



Università degli Studi  
di Milano

Scuola di Dottorato in  
“Innovazione Tecnologia per  
le Scienze Agro-Alimentari e  
Ambientali”

XXIII° CICLO

# Sostenibilità complessiva di filiere agro-energetiche



Jacopo Bacenetti

**Firma Tutor**

---

**Firma Coordinatore Scuola di Dottorato**

---



**Università degli Studi di Milano**

Scuola di Dottorato di Ricerca  
Innovazione Tecnologia per le Scienze Agro-Alimentari e Ambientali

XXIII° CICLO



**Titolo della tesi:**

**Sostenibilità complessiva di filiera agro energetiche**

**Dottorando: Dott. Jacopo Bacenetti**

Tutor: Prof. Marco Fiala



## Indice

<b><u>Abstract .....</u></b>	<b><u>9</u></b>
<b><u>1 Scopo e Obiettivi .....</u></b>	<b><u>13</u></b>
1.1 Premessa .....	13
1.2 Obiettivo .....	14
1.3 Attività .....	14
<b><u>2 Il settore energetico: situazione attuale e scenari futuri: il ruolo delle bio-energie .....</u></b>	<b><u>18</u></b>
2.1 Il Presente Energetico.....	18
2.2 La svolta .....	23
2.3 Il Futuro Energetico .....	25
2.3.1 - Scenari di Riferimento .....	26
2.3.2 - Scenari Alternativi .....	31
2.4 Le Tecnologie Energetiche.....	35
2.5 - Conclusioni .....	36
2.6 Bibliografia.....	37
<b><u>3 Valutazione di una filiera agro-energetica.....</u></b>	<b><u>44</u></b>
3.1 Schematizzazione di una filiera agro-energetica.....	45
3.1.1 Fase di campo .....	47
3.1.2 Fase di stoccaggio e trasporto .....	48
3.1.3 Fase di conversione .....	52
3.2 Sostenibilità .....	52
3.2.1 Aspetti economici.....	53

3.2.2	Aspetti energetici .....	54
3.2.3	Aspetti ambientali .....	55
3.3	Fattori di produzione .....	56
3.3.1	Analisi dei fattori produttivi .....	57
3.3.2	Valorizzazione dei diversi fattori di produzione .....	60
3.3.3	Equivalenti energetici (EE) e Fattori Emissivi (FE) .....	63
3.3.4	Fattore Emissivo Unitario Medio.....	78
3.4	Problematiche .....	79
3.4.1	Scelta e selezione dei parametri.....	79
3.4.2	Indici per la valutazione.....	80
3.5	Bibliografia.....	81
<b>4</b>	<b><u>Metodologie per l'analisi economica, energetica e ambientale.....</u></b>	<b>86</b>
4.1	Stato dell'arte .....	86
4.2	Linee guida generali.....	90
4.2	Metodologie per l'analisi economica .....	92
4.3	Metodologie per l'analisi energetica.....	94
4.3.1	Gross Energy Requirement.....	97
4.3.2	Emergy Analysis.....	100
4.4	Metodologie per analisi ambientale.....	104
4.4.1	Sistema di riferimento .....	106
4.4.2	Orizzonte temporale.....	107
4.4.3	Altre categorie di impatto ambientale .....	108
4.4.5	Life Cycle Assessment.....	109

4.5 Cogenerazioni e sottoprodotti .....	114
4.5.1 Allocazione.....	114
4.5.2 Sottoprodotti.....	116
4.6 Bibliografia.....	117
<b><u>5 SEA: Software per l'analisi Economica, Energetica ed Ambientale .....</u></b>	<b><u>122</u></b>
5.1 Scopo e Risultati .....	122
5.2 Scala.....	124
5.3 Descrizione .....	124
5.4 Metodologia .....	126
5.4.1 Analisi economica.....	128
5.4.2 Analisi energetica .....	130
5.4.3 Analisi ambientale .....	140
5.5 Allocazione.....	146
5.5.1 Allocazione Prodotti principali.....	146
5.5.2 Allocazione sottoprodotti.....	150
5.6 Bibliografia.....	150
<b><u>6 Applicazione del modello .....</u></b>	<b><u>153</u></b>
6.1 Premessa .....	153
6.2 Pioppo MRF in Italia.....	153
6.2.1 Fase di campo.....	154
6.2.2 Fase di trasporto.....	156
6.2.3 Fase di conversione .....	158
6.2.4 Risultati .....	160

---

6.2.5	Analisi risultati .....	169
6.3	Casi studio.....	173
6.2.1	SRF in Italia .....	174
6.2.2	SRF in Svezia .....	178
6.2.3	Residui forestali .....	182
6.2.4	Sottoprodotti Agricoli .....	187
6.2.5	Olio grezzo da colza .....	192
6.2.6	Biogas da insilato di mais.....	193
6.4	Discussione .....	196
6.5	Bibliografia.....	199
<b><u>7</u></b>	<b><u>Conclusioni .....</u></b>	<b><u>202</u></b>
	<b><u>ALLEGATI.....</u></b>	<b><u>205</u></b>



## Abstract

Negli ultimi anni la produzione di energia (termica ed elettrica) in ambito agricolo si è andata via via affermando e attualmente può rappresentare un'importante fonte di reddito per gli operatori agricoli.

Tuttavia, la valutazione di una filiera agro-energetica non può basarsi solo su criteri economici ma deve considerare anche gli aspetti energetici e quelli ambientali. Infatti, se da un lato la sostenibilità economica risulta cruciale per stimolare gli operatori agricoli alla conversione di parte della propria azienda alle bioenergie, dall'altro gli aspetti energetici e ambientali non possono essere trascurati anche in considerazione del fatto che la produzione di energia da fonti rinnovabili beneficia spesso di sostanziosi incentivi pubblici in tutti i Paesi occidentali.

Negli ultimi anni sempre crescente attenzione è stata rivolta a questi aspetti tuttavia, a tutt'oggi, le metodologie disponibili per la valutazione energetica e, soprattutto, per quella ambientale sono poche e non sempre di facile impiego. Raramente inoltre questi aspetti vengono analizzati insieme a quelli economici. In bibliografia, anche qualora la filiera analizzata sia la medesima, è possibile trovare risultati diversi, quando non discordi; tali discrepanze possono dipendere dall'impiego di metodologie diverse e/o dall'uso di parametri di calcolo differenti.

L'obiettivo del progetto di dottorato è stato sviluppare un modello di calcolo in grado di analizzare alcune tra le filiere agro-energetiche più diffuse nel sistema produttivo Europeo allo scopo di poterne eseguire un'analitica valutazione sotto i tre aspetti (economico, energetico e ambientale - EEA) che concorrono a determinarne la sostenibilità globale. La disponibilità di uno strumento in grado di confrontare analiticamente diverse filiere e/o diverse possibilità attuabili all'interno della stessa filiera produttiva può rivelarsi un utile strumento nella ricerca della soluzione ottimale.

Nel corso dei tre anni di attività, è stato sviluppato dunque un modello di calcolo accurato e flessibile in grado di eseguire la valutazione EEA delle diverse filiere studiate ma anche in grado di condurre confronti tra le diverse soluzioni possibili consentendo di individuare quella più razionale in grado di massimizzare la sostenibilità complessiva.

Definiti i confini del sistema, l'unità funzionale, la sequenza delle operazioni che lo caratterizzano, l'insieme dei fattori produttivi impiegati e i flussi di massa ed energia in ingresso e in uscita dal sistema il programma calcola i bilanci ricavi/costi EEA. Per i fattori produttivi impiegati, il costo energetico e quello ambientale (emissioni di CO<sub>2</sub>) vengono calcolati attraverso opportuni coefficienti di conversione (rispettivamente equivalenti energetici e fattori emissivi). Nel computo vengono considerati sia i fattopri prodotti a logorio totale che quelli a logorio parziale. Per questi ultimi il computo della quota di energia da associare all'unità di prodotto è fatta ripartendo nel corso degli anni di impiego la quantità complessiva di energia immagazzinata ("*embedded*") nel fattore produttivo.

Per la quantificazione dei ricavi economici vengono considerati gli incentivi percepiti e i ricavi della vendita dell'energia prodotta e di eventuali sottoprodotti, mentre per quelli energetici il modello considera tutte le forme di energia prodotte. Poichè alcune tra le più importanti linee guida per l'analisi ambientale impongono di considerare come immediatamente ossidato tutto il carbonio contenuto in una biomassa nel momento in cui questa viene raccolta, il ricavo ambientale è rappresentato dalle emissioni di GHG evitate, ovvero da quella quota di gas serra che verrebbe emessa in atmosfera producendo l'energia con tecnologie "tradizionali" basate su combustibili fossili.

Una volta sviluppato il modello è stato applicato per la valutazione della fase di campo e di trasporto di alcune tra le più importanti filiere agro-energetiche presenti in Europa. In tabella vengono riportati i casi studio analizzati organizzati per tipologia di biomassa.

Biomassa	Origine	Filiera	Caso Studio
Lignocellulosica	Colture legnose a rapido crescita	Termochimica per cogenerazione (EE + EE) o solo EE	Short Rotation Forestry basata su pioppo in rotazione biennale in Italia con ciclo colturale di 8 e 12 anni; Short Rotation Forestry basata su cloni di salice in rotazione triennale/quadriennale in Svezia con ciclo colturale di 20 anni; Medium Rotation Forestry basata su pioppo in rotazione quinquennale in Italia con ciclo colturale di 10 anni;
	Residui forestali		Produzione di cippato a scopo energetico da residui forestali in Svezia a seguito del taglio finale in fustaie di conifere;
	Sottoprodotti agricoli		Paglia di cereali
Oleaginosa	Coltura dedicata	Olio grezzo cogenerazione	Colza in Italia Settentrionale;
Fermentescibile	Coltura dedicata	Biogas cogenerazione	Digestione di insilato di mais in Italia Settentrionale

Per tutte i casi studio, sono stati calcolati il Costo, Ricavo e Profitto EEA per unità di energia prodotta nonché il Bilanci EEA e l'indice di sostenibilità complessiva (GSI).

In estrema sintesi è possibile affermare che tutti i casi analizzati presentano prestazioni energetico-ambientali interessanti ma performance economiche modeste tali, in alcuni casi, da ostacolare una più ampia e rapida diffusione di queste filiere. Inoltre, a tutt'oggi, è possibile osservare che la sostenibilità economica delle filiere agro-energetiche oggetto d'indagine dipende dalla presenza di forme di incentivazione pubblica. Per quanto riguarda la ripartizione tra le diverse voci del costo EEA la parte preponderante è dovuto

alla fase di campo della filiera. La meccanizzazione delle operazioni di campo (in particolare della raccolta) ha una forte incidenza nella determinazione del costo economico. Con riferimento sempre alla fase di campo, relativamente, agli aspetti energetici e ambientali, sebbene la meccanizzazione delle operazioni di campo rappresenti comunque una quota importante (in media il 20-30 % del totale), la fertilizzazione azotata (dove presente) si presenta come la voce di maggior incidenza arrivando a rappresentare anche il 40-45% del costo energetico e delle emissioni di GHG.

L'incidenza del trasporto dipende fortemente dalle distanze di conferimento ed è pertanto minore nelle filiere realizzate su scala locale. Dalle analisi condotte, l'aumento dell'efficienza di trasformazione ottenibile in centrali di maggiore potenza non sembra essere in grado di compensare il maggior di trasporto associato alle maggiori distanze di trasporto necessarie per il reperimento della biomassa necessaria.

Concludendo, il modello di calcolo sviluppato si presenta già attualmente come un valido strumento per la valutazione e il confronto di alcune tra le più interessanti filiere agro-energetiche attuabili in Europa e nei climi temperati, il suo impiego può consentire un'agile individuazione della soluzione che si presenta come più razionale ed efficiente sotto i tre aspetti considerati (economico, energetico e ambientale).

# 1 Scopo e Obiettivi

## 1.1 Premessa

Sebbene le prime filiere agro-energetiche siano state introdotte già da decenni è solo negli ultimi anni che la produzione di energia (termica ed elettrica) in ambito agricolo si è andata via via affermando e attualmente può rappresentare un'importante fonte di reddito per gli operatori agricoli.

Ciononostante, relativamente a questa opportunità, talvolta, le informazioni disponibili non sempre sono univoche sia riguardo gli aspetti tecnico-economici sia quelli energetico-ambientali.

Eccezion fatta che per le filiere in cui il prodotto della fase di campo è una derrata agricola comunemente prodotta e la cui coltura è quindi tradizionalmente coltivata (Es. girasole, colza e soia per la filiere olio grezzo/biodiesel; mais da trinciato per la produzione di biogas, ecc.) per le altre filiere anche la fase di coltivazione può comportare stravolgimenti e profonde modificazioni dell'ordinamento produttivo e dell'organizzazione aziendale. Ad esempio, nel caso della filiera legno-energia basata sull'introduzione delle *Short Rotation Forestry* (SRF) sono necessarie macchine operatrici tradizionalmente assenti dal parco macchine di aziende cerealicole ed è prevista la conversione di SAU da colture erbacee annuali a colture arboree perenni.

Sulla base di quanto appena detto è importante sottolineare che, nonostante il grande lavoro svolto negli ultimi anni da enti di ricerca privati e pubblici, per alcune filiere agro-energetiche l'agrotecnica e alcuni passaggi cruciali del processo produttivo presentano tutt'ora margini di miglioramento. Tra

questi i più importanti e “promettenti” sono la meccanizzazione delle operazioni di messa a dimora e di raccolta di alcune colture energetiche (es. SRF, Miscanto, ecc.), lo stoccaggio del materiale (soprattutto se presenta elevate umidità) e la logistica del trasporto al luogo di utilizzazione.

Per quanto riguarda invece la fase finale del processo, quella della conversione in energia del prodotto agricolo, l’ottimizzazione della filiera è focalizzata sulla scelta della migliore tecnologia di trasformazione.

## 1.2 Obiettivo

Così come suggerito dal titolo del progetto di dottorato l’obiettivo generale del lavoro è appunto l’**“Ottimizzazione di filiere per la produzione di energia da biomasse agricole”**.

A tal fine, nel corso dei tre anni, il risultato principale è stato lo sviluppo di un **modello di calcolo** accurato e flessibile in grado di valutare la sostenibilità economica, energetica ed ambientale (EEA) delle filiere agro-energetiche più diffuse nel sistema produttivo Europeo

La disponibilità di tale strumento, in grado di comparare analiticamente diverse filiere e/o diverse soluzioni tecniche attuabili all’interno della stessa filiera produttiva, può rivelarsi un utile strumento nella ricerca della soluzione ottimale.

## 1.3 Attività

In **Figura 1.1** sono riportate schematicamente le principali attività svolte, la relazione tra loro e il riferimento al Capitolo in cui vengono trattate.

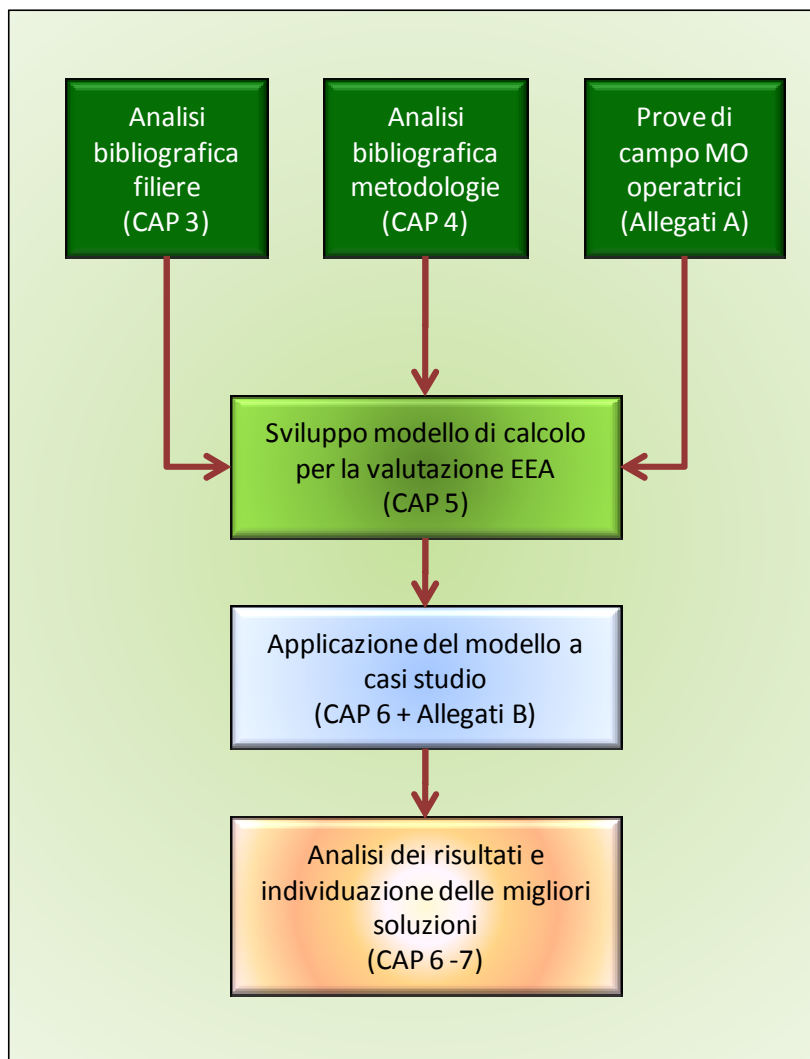
Più nel dettaglio per lo sviluppo del modello sono state predisposte le seguenti attività:

- **analisi bibliografica filiere:** volta ad individuare la sequenza logico operativa, i flussi di massa ed energia e le principali problematiche delle filiere agro-energetiche studiate;
- **analisi bibliografica metodologie:** riguardo le principali metodologie di analisi per la valutazione degli aspetti economici e, soprattutto, di quelli energetico-ambientali delle filiere analizzate;
- **prove di campo** relativamente alla valutazione delle caratteristiche tecnico-economiche ed energetico-ambientali di macchine operatrici specifiche per la messa a dimora e la raccolta di piantagioni da biomassa.

Per quanto riguarda le **prove di campo** sono state valutate alcune macchine operatrici utilizzate nella meccanizzazione delle operazioni caratteristiche della filiera legno-energia basata sull'impiego di SRF. Per le filiere "mature", relativamente alla meccanizzazione della fase di campo, non sono state condotte prove specifiche perché si è potuto beneficiare di numerose informazioni reperibili in bibliografia. Sono state condotte dunque prove relativamente alla messa a dimora di astoni di pioppo per colture legnose a rapido accrescimento a ciclo quinquennali (*Medium Rotation Forestry* - MRF) e alla raccolta, con apposita piattaforma di taglio accoppiata a falciatrinciacaricatrice (a cantieri riuniti) di SRF a ciclo biennale. Nel corso delle prove, oltre alle caratteristiche tecnico-economiche ed energetico-ambientali delle operatrici testate, sono stati rilevati anche altri parametri necessari per il funzionamento del modello: rese produttive delle piantagioni, caratteristiche del prodotto, ecc..

La descrizione e i risultati delle prove effettuate sono riportate negli **Allegati A1, A2, A3**.

Terminata la fase iniziale di sviluppo il modello è stato applicato ad alcune tra le più importanti filiere agro-energetiche presenti in Europa. In **Tabella 1.1** vengono riportati i casi studio analizzati organizzati per tipologia di biomassa, i risultati sono invece presentati nel Capitolo 6 e negli **Allegati B**.



**Figura 1.1** – Schematizzazione delle attività svolte



Filiera	Biomassa	Caso studio
Termochimica	Ligno-cellulosica Colture dedicate	Pioppo SRF biennale in Italia, ciclo colturale di 10 anni sia per la produzione combinata di energia elettrica e termica sia per la produzione di sola energia elettrica
		Salice SRF triennale in Svezia, ciclo colturale di 20 anni sia per la produzione combinata di energia elettrica e termica sia per la produzione di sola energia elettrica
		Pioppo MRF quinquennale in Italia, ciclo colturale di 10 anni sia per la produzione combinata di energia elettrica e termica sia per la produzione di sola energia elettrica
	Ligno-cellulosica Residui forestali	Produzione di cippato a scopo energetico da residui forestali in Svezia a seguito del taglio finale in fustaie di conifere sia per la produzione combinata di energia elettrica e termica sia per la produzione di sola energia elettrica
	Ligno-cellulosica Sottoprodotti agricoli	Utilizzazione della paglia di cereali sia per la produzione combinata di energia elettrica e termica sia per la produzione di sola energia elettrica
Olio grezzo	Oleaginosa	Colza in Italia Settentrionale per Olio grezzo da utilizzare in motori CHP per la cogenerazione di elettricità ed energia termica
Biochimica	Insilato di mais	Digestione anaerobica per la produzione di biogas da utilizzare in motori CHP per la cogenerazione di elettricità e calore

**Tabella 1.1** – Schema riassuntivo dei casi studio per cui è stato applicato il modello

## 2 Il settore energetico: situazione attuale e scenari futuri: il ruolo delle bio-energie

### 2.1 Il Presente Energetico

Il mix delle varie fonti di energia primaria impiegate nel pianeta (che, nel 2006, risulta pari a 11.700 Mt<sub>ep</sub>; **Figura 2.1**) conferma, da un lato, l'assoluta predominanza dei **combustibili fossili** (81%) e, dall'altro, la straordinaria "voracità" della trentina di **Paesi appartenenti all'OECD** che, da soli, utilizzano poco meno della metà (48%) dell'energia primaria totale.

Spiccano poi le posizioni di **Cina** e **Asia**<sup>1</sup> che, da sole, consumano ¼ dell'energia primaria mondiale mentre, all'opposto, **America Latina** e **Africa** non raggiungono il 10%. E', dunque, un dato oggettivo che, relativamente ai consumi energetici, il pianeta procede a "tre velocità" fra loro diverse per molti ordini di grandezza. (**Tabella 2.1**).

Le profonde differenze socio-economiche esistenti sul pianeta trovano cruda e puntuale conferma rapportando per ciascun Paese l'energia annualmente consumata (Mt<sub>ep</sub>; TWh) con alcuni semplici parametri (popolazione, PIL, ecc.) e confrontando fra loro i risultati ottenuti (**Tabella 2.2**).

Sul fronte dei "benefici socio-economici" connessi alla disponibilità di energia primaria vi sono regioni del mondo i cui abitanti mediamente dispongono 7 volte l'energia (t<sub>ep</sub>/anno·capite) che hanno altri; nel caso dell'energia elettrica (kWh/anno·capite) la differenza addirittura raddoppia, raggiungendo le 15 volte.

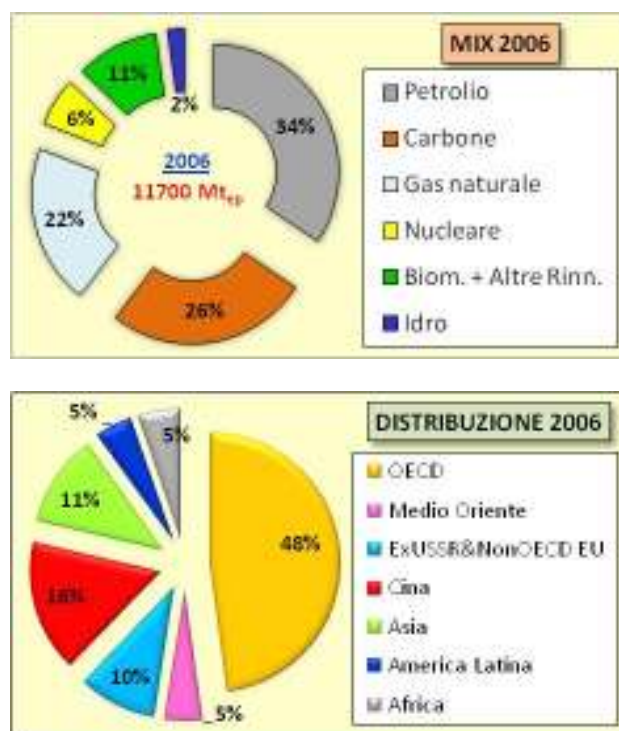
Il ruolo fondamentale giocato dal petrolio ma anche, più recentemente, dal gas naturale evidenziano, inoltre, la macroscopica "dipendenza" fra regioni del mondo, causa di continue, e a volte tragiche, tensioni politico-

---

<sup>1</sup> Identificata come tale con esclusione della Cina, considerata a parte nelle statistiche.

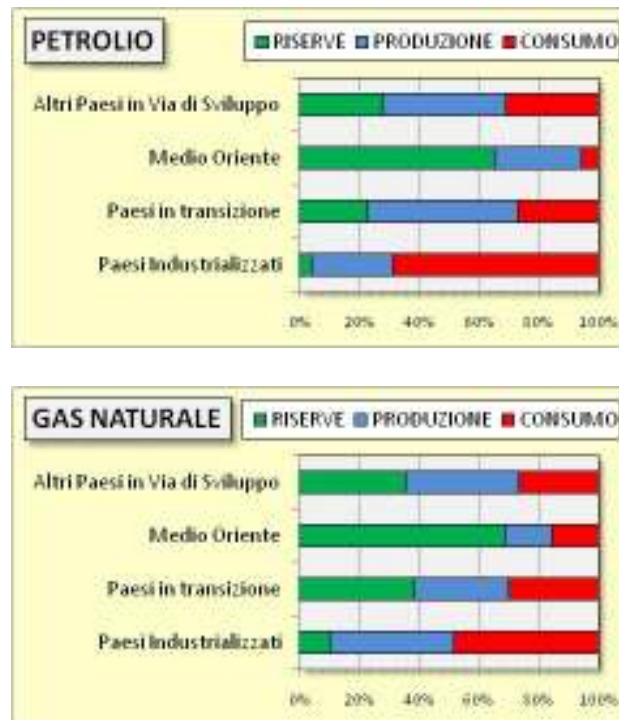
economiche; infatti e in generale, in termini energetici “i Paesi che più consumano, meno producono e, soprattutto, di minori riserve dispongono per il futuro” (Figura 2.2).

Ma anche sotto il profilo delle “responsabilità climatiche” correlabili all’impiego di energia il mondo dimostra tutta la sua diversità: il carico di emissioni di CO<sub>2</sub> addebitabili a un abitante (t<sub>CO2</sub>/anno·capite) dell’Africa è al momento mediamente 12 volte minore rispetto a quello di un Paese Industrializzato.



**Figura 2.1** – Anno 2006: impiego di energia primaria ripartito per fonte (sopra) e per regione del mondo (sotto)

Naturalmente, la “forbice” si apre in modo ancor più marcato se i confronti si fanno fra singoli Paesi. Tali aspetti sono solo una componente, sebbene abbastanza indicativa, delle difficoltà che la politica incontrerà nel trovare accordi internazionali che si basino su richieste e aspettative di sviluppo in grado di soddisfare tutti.



**Figura 2.2 – Petrolio:** 5 Paesi possiedono il 63% delle riserve, 10 Paesi l’84%; 5 Paesi producono il 42% del totale, 10 Paesi il 62%; 5 Paesi consumano il 47% del totale, 10 Paesi il 60%. **Gas Naturale:** 5 Paesi possiedono il 61% delle riserve, 10 Paesi il 75%; 5 Paesi producono il 59% del totale, 10 Paesi il 72%; 5 Paesi consumano il 51% del totale, 10 Paesi il 65% [Fonte: IEA, 2008]

Analizzando con maggior risoluzione l'attuale situazione energetica mondiale, per quanto riguarda l'Europa va innanzitutto evidenziato come l'obiettivo fissato nel "Libro Bianco"<sup>2</sup> - che prevedeva di **coprire nel 2010 almeno il 12% dei fabbisogni di energia primaria mediante Fonti Energetiche Rinnovabili (FER) - non sarà raggiunto.**

Difatti, nella UE25 al 2006, il contributo delle FER alla "bolletta energetica" risulta, mediamente, del **6,6%**, con punte del 30% in Svezia e minimi del 1,8% a Cipro (**Figura 2.3, sopra**). Relativamente alle differenti tecnologie impiegate (**Figura 2.3, sotto**), la quota maggiore è fornita dalle biomasse (solide e bio-carburanti) con il 66%. Seguono l'energia idraulica (23%), la geotermica e l'eolica (6% ciascuna) e il solare (termico e FV) con meno dell'1%.

L'Italia, nel 2006, il contributo complessivo delle FER raggiunge il **6,82%** e, come tale, si allinea alla media comunitaria, presentando i contributi riportati in **Tabella 2.3**.

Un secondo obiettivo previsto dal Libro Bianco riguarda il **progressivo ricorso alle FER per la produzione di EE che, nell'Europa del 2010, avrebbe dovuto raggiungere il 21% dei consumi totali di elettricità**. Purtroppo anche questo obiettivo non verrà centrato in quanto, nel 2006, l'elettricità generata da FER (principalmente ricorrendo a: eolico, biomasse e biogas) segna a malapena il **14,6%** del totale.

I risultati dell'Italia anche in questo caso non risultano particolarmente brillanti, raggiungendo soltanto quota 14,8%.

Non va, da ultimo, dimenticato che la UE nel 2007 si è formalmente (ma unilateralmente) impegnata – e ha emesso un pacchetto di misure attuative - a raggiungere entro il 2020, i seguenti ambiziosi obiettivi: (a) consumo finale di energia primaria sostenuto per 20% da FER; (b) riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> in atmosfera del 20%; (c) miglioramento dell'efficienza degli impianti energetici del 20%; (d) utilizzazione del 10% di bio-combustibili nei carburanti utilizzati nel settore dei trasporti.

---

<sup>2</sup> "Una politica energetica per l'Unione Europea", Gennaio 1996.



**Figura 2.3** – Sopra: contributo delle Fonti Energetiche Rinnovabili alla copertura dei fabbisogni di energia primaria nei Paesi della UE25 nel 2006. A destra: contributo delle differenti fonti [Fonte: EurObserv'ER 2007]

## 2.2 La svolta

Secondo il parere unanime dei più autorevoli esperti, il sistema energetico mondiale si trova oggi di fronte a una decisione da prendere assai urgente, la cui importanza non ha precedenti nella storia dell'uomo sul pianeta per le conseguenze sulla stessa possibilità di sopravvivenza.

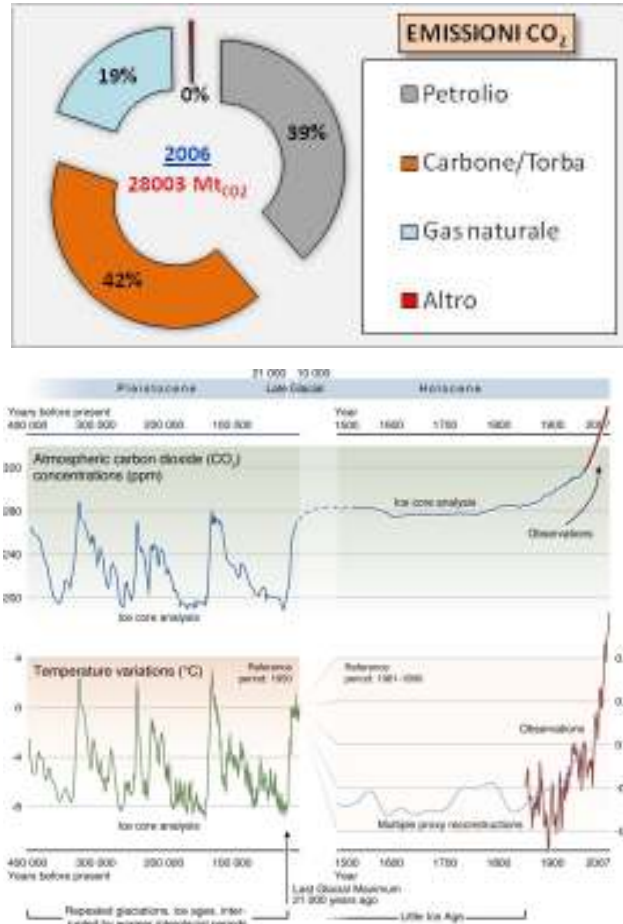
Tale decisione, che presuppone di raccogliere sfide diffusamente ritenute di *"dimensioni impressionanti"* è sinteticamente causata dalla palese **insostenibilità degli attuali consumi di energia con l'ambiente**, che - come noto - si esplicita in molteplici forme e manifestazioni ed è sostanzialmente riconducibile all'aumento esponenziale nell'atmosfera della concentrazione di gas a effetto serra, registratosi a partire dal 1800 ovvero l'era dei combustibili fossili (**Figura 1.4**).

La *"rivoluzione energetica"* dalla quale – ormai è affermazione certa - non può prescindere il futuro benessere del pianeta si traduce nell'attuare due azioni – o meglio **sfide** - tanto semplici da enunciare quanto imponenti da realizzare:

1. assicurare a tutti i Paesi una offerta di energia affidabile a prezzi accettabili che permetta di pianificare lo sviluppo e il progresso di ciascuno di essi;
2. decarbonizzare con grande rapidità le fonti energetiche mondiali, al fine di evitare conseguenze irreparabili sul clima.

La prima sfida fa, fondamentalmente, capo alla "politica" che è chiamata a:

- individuare strategie condivise da tutti i Governi che si traducano in azioni decise, a livello nazionale e locale, rivolte a tutti i settori produttivi e da attuare senza possibilità di deroga o ritardo di sorta.



**Figura 2.4** – Sopra: emissioni equivalenti di CO<sub>2</sub> da soli combustibili nel 2006; esse rappresentano poco più del 60% delle emissioni equivalenti totali che raggiungono 46 Gt<sub>CO2</sub>. Sotto: andamento storico della concentrazione di CO<sub>2</sub> nell’atmosfera

Per quanto invece concerne il secondo obiettivo, dal punto di vista **tecnologico** la riduzione delle emissioni di gas serra presuppone:

- il progressivo miglioramento dell’efficienza degli impianti di trasformazione;



- l'impiego sempre più massiccio sia di fonti rinnovabili, sia di tecnologie a basso impatto (*Low-Carbon Technologies, LCT*);
- il ricorso a tecniche di cattura e stoccaggio del carbonio (*Carbon Capture and Storage, CCS*);

Quale, fra queste due sfide, sia la più ardua da raccogliere e da condurre è difficile da stabilire.

Infatti, da un lato, l'attuale dibattito politico fornisce continue prove dell'evidente incapacità al confronto e alla soluzione condivisa di problemi pratici di carattere energetico-climatico, dall'altro, soprattutto fra l'opinione pubblica dei Paesi Industrializzati si assiste a una **crescente consapevolezza** delle dimensioni della questione ambientale e della ristrettezza del tempo rimasto per agire.

Un nuovo accordo internazionale sul clima è un passo imprescindibile verso la sostenibilità del sistema energetico, ma l'efficacia della sua realizzazione è altrettanto cruciale; qualsiasi **ritardo significherebbe un aumento dei costi finali** per il raggiungimento degli obiettivi climatici.

Quest'ultimo aspetto, insieme alla sempre più diffusa coscienza ambientale, potrebbero essere fattori decisivi (e particolarmente convincenti) per l'intera classe politica internazionale.

### 2.3 Il Futuro Energetico

La consapevolezza di essere giunti a un bivio ineludibile ma anche, o forse più realisticamente, la percezione delle **enormi difficoltà che si frappongono alla messa in moto delle sfide sul tappeto precedentemente ricordate**, fa sì che la quasi totalità degli scenari energetici futuri che vengono proposti da più parti prospettino **due** situazioni assai diversificate.

La prima – definibile, di continuità e, quindi, di sostanziale immobilismo rispetto alle grandi tematiche climatiche - non prevede siano messi in essere

sostanziali cambiamenti delle politiche energetiche planetarie (*business as usual*).

Questa possibile evoluzione, sebbene catastrofica per le conseguenze nel breve-medio termine sulla vita della Terra - si prospetta come lo **scenario al quale fare riferimento** per quantificare l'efficacia del pacchetto di interventi coordinati e internazionalmente condivisi che dovrebbe – questo è l'auspicio di tutti - mettersi in moto senza più indugio e condurre progressivamente il pianeta verso la piena sostenibilità, per garantendo appropriati livelli di sviluppo e crescita economica a tutti i Paesi. Alcuni “**scenari di riferimento**” limitano l'analisi ai prossimi 20-25 anni, altri fanno proiezioni a più lungo termine, arrivando al 2050 o, addirittura, a fine secolo.

I risultati prospettati dagli scenari di riferimento permettono di definire percorsi evolutivi diversi, più faticosi ma virtuosi e meno impattanti, che configurano il raggiungimento della sostenibilità energetico-ambientale (“**scenari alternativi**”).

Essi sono, quindi, caratterizzati da uno spiccato dinamismo, dal possesso di una strategia predefinita, dalla capacità politica di operare scelte, alimentati da una condizione di *agreement* internazionale. Pertanto, tutti questi gli scenari migliorativi - anch'essi proposti con diverse gittate temporali - innescano, sebbene con tempi, intensità e priorità differenziate a seconda dei vari punti di vista, azioni che nel loro complesso danno sostanza alla “rivoluzione energetica” precedentemente menzionata.

### 2.3.1 - Scenari di Riferimento

Lo Scenario di Riferimento al 2030 prospettato dallo IEA <sup>3</sup> si qualifica per l'impressionante incremento della domanda di energia primaria che, passando da **11.700 Mt<sub>ep</sub>** nel 2006 a **17.700 Mt<sub>ep</sub>** nel 2030, segna un **aumento del 51%** ([Tabella 2.4](#)).

---

<sup>3</sup> International Energy Agency

Analizzando più in dettaglio l'autorevole previsione, è interessante rilevare che (**Figura 2.5**):

- il mix energetico nel 2030 si presenta sostanzialmente analogo a quello del 2006, ricorrendo ancora per oltre l'80% ai combustibili fossili;
- il consumo di **petrolio** cresce (+38%) e resta ancora la principale fonte di approvvigionamento. I consumi di **carbone** e **gas naturale** aumentano in misura sensibilmente maggiore (+64%), coprendo il 60% dell'aumento complessivo della domanda energetica mondiale. Tali risorse, rispettivamente, rappresentano la 2<sup>a</sup> (28%) e la 3<sup>a</sup> (22%) fonte energetica del pianeta. La maggior parte dell'aumento del consumo di gas naturale è richiesto dal settore elettrico, mentre addirittura l'85% della aumento di consumo di carbone è destinato alla produzione di energia elettrica di Cina e India;
- le **biomasse** e le **altre rinnovabili** (solare, eolica, geotermica, talassica), nel loro complesso, pur segnando un sensibile aumento (+52%) e confermandosi la 4<sup>a</sup> risorsa energetica del pianeta, giocano un ruolo non predominante nel sostenere l'aumento complessivo della domanda. Da segnalare, tuttavia, che ad esclusione delle biomasse, le **rinnovabili moderne crescono complessivamente più velocemente di ogni altra fonte**, concentrandosi l'aumento soprattutto nel settore della generazione di Energia Elettrica (dall'1% del totale prodotto nel 2006 al 4% nel 2030). Sempre nel contesto di questo Scenario di Riferimento, non meno importante è osservare le significative variazioni dalla distribuzione della domanda di energia primaria nelle varie macro-aree e/o regioni della Terra che si registrano nell'arco temporale 2006-2030 (**Figura 2.6**).

Più in particolare:

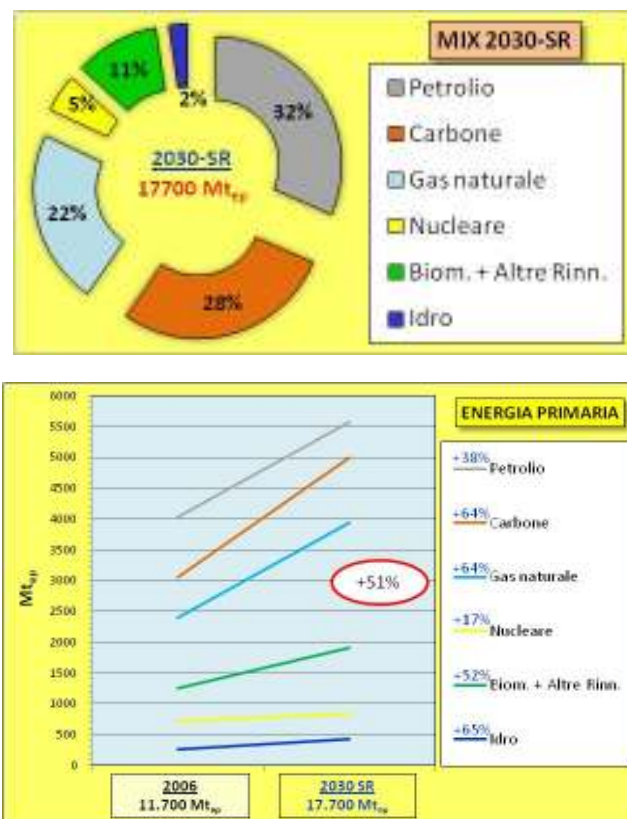
- i **Paesi OECD** – pur restando i più energivori in assoluto – si caratterizzano per un aumento “contenuto” dei propri consumi (+23%), riducendo di quasi 9 punti percentuali la loro incidenza sul bilancio energetico mondiale. Incidenza che, di fatto, si trasferisce a **Cina** e **Asia**

che – lanciate in un trend di sviluppo senza paragoni e conseguentemente andando a colmare l'attuale loro gap energetico - evidenziano aumenti di energia primaria scioccanti (rispettivamente, +101% e +96%) e motivano più della metà (3.200 Mt<sub>ep</sub>) dell'aumento mondiale di energia nel periodo considerato. Analogamente, il **Medio Oriente**, confermando le proprie formidabili prospettive di sviluppo, compie un balzo in avanti nei consumi (+95%); al contrario, pur essendo le regioni socialmente ed economicamente più arretrate del pianeta, **America Latina** e **Africa** presentano incrementi di energia primaria molto meno eclatanti (rispettivamente, +64% e +54%), segnale abbastanza inequivocabile di un divario che al 2030 appare non solo confermato ma, forse anche, peggiorato;

- la corsa all'urbanizzazione risulta inarrestabile e le **metropoli** e le **città** consolidano il loro primato nel consumare l'energia che muove il mondo: se nel 2006 i centri urbani ne assorbono circa il 67% (8.000 Mt<sub>ep</sub>, in cifra tonda), nel 2030 si sale al 75% (13.200 Mt<sub>ep</sub>).

Le diverse regioni del mondo, affrontano e poggiano il loro sviluppo 2006-2030, su fonti energetiche diverse (**Figura 2.7**); Cina e India identificano nel carbone e nel petrolio le fonti cruciali, Medio Oriente su petrolio e gas naturale. Indicativa la posizione dei Paesi OECD che, accanto al gas naturale, prevedono un forte sviluppo di biomasse e altre rinnovabili.

Qualora, malauguratamente, prendesse corpo e si compisse lo Scenario di Riferimento, gli effetti sul clima mondiale sarebbero catastrofici e irreversibili: le emissioni di CO<sub>2</sub> e degli altri gas a effetto serra passerebbero nel periodo 2006-2030 da **44 a 60 Gt<sub>CO2</sub>/anno**, pari a un aumento del 35% (addirittura, le emissioni dovute al solo uso di energia registrerebbero un incremento del 45%, passando da **27 a 41 Gt<sub>CO2</sub>/anno**). Ciò anche a causa ridotta applicazione delle tecnologie CCS alle centrali elettriche.

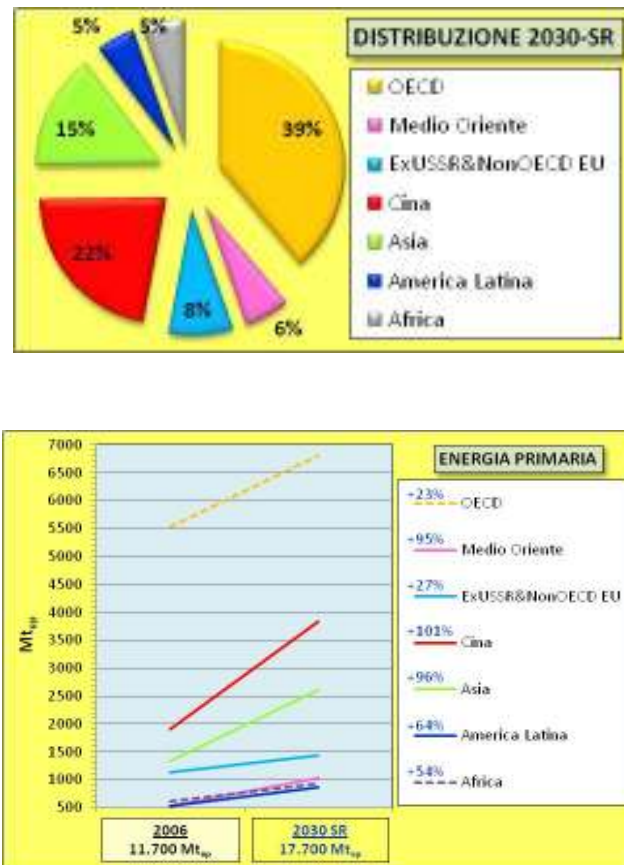


**Figura 2.5** – Scenario Riferimento 2030: impiego di energia primaria ripartito per fonte (sopra) e relative variazioni (sotto)

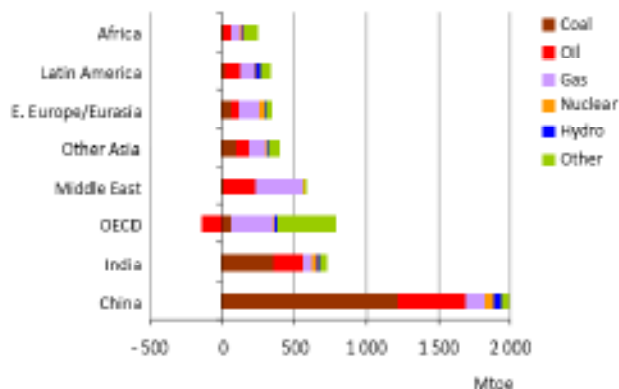
Tale trend di crescita comporterebbe, entro la fine del secolo, il **raddoppio della concentrazione di gas serra nell'atmosfera** (circa 1.000 ppm di CO<sub>2</sub> equivalente) con conseguente incremento della temperatura media del pianeta valutato dallo IEA in **6 °C**.

Sebbene il 97% dell'aumento di CO<sub>2</sub> da sola energia proviene dai Paesi non-OECD e il 75% (poco meno di 10 Gt<sub>CO2</sub>) da Cina, India e Medio Oriente, le emissioni pro-capite dei Paesi OECD restano estremamente più elevate rispetto a quelle degli altri Paesi e, nel 2030, solo in Europa e Giappone

risultano inferiori ai livelli 2006. Per quanto detto in precedenza sul fenomeno dell'urbanizzazione, la maggior parte dell'incremento delle emissioni di CO<sub>2</sub> da energia avverrà nelle città e nelle aree metropolitane.



**Figura 2.6** – Scenario Riferimento 2030: distribuzione della domanda di energia primaria per regione del mondo (sopra) e relative variazioni (sotto)



**Figura 2.7** – Scenario Riferimento 2030: variazione della domanda di energia primaria nelle regioni del mondo suddivisa per fonte [Fonte: IEA]

### 2.3.2 - Scenari Alternativi

Gli scenari per uno sviluppo alternativo del pianeta e del suo stato di salute sono ormai numerosi e vengono proposti a ritmo serrato da vari Enti di Ricerca, Agenzie Governative, nonché da privati.

Si tratta di modelli di calcolo estremamente complessi e articolati chiamati a considerare innumerevoli aspetti, variabili e/o parametri di analisi con previsioni modulate su target ambientali predefiniti e spesso riconducibili alla **stabilizzazione nel medio termine della concentrazione media nell'atmosfera dei gas a effetto serra** (in termini di CO<sub>2</sub> equivalenti) su **valori predefiniti** (scenario a 450 ppm; scenario a 550 ppm, ecc.).

Lo IEA prospetta per il 2030 uno Scenario Alternativo a quello di Riferimento (brevemente descritto in precedenza), associato alla **stabilizzazione delle emissioni a 550 ppm**, corrispondenti a un aumento medio della temperatura mondiale di **3 °C**.

Secondo tale Scenario Alternativo 550 ppm, tale concentrazione limite verrebbe raggiunta intorno al 2020 e nel successivo decennio si stabilizzerebbe; il risultato più eclatante sarebbe che **in tutti i Paesi**

**attualmente maggiormente inquinanti** <sup>4</sup> **il livello di emissioni complessive** (energia + altre cause) **risulterebbe significativamente più basso**. Considerando l'andamento delle sole emissioni dovute ai consumi energetici, se tutti i Paesi sapessero varare nuove ed efficaci politiche, le emissioni mondiali aumenterebbero "solo" fino a **34 Gt<sub>CO2</sub>/anno** (1/5 in meno rispetto alle 42 Gt<sub>CO2</sub>/anno proprie dello Scenario di Riferimento, ma comunque superiori del 22% rispetto alle 27 Gt<sub>CO2</sub>/anno del 2006).

Sul piano energetico, lo Scenario Alternativo 550 ppm si caratterizzerebbe per una domanda complessiva di energia primaria di **15.780 Mt<sub>ep</sub>** (**Tabella 2.5**), presentando un aumento molto più contenuto rispetto a quello dello Scenario di Riferimento (+34% contro +51%).

Il mix energetico si presenterebbe sensibilmente modificato, con i **combustibili fossili che perderebbero di importanza a favore delle rinnovabili e del nucleare** (**Figura 2.8, sopra**).

Petrolio, carbone e gas naturale mostrerebbero ancora cospicui incrementi nel consumo (rispettivamente, +22%, +21% e +43%), ma essi risulterebbero decisamente meno marcati se paragonati allo Scenario di Riferimento (**Figura 2.9, sotto**).

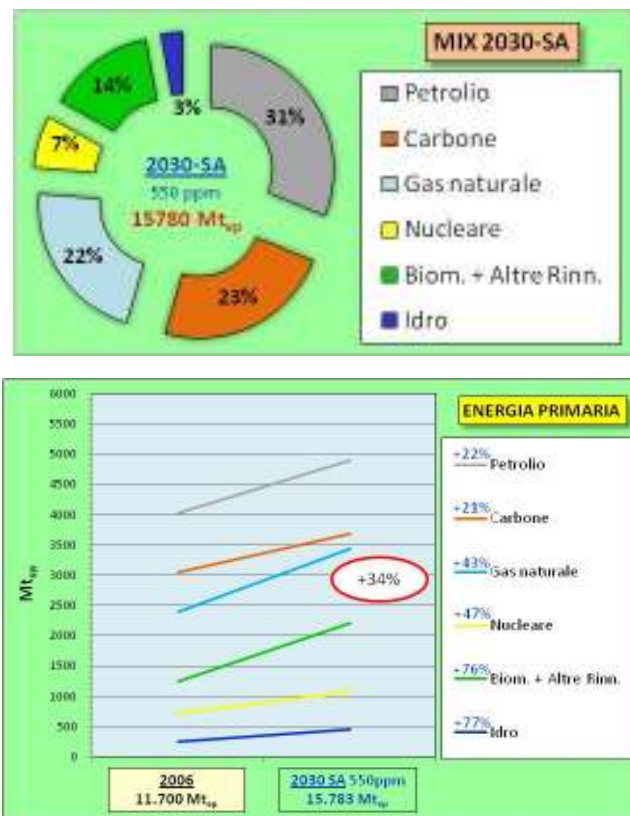
Il minor ricorso alle fonti fossili, soprattutto al carbone, si ripercuoterebbe positivamente sul sopraccennato contenimento delle emissioni totali, favorito anche dalla buona diffusione di tecnologie CCS (centrali elettriche per 160 GW).

Viceversa, le **biomasse e le rinnovabili** – a seguito della maturazione delle tecnologie ma, soprattutto, per la presenza di specifiche azioni governative di sostegno e il contestuale aumento del greggio (che raggiungerebbe 100 US\$<sub>2007</sub> a barile, -20% rispetto alla Scenario di Riferimento) – avrebbero l'opportunità di rimuovere la propria dipendenza da sussidi e incentivi e di permettere l'espansione delle tecnologie su larga scala.

---

<sup>4</sup> Attualmente, Cina, USA, UE, India e Russia producono 2/3 delle emissioni complessive



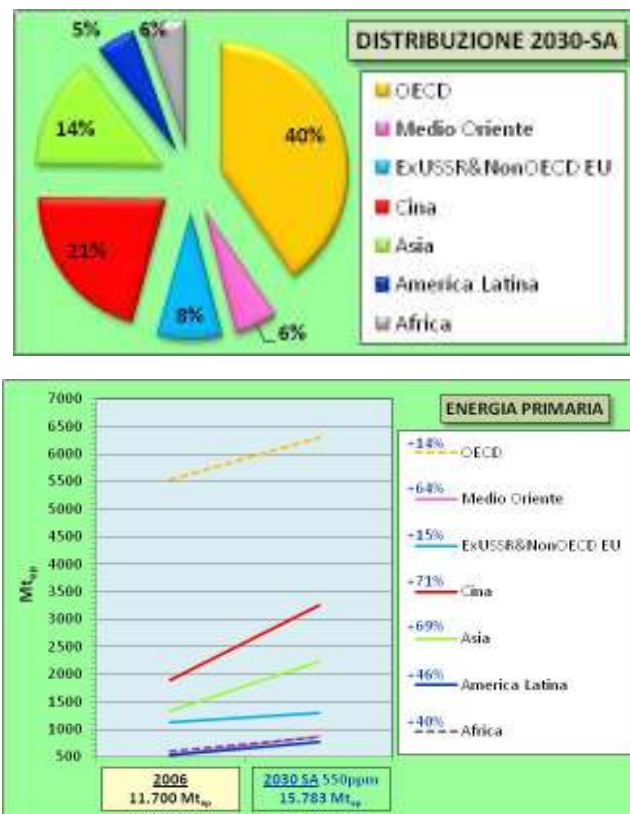


**Figura 2.8** – Scenario Alternativo 2030 con emissioni CO<sub>2</sub> a 550 ppm: impiego di energia primaria ripartito per fonte (sopra) e relative variazioni (sotto)

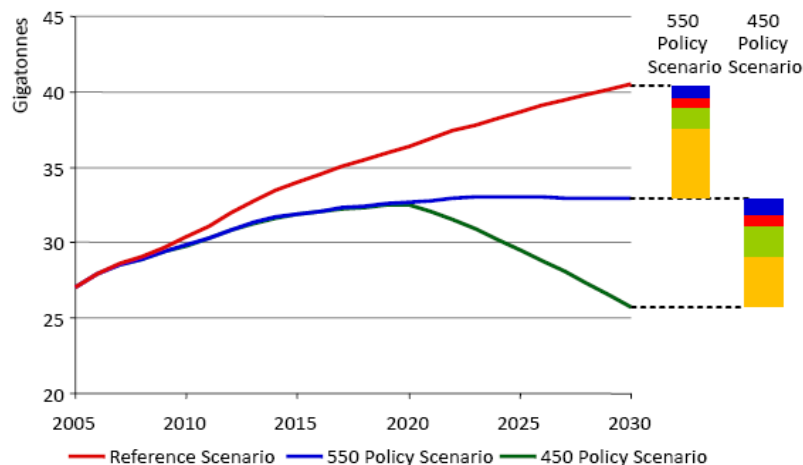
Questi sono i motivi per il loro deciso incremento (+75%) che, da solo, varrebbe ¼ dell'aumento complessivo della domanda di energia primaria.

Poiché, come brevemente accennato, anche nello Scenario Alternativo 550 ppm le emissioni di CO<sub>2</sub> risulterebbero comunque superiori a quelle attuali, lo IEA individua anche un percorso capace di stabilizzare nel 2030 delle emissioni di CO<sub>2</sub> equivalente a 450 ppm (**Scenario Alternativo 450 ppm**) che – a fronte di trasformazioni tecnologiche di portata e velocità di diffusione senza precedenti - porterebbe le emissioni nel 2030 a **23 Gt<sub>CO2</sub>/anno**, associate a un aumento della temperatura media mondiale limitato a **2 °C**.

Per raggiungere questo ambizioso obiettivo occorrerebbe tuttavia fare pieno ricorso alle tecnologie CCS, al nucleare di 4<sup>a</sup> generazione e alle biomasse/fonti rinnovabili; tuttavia, sarebbe l'aumento dell'efficienza energetica che giocherebbe di gran lunga il ruolo più importante (**Figura 2.10**).



**Figura 2.9** – Scenario Alternativo 2030 con emissioni CO<sub>2</sub> a 550 ppm: distribuzione della domanda di energia primaria per regione del mondo (sopra) e relative variazioni (sotto)



**Figura 2.10** – Andamento delle emissioni di CO<sub>2</sub> derivanti da consumo energetico nei vari scenari e ruolo giocato dalle diverse tecnologie. Rispetto allo Scenario di Riferimento (41 5,0 Gt<sub>CO2</sub> nel 2030), il contenimento delle emissioni a 34 Gt<sub>CO2</sub> (Scenario Alternativo 550 ppm) è imputabile a: aumento dell'efficienza energetica per 5,0 Gt<sub>CO2</sub>/anno; fonti rinnovabili e biocarburanti per 1,7 Gt<sub>CO2</sub>/anno; nucleare per 0,6 Gt<sub>CO2</sub>/anno; tecnologie CCS per 0,6 Gt<sub>CO2</sub>/anno. L'ulteriore contenimento delle emissioni a 23 Gt<sub>CO2</sub> (Scenario Alternativo 450 ppm) è ascrivibile ai seguenti contributi aggiuntivi: aumento dell'efficienza energetica per 3,8 Gt<sub>CO2</sub>/anno; fonti rinnovabili e biocarburanti per 2,4 Gt<sub>CO2</sub>/anno; nucleare per 0,7 Gt<sub>CO2</sub>/anno; tecnologie CCS per 1,0 Gt<sub>CO2</sub>/anno. [Fonte: IEA]

Le biomasse e le FER, in questo contesto, conoscerebbero uno sviluppo intenso nel settore elettrico arrivando a contare nel 2030 fino al **40% della generazione elettrica mondiale**.

## 2.4 Le Tecnologie Energetiche

Molte sono le tecnologie già **disponibili** e **mature**, sia sul fronte della rinnovabili vere e proprie (solare, eolico, geotermico), sia sul fronte

dell'impiego delle biomasse per la generazione diretta o indiretta di bio-energia a livello centralizzato o distribuito nel territorio; le caratteristiche salienti delle tecnologie che attualmente rivestono la maggior importanza anche sotto il profilo commerciale sono riassunte in **Tabella 2.6**.

Inoltre, è indispensabile sottolineare come in tutto il mondo siano in atto innumerevoli studi e progetti mirati a sperimentare nuove soluzioni tecnologiche, migliorare l'efficienza dei processi, ridurre i costi di investimento e i costi di gestione, ottimizzare le filiere eliminando sprechi energetici e/o migliorandone i punti critici.

Tale straordinaria vivacità che caratterizza ogni branca del settore energetico certamente contribuirà – in pochi anni - ad ampliare l'offerta di soluzioni convenientemente praticabili e a rendere sempre più efficienti, affidabili e meno costose le tecnologie attualmente già diffuse.

La descrizione basilare delle più importanti tecnologie basate sull'impiego delle Fonti Energetiche Rinnovabili nonché il contributo energetico da esse attualmente fornito è indicato nelle “**Schede Tecnologiche**”, riportate sottoforma di Allegato alla presente documento.

## 2.5 - Conclusioni

Il ruolo che giocheranno le biomasse e le altre rinnovabili nel futuro energetico del pianeta non è in discussione.

Qualsiasi scenario, dal più irresponsabile (e, dunque, devastante) al più difficoltoso (e, dunque, benefico) coglie le grandi potenzialità legate a queste fonti che, pertanto, diventano un **passaggio obbligato** mediante il quale – nel 2030 - immettere nel sistema energetico mondiale da **1.900** (Scenario di Riferimento) a **2.200** (Scenario Alternativo 550 ppm) Mt<sub>ep</sub>/anno, raggiungendo una fetta del mix planetario variabile tra **11% e 14%**.

Nel primo caso, tuttavia, il loro impiego risulterebbe incontrollato e obbedirebbe prevalentemente alla logica di **massimizzare lo sfruttamento** delle risorse, senza alcun limite e/o vincolo e, dunque, generando nuove problematiche e competizioni di non poco conto.

Viceversa, nel secondo caso, il ricorso alle rinnovabile e alle bio-energie, ancorché più intenso e differenziato, risulterebbe un **importantissimo tassello di un sistema complesso** nel quale tutte le risorse disponibili fornirebbero il loro contributo in modo equilibrato e armonioso, diventando esse stesse volano di sviluppo e, dunque, con ricadute positive in termini socio-economici e con effetti durevoli e capitalizzati.

Nel documento *“State of the World – 2008”*, si legge: *“abbiamo bisogno di un sistema economico che sia fermamente messo al sicuro entro i limiti ecologici della Terra; un sistema economico diversificato, adattabile, capace di reagire alla difficoltà. Tutti questi obiettivi possono essere ricompresi entro il concetto di **sviluppo sostenibile**”*.

Le bio-energie vanno proprio in questa direzione essendo in grado i coniugare sviluppo economico e progresso sociale, coinvolgendo produttori di tutti i Paesi e consegnando loro gran parte del valore aggiunto che si genera lungo le filiere produttive. Inoltre, alla produzione di bio-energia si associa di norma anche una elevata attenzione verso l’ambiente facendo sì che il recupero e la successiva trasformazione delle biomasse possa generare cura e manutenzione del territorio e porti a soluzione numerosi questioni ambientali locali ancora aperte.

## 2.6 Bibliografia

British Petroleum (BP), **Statistical Review of World Energy**, June 2008, pp. 48, [www.bp.com](http://www.bp.com)

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), **The State of Food and Agriculture**, 2008, [www.fao.org](http://www.fao.org)

International Energy Agency (IEA), **World Energy Outlook. 2008**,

[www.iea.org](http://www.iea.org)

International Energy Agency (IEA), **Key World Energy Statistics. 2008**, pp. 82,

[www.iea.org](http://www.iea.org)

Royal Dutch Shell, **Shell energy scenario to 2050**, pp. 50, [www.shell.com](http://www.shell.com)

**Photovoltaic Energy Barometer**, EurObserv'ER, [www.eurobserv-er.org](http://www.eurobserv-er.org)

**Wind Energy Barometer**, EurObserv'ER, [www.eurobserv-er.org](http://www.eurobserv-er.org)

**Solid Biomass Barometer**, EurObserv'ER, [www.eurobserv-er.org](http://www.eurobserv-er.org)

**Solar Thermal Barometer**, EurObserv'ER, [www.eurobserv-er.org](http://www.eurobserv-er.org)

**Biogas Barometer**, EurObserv'ER, [www.eurobserv-er.org](http://www.eurobserv-er.org)

**Biofuels Barometer**, EurObserv'ER, [www.eurobserv-er.org](http://www.eurobserv-er.org)

## TABELLE

Fonte Energetica	%	Mt <sub>ep</sub>	Regione	%	Mt <sub>ep</sub>
<b>Petrolio</b>	34,4%	4.039	<b>OECD</b>	47,1%	5.530
<b>Carbone</b>	26,0%	3.053	<b>Medio Oriente</b>	4,5%	528
<b>Gas naturale</b>	20,5%	2.407	<i>ExUSSR</i>	8,7%	1.021
<b>Nucleare</b>	6,2%	728	<i>NonOECD EU</i>	0,9%	106
<i>Biomasse</i>	10,1%	1.186	<b>ExUSSR &amp; NonOECD EU</b>	9,6%	1.127
<i>Altre Rinn.</i>	0,6%	70	<b>Cina</b>	16,2%	1.902
<b>Biomasse + Altre Rinn.</b>	10,7%	1.256	<b>Asia</b>	11,3%	1.327
<b>Idro</b>	2,2%	258	<b>America Latina</b>	4,5%	528
			<b>Africa</b>	5,2%	611
			<b>Bunkeraggi</b>	1,6%	188
<b>TOTALE</b>	<b>100%</b>	<b>11.741</b>	<b>MONDO</b>	<b>100%</b>	<b>11.741</b>
Fonti fossili	81%	9.498	Paesi OECD	47%	5.530
Fonti non-fossili	13%	1.515	Paesi NonOECD	51%	6.023
Nucleare	6%	728	Bunkeraggi	2%	188

**Tabella 2.1** – Anno 2006: impiego di energia primaria ripartito per fonte (a sinistra) e per regione del mondo (a destra) [Fonte: IEA e successive elaborazioni]

REGIONE PAESE	POP. MIL.	PIL mld\$	ENERGIA PRODOTTA Mt <sub>eq</sub>	IMPORT ENERGIA Mt <sub>eq</sub>	CONSUMI ENERGIA PRIMARIA CEP	CONSUMI ELETTRICI (#) TWh	EM CO <sub>2</sub> (S) Mt <sub>co2</sub>	CONSUMI PROP/POP. ENERGIA PRIMARIA t <sub>eq</sub> /capita	INTENSITA' ENERGETICA CEP/PIL t <sub>eq</sub> /000\$	CONSUMI ELETTRICI PROP/POP. KWh/cap	EMISSIONE SPECIFICA CO <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> /CEP t <sub>co2</sub> /t <sub>eq</sub>	EMISSIONE PROP/POP. CO <sub>2</sub> /POP. t <sub>co2</sub> /cap	EMISSIONE SPECIFICA CO <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> /PIL kg <sub>co2</sub> /\$
OECD	1.178	29.169	3.842	1.845	5.537	9.872	12.874	4,70	0,19	8.380	2,33	10,93	0,44
Medio Oriente	189	838	1.529	-990	523	599	1.291	2,77	0,62	3.169	2,47	6,83	1,54
Ex-USSR	284	568	1.610	-577	1.017	1.274	2.395	3,58	1,79	4.486	2,35	8,43	4,22
Europa Non OECD	54	162	64	45	108	171	271	2,00	0,67	3.167	2,51	5,02	1,67
Cina	1.319	2.315	1.749	161	1.897	2.716	5.648	1,44	0,82	2.059	2,98	4,28	2,44
Asia	2.120	2.139	1.187	176	1.390	1.414	2.718	0,63	0,62	667	2,04	1,28	1,27
America Latina	455	1.796	704	-169	531	808	972	1,17	0,30	1.776	1,83	2,14	0,54
Africa	937	773	1.110	-489	614	522	854	0,66	0,79	557	1,39	0,91	1,10
<b>MONDO</b>	<b>6.54</b>	<b>37.759</b>	<b>11.796</b>	<b>-</b>	<b>11.740</b>	<b>17.377</b>	<b>28.003</b>	<b>1,80</b>	<b>0,31</b>	<b>2.659</b>	<b>2,39</b>	<b>4,28</b>	<b>0,74</b>
<b>Italia</b>	<b>58,86</b>	<b>1157</b>	<b>27,43</b>	<b>183,19</b>	<b>184,17</b>	<b>339,18</b>	<b>448,03</b>	<b>3,13</b>	<b>0,16</b>	<b>5762</b>	<b>2,43</b>	<b>7,61</b>	<b>0,39</b>
Francia	63,2	1.688,3	137,02	140,22	272,67	479,33	377,49	4,31	0,19	7.584	1,38	5,97	0,26
Germany	82,37	2.011,2	136,76	215,56	348,56	590,98	823,46	4,23	0,17	7.175	2,36	10,00	0,41
Giappone	127,7	5.087,1	101,07	431,11	527,56	1.050,13	1.212,7	4,13	0,10	8.220	2,30	9,49	0,24
USA	299,8	11.285	1.654,2	730,44	2.320,7	4.052,24	5.696,7	7,74	0,21	13.515	2,45	19,00	0,51
Russia	142,5	373,2	1.219,9	-531,12	676,2	872,39	1.587,1	4,75	1,81	6.122	2,35	11,14	4,25
India	1.110	703,33	435,64	134,83	565,82	557,97	1.249,7	0,51	0,80	503	2,21	1,13	1,78
Brasile	189,3	765,13	206,72	20,35	224,13	389,95	332,42	1,18	0,29	2.060	1,48	1,76	0,43
Nigeria	144,7	63,53	235,34	-129,69	105,07	16,85	51,42	0,73	1,65	116	0,49	0,36	0,81
Qatar	0,82	28,36	94,95	-76,87	18,12	14,11	39,67	22,10	0,64	17.207	2,19	48,38	1,40
Eritrea	4,69	0,75	0,51	0,16	0,7	0,23	0,53	0,15	0,93	49	0,76	0,11	0,71

Note: (#) Produzione + import&export – perdite trasmissione/distribuzione; (S) Dovute all'uso di combustibili

**Tabella 2.2** – Dati statistici e parametri energetici nelle diverse regioni del mondo e in alcuni Paesi significativi [Fonte: IEA]



	EOLICO (MW <sub>e</sub> )	SOLARE FOTOVOLTAICO (MW <sub>p</sub> )	SOLARE TERMICO (MW <sub>t</sub> )	BIOGAS (k <sub>tep</sub> )	CONSUMO BIOCARBURANTE (k <sub>tep</sub> )	BIOMASSE SOLIDE (k <sub>tep</sub> )
<b>Italia</b>	2.213	5.181	606	354	177	1.967
<b>UE25</b>	48.009	3.127	14.280	5.142	2.992	62.413

**Tabella 2.3** – Anno 2006: contributo delle Fonti Energetiche Rinnovabili in Italia e nella UE a 25

FONTI ENERGETICHE	%	Mt <sub>ep</sub>
<b>Petrolio</b>	31,5%	5.582
<b>Carbone</b>	28,2%	4.997
<b>Gas naturale</b>	22,3%	3.952
<b>Nucleare</b>	4,8%	851
<i>Biomasse</i>		<i>nd</i>
<i>Altre Rinn.</i>		<i>nd</i>
<b>Biomasse + Altre Rinn.</b>	10,8%	1.914
<b>Idro</b>	2,4%	425
<b>TOTALE</b>	<b>100%</b>	<b>17.721</b>
Fonti fossili	82%	14.531
Fonti non-fossili	13%	2.339
Nucleare	5%	851

REGIONE	%	Mt <sub>ep</sub>
<b>OECD</b>	38,4%	6.805
<b>Medio Oriente</b>	5,8%	1.028
<i>ExUSSR</i>		<i>nd</i>
<i>NonOECD EU</i>		<i>nd</i>
<b>ExUSSR &amp; NonOECD EU</b>	8,1%	1.435
<b>Cina</b>	21,6%	3.828
<b>Asia</b>	14,7%	2.605
<b>America Latina</b>	4,9%	868
<b>Africa</b>	5,3%	939
<b>Bunkeraggi</b>	1,2%	213
<b>MONDO</b>		<b>17.721</b>
Paesi OECD	38%	6.805
Paesi NonOECD	61%	10.703
Bunkeraggi	1%	213

**Tabella 2.4** – Anno 2030: impiego di energia primaria ripartito per fonte (a sinistra) e per regione del mondo (a destra), nel caso non sia presa alcuna iniziativa in favore della sostenibilità energetica e del miglioramento climatico del pianeta (Scenario di Riferimento) [Fonte: IEA e successive elaborazioni]

FRONTE ENERGETICA	%	Mt <sub>ep</sub>	REGIONE	%	Mt <sub>ep</sub>
<b>Petrolio</b>	31,1%	4.909	<b>OECD</b>	39,9%	6.297
<b>Carbone</b>	23,4%	3.693	<b>Medio Oriente</b>	5,5%	868
<b>Gas naturale</b>	21,8%	3.441	<i>ExUSSR</i>		<i>nd</i>
<b>Nucleare</b>	6,8%	1073	<i>NonOECD EU</i>		<i>nd</i>
<i>Biomasse</i>		<i>nd</i>	<b>ExUSSR &amp; NonOECD EU</b>	8,2%	1.294
<i>Altre Rinn.</i>		<i>nd</i>	<b>Cina</b>	20,6%	3.251
<b>Biomasse + Altre Rinn.</b>	14,0%	2.210	<b>Asia</b>	14,2%	2.241
<b>Idro</b>	2,9%	458	<b>America Latina</b>	4,9%	773
			<b>Africa</b>	5,4%	852
			<b>Bunkeraggi</b>	1,3%	205
<b>TOTALE</b>	<b>100%</b>	<b>15.783</b>	<b>MONDO</b>		<b>15.783</b>
Fonti fossili	76%	12.042	Paesi OECD	40%	6.297
Fonti non-fossili	17%	2.667	Paesi NonOECD	59%	9.280
Nucleare	7%	1.073	Bunkeraggi	1%	205

**Tabella 2.5** – Anno 2030: impiego di energia primaria ripartito per fonte (a sinistra) e per regione del mondo (a destra), nel caso in cui vengano assunte iniziative in favore della sostenibilità energetica e per contenere le emissioni a 550 ppm di CO<sub>2</sub> equivalenti (Scenario Alternativo 550 ppm) [Fonte: IEA e successive elaborazioni]

FONTE	TECNOLOGIE FILIERA (X)	GENERAZIONE		IMPIANTI	DESTINAZ. PRINCIPALE	DIFF	TIPO (S)	IMPIANTI	DESTINAZ. PRINCIPALE
		MICRO	MACRO						
		DIFF	TIPO (S)						
SOLE	FV	+++	EE	Moduli FV	Autoconsumo, rete elettrica	+	EE	Campi FV	Rete elettrica
	ST	+++	ET	Collettore piani	Autoconsumo	+	EE, ET	Collettori concentratori	Rete elettrica
VENTO	E	+	EE	Mini generatori	Autoconsumo, rete elettrica	++ +	EE	Aero generatori	Rete elettrica
ENERGIA INTERNA	GT	+	ET	Pompa calore	Autoconsumo	+	EE ET	Centrali termo elettriche	Rete elettrica Reti TLR
COLTURE ENERGETICHE OLEAGINOSE	OP BD	+	EE+ET	Imp. estrazione + motori	Rete elettrica	++ +	FUE L	Imp.estrazione /raffinaz.	Trasporti
COLTURE ENERGETICHE AMIDACEE e ZUCCHERINE	BOH 1° g.					+	FUE L	Imp. fermentazione	Trasporti
BIOMASSE CELLULOSICHE MICROALGHE	BOH 2° g.					(?)	FUE L	Imp. fermentazione	Trasporti
BIOMASSE RESIDUALI UMIDE	BH	+	FUEL	Digestori	Vettore energetico				
	BG	+++	EE+ET FUEL	Imp. fermentaz. + motori	Rete elettrica Reti gas				
BIOMASSE LIGNO CELLULOSICHE	COM B	+++	ET ET+EE	Gen. termici domestici Gen. termici consortili	Autoconsumo Rete elettrica, reti TLR	++ +	EE + ET	Centrali termo elettriche	Rete elettrica
	GAS; PI	++	EE	Gassificatori Pirolicizzatori	Autoconsumo, rete elettrica	+	EE, ET Fuel	Gassificatori Pirolicizzatori	Rete elettrica Trasporti

Note: (S) EE = Energia Elettrica; ET = Energia Termica; FUEL = Biocarburante (x) FV = Fotovoltaico, ST = solare termico; E = Eolico; GT = Geotermico; OP = Olio Puro; BD = Biodiesel, BOH = biotanolio; BG = Biogas; BH = Bioidrogeno; COMB = Combustione; GAS = Gassificazione; PI = Pirolisi

**Tabella 2.6** – – Principali tecnologie e filiere, forme di energia prodotte e impianti utilizzati sia nella micro-generazione (distribuita), sia nella macro-generazione (centralizzata)

### 3 Valutazione di una filiera agro-energetica

La produzione di energia in ambito agricolo è un'attività che, soprattutto recentemente, sembra poter rappresentare una valida alternativa per gli operatori agricoli in un momento in cui parte delle colture tradizionalmente attuate nei climi temperati non sembrano più in grado di garantire sufficienti ritorni economici. La produzione di energia da fonti rinnovabili può inoltre concorrere agli obiettivi prestabiliti di riduzione dei gas climalteranti e ridurre la dipendenza dai combustibili fossili. Le filiere agro-energetiche tecnologicamente mature e quindi a tutt'oggi attuabili sono numerose e possono basarsi sull'impiego di **biomassa appositamente prodotta** così come su **sottoprodotti o residui di lavorazione**. In ogni caso, poiché una filiera agro-energetica possa diffondersi ed essere adottata dagli operatori agricoli è necessario che garantisca un adeguato ritorno economico.

La **sostenibilità economica** delle diverse filiere appare a tutt'oggi come l'unico fattore che può favorirne la diffusione in un contesto, quello agricolo, che solitamente si presenta recalcitrante ad intraprendere nuove iniziative.

Occorre sottolineare che spesso il ruolo del settore agricolo all'interno della filiera energetica è limitato alla fornitura di materie prime poi trasformate da soggetti terzi di carattere industriale (es. filiere biodiesel e bioetanolo per le quali la fase di trasformazione richiede impianti di notevole dimensione e costo che possono essere sostenibili solo su scala industriale). Nonostante ciò, comunque, il cambiamento dell'ordinamento produttivo da colture tradizionali alle agro-energie comporta radicali e costosi cambiamenti nella struttura aziendale.

Per stimolarne la produzione, soprattutto negli ultimi anni, sia le Regioni attraverso i rispettivi Piani di Sviluppo Rurale (PSR) sia i diversi Stati Europei (in Italia per esempio attraverso il meccanismo dei Certificati Verdi e della Tariffa Omnicomprensiva) hanno previsto sostanziosi incentivi sia per la

produzione di energia rinnovabile sia per la destinazione di superficie a colture appositamente dedicate alla produzione di biomassa da destinare alla filiera energetiche.

La presenza di questi incentivi pubblici talvolta si rileva decisiva per il raggiungimento della sostenibilità economica di filiera e consente, in taluni casi (es. filiera biogas), l'ottenimento di risultati particolarmente interessanti. Seppur di fondamentale importanza la sostenibilità economica **non può** e **non deve** però essere l'unico parametro su cui basare la scelta tra le diverse filiere: anche gli aspetti energetici ed ambientali del processo produttivo vanno attentamente presi in considerazione. Sarebbe irrazionale oltre che eticamente discutibile sovvenzionare filiere agro-energetiche non energeticamente ed ambientalmente sostenibili.

### 3.1 Schematizzazione di una filiera agro-energetica

Come brevemente accennato in precedenza il ruolo dell'imprenditore agricolo all'interno di una filiera agro-energetica può essere diverso ed assumere un'importanza differente.

I ruoli che il settore agricolo può svolgere all'interno di una filiera per la produzione di bioenergia sono i seguenti:

1. Produttore di materia prima;
2. Produttore di materia prima e attuatore di una prima trasformazione;
3. Produttore di materia prima, trasformatore della stessa in energia o in un vettore energetico e vendita dell'energia prodotta o del vettore energetico prodotto.

Nel caso in cui l'imprenditore agricolo agisca da mero fornitore di materia prima le trasformazioni dell'organizzazione aziendale sono generalmente modeste però è ridotto anche il beneficio che esso ricava dalla produzione di

energia. Ciò poiché il settore agricolo, rispetto a quello di trasformazione caratterizzato dalla presenza di un numero inferiore di soggetti di maggior dimensione, rimane in una condizione di minor forza contrattuale. L'agricoltore resta il fornitore di derrate trasformate da altri, gli unici benefici che può ricavare dalla scelta di destinare parte della propria superficie a colture energetiche derivano dalla possibilità di spuntare prezzi maggiori per i suoi prodotti rispetto a quelli alternativi a destinazione alimentare oppure dalla presenza di contratti di filiera in cui il trasformatore finale lega il prezzo percepito dall'agricoltore all'andamento del prezzo del prodotto energetico finale.

Qual'ora l'imprenditore agricolo esegua una primaria trasformazione della biomassa da lui prodotta può beneficiare dell'incremento di valore che ciò comporta.

Gli unici casi i benefici della produzione di bioenergia rimangono interamente all'interno del settore agricolo sono legati a quelle filiere (es. filiera biogas con immissione in rete dell'energia elettrica prodotta, filiera olio-grezzo con produzione di energia elettrica tramite motori diesel, ecc.) in cui il processo produttivo è concentrato all'interno dell'azienda agricola e l'operatore agricolo stesso è il venditore dell'energia prodotta.

Schematicamente una generica filiera agro-energetica può essere suddivisa in **3 distinte fasi**: la fase agricola o fase di campo, la fase di stoccaggio e di trasporto e la fase di trasformazione. Come citato appena sopra, queste tre fasi possono essere concentrate all'interno dell'azienda agricola oppure in settori differenti e non solo in quello agricolo.

Per quanto riguarda la consecutività temporale le tre fasi, seppure consecutive, avvengono generalmente in momenti diversi e sono separate da periodi di tempo più o meno lunghi. In alcuni casi, esempio di agro-filiera per la produzione di energia elettrica, ad una produzione di energia che è continua nel corso dell'anno si contrappone una produzione/recupero della biomassa da trasformare che è stagionale e concentrata in un periodo di tempo più ristretto. Il rifornimento continuo dell'impianto di conversione

richiede quindi un idoneo stoccaggio della biomassa. In altri casi invece la produzione di energia è stagionale così come la produzione/il recupero della biomassa.

In **Figura 3.1** è riportata, a titolo di esempio una schematizzazione della filiera legno-energia.



**Figura 3.1** – Schematizzazione della filiera legno-energia per la produzione di energia elettrica e termica

### 3.1.1 Fase di campo

La **fase di campo** della filiera comporta la produzione della materia prima che verrà utilizzata per la produzione dell'energia oppure, qual'ora la filiera agro-energetica preveda l'utilizzo di sottoprodotti o residui questa fase si limita alla loro raccolta e/o alla loro movimentazione. L'ordinamento produttivo dell'azienda può dover essere modificato soltanto nei casi in cui il

prodotto energetico sia una nuova coltura appositamente coltivata (es. Short Rotation Forestry - SRF) **Figura 3.2**. Generalmente questa fase può essere eseguita ricorrendo alle macchine operatrici presenti in azienda (es. produzione di mais ceroso per impianti di biogas, produzione di acheni di girasole o semi di colza e soia per le filiere olio-grezzo biodiesel, produzione di granella di mais per la filiera bioetanolo, raccolta dei residui di potatura per la filiera legno-energia, gestione dei reflui zootecnici per la filiera biogas). La fase di campo comprende anche il trasporto intra-aziendale del prodotto al luogo di stoccaggio in azienda.



**Figura 3.2** – Fase di campo, operazioni di raccolta con falciatrinciacaricatrice equipaggiata con piattaforma di taglio appositamente sviluppata per colture arboree da biomassa

### 3.1.2 Fase di stoccaggio e trasporto

La fase di stoccaggio e di trasporto può essere più o meno complessa in funzione delle caratteristiche del materiale (umidità, massa volumica



apparente, deperibilità, ecc.). In alcuni casi lo stoccaggio ha durata limitata ma in altri, in cui la raccolta del materiale è concentrata in ristretto arco temporale, può prolungarsi per un lungo periodo durante il quale possono verificarsi alterazioni e perdite di prodotto. Ad esempio, nel caso delle SRF la raccolta a cantieri riuniti, eseguita generalmente a fine inverno – inizio primavera, comporta la produzione di cippato che, seppur caratterizzato da elevate umidità, viene generalmente utilizzato all’inizio dell’inverno successivo. Durante questo periodo di tempo possono avere luogo fermentazioni del cippato e altri fenomeni che riducono la qualità del prodotto e comportano anche perdite di sostanza secca. Invece, per materiali a ridotta umidità (es. acheni di girasole, cippato di pioppo da impianti quinquennali con cippatura successiva alla raccolta, ecc. ecc) lo stoccaggio non comporta elevate perdite di prodotto ma presuppone comunque la disponibilità di infrastrutture adeguate per poterlo attuare.

Il **trasporto** del materiale dal luogo di accumulo aziendale all’impianto di utilizzazione è generalmente un’operazione extra-aziendale. Tuttavia nel caso di impianti di biogas operanti con silomais prodotto in azienda il trasporto all’impianto di utilizzazione è praticamente assente ed è tutt’al più limitato alla quotidiana alimentazione del digestore (**Figura 2.3** – parte cerchiata in rosso).

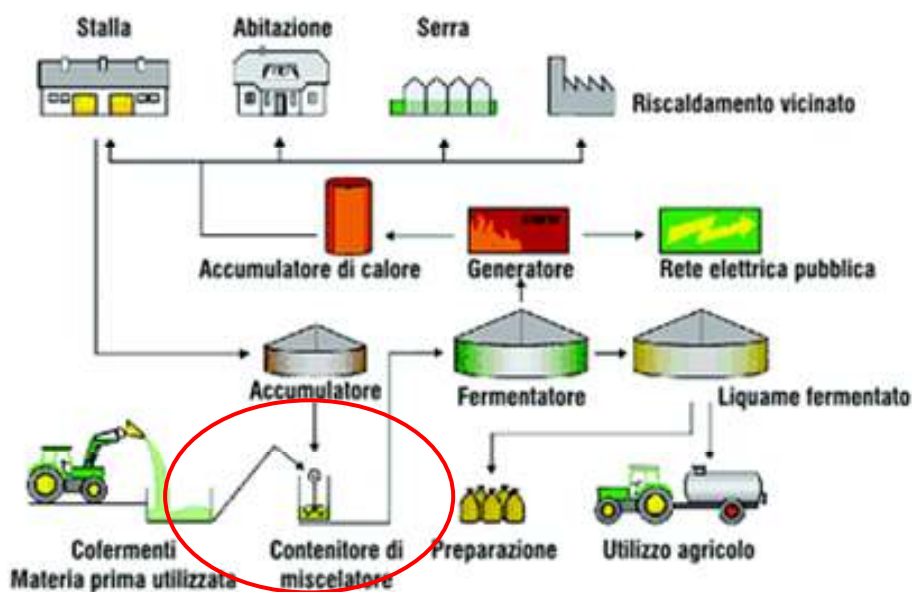
Sebbene il trasporto possa avvenire tramite differenti tipologie di mezzo (autoarticolati, rimorchi agricoli, treni, navi, ecc.) il parametri fondamentali che ne influenzano il costo sono la **distanza**, la **massa volumica apparente** e la **densità energetica** del prodotto trasportato.

Tra i diversi mezzi che possono essere utilizzati per il trasporto possono sussistere notevoli differenze.

In **Tabella 3.1** è riportato l’input energetico per il trasporto di biomasse ligno-cellulosiche, nello specifico di cippato di salice da cedui a breve rotazione, in funzione del mezzo di trasporto.

E' possibile innanzitutto osservare che il trasporto via mare tramite nave è quello che comporta il minor costo a seguire quello su treno mentre i trasporti su gomma sono quelli energeticamente più dispendiosi.

L'incidenza del trasporto sul "costo" economico, energetico e ambientale (EEA) del prodotto cresce, a parità di mezzo di trasporto, all'aumentare della distanza e al diminuire della **massa volumica apparente** (MVA) e della densità energetica del prodotto. La MVA, espressa in  $\text{kg}/\text{m}^3$ , indica la quantità di biocombustibile dell'unità di volume considerando anche gli interspazi tra le diverse particelle che ne costituiscono la massa totale. MVA e densità coincidono nel caso di biocombustibili liquidi (biofuels) ma possono essere sensibilmente differenti come ad esempio per il cippato e la legna in ciocchi (Tabella 3.1) (Borjesson, 1996).



**Figura 3.3** – Filiera biogas, fase di trasporto (cerchiata in rosso) e fase di trasformazione

Relativamente all'incidenza del trasporto sui risultati finali, un altro parametro utile per il calcolo è la **densità energetica** (DE) ovvero la quantità di energia contenuta nell'unità di volume. La densità energetica è la caratteristica che, a parità di mezzo utilizzato, maggiormente influenza il costo EEA del trasporto. Espressa in  $\text{MJ}/\text{m}^3$  è ricavabile dall'equazione di seguito riportata:

$$DE = MVA \cdot PCN \quad [\text{MJ}/\text{m}^3]$$

con:

DE = densità energetica  $[\text{MJ}/\text{m}^3]$

MVA = massa volumica apparente tal quale  $[\text{kg}_{\text{tq}}/\text{m}^3]$

PCN = potere calorifico netto del biocombustibile  $[\text{MJ}/\text{kg}_{\text{tq}}]$

$$PCN = PCI \cdot (1-U) - 2,52 \cdot U$$

U = Umidità percentuale del biocombustibile  $[\%]$

MEZZO	INPUT DIRETTO	INPUT TOTALE
Nave (mare)	0,22	0,23
Treno	0,68	0,70
Autotreno	1,30	1,40
Rimorchio agricolo	2,10	2,90

**Tabella 3.1** – Input energetico per il trasporto espresso in  $\text{MJ}/\text{kg} \cdot \text{t}$

In **Tabella 3.2** si riporta la DE per alcuni biocombustibili al variare della MVA e dell'umidità. Pur riferendosi sempre alla medesima specie legnosa (pioppo,  $\text{PCI} = 18,5 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{ss}}$ ) si può osservare come, tra i diversi assortimenti, vari fortemente, anche in funzione dell'umidità, la DE.

ASSORTIMENTO	MVA [kg/m <sup>3</sup> ]	PCN [MJ/kg]	DE [MJ/m <sup>3</sup> ]
Cippato (U= 55%)	250	6,9	1725
Cippato (U = 25%)	175	13,2	2317
Pellet (U = 10%)	650	16,4	10660
Legna in ciocchi (U = 25%)	350	13,2	4620

**Tabella 3.2** – Densità energetica e massa volumica apparente per diversi assortimenti di legna di pioppo

### 3.1.3 Fase di conversione

La **fase di conversione** di una filiera agro-energetica è solitamente quella che maggiormente si discosta da quelle attività che tradizionalmente sono state viste come “agricole”. Nel corso di questa fase avviene la trasformazione del prodotto della fase di campo direttamente in energia o in un vettore energetico. Le attrezzature e gli impianti necessari per la conversione non sono solitamente presenti nelle aziende agricole e spesso richiedono investimenti tali per cui possono essere adottati solo su scala industriale. Nonostante ciò, in alcune filiere agro-energetiche, le operazioni che caratterizzano questa fase possono essere svolte dall'imprenditore agricolo come ad esempio nella filiera biogas e in quella dell'olio grezzo per la produzione di energia elettrica.

## 3.2 Sostenibilità

La valutazione di una filiera agro-energetica deve prendere in considerazione, come già detto, sia gli aspetti economici che quelli energetici ed ambientali che concorrono alla determinazione della **sostenibilità complessiva** della filiera.

Per poter eseguire una corretta ed analitica valutazione della sostenibilità complessiva di una filiera è necessario avere chiara la sequenza logico-operativa che la caratterizza e disporre di dettagliate informazioni riguardo a ognuna delle operazioni che la compongono e a tutti i fattori di produzione che sono impiegati all'interno di essa.

Per una più dettagliata panoramica sulle metodologie di analisi per la valutazione della sostenibilità di una filiera si rimanda al Capitolo 3 mentre per un'analisi dettagliata dei fattori di produzione al Paragrafo 2.3.

Qui di seguito vengono presentate le principali problematiche e i punti salienti relativamente all'analisi dei tre aspetti EEA (economici, energetici e ambientali).

### 3.2.1 Aspetti economici

Come detto la sostenibilità economica è il fattore più importante dell'orientare le scelte degli agricoltori attraverso i possibili ordinamenti produttivi.

La sua valutazione non si presenta particolarmente complessa e può avvalersi di metodologie consolidate nel tempo, comunemente applicate e uniformate anche a livello internazionale (**Capitolo 4**).

Molto semplicemente una filiera può ritenersi sostenibile economicamente se permette di ottenere un tornaconto positivo e cioè se il **rapporto ricavi/costi** è maggiore di 1.

Nei costi vanno incluse tutte le spese sostenute, comprese quelle implicite (es, beneficio fondiario, remunerazione della manodopera, ammortamento fabbricati, ecc.), per la produzione dell'energia.

Relativamente alle entrate, devono essere considerati:

- i ricavi della vendita del vettore energetico e/o dell'energia prodotta;
- gli eventuali contributi percepiti,

- i ricavi derivanti dalla vendita di eventuali sottoprodotti. In filiere come quella dell'olio-grezzo in cui la produzione di sottoprodotti (panello proteico) è abbondante la sostenibilità economica della filiera non può prescindere da una loro valorizzazione.

### 3.2.2 Aspetti energetici

Perché una filiera agro-energetica sia sostenibile da un punto di vista energetico è necessario che l'energia prodotta sia maggiore di quella spesa. Il **rapporto ricavi/costi energetici** (spesso indicato come rapporto output/input) deve quindi essere maggiore di 1. Tale rapporto chiamato anche "energy ratio" o **EROEI** (*Energy Returned on Energy Invested*) rappresenta un indice di efficienza dell'intero processo: quanto più una filiera è efficace e sostenibile energeticamente tanto più tale indice è grande. Il presupposto alla base della possibilità di ottenere un rapporto ricavi/costi energetici maggiore di 1 è dovuto al fatto che la radiazione solare che rappresenterebbe a tutti gli effetti un input del sistema non è considerata. Se così non fosse sarebbe impossibile avere EROEI superiori all'unità.

Negli ultimi anni l'interesse e l'importanza nei confronti degli aspetti energetici delle diverse bioenergie è aumentata notevolmente. A riprova di ciò negli ultimi Piani di Sviluppo Rurale 2007-2013 alcune Regioni (Es. Veneto) vincolano il riconoscimento di alcuni contributi legati alla produzione di energie rinnovabili al fatto che, complessivamente, il processo per cui si richiede il contributo presenti  $EROEI > 1$ . All'interno di questo meccanismo di valutazione della sostenibilità energetica dei diversi prodotti sono riconosciuti differenti "punteggi di priorità" alle diverse richieste proprio in virtù del valore di questo indice.

Le metodologie per la valutazione degli aspetti energetici di una filiera sono più recenti rispetto a quelle per la valutazione della sostenibilità economica, la maggior parte di esse sono state sviluppate a partire dagli anni Settanta in concomitanza con la crisi petrolifera. Sebbene introdotte da circa 30 anni esistono tutt'ora alcune questioni irrisolte e che possono dare luogo diversi

risultati anche analizzando il medesimo processo produttivo tuttavia, per maggiori dettagli, si rimanda allo specifico capitolo (**Capitolo 3**).

### 3.2.3 Aspetti ambientali

Rispetto a quelle energetica e soprattutto a quella economica la valutazione ambientale di una filiera agro-energetica si presenta più complessa. Tale complessità è dovuta fondamentalmente al fatto che le metodologie impiegate, per cui si rimanda al capitolo successivo, sono recenti, non sempre univoche e soprattutto al fatto che gli aspetti che vengono valutati sono più difficili da quantificare e richiedono informazioni molto spesso non disponibili.

Le principali questioni che rientrano generalmente nella valutazione del carico ambientale di una filiera sono le seguenti:

- Emissioni di gas ad effetto serra (GHG) e più precisamente di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e ossido di diazoto (N<sub>2</sub>O);
- “Consumo” di superficie agricola intesa come superficie altrimenti destinabile alla produzione di altri prodotti e in particolare di prodotti alimentari;
- Acidificazione;
- Eutrofizzazione.

A seconda degli obiettivi dello studio e della disponibilità di tempo e risorse tali aspetti possono essere indagati o meno contemporaneamente. Tra i punti sopracitati quello che ha assunto maggior importanza, anche alla luce dei dibattiti sui cambiamenti climatici in corso, e che, per questo, è sempre il punto principale relativamente alla sostenibilità ambientale di una filiera è l'analisi delle emissioni di GHG.

Il **bilancio dei GHG** legati a un processo produttivo prevede il computo di tutte le **emissioni** direttamente o indirettamente ad esso associate. Sebbene nel corso della fase di campo della filiera vi sia assorbimento ed organizzazione di CO<sub>2</sub> da parte della coltura attraverso la fotosintesi l'output

ambientale, relativamente ai GHG, non è legato a questo fenomeno (cfr. Capitolo 3) ma bensì alla possibilità che l'energia prodotta sostituisca una corrispondente quantità di energia da fonti fossili. Tale sostituzione comporta la mancata emissione di GHG (espressa in massa di CO<sub>2</sub> equivalente) che è l'output ambientale della filiera relativamente alla problematica del riscaldamento globale o *Global Warming Potential* (GWP).

### 3.3 Fattori di produzione

La produzione di bioenergia così come un qualsiasi altro processo produttivo comporta l'impiego di differenti fattori di produzione senza i quali il processo stesso non potrebbe avere luogo. Tali fattori sono costituiti dall'insieme di beni, di servizi e di infrastrutture che, variamente interconnessi tra loro, permettono la produzione. La valutazione economica, energetica ed ambientale di un processo produttivo è essenzialmente basata sulla quantificazione degli effetti che l'impiego di questi fattori ha sui tre aspetti considerati.

E' possibile distinguere fattori di produzione a **logorio totale** e fattori di produzione a **logorio parziale** a seconda del fatto che, nel corso del ciclo produttivo, avvenga o meno il completo sfruttamento degli stessi.

Al contrario dei fattori a logorio totale che vengono impiegati ed esauriti nel corso del ciclo produttivo quelli a logorio parziale possono essere impiegati più volte: il loro impiego non preclude la possibilità che essi possano essere utilizzati nuovamente ma è tuttavia necessario perché il processo produttivo possa aver luogo. Nel caso di una filiera agro-energetica sono fattori produttivi a logorio parziale i trattori, le macchine operatrici, gli impianti di trasformazione, gli edifici utilizzati per lo stoccaggio ecc. ecc.

I fattori a **logorio totale**, utilizzati e consumati nel corso del ciclo produttivo, non possono pertanto essere impiegati nuovamente. Per quanto riguarda l'attività agricola i principali fattori di produzione che ricadono in questa



categoria sono i carburanti, l'elettricità, i fertilizzanti, l'acqua, le sementi, i fitofarmaci, ecc..

Occorre sottolineare che, per quanto riguarda l'analisi energetica e ambientale, molto spesso la classificazione dei fattori produttivi è differente rispetto a quella economica che li distingue in fattori di produzione a logorio totale e logorio parziale. I fattori di produzione vengono divisi in **input diretti** e **input indiretti**; molti Autori ([Pimentel, 1973](#); [Pimentel, 1991](#); [Kim, 2003](#); [Wood, 2004](#)) considerano input diretti solo quelli che comportano direttamente un consumo di energia o un'emissione di gas ad effetto serra (GHG) (es. carburanti, lubrificanti, elettricità) e classificano come indiretti tutti gli altri per i quali il consumo di energia e le emissioni di GHG sono legate alle fasi di produzione e trasporto ma non a quelle di consumo (es. fertilizzanti, erbicidi, trattori e macchine operatrici, ecc.). In altre pubblicazioni ([Shapouri, 2002](#); [Bernesson, 2004](#); [Fiala, 2009](#), [Vande Walle, 2007](#)) invece la classificazione dei fattori di produzione che viene adottata è la stessa che è utilizzata per l'analisi economica e gli input diretti coincidono con i fattori a logorio totale mentre quelli indiretti con quelli a logorio parziale. Nel prosieguo di questa Tesi, tra le due possibili classificazioni appena presentate verrà adottata la seconda.

### 3.3.1 Analisi dei fattori produttivi

La valutazione di un processo produttivo e quindi anche quella di una filiera agro-energetica è sostanzialmente basata sulla **quantificazione** e sulla successiva "**valorizzazione**" di tutti i fattori produttivi che sono impiegati al suo interno.

La valorizzazione economica, energetica ed ambientale dei fattori produttivi a logorio totale impiegati in un processo non si presenta particolarmente difficoltosa. Generalmente è agevolata dal fatto che trattandosi, nella maggior parte dei casi, di beni con un proprio valore economico è tenuta la loro contabilità o è comunque agevole stabilire le quantità utilizzate analizzando scontrini fiscali, fatture, bollette e altra documentazione simile.

Note le quantità impiegate la valorizzazione economica è fatta in funzione del prezzo mentre per quanto riguarda quella energetica e quella ambientale si rimanda allo specifico paragrafo.

Invece, la valorizzazione dei fattori produttivi a logorio parziale si presenta più complessa a causa del fatto che la definizione della quota parte di fattore produttivo che deve fare riferimento alla singola unità di prodotto si presenta non agevole, priva di una chiara metodologia di riferimento e suscettibile di soggettività.

Per esempio, una volta conosciuto il valore economico di un trattore, l'energia in esso immagazzinata e le emissioni di gas ad effetto serra (GHG) legate alla sua produzione come suddividere queste quantità tra i diversi cicli produttivi a cui il trattore prende parte? Come riferire queste quantità alla singola unità di produzione agricola prodotta nel corso del ciclo produttivi a cui il trattore ha preso parte?

E' necessario **ripartire** queste quantità.

Occorre innanzitutto sottolineare che a differenza che per l'analisi economica per il quale questi fattori di produzione sono sempre considerati per quella energetica e ambientale gli input a logorio parziale non vengono sempre considerati. Alcuni Autori ([Riva, 2006](#)) giustificano questa scelta in considerazione dello scarso peso che avrebbero sull'input energetico totale e sull'emissione totale di GHG. Tale scelta, seppur comprensibile viste le difficoltà legate ad un'analitica valutazione dell'input energetico e delle emissioni legate all'utilizzo dei fattori di produzione a logorio totale, appare però forzata poiché l'incidenza di queste voci può oscillare tra il 5 e il 20% del totale ([Fiala, 2009b](#); [Mikkola, 2010](#)). Quindi, quantomeno per quei processi caratterizzati da forte ricorso alla meccanizzazione o con fasi di trasformazione particolarmente complesse, non può essere trascurata.

La ripartizione della quantità di energia e di GHG emessi per la produzione di un fattore di produzione a logorio parziale può essere eseguita utilizzando parametri caratteristici del fattore stesso così come la sua durata economica e la sua durata fisica e/o conoscendo il suo impiego annuo. La durata

economica, espressa in anni, quantifica il periodo di tempo durante il quale il bene (es. un trattore) è economicamente funzionante ed è quindi in grado di svolgere la funzione per cui è stato acquistato. La durata fisica o tecnologica rappresenta invece il monte ore complessivo durante il quale il bene è operativo.

In prima analisi la ripartizione può essere eseguita considerando solo durata fisica e durata tecnologica e dividendo la quantità (di energia o di GHG) complessivamente presente nel bene, detta “*embedded*”, per il prodotto di questi due parametri arrivando quindi a quantificare la quantità di energia/di GHG che fa riferimento a un’ora di attività del fattore produttivo considerato. Tale sistema di calcolo può portare però a grosse sottostime qual’ora il fattore produttivo sia sottoutilizzato rispetto al suo impiego ottimale. Se, per esempio, un trattore, con una durata fisica di 1200 ore, viene utilizzato per tutti i 12 anni della sua durata economica per sole 500 ore annue ricorrendo alla procedura appena descritta la quota di energia e GHG riferita all’ora di funzionamento sarà la metà di quella reale. Per evidenziare l’importanza di questo passaggio può essere utile ricordare che in Italia, mediamente, il parco trattori presente nelle aziende agricole è fortemente sottoutilizzato e le singole trattrici a fronte di un impiego ottimale (dato dal rapporto tra la durata fisica e quella economica) di 800-1000 ore/anno sono utilizzate in media per 300-350 ore/anno (Pawlak, 2001). Pertanto, soprattutto nei casi in cui l’utilizzo del fattore di produzione è palesemente inferiore a quello ottimale, la “quota oraria” può essere ricavata dividendo la quantità di energia e GHG *embedded* per la sommatoria delle ore annualmente svolte dal fattore produttivo. In **Tabella 3.3** sono riportate le due ipotesi di calcolo relativamente alla ripartizione dell’energia *embedded* in un fattore a logorio parziale.

Il risultato delle due modalità di calcolo coincide qual’ora la sommatoria delle ore annue di utilizzo sia pari alla durata fisica.

Durata economica	DE	Anni
Durata fisica	DF	Ore
Ore annue di funzionamento	H <sub>ANNO</sub>	Ore/anno
Energia <i>embedded</i>	E <sub>EMBEDDED</sub>	MJ
Quota oraria	QH	MJ/h di funzionamento
<b>Hp 1</b>		
$Qh = E_{EMBEDDED} / (DF \cdot DE) = [MJ/h]$		
<b>Hp 2</b>		
$Qh = E_{EMBEDDED} / \sum H_{ANNO} = [MJ/h]$		

**Tabella 3.3** - Metodologie per la stima della quota parte di energia o GHG riferita all'ora di funzionamento per un ipotetico fattore produttivo

Una volta nota la quantità di prodotto ottenuta a seguito di un'ora di funzionamento del fattore produttivo è possibile individuare la quota parte associabile alla singola unità di prodotto di filiera.

### 3.3.2 Valorizzazione dei diversi fattori di produzione

Determinata la quantità di fattore produttivo, a logorio totale o parziale, che è utilizzata per la produzione del prodotto di filiera è necessario valorizzare questa quantità in termini economici, energetici e ambientali.

Per quanto riguarda gli aspetti economici il calcolo non presenta nessuna particolare difficoltà se non quella di ricorrere a prezzi, tariffe e valorizzazione il più recenti possibili.

Relativamente invece alla valorizzazione energetica e ambientale dei fattori produttivi impiegati, sebbene il procedimento sia il medesimo, risulta molto più complicato. Gli **equivalenti energetici** (ovvero la quantità di energia primaria necessaria per produrre un'unità di massa del fattore produttivo, espressa generalmente in MJ/kg) e soprattutto i **fattori emissivi** detti anche "*carbon equivalent*" (ovvero la quantità di GHG emessa per produrre un'unità di massa del fattore produttivo, espressa generalmente in kg<sub>CO2</sub>

eq./kg) non sono sempre facili da reperire, spesso non sono recenti e a volte possono non essere disponibili. Talvolta, in loro assenza, occorre ricorrere a equivalenti che fanno riferimento a fattori produttivi simili.

Relativamente ai fattori emissivi essi vengono generalmente espressi in  $\text{kg}_{\text{CO}_2}$  eq./kg e tengono conto di altri due gas oltre all'anidride carbonica: il metano ( $\text{CH}_4$ ) e il monossido di azoto ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Nota la quantità di questi tre GHG è possibile calcolare la quantità di  $\text{CO}_2$  equivalente applicando ad ognuno di essi il rispettivo coefficiente GWP. Tale coefficiente misura il contributo di un gas all'effetto serra ed è calcolato per uno specifico periodo di tempo. Questo indice è basato su una scala relativa che confronta il gas considerato con un'uguale massa di  $\text{CO}_2$ , il cui GWP è, per definizione, pari a 1.

In **Tabella 3.4** sono riportati i GWP per i tra GHG appena citati, a titolo di esempio il calcolo del fattore emissivi per il gasolio.

Di fatto il Fattore emissivo Specifico è la somma, pesata per i rispettivi GWP, dei fattori emissivi specifici di  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ .

Di seguito viene riportata una breve rassegna in cui, per i principali fattori produttivi, vengono riportati i rispettivi equivalenti energetici e i fattori emissivi. In prima analisi è possibile notare l'estrema variabilità riscontrabile in bibliografia anche relativamente allo stesso fattore di produzione.

Gas	GWP	Fattori emissivi [ $\text{kg CO}_2\text{eq/MJ}$ ]
$\text{CO}_2$	1	0,074
$\text{CH}_4$	21	$4 \cdot 10^{-6}$
$\text{N}_2\text{O}$	310	$2,8 \cdot 10^{-5}$

**Tabella 3.4** – GWP (a 100 anni) e fattori emissivi per il gasolio (PCI = 42,69 MJ/kg)

Tali differenze possono essere dovute a:

- a) A diverse efficienze di produzione del fattore produttivo, questa variabile dipende dalle condizioni operative in cui è avvenuta la produzione. Ad esempio gli impianti di produzione di fertilizzanti Svedesi sono mediamente più efficienti di quelli Statunitensi (Borjesson, 1996; Wood, 2004) gli impianti tedeschi e scandinavi per la produzione di acciaio (componente essenziale per molte macchine operatrici e per i trattori) sono normalmente meno energivori di quelli statunitensi e russi. Teoricamente due identici trattori costruiti uno in Russia e uno in Germania e dunque con tecnologie differenti dovrebbero essere considerati nell'analisi utilizzando due differenti equivalenti energetici pur essendo uguali.
- b) Diversi metodi di suddivisione dell'input energetico e delle emissioni di GHG associate alla produzione tra il prodotto principale e gli eventuali sottoprodotti. Il considerare o meno nel calcolo dell'equivalente energetico (o del fattore emissivo) la presenza di un sottoprodotto può influenzare fortemente il risultato. Ad esempio (Wood, 2004) nel corso della fabbricazione di ammonio si ha una grande produzione di CO<sub>2</sub> che potrebbe essere utilizzata per varie applicazioni tra cui la produzione di urea per cui servono 0,74-0,75 kg CO<sub>2</sub> per kg di fertilizzante (Kim, 2000; Kim, 2004). Se così fosse questo GHG si presenta come un coprodotto ed è pertanto corretto associargli parte dell'input energetico e delle emissioni: in tal caso l'equivalente energetico dell'ammonio è pari a 32,08 MJ/kg e il fattore emissivo a 3,27 kg CO<sub>2</sub> eq./kg di N; se invece la CO<sub>2</sub> non è utilizzata tali parametri sono uguali a 70,62 MJ/kg e 9,72 kg CO<sub>2</sub> eq./kg di N.
- c) Alle modalità con cui è considerata la fase di trasporto del fattore di produzione stesso dal luogo in cui è recuperato a quello in cui viene utilizzato.
- d) Alla diversa metodologia di analisi impiegata. Non tutte le metodologie prevedono di considerare gli stessi input nel calcolo dell'Equivalente Energetico. Una delle metodologie più utilizzate per l'analisi energetica prevede di considerare solo gli input di energia di origine fossile

tralasciando tutte le altre fonti energetiche rinnovabili che possono essere utilizzate.

I rispettivi equivalenti energetici e i fattori di emissione dovrebbero considerare non solo l'energia immagazzinata all'interno del fattore produttivo stesso ma anche l'energia necessaria per produrlo e per trasportarlo al luogo di utilizzo.

### 3.3.3 Equivalenti energetici (EE) e Fattori Emissivi (FE)

#### Gasolio

Tra tutti i fattori di produzione il gasolio è uno di quelli per cui le variazioni dell'Equivalente Energetico (EE) sono meno ampie questo perché le tecnologie di produzione di questo carburante sono meno variabili rispetto ai processi che possono portare alla produzione di altri fattori di produzione. Le variabilità che possono essere talvolta riscontrate dipendono unicamente dalla diversa incidenza delle spese di trasporto del combustibile.

Nella maggior parte dei casi viene utilizzato un EE pari a 51,5 MJ/kg.

Equivalente Energetico	Unità di Misura	Fattore Emissivo	Unità di Misura	Riferimento
46,2	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Biondi, 1989
50,4	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Carillon, 1979
55,4	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Slessor, 1982
51,5	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Jarach, 1985
	MJ/kg	3,6	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Assoelettra, 2007
	MJ/kg	3,14	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	IPCC, 2006

**Tabella 3.5 – Equivalenti Energetici e Fattori Emissivi per il gasolio**

### Lubrificanti

Molto spesso i lubrificanti vengono considerati i medesimi EE e FE del gasolio. Tale scelta seppur motivata dal fatto che la massa di lubrificanti che viene consumata è ridotta non trova giustificazione dal confronto tra i rispettivi EE e FE che risultano superiori per i lubrificanti.

Equivalente Energetico	Unità di Misura	Fattore Emissivo	Unità di Misura	Riferimento
81,00	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Biondi, 1989
83,70	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Jarach, 1985
78,13	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Carillon, 1979
38,5	MJ/kg	3,46	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	AGO, 2004

**Tabella 3.6 – Equivalenti Energetici e Fattori Emissivi per i lubrificanti**



## Elettricità

Gli EE associati all'elettricità sono spesso molto differenti tra loro in funzione del luogo in cui si svolge l'analisi. Ciò è dovuto al fatto che la principale metodologia di analisi energetica (Gross Energy Requirement) prevede di considerare solo gli input energetici di origine fossile pertanto a seconda della tecnologia di produzione adottata variano gli EE. I valori più bassi corrispondono a kWh prodotti da fonti rinnovabili (Es. eolico, fotovoltaico, ecc.) mentre quelli più alti a impianti in cui vengono utilizzati combustibili fossili e in cui l'efficienza di trasformazione è bassa.

Equivalente Energetico	Unità di Misura	Fattore Emissivo	Unità di Misura	Riferimento
10,5	MJ/kWh	-	Kg CO <sub>2</sub> eq/kWh	Monarca, 2010
	MJ/kWh	0,48- 0,57	Kg CO <sub>2</sub> eq/kWh	ASSOELETTRA, 2006
	MJ/kWh	0,575	Kg CO <sub>2</sub> eq/kWh	Giontella, 2004

**Tabella 3.7–** Equivalenti Energetici e Fattori Emissivi per l'elettricità

## Azoto

La produzione dei fertilizzanti azotati è un processo che richiede una grande quantità di energia (1,4% del fabbisogno mondiale di energia) e comporta una notevole emissione di GHG (1,2% delle emissioni annue).

L'EE e il FE dovrebbero comprendere tutta l'energia o le emissioni di GHG associate con l'estrazione delle risorse, il trasporto delle materie prime e la fabbricazione del concime vero e proprio. Tali valori possono variare a causa di numerosi fattori i più importanti dei quali sono:

- Efficienza dei diversi impianti di produzione,
- Meccanismi di controllo delle emissioni,
- Criteri di ripartizione degli input tra gli eventuali sottoprodotti,

- Assunzioni adottate nel calcolo.

Per quanto riguarda la determinazione dell'EE e dei FE dei concimi azotati, ancor più che per quelli potassici e fosfatici, occorre sottolineare che, molto spesso si ricorre a valori medi. Tuttavia, la presenza di un numero molto elevato di formulati commerciali in cui varia non solo il titolo del concime stesso ma anche la forma chimica di azoto presente richiederebbe la disponibilità di EE specifici per ogni concime.

La stima di EE e FE comprende in primo luogo la valutazione dell'input energetico e delle emissioni per la produzione dell'ammoniaca e dell'acido nitrico ovvero dei due principali precursori di ogni fertilizzante azotato. Relativamente alle emissioni i principali GHG sono la CO<sub>2</sub> e l'N<sub>2</sub>O il primo legato alla produzione dell'ammoniaca (NH<sub>3</sub>) mentre il secondo alla produzione dell'acido nitrico.

In **Tabella 3.8** sono riportati alcuni dei valori medi che vengono solitamente utilizzati per l'azoto ed alcuni esempi per specifici concimi. Pochi studi analizzano sia l'EE che il FE dei diversi concimi azotati.

EE	Unità di Misura	FE	Unità di Misura	NOTE	Riferimento
74	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg		Jarach, 1985
81	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg		Pimentel, 1981
77	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg		Pimentel, 2002
42	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg		Borjesson, 1996
59	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg		Scholz, 1998
94-111	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Nitrato Ammonio	Boustead, 1979
71-75	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Urea	Boustead, 1979
59	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Solfato ammonico	Boustead, 1979
59	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	N-NH <sub>3</sub>	Scholz, 1998
77,8	MJ/kg <sub>N</sub>		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Urea	Lewis, 1982
65,1	MJ/kg <sub>N</sub>			Nitrato d'ammonio	Lewis, 1982
25-35	MJ/kg	2,0-2,6	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	N-NH <sub>3</sub>	Wood, 2004
	MJ/kg	2,8 <sup>a</sup> -10,7 <sup>b</sup>	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Acido Nitrico	Wood, 2004
	MJ/kg	3,0-9,5; 7,5 <sup>c</sup>	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Calcocianammide	Wood, 2004
	MJ/kg	3,0 <sup>a</sup> -7,1 <sup>b</sup> ; 6,8 <sup>c</sup>	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Nitrato d'ammonio	Wood, 2004
	MJ/kg	0,4-1,8; 0,6 <sup>c</sup>	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Urea	Wood, 2004
	MJ/kg	5,3	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	N-fertilizzante (27,7%)	Wood, 2004
65	MJ/kg	3,25	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Azoto	Saunders, 2006
28,82	MJ/kg	-	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Ammonio	Saunders, 2006
33,8	MJ/kg	-	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Urea	Saunders, 2006
31,62	MJ/kg	1,33	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Urea	Spugnoli, 2010
12,75	MJ/kg	1,59	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Nitrato d'ammonio	Spugnoli, 2010

Note: a, impianti con di abbattimento delle emissioni, b impianti privi di questo sistema, c media

**Tabella 3.8 – Equivalenti Energetici e Fattori Emissivi per concimi azotati o loro precursori**

### Fosforo e Potassio

A differenza che per i concimi azotati per quelli fosfatici e potassici si osserva una variabilità minore per gli EE e i FE riportati in bibliografia. Ciò è sicuramente dovuto al fatto che i processi produttivi sono più semplici e, almeno in parte, più standardizzati. Per entrambe queste tipologie di fertilizzante i valori di questi parametri sono sensibilmente inferiori a quelli appena riportati per l'azoto e ciò è essenzialmente dovuto al fatto che il processo è meno energivoro rispetto alla fissazione dell'azoto atmosferico.

I processi che devono essere considerati nella determinazione degli EE e dei FE sono gli stessi elencati per i concimi azotati.

La produzione di concimi fosfatici prevede la combinazione di rocce fosfatiche, acido solforico, acido fosforico e ammoniaca nel caso della produzione di binari N-P. La maggior parte delle emissioni sono legate alla CO<sub>2</sub> prodotta a causa del consumo di combustibili fossili. La presenza di reazioni esotermiche legate alla produzione dell'acido solforico potrebbe dare luogo a un'esportazione netta di energia ed è questo il motivo per il quale alcuni studi, condotti in moderni impianti, riportano emissioni di GHG negative.

La produzione di concimi potassici comporta l'utilizzo di rocce potassiche, acidi nitrico, solforico e fosforico che sono poi neutralizzati mediante ammoniaca. La maggior parte dell'input energetico e delle emissioni sono legate appunto all'utilizzo di ammoniaca.

In [Tabella 3.9](#) sono riportati EE e FE per concimi fosfatici e potassici.

EE	Unità di Misura	FE	Unità di Misura	NOTE	Riferimento
13,4	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Fosforo	Jarach, 1985
9,2	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Potassio	Jarach, 1985
19,2	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Fosforo	Kim, 2004
9,4	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Potassio	Kim, 2004
17,0	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Fosforo	Scholz, 1998
10,0	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Potassio	Scholz, 1998
11,0-18,0	MJ/kg <sub>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></sub>		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Fosforo	Stout, 1990
7,0-9,0	MJ/kg <sub>K<sub>2</sub>O</sub>		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg		
	MJ/kg	0,22-0,05 <sup>a</sup>	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Monofosfato	Wood, 2004
	MJ/kg	0,52-0,2 <sup>a</sup>	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Trifosfato	Wood, 2004
	MJ/kg	0,7-0,27 <sup>a</sup>	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Trifosfato	Wood, 2004
	MJ/kg	1,6-1,9	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	N-P-K (20-5-4)	Wood, 2004
	MJ/kg	0,34-0,97	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	N-P-K (15-15-15)	Wood, 2004
	MJ/kg	0,7	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Fosforo	Lal, 2004
	MJ/kg	9,6	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Potassio	Lal, 2004
15	MJ/kg	0,9	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Fosfato d'ammonio	Saunders, 2006
10	MJ/kg	0,6	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Potassio	Saunders, 2006
15,26	MJ/kg	1,72	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Fosfato d'ammonio	Spugnoli, 2010

Note: a, impianti di nuova concezione in grado di capitalizzare l'energia prodotta con le reazioni esotermiche legate alla produzione di acido solforico, b, c

**Tabella 3.9** – Equivalenti Energetici e Fattori Emissivi per concimi fosfatici e potassici

### Fertilizzanti organici

Gli EE per i fertilizzanti organici (liquami, letami e altri ammendanti) comprendono generalmente solo l'energia necessaria per la loro movimentazione, il loro stoccaggio e, in generale, per la loro gestione. Il loro impiego pur comportando un input energetico modesto molto spesso si rivela decisivo per aumentare la sostenibilità di una filiera perché permette la sostituzione dei ben più energivori concimi di origine minerale. I riferimenti bibliografici disponibili riguardano unicamente reflui palabili, i dati che fan riferimento ai liquami sono difficilmente reperibili.

Equivalente Energetico	Unità di Misura	Fattore Emissivo	Unità di Misura	NOTE	Riferimento
0,42	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Letame	Jarach, 1985
0,10	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Letame	Biondi, 1989
0,30	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Letame	Gezer, 2003

**Tabella 3.10 – Equivalenti Energetici e Fattori Emissivi per alcuni fertilizzanti organici**

### Erbicidi e Fitofarmaci

Ancor più che per i fertilizzanti azotati per erbicidi e fitofarmaci sarebbe necessario poter disporre di EE specifici per ogni prodotto. Generalmente però, anche in questo caso, vengono utilizzati EE generici che "rappresentano" tutti i prodotti e che sono riferiti alla media complessiva tra i prodotti. Solo recentemente sono stati pubblicati alcuni studi specifici che riferiscono l'equivalente energetico alla massa di principio attivo.

Sebbene le variazioni tra gli EE riferibili ai diversi prodotti siano maggiori rispetto a quelle riscontrabili tra i diversi concimi azotati l'esigenza di disporre di valori specifici per i diversi erbicidi e fitofarmaci è resa meno impellente dalla ridotta massa di prodotto che viene solitamente impiegato nel corso del ciclo produttivo.

In **Tabella 3.11** sono riportati alcuni valori relativi a erbicidi e antiparassitari. Trattandosi di tipologie di prodotto dalla composizione estremamente eterogenea per maggior dettagli relativamente ai singoli prodotti si rimanda a pubblicazioni in cui questi temi sono specificatamente trattati (LaI, 2004; Audsley, 2009)

Equivalente Energetico	Unità di Misura	Fattore Emissivo	Unità di Misura	NOTE	Riferimento
81,5	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Erbicida	Jarach, 1985
91,0	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Erbicida	Biondi, 1989
56,0	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Antiparassitario	Biondi, 1989
429,0	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Erbicida	Kim, 2004
440,0	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Antiparassitario	Kim, 2004
277,0	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Erbicida	West, 2002
261,0	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Antiparassitario	West, 2002
310,0	MJ/kg	18,6	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Erbicida	Saunders, 2006
210,0	MJ/kg	12,6	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Fungicida	Saunders, 2006
315	MJ/kg	18,9	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Insetticida	Saunders, 2006
175	MJ/kg	10,5	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Regolatore crescita	Saunders, 2006
140	MJ/kg	6,35	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Insetticida (Isoproturon)	Spugnoli, 2010

**Tabella 3.11** – Equivalenti Energetici e Fattori Emissivi per erbicidi e antiparassitari

**Sementi – Talee**

L'Equivalente Energetico per le sementi può essere calcolato in modo analitico considerando il materiale di impianto come il prodotto finale di un apposito processo produttivo oppure può essere stimato empiricamente assumendo un input energetico pari al 150% di quello richiesto normalmente per la sua produzione.

In **Tabella 3.12** vengono riportati alcuni EE per le diverse sementi, in generale, a causa della possibilità di fissare azoto, le leguminose hanno EE per le sementi inferiori rispetto a quelli caratteristici di specie appartenenti ad altre famiglie.

Equivalente Energetico	Unità di Misura	Fattore Emissivo	Unità di Misura	NOTE	Riferimento
	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Erbicida	Jarach, 1985
<b>50,00</b>	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Non leguminose	Monarca, 2009
<b>20,00</b>	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Leguminose	Monarca, 2009
<b>104,65</b>	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Mais	Pimentel, 1979
<b>27,63</b>	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Frumento	Pimentel, 1979
<b>33,50</b>	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Soia	Pimentel, 1979
<b>33</b>	MJ/kg	<b>5,6</b>	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Cotone	USDA, 2004
<b>6,93</b>	MJ/kg	<b>6,93</b>	Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Girasole	Spugnoli, 2010
<b>38,5</b>	MJ/kg		Kg CO <sub>2</sub> eq/kg	Talee di pioppo	Fiala, 2009

**Tabella 3.12 – Equivalenti Energetici e Fattori Emissivi per alcune sementi**



### Trattori e macchine operatrici

La determinazione dell'energia immagazzinata in un trattore o in una macchina operatrice può essere suddivisa in:

- Energia necessaria per la produzione, il trasporto e l'assemblaggio di tutti i materiali che costituiscono la macchina stessa;
- Energia necessaria per il trasporto della macchina;
- Energia che nel corso della vita della macchina verrà spesa per la sua manutenzione e per la sua riparazione;
- Energia spesa, direttamente o indirettamente, per il loro ricovero.

La prima quota dell'energia *embedded* di una macchina, indicata al punto A, noti tutti i componenti della macchina e i rispettivi EE, può essere ricavata dalla sommatoria dei prodotti tra la massa di ogni componente per il rispettivo equivalente secondo la seguente formula:

$$E_{EMBEDDED} = \sum m_i \cdot EE_i = [\text{MJ}]$$

con:

$E_{EMBEDDED}$  = Energia immagazzinata nella macchina [MJ]

$m_i$  = Massa del materiale  $i$  utilizzata nella produzione della macchina [kg]

$EE_i$  = Equivalente energetico del materiale  $i$  [MJ/kg]

Seppur chiara, semplice e di immediata comprensione questa formula risulta a tutt'oggi praticamente inapplicata per quanto riguarda le principali macchine agricole a causa del fatto che il reperimento di informazioni dettagliate relativamente alla composizione delle singole macchine si presenta molto difficoltoso. Tale approccio può essere adottato solo per alcune tipologie di macchine operatrici la cui costruzione comporta l'impiego di un numero limitato di materiali (es. aratri, erpici) ma è estremamente complicato quelle macchine la cui composizione è particolarmente complessa (trattrici, semoventi, seminatrici, irroratrici, ecc.). Infatti

relativamente alla composizione di un trattore nessuno studio è stato finora pubblicato e tutte le stime disponibili si rifanno a analisi condotte nel campo dell'industria automobilistica e, in particolare, a un'indagine condotta nel 1967 da Pimentel (Pimentel, 1973) nelle fabbriche di Chicago. E' pur vero che anche per i costruttori stessi di trattori non è semplice reperire informazioni su tutti i materiali utilizzati per la fabbricazione dato che molte componenti vengono commissionate a fornitori esterni.

In **Tabella 3.13** sono riportati gli EE per i principali materiali comunemente utilizzati per la fabbricazione di macchine operatrici e trattori.

MATERIALE	Equivalente Energetico	Unità di Misura
Alluminio	18,3	MJ/kg
Plastica	44,6	MJ/kg
Gomma	79,9	MJ/kg

**Tabella 3.13** – Equivalenti energetici per i principali materiali utilizzati nella fabbricazione delle diverse macchine

Dagli studi di Pimentel alcuni altri studi sono stati condotti relativamente al calcolo dell'input energetico associato alla **fabbricazione** di autovetture in essi si riportano valori di input pari a 81,2 MJ/kg per un'auto di media cilindrata negli USA nel 1975, a 86,6 MJ/kg per una Ford Taurus nel 1990 e di 80,8 MJ/kg per una Golf in Germania nel 1994 (Mikkola, 2010). E' interessante notare che sebbene dalla fine degli Anni Cinquanta al 2000 l'uso di energia nella produzione di acciaio sia passato da 35,6 a 25,9 MJ/kg negli USA e da 34,1 a 24,0 MJ/kg in Germania l'EE per un'autovettura sia sostanzialmente lo stesso. Nel corso degli anni, il sempre maggior ricorso a materiali (plastiche, fibra di vetro, alluminio) a più alto input energetico ha compensato i benefici derivanti dall'aumento di efficienza dell'industria

siderurgica. Da quanto appena riportato si evince, in primo luogo, che qual'ora effettuata l'analisi dell'energia *embedded* nelle trattatrici non può essere basata unicamente sull'input dei principali componenti metalliche e, secondariamente, che gli EE ricavati negli anni Settanta potrebbero essere tutt'ora validi.

L'energia per la **manutenzione e la riparazione** (M&R) comprende la fabbricazione, l'immagazzinamento e il trasporto dei pezzi di ricambio oltre ai servizi di manutenzione vera e propria. Tali voci sono variabili tra le diverse categorie di macchine e dipendono anche dal ciclo produttivo in cui sono impiegate ad anche dalle condizioni climatiche in cui operano. A causa della eterogeneità delle diverse spese energetiche che costituiscono la spesa per manutenzione e riparazione la determinazione di questa quota dell'energia *embedded* nella macchina è alquanto complicata. Mikkola ([Mikkola, 2010](#)) rileva che i pochi studi a riguardo riportano percentuali per la M&R che variano, a seconda delle assunzioni fatte, dal 6 al 138% dell'input per la fabbricazione e conclude che non dovrebbero essere utilizzati valori inferiori al 55% per la maggior parte delle operatrici.

L'energia necessaria per il **trasporto** della macchine dalla fabbrica di produzione all'azienda agricola in cui opererà è spesa una sola volta nel ciclo di vita del trattore o dell'operatrice tuttavia le poche stime disponibili indicano una spesa di 8,8 MJ/kg ([Loewer, 1977](#)).

L'input energetico associato al ricovero di trattori e operatrici è legato sostanzialmente all'ammortamento nel corso degli anni del energia immagazzinata negli edifici in cui questo avviene. A riguardo la disponibilità di parametri relativi agli EE dei fabbricati è veramente ridotta, Monarca ([Monarca, 2009](#)) riporta un EE di 1240 MJ/m<sup>2</sup> mentre Saunders di 29,5 MJ/m<sup>2</sup>-anno ([Saunders, 2006](#)).

In **Tabella 3.14** sono riportati alcuni valori relativamente agli EE utilizzati per trattori e macchine operatrici. Non vengono riportati i fattori emissivi specifici perché trattandosi di input indiretti la stima delle emissioni

associate al loro utilizzo è effettuata sulla base dell'energia consumata per la loro produzione utilizzando (Paragrafo 2.3.4).

Relativamente alle operatrici è necessario sottolineare che sebbene in molti studi venga utilizzato un EE unico per tutte le differenti categorie di macchine tale semplificazione non appare per nulla giustificata in considerazione delle ampie differenze nella loro composizione. Se infatti per alcune tipologie di operatrici come ad esempio quelle per la lavorazione primaria e secondaria del terreno (aratri, erpici, ecc.) può aver senso utilizzare un unico EE data la loro composizione molto simile ciò si presenta sicuramente come una fonte di errore per operatrici composte non solo da acciaio e altri metalli ma da percentuali variabili di plastica, resine, alluminio e gomma.

Equivalente Energetico	Unità di Misura	NOTE	Riferimento
92,00	MJ/kg	Trattrice	Jarach, 1985
69,00	MJ/kg	Operatrice	Jarach, 1985
80,23	MJ/kg	Trattrice	Hornacek, 1979
160	MJ/kg	Trattori	Wells,2001
80	MJ/kg	Operatrici	Wells,2001

**Tabella 3.14** – Equivalenti Energetici e Fattori Emissivi per alcune trattori e macchine operatrici

In considerazione di quanto appena detto e considerando che talvolta la sostenibilità energetica ed ambientale della filiere è incerta presentando rapporti tra ricavi e costi energetici prossimi all'unità maggiore attenzione è stata dedicata al computo degli input indiretti legati all'impiego delle principali macchine operatrici (Hagstrom, 2005). Una stima più precisa può essere fatta tenendo in considerazione la percentuale dei principali materiali

che sono presenti nella singola operatrice. Generalmente alluminio e altri metalli sommati gomma e plastica compongono più del 95% di un'operatrice (Volvo, 2010). Nota la massa dei diversi materiali, conoscendo gli EE riportati in Tabella 2.13, è possibile calcolare l'energia primaria necessaria per la loro produzione. Per calcolare l'energia *embedded* nella specifica operatrice a tale quota occorre però sommare l'energia necessaria per la fabbricazione, l'assemblaggio e il trasporto delle componenti che la costituiscono.

OPERATRICE	Unità di Misura	Equivalente Energetico
Aratro	MJ/kg	45,3
Erpice a denti fissi	MJ/kg	36,5
Erpice rotativo	MJ/kg	37,2
Erpice a dischi	MJ/kg	34,5
Coltivatore	MJ/kg	36,5
Trapianta talee	MJ/kg	40,2
Spandiconcime	MJ/kg	31,1
Atomizzatore	MJ/kg	42,6
Seminatrice	MJ/kg	40,1
Falciatrinciacaricatrice	MJ/kg	43,1
Trailer	MJ/kg	36,6
Ripuntatore	MJ/kg	36,2
Cippatrice	MJ/kg	36,7
Imballatrice	MJ/kg	39,1

**Tabella 3.15** – Equivalenti Energetici e Fattori Emissivi per alcune trattrici e macchine operatrici

In **Tabella 3.15** sono riportati gli EE per le principali macchine operatrici calcolati con il metodo appena descritto e considerando un input energetico per la fabbricazione delle componenti di 11,4 MJ/kg, di 5,7 MJ/kg per il loro assemblaggio e di 1,3 MJ/kg per il trasporto.

Nel caso di un erpice costituito esclusivamente da acciaio l'EE è dato da:

$$18,3 + 11,4 + 5,7 + 1,3 = 36,7 \text{ MJ/kg.}$$

### 3.3.4 Fattore Emissivo Unitario Medio

Il fattore Emissivo Unitario Medio esprime la quantità di gas ad effetto serra mediamente emessa per la produzione di un unità di energia elettrica ed è solitamente espresso in kg CO<sub>2</sub> eq/kW<sub>e</sub>. Si tratta di un parametro "sito specifico", cioè strettamente dipendente dalla tecnologia con cui l'energia elettrica è prodotta. Ad esempio, le emissioni legate alla produzione di 1 kWh da combustibili fossili sono infatti generalmente notevolmente superiori a quelle derivanti dalla produzione della medesima quantità di energia da fonti rinnovabili (es. eolico).

Per stimare la quantità emessa di GHG associata all'impiego dei fattori di produzione a logorio parziale, nota la loro energia *embedded*, si utilizza quindi il fattore emissivo unitario medio:

$$EM_i = E_{EMBEDDED} \cdot FEM = [\text{kg CO}_2 \text{ eq}]$$

con:

$EM_i$  = Emissioni legate all'utilizzo del fattore produttivo  $i$  [kg CO<sub>2</sub> eq]

$E_{EMBEDDED}$  = Energia immagazzinata nella macchina [kWh]

FEM = Fattore emissivo Unitario Medio [kg CO<sub>2</sub> eq/kWh]

Tale quantità di GHG ( $EM_i$ ) viene poi successivamente ripartita secondo il procedimento riportato precedentemente.

### 3.4 Problematiche

#### 3.4.1 Scelta e selezione dei parametri

La scelta e la selezione dei parametri di calcolo utilizzati per la valutazione della sostenibilità della filiera agro-energetica è un aspetto che deve essere attentamente valutato perché può avere un peso decisivo sui risultati ottenuti e potrebbe influenzare anche la confrontabilità tra studi differenti.

Soprattutto per quanto riguarda la valutazione degli aspetti ambientali, la disponibilità di informazioni relative ai fattori emissivi e agli altri parametri di calcolo necessari è spesso limitata e, talvolta, si hanno a disposizione dati con un differente grado di dettaglio. Qualora i dati di input disponibili appartengono a entrambe le categorie appena citate è opportuno operare una uniformazione dei dati il che, generalmente, porta all'utilizzo di **parametri di carattere generale**.

Quindi nella fase di impostazione dello studio e di definizione dei confini, relativamente ai parametri di calcolo, la scelta che si impone può prevedere l'utilizzo di parametri di calcolo di carattere generale oppure di informazioni dettagliate, sito-specifiche e puntuali: tale scelta è influenzata dall'obiettivo dello studio. Se lo scopo è la valutazione di un processo produttivo contestualizzato, riferibile ad una situazione specifica l'analisi non può essere attuata se non con **parametri specifici**. L'uso di parametri di carattere generale è la scelta migliore qualora lo scopo dell'analisi sia la valutazione di un processo produttivo ideale, "medio", non contestualizzato in una specifica situazione, i risultati ottenuti in questo caso sono riferibili a una molteplicità di situazioni e facilmente confrontabili con quelli ottenuti in altri studi in cui gli stessi criteri di scelta sono attuati.

### 3.4.2 Indici per la valutazione

L'indice più utilizzato indice per la valutazione della sostenibilità della filiera è il rapporto input/output siano essi economici, energetici o ambientali.

Viene qui di seguito discussa brevemente l'opportunità che tali indici siano utilizzati per il confronto tra filiere agro-energetiche diverse e per la loro successiva ottimizzazione. Infatti, a seconda di quello che si considera come il **fattore limitante** l'espansione delle bioenergie il rapporto input/output potrebbe non essere l'indice più adatto. La domanda che dovrebbe guidare la scelta del miglior indice per la valutazione delle filiere è sostanzialmente legata alla scelta del **fattore limitante** per il quale si intende massimizzare il rendimento (Schlamadinger, 1998).

In **Tabella 3.16** sono riportate le possibili casistiche in relazione ai diversi fattori limitanti. La minimizzazione del costo energetico specifico (MJ/kWh) e ambientale specifico (kg CO<sub>2</sub>eq./kWh) (casi 1A e 2A) non è sempre la miglior soluzione. Per ottenere ciò, parte dell'energia prodotta potrebbe essere utilizzata per il funzionamento di meccanismi (es. filtri) in grado di ottenere una riduzione delle emissioni specifiche ma anche un drastico calo dell'energia prodotta.

In generale, il miglior indice di ottimizzazione è quello che permette la **massimizzazione dei ricavi** per unità di fattore limitante (Casi 1B, 2B e 3A).

Non sempre la riduzione degli input utilizzati nella filiera comporta un miglioramento della sua sostenibilità. Se per esempio con una fertilizzazione di 5 GJ di azoto si ottiene una resa di biomassa di 10 t/ha e incrementando la concimazione a 10 GJ di N la resa passasse a 15 t/ha si otterrebbe un aumento del costo energetico specifico (0,65 GJ/t contro 0,5 GJ/t) ma anche un incremento del benefico ad ettaro (da 10 a 15 t) superiore all'incremento del costo energetico complessivo (da 5 a 10 GJ) .



CASO	Risorsa Limitante		Indice di ottimizzazione
1	Disponibilità della biomassa per la produzione di energia	A	Minimizzare il costo energetico e l'emissione di GHG per kg di biomassa
		B	Massimizzare il ricavo energetico e quello ambientale per kg di biomassa
2	Quantità di bioenergia vendibile sul mercato	A	Minimizzare il costo energetico e l'emissione di GHG per kWh
		B	Massimizzare il ricavo energetico e quello ambientale per kWh
3	Disponibilità di superficie per la coltivazione	A	Massimizzare il ricavo energetico e quello ambientale per ettaro

**Tabella 3.16** – Indici di ottimizzazione da considerare per l'ottimizzazione della filiere agro-energetica relativamente agli aspetti energetico-ambientali

### 3.5 Bibliografia

ASSOELETTRICA, 2007 - L'industria elettrica Italiana: Il presente e il futuro. Assemblea annuale Roma, 13 giugno 2007

Audsley E. et altri, 2009 - Estimation greenhouse gas emission from agricultural pesticide manufacture and use, Cranfield University, p. 1-120

Australian Greenhouse Office. 2004 - AGO Factors and Methods Workbook. Australian National Greenhouse Gas Inventory, Emissions Analysis Team, International Land and Analysis Division, Australian Greenhouse Office, ISBN: 1920840 370.

Bernesson S., Nilsson D., Hansson P.A. 2004 - A limited LCA comparing large- and small-scale production of rape methyl ester (RME) under Swedish conditions. *Biomass and Bioenergy*, 26 (6), p. 545-559

- Biondi P; Panaro V; Pellizzi G., 1989 - Le richieste d'energia del sistema agricolo italiano, PFE, LB-20. Consiglio Nazionale delle Ricerche—Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente, Roma, Italia, p 387
- Borjesson P., 1996 - Energy analysis of biomass production and transportation. *Biomass and Bioenergy*, 11, 305–318.
- Boustead, I., Hancock, G.F., 1979 - Handbook of industrial energy analysis, Ellis Horwood, Chichester,.
- Carillon R., 1979 - L'analyse energetique de l'acte agricole. Etude du Centre national d'etudes et d'expérimentation de machinisme agricole, 458, 1–48
- Fiala M., Bacenetti J., 2009 – Filiere agro-energetiche a confronto: bilancio economico, energetico e ambientale Proceedings AIIA2009 Ricerca e innovazione nell'ingegneria agraria dei biosistemi agro/territoriali, Ischia (NA), pp. 11, 12-16 settembre 2009.
- Fiala M., Bacenetti J., 2009 – Il trapianto di astoni di pioppo, Convegno nazionale IV Sezione AIIA: “La produzione di energia da biomasse agroforestali e' sempre una proposta attuale?”, Udine 3-4 Dicembre 2009, p. 83-84
- Fiala, M., 2008 - Costo di produzione e profitto del pioppo da cippato, *Estimo e Territorio*, 11. 45-54.
- Gezer I; Acaroglu M; Haciseferogullari H., 2003 - Use of energy and labour in apricot agriculture in Turkey. *Biomass and Bioenergy*, 24, 215–219
- Giontella D, Danieli P.P., 2006 - Analisi di sostenibilità di un modello agricolo-zootecnico. XVI°Congresso della Società Italiana di Ecologia, Viterbo/Civitavecchia 2006, p. 1-11
- Hagstrom P., 2005 - Biomass Potential for Heat, Electricity and Vehicle Fuel in Sweden, Doctoral Thesis, Acta Universitatis Agriculturae Sueciae
- Hornacek M., 1979 - Application de l'analyse energetique a` 14 exploitations agricoles [Energetic analysis of 14 agricultural practices.]. Etudes du Centre

National d'Études et d'Expérimentation de Machinisme Agricole (CNEEMA), 457, 1–120

IPCC-NGGIP, 2006 - Database on greenhouse gas emission factors. Consultabile all'URL: <http://www.ipccnggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>.

Jacobs, S., 2006 - Comparison of Life Cycle Energy Consumption of Alternative Irrigation Systems. Faculty of Engineering and Surveying, University of Southern Queensland, Toowoomba, Australia.

Jarach M., 1985 - Sui valori di equivalenza energetica per l'analisi e il bilancio energetico in agricoltura. Rivista di Ingegneria Agraria, 2, 102–114

Khabbaz B.G., Chen G., Baillie C., 2010 - Energy and Greenhouse Gas Emissions of Australian Cotton: From Field to Fabric, XVIIth World Congress of The International Commission Of Agricultural And Biosystems Engineering (CIGR), CSBE/SCGAB, Québec City, Canada June 13-17, 2010

Kim S., 2000 - Allocations procedure in a multi-output process: An illustration of ISO 14041, International Journal of LCA, 5, 221-228.

Kim S., Dale E., 2004 - Cumulative Energy and global warming potential from production of biomass for biobased products, Journal for Industrial Ecology, 7, 147-162

Lal R., 2004 - Carbon emissions from farm operations, Environmental International, 30, 981,990

Lewis DA. The role of energy in U.K. agriculture. In: Robinson DW, Mollan RC, editors. 1982 - Energy management and agriculture. Proc. First summer school in agriculture, Dublin, Ireland. Amsterdam: Elsevier; p. 43– 65.

Loewer J., 1977 - Beef: production of beef with minimum grain and fossil energy inputs, Reports to NSF

Mikkola H., 2010 - Indirect energy input of agricultural machinery in bioenergy production, Renewable Energy, 35, 23-28

Pawlak J., Pellizzi G., Fiala M. 2001 - Development of agricultural mechanisation to ensure a long-term world food supply. General background information and requirements. Proceedings of XII Meeting Club of Bologna, Bologna, Italy, 17-18 november, 24-47

Pellizzi G. et altri., 2006 – Meccanica agraria: Il trattore e le macchine operatrici, Edagricole, pp. 320

Pimentel D, Hurd LE, Bellotti AC, Forster MJ, Oka IN, Sholes OD, et al., 1973 - Food production and the energy crisis. Science 2 November 1973; 182(4111):443–9.

Pimentel P; Pimentel M., 1979 - Food, Energy and Society. Edward Arnold, London

Pimentel, D. 1991 - Ethanol fuels: Energy security, economics, and the environment. Journal of Agricultural and Environmental Ethics 4: 1–13.

Pimentel, D. 2002 - Limits of biomass utilization. In Encyclopedia of Physical Science and Technology. New York: Academic.

Riva G. et altri, 2006 - Agroenergie: Filiere Locali per la Produzione di Energia Elettrica da Girasole, Progetto Probio, p. 1-46.

Saunders, C., Barber, A., and Taylor, G., 2006 - Food Miles – Comparative Energy/Emissions Performance of New Zealand's Agriculture Industry". ISSN: 1170-7682, ISBN: 0-909042-71-3, Research Report No. 285, Agribusiness and Economics Research Unit, Lincoln University, New Zealand.

Schlamadinger B. et altri, 1998 – Towards a standard methodology for greenhouse gas balances of bioenergy systems in comparison with fossil energy systems, Biomass & Bioenergy, 13, 359-375.

Scholz V; Berg W; Kaulfub P., 1998 - Energy balance of solid biofuels. Journal of Agricultural Engineering Research, 71, 263–272

Shapouri H., Duffield JA, Wang M., 2002 - The energy balance of corn ethanol: an update, Agricultural Economics Reports, 1-19

Slessor M., Wallace I., 1982 - Energy consumption per tonne of competing agricultural products available to the EC (Commission of the European Communities, ed.). Information on Agriculture, 85, 168

Spugnoli P., et altri. 2010 – Energy and CO<sub>2</sub> eq analysis of the agricultural phase in the sunflower biodiesel chain, XVIIth World Congress of The International Commission Of Agricultural And Biosystems Engineering (CIGR), CSBE/SCGAB, Québec City, Canada June 13-17, 2010

United States Department of Agriculture (USDA). (2009). "Life Cycle Inventory for Cotton (Field to Bale – Version 1.0 – 19 June 2009)". USDA.

Vande Walle I. et altri, 2007 – Short rotation Forestry of birch, maple, poplar and willow in Flanders (Belgium) II: Energy production and CO<sub>2</sub> emission reduction potential, Biomass & Bioenergy, 31, 276-283.

Volvo, 2010 - Construction equipment environmental declaration, [www.volvo.com](http://www.volvo.com)

Wells, C. (2001). "Total Energy Indicators of Agricultural Sustainability: Dairy Farming Case Study". ISBN: 0-478-07968-0, ISSN: 1171-4662 Department of Physics, University of Otago.

Wood S., Cowie A., 2004 - A review of Greenhouse Gas Emissions Factors from Fertilizer Production, IEA Bioenergy Task 38

## 4 Metodologie per l'analisi economica, energetica e ambientale

### 4.1 Stato dell'arte

Nel corso degli anni il concetto di sostenibilità si è evoluto. Fino alla crisi petrolifera degli Anni Settanta la sostenibilità di un processo produttivo e quindi anche di una filiera energetica era valutata solo in termini economici ovvero valutando come unico indice il **rapporto ricavi/costi**: tanto più questo era superiore a 1 tanto più la filiera era sostenibile. La possibilità di aumentare l'efficienza del processo e/o di ridurre i consumi di energia erano soluzioni ricercate al solo scopo di ridurre la spesa per l'acquisto di energia e quindi il costo di produzione.

A seguito della Guerra del Kippur del 1973 e il conseguente calo delle forniture di petrolio dai Paesi OPEC associato al drammatico aumento dei prezzi finì un'epoca caratterizzata da grande disponibilità di energia a buon mercato. Con l'avvento della **crisi petrolifera** gli aspetti energetici di un processo produttivo hanno acquisito sempre maggior importanza: il risparmio energetico e la ricerca di processi produttivi a maggiore efficienza non sono state più considerati solo come una possibilità per aumentare i profitti ma anche come possibili vie per ridurre la dipendenza dai Paesi arabi principali fornitori di combustibili fossili. A seguito di ciò, la sostenibilità energetica di un processo produttivo è diventata un fattore sempre più importante e complementare rispetto a quella economica; parallelamente si sono sviluppate adeguate metodologie di analisi in grado di valutare costi e ricavi energetici di una filiera.

Invece, per quanto riguarda gli aspetti ambientali di una filiera e in particolare l'emissione di gas ad effetto serra (GHG) la loro importanza e il

dibattito che li coinvolge è ancora più recente rispetto a quello relativo agli aspetti energetici.

Sebbene l'incremento della concentrazione di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) nell'atmosfera sia un fenomeno che trae le sue origini a partire dalla rivoluzione industriale (la concentrazione atmosferica di anidride carbonica prima della rivoluzione industriale era pari a 280 ppm ed è aumentata del 35% da allora e del 20% dal 1958, **Figura 4.1**) è solo negli ultimi 20 anni che è stata posta maggiore attenzione sulle problematiche che il suo accumulo comporta e sulle possibili soluzioni per limitarne le emissioni insieme a quelle degli altri gas ad effetto serra. Le metodologie per l'analisi ambientale e in particolare degli aspetti legati alle emissioni di GHG sono quindi di recente introduzione, la maggior parte di esse sono state sviluppate a seguito o in concomitanza degli accordi di Kyoto nel 1997.

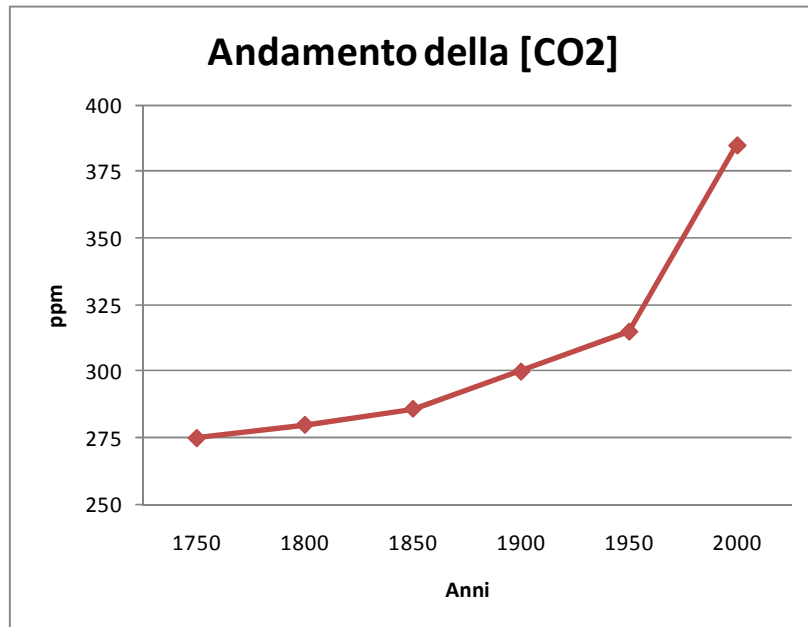
Alla luce di quanto appena detto non è difficile comprendere il perché la maggior parte degli studi condotti su filiere agro-energetiche si riferiscono agli aspetti economici della produzione di bioenergia mentre quelli energetici ed ambientali hanno ricevuto crescente attenzione solo recentemente.

Anche per quanto riguarda le **metodologie d'analisi** la valutazione economica si presenta più agevole. Rispetto alla economica invece la valutazione energetica-ambientale di una filiera si presenta più difficoltosa e maggiormente soggetta a variabilità dei risultati. Ciò perché, a differenza dell'analisi economica per la quale esistono consolidate metodologie di riferimento, per la valutazione energetica e, soprattutto, ambientale i metodi di analisi sono più recenti, spesso, differiscono sostanzialmente tra loro e lasciano talvolta molto spazio alla soggettività.

Il problema principale riguardo alla valutazione energetico-ambientale non è tanto dovuto alla mancanza di idonei strumenti per l'analisi, quanto piuttosto alla grande variabilità di risultati che si possono ottenere dal loro impiego.

Alcune volte tali differenze sono giustificate dal fatto che l'analisi riguarda filiere simili ma attuate con "prodotti primari" diversi e in differenti aree

geografiche (è il caso, a esempio, del bio-etanolo da granella di mais negli USA piuttosto che quello da canna da zucchero in Brasile). Tuttavia numerosi studi (Pimentel, 2002; Shapouri, 2004; Patzek, 2004; Farrel, 2006) condotti sulla sostenibilità dell'etanolo da mais negli Stati Uniti hanno condotto a risultati opposti: in alcuni di essi il rapporto costi/ricavi energetici è maggiore di 1 mentre in altri è inferiore a questa soglia.



**Figura 4.1** – Andamento della concentrazione atmosferica di anidride carbonica dal 1750 al 2000, il 64% di questo incremento è legato all'utilizzo di combustibili fossili e il 20% circa alla deforestazione

Brevemente le differenze che si possono riscontrare si possono ricondurre a:

- 1) fattori dipendenti dalla metodologia d'analisi impiegata;
- 2) fattori non dipendenti dalla metodologia ma che riguardano la scelta dei parametri utilizzati.



Per quanto riguarda la metodologia d'analisi è importante sottolineare che, come detto, esistendone molteplici, per l'analisi di una filiera se ne possono applicare diverse ottenendo risultati differenti e non sempre confrontabili.

Nel caso dell'analisi energetica, una delle metodologie più diffuse prevede la suddivisione dei fattori produttivi in diretti e indiretti, secondo le definizioni riportate nel precedente Capitolo 2. Numerosi studi vengono però tuttora condotti senza computare gli input indiretti, causa le difficoltà nella loro quantificazione, supponendone un "impatto" nullo tra flusso in entrata e in uscita e un peso relativamente modesto sul bilancio complessivo di filiera. Come già detto in precedenza, nel caso delle filiere agro-energetiche in cui fase di campo è intensamente meccanizzata e/o in cui la fase di conversione prevede grossi impianti, l'incidenza degli input indiretti (legati cioè ai fattori produttivi a logorio parziale) sul costo energetico totale può tuttavia arrivare al 20% e, dunque, trascurare queste voci può comportare errori di non poco conto.

Inoltre, sempre con riferimento alle differenze legate alla metodologia d'analisi impiegata, per filiere agro-energetiche nelle quali vi è una rilevante produzione di sottoprodotti (DGGs per la filiera bio-etanolo, pannello proteico per le filiere olio grezzo e bio-diesel) il loro computo o meno nel calcolo dei benefici influenza, spesso in modo sostanziale, il risultato.

Viceversa, talvolta si osservano risultati differenti pur in analisi condotte con identica metodologia. Ciò è generalmente causato dall'utilizzo di parametri diversi (produzioni per ettaro, rendimenti di trasformazione, valorizzazione dei diversi fattori produttivi impiegati e dei sottoprodotti di filiera, equivalenti energetici, ecc.).

Per l'analisi economica, energetica e ambientale (EEA) nel corso degli anni sono stati via via sviluppati strumenti e **modelli di calcolo** più o meno complessi, sviluppati in ambiente Microsoft Excel o tramite veri e propri linguaggi di programmazione, allo scopo di analizzare le principali filiere agro-energetiche o parti di esse. La loro complessità e completezza è variabile in funzione dell'obiettivo specifico per cui sono stati sviluppati;

tuttavia, generalizzando, la gran parte di tali strumenti presenta alcuni limiti che ne rendono spesso complicato l'utilizzo per una analisi completa della sostenibilità EEA di una filiera.

Brevemente, i principali limiti riscontrabili sono riconducibili ai seguenti aspetti:

- non vengono considerate tutte le filiere agro-energetiche attualmente diffuse e tecnologicamente mature;
- l'analisi è limitata alle fasi/operazioni caratteristiche della filiera trascurando le altre che comunque sono indispensabili per la produzione e che, comunque, comportano un costo sia economico che energetico ed ambientale;
- la flessibilità di tali strumenti è limitata, rendendo difficoltosa la valutazione di filiere simili a quelle per cui sono stati sviluppati.

## 4.2 Linee guida generali

L'analisi di una filiera agro-energetica, sia che l'indagine riguardi gli aspetti economici sia che riguardi quelli energetico-ambientali, deve prevedere alcuni passaggi chiave che permetteranno di interpretare più facilmente i risultati consentendo anche un più agevole confronto con quelli derivanti da altri studi.

Tra questi alcuni dei più importanti sono la definizione dei confini del sistema, la scelta dell'unità funzionale a cui riferire i risultati e la definizione dei flussi di massa che caratterizzano il sistema analizzato.

La definizione dei **confini del sistema** consiste nella creazione di una sorta di "recinto ideale" all'interno del quale viene condotta l'analisi, tutto ciò che è entro i confini viene analizzato, quantificato e valutato mentre ciò che oltrepassa i confini è considerato come fattore di input (se il flusso è verso l'interno) o come output (se è verso l'esterno).

Non esistono regole precise per la definizione del confine del sistema analizzato e molto spazio è lasciato alla soggettività: tale scelta dipende sostanzialmente dall'obiettivo dello studio. Per esempio all'interno della filiera olio-grezzo se l'obiettivo è valutare l'intero sistema i confini possono comprendere la fase di campo, quella di trasporto e quella di trasformazione andando a considerare tutto ciò che in azienda è legato alla produzione di energia se, invece, l'obiettivo è la valutazione dell'efficienza di una pressa per la spremitura dei semi o del motore i confini sono molto ristretti e considerano input o output flussi di massa o energia che, nel caso di analisi dell'intera filiera, erano interamente interni al sistema.

I confini del sistema costituiscono l'interfaccia con l'ambiente e con gli altri sistemi produttivi; essi definiscono quali processi vadano incluse e quali escluse dall'indagine.

Per quanto riguarda l'analisi delle filiere agro-energetiche nella maggioranza dei casi i confini del sistema comprendono solo una delle tre fasi che compongono il sistema tuttavia, recentemente, sempre più studi analizzano la filiera nel suo complesso: dalla produzione delle materie prime alla vendita dell'energia.

L'**unità funzionale** è il bene o servizio per cui si conduce l'analisi e per cui si calcola il costo EEA specifico (economico - €/kWh, energetico MJ/kWh e ambientale kg CO<sub>2</sub> eq/kWh). L'unità funzionale fa generalmente riferimento all'unità di prodotto, solo in alcuni casi questa coincide con l'unità di misura fisica è ad essa che si rapportano tutti i risultati. Ad esempio in una linea di produzione in cui si realizzano bottiglie di plastica da 1,5 litri, l'unità funzionale è la bottiglia stessa e non il chilogrammo di plastica. Comparando tra loro differenti prodotti o processi produttivi risulta di particolare importanza il criterio dell'**equivalenza funzionale**.

Nel caso di filiere in cui la produzione finale è direttamente l'energia si ha coincidenza tra l'unità funzionale e quella fisica. Ciò non avviene nelle filiere per la produzione di biocombustibili liquidi in cui l'unità funzionale è l'unità di massa (o di volume) del biofuels stesso o la distanza che permettono di

percorrere (es. km/kg di biodiesel). Così come per i confini del sistema anche la definizione dell'unità funzionale dipende dall'obiettivo dello studio ma in ogni caso deve individuare la prestazione quantificata e per questo misurabile e oggettivamente riscontrabile di un prodotto. Quando due sistemi differenti sono raffrontati tra loro è di fondamentale importanza scegliere un'unità funzionale che permetta il confronto. Per le filiere agro-energetiche una possibile unità funzionale potrebbe essere il kWh di calore, elettricità.

Definiti i confini del sistema e l'unità funzionale occorre individuare i **flussi di massa ed energia** che intercorrono all'interno del sistema e tra questo e l'esterno. Questo step è il presupposto fondamentale per un'analitica valutazione del processo produttivo. Tali flussi dopo essere stati individuati e quantificati verranno poi convertiti in valore economico, energia e emissione in funzione dei rispettivi prezzi, equivalenti energetici e fattori emissivi.

Una imprecisa definizione dei confini del sistema così come la scelta di più unità funzionali all'interno dello stesso processo ovvero di unità funzionali poco chiare e difficilmente identificabili rende difficoltosa anche la definizione dei flussi di massa.

## 4.2 Metodologie per l'analisi economica

L'analisi economica di un processo produttivo ha come obiettivo quello di stabilire il costo di produzione specifico e il reddito netto associato al bene o al servizio prodotto. L'impiego di tutti i fattori produttivi comporta un costo che può essere implicito o esplicito a seconda del fatto che venga effettivamente sostenuto o che riguardi solamente la remunerazione di un fattore produttivo.

Come detto in precedenza, numerose metodologie di analisi sono disponibili per quanto riguarda la valutazione di un processo.

La metodologia più impiegata (Lazzari, 2005) prevede la suddivisione dei costi di produzione in **costi fissi** (CF) e **costi variabili** (CV) i primi indipendenti dal volume di bene o servizio prodotto mentre i secondi direttamente legati alla quantità di prodotto.

Il **costo economico totale** (CT, €) è dato dalla somma dei costi fissi e dei costi variabili mentre il **costo economico specifico (costo unitario di produzione)** (CP) è dato dal rapporto tra il costo economico totale e la quantità (Q) di bene o servizio prodotto.

$$CT = \sum CF + \sum CV \quad [€]$$

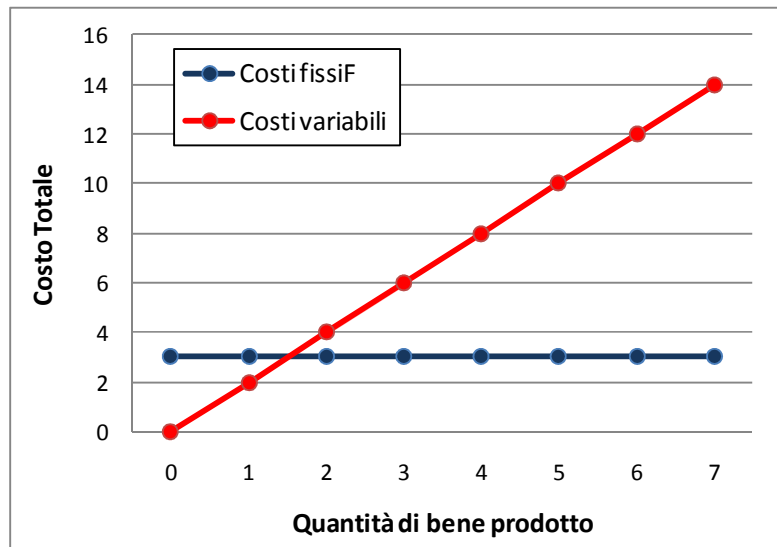
$$CP = CT/Q \quad [€/unità di prodotto]$$

I costi fissi sono spese che vengono sostenute anche in assenza di produzione e sono essenzialmente legati ai fattori produttivi a logorio parziale il cui utilizzo non si esaurisce in un unico ciclo produttivo. L'acquisto di trattori, macchine operatrici, di impianti di trasformazione così come la costruzione di fabbricati comporta spese di ammortamento, assicurazione e manutenzione che devono essere sostenute per mantenerne l'efficienza produttiva anche nel caso in cui questo non sia usato.

La somma dei costi fissi associata a un processo produttivo è una quantità fissa la cui incidenza sul costo specifico di produzione dipende sostanzialmente dalla quantità di bene o servizio che viene prodotta. Tanto più un fattore a logorio parziale viene utilizzato tanto meno sarà la quota del costo unitario imputabile ai costi fissi.

I **costi variabili** dipendono invece dai fattori di produzione a logorio totale e la loro entità è proporzionale alla quantità di bene che viene prodotto: in assenza di produzione è pari a zero.

In **Figura 4.2** è riportato schematicamente l'andamento dei costi fissi e di quelli variabili in funzione della quantità di bene prodotto.



**Figura 4.2** – Andamento dei costi fissi (CF) e di quelli variabili (CV) in funzione della quantità di bene prodotto

### 4.3 Metodologie per l'analisi energetica

La definizione di queste metodologie, come detto, è più recente rispetto a quelle per la valutazione economica ed è stimolata oltre che dall'aumento del prezzo del petrolio e degli altri combustibili fossili anche dalla consapevolezza che le risorse mondiali di queste fonti sono in via di esaurimento e che il loro impiego comporta effetti dannosi sull'ambiente.

La classificazione delle metodologie in base all'analisi degli aspetti energetici o di quelli ambientali non è semplicissima perché spesso, all'interno di una metodologia, entrambi gli aspetti vengono trattati. Quindi, anche se in questa fase per semplicità vengono suddivise le due tipologie di analisi presentano step sovrapponibili i più importanti dei quali sono la definizione

dei confini del sistema, dell'unità funzionale e dei flussi di massa ed energia che caratterizzano il sistema analizzato.

L'**analisi energetica**, relativamente a un bene o un servizio, permette di rispondere a domande come: "Quale è l'energia richiesta per produrre un kilogrammo di pane?" "Qual è il costo energetico di una visita da un parrucchiere?" "Quel'è l'energia spesa per la produzione di una tonnellata di granella di mais?" "Qual è l'energia spesa per produrre 1 kWh di energia elettrica?".

L'*energy analysis* è stata definita nel 1974 dall'IFIAS (*International Federation of Institutes for Advanced Study*) come "la determinazione dell'energia sequestrata in un processo di produzione di un bene o servizio" e comprende la determinazione dell'energia necessaria per la produzione dei materiali, per la manifattura del prodotto e per la fornitura del servizio.

Prima di tale data nessun approccio organico era stato dedicato a questa tematica che veniva trattata con metodologie differenti portando a risultati tra loro non confrontabili. Il maggior contributo apportato dall'IFAS è stato quello di definire un insieme di regole e indicazioni che permettessero di eseguire l'analisi energetica dei differenti processi ottenendo risultati confrontabili.

Fino ad oggi la metodologia più utilizzata per l'analisi degli aspetti energetici è la *Gross Energy Requirement*, tale metodo che segue le indicazioni IFIAS viene spesso utilizzato in associazione ai metodi per l'analisi ambientale in quegli studi che prevedono la valutazione di entrambi questi aspetti.

Un altro approccio per l'analisi energetica che comprende anche il computo della manodopera e di alcuni processi naturali (irradiazione solare, cicli idrogeologici degli elementi, ecc.) è stato sviluppato da Odum ed è chiamato *Emergy Analysis* (Odum, 1988; Odum, 1989; Brown, 1996; Brown, 2005 ).

Un aspetto controverso per quanto riguarda l'analisi energetica è il computo della **manodopera**. Tale fattore produttivo diretto può essere valutato in

differenti modi, Fluck (Fluck, 1992) individua 9 diversi metodi. In generale le soluzioni adottate più di frequente utilizzano le seguenti modalità:

- considerando l'energia consumata sottoforma di cibo dal lavoratore. Andrebbero tuttavia considerate anche le spese energetiche necessarie per vestire, istruire e alloggiare il lavoratore oltre a quelle per nutrirlo. Un apporto calorico di 10 MJ/giorno per lavoratore può essere considerato come il livello minimo qualora si volesse considerare questo input. Nella maggior parte degli studi che utilizzano questa tecnica è utilizzato un valore compreso tra 1,96 e 2,3 MJ/h (Baali E., 2005, Ozkan B., 2004, Liborio Romanelli T., 2005, Fluck, R. C., 1992, Shapouri, H., 2004).

- secondo Alcuni autori (Odum, 1988; Odum, 1989, Franzese, 2009) tenendo conto del costo orario della manodopera e dell'intensità economica del sistema produttivo l'equivalente energetico per la manodopera può essere stimato moltiplicando questi due valori secondo la seguente formula:

$$EE_{MAN} = Ch_{MAN} \cdot IEE = [MJ/h]$$

con:

$EE_{MAN}$  = Equivalente energetico per la manodopera [MJ/h]

$Ch_{MAN}$  = Costo orario manodopera [€/h]

IEE = Intensità Economica del sistema [MJ/€]

Appare evidente che le due modalità di calcolo appena presentate conducono a risultati differenti, nel primo caso l'input associato alla manodopera è indipendente dal settore in cui questo fattore produttivo è impiegato mentre nel secondo fortemente influenzato da questa variabile.

Sebbene, come visto esistono differenti modalità per il suo computo, generalmente la manodopera non è considerata tra gli input energetici di un



sistema produttivo e ciò deriva dal fatto che, soprattutto per i processi produttivi in cui è forte il contributo di macchine e altre attrezzature il contributo di questo fattore di produzione è molto basso in confronto con gli altri input (Leach, 1976).

#### 4.3.1 Gross Energy Requirement

La definizione *Gross Energy Requirement* (GER) fu usata per la prima volta in un congresso dell'IFIAS nel 1974 (IFIAS, 1974; IFIAS, 1975) in cui fu introdotto anche il concetto di intensità energetica che esprime l'energia richiesta per unità monetaria di prodotto. Inizialmente applicata solo per la definizione dei consumi energetici associati alla produzione dei combustibili fossili il suo campo di applicazione si è via via espanso e, a tutt'oggi, è utilizzata in differenti settori per la valutazione dei carichi energetici dei processi studiati. Le prime applicazioni della GER a filiere agricole risalgono alla fine degli anni Settanta-primi anni Ottanta in Olanda (Brascamp, 1983; Brand et al., 1993; Melman et al., 1994) soprattutto relativamente alle produzioni in serra per le quali i consumi energetici sono particolarmente alti.

L'analisi energetica prevede l'assegnazione di un'energia al bene o servizio per cui si conduce l'analisi. Questa energia è chiamata Richiesta Lorda di Energia (da cui deriva l'acronimo RLE) che è definita come "la quantità di energia primaria – "energy source" – che viene sequestrata nel processo di produzione di un prodotto o un servizio. La GER (o RLE) di un prodotto è la somma di tutta l'energia primaria richiesta per la sua produzione. A differenza di altre metodologie (Odum, 1988) che valutano anche le fonti di energia rinnovabili le indicazioni IFIAS impongono di considerare solo l'energia di origine fossile: la radiazione solare così come tutte le fonti di energia rinnovabili non sono considerate (Slesser, 1982).

Quando un prodotto per la sua fabbricazione prevede l'impiego di fonti di secondarie d'energia nella sua GER tali contributi vengono considerati ricorrendo a opportuni coefficienti di conversione. In Tabella 3.1 (Halgstrom, 2005) sono riportati i coefficienti di conversione usati per il calcolo dell'energia primaria necessaria per la produzione di energia secondaria.

L'inverso di questi coefficienti, chiamati ERE (*Energy Requirement for Energy*) altro non è che l'efficienza del sistema di conversione.

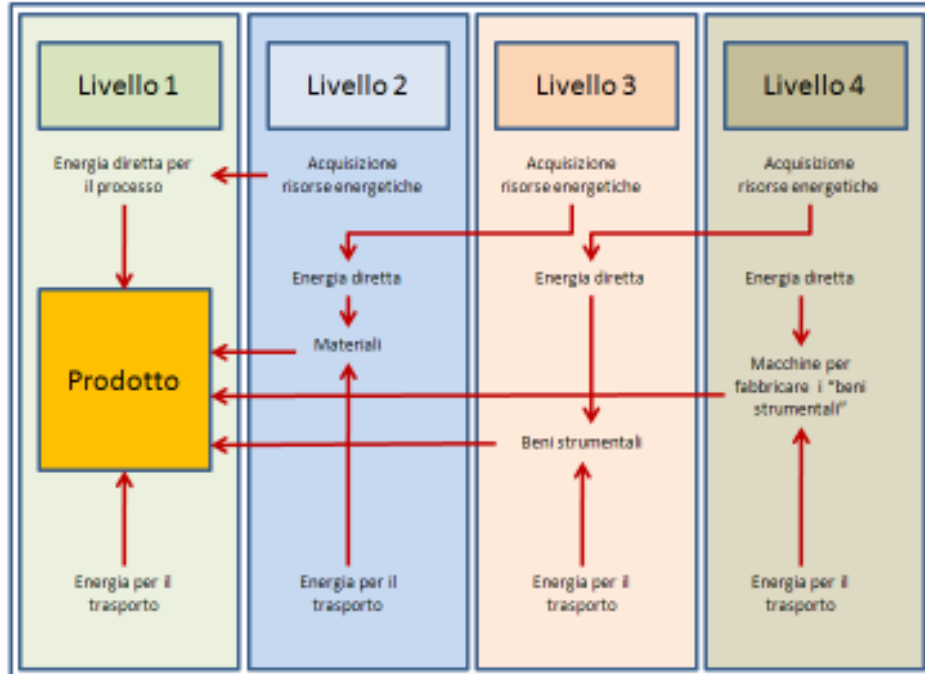
La GER di un prodotto dipende dalla tecnologia con cui è fabbricato e dal contesto in cui avviene la sua produzione. Infatti la messa a punto e l'impiego di nuovi processi energetici più efficienti incide sulla GER riducendola. In sostanza la GER di un prodotto è un valore **"time dependent"** che è influenzato dall'epoca in cui il processo produttivo è effettuato. Ciò implica che un fondamentale *step* dell'analisi energetica è la corretta definizione e contestualizzazione del sistema analizzato.

Energia secondaria	Fattore di conversione
Elettricità	1,59
Carbone	1,10
Gas naturale	1,14
GPL	1,16
Diesel	1,14
Teleriscaldamento	1,21

**Tabella 3.1** – Coefficienti di conversione usati per il calcolo dell'energia primaria necessaria per la produzione di alcuni fonti di energia secondaria

In **Figura 4.3** è riportata la schematizzazione dei quattro livelli a cui può essere condotta l'analisi energetica. Il primo livello dell'analisi riguarda solo gli input diretti del processo considerato. Il secondo livello concerne le spese energetiche necessarie per l'acquisizione, l'estrazione, la conversione e la distribuzione dell'energia utilizzata al livello precedente e degli altri fattori di produzione impiegati (es. fitofarmaci, fertilizzanti, sementi, ecc.). Il terzo livello considera l'energia necessaria per la produzione dei "beni strumentali"

impiegati: macchine, operatrici, impianti di trasformazione, edifici e mezzi di trasporto. Il quarto livello invece comporta la stima dell'energia utilizzata per la produzione dei fattori di produzione impiegati al livello tre.



**Figura 4.3** – Schematizzazione dei livelli dell'analisi energetica (IFIAS, 1975)

Nello schema riportato in figura il secondo livello riguarda le richieste di energia per i materiali e gli altri input utilizzati nella produzione. Questi input sono a loro volta il risultato di altri processi per i quali l'analisi energetica potrebbe essere effettuata nello stesso modo. Un processo produttivo di fatto è costituito da più catene produttive legate tra loro.

Definiti i livelli dell'analisi relativamente a un processo produttivo uno dei principali problemi è definire il grado di dettaglio a cui si vuole spingere

l'analisi stessa o, più praticamente, scegliere quali livelli si vuole considerare entro i confini del sistema e quali invece tralasciare. La pratica ha mostrato che i primi due livelli coprono il 90-95% dell'input energetico e che con l'aggiunta del terzo livello relativo all'energia richiesta per la produzione e la manutenzione dei "beni strumentali" tale percentuale si avvicina al 100%. Nella presentazione dei risultati è di fondamentale importanza, al fine di permettere comparazioni tra studi diversi, indicare il livello a cui viene condotta l'analisi.

#### 4.3.2 Energy Analysis

L'Energy Analysis o Energy Syntesis (ES) o **Analisi Energetica** è una tipologia di analisi per la determinazione dei carichi ambientali di un processo produttivo introdotta per la prima volta (Odum, 1988; Odum, 1989) circa 30 anni fa.

La principale differenza rispetto alla *Gross Energy Requirement* è che l'*Energy Analysis* considera anche alcuni input che sono **risorse ambientali** libere, a disponibilità illimitata (Franzese, 2009) e altri che generalmente non sono computati (es. manodopera, informazione, ecc.).

Rispetto ai metodi tradizionalmente utilizzati per l'analisi energetico-ambientale di un processo produttivo l'ES consente di eseguire una valutazione che spesso si rivela complementare che indaga anche alcuni aspetti solitamente trascurati. Le analisi energetiche ed economiche infatti tralasciano gli input che non sono in grado di valutare su una base monetaria o energetica.

Qualsiasi processo di trasformazione sfrutta risorse di natura diversa, la maggior parte delle quali è il risultato di trasformazioni di altre risorse. Per fare un quadro globale di sostenibilità bisogna trovare la risorsa originaria, cioè ciò quella che può essere considerata inesauribile.

La qualità di ciascun tipo di energia è completamente differente ed è in grado di sostenere lavori molto diversi per unità di input.

Lo scopo dell'ES è quello di calcolare alcuni indicatori delle performance ambientali che considerino sia le risorse naturali sia quelle economiche utilizzate all'interno del processo. Le differenti forme di energia, materiali, lavoro umano e servizi economici sono tutte valutate mediante la loro conversione in unica forma di energia, l'energia solare espressa in **solar equivalent joule (sej)**.

L'obiettivo è quello di quantificare in modo preciso la quantità di radiazione solare necessaria per produrre l'unità di massa o di energia di qualunque tipo di risorsa.

I concetti di "solar transformity" e "solar emergy" sono la base per una metodologia termodinamica di analisi sistemica volta a determinare le migliori alternative nell'uso delle risorse e l'impatto ambientale.

In generale, per ogni sistema, diversi input di energia di minor qualità sono necessari per dar luogo ad un tipo di energia a livello più alto. Ad esempio, per produrre energia elettrica è necessaria una grande energia sottoforma di combustibile e di impianti. La "quantità" di energia elettrica è molto minore della somma dell'energia necessaria per ottenerla, ma la sua produzione può essere ugualmente vantaggiosa perché l'energia elettrica è molto più "flessibile". Un'unità (joule) di energia solare, di carbone e di energia elettrica, anche se hanno lo stesso contenuto energetico, hanno diversa qualità, nel senso che le loro potenzialità sono diverse.

L'emergy analysis è dunque fortemente legata con il concetto di **qualità delle risorse** partendo dal presupposto che le differenti forme di energia hanno una diversa attitudine a svolgere lavoro anche quando il loro contenuto energetico è lo stesso. La qualità di una risorsa dipende dalle sue caratteristiche fisico-chimiche che a loro volta dipendono dal lavoro svolto dall'ecosistema per produrla.

Poiché molti joule di energia di bassa qualità sono necessari per ottenere pochi joule di qualità più elevate, per dare una possibile misura alla posizione gerarchica dei vari tipi di energia, è stato introdotto il concetto di “**transformity**”, che è la quantità di energia di un tipo necessaria per ottenere un joule di un altro tipo. Per poter confrontare tutti i vari tipi di energia secondo un comune denominatore, si usa la **solar transformity**, cioè l’energia solare che è, direttamente o indirettamente, necessaria per produrre un joule del prodotto. In questo modo ogni input può essere misurato su una base comune, usando una scala assoluta. La transformity fornisce quindi una misura della posizione gerarchica dell’energia all’interno della scala termodinamica della biosfera. Più energia è utilizzata più alta è la transformity del prodotto e più alta sarà la posizione gerarchica dell’energia in esso contenuta.

Si definisce quindi **emergia solare** (o semplicemente **emergia**) la quantità di energia solare che, come detto, è necessaria (direttamente o indirettamente) per ottenere un prodotto o un flusso di energia in un dato processo; la sua unità di misura è il **solar emergy joule (sej)**. La transformity è quindi l’emergia di un prodotto divisa per il suo contenuto energetico. La sua unità di misura è il sej/J, anche se talvolta, per certi tipi di prodotto o di flusso, si usa una transformity misurata in solar emergy joule per grammo, per la più facile reperibilità dei dati.

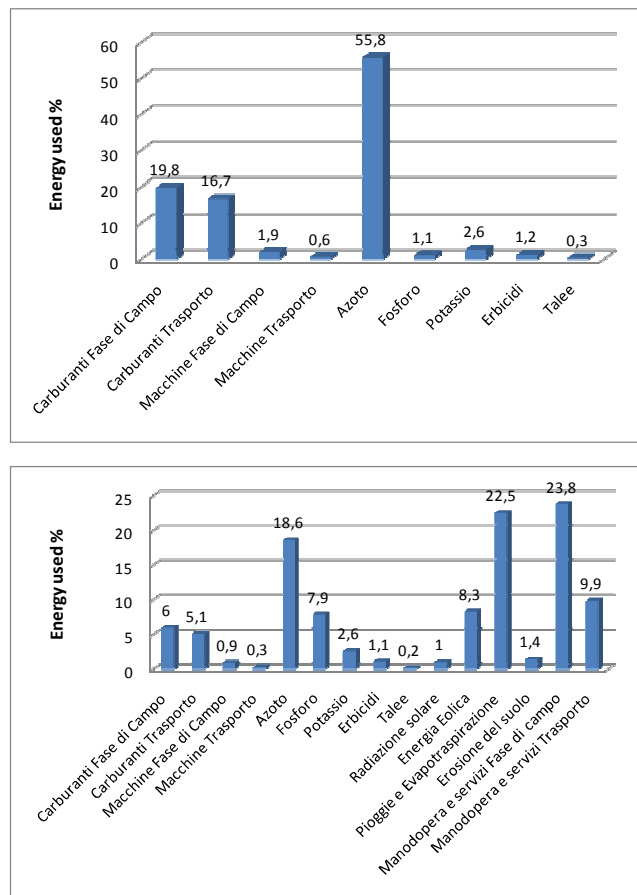
Il flusso energetico necessario per un dato processo diviene quindi un indice del costo ambientale presente e passato per supportarlo. Il termine emergy può infatti essere considerato come una “energy memory”, cioè come la memoria di tutta l’energia solare spesa durante un processo. Poiché l’approccio energetico è in grado di tenere conto del lavoro che l’ambiente ha dovuto svolgere per produrre un certo bene o prodotto, è considerato di fondamentale importanza per una definizione di sviluppo sostenibile, per un utilizzo del capitale naturale e di quello prodotto dall’uomo, che sia corretto non solo da un punto di vista economico, ma anche ambientale.

Più grande è la quantità di energia solare, ovvero il flusso energetico, che sostiene un dato processo, maggiore è il costo ambientale presente e passato necessario a mantenerlo.

L'emergy analysis consiste nel calcolare l'emergia di ogni stadio di trasformazione. Una volta elaborato il diagramma energetico del sistema si può passare alla vera e propria analisi energetica, costruendo una tabella in cui sono elencati tutti gli input al sistema e la quantità usata nell'arco di tempo considerato, con specificata accanto l'unità di misura (joule, grammi o denaro). Attraverso le transformities (ricavati da altre analisi o dalla letteratura scientifica), si perviene ad una misurazione delle risorse impiegate e della produzione svolta. Si arriva cioè a calcolare (in sej) l'emergia totale necessaria per supportare un certo processo.

Il principale limite di questo approccio è che la transformity è difficile da determinare, per la maggior parte dei processi biologici mancano questi valori. Molto spesso pertanto si ricorre a stime, basandosi su processi simili per cui il valore della transformity esiste. Anche per quanto riguarda il computo di altre risorse come l'informazione, alcuni servizi e le diverse tipologie di lavoro umano sono difficili da calcolare.

Recentemente sono stati pubblicati alcuni studi (Franzese 2009) in cui l'emergy analysis è stata applicata anche ad alcune filiere agro-energetiche conducendo parallelamente l'analisi anche utilizzando la GER. Il confronto tra i risultati risulta difficoltoso a causa della diversità delle risorse considerate. A titolo di esempio in **Figura 4.4** viene riportata la ripartizione tra le diverse voci di input energetico relativamente alla coltivazione di Short Rotation Forestry (SRF) con cloni di salice in Svezia, in alto sono presentati i risultati applicando il metodo GER mentre in basso applicando l'emergy analysis.



**Figura 4.4** – Ripartizione del costo energetico tra le diverse voci nel caso di SRF in Svezia. In alto analisi condotta secondo la GER in basso con Analisi Energetica

#### 4.4 Metodologie per analisi ambientale

Sebbene nel corso degli anni alcune metodologie siano state sviluppate da singoli gruppi di ricerca o da singoli ricercatori, per quanto riguarda la definizione di diverse metodiche internazionalmente riconosciute grande



lavoro è stato fatto dall'**IEA** (International Energy Agency) e dall'**IPCC** (Intergovernmental Panel on Climate Change) che, soprattutto per l'analisi delle emissioni di GHG, hanno definito gli aspetti chiave e linee guida da rispettare.

Per eseguire una accurata stima delle emissioni di GHG legate alla produzione e all'uso delle bioenergie alcuni considerazioni devono essere fatte:

- nel corso della coltivazione avvengono cambiamenti dello stock di carbonio immagazzinato nella coltura, nei residui colturali e nel suolo;
- la selvicoltura e la riforestazione possono avere significativi impatti nell'assorbimento di CO<sub>2</sub>;
- i combustibili derivanti da biomassa possono avere emissioni di CO<sub>2</sub>, espresse per unità di energia, più alte di quelle di alcuni combustibili fossili (es. gas naturale) ([Schlamadinger, 1997](#));
- l'efficienza delle filiere agro-energetiche può differire da quella dei sistemi energetici basati sull'impiego dei combustibili fossili e, generalmente, è più bassa;
- la produzione, il trasporto e la conversione della biomassa richiedono input di energia che devono essere inclusi nella stima;
- qualora la bioenergia sia prodotta utilizzando sottoprodotti le emissioni devono essere ripartite anche con il prodotto principale;
- la produzione di bioenergia non sempre rimpiazza energia prodotta da fonti fossili ma, più semplicemente, potrebbe soltanto provvedere energia aggiuntiva;
- i GHG associati con la produzione di bioenergia non includono solo la CO<sub>2</sub> ma anche altri gas (ad esempio CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) che alterano il bilancio della radiazione dell'atmosfera terrestre.

Come precedentemente detto il bilancio delle emissioni di GHG prevede il calcolo delle emissioni legate al processo produttivo. Tali emissioni, prodotte

nel corso della filiera, sono legate all'utilizzo di combustibili e alla produzione/consumo dei fattori produttivi.

Così come per la GER anche per l'analisi delle emissioni è di fondamentale importanza definire il livello (cfr Figura 3.3) a cui si intende condurre l'analisi.

Definiti i flussi di massa e di energia la stima delle emissioni è fatta ricorrendo a **fattori emissivi** per i diversi fattori di produzione o utilizzando il **fattore emissivo unitario medio** per i fattori produttivi a logorio parziale. Per quanto riguarda le emissioni indirette di GHG, ancor più che per l'analisi energetica, la loro incidenza sul totale è molto ridotta (Schlamadinger B., 1997) e rappresenta una quota variabile dallo 0,1 al 1% delle emissioni dirette; inoltre è interessante sottolineare che questa voce è molto simile per gli impianti di conversione che impiegano combustibili fossili sia per quelli che impiegano biomassa.

Vengono di seguito riportate alcune indicazioni relativamente ai punti critici ai quali bisogna porre particolare attenzione.

#### 4.4.1 Sistema di riferimento

La riduzione delle emissioni di GHG, come accennato anche nel precedente Capitolo 2, viene ottenuta confrontando la filiera agro-energetica con una filiera basata su combustibili fossili. Tale soluzione, chiamata **sistema di riferimento**, è utilizzata come ipotesi alternativa e permette di stimare la potenziale riduzione del *Global Warming* delle tecnologie che si vogliono valutare.

La domanda chiave della scelta del sistema di riferimento è: "Al posto di cosa?" ovvero quale sistema energetico tradizionale produce la medesima energia/vettore energetico della filiera che voglio valutare? Un idoneo sistema di riferimento è: "un'alternativa simile al sistema analizzato che permette di ottenere la stessa produzione energetica" (Schlamadinger, 1997). Numerose alternative potrebbero dover essere prese in considerazione per la scelta del miglior sistema di riferimento. In generale si possono distinguere due situazioni, la prima in cui è la produzione di

bioenergia va ad aggiungersi agli impianti già presenti e una in cui il sistema analizzato sostituisce un impianto funzionante con combustibili fossili.

Nel primo caso il miglior sistema di riferimento è la filiera energetica che ha il minor impatto per quanto riguarda emissioni di GHG ed eventualmente altri inquinanti. Per evitare critiche lo stesso livello di tecnologia dovrebbe essere utilizzato in entrambe le filiere.

Nel secondo caso il sistema di riferimento da considerare è (ovviamente) quello rimpiazzato dalla filiera agro-energetica.

Come precedentemente detto il primo *step* è la definizione dei confini del sistema che devono comprendere le maggiori fonti di emissioni del processo produttivo analizzato. Lungo tutta la filiera, le emissioni devono essere computate e lo stesso deve essere fatto per il sistema di riferimento. Le emissioni legate alla produzione di bioenergia sono confrontate con quelle del sistema di riferimento, la differenza rappresenta il beneficio netto ottenibile qualora l'energia venisse prodotta con il sistema analizzato invece che con il sistema di riferimento. In generale il sistema di riferimento dovrebbe essere individuato tra le soluzioni tecnologiche che sono solitamente praticate nel contesto in cui si intende valutare le performance della filiera agro-energetica.

#### 4.4.2 Orizzonte temporale

Relativamente agli stock di carbonio (soprattutto quello nei residui e quello nel suolo) è importante considerare necessario indicare anche l'**orizzonte temporale** a cui si riferisce l'analisi perché nel corso degli anni le quantità di carbonio e di altri precursori dei principale gas serra possono variare. Per esempio il taglio di una foresta mette in moto una serie di processi che comportano lo scambio di GHG con l'atmosfera. Tali processi, associati alla decomposizione dei residui colturali e delle radici continuano per molti anni anche dopo la ceduazione durante i quali la foresta continua a "produrre" emissioni. A seconda dell'orizzonte temporale il bilancio complessivo di filiera potrebbe essere positivo o negativo.

#### 4.4.3 Altre categorie di impatto ambientale

Sebbene il bilancio dei GHG sia l'aspetto più indagato e di maggior interesse l'analisi ambientale di una filiera può prevedere la valutazione anche di altre problematiche che, a seconda dello scopo dell'analisi, possono rivelarsi più o meno importanti. Tali aspetti possono comunque essere decisivi nella scelta tra due differenti filiere agro-energetiche perché ne influenzano l'"accettabilità", tra questi i più importanti sono:

- l'acidificazione;
- l'uso della risorsa suolo;
- l'eutrofizzazione;
- il consumo di acqua.

Il "consumo" della **risorsa suolo** è legato al fatto che la superficie agricola utilizzabile è una risorsa limitata ed è quindi un aspetto che deve essere indagato soprattutto per le colture energetiche dedicate. In questo caso il problema deve essere affrontato considerando al posto di cosa l'*energy crop* viene coltivata. Occorre infatti considerare che il suolo dedicato alla coltura energetica potrebbe essere soggetto a riforestazione con un conseguente assorbimento di CO<sub>2</sub> da parte delle specie forestali e nel suolo. Relativamente all'analisi dei GHG, l'uso del suolo andrebbe quindi considerato confrontando la situazione che si viene a creare con la messa in atto della filiera agro-energetica con quella che sarebbe invece legata ad un uso alternativo. La differenza tra il bilancio del C legato alle due situazioni rappresenta il beneficio/costo causato dalla scelta di destinare il terreno alla filiera energetica.

In teoria, per quanto riguarda gli altri aspetti sopracitati e quindi la valutazione completa della sostenibilità ambientale della filiera, la migliore opzione è l'utilizzo di un processo decisionale multi obiettivo oppure la minimizzazione del costo totale. Entrambe le soluzioni si presentano difficili e, relativamente alla seconda appare particolarmente difficile

la stima e la monetizzazione delle diverse esternalità che sono sito specifiche e di difficile quantificazione.

#### 4.4.5 Life Cycle Assessment

Il **Life Cycle Assessment** (Valutazione del Ciclo di Vita) rappresenta uno degli strumenti fondamentali per l'attuazione di una Politica Integrata dei Prodotti, nonché il principale strumento operativo del "Life Cycle Thinking": si tratta di un metodo oggettivo di valutazione e quantificazione dei carichi energetici ed ambientali e degli impatti potenziali associati ad un prodotto/processo/attività lungo l'intero ciclo di vita, dall'acquisizione delle materie prime al fine vita ("dalla Culla alla Tomba" "from cradle-to-grave") (Curran M.A., 1996; Guinee, 2002). Inizialmente l'LCA fu sviluppato come strumento per il supporto decisionale relativamente ai principali processi industriali; i primi studi (1969-1972) furono focalizzati sull'impatto sull'ambiente del trattamento dei rifiuti e sul packaging dei prodotti. Dopo la crisi petrolifera del 1973 l'analisi degli aspetti energetici ed ambientali dei processi produttivi e in particolare delle filiere energetiche è diventata uno dei principali campi di applicazione di questa tecnica.

La rilevanza di tale tecnica risiede principalmente nel suo **approccio innovativo** che consiste nel **valutare tutte le fasi di un processo produttivo come correlate e dipendenti**.

Tra gli strumenti nati per l'analisi di sistemi industriali l'LCA ha assunto un ruolo preminente ed è in **forte espansione a livello nazionale ed internazionale**.

A livello internazionale la metodologia LCA è regolamentata dalle norme ISO della serie 14040's in base alle quali uno studio di valutazione del ciclo di vita prevede: la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dell'analisi (**ISO 14041**), la compilazione di un inventario degli input e degli output di un determinato sistema (**ISO 14041**), la valutazione del potenziale impatto

ambientale correlato a tali input ed output (**ISO 14042**) e infine l'interpretazione dei risultati (**ISO 14043**) ([ISO, 1997](#); [ISO, 2000](#); [ISO, 2006](#)).

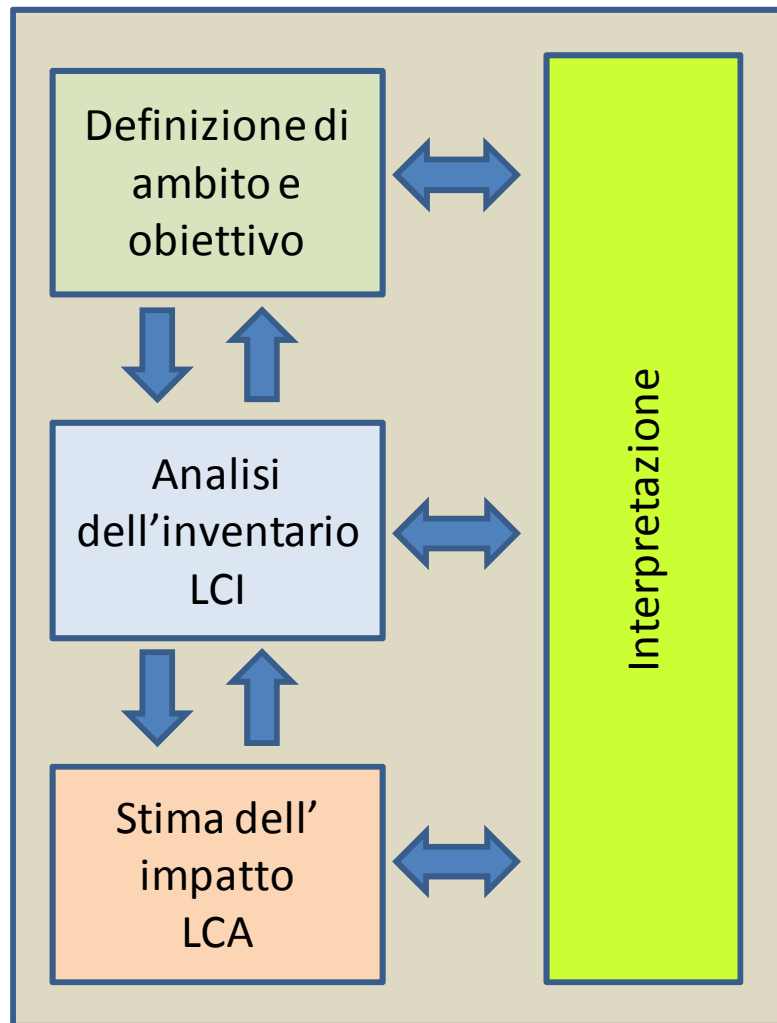
Considerando che le norme che lo disciplinano comportano molto spesso un carico di lavoro e un livello di dettaglio che, talvolta, può non essere confacente con gli obiettivi dello studio negli ultimi anni sono state pubblicati alcuni lavori ([Bernesson, 2004](#); [Bernesson, 2006](#); [Goglio, 2009](#)) in cui solo alcune delle categorie di impatto vengono considerate, si parla di questi casi di “*limited*” o “*focused*” LCA.

L'idea di base del metodo LCA è la registrazione di tutti i flussi di massa ed energia connessi con un prodotto, un processo o un servizio. Il concetto “dalla culla fino alla tomba” significa che viene preso in considerazione l'intero processo che porta ad un prodotto, a partire dall'approvvigionamento delle materie prime, fino allo smaltimento, passando attraverso l'utilizzo e il consumo. Questo approccio di tipo estensivo è molto importante in quanto, se si limitasse l'analisi restringendo i confini del sistema indagato, si potrebbe arrivare a conclusioni sbagliate; in questo modo invece, è possibile spingere l'ottimizzazione fino a raggiungere il reale minimo scientifico del soggetto dell'indagine.

Come già sottolineato, la struttura e le richieste di LCA sono fissate dalle normative ISO 14040 –14043; in accordo con queste, il metodo si divide in 4 parti (**Figura 4.4**).

#### **Definizione di ambito ed obiettivo**

La **definizione dell'obiettivo** di uno studio LCA è un passaggio cruciale, in quanto è la fase in cui vengono prese le decisioni più importanti. In accordo con le intenzioni e gli interessi specifici, viene definito il contesto dell'indagine e vengono fissate le richieste per le fasi successive. Questo aspetto potrebbe riguardare il livello di approfondimento dello studio, la qualità dei dati di input, la selezione dei migliori parametri per la realizzazione della stima dell'impatto ambientale e le possibili interpretazioni all'interno del contesto della valutazione; il risultato nasce dai processi iterativi di LCA.



**Figura 4.4** – Componenti dell'LCA

Lo **scopo** e gli interessi specifici di uno studio LCA devono essere fissati durante la fase di definizione dell'obiettivo; allo stesso modo, anche i **destinatari** cui è indirizzata l'indagine devono essere indicati chiaramente.

All'atto di rendere noti i risultati, inoltre, è molto importante sottolineare quali sono gli aspetti considerati dall'LCA e quali invece non vengono analizzati.

Fermo restando tutto quanto precedentemente detto, i **confini del sistema** devono essere definiti in accordo con quelli che sono gli obiettivi dell'LCA. Innanzitutto, è necessario valutare attentamente le risorse utilizzabili, il contesto temporale e la disponibilità (o meno) di tutti i dati e le informazioni necessarie.

Per ridurre l'estensione e la complessità dell'analisi entro limiti ragionevoli, è possibile determinare, secondo precisi criteri, se un flusso di materiale o energia possa (o meno) essere trascurato. Tra gli altri, possono essere considerati i seguenti criteri.

**Criterio di massa:** Solo nel caso in cui il bilancio di massa del flusso di un materiale cada al di sotto di una certa soglia minima (stabilita a priori) sia in entrata che in uscita rispetto al totale del sistema, allora è possibile trascurare gli aspetti relativi alla produzione di tale materiale.

**Criterio energetico:** In maniera analoga, gli aspetti relativi ad un certo materiale possono essere trascurati solo qualora il suo contributo all'energia totale (ottenuta sommando le quote di tutti i materiali) cada al di sotto di una certa soglia (stabilita a priori).

#### **Analisi dell'Inventario (LCI)**

Nell'analisi dell'inventario, i flussi di massa ed energia vengono annotati minuziosamente, prendendo in considerazione l'intera vita del prodotto esaminato. In un primo momento, viene modellizzato il processo complessivo "dalla culla alla tomba", così da avere un supporto per relazionare tra loro tutti i dati e le informazioni. I flussi di massa ed energia vengono quindi determinati sulla base delle entrate e delle uscite di tutti i **processi parziali**, in relazione ai confini del sistema. Successivamente, connettendo tra loro i vari passaggi analizzati, si riesce a simulare la rete di connessioni che intercorrono tra il sistema e l'ambiente: in questo modo si



possono tracciare i bilanci di massa e di energia, che diventano l'inventario vero e proprio del sistema complessivo. Per finire, tutti i flussi di materiale ed energia che passano i confini precedentemente fissati vengono annotati quantitativamente (come unità di misura si usano quelle normalmente impiegate in fisica), facendo sempre riferimento all'unità funzionale.

### **Stima dell'impatto**

L'obiettivo della stima dell'impatto ambientale è la valutazione (secondo precisi parametri ambientali) dei flussi di massa e di energia calcolati durante l'analisi dell'inventario: tale stima, quindi, serve per **riconoscere, riassumere e quantificare** i possibili effetti ambientali dei sistemi esaminati, nonché per fornire informazioni essenziali intese alla loro valutazione.

I flussi di massa ed energia, esaminati nell'analisi dell'inventario, vengono assegnati alle categorie ambientali (assimilabili a veri e propri effetti ambientali), che sono state fissate in precedenza. Nell'LCA vengono normalmente studiate alcune delle seguenti categorie di impatto:

- Riscaldamento globale (GWP)
- Riduzione dell'ozono presente nella stratosfera (ODP)
- Formazione fotochimica dell'ozono nella troposfera (POCP)
- Eutrofizzazione (NP)
- Acidificazione (AP)
- Tossicità per l'uomo (HTP)
- Eco-tossicità (ETP)
- Utilizzo del territorio

Le categorie di impatto descrivono i potenziali effetti sull'uomo e sull'ambiente. In linea di principio, ciascun effetto ambientale potrebbe essere incluso all'interno di un'indagine, a patto che i dati necessari all'analisi e un modello adatto per la descrizione e parametrizzazione dell'effetto

stesso siano disponibili. Per finire, occorre ricordare che un **flusso di massa e/o energia può essere assegnato a diversi effetti ambientali**.

Nella fase di “Caratterizzazione”, vengono quantificate le porzioni precedentemente assegnate: con l’aiuto dei **fattori di equivalenza** (es. equivalenti energetici e fattori emissivi), infatti, i differenti contributi dei diversi fattori di produzione vengono aggregati in un determinato effetto ambientale e rapportati ad una sostanza (presa come riferimento – es. i kg di CO<sub>2</sub> eq. per la categoria GWP). I flussi registrati nell’analisi dell’inventario vengono moltiplicati per i rispettivi fattori di equivalenza e sommati tra loro: il potenziale d’impatto così determinato rappresenta la misura di un possibile danno ambientale.

Il potenziale d’impatto determinato viene messo in relazione con un valore di riferimento all’interno della stessa area. Non viene condotta alcuna aggregazione delle categorie d’impatto in uno (o più) indici riassuntivi.

### **Interpretazione**

L’obiettivo di questa fase è l’analisi dei risultati ottenuti, nonché la spiegazione del significato che essi assumono e delle restrizioni che impongono. I fatti essenziali, basati sui risultati dell’analisi dell’inventario e sulla stima dell’impatto ambientale, devono essere determinati e verificati in merito alla loro completezza, sensibilità e consistenza. Le assunzioni fatte nella fase di definizione dell’obiettivo e dell’ambito dell’analisi devono essere richiamate in questo passaggio: solo sulla base di questi presupposti, infatti, è possibile trarre delle conclusioni e fornire delle raccomandazioni.

## **4.5 Cogenerazioni e sottoprodotti**

### **4.5.1 Allocazione**

Nelle filiere agro-energetiche così come in molti altri processi produttivi può venir prodotto più di un unico bene/servizio. Non è raro il caso in cui,

relativamente alle agro energie, la produzione di energia elettrica è associata a quella di energia termica.

Il costo EEA deve essere quindi distribuito tra i diversi prodotti: si parla di **allocazione**. Il processo di allocazione dovrebbe essere evitato, dove possibile, poiché fortemente soggettivo. La soluzione ottimale proposta (Schlamadinger, 1997) prevede l'espansione dei confini del sistema in modo tale da includere tutti i beni/servizi prodotti.

Nella pratica però l'espansione dei confini del sistema si presenta molto dispendiosa e laboriosa e, generalmente, si ricorre all'utilizzo di un metodo di allocazione. Esistono diverse metodi per l'allocazione dei costi EEA tra i diversi prodotti di filiera:

- Metodo 1: Allocazione basata sul "**displacement method**" (o della sostituzione), nel caso di un impianto CHP operante principalmente per la produzione di energia elettrica la produzione addizionale di calore potrebbe essere considerata come un effetto secondario. In tal caso solo l'elettricità è considerata come prodotto di filiera e all'energia termica vengono assegnati dei **crediti** determinati calcolando quale sarebbe l'input energetico e quali sarebbero le emissioni associate alla sua produzione con sistemi "tradizionali". I crediti sono poi scorporati dal costo EEA totale.
- Metodo 2 : Allocazione basata su **parametri termodinamici** (potere calorifico/contenuto energetico, contenuto in exergia – definita come la massima quota di una certa energia che può essere convertita in un'altra forma, ecc.) che vengono utilizzati come fattori di ripartizione. L'exergia permette una allocazione più realistica: usando solo il contenuto energetico un kWh di energia elettrica sarebbe equiparato a un kWh di energia termica e ad entrambi sarebbe allocata la quota del Costo EEA. Usando il contenuto di exergia invece al kWh<sub>e</sub> potrebbero essere allocati circa 5 volte la quantità di input e GHG che verrebbero associate

al kWh<sub>th</sub> (considerando un fattore di Carnot di 1 per l'elettricità e 0,2 per il calore).

- **Metodo 3** : Allocazione basata sul **prezzo finale** in cui il valore di mercato dei prodotti di filiera è utilizzato come fattore per la ripartizione. Questo sistema funziona bene quando il rapporto tra i prezzi è simile al rapporto tra l'efficienza di produzione delle due forme di energia e presenta il grosso vantaggio di prevedere l'utilizzo di parametri facilmente reperibili; il principale limite è dovuto al fatto che i prezzi dell'energia sono sito-specifici – e come tali fortemente variabili tra i diversi Paesi – e talvolta incorporano al loro interno “quote” dovute a forme particolari di tassazione/incentivazione. Una variante di questo metodo è quella del “green price” che prevede di considerare i prezzi dell'energia al netto di incentivi, tasse e altre variabili che ne possono influenzare la quotazione.
- **Metodo 4** : Allocazione basata sulla “**quantità**” delle due forme di energia.

Considerando che la scelta del metodo di allocazione può influenzare fortemente il risultato dell'analisi occorre sempre fare un confronto tra questi risultati e quelli che si ottengono con l'analisi del sistema allargato; se ciò non fosse possibile è necessario condurre un'accurata analisi di sensitività sull'influenza il metodo di allocazione ha sul risultato finale.

#### 4.5.2 Sottoprodotti

A differenza che per le filiere energetiche basate sull'impiego di combustibili fossili quelle agro-energetiche si presentano più complesse e possono prevedere sia l'impiego sia la produzione di sottoprodotti. Per esempio la paglia, sottoprodotto della produzione di molti cereali, può essere utilizzata per le filiere basate sulla combustione così come i DDGS (distillers dried grains and solubles) sono un sottoprodotto della produzione del bioetanolo ma possono essere utilizzate nell'alimentazione del bestiame grazie all'elevato contenuto proteico.

Anche in questo caso, così come per le cogenerazioni, occorre considerare che è possibile associare parte del costo energetico e delle emissioni di GHG al sottoprodotto. Oltre ai primi tre metodi di allocazione riportati precedentemente (paragrafo 3.5.1) è possibile ripartire input ed emissioni anche in funzione della massa complessiva di sottoprodotto.

Più nel dettaglio ([Schlamadinger, 1997](#)) si distinguono poi due casi differenti:

- la bioenergia è prodotto principale: il metodo di allocazione da utilizzare è il metodo 1 (*“displacement method”*) e sostanzialmente al sottoprodotto vengono associati dei “crediti” calcolando quale sarebbero l’input e le emissioni necessarie per produrlo o per produrre il bene equivalente (es. un normale mangime nel caso dei DDGS);
- la bioenergia è il sottoprodotto di filiera, in questo caso la scelta del metodo per la ripartizione dell’input energetico e delle emissioni è più difficile e la soluzione migliore è quella di espandere i confini del sistema analizzato.

#### 4.6 Bibliografia

Baali E., Ouwerkerk E., 2005 - Energy Balance of Wheat Production in Morocco, International Research on Food Security, Natural Resource Management and Rural Development, 2005, Stuttgart , Centre for Agriculture in the Tropics and Subtropics October 11 – 13.

Bernesson S., Nilsson D., Hansson P.A. 2004 - A limited LCA comparing large- and small-scale production of rape methyl ester (RME) under Swedish conditions. *Biomass and Bioenergy*, 26 (6), p. 545-559

Bernesson S., Nilsson D., Hansson P.A. 2006 - A limited LCA comparing large- and small-scale production of ethanol for heavy engines under Swedish conditions. *Biomass and Bioenergy*, 30 (1), p. 46-57

- Brand, R.A., Melman, A.G., 1993 - Energie-inhoudnormen voor de veehouderij, TNO-IMET, rap.nr. 93-208, Apeldoorn.
- Brascamp, M., 1983 - Direct en indirect energieverbruik in de landbouw, basismateriaal voor de LEI-databank, TNO-MT, rap.nr. 83-01936, Apeldoorn.
- Brown, L.H., Bernard, B.H., Bruce, A.H., 1996 - Energy analysis of 108 industrial process. Fairmont Press, INC, pp. 314.
- Brown, M.T., Ulgiati, S., 2005 - Emery, transformity and ecosystem health. In: Jørgensen, S.E., Costanza, R., Xu, F.L. (Eds.), Handbook of Ecological Indicators for Assessment of Ecosystem Health. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 333–352.
- Curran M.A., 1996 - Environmental life-cycle assessment, The International Journal of Life Cycle Assessment, p. 179
- Fargione J, Hill J, Tilman D, Polasky S, Hawthorne P. Land clearing and the biofuel carbon debt. Science 2008;319(5867): 1235–8.
- Farrel A. et altri, 2006 – Ethanol Can Contribute To Energy And Environmental Goals?, Science, 311, 506-508.
- Feng H, Rubin O, Babcock B, 2010 - Greenhouse gas impacts of ethanol from Iowa corn: Life cycle assessment versus system wide approach, Biomass and Bioenergy, 34, 912-921.
- Fluck, R. C. 1992 - Energy of Human Labor. In Energy in Farm Production (Vol. 6 of Energy in World Agriculture), Ed.; Elsevier: Amsterdam, pp 31-37.
- Franzese P.P., Rydberg T., Russo G.F, Ulgiati S., Sustainable biomass production: A comparison between Gross Energy Requirement and Emery Synthesis methods, 200, Ecological Indicators, volu.9. p. 959-970.
- Goglio P., 2009 – A screening LCA of short rotation coppice willow feedstock production system from small-scale electricity generation, Biomass & Bioenergy, 103, 389-394.

Guinee J.B., 2002 - Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards, The international journal of life cycle assessment.

IFIAS, 1974 - Energy analysis: workshop on methodology and conventions, Report no. 6, International Federation of Institutes for Advanced Study, Stockholm.

IFIAS, 1975 - Energy analysis and economics, Report no. 9, International Federation of Institutes for Advanced Study, Stockholm.

International Standards Organization, 1997 - Environmental management—life cycle assessment—life cycle impact assessment. International Standard ISO14040:1997(E)

International Standards Organization, 2000 - Environmental management—life cycle assessment—life cycle impact assessment. International Standard ISO14042:2000(E)

International Standards Organization, 2006 - Environmental management—life cycle assessment—life cycle impact assessment. ISO 14042

IPCC—Intergovernmental Panel on Climate Change, 1996 - In: Houghton JT, Meira Filho LG, Callander BA, Harris N, Kattenberg A, Maskell K (eds) Climate change 1995: the science of climate change. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge

IPCC—Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001a - Climate change 2001: the scientific basis: contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge

IPCC—Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001b - Climate change 2001: the scientific basis: contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Table 6.7 and Table 6.8. Cambridge University Press, Cambridge

IPCC—Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005 - In: Metz B, Kuipers L, Solomon S, Andersen SO, Davidson O, Pons J, de Jager D, Kestin T,

Manning M, Meyer L (eds) Special report on safeguarding the ozone layer and the global climate system: issues related to hydrofluorocarbons and perfluorocarbons, special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge

Lazzari M., Mazzetto F., 2005 - Prontuario di Meccanica Agraria e Meccanizzazione, Reda.

Leach, G., 1976 - Energy and food production, I.P.C. Science and Technology

Melman, A.G., Schiphouwer, H., Hendriksen, L.J.A.M., 1994 - Energieinhoudnormen voor de akker- en tuinbouw, TNO-IMET, rap.nr. 94-425, Apeldoorn.

Odum, H.T., 1988 - Self-organization, transformity, and information. *Science* 242, 1132–1139.

Odum, H.T., 1989 - A systems overview of the university in society. In: Bjornson, R., Waldman, M. (Eds.), *Rethinking Patterns of Knowledge. Papers in Comparative Studies No. 6.* The Center for Comparative Studies in the Humanities, The Ohio State University, Columbus, Ohio.

Ozkan, B.; Akcaoz, H.; Fert, C., 2004 - Energy input-output analysis in Turkish agriculture. *Renew. Energy*, 29, 39-51.

Patzek T., 2004 - Thermodynamics of the Corn-Ethanol Biofuel Cycle, *Critical Reviews in Plant Sciences*, 519-567.

Pimentel D., 2003 - Ethanol fuels: energy balance, economics, and environmental impacts are negative. *Natural resources research*, 12, 127-134

Pimentel D., Patzek T. , 2005 - Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower. *Natural Resources Research*, 14, 65-76 .

Schlamadinger B., 1997 - Towards a standard methodology for greenhouse gas balances of bioenergy systems in comparison with fossil energy systems, *Biomass & Bioenergy*, 13, p. 359-375



Searchinger T, Heimlich R, Houghton RA, Dong F, Elobeid A, Fabiosa J, et al., 2008 - Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land use change. *Science*, 319(5867), 1238–40.

Shapouri H., Duffield JA, Wang M, 2002 - The energy balance of corn ethanol: an update, *Agricultural Economics Reports*, 1-19

Shapouri, H.; Duffield, J. A.; McAloon, A.; Wang, M. , 2004 - The 2001 Net Energy Balance of Corn Ethanol; Report No. 814; U.S. Dept. of Agriculture: Washington, DC.

Slesser M., Wallece I., 1982 - Energy consumption per tonne of competing agricultural products available to the EC (Commission of the European Communities, ed.). *Information on Agriculture*, 85, 168

Thiago Liborio Romanelli, T. L.; Milan, M. 2005 - Energy balance methodology and modeling of supplementary forage production for cattle in Brazil. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, 62, 1-7.

Wilting H.C., 1996 – An energy perspective on economic activities, <http://dissertations.ub.rug.nl/faculties/science/1996/h.c.wilting/>, Thesis, University of Groningen, p 1-203.

## 5 SEA: Software per l'analisi Economica, Energetica ed Ambientale

### 5.1 Scopo e Risultati

Negli ultimi anni sono stati sviluppati numerosi modelli di calcolo e software specifici per la valutazione energetica e/o ambientale di filiere per la produzione di bioenergie. La loro complessità e completezza è variabile in funzione dell'obiettivo specifico per cui sono stati sviluppati. Gran parte di questi strumenti presenta alcuni limiti che ne rendono spesso complicato l'utilizzo per un'analisi completa della sostenibilità di una filiera.

Alla luce di quanto appena detto e con riferimento alle condizioni climatiche del nostro Paese e dell'Europa Centro-Meridionale è stato appositamente sviluppato un modello di calcolo per valutare la sostenibilità complessiva (economica, energetica ed ambientale - EEA) delle principali filiere agro-energetiche. Tale strumento, chiamato **SEA** (Software per l'analisi Economica, Energetica e Ambientale), consente una valutazione contemporanea dei tre aspetti legati alla sostenibilità complessiva del processo produttivo affrontando con grande grado di dettaglio la fase agricola della filiera, spesso trascurata.

L'impiego di SEA permette di calcolare:

- i **costi EEA totali**: comprendenti tutti i costi associati all'intera filiera: economici (€), energetici (MJ) e ambientali (kg CO<sub>2</sub> eq);
- i **costi EEA specifici**: economici (€/unità funzionale), energetici (MJ/unità funzionale) e ambientali (kg CO<sub>2</sub> eq/unità funzionale);
- i **ricavi EEA totali**: ricavati considerando, rispettivamente, prezzi di vendita e incentivi (€), l'energia prodotta (MJ) e le emissioni evitate (kg CO<sub>2</sub> eq);

- i **ricavi EEA specifici**: economici (€/unità funzionale), energetici (MJ/unità funzionale) e ambientali (kg CO<sub>2</sub> eq/unità funzionale);
- i **profitti EEA totali**: ricavati considerando, dalla differenza tra ricavi e costi EEA totali;
- i **profitti EEA specifici**: ricavati considerando, dalla differenza tra ricavi e costi EEA specifici;
- i bilanci **EEA**, calcolati come rapporto tra costi EEA e ricavi EEA di filiera,
- l'**Indice di Sostenibilità Complessiva** (o *Global Sustainability Index, GSI*), ovvero un indice che sintetizza le performance della filiera analizzata sui tre livelli di analisi (EEA) e permette un immediato confronto tra le diverse situazioni.

In **Tabella 5.1** sono riportati, con maggior dettaglio ed organizzati per i tre aspetti considerati, i risultati ottenibili dall'applicazione di SEA.

ASPETTI	ECONOMICI	ENERGETICI	AMBIENTALI
<b>Costo EEA Totale</b>	€	MJ	kg CO <sub>2</sub> eq
<b>Costo EEA Specifico</b>	€/U.F.	MJ/U.F.	kg CO <sub>2</sub> eq/U.F.
<b>Ricavo EEA Totale</b>	€	MJ	kg CO <sub>2</sub> eq
<b>Ricavo EEA Specifico</b>	€/U.F.	MJ/U.F.	kg CO <sub>2</sub> eq/U.F.
<b>Profitto EEA Totali</b>	€	MJ	kg CO <sub>2</sub> eq
<b>Profitto EEA Specifico</b>	€/U.F.	MJ/U.F.	kg CO <sub>2</sub> eq/U.F.
<b>Bilanci EEA</b>	-	-	-
<b>Indice Sostenibilità Complessiva</b>	-	-	-

**Tabella 5.1 – Risultati proposti da SEA**

Il software si presenta, dunque, come uno strumento in grado di fornire indicazioni sulla attuale sostenibilità delle filiere agro-energetiche e come supporto decisionale multi-obiettivo di medio-lungo periodo.

## 5.2 Scala

SEA è stato sviluppato per condurre simulazioni riguardo la sostenibilità di filiere agro-energetiche su **scala aziendale/comprenditoriale**; pertanto - considerando poco realistica l'ipotesi che gli agricoltori convertano interamente le proprie superfici in assenza in un profitto "verificato"- l'analisi prevede si eseguire la valutazione della fase di campo in corrispondenza di valori crescenti di SAU destinata a coltura energetica ( $SAU_{ene}$ ). La rimanente superficie  $SAU_{trad}$  è destinata ad altre colture.

La destinazione della superficie aziendale oltre che alla coltura energetica anche ad altre coltivazioni permette di tenere conto del fatto che alcune macchine (trattori e operatrici) e talvolta alcuni impianti, possono essere utilizzati sia per la filiera energetica sia per quelle "tradizionali". Ad esempio, un aratro può essere impiegato sia per la lavorazione primaria di una coltura energetica così come di una coltura "tradizionale".

La possibilità di utilizzare alcune operatrici del parco macchine aziendale sull'intera superficie permette, in primo luogo, di abbassare i costi fissi legati al loro utilizzo ma anche di ridurre l'input energetico indiretto e la quota di emissioni di GHG che derivano, rispettivamente, dalla ripartizione dell'energia e della  $CO_2$  eq. *embedded* nella massa della macchina.

## 5.3 Descrizione

Nella versione attuale il modello è sviluppato in ambiente MS Office Excel, tutte le equazioni sono scritte in Visual Basic e vengono richiamate da appositi pulsanti (macro).

SEA è suddiviso in più sezioni alcune delle quali dedicate all'inserimento dei parametri di calcolo, altre alla definizione delle costanti utilizzate nelle

simulazioni mentre, altre ancora alla “caratterizzazione” della filiera che si intende analizzare (**Tabella 5.2**).

Aspetto	Voci	Unità di misura	Tipo
Azienda Coltura	Durata del ciclo colturale	anni	P
	Densità dell’impianto	p/ha	P
	SAU totale e SAU dedicata a coltura energetica	ha	P - V
	Resa produttiva Prodotto Principale	t <sub>eq</sub> /ha	P/V
	Resa produttiva Sottoprodotto	t <sub>eq</sub> /ha	P/V
Analisi Economica	Prezzo di vendita prodotto energetico	€/t <sub>eq</sub>	P/V
	Prezzo di vendita Sottoprodotti	€/t <sub>eq</sub>	P/V
	Contributi percepiti	€/ha	P
	Costo dei Fattori Produttivi	€/unità	P
Analisi Energetica	Umidità Prodotto Principale	%	P
	Umidità Sottoprodotto	%	P
	PCI del Prodotto Principale	GJ/t <sub>ss</sub>	P
	PCI del Sottoprodotto	GJ/t <sub>ss</sub>	P
	Equivalenti Energetici per i fattori produttivi	MJ/unità	P
Analisi Ambientale	Emissione unitaria media	kg CO <sub>2</sub> eq/kWh <sub>e</sub>	P
	Sistema di riferimento: Emissioni	kg CO <sub>2</sub> eq/kWh <sub>e</sub>	P
	Fattori Emissivi Specifici per i fattori produttivi	kg CO <sub>2</sub> eq/unità	P

Note: V = Variabile; P = Parametro, grandezza che può essere variata tra simulazioni diverse; K = Costante, grandezza che non varia tra simulazioni successive

**Tabella 5.2 – Costanti, parametri e variabili utilizzati da SEA**

Nella **prima sezione**, innanzitutto, deve essere caratterizzata e contestualizzata la coltura agro-energetica.

Nella **seconda sezione** l’operatore definisce la sequenza di operazioni di campo che avvengono nel corso del ciclo colturale e, successivamente per

ognuna di esse, identifica la meccanizzazione impiegata per l'esecuzione. La selezione delle macchine operatrici avviene grazie a un DataBase appositamente predisposto contenente tutte le informazioni necessarie per il calcolo dei costi EEA relativamente alle principali macchine operatrici.

Nella **terza sezione**, l'operatore procede all'accoppiamento operatrice-trattore selezionando questi ultimi tra quelli disponibili nel parco aziendale; è il modello stesso che, in funzione del bilancio dinamico della potenza, ne verifica la razionalità. La scelta dei trattori avviene attraverso un DataBase, simile a quello delle operatrici, nel quale sono elencate le caratteristiche dei trattori disponibili in azienda. In questa sezione è necessario anche definire il numero di volte che un'operazione viene ripetuta nel corso degli anni del ciclo colturale e, eventualmente, definirne la tariffa applicata dai contoterzisti per le operazioni non sono svolte con macchine aziendali. La possibilità di ricorrere ad imprese di servizi agro-meccanici è legata al fatto che per la meccanizzazione di alcune operazioni caratteristiche del ciclo colturale di alcune colture energetiche (es. messa a dimora delle SRF) non sono solitamente presenti nel parco macchine aziendale le operatrici necessarie. In questi casi, da parte dell'operatore agricolo, rispetto all'acquisto, è quindi più ragionevole supporre il ricorso al contoterzista.

Attraverso un pulsante di comando vengono eseguite le macro di calcolo ed è, dunque, possibile visualizzare, nell'apposita **quarta sezione**, i risultati.

#### 5.4 Metodologia

Il **costo EEA totale** deriva dalla sommatoria dei risultati parziali ottenuti nell'analisi delle tre fasi di filiera.

Per quanto riguarda la **fase di campo** i confini del sistema analizzato coincidono sostanzialmente con quelli fisici dell'azienda agricola in cui si suppone di coltivare l'energy crop considerando, in ingresso, tutti i fattori

produttivi e, in uscita, il prodotto principale (PP) e l'eventuale sottoprodotto (SP) (**Figura 5.1**).

Per la **fase di trasporto** l'analisi considera il trasferimento del PP e del SP tra il luogo di produzione a quello di utilizzazione le modalità con cui è effettuato e le eventuali perdite di prodotto (**Figura 5.2**). Per quella **di conversione**, individuato l'impianto, invece SEA valuta i flussi in ingresso sottoforma di PP e, eventualmente, di SP e in uscita come energia e coprodotti (**Figura 5.3**).

Per tutte le fasi e le singole operazioni in cui è suddivisa la filiera vengono considerati tutti i fattori produttivi utilizzati, i flussi di massa e di energia, in ingresso e in uscita.

In **Tabella 5.3** vengono riportate tutte le voci considerate nella definizione del costo EEA, nella maggior parte dei casi tali voci hanno un'incidenza sui tre livelli dell'analisi ma in altri vengono invece considerati solo per uno di questi.

Rispetto alla fase di campo per la quale SEA esegue una valutazione analitica e puntuale di tutti i passaggi caratterizzanti per la fase di conversione si fa invece riferimento a coefficienti ricavati dalla bibliografia che indicano l'incidenza delle operazioni che avvengono in questa fase sul Costo EEA totale. L'estrema complessità dei processi richiederebbe analisi e rilievi *ad hoc* che esulano dagli obiettivi di questo studio mirato ad indagare in particolar modo la fase prettamente agricola delle filiere agro-energetiche. A supporto della soluzione adotta va sottolineato che numerosi autori [Dubuisson, 1998; Lettens, 2003; Faaij, 2006; Vande Walle, 2007] hanno dimostrato che il carico energetico ed emissivo associato alla fase di conversione ha un'incidenza modesta e relativamente costante sulle performance complessive della filiera.

Vengono qui di seguito illustrati i passaggi fondamentali per quanto riguarda il calcolo delle prestazioni economiche, energetiche ed ambientali delle tre fasi di filiera.

VOCE	Analisi		
	Economica	Energetica	Ambientale
Spese di gestione azienda	SI	NO	NO
Beneficio Fondiario	SI	NO	NO
Manodopera	SI	NO	NO
Carburanti	SI	SI	SI
Lubrificanti	SI	SI	SI
Fertilizzanti	SI	SI	SI
Erbicidi	SI	SI	SI
Antiparassitari	SI	SI	SI
Acqua	SI	NO	NO
Materiale di impianto	SI	SI	SI
Plastica	SI	SI	SI
Legna	SI	SI	SI
Altri materiali	SI	SI	SI
Trattori	SI	SI	SI
Macchine operatrici	SI	SI	SI
Fabbricati	NO	NO	NO
Impianti di condizionamento	SI	SI	SI

**Tabella 5.3** – Quadro riassuntivo delle voci considerate dal modello e del loro computo sui livelli EEA per cui è condotta l'analisi

#### 5.4.1 Analisi economica

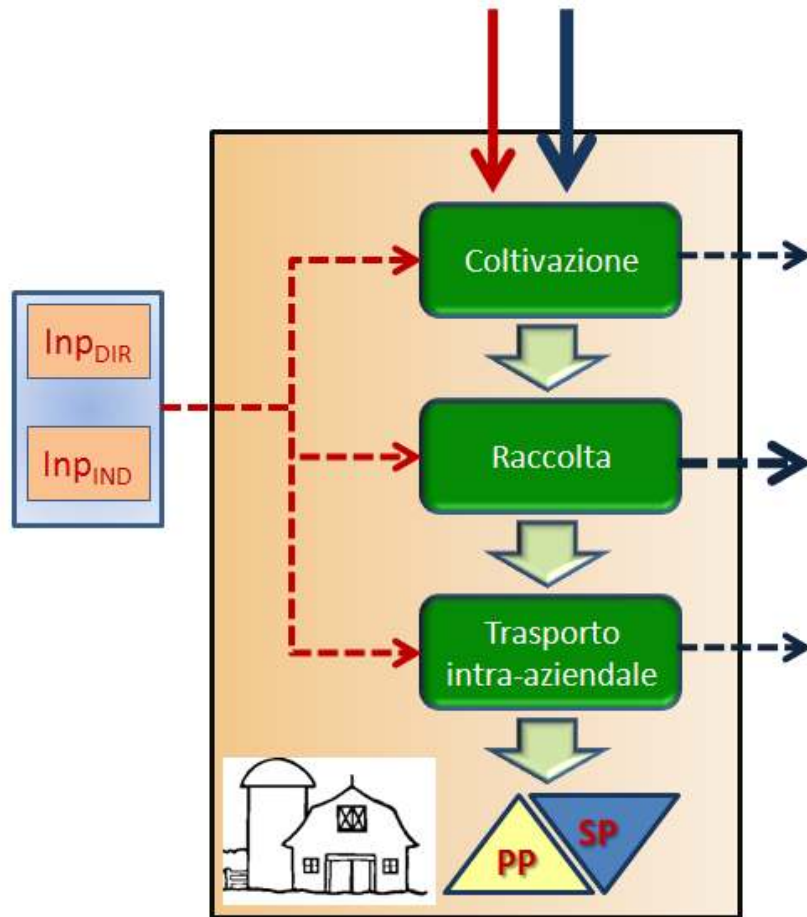
La valutazione degli aspetti economici della sostenibilità complessiva fa riferimento al **metodo di calcolo dei Costi Fissi e dei Costi Variabili** (Lazzari, 2005).

Relativamente alla fase di campo, nel caso in cui una macchina operatrice o un trattore vengano utilizzati sia su  $SAU_{ene}$  che su  $SAU_{trad}$ , il modello esegue



la ripartizione dei Costi Fissi in funzione delle ore annualmente lavorate sulle due superfici (Fiala, 2008; Fiala, 2009).

Per il calcolo del costo economico il modello prevede l'uso di una tariffa (€/km) che l'utente deve inserire.



**Figura 5.1** – Schematizzazione della fase di campo con definizione dei principali flussi (consumi ---, assorbimenti ) d'energia (in rosso) e GHG (in blu)

### 5.4.2 Analisi energetica

L'analisi energetica è condotta utilizzando il metodo della *Gross Energy Requirement* che, come precedentemente detto, prevede il computo unicamente della quota di origine fossile del costo energetico.

Tale costo è calcolato suddividendo i fattori produttivi in diretti e indiretti secondo la classificazione riportata nel Capitolo 2.

#### a) Fase di Campo

Analiticamente la spesa energetica complessiva per questa fase si ottiene dall'applicazione della formula di seguito riportata:

$$\text{Inp}_{\text{CAMPO}} = \text{Inp}_{\text{DIR}} + \text{Inp}_{\text{IND}} + \text{Inp}_{\text{CT}} \quad [\text{MJ}]$$

essendo:

- $\text{Inp}_{\text{CAMPO}}$  = Input energetico totale [MJ];
- $\text{Inp}_{\text{DIR}}$  = Input energetici diretti [MJ];
- $\text{Inp}_{\text{IND}}$  = Input energetici indiretti [MJ];
- $\text{Inp}_{\text{CT}}$  = Input energetici per le operazioni svolte in conto terzi. [MJ].

Gli input diretti possono essere suddivisi in:

$$\text{Inp}_{\text{DIR}} = \text{Inp}_{\text{GAS}} + \text{Inp}_{\text{OL}} + \text{Inp}_{\text{FER}} + \text{Inp}_{\text{ERB}} + \text{Inp}_{\text{ANT}} + \text{Inp}_{\text{AM}} + \text{Inp}_{\text{MI}} + \text{Inp}_{\text{LG}} \quad [\text{MJ}]$$

essendo:

- $\text{Inp}_{\text{GAS}}$  = Input energetico per il consumo di carburante [MJ];
- $\text{Inp}_{\text{OL}}$  = Input energetico per il consumo di lubrificante [MJ];

- $\text{Inp}_{\text{FER}}$  = Input energetico per il consumo di fertilizzanti [MJ];
- $\text{Inp}_{\text{ERB}}$  = Input energetico per il consumo di erbicidi [MJ];
- $\text{Inp}_{\text{ANT}}$  = Input energetico per il consumo di antiparassitari [MJ];
- $\text{Inp}_{\text{AM}}$  = Input energetico per altri materiali [MJ];
- $\text{Inp}_{\text{MI}}$  = Input energetico per materiale di impianto [MJ];
- $\text{Inp}_{\text{LG}}$  = Input energetico per i materiali legnosi [MJ];

mentre quelli indiretti risultano dalla:

$$\text{Inp}_{\text{IND}} = \sum \text{Inp}_{\text{M}} \quad [\text{MJ}]$$

essendo:

- $\text{Inp}_{\text{M}} = \text{Inp}_{\text{TR/SMV}} + \text{Inp}_{\text{MO}}$ , input energetico per l'impiego di macchine (operatrici e trattori) e impianti [MJ];

in cui:

- $\text{Inp}_{\text{TR/SMV}}$  = Input energetico per trattori e macchine semoventi [MJ];
- $\text{Inp}_{\text{MO}}$  = Input energetico per macchine operatrici [MJ];

I **costi energetici dei fattori produttori diretti** vengono calcolati sulla base dei consumi di carburante e lubrificante precedentemente definiti nell'analisi economica e delle dosi applicate per i diversi prodotti. Nota la massa impiegata la conversione avviene utilizzando i relativi Equivalenti Energetici (MJ/unità).

I **costi energetici dei fattori indiretti**, legati all'utilizzo nel corso del ciclo produttivo di impianti e macchine necessarie per l'esecuzione delle diverse operazioni di filiera, sono stimati considerando il contenuto di energia

primaria ( $C_{EMB}$ ) dato dalla somma dell'energia incorporata ("*embedded*") nelle materie prime e dei costi di produzione, trasporto e manutenzione.

Il contenuto di energia primaria ( $C_M$ ) di un trattore, di un'operatrice o, eventualmente, di un impianto di massa  $M$  è dato da:

$$C_M = M \cdot C_{EMB} \quad [MJ]$$

Il contenuto energetico di ogni fattore di produzione a logorio parziale così calcolato deve essere, in ogni caso, distribuito nel corso di tutti gli anni della sua vita utile. Tale ripartizione, per trattori e macchine, avviene generalmente secondo la seguente espressione:

$$Inp_M = C_M / (V_u \cdot h_{aa})$$

essendo:

- $Inp_M$  = Input energetico "*embedded*" per la specifica operazione [MJ/anno];
- $C_M$  = contenuto di energia primaria [MJ];
- $V_u$  = vita utile [h];
- $h_{aa}$  = impiego annuo [h/anno].

Tale approccio però, non considerando che macchine e impianti possono venir utilizzati per un periodo di tempo inferiori alla loro vita utile, può comportare una sottostima del costo energetici indiretti. Poiché, in Italia, soprattutto per quanto riguarda i trattori si registra un impiego annuo modesto e assai lontano dalla vita utile annua (h/anno) (Pellizzi, 1996), SEA, per tener conto di questa realtà e del fatto che una macchina può essere utilizzata anche su  $SAU_{trad}$ , calcola  $Inp_M$  come:

$$Inp_M = [C_M / (h_{aa} \cdot D_E)] \cdot h_{aaCE}$$

essendo:

- $Inp_M$  = Input energetico “*embedded*” macchina per l’operazione specifica [MJ/anno];
- $C_M$  = contenuto di energia primaria [MJ];
- $h_{aa}$  = impiego annuo [h/anno];
- $D_E$  = obsolescenza tecnica [anni];
- $h_{aaCE}$  = impiego annuo su  $SAU_{ene}$  [h/anno].

Per quanto riguarda invece le eventuali operazioni svolte da aziende agro-meccaniche ( $Inp_{CT}$ ), la spesa energetica totale viene ottenuta moltiplicando la “tariffa energetica” di ciascuna specifica operazione per il numero di volte che, nel corso dell’intero ciclo, la stessa viene eseguita. La “**tariffa energetica**” è calcolata con metodologia identica a quella qui descritta ma adottando un impiego annuo ottenuto dividendo la vita utile per l’obsolescenza tecnica dell’operatrice impiegata, nell’ipotesi che le imprese agro-meccaniche riescano ad utilizzare al meglio le proprie macchine operatrici.

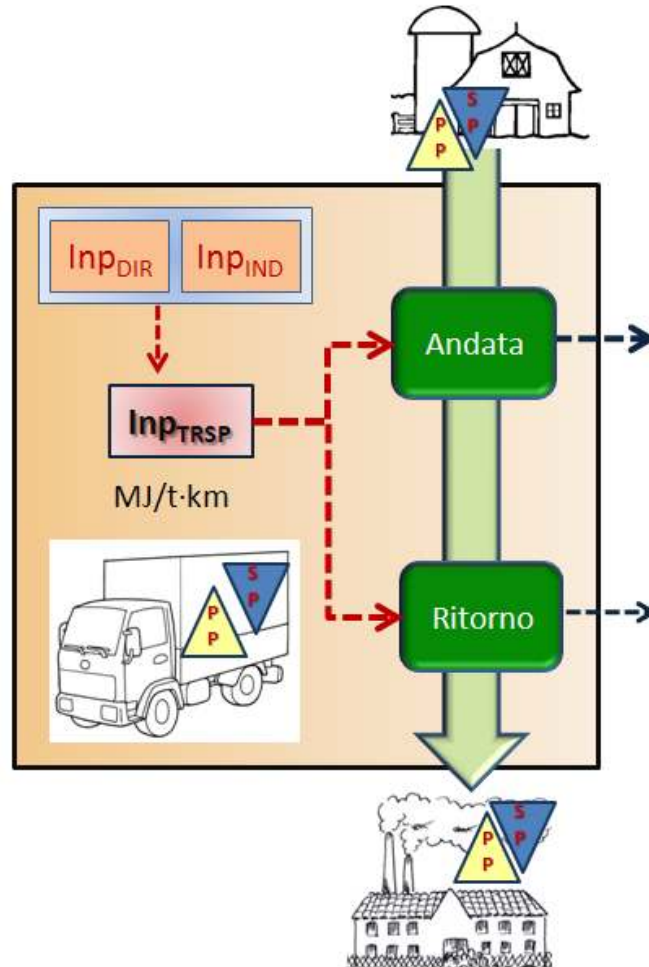
I ricavi energetici di questa fase derivano dalla somma tra l’energia contenuta nel prodotto principale di filiera e quella negli eventuali sottoprodotti qual’ora presenti e utilizzabili.

Noti ricavi e costi vengono calcolati, per questa fase:

- il rapporto Ricavi/Costi, il costo di produzione e il guadagno per unità di massa del prodotto o di superficie;
- l’input e il “guadagno” energetico per unità di prodotto (rapporto  $Inp_{CAMPO}$ /massa totale di prodotto) e l’EROEI;
- l’emissione specifica per unità di prodotto o di superficie.

**b) Fase di Trasporto**

Questa fase della filiera rispetto alle quelle di campo e di trasformazione si presenta come la più semplice.



**Figura 5.2** – Schematizzazione della fase di trasporto con definizione dei principali flussi (consumi ---, assorbimenti ) di energia (in rosso) e GHG (in blu)

Il prodotto della fase di campo (più eventualmente il sottoprodotto) viene trasportato al luogo in cui avverrà la trasformazione nel prodotto finale (energia o vettore energetico); durante le operazioni di movimentazioni SEA permette di considerare che una parte del prodotto venga persa ma suppone che le caratteristiche energetiche dello stesso rimangano inalterate. La possibilità di considerare variazioni dei parametri caratteristici della biomassa come ad esempio il suo Potere Calorifico Inferiore o il suo contenuto idrico, non è stata implementata nel modello causa l'assenza di specifici dati a riguardo e l'impossibilità di condurre, all'interno del dottorato di ricerca, specifici rilievi a riguardo. Tale scelta deriva anche dal fatto che la fase di trasporto avviene in un arco temporale ristretto durante il quale è forzato sopporre radicali trasformazioni delle caratteristiche del prodotto.

Il calcolo del costo energetico associato al trasporto avviene considerando le seguenti variabili:

- **tipologia di mezzo** di trasporto adottata a cui è associato uno specifico coefficiente che esprime l'energia consumata per tonnellata di prodotto trasportata per un kilometro (MJ/t·km);
- **distanza** tra il luogo di produzione e il luogo di utilizzo del prodotto (km);
- **coefficiente di carico** complessivo che indica la percentuale di carico del mezzo di trasporto considerando sia il viaggio di andata sia l'eventuale viaggio di ritorno. Nel caso in cui un'attenta logistica dei trasporti permetta al mezzo utilizzato di viaggiare a pieno carico sia in andata verso l'impianto di trasformazione sia durante il viaggio di ritorno il coefficiente di carico è pari a 1. Invece, nel caso in cui il mezzo di trasporto viaggi a pieno carico in andata e vuoto al ritorno tale coefficiente è pari a 0,5. La capacità di aumentare, attraverso una buona organizzazione dei trasporti, il coefficiente di carico può avere un ruolo decisivo nella riduzione del costo energetico associato a questa fase della filiera.

Il costo energetico associato al trasporto ( $\ln_{\text{TRASPORTO}}$ , MJ) è ricavato dunque dalla seguente equazione:

$$\text{Inp}_{\text{TRASPORTO}} = \frac{(d_A + d_B)}{\text{Media}(CC_A, CC_R)} \cdot M_P \cdot \text{EN}_{\text{TR}} \quad [\text{MJ}]$$

con:

$d_A$  e  $d_B$  = Distanza di andata e di ritorno [km];

$CC_A$  e  $CC_R$  = Coefficiente di carico in andata e in ritorno [%];

$M_P$  = Massa di biomassa prodotta a seguito della fase di campo [t],

$\text{EN}_{\text{TR}}$  = Costo energetico specifico per la tipologia di mezzo di trasporto adottata (**Tabella 2.2**) [MJ/t · km].

Il modello considera inoltre la possibilità che durante la fase di trasporto parte del prodotto venga perso nelle operazioni di movimentazione (carico, trasferimento e scarico).

L'utente deve quindi indicare la **percentuale di prodotto persa** nelle operazioni di carico, trasferimento e scarico ( $\%_{p1}$ ; %) che dipende dalle modalità con cui tali operazioni sono eseguite (**Figura 5.4**). Conseguentemente, la massa di prodotto che giunge all'impianto ( $M_U$ ) di conversione ed è qui stoccata per un periodo di tempo più o meno lungo è data dalla seguente espressione:

$$M_U = M_P \cdot (1 - \%_{p1}) \quad [\text{t}]$$

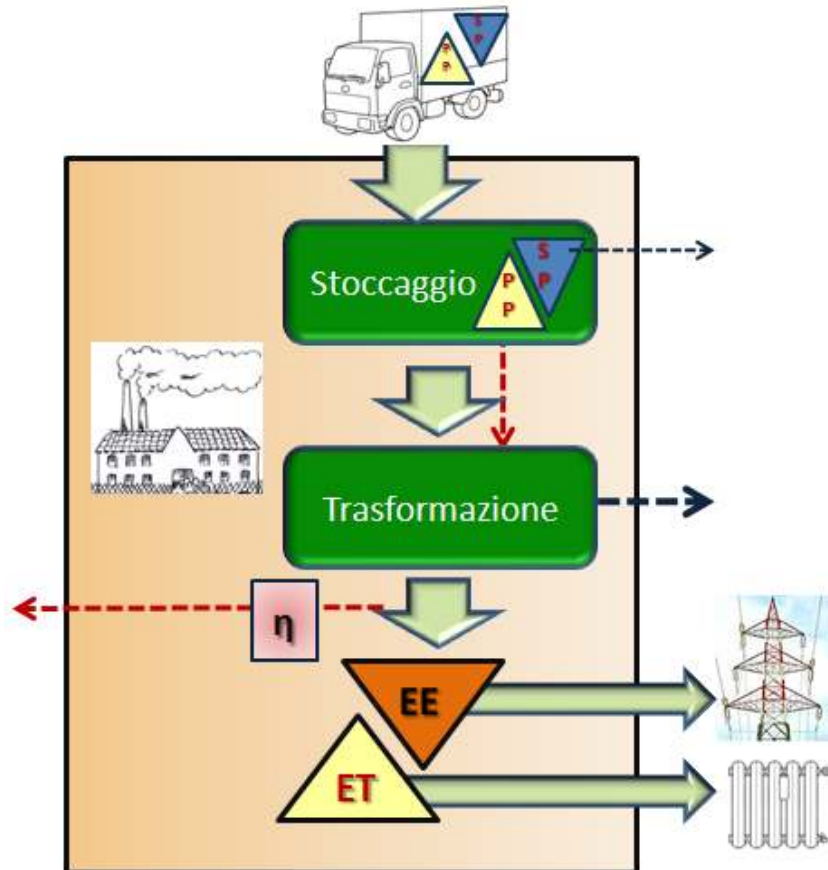
con:

$M_U$  = Massa utile di prodotto, quantità di biomassa che giunge all'impianto di trasformazione [t]

$M_P$  = Massa di biomassa prodotta a seguito della fase di campo [t]

$\%_{p1}$  = Percentuale di prodotto persa durante le operazioni di movimentazione del prodotto [%].





**Figura 5.3** – Schematizzazione della fase di trasporto con definizione dei principali flussi (consumi ---, assorbimenti - ) di energia (in rosso) e GHG (in blu).

### c) Fase di Conversione

Gli **input** energetici associati alla fase di trasformazione rappresentano, come già detto, una quota ridotta rispetto all'input complessivo e vengono pertanto calcolati ricorrendo a **coefficienti empirici** che indicano appunto la percentuale dell'input energetico totale che è legata alla trasformazione del

prodotto della fase di campo in energia. Tale quota (%EN<sub>TRASF</sub>) dipende fondamentalmente dalla tipologia di impianto.

Il costo energetico totale di filiera (Inp<sub>EN</sub>) è quindi ricavato come:

$$\text{Inp}_{\text{EN}} = \frac{(\text{Inp}_{\text{CAMPO}} + \text{Inp}_{\text{TRASPORTO}})}{(1 - \% \text{EN}_{\text{TRASF}})}$$

Inp<sub>EN</sub> = Costo energetico totale di filiera [MJ];

Inp<sub>CAMPO</sub> = Costo energetico fase di campo [MJ];

Inp<sub>TRASPORTO</sub> = Costo energetico fase di trasporto [MJ];

%EN<sub>TRASF</sub> = Percentuale di Inp<sub>EN</sub> dovuto alla fase di trasformazione [%];

Relativamente invece al calcolo del **ricavio energetico** il modello considera anche la possibilità che, nel corso dello **stoccaggio** precede l'utilizzazione, possano avvenire sia **perdite di prodotto** dovute a una movimentazione imperfetta sia causate dall'avvento di fermentazioni e/o all'attacco di funghi e batteri (**Figura 5.4**).

La massa effettivamente trasformata in energia (M<sub>T</sub>) si ha quindi dalla seguente espressione:

$$M_T = M_U \cdot (1 - \%p_2) \cdot (1 - \%p_3) \quad [\text{t}]$$

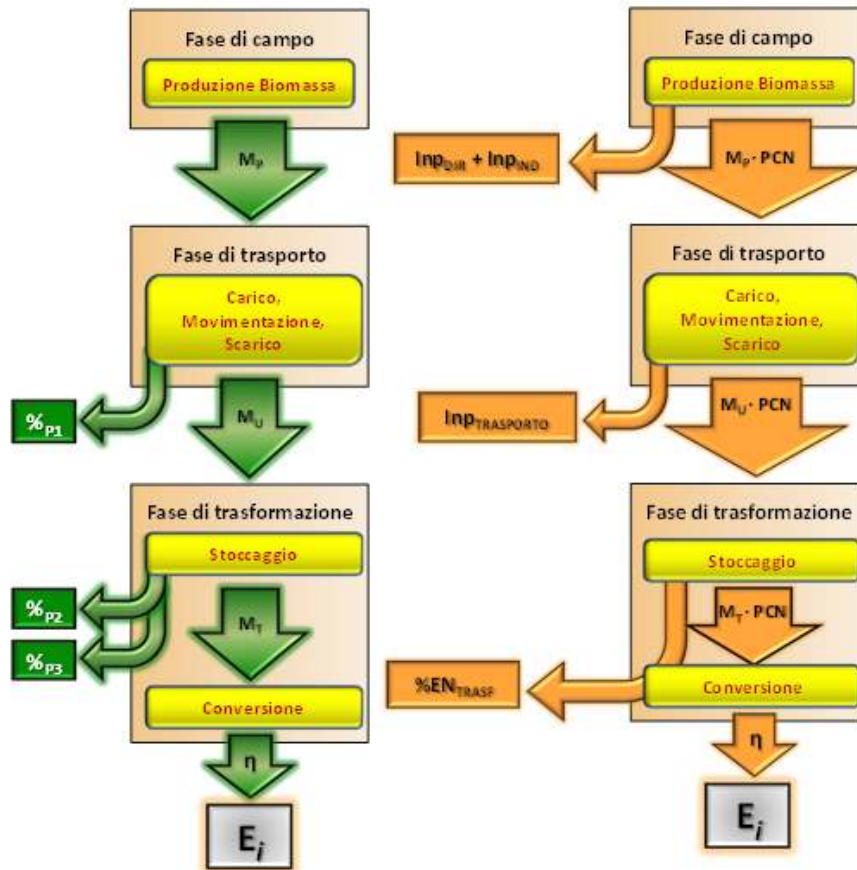
con:

M<sub>T</sub> = Massa di prodotto effettivamente utilizzata per la conversione [t];

M<sub>U</sub> = Massa di prodotto che giunge all'impianto di conversione [t];

$\%p_2$  = Percentuale di prodotto persa durante le operazioni di movimentazione del prodotto che avvengono all'impianto di trasformazione [%];

$\%p_3$  = Percentuale di prodotto persa a causa di fenomeni fermentativi e/o di altri agenti che comportano la riduzione della sostanza secca [%].



**Figura 5.4** – A sinistra diagramma dei flussi di massa nelle tre fasi della filiera, a destra diagramma dei flussi di energia

Il **ricavo energetico** ( $OUT_{EN}$ ) dipende oltre che dalla quantità di biomassa che giunge alla trasformazione (“a bocca impianto”) anche e soprattutto dal rendimento di conversione caratteristico dell’impianto stesso:

$$OUT_{EN} = M_T \cdot PCN \cdot \eta = \quad [MJ]$$

con:

PCN = Potere Calorifico Netto di  $M_T$ ,

$$\text{con } PCN = PCI \cdot (1 - U) - 2,52 \cdot U = [MJ/kg_{tq}]$$

U = Percentuale di umidità [%]

$\eta$  = rendimento di trasformazione dell’impianto [%]

#### 5.4.3 Analisi ambientale

Anche per l’analisi delle emissioni di GHG vengono analizzate separatamente le tre fasi della filiera. Il modello è implementato secondo le linee guida redatte recentemente da importanti gruppi di lavoro internazionale e in particolare seguendo le indicazioni dell’IPCC e dell’IEA ([Schlamadinger, 1997](#); [IPCC, 2001](#); [IPCC, 2006](#); [Cherubini, 2010](#); [Jungmeier, 2000](#); [IEA, 2006](#); [Daviet, 2006](#); [Bergsma, 2006](#)).

Di seguito viene riportato il sistema di calcolo e le principali assunzioni fatte da SEA per il calcolo delle emissioni nelle tre fasi della filiera.

SEA computa il costo ambientale totale di filiera ( $kg\ CO_2\ eq.$ ) sommando alle emissioni legate all’impiego dei diversi fattori di produzione (calcolate tramite i rispettivi Fattori Emissivi Specifici) quelle di  $N_2O$  causate dall’impiego di fertilizzanti azotati.

**a) Fase di Campo**

Anche nella valutazione ambientale della fase di campo, per il calcolo delle emissioni ( $EM_{CAMPO}$ ), sono distintamente computate le emissioni dirette ( $EM_{DIR}$ ), quelle indirette ( $EM_{IND}$ ) e quelle dovute all'impiego di fertilizzanti azotati.

Così come per l'analisi energetica tra quelle dirette vengono considerate tutte le emissioni derivanti dall'impiego dei fattori produttivi a logorio totale mentre in quelle indirette si considerano le emissioni legate alla produzione dei fattori produttivi a logorio parziale:

$$EM_{CAMPO} = EM_{DIR} + EM_{IND} + EM_{N2O} \quad [t \text{ CO}_2 \text{ eq}]$$

La stima delle **emissioni dirette** avviene mediante l'impiego di Specifici Fattori di Emissione ( $\text{kg CO}_2 \text{ eq./kg}$ ) calcolati tenendo conto delle emissioni di GHG legate alla produzione dei diversi fattori produttivi impiegati. Le emissioni per l'impiego dei fattori produttivi sono espresse in  $\text{kg CO}_2 \text{ eq.}$  e considerano le emissioni di  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  pesate per i rispettivi GWP ([Tabella 5.4](#)).

Genericamente:

$$EM_{DIR\ i} = M_i \cdot FE_i \quad [\text{kg CO}_2 \text{ eq}]$$

con:

$EM_{DIR\ i}$  = Emissione di GHG legate all'utilizzo del generico fattore di produzione diretto  $i$  [kg  $\text{CO}_2 \text{ eq}$ ]

$M_i$  = Massa del fattore produttivo impiegata [kg]

$FE_i$  = Fattore emissivo specifico per il fattore produttivo  $i$  [kg CO<sub>2</sub> eq/kg]

GHG	GWP(*)
CO <sub>2</sub>	1
CH <sub>4</sub>	21
N <sub>2</sub> O	310

**Tabella 5.4 – Global Warming Potential dei tre GHG considerati**

*Note: (\*) Global Warming Potential: misura il contributo di un gas all'effetto serra ed è calcolato per uno specifico periodo di tempo. Questo indice è basato su una scala relativa che confronta il gas considerato con un'uguale massa di CO<sub>2</sub>, il cui GWP è, per definizione, pari a 1. Complessivamente vengono emesse circa 3,6 kg di CO<sub>2</sub> eq/kg di gasolio*

Le **emissioni indirette** associate all'uso di fattore produttivo indiretto sono stimate sulla base dell'input energetico che lo caratterizza ( $Inp_i$ , MJ) e dell'**Emissione Unitaria Media** ( $EM_{UM}$ , kg CO<sub>2</sub> eq/MJ di energia). Nelle simulazioni è impostato come valore di default 0,575 kg CO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub>.

Genericamente:

$$EM_{IND\ i} = Inp_i \cdot EM_{UM} \quad [kg\ CO_2\ eq]$$

con:

$EM_{IND\ i}$  = Emissione di GHG legate all'utilizzo del generico fattore di produzione indiretto  $i$  [kg CO<sub>2</sub> eq];

$Inp_i$  = Costo energetico associato al fattore produttivo  $i$  [MJ];

$EM_{UM}$  = Emissione unitaria media [kg CO<sub>2</sub> eq/MJ].

L'impiego di fertilizzanti azotati comporta oltre all'emissione della quantità di GHG indicata dal fattore emissivo anche la produzione di N<sub>2</sub>O da parte del suolo. Quest'ulteriore massa di GHG deve essere considerata nel calcolo del costo ambientale. La quantità di N<sub>2</sub>O emessa per unità di azoto apportata al suolo (%<sub>N<sub>2</sub>O/N</sub>) è un parametro di calcolo che l'utente può selezionare tra quelli riportati da SEA (**Tabella 5.5**); in assenza di ciò vengono utilizzati come valori di default quelli indicati dall'IPCC.

Tipologia di fertilizzante azotato	Fattore emissivo dell'N <sub>2</sub> O %N <sub>2</sub> O/N [N <sub>2</sub> O-N come % di N <sub>supply</sub> ]	
	Fonte	
Fertilizzanti minerali	IPCC, 2006	Naturvårdsverket, 2009
Fertilizzanti organici	1	0,8
Residui colturali	1	2,5
	1	1,25

**Tabella 5.5** – Fattori emissivi dell'ossido di azoto (%<sub>N<sub>2</sub>O/N</sub>) per differenti fertilizzanti azotati e differenti fonti [IPCC, 2006; Naturvårdsverket, 2009 ]

Si ha quindi:

$$EM_{N_2O} = N_{supply} \cdot \%_{N_2O/N} \cdot 310 \quad [kg \text{ CO}_2 \text{ eq}]$$

con:

$$EM_{N_2O} = \text{Emissioni di GHG dal suolo} \quad [kg \text{ CO}_2 \text{ eq}]$$

$$N_{supply} = \text{Massa di azoto applicata al suolo con i fertilizzanti} \quad [kg_N]$$

$\%_{N_2O/N} = \text{Percentuale di } N_{\text{supply}} \text{ emessa come } N_2O$  [% - kg  
 $N_2O/kg_N]$

310 = Global warming potential dell' $N_2O$  [-]

### b) Fase di Trasporto

Le emissioni di GHG associate a questa fase ( $EM_{\text{TRASPORTO}}$ ) vengono stimate moltiplicando il costo energetico ( $Inp_{\text{TRASPORTO}}$ ) per l'emissione unitaria media.

$$EM_{\text{TRASPORTO}} = Inp_{\text{TRASPORTO}} \cdot EM_{\text{UM}} \quad [\text{kg CO}_2 \text{ eq}]$$

### c) Fase di Trasformazione

Così come per la stima del costo energetico associato alla fase di conversione SEA anche per il computo delle emissioni legate a quest'ultima fase di filiera ( $EM_{\text{TRASFORMAZIONE}}$ ) impiega degli specifici coefficienti che indicano la percentuale del costo ambientale totale ( $EM_{\text{GHG}}$ ) che è dovuta alle operazioni che si avvengono nell'impianto di conversione. Tale coefficiente ( $\%GHG_{\text{TRASF}}$ ) dipende dalla tecnologia impiegata per la trasformazione della biomassa e sono variabili a seconda della filiera considerata.

$$EM_{\text{GHG}} = \frac{(EM_{\text{CAMPO}} + EM_{\text{TRASPORTO}})}{(1 - \%GHG_{\text{TRASF}})} \quad [\text{t CO}_2 \text{ eq.}]$$

con:

$$EM_{\text{GHG}} = \text{Emissioni totali di GHG} \quad [\text{t CO}_2 \text{ eq.}]$$

$$EM_{\text{CAMPO}} = \text{Emissioni GHG della fase di campo} \quad [\text{t CO}_2 \text{ eq.}]$$



$EM_{\text{TRASPORTO}}$  = Emissioni di GHG della fase di trasporto [t CO<sub>2</sub> eq.]

$\%GHG_{\text{TRASF}}$  = Percentuale di  $EM_{\text{GHG}}$  dovuta alla fase di trasformazione [%]

Per quanto riguarda invece la stima del **ricavo ambientale**, occorre considerare che, sebbene nel corso del ciclo colturale la pianta assorba CO<sub>2</sub> dall'atmosfera organicandola, questa quantità non può essere computata nel bilancio dei GHG perché viene re-immessa in atmosfera nel momento in cui la biomassa è utilizzata.

SEA dunque, relativamente al bilancio dei GHG, in accordo con le linee guida internazionali ([Schlamadinger, 1997](#); [IPCC,2001](#); [IPCC, 2006](#); [Cherubini, 2010](#); [Jungmeier, 2000](#); [IEA, 2006](#)), confronta le emissioni per unità di energia prodotta (**kg CO<sub>2</sub>/kWh**) con quelle di una filiera energetica di riferimento ("**reference systems**") considerando come output la differenza tra le due.

L'**emissione specifica** della filiera agro-energetica per unità di energia prodotta ( $EM_{\text{FA-E}}$ , kg CO<sub>2</sub> eq./MJ) è ricavabile dal rapporto tra le emissioni totali ( $EM_{\text{GHG}}$ ) e l'energia totale prodotta che corrisponde all'output energetico ( $OUT_{\text{EN}}$ ):

$$EM_{\text{FA-E}} = \frac{EM_{\text{GHG}}}{OUT_{\text{EN}}} = \quad \text{[kg CO}_2 \text{ eq./kWh]}$$

Il **ricavo Ambientale** ( $OUT_{\text{GHG}}$ ) deriva dunque dall'equazione di seguito riportata. Appare evidente che nel caso in cui la filiera agro-energetica produca più emissioni rispetto a quella di riferimento tale ricavo risulta negativo:

$$OUT_{\text{GHG}} = EM_{\text{FA-E}} - EM_{\text{RS}} = \quad \text{[+/- kg CO}_2 \text{ eq./MJ]}$$

con:

$EM_{FA-E}$  = Emissione specifica di GHG per unità di energia prodotta per la filiera agro-energetica [kg CO<sub>2</sub>eq/MJ];

$EM_{RS}$  = Emissioni specifiche di GHG per unità di energia per il sistema di riferimento [kg CO<sub>2</sub>eq/MJ];

$OUT_{GHG}$  = Emissioni evitate/causate per unità di energia prodotta [kg CO<sub>2</sub>eq/MJ];

## 5.5 Allocazione

In alcuni casi, come già accennato nel Capitolo 4, il prodotto finale della filiera agro-energetica non è sempre costituito da un'unica forma di energia così come essere associato alla produzione di uno o più sottoprodotti potenzialmente valorizzabili economicamente, energeticamente e ambientalmente. E' il caso, ad esempio della filiera biogas che comporta la produzione sia di energia termica (ET) sia di energia elettrica (EE) e del digestato che può comunque essere utilizzato come ammendante.

In queste situazioni il calcolo dei costi e ricavi EEA specifici si presenta problematico o comunque più difficoltoso rispetto ai casi in cui il prodotto di filiera è unico.

SEA, per quanto riguarda le cogenerazioni, ripartisce il costo totale, l'input energetico totale e le emissioni di GHG complessive permettendo all'utente di individuare il **metodo di allocazione** che ritiene più opportuno individuandoli tra quelli precedentemente descritti (cfr. 4.5.1).

### 5.5.1 Allocazione Prodotti principali

Vengono di seguito riportate le metodologie di allocazione implementate dal modello e selezionabili dall'utente per quanto riguarda l'allocazione del

costo totale e del carico energetico-ambientale nel caso in cui la filiera compori la produzione simultanea di più forme di energia

### Displacement method

In questo metodo individuata l'unità funzionale (in genere l'unità di energia elettrica – Energia Elettrica), il programma scorpora dal costo EEA i **crediti** determinati calcolando quale sarebbe il costo energetico e ambientale associato alla produzione con sistemi “tradizionali” dell'altra forma di energia (es. Energia Termica).

Per esempio, nel caso in cui la filiera produca sia Energia Elettrica che Energia Termica e che la prima delle due forme di energia sia stata scelta come unità funzionale dell'analisi, per il calcolo dei tre costi si avrà:

$$CP_{EE} = \frac{SP_{TOT} - V\epsilon_{ET}}{OUT_{EE}} = \quad [€/kWh_e]$$

con:

$CP_{EE}$  = Costo di produzione dell'energia elettrica (EE) prodotta [€/kWh<sub>e</sub>];

$SP_{TOT}$  = Spese totali di filiera [€];

$V\epsilon_{ET}$  = Valore economico dell'energia termica (ET) prodotta [€/kWh<sub>th</sub>];

$OUT_{EE}$  = Ricavo energetico, quantità di EE prodotta [kWh<sub>e</sub>];

$$Inp_{EN\_EE} = \frac{Inp_{TOT} - VE_{ET}}{OUT_{EE}} = [MJ/kWh_e]$$

con:

$Inp_{EN\_EE}$  = Costo energetico specifico dell'energia elettrica (EE) [MJ/kWh<sub>e</sub>];

$Inp_{TOT}$  = Costo energetico totale di filiera [MJ];

$VE_{ET}$  = Valore energetico dell'energia termica (ET) cioè la quantità di energia che dovrebbe essere utilizzata per produrre un'equivalente quantità di calore [MJ/kWh<sub>th</sub>];

$OUT_{EE}$  = Ricavo energetico, quantità di EE prodotta [ $kWh_e$ ];

$$EM_{EN\_EE} = \frac{EM_{TOT} - VGHG_{ET}}{OUT_{EE}} = \quad [kg \text{ CO}_2 \text{ eq./kWh}_e]$$

con:

$EM_{EN\_EE}$  = Emissione specifica per unità di energia elettrica prodotta [ $MJ/kWh_e$ ];

$EM_{TOT}$  = Emissione totale di filiera [ $MJ$ ];

$VGHG_{ET}$  = Crediti GHG associati all'energia termica (ET) prodotta, cioè la quantità di gas ad effetto serra che verrebbero emessi per produrre un'equivalente quantità di calore [ $kg \text{ CO}_2 \text{ eq./kWh}_{th}$ ];

$OUT_{EE}$  = Ricavo energetico, quantità di EE prodotta [ $kWh_e$ ];

#### **Metodo di allocazione basato sull'Exergia**

Questo metodo per l'allocazione di costi, input e emissioni totali utilizza **parametri termodinamici** che vengono utilizzati come fattori di ripartizione. In genere viene considerata l'Exergia delle forme di energia prodotta.

Per energia termica ed energia elettrica al  $kWh_e$  viene allocata una quantità che è 5 volte quella allocata al  $kWh_{th}$  considerando un fattore di Carnot di 1 per l'elettricità e 0,2 per il calore.

#### **Metodo di allocazione basato sui Prezzi**

Il coefficiente per l'allocazione è calcolato considerando il **prezzo finale** delle due forme di energia. E' utilizzato come fattore per la ripartizione il rapporto tra il prezzo dell'EE e la somma dei due prezzi. Il prezzo finale delle due forme di energia può essere comprensivo degli incentivi oppure al netto di questi.

$$K_{EE} = \frac{P_{EE}}{(P_{EE} + P_{ET})} = [\%]$$

con:

$K_{EE}$  = Coefficiente di allocazione per l'EE [%];

$P_{EE}$  e  $P_{ET}$  = Prezzo dell'energia elettrica (EE) e dell'energia termica (ET) [€/kWh];

$$CP_{EE} = \frac{SP_{TOT} \cdot K_{EE}}{OUT_{EE}} = [€/kWh_e]$$

$$Inp_{EN\_EE} = \frac{Inp_{TOT} - K_{EE}}{OUT_{EE}} = [MJ/kWh_e]$$

$$EM_{EE} = \frac{EM_{TOT} - K_{EE}}{OUT_{EE}} = [kg CO_2 eq./kWh_e]$$

con:

$CP_{EE}$  = Costo economico specifico dell'energia elettrica (EE) prodotta [€/kWh<sub>e</sub>];

$SP_{TOT}$  = Spese totali di filiera [€];

$Inp_{EN\_EE}$  = Costo energetico specifico dell'energia elettrica [MJ/kWh<sub>e</sub>];

$EM_{EN\_EE}$  = Emissione specifica per unità di energia elettrica [kg CO<sub>2</sub> eq./kWh<sub>e</sub>];

$OUT_{EE}$  = Ricavo energetico, quantità di EE prodotta [kWh<sub>e</sub>];

### Metodo di allocazione basato sull'Efficienza energetica

Il coefficiente di allocazione è calcolato considerando l'efficienza di produzione delle due forme di energia.

$$K_{EE} = \frac{\eta_{EE}}{(\eta_{ET} + \eta_{EE})} = [\%]$$

con:

$K_{EE}$  = Coefficiente di allocazione per l'EE [%];

#### 5.5.2 Allocazione sottoprodotti

Per quanto riguarda i sottoprodotti il metodo applicato da SEA per considerare la loro produzione è quello del *displacement* che prevede di associarvi crediti in funzione della possibilità che venga impiegato in sostituzione di fattori di produzione che, se utilizzati, comporterebbero un costo economico, un input energetico e uno ambientale.

All'utente è richiesto di inserire l'entità del credito EEA del sottoprodotto (€/t; MJ/t; kg CO<sub>2</sub> eq/t). Tale credito, considerando poi la massa complessiva di sottoprodotto, è poi scorporato dalle spese complessive, dall'input energetico totale e dalle emissioni GHG di filiera.

## 5.6 Bibliografia

Bergsma et altri., 2006 – The greenhouse gas calculation methodology for biomass-based electricity, heat and fuels, Report from Working group CO2 Methodology, 1-39.

Cherubini F., Stromman A-H., 2010 – Life cycle assessment of bioenergy system: State of the art and future challenges, Bioresource Technology

Daviet F., 2006 – Designing a customized greenhouse gas calculation tool, World Resources Institute, 1-42.

Dubuisson X., Sintzoff I., 1998 - Energy and CO<sub>2</sub> balances in different power generation routes using wood fuel from short rotation coppice, *Biomass & Bioenergy*, 15, 379-390.

Faij A. 2006 – Modern biomass conversion technologies, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11, 335-367.

Fiala M., Bacenetti J., 2009 – Filiere agroenergetiche a confronto: bilancio economico, energetico e ambientale *Proceedings AIIA2009 Ricerca e innovazione nell'ingegneria agraria dei biosistemi agro/territoriali*, Ischia (NA), pp. 11, 12-16 settembre 2009.

Fiala, M., 2008 - Costo di produzione e profitto del pioppo da cippato, *Estimo e Territorio*, 11. 45-54.

IEA-Task38, 2006 . Greenhouse gas balances of biomass and bioenergy systems, *IEA Bioenergy Task*, 1-4.

IPCC, 2006, Guidelines for national greenhouse gas inventors and revision of the UNFCCC reporting guidelines for Annex I Parties to the Convention

IPCC—Intergovernmental Panel on Climate Change, 1996 - In: Houghton JT, Meira Filho LG, Callander BA, Harris N, Kattenberg A, Maskell K (eds) *Climate change 1995: the science of climate change*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge

IPCC—Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001a - *Climate change 2001: the scientific basis: contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge

IPCC—Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001b - *Climate change 2001: the scientific basis: contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Table 6.7 and Table 6.8. Cambridge University Press, Cambridge

IPCC—Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005 - In: Metz B, Kuijpers L, Solomon S, Andersen SO, Davidson O, Pons J, de Jager D, Kestin T, Manning M, Meyer L (eds) Special report on safeguarding the ozone layer and the global climate system: issues related to hydrofluorocarbons and perfluorocarbons, special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge

Jungmeier G., 2000 – LCA for comparison of greenhouse gas emissions of bioenergy and fossil energy systems, 8° Meeting of CPST E9-Working Group 3, 17-20 September Montpellier.

Lazzari M., Mazzetto F., 2005 - Prontuario di Meccanica Agraria e Meccanizzazione, Reda.

Lettens S. et altri, 2003 – Energy budget and greenhouse gas balance evaluation of sustainable coppice systems for electricity production, Biomass & Bioenergy, 24, 179-197.

Pellizzi G. et altri., 2006 – Meccanica agraria: Il trattore e le macchine operatrici, Edagricole, pp. 320

Schlamadinger B. et altri, 1998 – Towards a standard methodology for greenhouse gas balances of bioenergy systems in comparison with fossil energy systems, Biomass & Bioenergy, 13, 359-375.

Vande Walle I. et altri, 2007 – Short rotation Forestry of birch, maple, poplar and willow in Flanders (Belgium) II: Energy production and CO<sub>2</sub> emission reduction potential, Biomass & Bioenergy, 31, 276-283.



## 6 Applicazione del modello

### 6.1 Premessa

Una volta sviluppato SEA è stato applicato ad alcune filiere agro-energetiche attualmente sviluppate in Italia e in Europa. Per alcune di queste l'analisi è stata condotta considerando tutte le tre fasi della filiera mentre per altre in cui la fase di conversione è tipicamente svolta da soggetti di carattere industriale la fase di conversione non è stata inclusa nell'analisi che calcola quindi le performance EEA a bocca impianto. Nei casi studio in cui l'analisi della filiera comprende tutte le tre fasi viene calcolato anche l'**Indice di Sostenibilità Complessiva**.

Allo scopo di mettere in luce alcuni aspetti metodologici fondamentali che possono giocare un ruolo fondamentale nella definizione delle prestazioni EEA di una filiera nel primo dei casi studio riportato la simulazione è condotta confrontando i risultati della filiera ottenuti ipotizzando differenti scelte metodologiche e differenti possibilità di conversione.

Ad eccezione che per il primo caso studio il cui scopo è appunto quello di evidenziare la potenzialità del modello per tutti gli altri le informazioni riportate sono funzionali a permettere un confronto tra le diverse filiere studiate.

### 6.2 Pioppo MRF in Italia

Questa filiera termochimica è basata sulla trasformazione di biomassa ligno-cellulosica ottenuta attraverso la coltivazione di colture legnose a rapido accrescimento (*Short Rotation Coppice* - SRC) in Italia.

La coltivazione di specie arboree caratterizzate da un rapido sviluppo ad elevate densità permette la produzione di notevoli quantità di biomassa che può essere trasformata sia in impianti a combustione diretta così come in gassificatori per la produzione di energia elettrica (**Figura 6.1**) e/o di energia termica.

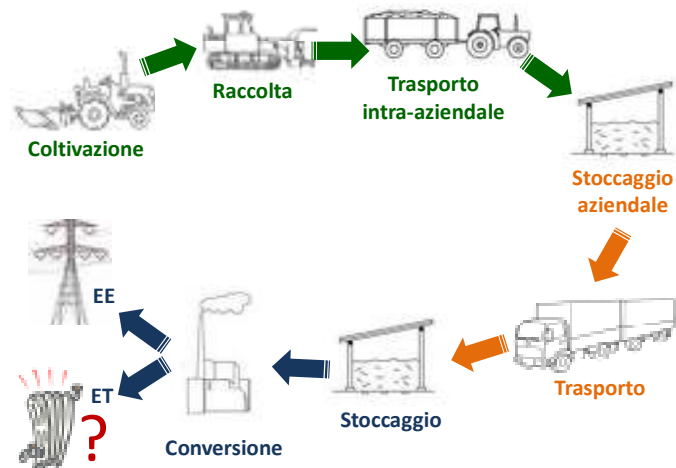
In Italia le SRC sono state introdotte da circa 20 anni e attualmente coprono una superficie di circa 5500-6000 ha la maggior parte dei quali localizzati in Lombardia e gestiti con cicli di ceduzione biennali (*Short Rotation Forestry*). Le SRC a ciclo medio (*Medium Rotation Forestry – MRF*) attualmente coprono una superficie di circa 1000-1500 ha. Rispetto alle *SRF* le *MRF* sono state introdotte solo successivamente. A differenza del ciclo biennale la possibilità di ceduire ogni 4-6 anni permette, in primo luogo, di rispondere più efficacemente all'andamento del prezzo di mercato del cippato grazie alla possibilità di anticipare o posticipare la raccolta ma consente anche la produzione di un cippato di migliore qualità grazie al minor contenuto in ceneri dovuto alla minor proporzione di corteccia rispetto a quella di legno.

La principale differenza tra i due sistemi colturali riguarda la fase di campo che nelle *MRF* richiede un minor impiego di fattori produttivi e in cui le operazioni di taglio e cippatura avvengono in momenti separati ad opera di due operatrici differenti (raccolta a cantieri separati).

Questo caso studio intende valutare costi, benefici e bilanci EEA di un'ipotetica filiera agro-energetica per la produzione di energia elettrica basata sull'impiego di cippato di *MRF* a ceduzione quinquennale; l'unità funzionale individuata è il gigawatt'ora elettrico (1 GWh<sub>e</sub>).

### 6.2.1 Fase di campo

Per quanto riguarda i dettagli della **fase di campo** della filiera si rimanda all'**Allegato B1**, in sintesi i principali parametri di calcolo considerati sono un ciclo colturale di 10 anni con due ceduzioni al 5° e al 10°, una resa di 40 t<sub>tq</sub>/ha·anno (U = 55%, PCI = 18,5 MJ/t<sub>ss</sub>) e un prezzo di vendita di 35 €/t<sub>tq</sub>.



**Figura 6.1** – Schematizzazione della caso studio A

La piantagione prevede la coltivazione di cloni di pioppo specifici per la produzione di biomassa (AF2) in pianura Padana con una densità di 1150 piante/ha (**Figura 6.2**).

In **Tabella 6.1** sono riportati i **costi EEA specifici** per unità di biomassa prodotta. Per maggiori dettagli relativamente all'analisi di questa fase si rimanda all'**Allegato B1**.

COSTO	Unità di misura	Valore
Economico	€/t <sub>ss</sub>	59,5
Energetico	MJ/t <sub>ss</sub>	300
Ambientale	kg CO <sub>2</sub> eq/t <sub>ss</sub>	40,2

**Tabella 6.1** – Costi EEA specifici per la fase di campo



**Figura 6.2** – Impianto MRF con astoni di due anni appena messi a dimora

### 6.2.2 Fase di trasporto

Il trasporto della biomassa avviene attraverso un autotreno con capacità utile totale di  $86,2 \text{ m}^3$ . Per quanto riguarda il percorso vengono ipotizzate differenti distanze di trasporto a seconda della potenza dell'impianto in cui avviene la conversione in energia del cippato:

- 70 km nel caso di impianti di minore taglia - potenza  $10 \text{ MW}_e$ ;
- 450 km per impianti di taglia più elevata - potenza  $50 \text{ MW}_e$ ).

E' supposto che l'autotreno viaggi a pieno carico sia in andata sia in ritorno (**Coefficiente di carico A/R = 100%**) e che non si verifichino perdite di biomassa nel corso delle operazioni di movimentazione.

La scelta di ipotizzare che il trasporto della biomassa avvenga su gomma deriva sia da considerazioni oggettive (gran parte del movimento merci in

Italia avviene attraverso questa soluzione) sia da indagini dirette effettuate presso alcuni gestito di impianti di conversione.

Le ipotesi considerate per il trasporto sono riportate in **Tabella 6.2**.

Parametro	Unità di misura	Valore
<b>Massa</b>	t	<b>19,1</b>
<b>Utilizzo annuo</b>	km/anno	<b>54000</b>
<b>Massa limite</b>	t	<b>38</b>
<b>Capacità</b>	m <sup>3</sup>	<b>86,2</b>
<b>Vita utile</b>	anni	<b>10</b>
<b>Coefficiente di carico A/R</b>	%	<b>50</b>
<b>Massa Volumica Apparente</b>	kg <sub>tq</sub> /m <sup>3</sup>	<b>300</b>
<b>Tariffa Economica</b>	€/km	<b>1,7</b>

**Tabella 6.2** – Costi EEA specifici per la fase di campo

In **Tabella 6.3** sono riportati i costi EEA specifici per unità di biomassa trasportata.

COSTO	Unità di misura	Distanza	Valore	Distanza	Valore
<b>Economico</b>	€/t <sub>ss</sub>	<b>70 km</b>	7,30	<b>450 km</b>	65,7
<b>Energetico</b>	MJ/t <sub>ss</sub>		74,5		670,3
<b>Ambientale</b>	kg CO <sub>2</sub> eq/t <sub>ss</sub>		7,34		66,0

**Tabella 6.3** – Costi EEA specifici per la fase di campo

### 6.2.3 Fase di conversione

La conversione del cippato avviene, come detto, in impianti di diversa potenza (10 e 50 MW<sub>e</sub>) e in cui sono considerate differenti opzioni:

- A) produzione di energia elettrica in impianti di diversa potenza;
- B) produzione di energia elettrica ed energia termica in cogenerazione con elevati rendimenti;
- C) produzione di energia elettrica ed energia termica in impianto CHP-ORC.

Mentre nel caso della produzione di energia elettrica (**Ipotesi A**) (**Figura 6.3**) si ha la valorizzazione di un'unica forma di energia negli altri due casi (**Ipotesi B** e **Ipotesi C**) si ha la contemporanea produzione (cogenerazione) di elettricità ed energia termica ed è dunque necessario allocare i costi EEA per poter calcolare costi e benefici EEA per GWh<sub>e</sub> prodotto.

In **Tabella 6.4** sono riportate le efficienze di conversione considerate.

Ipotesi	Potenza	$\eta_{EE}$	$\eta_{ET}$	Distanza	Riferimento
A	10 MW <sub>e</sub>	25%	-	70 km	Butnar,2010
	50 MW <sub>e</sub>	30%	-	450 km	Butnar,2010
B	-	31%	56%	70 km	Roedl, 2010
C	-	15%	65%	70 km	Bini, 2004; Duvia, 2008

**Tabella 6.4**– Efficienze di trasformazione utilizzate nelle diversi impianti di conversione del cippato, due le distanze di trasporto considerate

In **Tabella 6.5** sono indicati i parametri utilizzati per il calcolo del Costo EEA della fase di trasformazione. Per l'incidenza della fase di conversione (FC) sul costo totale EEA i valori riportati sono stati ricavati dalla bibliografia per quanto riguarda gli impianti dedicati alla produzione di energia elettrica mentre per quanto riguarda gli impianti CHP (cogenerazione) l'analisi fa

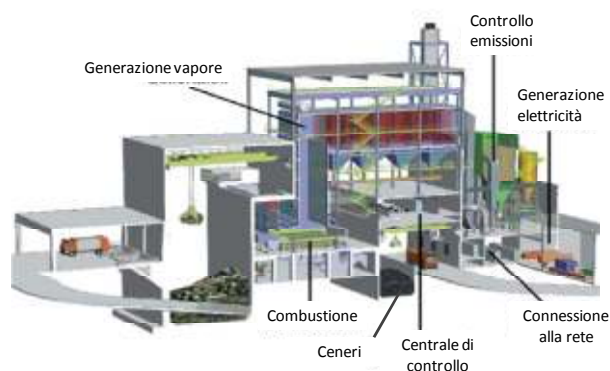
riferimento, oltre che alla bibliografia, ad informazioni fornite da federazioni di produttori (Fiper; Dubuisson, 1998; Berglund, 2006).

INCIDENZA FC SUL COSTO EEA DI FILEIRA		
Economico	Energetico	Ambientale
3,5 %	2,0 %	2,0 %
3,0 %	2,0 %	2,0 %

**Tabella 6.5** – Incidenza della fase di conversione (FC) sul costo EEA totale

Poiché l'unità funzionale scelta è  $1 \text{ GWh}_e$ , per l'analisi dei benefici ambientali come sistemi di riferimento sono state scelte:

- produzione di energia elettrica da carbone (SR1):  $1000 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/MWh}_e$  (Weisser, 2007)
- la media del sistema elettrico italiano (SR2):  $575 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/MWh}_e$  (Assoelettra, 2007).



**Figura 6.3** – Schematizzazione di un impianto a ciclo ORC per la produzione di energia elettrica

Per la trasformazione il costo specifico EEA per unità di biocombustibile di questa fase, calcolato sulla base dei parametri di calcolo riportati in **Tabella 6.5**, è pari a 2,4 €/t<sub>ss</sub>, 7,64 MJ/t<sub>ss</sub> e 0,95 kg CO<sub>2</sub> eq/t<sub>ss</sub>.

#### 6.2.4 Risultati

Per le due distanze di trasporto precedentemente indicate (50 e 450 km) il **costo EEA specifico** di filiera per unità di biocombustibile è pari a 68,7 €/t<sub>ss</sub>, 382,1 MJ/t<sub>ss</sub> e 47,3 kg CO<sub>2</sub> eq/t<sub>ss</sub> con d = 70 km e 129,3 €/t<sub>ss</sub>, 71, €/t<sub>ss</sub>, 412,5 MJ/t<sub>ss</sub> e 50,3 kg CO<sub>2</sub> eq/t<sub>ss</sub> con d = 70 km e 129,3 €/t<sub>ss</sub>, 990,2 MJ/t<sub>ss</sub> e 107,2 kg CO<sub>2</sub> eq/t<sub>ss</sub> per d = 450 km.

Considerando una valorizzazione e dell'energia di 280 €/GWh<sub>e</sub> e di 50 €/GWh<sub>t</sub>, per unità di biocombustibile (U = 55 %, PCI = 18,5 MJ/t<sub>ss</sub> pari a 1,93 GWh/t<sub>tt</sub>) vengono prodotti

- Ipotesi **A**: 0,48 (pari a 134,4 €) e 0,58 GWh<sub>e</sub> (pari a 162,4 €), rispettivamente per impianti di media ed elevata taglia;
- Ipotesi **B**: 0,60 GWh<sub>e</sub> e 1,08 GWh<sub>t</sub> pari a 222 €);
- Ipotesi **C**: 0,29 GWh<sub>e</sub> e 1,25 GWh<sub>t</sub> pari a 134,7 €.

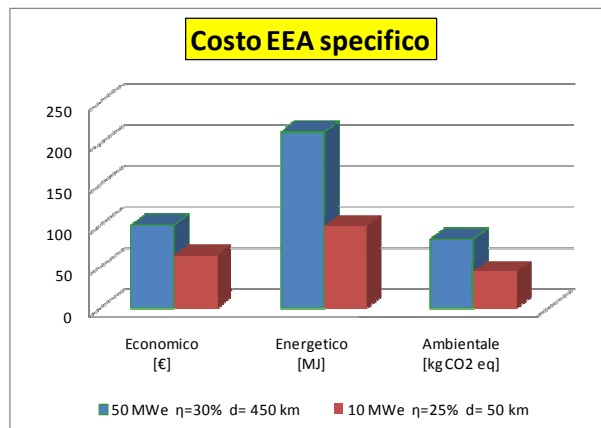
#### Ipotesi A: solo Energia Elettrica

Nel caso dell'impianto con 10 MW<sub>e</sub> di potenza ( $\eta_e = 25\%$  e 70 km di distanza di trasporto) il **costo EEA specifico** per l'energia elettrica prodotta (Costo EEA/kWh<sub>e</sub>) è pari a 64,2 €/GWh<sub>e</sub>, 99,1 MWh/GWh<sub>e</sub> e 44,2 kg CO<sub>2</sub> eq/GWh<sub>e</sub>, mentre, per impianti di 50 MW<sub>e</sub> ( $\eta_e = 30\%$  e 450 km di distanza di trasporto) è pari a 100,6 €/GWh<sub>e</sub>, 214,0 MWh/€/GWh<sub>e</sub> e 83,4 kg CO<sub>2</sub> eq/€/GWh<sub>e</sub> (**Figura 6.4**).

In **Figura 6.5** è riportata invece l'incidenza delle diverse fasi sul costo EEA specifico, a sinistra per l'impianto con 10 MW<sub>e</sub> di potenza e a destra per quello con 50 MW<sub>e</sub>. L'aumento della distanza di trasporto del



biocombustibile non è compensato dall'incremento di efficienza che si registra operando con impianti di maggiori dimensioni.



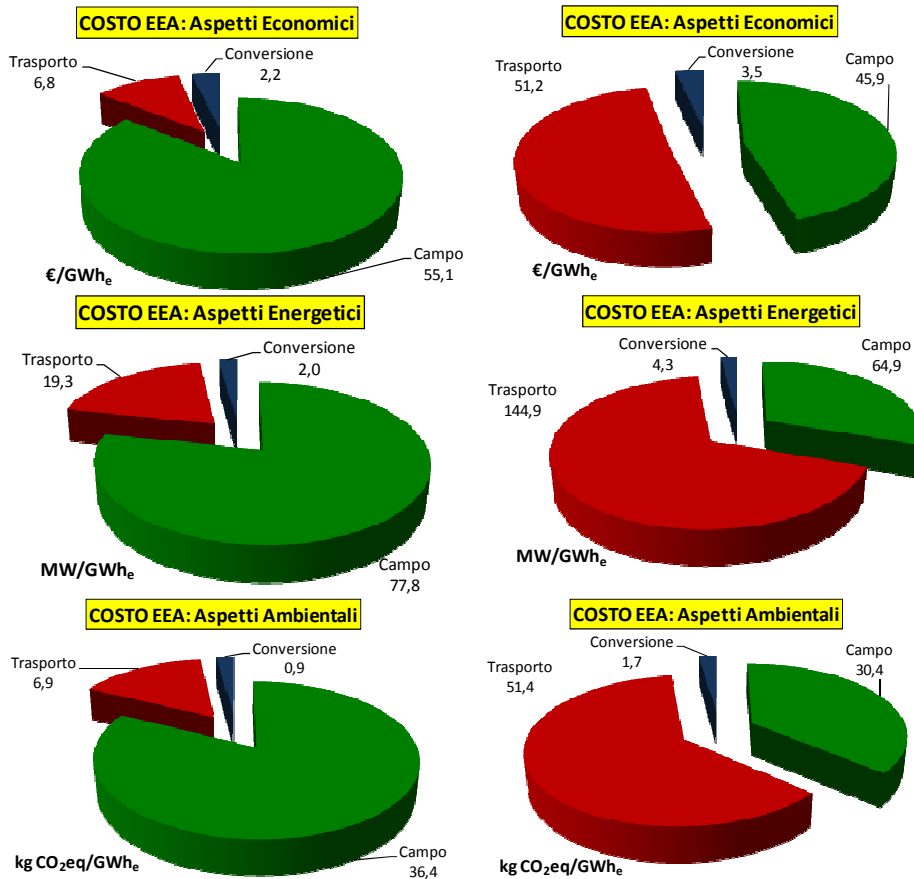
**Figura 6.4** – Costo EEA specifico (per unità funzionale -  $\text{GWh}_e$ ) per le due classi di potenza considerate

I **ricavi EEA** per ogni tonnellata di cippato trasformata sono, da un punto di vista economico, pari ai proventi della vendita dell'energia prodotta (134,4 € in impianti da 10  $\text{MW}_e$  e 162,4 € in impianto da 50  $\text{MW}_e$ ), dal punto di vista energetico all'energia prodotta (0,48 e 0,58  $\text{GWh}_e$ ) e, per quanto riguarda l'aspetto ambientale, alle emissioni evitate rispetto al sistema di riferimento scelto.

Il **profitto EEA specifico** per  $\text{GWh}_e$  è pari, rispettivamente per impianti da 10 e 50  $\text{MW}_e$  di potenza, a:

- 215,8 e 179,4 €/GWh<sub>e</sub>;
- 901 e 786 MWh/GWh<sub>e</sub>;
- 955,8 e 916,6 kg CO<sub>2</sub>eq/GWh<sub>e</sub> (RS1); e 530,84 e 491,6 e kg CO<sub>2</sub>eq/GWh<sub>e</sub> (RS2).

Sulla base delle performance ambientali della filiera è possibile calcolare la **percentuale di riduzione delle emissioni di GHG** per le due classi di potenza considerate: nel caso di impianti di minor taglia la riduzione delle emissioni è 97,1% (RS1) del e del 94,9% (RS2) mentre, per impianti di elevata taglia, la riduzione delle emissioni è del 94,4% (RS1) e del 90,3% (RS2).



**Figura 6.5** – Ripartizione del Costo EEA tra le fasi della filiera a sinistra per impianti da 10 MW<sub>e</sub> con distanza di trasporto a 70 km a destra per impianti da 50 MW<sub>e</sub> con distanza di trasporto a 450 km

In **Tabella 6.5** sono riportati i bilanci EEA per le due situazioni considerate e i corrispondenti **Indici di sostenibilità complessiva (GSI)**. La **Figura 6.6** riporta graficamente i GSI calcolati per le situazioni prese in considerazione (2<sup>potenze</sup> e 2<sup>RS</sup>), al crescere di tale indice aumenta la sostenibilità complessiva.

Aspetto	Caso	Valore	Caso	Valore
Economico	10 MW <sub>e</sub> 70 km	4,36	50 MW <sub>e</sub> 450 km	2,78
Energetico		10,9		4,6
Ambientale		21,6 <sup>1</sup>		11,0 <sup>1</sup>
		12,0 <sup>2</sup>		5,9 <sup>2</sup>
GSI	22,7 <sup>1</sup>	8,1 <sup>1</sup>		
	15,7 <sup>2</sup>	5,5 <sup>2</sup>		

Note: sistema di riferimento 1= carbone 2=media italiana

**Tabella 6.5** – Bilanci EEA per le due casistiche considerate di impianti ORC e corrispondenti Indici di sostenibilità Complessiva (GSI)

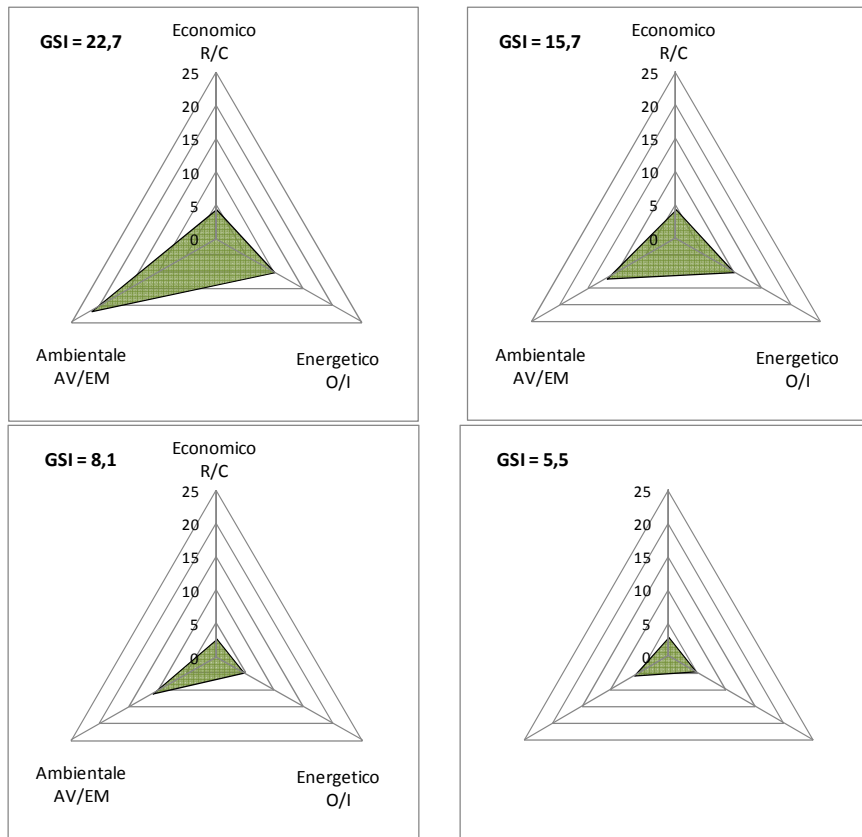
#### **Ipotesi B: Cogenerazione (alta efficienza)**

Per quanto riguarda la fase di conversione in impianti **cogenerativi** si ha la contemporanea produzione di energia elettrica e termica. Per poter riferire i risultati all'unità funzionale (1 GWh<sub>e</sub>) è necessario **allocare** parte del costo EEA all'energia termica prodotta. Considerando l'importanza che questa scelta può avere nella definizione delle performance di filiera per l'analisi sono stati utilizzati due differenti metodi di allocazione basati su:

- prezzi considerando rispettivamente prezzi di 280 e 50 €/GWh per l'energia elettrica e per quella termica;
- rendimenti di trasformazione (il 65% del Costo EEA è allocato all'energia elettrica).

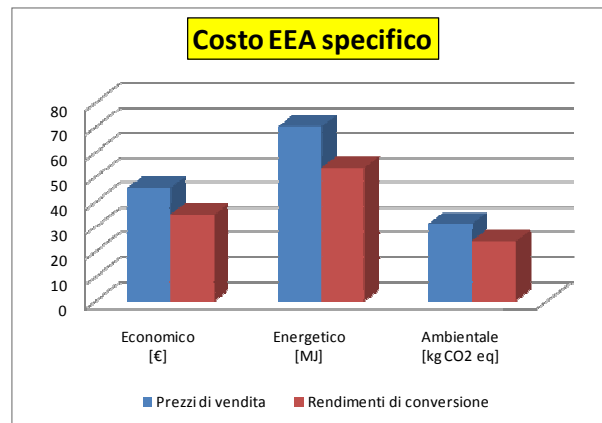
Considerando una distanza di trasporto di 70 km, il **costo EEA specifico** di filiera dipende quindi dal criterio di allocazione scelto (**Figura 6.7**):

- allocazione basata sui prezzi: 45,8 €/GWh<sub>e</sub>; 73,2 MWh/GWh<sub>e</sub> e 32,1 kg CO<sub>2</sub> eq/GWh<sub>e</sub>,
- allocazione basata sui rendimenti: 34,8 €/GWh<sub>e</sub>; 55,5 MWh/GWh<sub>e</sub> e 24,4 kgCO<sub>2</sub> eq/GWh<sub>e</sub>.



**Figura 6.6** – GSI considerando i due sistemi di riferimento (RS1 a sinistra, RS2 a destra), **Sopra**: per impianti con potenza di 10 MW<sub>e</sub> (d = 70 km); **Sotto**: per impianti con potenza di 50 MWe (d = 450 km)

I **profitti EEA specifici** sono pari a 234,2 €/GWh<sub>e</sub>; 926,8 MWh/GWh<sub>e</sub> e 968,8 kgCO<sub>2</sub> eq/GWh<sub>e</sub>, nel caso dell'allocazione basata sui prezzi e pari a 245,2 €/GWh<sub>e</sub>; 944,5 MWh/GWh<sub>e</sub> e 975,6 kg CO<sub>2</sub> eq/GWh<sub>e</sub>, se la ripartizione è eseguita sulla base dei rendimenti di trasformazione.



**Figura 6.7** – Costo EEA specifico (per unità funzionale GWh<sub>e</sub>) per i due sistemi di allocazione considerati

In **Tabella 6.7** sono riportati i **bilanci EEA** per i due sistemi di allocazione considerati e i corrispondenti GSI.

Aspetto	Caso	Valore	Caso	Valore
Economico	Allocazione basata sui prezzi	6,1	Allocazione basata sui rendimenti	7,0
		Energetico		7,8
Ambientale				30,1 <sup>1</sup>
				16,9 <sup>2</sup>
GSI		36,5 <sup>1</sup>		52,1 <sup>1</sup>
		18,1 <sup>2</sup>		36, <sup>2</sup>

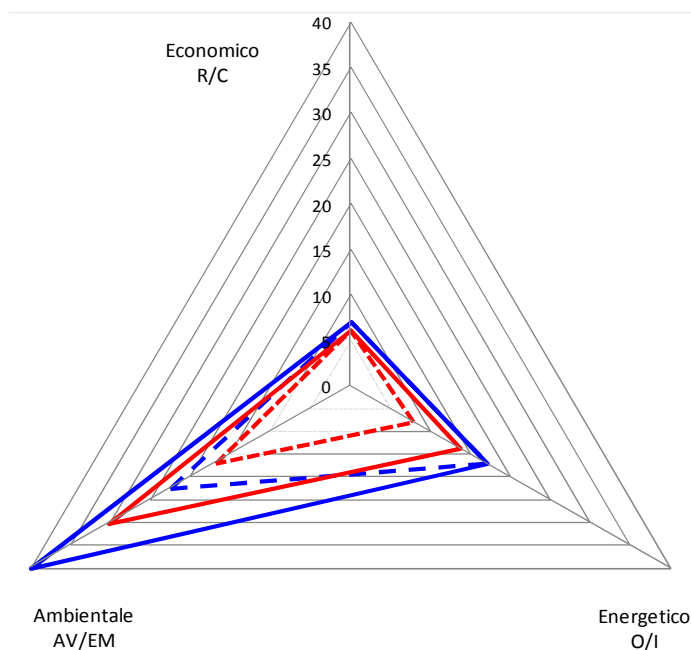
Note: sistema di riferimento 1= carbone 2= media sistema elettrico Italiano

**Tabella 6.7** – Bilanci EEA per impianti CHP e corrispondenti Indici di sostenibilità Complessiva (GSI)

La percentuale di riduzione delle emissioni di GHG conseguibile attraverso la messa a punto della filiera agro-energetica dipende dai due metodi di allocazione considerati:

- se si considera il **RS1** è pari rispettivamente al 96,8 % se l'allocazione è basata sui prezzi e al 97,5% se i costi EEA di filiera vengono ripartiti in funzione dei rendimenti;
- se si considera il **RS2** è pari rispettivamente al 94,4 % se l'allocazione è basata sui prezzi e al 95,8% se i costi EEA di filiera vengono ripartiti in funzione dei rendimenti.

In **Figura 6.7** vengono graficamente riportati i bilanci EEA di filiera per i due sistemi di allocazione e per i due differenti sistemi di riferimento.



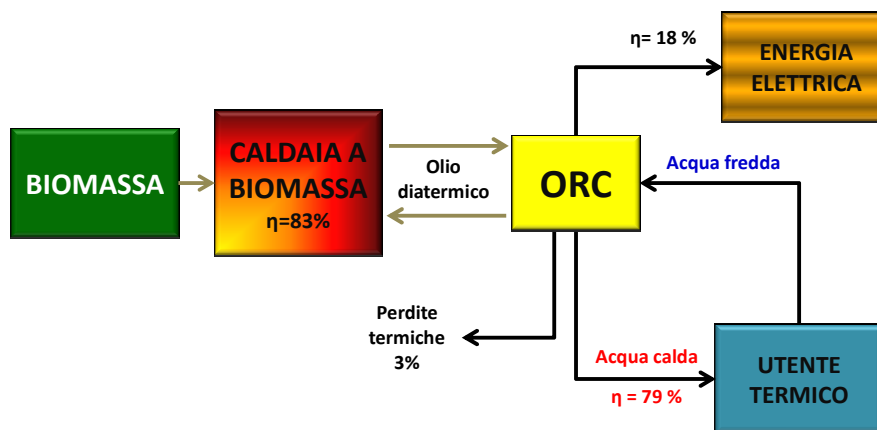
**Note:** R/C = ricavi/costi; O/I = output/input energetici; AV/EM = emissioni evitate/emissioni causate

**Figura 6.7** – Bilanci EEA la filiera considerata: le linee continue fanno riferimento al RS1 quelle tratteggiate al RS2, in **rosso** i risultati per l'allocazione basata sui prezzi, in **blu** quella basata sui rendimenti

L'area compresa tra i tre vertici costituisce il GSI, più è grande maggiore è la sostenibilità di filiera. In figura è immediatamente apprezzabile l'importanza che la scelta del sistema di riferimento così come quella del metodo di allocazione prescelto porti a sensibili differenze nella dimensione dei diversi triangoli e quindi al loro GSI, anche se tutti fanno riferimento alla stessa filiera.

### **Ipotesi C: Cogenerazione in impianti ORC**

La schematizzazione di questa terza ipotesi considerata per la filiera legno-energia da SRF è riportata in **Figura 6.8**, è possibile osservare come, ad un minor rendimento elettrico, venga sfruttata una maggiore quantità di energia termica. Anche in questo caso, poiché si ha una cogenerazione è necessario allocare i costi EEA tra l'energia elettrica che rappresenta l'obiettivo principale e l'energia termica valorizzata attraverso la cessione ad utenze termiche. I criteri di allocazione sono gli stessi utilizzati per il precedente esempio: basata su prezzi e rendimenti di trasformazione.

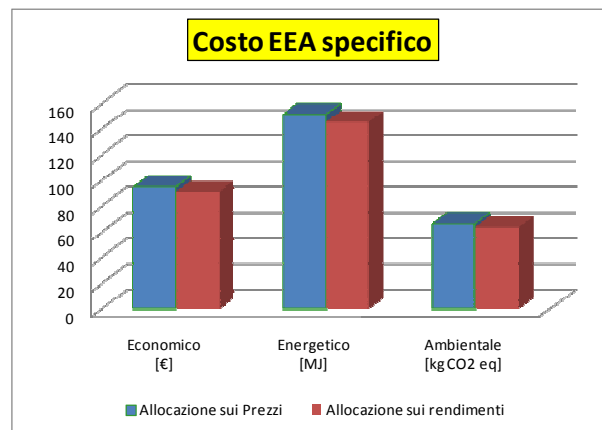


**Figura 6.7** – Fase di conversione del cippato con cogenerazione di EE e ET

In **Tabella 6.8** e in **Figura 6.8** sono riportati i costi EEA specifici.

COSTO EEA specifico	Allocazione		Unità di misura
	Prezzi	Rendimenti	
Economico	94,74	90,85	€/kWh <sub>e</sub>
Energetico	151,3	145,1	MJ/kWh <sub>e</sub>
Ambientale	66,4	63,68	kg CO <sub>2</sub> eq/kWh <sub>e</sub>

**Tabella 6.8** – Costi EEA in funzione dei due criteri di allocazione



**Figura 6.8** – Costi EEA specifici dell'ipotesi considerate espressi per GWh<sub>e</sub>

I **profitti EEA specifici** sono pari a 185,3 €/GWh<sub>e</sub>; 848,7 MWh/GWh<sub>e</sub> e 933,6 kgCO<sub>2</sub> eq/GWh<sub>e</sub>, nel caso dell'allocazione basata sui prezzi e pari a 189,2 €/GWh<sub>e</sub>; 854,9 MJ/GWh<sub>e</sub> e 936,3 kg CO<sub>2</sub> eq/GWh<sub>e</sub>, se la ripartizione è eseguita sulla base dei rendimenti di trasformazione.

In **Tabella 6.9** sono riportati i **bilanci EEA**.



Aspetto	Caso	Valore	Caso	Valore
Economico	Allocazione basata sui prezzi	3,0	Allocazione basata sui rendimenti	2,1
Energetico		6,6		5,9
Ambientale		14,1 <sup>1</sup>		14,7 <sup>1</sup>
		7,7 <sup>2</sup>		8,0 <sup>2</sup>
GSI		12,0 <sup>1</sup>		10,8 <sup>1</sup>
	8,2 <sup>2</sup>	10,8 <sup>2</sup>		

Note: sistema di riferimento 1= carbone 2= media sistema elettrico Italiano

**Tabella 6.9** – Bilanci EEA per impianti CHP-ORC e corrispondenti Indici di Sostenibilità Complessiva (GSI)

La percentuale di riduzione delle emissioni di GHG è pari al rispettivamente al 93,3 % se l'allocazione è basata sui prezzi e al 93,7% se i costi EEA di filiera vengono ripartiti in funzione dei rendimenti se si considera il **RS1** e al 94,4 % se l'allocazione è basata sui prezzi e al 95,8% se i costi EEA di filiera vengono ripartiti in funzione dei rendimenti e si considera **RS2**.

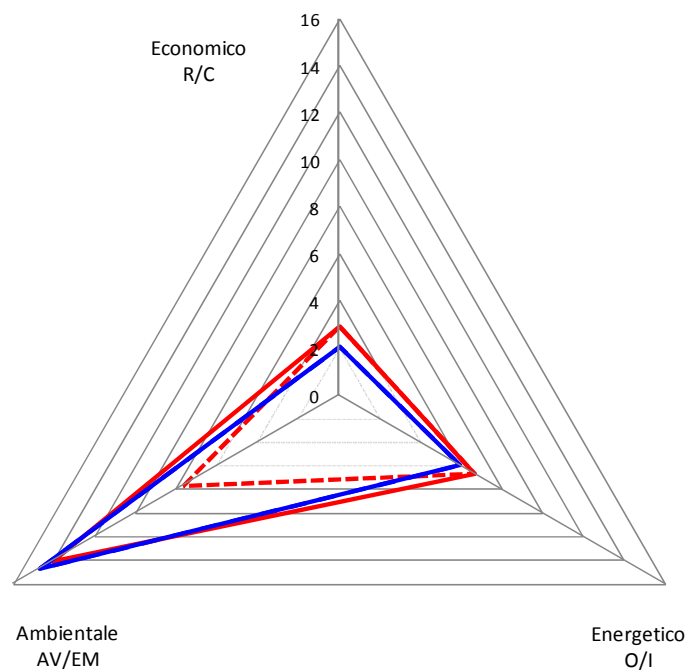
In **Figura 6.9** vengono graficamente riportati i bilanci EEA di filiera per i due sistemi di allocazione e per i due differenti sistemi di riferimento.

### 6.2.5 Analisi risultati

La produzione di energia (sia in cogenerazione che non) attraverso la conversione di cippato di pioppo prodotto da SRF a ciclo biennale consente di ottenere risultati positivi (**Figura 6.10**). In tutte le casistiche considerate la sostenibilità della filiera sotto i tre aspetti è assicurata anche se è importante sottolineare che tra i diversi casi ipotizzati le differenze possono essere notevoli.

La scelta del sistema di riferimento gioca un ruolo fondamentale nella definizione delle prestazioni ambientali della filiera e quindi incide sensibilmente anche sull'indice di sostenibilità complessiva. A parità di

sistema di riferimento le migliori prestazioni vengono ottenute nell'**Ipotesi 2** in cui il cippato è utilizzato per la cogenerazione dove ad un'efficienza termica più bassa è associato un rendimento elettrico più elevato. Nel caso della produzione di sola energia elettrica (**Ipotesi 1**) l'incremento di efficienza elettrica considerato passando da impianti con 10 MW<sub>e</sub> di potenza a impianti con 50 MW<sub>e</sub> non consente di compensare l'incremento del Costo EEA dovuto all'aumento dei costi EEA di trasporto del biocombustibile. La messa in opera di filiere di trasformazione basate sull'utilizzo di biomassa proveniente da notevoli distanze deve dunque essere attentamente valutato perché può ridurre i benefici EEA.



**Note:** R/C = ricavi/costi; O/I = output/input energetici; AV/EM = emissioni evitate/emissioni causate

**Figura 6.9** – Bilanci EEA la filiera considerata: le linee continue fanno riferimento al RS1 quelle tratteggiate al RS2, in **rosso** i risultati per l'allocatione basata sui rendimenti, in **blu** quella basata sui rendimenti

Per quanto riguarda la cogenerazione l'analisi condotta ha messo in luce come la scelta di un sistema di allocazione piuttosto che di un altro può avere un'influenza notevole sui risultati ottenuti.

Generalizzando, sebbene la sostenibilità della filiera appaia assicurata sotto tutti e tre gli aspetti EEA tuttavia se da un punto di vista energetico e ambientale i risultati sono sempre soddisfacenti (es. percentuali di riduzione delle emissioni di GHG sempre ampiamente superiori al 90%) da un punto di vista economico invece la sostenibilità della filiera è meno evidente e il rapporto Ricavi/Costi (R/C) in alcuni casi si abbassa fino a 2.

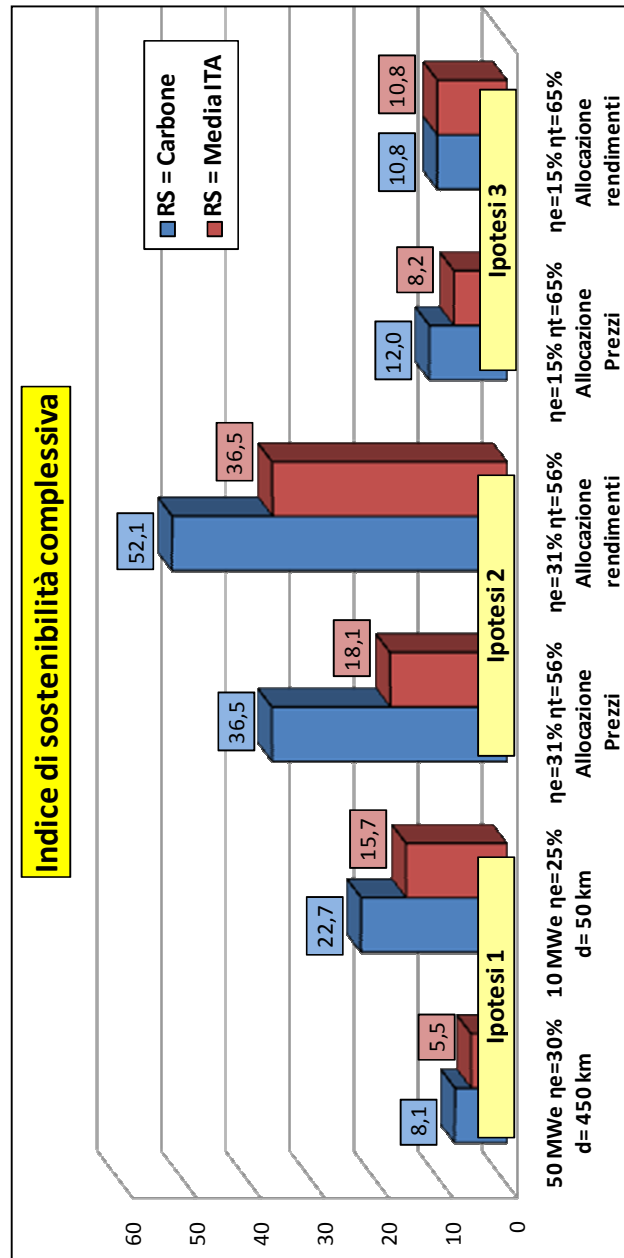


Figura 6.10 – GSI per filiera legno energia basata su processi di combustione diretta di cippato proveniente da SRF biennale

### 6.3 Casi studio

In questa sezione vengono riportati i risultati relativi all'analisi della sostenibilità EEA delle filiere riportate in **Tabella 6.10**.

Filiera	Biomassa	Caso studio
Termochimica	Ligno-cellulosica Colture dedicate	Pioppo SRF biennale in Italia, ciclo colturale di 10 anni
		Salice SRF triennale in Svezia, ciclo colturale di 20 anni
		Pioppo MRF quinquennale in Italia, ciclo colturale di 10 anni
	Ligno-cellulosica Residui forestali	Produzione di cippato a scopo energetico da residui forestali in Svezia a seguito del taglio finale in fustaie di conifere
Olio grezzo	Oleaginosa	Colza in Italia Settentrionale per Olio grezzo
Biochimica	Insilato di mais	Digestione anaerobica

**Tabella 6.10** – Schema riassuntivo dei casi studio per cui è stato applicato il modello

Per permettere poi il confronto delle prestazioni EEA dei diversi casi studio per tutte le filiere analizzate si considera:

- **unità funzionale:** 1 GWh<sub>e</sub>;
- **distanza di trasporto** tra il luogo di accumulo aziendale a quello di utilizzazione di 70 km, tale distanza è stata scelta perché corrisponde a quella che consente di considerare la filiera come locale;
- **rendimenti di trasformazione:** per impianti termochimici in cui si ha la cogenerazione di elettricità ed energia termica pari rispettivamente a  $\eta_{EE} = 15\%$  e  $\eta_{ET} = 65\%$  mentre per impianti per la sola produzione di energia elettrica  $\eta_{EE} = 25\%$ .

- **sistema di riferimento** per il calcolo delle prestazioni ambientali di filiera (ricavi, profitti e bilanci) vengono considerate: la produzione di energia elettrica del sistema elettrico nazionale italiano (emissione unitaria media) pari a 575 g CO<sub>2</sub>eq/kWh<sub>e</sub> e, nel caso di filiere attuate in contesti differenti da quello produttivo italiano (la Svezia in due casi studio) anche la produzione di energia elettrica mediante combustione di carbone in impianti ad elevata efficienza dotati di filtri per l'abbattimento delle emissioni (110 g CO<sub>2</sub>eq/kWh<sub>e</sub>) (Cherubini, 2009).

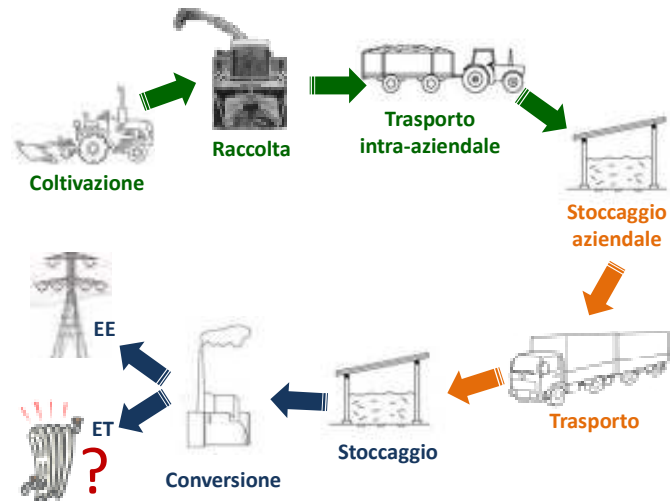
- **allocazione basata sui prezzi** di valorizzazione delle forme di energia prodotte, considerando  $P_{EE} = 280 \text{ €/GWh}_e$  e  $P_{Et} = 50 \text{ €/GWh}_e$  con quindi l'85% del Costo EEA allocato all'energia elettrica e il 15% all'energia termica. Per le filiere attuate all'estero (Svezia) vengono invece considerati i prezzi di vendita dell'energia sommati ai certificati verdi moltiplicati per il rispettivo coefficiente moltiplicativo (AA.VV, 2009; AA.VV, 2010a)

Per ogni caso studio analizzato le informazioni riportate sono le seguenti:

- **confini del sistema;**
- **costi EEA specifici per il biocombustibile** per tutte le fasi della filiera;
- **costi, profitti e bilanci EEA specifici per l'unità funzionale;**
- **percentuale di riduzione dei GHG.**

### 6.2.1 SRF in Italia

Così come per le MRF anche il cippato da SRF può essere utilizzato per la produzione sia di energia elettrica che di energia termica (Figura 6.11). La raccolta nel caso delle SRF è generalmente svolta utilizzando falciatrinciacaricatrici che, accoppiate a specifiche piattaforme di taglio consentono di tagliare e cippare i polloni in un unico passaggio (Figura 6.12).



**Figura 6.11** – Schematizzazione della filiera agro-energetica basata su SRF

La **fase di campo** prevede la messa a dimora di 5560 talee/ha, il ciclo colturale ha una durata di 10 anni nel corso dei quali si succedono 5 ceduzioni. La resa media ipotizzata è di 35  $t_{td}/ha \cdot anno$  ( $U=55\%$ ,  $PCI=18,5 MJ/kg_{ss}$ ). Per maggiori dettagli per quanto riguarda questa fase della filiera si rimanda all'**Allegato B2**.



**Figura 6.12** – **A sinistra:** Impianto di SRF biennale 2 mesi dopo il trapianto; **A destra:** Falciatriniciacaricatrice al lavoro

Il **trasporto** avviene per mezzo di un autotreno (**Figura 6.13**) le cui caratteristiche sia tecnico-economiche sono riportate in **Tabella 6.2**, come detto, la distanza di trasporto considerata è di 70 km.



**Figura 6.13** – Autotreno per il trasporto del cippato

La **fase di conversione** avviene sia in impianti termochimici in cui la cogenerazione di energia elettrica ( $\eta_{EE}=15\%$ ) e termica ( $\eta_{ET}=65\%$ ) (**Figura 6.7**) sia in impianti in cui si produce solo elettricità ( $\eta_{EE}=25\%$ ) in cui si ha; l'incidenza di questa fase sul Costo EEA è quella riportata in **Tabella 6.5**.

In **Tabella 6.11** è riportato, espresso per unità di biocombustibili e distinto per le tre fasi di filiera, il costo EEA. In **Tabella 6.12** è riportato il Costo EEA specifico calcolato, considerando i rendimenti di trasformazione precedentemente indicati e ripartendo il Costo EEA tra le due forme di energia prodotte in funzione del coefficiente di allocazione calcolato sulla base dei differenti prezzi di vendita.

A tali costi, considerando il prezzo di vendita dell'EE (280 €/GWh<sub>e</sub>) e il sistema di riferimento adottato, corrispondono i profitti e i bilanci EEA riportati in **Tabella 6.13**.



Costo	FA	FT	FC	Tot	Unità di misura
Economico	92,7	10,2	3,7	106,6	€/t <sub>ss</sub>
Energetico	457	104	11	574	MJ/t <sub>ss</sub>
Ambientale	61,5	10,3	1,5	73,2	kg CO <sub>2</sub> eq/t <sub>ss</sub>

**Tabella 6.11** – Costo EEA per unità di biocombustibile

Aspetto	Unità di misura	Costo EEA	
		Cogenerazione EE + ET	solo EE
Economico	€/GWh <sub>e</sub>	141,8	99,6
Energetico	MWh/GWh <sub>e</sub>	210,1	148,6
Ambientale	kg CO <sub>2</sub> eq/GWh <sub>e</sub>	96,7	68,4

**Tabella 6.12** – Costo EEA specifico per le due ipotesi di trasformazione

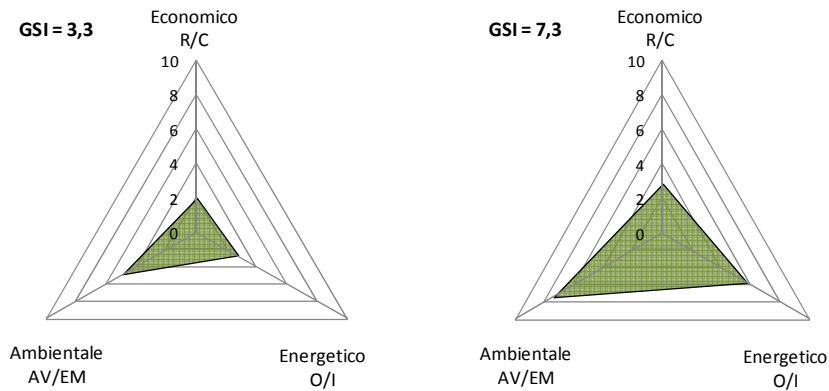
Aspetto	Unità di misura	Profitto EEA		Bilancio EEA	
		EE + ET	solo EE	EE + ET	solo EE
Economico	€/GWh <sub>e</sub>	139,2	180,4	2,0	2,8
Energetico	MWh/GWh <sub>e</sub>	789,9	851,4	2,7	3,9
Ambientale	kg CO <sub>2</sub> eq/GWh <sub>e</sub>	478,3	506,6	4,9	7,4

**Tabella 6.13**– Profitto e Bilanci EEA per le due ipotesi di trasformazione

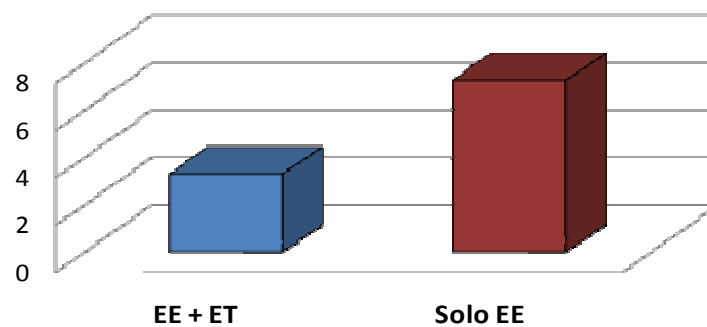
La riduzione delle emissioni di GHG è uguale a:

- 83,2 % qual'ora la conversione del cippato avvenga in impianti in cui ad un più basso rendimento elettrico è abbinato lo sfruttamento dell'energia termica di processo;
- 88,10 % per la filiera in cui si ha la produzione di sola energia elettrica.

Il **GSI** per le due situazioni è pari a 3,3 nel caso di cogenerazione di EE e ET e pari a 7,3 nella filiera in cui si ha la sola produzione di EE (**Figura 6.14**).



### Indice di sostenibilità complessiva



**Figura 6.13** – Indice di sostenibilità complessiva per il Caso studio 2

#### 6.2.2 SRF in Svezia

In Svezia le SRF occupano una superficie di circa 15000 ha e sono state introdotte a partire dall'inizio degli anni Settanta e prevedono la coltivazione di specifici cloni di salice. Rispetto alle SRF diffuse in Italia quelle svedesi, oltre che per la differente specie utilizzata, si differenziano per una maggiore densità di impianto (14-20000 talee/ha) (**Figura 6.14**), per l'allungamento del ciclo colturale (20-25 anni) e per l'adozione di un turno di ceduzione più lungo (3-4 anni). Rispetto al pioppo inoltre, il salice produce un maggior

numero di polloni per ceppaia che quindi, alla raccolta, presentano un diametro inferiore. Tale caratteristica ha facilitato la meccanizzazione completa delle operazioni di raccolta che avvengono con falciatrinciacaricatrici dotate di piattaforme di taglio da foraggio modificate.

In questo caso studio vengono valutate le prestazioni EEA di una filiera agro-energetica basata sull'utilizzo di cippato di salice per la produzione di energia elettrica o per la cogenerazione di energia elettrica ed termica.

Per il calcolo delle prestazioni ambientali il sistema di riferimento adottato, è, come detto, l'emissione di GHG caratteristica della produzione di energia elettrica da impianti a carbone di nuova generazione. Non si è utilizzata l'emissione unitaria media del sistema elettrico svedese (51 kg CO<sub>2</sub>eq/GWh<sub>e</sub>) (Aldrich, 2009) perché tale valore, considerando l'elevato contributo delle centrali atomiche per la generazione di elettricità, non appare realisticamente confrontabile con quello derivante dalla produzione di energia da biomasse.

La filiera, nella definizione delle diverse operazioni che la compongono, è simile a quella analizzata per le SRF in Italia pertanto, per la schematizzazione delle diverse fasi si rimanda alla **Figura 6.11**.



**Figura 6.14** – Piantagioni di SRF in Svezia con cloni di salice

La **fase di campo** è costituita da un ciclo colturale di 21 anni all'interno del quale si succedono 7 ceduzioni (turno triennale), la resa media considerata è di 20 t<sub>tq</sub>/ha-anno (U = 55%, PCI = 18,0 MJ/kg<sub>ss</sub>).

In **Tabella 6.14** è riportata la sequenza delle operazioni nel corso del ciclo colturale mentre in **Tabella 6.15** i fattori produttivi a logorio totale impiegati.

Operazione	Anno																					Tot
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Aratura	1																					1
Erpicatura	1																					1
Diserbo Meccanico	2	1																				2
Rullatura	1																					1
Messa dimora	1																					1
Trattamento erbicida	1				1			1			1			1			1			1		8
Fertilizzazione N		1			1			1			1			1			1			1		7
Fertilizzazione P e K				1			1			1			1			1			1		1	7
Fertilizzazione N			1			1			1			1			1			1		1		7
Taglio-Cippatura			1			1			1			1			1			1		1		7
Trasporto aziendale			1			1			1			1			1			1		1		7
Ripristino terreno																						1

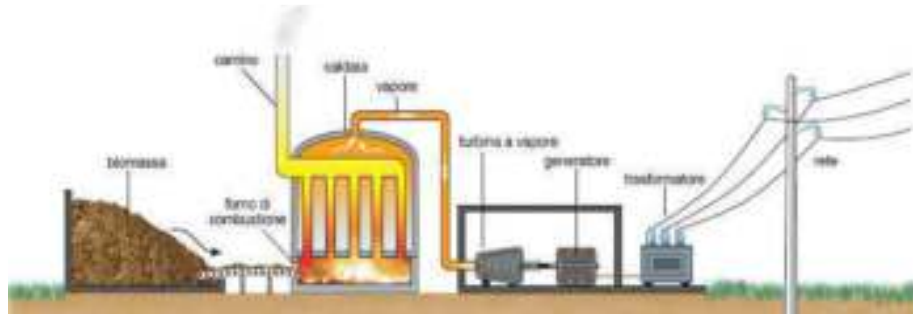
**Tabella 6.14**– Filiera SRF in Svezia: Operazioni della fase di campo (AA.VV., 2000; Borjesson, 2006; Halgstrom, 2006; AA.VV.,2010b;

FATTORE DI PRODUZIONE	UNITÀ	DOSE
Talee	talee/ha	15000
Erbicidi <sup>1</sup>	kg/ha·anno	2,5
Fertilizzante N-NO <sub>3</sub> <sup>2</sup>	kg/ha·anno	80
Fertilizzante P <sup>3</sup>	kg/ha·anno	40
Fertilizzante K <sup>4</sup>	kg/ha·anno	120
Fertilizzante Azotato N-NO <sub>3</sub> <sup>4</sup>	kg/ha·anno	120

**Tabella 6.15** – Fattori produttivi impiegati nella fase di campo (la dose è riportata per anno di applicazione)

Il **trasporto**, anche in questo caso, è supposto essere eseguito con un autotreno le cui caratteristiche sia tecnico-economiche sono riportate in **Tabella 6.2**, come detto, la distanza di trasporto considerata è di 70 km.

La **fase di conversione** avviene sia in impianti termochimici in cui la cogenerazione di energia elettrica ( $\eta_{EE}=15\%$ ) e termica ( $\eta_{ET}= 65\%$ ) sia in impianti in cui si produce solo elettricità ( $\eta_{EE}=25\%$ ) (**Figura 6.15**) in cui si ha; l'incidenza di questa fase sul Costo EEA è quella riportata in **Tabella 6.5**.



**Figura 6.15** – Fase di conversione in una filiera per la produzione di EE

Considerando la messa a dimora di 100 ha di SRF a salice in Svezia, una meccanizzazione ottimale delle operazioni di campo e un accoppiamento tra le diverse operatrici e i trattori secondo il criterio della massima razionalità in **Tabella 6.16** è riportato il costo EEA per unità di biocombustibili distinto per le tre fasi di filiera.

Costo	FA	FT	FC	Tot	Unità di misura
Economico	92,2	10,2	3,7	106,1	€/t <sub>SS</sub>
Energetico	817,4	104,2	18,8	940,5	MWh/t <sub>SS</sub>
Ambientale	35,3	10,3	0,9	46,6	kg CO <sub>2</sub> eq/t <sub>SS</sub>

**Tabella 6.16** – Costo EEA per unità di biocombustibile

In **Tabella 6.17** è riportato il Costo EEA specifico calcolato, considerando i rendimenti di trasformazione precedentemente indicati e ripartendo il Costo EEA tra le due forme di energia prodotte in funzione del coefficiente di allocazione calcolato sulla base dei differenti prezzi di vendita.

Aspetto	Unità di Misura	Costo EEA	
		Cogenerazione EE + ET	solo EE
Economico	€/GWh <sub>e</sub>	119,3	99,1
Energetico	MWh/GWh <sub>e</sub>	293,7	244,0
Ambientale	kg CO <sub>2</sub> eq/GWh <sub>e</sub>	52,3	43,5

**Tabella 6.17** – Costo EEA specifico per le due ipotesi di trasformazione

In **Tabella 6.18** invece, si trovano profitti e bilanci EEA della filiera. Il GSI e la riduzione di GHG sono, rispettivamente, pari a 1,3 e 60,5 % nel caso di filiere esclusivamente dedicate alla produzione di energia elettrica e pari a 1,8 e 52,4 % per le filiere con cogenerazione.

Aspetto	Unità di misura	Profitto EEA		Bilancio EEA	
		EE + ET	solo EE	EE + ET	solo EE
Economico	€/GWh <sub>e</sub>	10,7	30,9	1,1	1,3
Energetico	MWh/GWh <sub>e</sub>	706,3	756,0	3,4	4,1
Ambientale	kg CO <sub>2</sub> eq/GWh <sub>e</sub>	57,7	66,5	1,1	1,5

**Tabella 6.18**– Profitto e Bilanci EEA per le due ipotesi di trasformazione

### 6.2.3 Residui forestali

Questo caso studio riguarda la possibilità di utilizzare residui forestali per la produzione di cippato da destinare alla filiera energetica. Lo sfruttamento delle fustaie per la produzione di legname da opera comporta la produzione di un'elevata massa di biomassa composta da cimali e rami che può essere raccolta e utilizzata per l'alimentazione di filiere agro-energetiche. Il costo di

produzione del cippato è costituito quindi unicamente dalle operazioni di raccolta e di cippatura. Dopo il taglio di maturità, si rende disponibile in foresta una grande quantità di biomassa residuale (cimali, rami, piccole piante, ceppaie, che complessivamente rappresentano il 25-30% della biomassa legnosa totale) che non è valorizzabile come legname da opera ma può essere agevolmente destinata alla trasformazione energetica anche in considerazione del fatto che per l'esbosco possono essere efficacemente utilizzate le stesse operatrici impiegate per tale operazione. Rami e cimali possono venir raccolti anch'essi mediante un *forwarder* che li accumula a bordo strada dove in 8-9 mesi essiccano parzialmente e vengono cippati; in alternativa, sono immediatamente trasportati tal quali alla centrale dove vengono cippati poco prima della trasformazione in energia.

L'analisi qui di seguito riportata fa riferimento all'utilizzo dei residui forestali derivanti dallo sfruttamento di fustaie di conifere in Svezia nella regione dello Svealand (60 km a nord di Stoccolma). Il cantiere per la meccanizzazione delle operazioni di abbattimento ed esbosco è costituito da un *harvester* e un *forwarder* (**Figura 6.16**). Cimali e rami costituiscono un residuo delle operazioni di abbattimento ed allestimento del legname da opera.

Per maggiori dettagli relativamente a queste operazioni si rimanda all'**Allegato B3**.

Il costo EEA di questo materiale è legato alle operazioni di recupero che vengono effettuate con il *forwarder* e di cippatura che viene invece eseguita con cippatrici a tamburo camionabili di elevata potenza che, posizionate a bordo foresta, sminuzzano il materiale e lo caricano direttamente su autotreni che provvederanno poi al trasporto della biomassa agli impianti di trasformazione.

In **Figura 6.17** è riportata la schematizzazione della filiera. Considerando le norme ambientali in vigore che vietano di asportare l'intera massa disponibile viene ipotizzata un recupero di  $100t_{td}/ha$  da destinare alla filiera agro-energetica. Alla cippatura, al termine del periodo di 8-9 mesi in cui le

ramaglie sono accatastate a bordo foresta, l'umidità del prodotto è del 25% (PCI=19,2 MJ/kg<sub>ss</sub>).



**Figura 6.16** – *Harvester e forwarder all'opera in fustaie di conifere in Svezia*

Le caratteristiche tecnico-economiche del *forwarder* sono riportate nell'**Allegato B3** mentre quelle della cippatrice in **Tabella 6.19** (Verani, 2007).



VOCE	Unità di misura	VALORE
Valore a nuovo	€	35000
Potenza richiesta	kW	55
Vita utile	Anni	8
Durata fisica	Ore	8000
Produttività oraria	$t_{tq}/h$	20

**Tabella 6.19** – Caratteristiche tecnico-operative della cippatrice



**Figura 6.17** – Schematizzazione della filiera residui forestali in Svezia

In **Tabella 6.20** è riportato il costo EEA per unità di biocombustibili distinto per le tre fasi di filiera.

In **Tabella 6.21** è riportato il Costo EEA specifico calcolato, considerando i rendimenti di trasformazione precedentemente indicati e ripartendo il Costo EEA sulla base dei differenti prezzi di vendita.

Costo	FA	FT	FC	Tot	Unità di misura
Economico	16,0	6,1	0,8	23,0	€/t <sub>ss</sub>
Energetico	36,9	62,6	2,0	101,5	MJ/t <sub>ss</sub>
Ambientale	26,1	6,2	0,7	33,0	kg CO <sub>2</sub> eq/t <sub>ss</sub>

**Tabella 6.20** – Costo EEA per unità di biocombustibile

Aspetto	Unità di misura	Costo EEA	
		Cogenerazione EE + ET	solo EE
Economico	€/GWh <sub>e</sub>	25,7	18,2
Energetico	MWh/GWh <sub>e</sub>	31,6	22,4
Ambientale	kg CO <sub>2</sub> eq/GWh <sub>e</sub>	37,0	26,2

**Tabella 6.21** – Costo EEA specifico per le due ipotesi di trasformazione

Per il calcolo delle prestazioni ambientali il sistema di riferimento adottato è l'emissione unitaria media italiana e la produzione di elettricità da carbone.

In **Tabella 6.22** sono riportati i profitti e i bilanci EEA della filiera, il GSI e la riduzione di GHG sono, rispettivamente, pari a 5,0 e al 71,4% nel caso di filiere esclusivamente dedicate alla produzione di energia elettrica e pari a 6,7 e al 76,2% per le filiere con cogenerazione.

Aspetto	Unità di misura	Profitto EEA		Bilancio EEA	
		EE + ET	solo EE	EE + ET	solo EE
Economico	€/GWh <sub>e</sub>	108,1	111,8	5,9	7,1
Energetico	MWh/GWh <sub>e</sub>	973,1	977,6	4,1	4,9
Ambientale	kg CO <sub>2</sub> eq/GWh <sub>e</sub>	78,5	83,8	2,5	3,2

**Tabella 6.22**– Profitto e Bilanci EEA per le due ipotesi di trasformazione

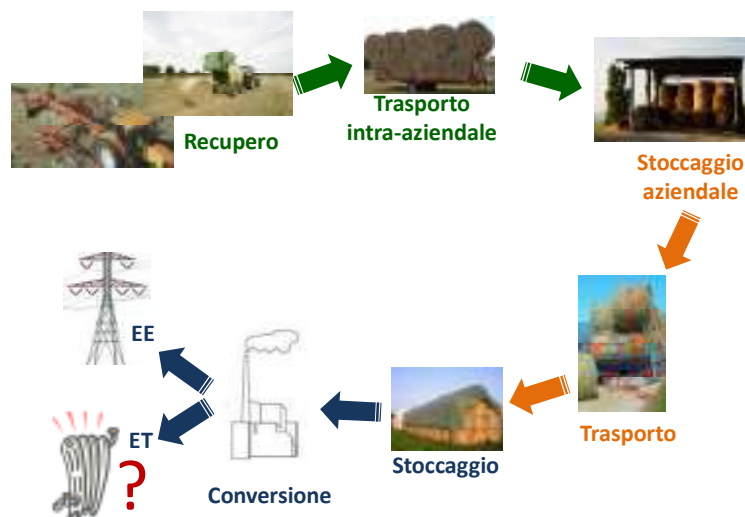
Anche in questo caso, così come per la filiera basata sull'utilizzo di cippato di salice da SRF in Svezia le prestazioni complessive della filiera agro-energetica risultano "penalizzate" dal confronto con un sistema di riferimento le cui emissioni sono considerevolmente più basse di quelle caratteristiche del sistema elettrico italiano.

#### 6.2.4 Sottoprodotti Agricoli

Molte colture tradizionali oltre alla produzione di derrate alimentari portano alla produzione di sottoprodotti che possono spesso essere valorizzati anche per la produzione di energia (Pirani, 1980).

In questo caso studio SEA è stato utilizzato per calcolare i bilanci EEA e la sostenibilità complessiva di una filiera agro-energetica basata sul recupero e l'utilizzo della paglia di cereali (riso, frumento e orzo).

In **Figura 6.18** è schematizzata la filiera, la fase di campo è limitata quindi al recupero della biomassa.



**Figura 6.18** – Schematizzazione della filiera

La paglia è prima andata attraverso l'utilizzo di ranghinatori (Co 3,4 ha/h, Valore a nuovo 5500 €, vita utile 8 anni) accoppiati a trattori (60 kW di potenza, Valore a nuovo 27000 €) ed avviene attraverso l'impiego di rotoimballatrici cilindriche (Co 2,0 ha/h, Valore a nuovo 30000 €, vita utile 8 anni) accoppiate a trattore (90 kW di potenza, Valore a nuovo 40500 €) che operano su andane. Il trasporto in azienda delle balle di paglia è effettuato attraverso l'impiego di carri agricoli (Co 0,6 ha/h, Valore a nuovo 18000 €, vita utile 10 anni) senza sponde in grado di trasportare 14 balle (trattore 80 kW di potenza, Valore a nuovo 39000 €) ([Natalicchio, 1981](#); [AA.VV, 1981](#); [Pellizzi, 1994](#)).

Il costo EEA del biocombustibile al termine della fase di campo è stato valutato considerando una superficie di raccolta di 100 ha e una disponibilità di biomassa di 55 t<sub>td</sub>/ha ([Baldoni, 2000](#)) (U = 25 %, PCI = 16,5 MJ/kg<sub>ss</sub>) ([CTI, 2004](#)).

Per il calcolo del costo EEA del **trasporto** è stata considerata una massa volumica apparente della paglia imballata di 250 kg/m<sup>3</sup> e l'utilizzo di un autotreno con un volume utile di carico di 86,2 m<sup>3</sup> (**Figura 6.19**).



**Figura 6.19** – Trasporto della biomassa imballata all'impianto di conversione

Per la determinazione del costo EEA della **fase di conversione** i parametri utilizzati sono il doppio rispetto a quelli precedentemente riportati in **Tabella 6.5**, ciò in considerazione del fatto che le operazioni che avvengono in questa fase, a parità di tecnologia di trasformazione, sono le stesse anche al variare della biomassa e comportano un costo di gestione che, espresso per unità di biocombustibile, è relativamente costante.

In **Tabella 6.23** è riportato il costo EEA per le fasi di campo, di trasporto e di conversione e il costo EEA complessivo per unità di biocombustibile.

Costo	FA	FT	FC	Tot	Unità di misura
Economico	12,3	6,9	1,4	20,6	€/t <sub>ss</sub>
Energetico	53,4	70,4	5,2	128,9	MJ/t <sub>ss</sub>
Ambientale	6,3	6,9	0,6	13,8	kg CO <sub>2</sub> eq/t <sub>ss</sub>

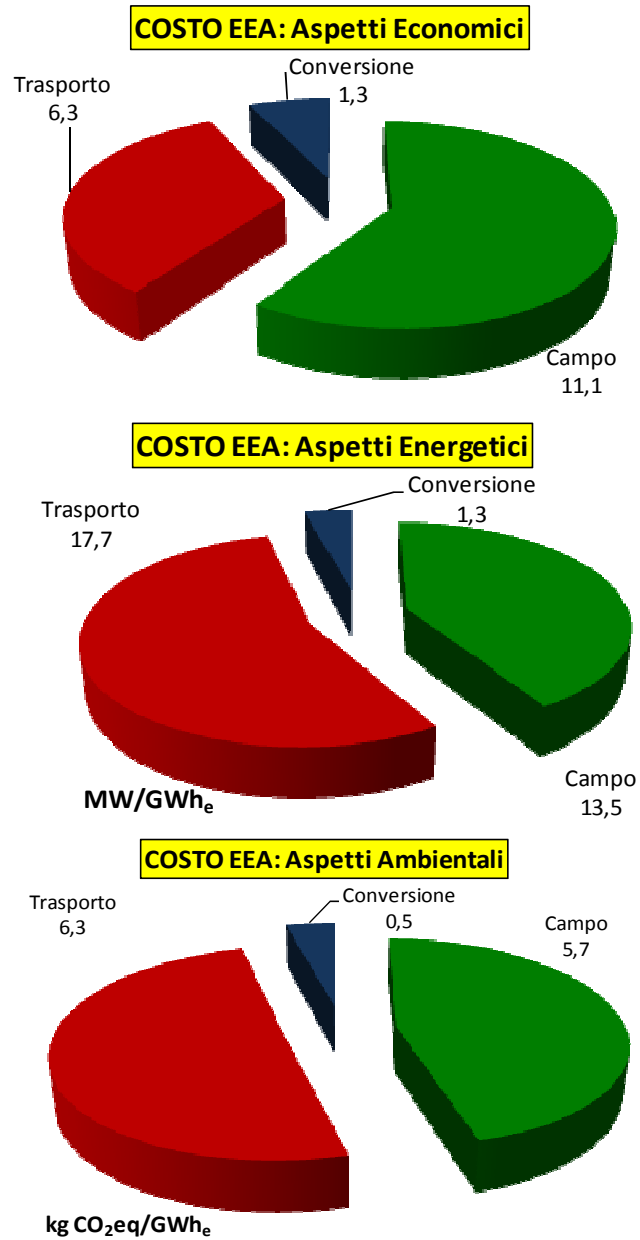
**Tabella 6.23** – Costo EEA per unità di biocombustibile

In **Tabella 6.24** è riportato il **Costo EEA specifico calcolato** (**Figura 6.21**), considerando i rendimenti di trasformazione indicati e in funzione del coefficiente di allocazione calcolato sulla base dei differenti prezzi di vendita.

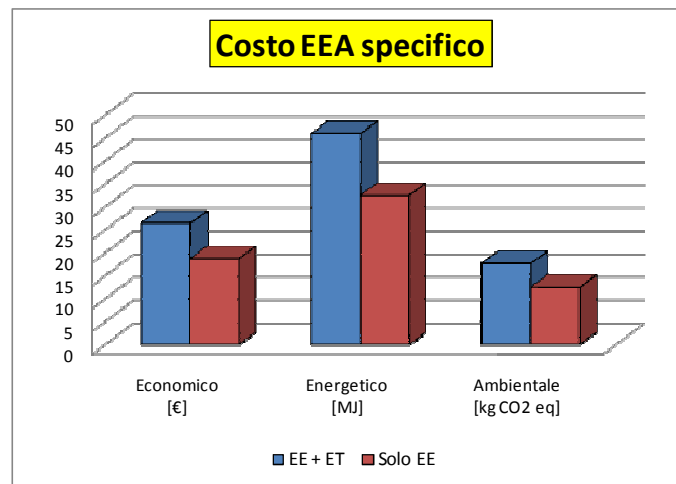
In **Figura 6.20** è invece riportata la suddivisione del Costo EEA tra le tre diverse fasi della filiera; è interessante notare come, rispetto ad altre filiere con ugual distanza di trasporto, l'incidenza delle operazioni di movimentazione sia superiore mentre è nettamente inferiore quella della fase di campo.

Aspetto	Unità di misura	Costo EEA	
		Cogenerazione EE + ET	solo EE
Economico	€/GWh <sub>e</sub>	26,5	18,7
Energetico	MWh/GWh <sub>e</sub>	46,0	32,5
Ambientale	kg CO <sub>2</sub> eq/GWh <sub>e</sub>	17,7	12,5

**Tabella 6.24** – Costo EEA specifico per le due ipotesi di trasformazione



**Figura 6.20**– Ripartizione del costo EEA nelle tre fasi di filiera



**Figura 6.21** – Costo EEA specifico per la filiera basata sull'impiego della paglia

Considerando il prezzo di vendita dell'EE (280 €/GWh<sub>e</sub>) e il sistema di riferimento adottato corrispondono profitti e bilanci EEA riportati in **Tabella 6.25**.

Aspetto	Unità di misura	Profitto EEA		Bilancio EEA	
		EE + ET	solo EE	EE + ET	solo EE
Economico	€/GWh <sub>e</sub>	253,5	261,3	10,6	15,0
Energetico	MWh/GWh <sub>e</sub>	954,0	967,5	12,5	17,7
Ambientale	kg CO <sub>2</sub> eq/GWh <sub>e</sub>	557,3	562,5	31,5	45

**Tabella 6.25**– Profitto e Bilanci EEA per le due ipotesi di trasformazione

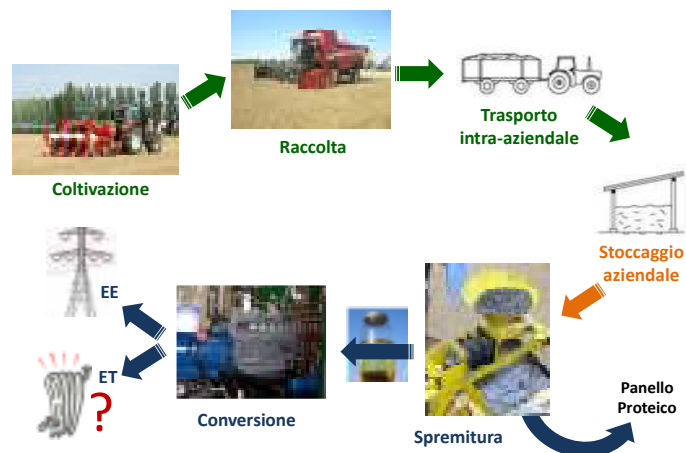
Nel caso della cogenerazione il **GSI** è pari a 41,3 mentre nel secondo caso a 69,8.

### 6.2.5 Olio grezzo da colza

Negli ultimi anni, l'utilizzo dell'olio grezzo ottenuto dalla spremitura di semi di colture oleaginose è una possibilità che sempre più spesso viene presa in considerazione dagli operatori agricoli perché permettendo di concentrare all'interno del settore agricolo tutti i vantaggi della filiera agro-energetica sembra garantire maggiori profitti rispetto alla vendita del seme alle industrie produttrici di biodiesel.

La **fase di campo** della filiera agro-energetica non differisce da quella della filiera tradizionale in cui le colture oleaginose sono coltivate per la produzione di semi da destinare all'industria alimentare.

In questo caso studio vengono riportati i risultati EEA relativi alla messa in opera di una filiera agro-energetica basata sull'utilizzo dell'olio grezzo prodotto da semi di colza in motori endotermici in grado di generare sia elettricità che calore con elevati rendimenti. In **Figura 6.22** è riportata la schematizzazione della filiera con le principali operazioni considerate. La **fase di trasporto** non viene considerata perché la trasformazione del seme avviene in azienda.



**Figura 6.22** – Schematizzazione della filiera olio grezzo



Il seme prodotto nella fase di campo (per maggiori dettagli **Allegato B4**) viene spremuto attraverso l'utilizzo di spremitrici meccaniche. Il costo EEA del seme riportato nell'Allegato B4 è ripartito tra l'olio prodotto e il pannello proteico utilizzando un'allocazione basata sui prezzi di vendita (rispettivamente 800 e 150 €/t) (Riva, 2006; Enama, 2010).

Ad un costo EEA del seme di 390 €/t<sub>ss</sub>, 3159 MJ/t<sub>ss</sub> e 390 kg CO<sub>2</sub>eq/t<sub>ss</sub> corrisponde un costo EEA specifico dell'olio, calcolato considerando un rendimento di estrazione del 35 % e un rendimento complessivo del motore pari al 80 % ( $\eta_{EE}=35\%$ ,  $\eta_{ET}=45\%$ ) di 950 €, 7,5 GJ e 0,94 t CO<sub>2</sub>eq. In **Tabella 6.26** sono riportati il costo, il profitto e i bilanci EEA per l'energia prodotta, il GSI è pari al 60,3 %.

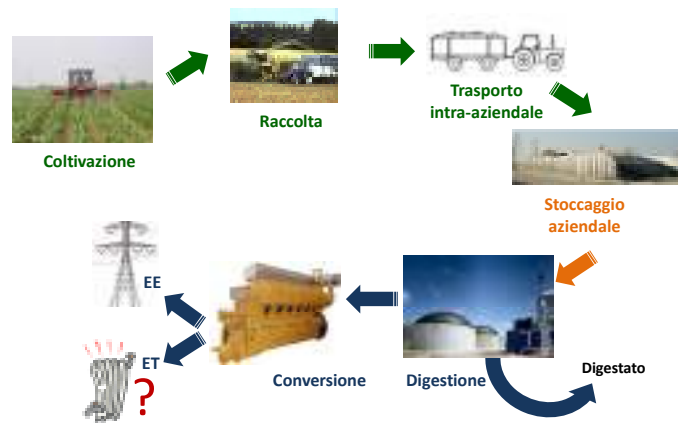
Aspetto	Unità di misura	Costo EEA	Profitto EEA	Bilancio EEA
Economico	€/GWh <sub>e</sub>	234,9	45,1	1,2
Energetico	MWh/GWh <sub>e</sub>	513,6	486,4	1,1
Ambientale	kg CO <sub>2</sub> eq/GWh <sub>e</sub>	228,9	346,1	1,5

**Tabella 6.26** – Costi, profitti e Bilanci EEA per la filiera olio grezzo

### 6.2.6 Biogas da insilato di mais

Per quanto riguarda le filiere basate su processi biochimici di trasformazione della biomassa viene analizzata la produzione di energia elettrica e termica mediante l'utilizzazione in un cogeneratore ( $\eta_{EE}=35\%$ ,  $\eta_{ET}=50\%$ ) (Berglund, 2006; Cuellar, 2006; Enama, 2010). In **Figura 6.23** è riportata la schematizzazione della filiera.

La fase di campo della filiera comprende tutte le operazioni necessarie alla coltivazione e alla raccolta dell'insilato di mais. In **Tabella 6.27** vengono riportati, rispettivamente, la tecnica colturale adottata e i fattori produttivi impiegati (Baldoni, 2000).



**Figura 6.23** – Schematizzazione della filiera biogas

Operazione	Numero di ripetizioni	Dose fattore Produttivo
<b>Concimazione di fondo</b> (spandiletame)	1	30 t/ha
<b>Lavorazione primaria</b> (aratro)	1	-
<b>Ercpicatura</b> (erpice a denti rotanti)	2	-
<b>Semina</b> (Seminatrice pneumatica)	1	20 kg/ha
<b>Trattamento erbicida</b> (Irroratrice)	1	1,5 kg/ha
<b>Fertilizzazione N</b> (Spandiconcime centrifugo)	2	250 kg/ha
<b>Fertilizzazione P e K</b> (Spandiconcime centrifugo)	1	120 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha + 100 kg K <sub>2</sub> O/ha
<b>Raccolta</b> (Falciatrinciacaricatrice)	1	-
<b>Trasporto aziendale</b> (Carri agricoli)	1	-

**Tabella 6.27** – Operazioni della fase di campo e fattori produttivi impiegati

La **fase di trasporto** extra-aziendale non è stata considerata nell'analisi in quanto è stato supposto che l'insilato prodotto alimenti il digestore aziendale senza dover quindi essere movimentato al di fuori dell'azienda agricola.

Il **biogas** ( $PCI = 20 \text{ MJ/Nm}^3$ ) è ottenuto dalla digestione di insilato di mais ( $200 \text{ Nm}^3/t_{ss} - 600-608 \text{ Nm}^3/t_{sv}$ ). Gli autoconsumi per il funzionamento dell'impianto sono pari all'8% dell'energia elettrica e al 35% dell'energia termica prodotta. I costi di gestione (stoccaggio, movimentazione e spandimento) del digestato sono stati considerati pari ai benefici derivanti dal suo impiego come fertilizzante in sostituzione di concimi azotati.

Allocando il **costo EEA** di filiera il costo EEA specifico dell'energia elettrica prodotta è pari a:

- 71,4 €/GWh<sub>e</sub>,
- 29,4 MWh/GWh<sub>e</sub>
- 59,3 kg CO<sub>2</sub>eq/GWh<sub>e</sub>.

Profitti specifici e bilanci EEA sono mostrati in **Tabella 6.28** insieme al corrispondente GSI. La riduzione di GHG rispetto al sistema di riferimento è pari all'89,7%.

Aspetto	Unità di misura	Profitto EEA	Bilancio EEA
Economico	€/GWh <sub>e</sub>	208,6	3,9
Energetico	MWh/GWh <sub>e</sub>	970,6	19,5
Ambientale	kg CO <sub>2</sub> eq/GWh <sub>e</sub>	515,7	8,7
Indice di Sostenibilità Complessiva (GSI)			18,79

**Tabella 6.28** – Profitti, Bilanci EEA e GSI per la filiera biogas

## 6.4 Discussione

L'applicazione del modello di calcolo ad alcune filiere agro-energetiche diffuse ed applicabili nel contesto agricolo ha permesso di evidenziarne la sua adattabilità ai diversi contesti agevolando il confronto tra le diverse filiere agro-energetiche.

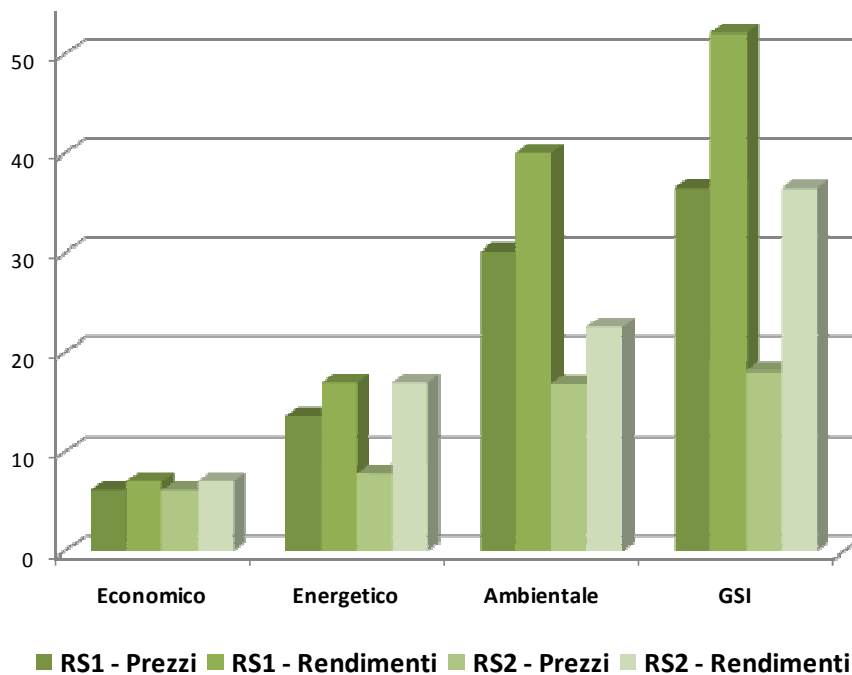
Nel primo caso studio analizzato, relativamente alla produzione di energia attraverso l'utilizzazione del cippato da MRF è stato messo in evidenza come alcune scelte metodologiche (es. criteri di allocazione e scelta del sistema di riferimento) possono avere un'influenza decisiva nel determinare le performance EEA di una filiera. A titolo di esempio, in **Figura 6.24** vengono riportati il bilancio EEA e i corrispondenti GSI per il primo caso studio analizzato. E' possibile osservare come la scelta di differenti sistemi di allocazione così come quella di due diversi sistemi di riferimento possa far variare in modo considerevoli il bilancio EEA e il GSI della medesima filiera.

Generalizzando, per quanto riguarda i risultati specifici dell'applicazione nei diversi casi studio l'analisi ha permesso di evidenziare che tutte le filiere consentono di ottenere un bilancio EEA positivo, superiore a 1 tuttavia si può osservare che:

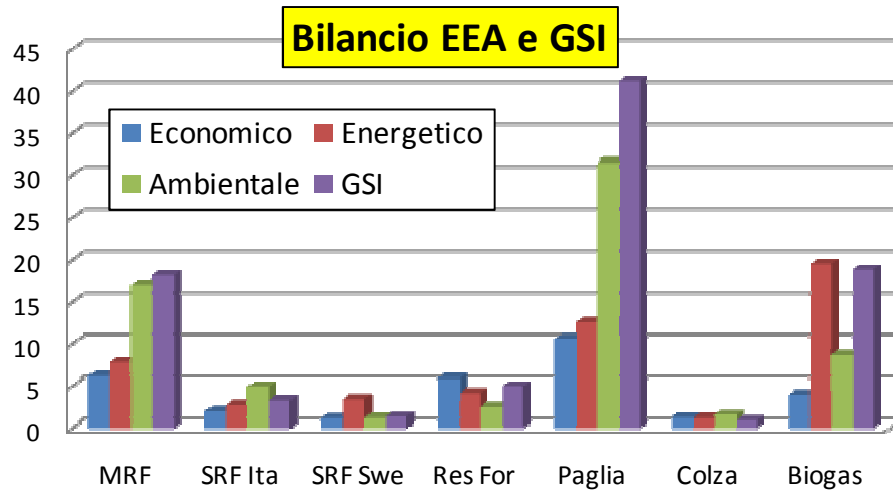
- mediamente le filiere termochimiche e quella biochimica (biogas) consentono di ottenere migliori risultati rispetto alla filiera dell'olio grezzo per la cogenerazione di elettricità ed energia termica;
- le prestazioni energetico ed ambientali risultano generalmente più soddisfacenti di quelle economiche;
- tra le filiere termochimiche i migliori risultati si ottengono in quelle in cui il materiale di partenza per la produzione di energia è un sottoprodotto (paglia e residui forestali) (**Figura 6.25**);
- la produzione di cippato da SRF da destinare alla filiera agro-energetica in Svezia risulta meno vantaggiosa della medesima filiera in Italia a causa delle rese produttive inferiori e del maggior livello di

fattori produttivi impiegato soprattutto per quanto riguarda i concimi azotati. Tra SRF e MRF in Italia le piantagioni a turno medio consentono di raggiungere migliori risultati infatti, anche considerando rese produttive uguali, richiedono una meno intensa meccanizzazione delle operazioni di campo e un inferiore impiego di fattori produttivi.

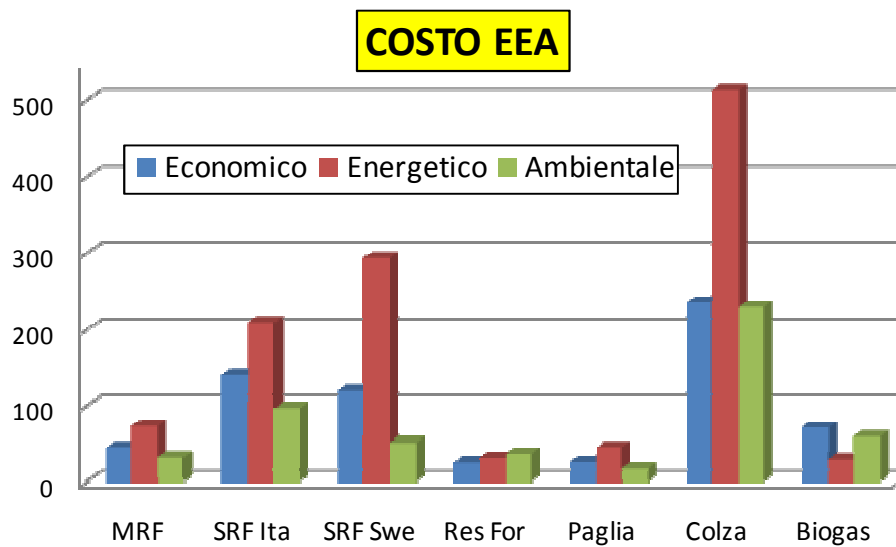
- il confronto tra filiere attuate in Italia e in Svezia deve essere limitato ai costi EEA dell'energia prodotta (**Figura 6.26**) perché la comparazione tra bilancio EEA e GSI delle diverse soluzioni studiate è influenzato dall'utilizzo di due differenti sistemi di riferimento.



**Figura 6.24** – Bilanci EEA e GSI per la filiera basata su cippato da MRF al variare del sistema di riferimento (produzione di energia elettrica da carbone vs media del sistema elettrico italiano) e del criterio di allocazione (prezzi vs rendimenti)



**Figura 6.25** – Bilanci EEA e GSI per i diversi casi studio considerati



**Figura 6.26** – Costi EEA specifici per i diversi casi studio considerati

## 6.5 Bibliografia

- AA.VV. , 2010a - The Swedish electricity and natural gas markets 2009, Energy Markets Inspectorate, p.1-58
- AA.VV., 1981 – Utilizzazione della paglia e di altri sottoprodotti a fini zootecnici, C.N.R. Meccanizzazione Agricola Quaderno 5
- AA.VV., 2000 – Energy from Willow, SAC, West Mains Road, Edimburgh EH9 3JG, UK, p. 1-32.
- AA.VV., 2009 – The electricity certificate systems, 2008, Swedish Energy Agency, English language edition: 700, ET 2008:09, p.1-44
- AA.VV., 2010b – Manual for SRC willow growers, Lantmannen Agroenergi, Sweden, p. 1-18.
- Aldrich T., 2009 – Allocation of GHG emissions in a paper mill, an application tool to reduce emissions, Doctoral Thesis, Universidad Politecnica de Catalonia, Programa “Ciencia I Tecnologia de materials”, p. 1-304.
- ASSOELETTRICA, 2007 - L'industria elettrica Italiana: Il presente e il futuro. Assemblea annuale Roma, 13 giugno 2007.
- Baldoni R., Giardini L., 2000 – Coltivazioni Erbacee, Patron Editore.
- Benetto E. et altri, 2004 – Life cycle assessment of fossil CO2 emission reduction scenarios in coal-biomass based electricity production, Energy and Conversion Management, 45, p. 3053-3074.
- Berglund N., Borjesson P., 2006 – Assessment of energy performance in the life cycle of biogas plant, Biomass and Bioenergy, 30, 254-266.
- Bini R. et altri, 2008- Operational results of the first biomass CHP plant in Italy based on organic rankine cycle turbogenerator and overview of a number of plants in operation in Europe since 1998, 16° European Biomass Conference, Valencia, 3-6 june 2008.
- Borjesson P., 2006 – Livscykelanalys av salicproduktion, Rapport 60, Lund Tekniska Hogskola, University of Lund, p. 1-21.

- Butnar I. et altri, 2010 – Life cycle assessment of electricity from biomass: Case studies of two biocrops in Spain, *Biomass & Bioenergy*, 34, p. 1780-1788.
- Cherubini F. et altri, 2009 - Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations, *Resources, Conservation and Recycling* 53, p. 434–447.
- Cherubini F., Stromman A-H., 2010 – Life cycle assessment of bioenergy system: State of the art and future challenges, *Bioresource Technology*.
- CTI, 2004 – Raccomandazione Biocombustibili: specifiche e classificazione, p.1-54.
- Cuellar A., Webber M., 2008 – Cow power: the energy and emissions benefit of converting manure to biogas, *Environmental Research Letters*, 3, 1-8.
- Duvia A. et altri, 2004 – Cogenerazione a biomassa mediante turbogeneratori ORC Turboden: tecnologia, efficienza, esperienze pratiche ed economia, Atii convegno “Energia prodotta dagli scarti del legno: opportunità di cogenerazione nel distretto del mobile”, 11 novembre 2004.
- Dubuisson X., Sintzoff I., 1998 – Energy and CO2 balances in different power generation routes using wood fuel from short rotation coppice, *Biomass and bioenergy*, 15, 379-390.
- Enama, 2010 – Progetto Biomasse, Caso studio 14, p. 1-14 (<http://www.progettobiomasse.it/it/pdf/casidistudio/CS14.pdf>)
- Faij A. 2006 – Modern biomass conversion technologies, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11, 335-367.
- FIPER, Federazione Italiana Produttori di energia da fonti rinnovabili, [www.fiper.it](http://www.fiper.it)
- Halgstrom P., 2006 – Biomass potential for heat, electricity and vehicle fuels in Sweden, Vol I e II, Doctoral Thesis 2006-11, SLU University.
- Natalicchio E., Semenza C., 1981 - Possibilità produttive, tecniche di raccolta, utilizzazione attuale e alternativa dei sottoprodotti agricoli, C.N.R. Quaderno 23.
- Pellizzi G., Riva G., Fiala M., 1994 – Potenzialità energetica da biomasse nelle regioni italiane- Rapporto conclusivo.



Pirani A., 1980 – Utilizzazione della paglia nei settori industriale e zootecnico, *L'Informatore Agrario*, 41.

Riva G. et altri, 2006 - Agroenergie: Filiere Locali per la Produzione di Energia Elettrica da Girasole, *Progetto Probio*, p. 1-46.

Roedle A., 2010 – Production and energetic utilization of wood from short rotation coppice – a life cycle assessment, *International Journal of Life Cycle Assessment*, 15, 567-578.

Verani S., Sperandio G., 2007 – Meccanizzazione spinta in pioppeto, *Sherwood*, 137, 29-33.

Weisser D., 2007 - A guide to life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies , *Energy*, 32, 1543–1559.

## 7 Conclusioni

La possibilità di produrre bioenergie in ambito agricolo se da un lato può consentire una diversificazione del reddito degli agricoltori dall'altro deve essere valutata attentamente al fine di incentivare e favorire la diffusione solo di quelle filiere agro-energetiche che si presentano come realmente sostenibili sia da un punto di vista economico che energetico ed ambientale.

La messa a punto del modello si calcola attraverso l'implementazione delle metodologie correntemente utilizzate per l'analisi delle prestazioni economiche, energetiche ed ambientali delle diverse filiere agro-energetiche attuabili nell'agricoltura Europea e, in particolare, italiana si presenta come un valido strumento in grado di agevolare il confronto tra le diverse soluzioni facilitando la scelta della filiera che presenta le migliori prestazioni.

L'utilizzo del modello può orientare la scelta degli operatori agricoli in fase di valutazione delle diverse opzioni agro-tecniche che consentono la produzione di bioenergia ma può anche rivelarsi un utile strumento per quegli operatori (funzionari regionali, amministratori pubblici, professionisti, ecc.) chiamati a compiere scelte di indirizzo relativamente alla definizione di quali filiere incentivare, in che misura e in che contesti produttivi.

Oltre allo sviluppo del modello la definizione di una metodologia di calcolo in grado di eseguire una valutazione analitica degli aspetti che concorrono alla definizione della sostenibilità complessiva di filiera si presenta come un altro utile strumento per l'analisi delle diverse filiere.

Per quanto riguarda l'utilizzo del modello, il presupposto fondamentale per l'ottenimento di risultati attendibili dall'applicazione di SEA è l'utilizzo di dati **sito specifici** in grado di rappresentare al meglio la situazione che si intende analizzare.

Le problematiche che ancora persistono sono:

- la difficoltà nel reperire informazioni caratterizzate da un grado di dettaglio congruente con quello richiesto dal modello;
- l'estrema complessità delle fasi di campo e di conversione delle diverse filiere che, rispetto alla fase di trasporto, possono prevedere un grande numero di differenti soluzioni tecniche in grado di incidere sulle performance di filiera;
- l'assenza di informazioni adeguate per quanto riguarda la fase di conversione della filiera. Molto spesso costi energetici ed ambientali di questa fase vengono trascurati nelle analisi supponendo un loro impatto nullo o comunque trascurabile sui bilanci di filiera. A tal proposito la definizione di un Costo EEA di questa fase espresso per unità di biomassa trasformata e non come percentuale del costo totale permetterebbe una modellizzazione più realistica dei processi analizzati.

Lo sviluppo del modello dovrebbe prevedere la sua implementazione con un linguaggio di programmazione strutturato e più *user friendly* rispetto a quello attuale, che, seppur in grado di supportare l'analisi, si presenta poco intuitivo e inadatto a utenti di livello basso.

Relativamente all'indice di sostenibilità complessiva (GSI) occorre sottolineare che, al momento, SEA assegna lo stesso peso alle tre componenti che lo determinano. La possibilità di assegnare pesi differenti ai tre aspetti EEA definendo un "**GSI pesato**" consentirebbe di adattare maggiormente l'analisi alle condizioni locali assegnando pesi maggiori a quegli aspetti che, nelle differenti situazioni locali, assumono una particolare rilevanza.

L'applicazione del modello a diverse filiere agro-energetiche ha evidenziato come, sebbene la sostenibilità EEA sia sempre raggiunta, esistano considerevoli differenze tra le diverse situazioni e come, nel caso delle soluzioni in cui i risultati sono meno incoraggianti (es. filiera olio grezzo,

filiera SRF in Svezia) l'ottimizzazione di tutte le fasi debba essere attentamente valutata.

La valutazione dei tre aspetti EEA ha evidenziato come, a differenza degli aspetti energetici ed ambientali per i quali le filiere studiate hanno generalmente fornito buone performance, la sostenibilità economica sia, delle tre, quella più difficilmente raggiungibile e quella per cui si ottengono i risultati meno soddisfacenti. Alla luce di quanto appena detto la presenza di forme di incentivazione pubblica appare ancora uno strumento decisivo per favorire la diffusione delle agro-energie.

## **ALLEGATI**

# Trapiantatrice per pioppo da biomassa

## Esperienza in un impianto a ceduzione quinquennale

di MARCO FIALA  
 JACOPO BACENETTI

L'impianto delle *Short Rotation Coppice* (SRC), che taluni Autori distinguono in *Short Rotation Forestry* (SRF ceduzione breve rotazione) e in *Medium Rotation Forestry* (MRF ceduzione media rotazione), richiede l'impiego di macchine specifiche e può condizionare la sostenibilità economica della coltura. Le prove condotte dimostrano l'adattabilità e le buone prestazioni di una trapiantatrice per impianti di pioppo MRF.

In Italia l'introduzione delle SRC è recente e fa principalmente riferimento alla coltivazione, con turni di ceduzione biennale, di specifici cloni di pioppo; è però solo negli ultimi anni che i risultati economici ottenibili da queste colture energetiche raggiungono livelli soddisfacenti (FIALA 2008).

In termini generali, considerato il basso valore commerciale del bio-combustibile (legno cippato), la sostenibilità economica del pioppo SRC dipende innanzi tutto dal contenimento dei costi di produzione. A tal fine, nel recente passato, grande impegno è stato posto nella definizione e nella messa a punto di cantieri per il trapianto e per la raccolta, completamente meccanizzati e caratterizzati, al pari delle colture erbacee di pianura, da elevata produttività di lavoro e ridotto impiego di manodopera (BALSARI *et al.* 2002, PARI e FEDRIZZI 2004).

La coltivazione di pioppo da biomassa su intervalli di taglio più lunghi (MRF, 5 anni), diventa più simile alla pioppicoltura tradizionale e comporta la radicale trasformazione della tecnica colturale e dei mezzi impiegati nella SRF (SPINELLI *et al.* 2006); difatti, il prolungamento del turno determina il maggior sviluppo dei polloni che al taglio possono presentare notevoli diametri basali (20-22 cm) e che, attualmente, non possono essere sottoposti a operazioni di taglio e cippatura eseguite con la medesima macchina operatrice (cantiera a operazioni riunite). Va, peraltro, osservato che nel nostro Paese la MRF è stata oggetto di limitati studi e ridotte applica-

zioni di campo.

Nondimeno, il turno quinquennale presenta alcuni vantaggi che lasciano presupporre una maggiore diffusione nel futuro; al riguardo gli aspetti più interessanti sono:

- la tecnica colturale risulta meno intensiva, soprattutto in relazione alla lotta contro le infestanti;
- la possibilità di diversificare la produzione, destinan-



Foto 1 - Macchina trapiantatrice.

do le parti legnose di maggior calibro per la produzione di materiali di buon valore commerciale (tondame, legno per cellulosa ecc.) e riservando le più minute alla cippatura;

- nel caso di utilizzazione integrale della pianta per legno cippato, il prodotto risulta assai omogeneo, con elevato rapporto legno/corteccia e, conseguentemente, caratterizzato da livelli qualitativi assai apprezzati sia nella filiera energetica (il processo di combustione risulta facilitato per il ridotto contenuto di ceneri), sia nelle filiere industriali (carta, imballaggi, pannelli legnosi ecc.);
- con una meccanizzazione della raccolta di norma improntata sulla separazione delle operazioni di taglio e sminuzzatura (soluzione possibile anche su SRF ma, di fatto, attualmente non praticata) è possibile, in pochi mesi di stoccaggio all'aperto, ottenere la parziale essiccazione del prodotto e la conseguente produzione di un bio-combustibile facilmente conservabile e di qualità (Potere Calorifico Netto più elevato - kcal/kgqtq);
- la flessibilità della produzione di biomassa legnosa permette di scegliere il momento più conveniente per collocare il prodotto sul mercato. Né l'anticipo al 4° né il ritardo al 6° anno della ceduzione determinano, difatti, cambiamenti nelle macchine impiegate per la raccolta e nella organizzazione del relativo cantiere. Nella SRF, tale "flessibilità" risulta vincolata dalla disponibilità di macchine operatrici in grado di tagliare/sminuzzare polloni con diametri assai variabili (da 5-6 cm nel caso di anticipo della raccolta al 1° anno a 12-14 cm nel caso di raccolta posticipata al 3° anno).

## MATERIALI E METODI

Nel turno quinquennale, la messa a punto di un'adeguata meccanizzazione culturale riguarda, oltre che le operazioni di raccolta (taglio, cippatura e trasporto del materiale al centro di stoccaggio aziendale), la fase di trapianto che prevede distanze di impianto variabili in funzione del clone impiegato e delle caratteristiche del sito (giacitura, dimensioni, forma ecc.). In pratica, si va da 2,5 x 4 m (corrispondente a una densità di 1.000

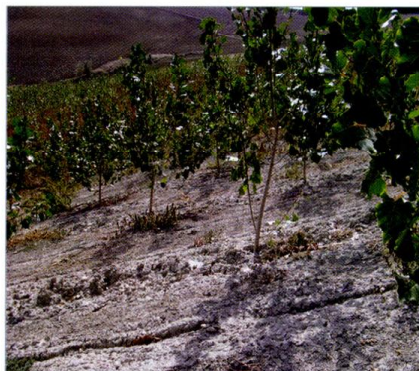


Foto 2 - L'impianto.

piante/ha), a 3 x 3 m (1.110 piante/ha, il più diffuso), fino a 2 x 3 m (1.665 piante/ha).

Il materiale di propagazione è rappresentato da astoni non radicati di un anno di età, alti 2 m, messi a dimora a 90 cm di profondità, in febbraio-marzo. Sebbene per il trapianto di talee (turno biennale) siano disponibili sul mercato soluzioni valide e diversificate, per la messa a dimora degli astoni occorre fare ricorso a prototipi non ancora commercializzati (MANZONE *et al.* 2006).

Allo scopo di valutare l'efficacia e la capacità di lavoro di uno di questi prototipi, si sono effettuate prove sperimentali che hanno interessato una superficie elevata (8 ha), che è il presupposto indispensabile per l'attendibilità delle misure ottenute e, dunque, delle successive elaborazioni per valutare la reale funzionalità della macchina.

La trapiantatrice (Foto 1) è un'operatrice portata (larghezza 3,5 m; lunghezza 2 m; massa a vuoto 1.200 kg) costituita da un robusto telaio che regge una piattaforma sulla quale operano 3 addetti e vengono accumulati circa 600-800 astoni da trapiantare. Per permetterne il trasporto su strada la piattaforma viene ripiegata in due parti mediante martinetti idraulici.

Sul telaio è montato, nella parte inferiore, un robusto assalatore cavo per l'apertura di un solco nel terreno (pro-

Definizione	Simbolo	Descrizione
Trasferimento	T <sub>TR</sub>	Tempo di trasferimento centro aziendale-apprezzamento e viceversa
Regolazione	T <sub>RG</sub>	Tempo di preparazione e regolazione della macchina
Messa a dimora	T <sub>MD</sub>	Tempo durante il quale la macchina esegue il trapianto degli astoni
Svolta/Manovra	T <sub>SV</sub>	Tempo durante il quale la macchina compie le manovre necessarie per dare avvio al trapianto (inizio fila) e/o alla risalita a vuoto (fine fila)
Risalita	T <sub>RS</sub>	Tempo durante il quale la macchina, in assetto portato, risale l'apprezzamento in retromarcia (ritorno a vuoto)
Spostamento	T <sub>SP</sub>	Tempo durante il quale la macchina, terminati gli astoni a bordo, si sposta verso il carro con i fasci di astoni e ritorna al trapianto
Carico	T <sub>CA</sub>	Tempo necessario per caricare sulla trapiantatrice i fasci di astoni da trapiantare
Riposo	T <sub>RP</sub>	Tempo di riposo in campo degli addetti alla trapiantatrice

Tabella 1 - Le fasi di lavoro delle quali si sono misurati i tempi.

TRAPIANTATRICE									PRESTAZIONI	
T <sub>TR</sub>	T <sub>RG</sub>	T <sub>MD</sub>	T <sub>SV</sub>	T <sub>RS</sub>	T <sub>SP</sub>	T <sub>CA</sub>	T <sub>RP</sub>	T <sub>TOT_FTC</sub>	C <sub>0</sub>	P <sub>1</sub>
[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[ha/h]	[astoni/h]
0,83	0,1	6,98	0,62	2,7	1,10	0,10	0,66	13,1	0,61	610
6,3%	0,8%	53,3%	4,7%	20,7%	8,4%	0,8%	5,0%	100%		

**Tabella 2** – Tempi complessivamente rilevati sulla superficie di lavoro e calcolo delle prestazioni operative.

fondità massima: 0,9 m), seguito da 2 dischi rinalzatori ( $\varnothing = 0,4$  m) e da 2 ruote metalliche compattatrici ( $\varnothing = 0,8$  m) che, rispettivamente, addossando e comprimendo il terreno, evitano il disseccamento dell'astone piantato e assicurano un elevato grado di attecchimento.

La macchina in questione è già in dotazione ad alcune imprese di servizi agro-meccanici che da alcuni anni si occupano della meccanizzazione del pioppo da energia nella Pianura Padana.

Dal punto di vista operativo il primo addetto porge l'astone da trapiantare al secondo che, allocandolo nell'assolcatore cavo, provvede al posizionamento verticale nel solco. Per mantenere costante la distanza di trapianto lungo la fila, una terza ruota metallica folle in appoggio è dotata di conta impulsi elettronico che, azionando un dispositivo acustico, avverte l'operatore quando è il momento di deporre l'astone nel solco. La verticalità è assicurata dallo stesso operatore il quale, dopo il posizionamento nel solco, mantiene fermo l'astone per qualche frazione di secondo, fintantoché il terreno mosso dai dischi rinalzatori ne impedisce lo spostamento.

Terminata la scorta di astoni a bordo, la trapiantatrice si dirige verso un carro a bordo campo sul quale sono accumulati fasci di astoni. Il carico del materiale di propagazione dal carro al pianale della trapiantatrice è eseguito manualmente dai tre operatori, coadiuvati dal trattorista.

Le prove sono state effettuate in due giorni del mese di Febbraio in un'azienda cerealicola-zootecnica ubicata a Dozza (BO), sull'Appennino Bolognese. L'impianto ha interessato due grandi appezzamenti contigui, con una pendenza media del 25%, di forma rispettivamente rettangolare e trapezoidale e di superficie complessiva pari a 8 ha. Il terreno è franco-argilloso e, al momento della messa a dimora, presentava un livello di umidità non ottimale (tendente al plastico). Impiegando il clone AF2, si è operato con distanza sulla fila di 2,5 m e interfila di 4 m, raggiungendo un investimento di 1.000 piante/ha (Foto 2).

Prima della messa a dimora gli astoni sono stati idratati per sommersione e nei mesi successivi all'impianto ha fatto seguito una primavera caratterizzata da abbondante piovosità.

Causa l'elevata pendenza dei fondi interessati, l'operazione è stata eseguita lavorando a ritocchino, procedendo in discesa e accoppiando la trapiantatrice a una trattoria cingolata con potenza motore nominale di 225 kW e, come tale, decisamente troppo elevata.

In tale contesto operativo particolarmente severo, la valutazione delle prestazioni della trapiantatrice è stata

eseguita misurando, da un primo operatore posto sulla trattoria e un secondo a bordo campo, i tempi - rilevati in secondi - delle diverse fasi del lavoro (Tabella 1). La ripartizione dei tempi di lavoro della macchina è stata fatta tenuto conto dell'impostazione di alcuni lavori specifici (BOLLI e SCOTTON 1987).

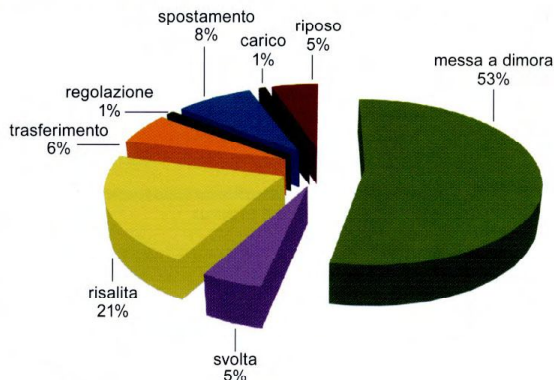
## RISULTATI

La dimensione degli appezzamenti sui quali sono state eseguite le prove consente di stabilire con accuratezza le caratteristiche operative della trapiantatrice e di valutarne, in particolare, l'adattabilità in ambienti collinari e marginali, particolarmente interessanti per la produzione di biomasse energetiche di tipo legnoso.

La Tabella 2 riporta i tempi delle diverse fasi di lavoro rilevati durante le prove che hanno interessato due giorni consecutivi. L'insieme dei lavori ha richiesto complessivamente 13,1 ore, corrispondenti a una capacità operativa di lavoro (C<sub>0</sub>) della trapiantatrice di 0,6 ha/h. Conseguentemente, la produttività di lavoro risulta di 610 astoni/h.

Al tempo di messa a dimora di 6,98 h corrisponde una capacità teorica di lavoro di 1,15 ha/h (1.150 astoni/h). Il Grafico 1, che ripartisce tutte le fasi di lavoro, evidenzia la forte incidenza (1/5 del totale) del tempo di risalita, reso peraltro necessario dalle particolari condizioni di giacitura del terreno.

Tra gli altri tempi, da rilevare quelli relativi alle fasi di rifornimento e di carico degli astoni che, con 1,2 h complessive, raggiungono 9 min/ha, la quasi totalità dei quali spesi dalla trapiantatrice per lo spostamento verso il carro di accumulo a bordo campo e per il ritorno al



**Grafico 1** - Suddivisione dei tempi di lavoro.



Voce	Unità Misura	Trattore 4 RM	Trapiantatrice
Capacità di lavoro	ha/h	-	0,6 - 0,8
Potenza nominale	kW	90	-
Potenza richiesta	kW	-	45
Consumo materiali	kg/h	-	-
Impiego annuo	h/anno	800	-
Consumo specifico minimo	g/kWh	220	-
Carico motore con Cs min	%	85	-
Valore a nuovo	€	49.500	8.000
Tasso di deprezzamento	%	12,5	18,0
Tasso di interesse	%	4,0	4,0
Durata fisica	h	12.000	2.000
Durata economica	anni	12	12
Costo gasolio	€/kg	0,95	-
Costo lubrificante	€/kg	5,50	-
Numero addetti	-	1	3
Costo orario conduttore trattore	€/h	18,00	-
Costo orario addetti alla trapiantatrice	€/h	-	15,00
Coeff. spese varie	%	1,5	1,5
Coeff. manutenzione e riparazione	%	80	70

**Tabella 3** – Parametri impiegati per il calcolo dei costi economici.

punto di trapianto. L'ampio spazio di carico disponibile sulla piattaforma di lavoro consente di raggiungere un'elevata autonomia, limitando il numero di volte in cui è necessario interrompere la messa a dimora causa l'esaurimento degli astoni.

Nelle condizioni di prova, causa la cospicua distanza (2.300 e 2.600 m) degli appezzamenti dal centro aziendale e la non agevole percorribilità delle strade di accesso ai fondi, anche il tempo complessivo di trasferimento non risulta trascurabile, superando 6 min/ha. Invece, grazie alla presenza di ampie capezzagne e alla buona manovrabilità della trattrice cingolata, appaiono contenuti i tempi di manovra/svolta (4-5 min/ha).

Al riguardo, tuttavia va osservato che nelle condizioni di prova, la trattrice non effettua vere e proprie svolte in capezzagna ma compie una serie di manovre, a monte, per allinearsi dando inizio a una nuova fila e, a valle, per risalire in retromarcia l'appezzamento con la trapiantatrice in assetto sollevato.

La regolazione della macchina si è limitata a un solo

intervento, agevole e di pochi minuti, sulla ruota conta impulsi, regolando l'altezza da terra in modo da assicurarsi il rotolamento anche in presenza di forti avvallamenti.

Con una frequenza di trapianto pari a 3,2 s/astone, la velocità media di avanzamento tenuta dalla trapiantatrice non è potuta andare oltre 2,8-2,9 km/h; nel ritorno a vuoto, sebbene in salita, si è mantenuta una velocità media notevolmente superiore, pari a 7,5 km/h.

Relativamente alla qualità del lavoro svolto, gli astoni sono stati messi a dimora con un grado di verticalità sufficiente per le finalità colturali, il numero di quelli rotti durante la prova è pari al 0,6% circa e il buon compattamento eseguito dalla macchina ha contribuito al contenimento degli astoni messi a dimora ma non germogliati (7,9% del totale).

In termini generali, va tuttavia sottolineato che ai non germogliati si aggiunge una quota non trascurabile (3,8% del totale) di astoni che, sebbene regolarmente germogliati, sono risultati disseccati a 220 giorni dalla messa dimora (Foto 3). Con riferimento ai parametri riportati nelle Tabella 3 e 4 si è poi proceduto alla valutazione economica ed energetica dell'operazione.

Relativamente alla valutazione tecnico-economica è stata utilizzata la diffusa metodologia basata sul calcolo dei costi fissi e costi variabili dell'accoppiamento ottimizzato trattrice-macchina operatrice (LAZZARI e MAZZETTO 2005) mentre, per quella energetica, si è fatto riferimento al metodo *Gross Energy Requirement* (GER; SLESSER e WALLECE 1982), con l'eccezione che - come riportato in altri lavori (PIMENTEL 2003; PATZEK 2004; AA.VV. 2005) - è stato attribuito un valore energetico anche alla manodopera.

Per quanto riguarda l'aspetto economico, in Grafico 2 (linee verdi) è riportato l'andamento del costo dell'operazione (astoni esclusi) per due differenti capacità operative di lavoro; la prima ( $Co = 0,6$  ha/h) relativa a condizioni di lavoro estremamente difficili (pendenze elevate con trapianto effettuato solo nei passaggi in discesa, difficoltà nel rifornimento degli astoni, difficile manovrabilità nelle capezzagne, elevata distanza dal centro aziendale) e la seconda ( $Co = 0,8$  ha/h) riscontrabile in situazioni di lavoro più agevoli (corrispondenti a suoli pianeggianti con trapianto in entrambi i sensi di percorrenza, appezzamenti di forma regolare, vicinanza al centro aziendale).

Numericamente, si osserva che, per superfici impiantate superiori a 50 ha/anno il costo dell'operazione si assesta su valori di 125 e 165 €/ha, rispettivamente, per capacità operative di lavoro elevata e ridotta.

VOCE DI INPUT	UNITA' MISURA	TIPO DI INPUT	VALORE
Gasolio	MJ/kg	Diretto	51,5
Lubrificante	MJ/kg	Diretto	83,7
Manodopera	MJ/h	Diretto	2,3
Energia immagazzinata nella macchina operatrice	MJ/kg	Indiretto	69,0
Energia immagazzinata nel trattore accoppiato	MJ/kg	Indiretto	92,0

**Tabella 4** – Parametri di calcolo impiegati per il calcolo dei costi energetici (JARACH 1985).

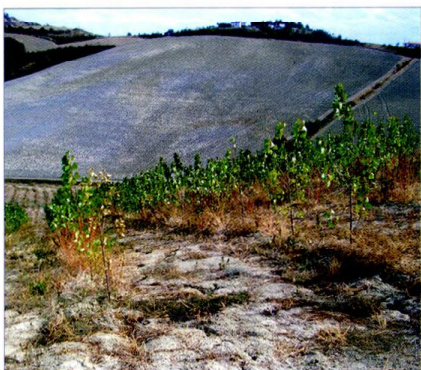


Foto 3 - Impianto a 220 giorni dalla messa a dimora.

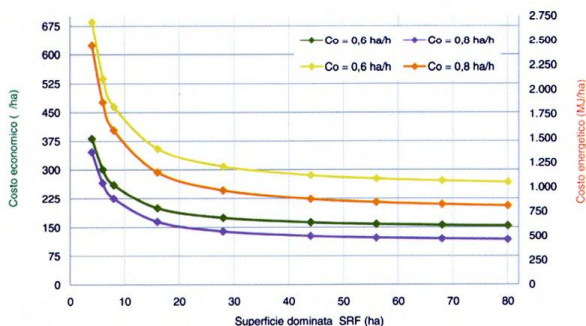


Grafico 2 - Costo economico (ordinata a sinistra) e costo (ordinata a destra) energetico dell'operazione di trapianto (esclusi gli astoni) al variare della superficie dominata per due diverse capacità operative di lavoro.

Anche il costo energetico dell'operazione dipende dalla capacità operativa della macchina (Grafico 2; linee rosse), stabilizzandosi a 50 ha su valori di 1.100 MJ/ha ( $Co = 0,6 \text{ ha/h}$ ) e 850 MJ/ha ( $Co = 0,8 \text{ ha/h}$ ).

Con  $Co = 0,8 \text{ ha/h}$  l'analisi delle voci che compongono la spesa energetica (Grafico 3) mostra che:

- circa l'80% della spesa energetica è dovuta agli input diretti e, in particolare, al consumo di gasolio; l'incidenza ridotta degli input indiretti giustifica, ma solo in parte, il mancato inserimento di tali voci in talune analisi energetiche;
- suddividendo la spesa energetica tra trattrice e operatrice, la quota ascrivibile al trattore è preponderante (85%). Per quanto riguarda, invece, la trapiantatrice, non presentando essa consumo di materiali, il contributo maggiore è addebitabile agli input indiretti e, in particolare, all'ammortamento energetico della macchina.

## CONCLUSIONI

Nelle condizioni di prova, la capacità operativa di lavoro della trapiantatrice - riferita a una superficie di 8 ha - è stata penalizzata dalla forte pendenza che ha imposto di piantare in una sola direzione, procedendo in discesa e imponendo passaggi a vuoto in risalita. La percentuale complessiva di mancato attecchimento (12,3%) appare non soddisfacente.

A fronte di una bassa percentuale di astoni rotti al trapianto e di un buon apporto idrico derivante dall'abbondanza delle precipitazioni avvenute successivamente alla messa a dimora, a incidere negativamente sull'attecchimento hanno certamente pesato sia la formazione di una crosta ai lati del solco dovuta all'esecuzione dell'operazione con terreno non in tempera, sia la presenza di ungulati selvatici (caprioli) più volte avvistati in prossimità dell'impianto in via di germogliazione.

Con appezzamenti in piano (o quantomeno in condizio-

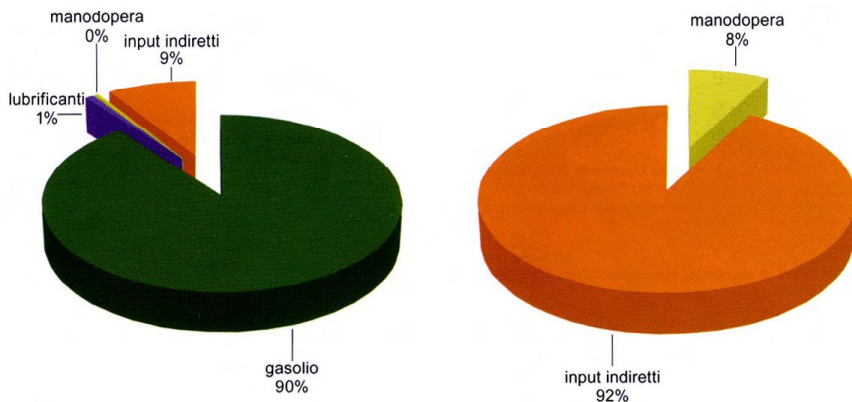


Grafico 3 - Ripartizione della spesa energetica (MJ/ha) tra le diverse voci di input. A sinistra per il trattore, a destra per la trapiantatrice.

ni di giacitura meno severe), l'eliminazione dei passaggi a vuoto, permette di migliorare sensibilmente le prestazioni incrementando la capacità operativa almeno del 20-25% rispetto a quella rilevata nelle prove svolte sull'Appennino bolognese.

In aggiunta e a beneficio dei costi dell'operazione, è possibile ipotizzare accoppiamenti con trattori di minor potenza nominale rispetto a quello impiegato nelle prove. In particolare, sulla base della potenza assorbita dalla macchina sottoforma di forza di trazione, è possibile indicare come ottimale un accoppiamento con trattori gommati 4 RM da 90 kW di potenza nominale. Ulteriori miglioramenti della capacità di lavoro possono derivare dalla scelta dei fondi, del sesto di impianto da adottare e dall'organizzazione del lavoro, mirando al contenimento dei principali tempi accessori. In tal senso, la riduzione delle distanze da percorrere sia nei trasferimenti azienda-appezzamento, sia negli spostamenti in campo necessari per il rifornimento degli astoni appaiono interventi di sicura efficacia.

In termini generali, la quasi assoluta mancanza di tempi morti registrati nella prova sta a indicare l'ottima adattabilità, la robustezza e l'affidabilità della trapiantatrice; tali prerogative acquistano ancor più rilevanza se si considerano le condizioni di lavoro particolarmente severe in cui si è operato.

Il costo dell'operazione appare inferiore alle tariffe praticate dai contoterzisti per tale genere di intervento; non va trascurato, peraltro, che in queste ultime è compreso il costo di trasporto della trapiantatrice dalla sede dell'impresa agro-meccanica al luogo di messa a dimora, evidentemente variabile a seconda della distanza. Può essere utile sottolineare che, grazie alla possibilità di ripiegare la piattaforma della trapiantatrice, il trasporto su strada di norma avviene mediante un autocarro di media cilindrata munito di pianale di carico (3,1 x 2,1 m).

Relativamente alla spesa energetica dell'operazione, l'incidenza sull'*output* complessivo appare modesta; infatti, considerando rese variabili tra 12 e 20 tss/ha/anno, un ciclo di 10 anni e un Potere Calorifico Inferiore di 18,5 MJ/tss, la spesa per l'impianto rappresenta una quota compresa tra 0,4 e 1% dell'*output* finale.

## Bibliografia

- AA.VV., 2005 - **Energy Use and Economic Evaluation of a Three Year Crop Rotation for Conservation and Organic Farming in NE Italy**, Biosystem Engineering, 91 (2): 245-256.
- BALSARI P., AIROLDI G., FACCIOUO G., 2002 - **Messa a dimora di impianti di pioppo da biomassa**. Sherwood anno 8 (8): 49-54
- BOLLI P., SCOTTON M., 1987 - **Lineamenti di tecnica della meccanizzazione agricola**. Edagricole Bologna.
- FIALA, M., 2008 - **Costo di produzione e profitto del pioppo da cippato**. Estimo e Territorio, anno 72 (11): 21-26.
- JARACH M., 1985 - **Sui valori di equivalenza per l'analisi e il bilancio energetici in agricoltura**. Rivista di ingegneria agraria, 2: 102-114.

LAZZARI M., MAZZETTO F., 2005 - **Prontuario di meccanica e meccanizzazione agraria**. Reda Edizioni, 192 pp.

MANZONE M., AIROLDI G., BALSARI P., 2006 - **Trapiantatrici per impianti da biomassa**. Sherwood anno 12 (11): 49-55

PARI L., FEDRIZZI M., 2004 - **Provata una trapiantatrice per le colture forestali energetiche**. L'Informatore Agrario, 43: 95-98.

PATZEK T., 2004 - **Thermodynamics of the Corn-Ethanol Biofuel Cycle**, Critical Review in Plant Sciences, 23 (6): 519-567.

PIMENTEL D., 2003 - **Ethanol Fuels: Energy Balance, Economics, and Environmental Impacts are Negative**, Natural Resources Research, 12: 127-134.

SLESSER M., WALLECE I., 1982 - **Energy consumption per tonne of competing agricultural products available to the EC (Commission of the European Communities, ed.)**. Information on Agriculture, 85. 168 pp.

SPINELLI R., NATI C., MAGAGNOTTI N., 2006 - **Efficienza complessiva di cantieri di meccanizzazione integrale di SRF (Short Rotation Forestry) in Lombardia**. In: Raccogliamo l'energia. Regione Lombardia, 54 (3): 19-48.

---

## INFO . ARTICOLO

**Autori:** Marco Fiala, professore associato, docente di "Energetica per l'Agricoltura", Facoltà di Agraria, Università degli Studi di Milano. E-mail: marco.fiala@unimi.it

Jacopo Bacenetti, dottorando in "Innovazione Tecnologica per le Scienze Agro-alimentari ed Ambientali", Università degli Studi di Milano.

**Parole chiave:** Meccanizzazione, pioppo da biomassa, impianto quinquennale, trapiantatrice, costo, fabbisogno energetico.

**Abstract:** A field test of a Medium Rotation Forestry-poplar transplanter. To obtain an economical sustainability, Short Rotation Coppice (SRC) must reach a high level of field mechanization in order to improve the work efficiency and the quality of final product (chipped wood). The paper analyzes the work productivity of a Medium Rotation Forestry-poplar transplanter tested in a slope Appennino area. By means of field tests, the time necessary for the various operations has been measured and, through the time analysis, the operative, economical and energetic performances of transplanter have been evaluated. Results underline the excellent adaptability of the assessed machine and its good work capacity also in hard working conditions (0,6 ha/h).

# Ottimizzare i tempi nei cantieri di cippatura

[ DI MARCO FIALA\* E JACOPO BACENETTI\*\* ]

Le rese aumentano  
se si riducono le  
attese e le svolte  
delle macchine

La sostenibilità economica delle short rotation forestry (Srf) dipende essenzialmente dalla possibilità di minimizzare i costi di produzione, risultato, questo, che non può prescindere dalla completa meccanizzazione delle operazioni di campo. Tra queste, la raccolta è certamente la più delicata, vedendo impiegate macchine di nuova concezione, complesse e con costi di esercizio elevati. Attualmente il turno di ceduazione più diffuso è il biennale per il quale le operazioni di taglio e cippatura avvengono contemporaneamente mediante il ricorso a specifiche piattaforme di taglio montate su Falcia-trincia-caricatrici (Ftc) semoventi. Il gruppo Biomasse Europa (Be), facente parte del Cner - ha messo a punto una nuova piattaforma di taglio in grado di lavorare su polloni che presentano un diametro basale anche di 12-13 cm; essa provvede al taglio, all'abbattimento e all'invio dei polloni verso il rotore di sminuzzatura di cui è dotata la Ftc.

Il taglio, a 10-12 cm da terra, è attuato da 2 lame circolari controrotanti ( $\varnothing = 800$  mm; 80 denti; 1.700 giri/min) e leggermente inclinate in avanti; l'abbattimento dei polloni è favorito da una barra posta sopra la testata che, inforcandoli a circa 3 m di altezza, li piega in avanti mentre le lame procedono al taglio. Sopra le lame operano,

con medesima velocità e senso di rotazione, 2 aspi dotati di 6 robuste dita incernierate e folli (lunghezza: 220 mm) che hanno il compito di agevolare l'invio dei polloni tagliati verso il grup-

**La piattaforma di taglio** impiegata nelle prove è larga 2,5 m, lunga 2,7 m, alta 1,4 m e pesante circa 2 t.



po alimentatore costituito da 3 tamburi ad asse orizzontale, controrotanti (2.200 giri/min). Due di questi sono posti nella parte inferiore ( $\varnothing = 390$  mm; larghezza: 690 mm) mentre il terzo nella parte superiore dell'alimentatore ( $\varnothing = 290$  mm; larghezza: 670 mm). La sminuzzatura avviene nella Ftc per mezzo di un rotore ( $\varnothing = 669$  mm; larghezza: 750 mm; 1.200 giri/min), munito di 6 coltelli disposti in modo alternato a V rovesciata. Per valutare le reali prestazioni di questa operatrice, durante la campagna di raccolta 2008, sono stati seguiti in modo sistematico tre cantieri di raccolta-trasporto allestiti in aziende della provincia di Cremona.

**PROVE SU 50 ETTARI DI PIOPPO SRF A TURNO BIENNALE**

Le prove sperimentali, svolte nei mesi di febbraio e marzo, hanno interessato una superficie totale di oltre 50 ha di Srf di pioppo a turno biennale. La scelta di valutare le prestazioni operative del cantiere di raccolta-trasporto su una superficie complessivamente molto elevata è il presupposto - ultimamente del tutto trascurato - per l'attendibilità delle misure ottenute e, dunque, delle successive elaborazioni e valutazioni. La scelta degli appezzamenti in cui effettuare i rilievi sperimentali è stata fatta individuando quelli in cui lo sviluppo complessivo della coltura e il diametro basale dei polloni fossero tali da impegnare severamente la macchina, testandone in questo modo, oltre che la

**Rotore di sminuzzatura dotato di 6 lame** (la metà rispetto a quelle impiegate per la trinciatura del mais ceroso).



[ TAB. 1 - CARATTERISTICHE DELLE PIANTAGIONI SRF DI PIOPPINO IN CUI SONO STATE CONDOTTE LE PROVE ]

AZIENDA	COMUNE	APPEZZAMENTI SAU <sub>SRF</sub> [HA E FORMA]	% SAU <sub>TOT</sub>	DISTANZA [M]		CLONE	DENSITÀ [PNT/HA]	MASSA CIPPATO [T]	RESA MEDIA [T/HA]
A	Casteldidone	A1 = 2,71 regolare	15%	100	2.200	Pegaso	14.085	710	54,6
		A2 = 3,02 regolare		200	2.350				
		A3 = 7,27 irregolare		300	2.200				
B	Gadesco	B1 = 16,58 irregolare	50%	200	200	AF2	5.555	1.300	59,4
		B2 = 2,02 regolare		300	300				
		B3 = 3,29 regolare		250	250				
C	Cremona	C1 = 15,90 regolare	25%	400	400	AF2	7.092	585	36,9
<b>TOTALE</b>				<b>50,79</b>				<b>2.595</b>	<b>54,1</b>

capacità di lavoro, robustezza e affidabilità. In tabella 1 sono riportate le informazioni riguardanti gli ambiti in cui si sono svolte le prove; la resa media di cippato (t tal quali/ha) è ricavata misurando direttamente la massa umida trasferita dagli accumuli aziendali ai luoghi di utilizzo finale. Il cantiere di lavoro per la raccolta-transporto del cippato utilizzato nei tre casi è quello oggi più diffuso nelle Srf di pioppino biennali; per la raccolta è impiegata una Frc Claas Jaguar 860 (327 kW) equipaggiata con la piattaforma di taglio BE, al servizio della quale sono posti carri agricoli di diversa capacità (tab. 2). Per valutare le prestazioni della nuova piattaforma di taglio sono stati misurati i tempi necessari per l'esecuzione di tutte le diverse fasi di lavoro (tab. 3). Tutti i tempi sono stati rilevati mediante cronometro digitale da due rilevatori: uno posto nell'appezzamento, l'altro nel piazzale di accumulo. Per ciascun carro giunto al luogo di scarico-accumulo (245 in totale) veniva, inoltre, prelevato un campione di cippato sul quale si determinava la massa volumica apparente (kg tal quali/m<sup>3</sup>) e l'umidità (% sul tal quale) (tab. 4).

Poiché i rilievi sono stati eseguiti su cantieri di lavoro reali, per di più gestiti da un contoterzista, la pesata di ogni carro che giungeva

[ TAB. 2 - CARATTERISTICHE DEI CARRI PER IL TRASPORTO DEL CIPPATO ]

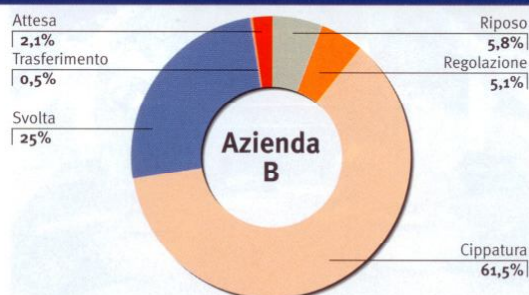
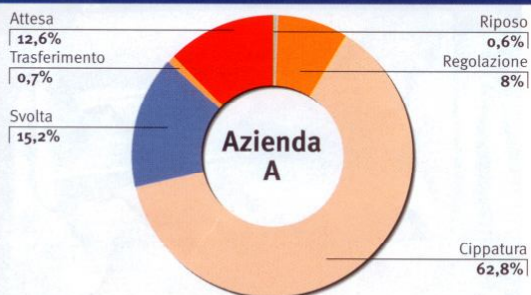
CARRO	CR1	CR2	CR3
Utilizzato nell'azienda	A - B	A - B	A - B - C
Volume utile [m <sup>3</sup> ]	40,5	30,1	24,9
Massa a vuoto [kg]	5.200	4.000	3.250
Potenza trattore [kW]	170	103	66
Caratteristiche	3 assi, pianale ribaltabile, portellone idraulico	2 assi, pianale ribaltabile, portellone idraulico	2 assi, pianale ribaltabile, portellone idraulico

all'accumulo, risultava improponibile, causa anche la mancanza in due aziende su tre di idonee bilance. Pertanto, la Produttività di lavoro (t tal quali/h) in raccolta è stata calcolata in base al volume complessivo di prodotto trasportato, valutato in base alla capacità dei singoli carri e al numero di mezzi impiegati nel trasporto. Considerando che il trasferimento finale dall'accumulo all'utilizzatore finale è avvenuto poche ore dopo la raccolta, il che riduce ma non azzerava le perdite per essiccazione naturale, la differenza contenuta tra la massa di cippato calcolata (2.730 t) e pesata (2.595 t) indica l'attendibilità della produttività oraria della macchina in tabella.

I rilievi effettuati hanno permesso di valutare le prestazioni della Frc accoppiata alla piattaforma Be in tre realtà operative diverse e di analizzare l'organizzazione del cantiere di trasporto.

In tabella 5 sono riportati i risultati ottenuti; si evidenzia come la

[ SUDDIVISIONE DEL TEMPO TOTALE NELLA RACCOLTA DEL CIPPATO ]



TAB. 3 – LE FASI DI LAVORO E I TEMPI

DEFINIZIONE	SIMBOLO	DESCRIZIONE TEMPI
<b>FTC + PIATTAFORMA DI TAGLIO</b>		
Trasferimento	T1	di trasferimento agli appezzamenti
Settaggio	T2	di preparazione e regolazione
Cippatura	T3	in cui si attua la sminuzzatura
Svolta	T4	necessari, terminata una fila, per posizionarsi sulla successiva riprendendo la raccolta
Attesa	T5	di inattività dovuta all'attesa dell'arrivo di un carro
Riposo	T6	di riposo in campo dell'addetto
<b>CARRI</b>		
Settaggio	T7	di preparazione e regolazione
Riempimento	T8	durante il quale il carro affiancato alla Ftc si riempie
Svolta	T9	necessari, terminata una fila, per posizionarsi sulla successiva e riprendere il riempimento
Attesa	T10	di inattività dovuto all'attesa della fine del riempimento del carro precedente
Trasferimenti	T11	- appezzamento-accumulo - accumulo-appezzamento
Scarico	T12	di scarico nel luogo di accumulo
Riposo	T13	di riposo in campo del trattorista

TAB. 4 – MASSA VOLUMICA E UMIDITÀ CIPPATO

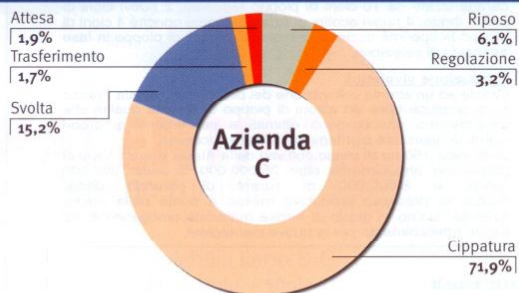
AZIENDA	CAMPIONI	MASSA VOLUMICA APPARENTE		UMIDITÀ	
		M [KG/M <sup>3</sup> ]	CV* [%]	U [%]	CV* [%]
A	59	343,7	4	59,9	2
B	122	337,3	4,4	64,7	1
C	64	270,9	4,2	54,6	1,8

\*CV= Coefficiente di variazione: rapporto tra deviazione standard e media aritmetica dei campioni.



[ Rimorchio in fase di scaricamento.

Capacità di lavoro operativa della macchina per la raccolta presenti sensibili variazioni oscillando tra 0,8 e 1,7 ha/h. Nell'azienda A la raccolta si è rivelata meno agevole rispetto agli altri due pioppeti. Difatti, la macchina, oltre a dover operare su file binate e, quindi, con una densità di polloni molto elevata, si è frequentemente trovata a lavorare su fusti con diametro basale superiore a 12 cm (la cui presenza si deve all'eccessiva altezza di taglio attuata alla prima ceduzione) che ne rallentavano l'avanzamento o, addirittura, imponevano modifiche nella regolazione degli organi di lavoro. Un altro fattore che ha contribuito a ridurre la Capacità operativa è la considerevole distanza tra appezzamenti e centro di accumulo; ciò ha causato lunghi periodi di inattività della Ftc (più di 2 h). In questa situazione, la presenza di un terzo carro avrebbe giovato, permettendo un maggior grado di utilizzazione della macchina.



[ FALCIATRINCIACARICATRICE ACCOPPIATA A PIATTAFORMA BE

Come riportato nei grafici della figura, tali tempi di attesa – improduttivi e, come tali, da evitare – hanno raggiunto addirittura il 12% del tempo totale. D'altro canto, grazie alla forma regolare degli appezzamenti e al corretto schema di impianto, in questa azienda si osservano tempi di svolta piuttosto contenuti (circa 11-12 min/ha) che consentono di compensare, almeno in parte, i predetti tempi di attesa. Negli altri due cantieri (aziende B e C) la raccolta non è invece stata ostacolata da particolari cause permettendo l'ottenimento di Capacità operativa decisamente superiori (1,1 e 1,7 ha/h). Nella seconda azienda però si evidenziano tempi di svolta elevati (13-14 min/ha) corrispondenti addirittura a ¼ del tempo totale.

Nell'azienda C si registrano le migliori prestazioni in assoluto; difatti, oltre alle ridotte perdite di tempo alle cappezzagne (5-6 min/ha), la presenza di un terzo carro al servizio della Ftc ne riduce i tempi di attesa (meno del 2% del tempo totale). A fronte di una resa produttiva piuttosto bassa (36,9 t tal quali/ha), il moderato sviluppo dei polloni ha permesso il mantenimento di velocità di avanzamento superiori, conseguendo una produttività di lavoro simile (71,9 t tal quali/h) a quella dell'azienda B. In tutte le situazioni considerate, gli altri tempi (riposo, trasferimento e regolazioni), sebbene con incidenza diversa, assumono un'importanza complessivamente marginale, assestandosi tra 9,5 e 11,5% del tempo totale. In particolare, i tempi di regolazione della macchina risultano compresi tra 1,1 e 6,0 min/ha, dimostrando le notevoli doti di robustezza, affidabilità e flessibilità della piattaforma di taglio. Il valore più alto si registra nell'azienda A ed è dovuto ai ripetuti aggiustamenti di assetto degli organi di lavoro resisi necessari dall'eccessivo sviluppo dei polloni. Durante il lavoro nell'azienda B, 2 interventi per la modifica dell'inclinazione delle lame hanno richiesto

circa 20-25 minuti ciascuno.

L'analisi dei tempi di trasporto (tabella 6) conferma la difficoltà pratica di affiancare un sistema di movimentazione del cippato che risulti correttamente dimensionato rispetto alle diverse condizioni di lavoro.

Le prove hanno dimostrato l'efficacia e l'adattabilità del sistema di raccolta di Srf biennali basato sull'impiego della piattaforma di taglio Be, montata su Ftc semovente. Le prestazioni dell'operatrice risultano influenzate dalle caratteristiche della Srf su cui opera; in particolare modo, la densità della piantagione e il diametro basale dei polloni rappresentano parametri capaci di condizionare in modo tangibile la produttività. Il dispositivo di raccolta ha dimostrato buona flessibilità operativa mantenendo una produttività del lavoro elevata anche nel caso di piantagioni con rese contenute e modesto diametro medio dei polloni. Con una buona impostazione della piantagione in relazione alla

[ TAB. 5 - TEMPI RILEVATI NELLE AZIENDE E PRESTAZIONI OPERATIVE ]

AZIENDA [HA]	FTC + PIATTAFORMA DI TAGLIO							PRESTAZIONI	
	T <sub>1</sub> [H]	T <sub>2</sub> [H]	T <sub>3</sub> [H]	T <sub>4</sub> [H]	T <sub>5</sub> [H]	T <sub>6</sub> [H]	T <sub>TOT.FTC</sub> [H]	C <sub>0</sub> [HA/H]	P <sub>L</sub> [T/H]
A: 13,00	0,12	1,3	10,16	2,45	2,04	0,1	16,17	0,8	44
B: 21,89	0,1	1,03	12,37	5,02	0,42	1,17	20,11	1,1	65
C: 15,90	0,16	0,3	6,82	1,44	0,18	0,58	9,48	1,7	62

[ TAB. 6 - TEMPO TOTALE DI IMPIEGO DEI CARRI (%) ]

CARRO	AZIENDA	T <sub>7</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>9</sub>	T <sub>10</sub>	T <sub>11A</sub>	T <sub>11R</sub>	T <sub>12</sub>	T <sub>13</sub>
CR1	A	1	40	8	4	21	14	11	1
	B	1	41	11	17	10	6	13	1
	C	0	39	8	10	13	8	15	7
CR2	A	1	36	7	9	19	13	13	1
	B	1	30	15	18	11	7	17	1
CR3	C	0	36	8	8	14	10	17	6
	C	0	30	6	4	19	9	27	4

forma dell'appezzamento, in assenza di particolari problematiche legate allo sviluppo della coltura e con una buona organizzazione del cantiere di trasporto (numero e dimensione dei carri), in una Srf a ceduzione biennale (resa 60 t tal quali/ha), la produttività di lavoro del cantiere di raccolta-transporto può raggiungere 70 t tal quali/h.

\*Professore Associato, Docente di "Energia per l'Agricoltura", Facoltà Agraria, Università di Milano

\*\*Dottorando in "Innovazione Tecnologica per le Scienze Agro-alimentari ed Ambientali" presso la Scuola di Dottorato dell'Università di Milano

## GLI SPECIALISTI DELLE FILIERE AGRO-ENERGETICHE



**Alasia Franco Vivai**, grazie alla stretta collaborazione con i partners del suo gruppo, è stata la prima azienda in Italia ad aver attivato una vera **filiera agro-energetica** a partire dalla coltivazione dedicata di biomassa legnosa.

Sin dal 1998 infatti lavoriamo a diretto contatto coi principali protagonisti del settore (imprenditori agricoli ed industriali del mondo della trasformazione) e rappresentiamo un vero e proprio punto di riferimento per chiunque operi nel campo della Short Rotation Forestry.

I principali settori di competenza della Alasia Franco Vivai sono il miglioramento genetico delle specie a rapido accrescimento impiegate nelle piantagioni da biomassa e la produzione del materiale vegetale necessario alla realizzazione delle stesse.

Oggi la Alasia Franco Vivai è la principale azienda europea nella produzione di piante e talee per colture arboree energetiche. I suoi cloni di pioppo da SRF rappresentano il 98% di quelli piantati nel continente dove operiamo in 14 Paesi. Siamo inoltre attivi in Cina, Sud America, Nord America e Tunisia.

### Sperimentazione

L'attività di sperimentazione iniziata nel 1983 ha permesso e permette all'Alasia Franco Vivai di assecondare le esigenze del mercato nazionale e internazionale, e diventare protagonista attiva nelle scelte dell'industria.

Grazie ad un ambizioso programma di miglioramento genetico finalizzato alla coltura di nuovi cloni di pioppo, salice, *Arundo donax*, *Miscanthus*, eucalitto e tamerice, oggi la Alasia Franco Vivai, **unica** azienda privata italiana a condurre un'attività di questo tipo, è in grado di proporre un'ampia gamma di varietà capaci di adattarsi a molteplici modalità d'impianto e a differenti condizioni

pedoclimatiche.

Tra i temi cui l'Azienda tiene maggiormente occupa uno spazio di rilievo la ricerca sulla meccanizzazione e sugli impieghi innovativi della biomassa in processi che ne aumentino la resa energetica garantendo una maggiore efficienza in fase di trasformazione, come la co/tri-generazione, la pelletizzazione, la gassificazione o le fermentazioni finalizzate alla produzione di bioetanolo.

L'Alasia Franco Vivai lavora necessariamente a stretto contatto di istituti di ricerca (in particolare CNR di Porano, Università della Tuscia, CRA-ING), enti pubblici italiani e stranieri, compagnie private che si avvalgono della sua collaborazione per condurre progetti finalizzati all'innovazione e alla divulgazione della **filiera legno-energia**, ivi compresa la produzione di **bio-carburanti**. In particolare si evidenzia la collaborazione con Powercrop per la fornitura del materiale di moltiplicazione di pioppo destinato alle piantagioni da biomassa ad uso energetico e con Mossi & Ghisolfi nell'ambito del progetto sulla produzione di etanolo di seconda generazione attraverso l'utilizzo di *Arundo donax*.

Attualmente il materiale vegetale di cui disponiamo è caratterizzato da 10 cloni di pioppo registrati, 2 nuovi cloni di salice ibrido, 4 nuovi ecotipi di *Arundo donax*, nonché 4 cloni di pioppo in sperimentazione ufficiale e 11 cloni di pioppo in fase avanzata di selezione.

### Produzione vivaistica

Grazie ad un'attenta coltivazione dei propri vivai, Alasia Franco Vivai produce talee ed astoni di pioppo di elevata qualità che garantiscono attecchimenti ottimali e permettono ai propri clienti di realizzare piantagioni di sicuro successo.

Sugli oltre 150 ha di vivaio coltivati dalla Alasia Franco Vivai si producono annualmente oltre 35.000.000 di talee, 800.000 astoni e 8.000.000 di rizomi di *Arundo donax*. Grazie al processo produttivo messo a punto dalla nostra azienda, siamo in grado di fornire materiale omogeneo e dal sicuro attecchimento per la nuove piantagioni.

Alasia Franco Vivai, strada Solerette 5/A, 12038 Savigliano (CN)

Tel. 0172 377422, Fax 0172 377420, info@alasiafranco.it - www.alasiafranco.it

# Economic, energetic and environmental impact of harvest operations of Short Rotation Coppice

## Introduction

In Italy, agro-energy's contribution to the national energy demand is still moderate; nevertheless, even if slowly, its relevance has increased in recent years. Renewable energy from farms seems like a possible, and theoretically interesting, alternative to traditional crops, allowing a diversification of income sources.

In the last 20 years, supported by favourable grant programs, short rotation coppice (SRC) has taken up about 6.500 ha, mainly in Po Valley Region [1]. The interest in this energy crop is due to its potential to produce thermal and electric energy, reducing consumption of fossil fuels and the subsequent production of GHG [2,3].

The woody trees for SRC are *poplar spp*, *salix spp*, black locust, and eucalyptus, but most plantations are established with specific clones of the poplar an arboreous specie, which is historically well-known and esteemed for Padana agriculture more adaptable for bio-fuel production. Over the years, the development of new specific clones for biomass production and the improvement of cultivation techniques have made it possible to obtain remarkable yield increases. Several crop systems with different cutting times have been adopted: 1-year, 2-years (short rotation forestry), and 5-6 years (medium rotation forestry). At present, though bio-fuels with better quality derive from 5-year plantations, the larger part of the SRC foresees a harvest every 2-years.

The chip wood from SRC is a raw material with a low market value (sale prices range from 60 to 100 \$/t<sub>od</sub>); its economic sustainability strongly depends on production cost reduction. This aim can be reached only with a complete and efficient mechanization over the entire cultural cycle and for all field operations [4,5,6,7,8]. Among these, the harvest is the trickiest because it involves the use of new equipment, which can be complicated and bring high operating costs. Harvesting cost is estimated to be above half of the total cost of chip wood produced from SRC [9,10,11,12].

The harvest includes felling, chipping, and transporting the chips to the storage yard. In the plantations with 5-years cutting time, felling and chipping are normally separated while in biannual SRC. All of these operations are usually carried out simultaneously using different harvest solutions—tractor-based or forager-based harvesting units [13, 14]. These modified foragers are fitted with a specific header for harvest short rotation. In addition to Claas HS1-HS2, Kemper, and Krone headers, an Italian GBE company has developed another two versions, GBE1 and GBE2.

However felling and chipping at the same time appears the best solution because the chips are cheaper to handle than whole plants and because harvesters have a lesser idle time than a combination harvester-forwarder.

The effectiveness of a harvest system with simultaneous operation depends on logistic issues. Transport to a storage yard must be carefully evaluated in order to avoid long forager waiting. The transport system is based on some tractor trailer units, which receive wood chips from the harvest and move them to the storage square; the trailer number depends on the load volume, productivity of the harvester, distance to the collection point, and the speed of tractors.

The goals of this job are as follows:

a) to evaluate the performance of adapted forage harvesters fitted with a GBE2 header in plantations with different plant densities;

b) to assess GBE2's ability to process shoots with a large basal diameter.

For this reason, during the 2009 winter, we followed the harvest operations, carried out with a Claas Jaguar 880 forager fitted with a GBE2 header, at several poplar SRC plantations.



## Materials

### Description of harvest system

This study is concerned the new GBE<sub>2</sub> header coupled with the forager Claas Jaguar 880. The GBE<sub>2</sub> header has been developed to work shoots with a basal diameter of about 12 – 14 cm, more than managed by other headers on the market. After the cut, the shoots are sent to the forager chopper. The header—2,5 m wide, long 2,7 m, and high 1,4 m with a mass of 2050 kg—has the most mechanical transmission devices and receives power from the self-propelled harvester (engine power = 343 kW) by cardanic joint.

The basal cut (10 – 12 cm from soil) is carried out by a pair of circular counterwise saws (diameter = 800 mm; tooth number = 80; thickness = 7 mm; velocity = 1700 turns/min) and slightly tilted forward (15°). The saws are placed in the lower part of the same shafts that carry the steel fingers (long = 220 mm) dedicated to move the stools to the header infeed system. This is constituted by three horizontal infeed counterwise rollers (velocity = 2200 turns/min), two placed in the upper part (diameter = 390 mm, long = 690 mm) and one on top (diameter = 290 mm, long = 670 mm). These rollers, moving away from each other, may increase the infeed openness to 40 cm, allowing management of large volumes of biomass.

Shoots are chopped by the Claas harvester, which uses the same drum employed for chopping forages (diameter = 670 mm; wide = 750 mm; velocity = 1200 turns/min) but without all blades because half are removed. Therefore, the header works with only six V-shaped blades to produce larger wood chips to reduce power requests and decrease the solicitations to the drum. Between the chipping drum and the infeed system of the header there is a second infeed device built in the self-propelled harvester that is similar to the other but only has two horizontal rollers.

### Description of plantations

A forager fitted with a GBE<sub>2</sub> header was evaluated in 5 different places of Po Valley during biannual SRC with two different planting systems, single row and twin row. In either situation, the used clones (AF2 and Pegaso) are specific for biomass production. Single row plantations have a spacing of 3,0 m between the rows and 0,45–0,60 along the row (plant density ranges from 5500–7100 plants/ha) while in plantations with twin rows, there is a spacing of 2,8–3,0 m between twin-rows, 0,70 - 0,75 m between the rows forming a pair, and 0,40 - 0,45 m along the rows (plant density ranges from 9500–15000 plants/ha).

Two plantations are at first harvest, two at second, and the last one at the third. For the field trial, we selected plantations with well developed stools in order to evaluate the work capacity of the machine and its reliability and sturdiness, too.

## Methods

The study, carried out during 2009-2010 harvesting operations, was designed to evaluate machine productivity and to identify the most important factors affecting it. All of the harvest operations were analyzed; following the CIOSTA (Comité International d'Organisation Scientifique du Travail en Agriculture) methodology, the working times were recorded on the field and reported in specific tabs [15].

The different times of work measured were:

- time of chipping,
- time of bend, of wait,
- time of relocation,
- time for driver rest, and

- time for maintenance.

The effective field capacity (EFC), expressed in ha/h, was calculated by dividing the hectares completed by all the working times. Instead, the theoretical field capacity (TFC; ha/h) is obtained by the product between working width (m) and optimal working speed of machine (km/h) (6,5 and 5,0 km/h, respectively for plantations with a single row and with double rows) provided by GBE company. Work productivity (WP, t/h) is derived from the product of EFC (ha/h) and the plantation yield (t/ha) [16].

The field tests were conducted by three operators, one on board of the forager, one at the edge of the field, and one in the storage square of the product. The determination of the mass transported by each farm trailer was made using the weights of the product accumulation place.

Row spacing and the length of rows were been measured with a tape measure, while field surfaces and the distance between storage squares and the fields was determined using GPS (Mobil Mapper). In order to import a GIS map, the data were converted with Mobile Mapper Office.

Each trailer that arrived at chip wood storage collected 2 samples of product (350 total) to determine bulk density (Methodology CEN/TS 15103), moisture content (Methodology CEN/TS 14774-1), and particle size (Methodology CEN/TS 15149-1 and ISO 3310-2) [17,18,19,20,21].

Moreover, in each storage yard and in different chip heaps, samples were collected to evaluate higher heating value (HHV, MJ/kg<sub>od</sub>) (Methodology CEN/TS 14918) and, subsequently, the lower heating value (LHV, MJ/kg<sub>wb</sub>), according to the following equation [22, 23,24]:

$$\text{LHV}_{wb} = (\text{HHV} - 2,45 \cdot 0,09 \cdot \text{H}_2) \cdot (1-U) - 2,45 \cdot U$$

LHV<sub>wb</sub> = The lower heating value of chip on a fresh mass basis (MJ/kg<sub>wb</sub>);

PCS = Higher heating value (MJ/kg<sub>od</sub>);

2,45 MJ/kg = Heat energy required to vaporize water at 20°C;

H<sub>2</sub> = Hydrogen percentage in oven dried poplar biomass, equal to 6,3% [25] (%);

U = Moisture content of biomass on a fresh mass basis (%).

Furthermore, in order to improve the assessment of operative characteristics of the header, observations were made on the average diameters of cut shoots in both plantations, moving along the diagonal of the field for. Each stump was analyzed (one every ten) and the diameter of the shoot was measured to find those with a diameter greater than 3 cm.

Collected data were statistically analyzed with ANOVA to detect significant differences. Harvest costs were calculated using a method described by numerous authors, which divides the costs fix and the variable [26] while energetic input was assessed using gross energy requirement (GER) [27, 28]. GHGs emissions were estimated using a specific carbon equivalent (CE) for diesel fuel and lubricant while other indirect emissions (linked with production of forager, tractors, trailers) we assessed by average emission factor (0,159 kg CO<sub>2</sub> eq/MJ<sub>e</sub>) [29].

For this purpose, the following parameters were used:

- foragers—life term, 12000 h; depreciation time, 8 years; investment cost, 250000 €; energy equivalent, 92 MJ/kg [30];
- GBE2 header—life term, 3000 h; depreciation time, 8 years; investment cost, 90000 €; energy equivalent, 69 MJ/kg [30];
- transport system—3 couples trailer-tractor: life term, 3000 - 12000 h; depreciation time, 8 - 12 years; investment cost, 22000 and 35000 €; energy equivalent, 69 and 92 MJ/kg [30];
- cost, energetic equivalent, and carbon equivalent equal—0,80 €/kg, EE= 51,5 MJ/kg and CE = 3,14 kg CO<sub>2</sub> eq/kg for fuel [30, 31]; 4,0 €/kg, EE = 83,7 MJ/kg, CE = 2,94 kg CO<sub>2</sub> eq/kg for lubricant [30, 32] and 15 €/h for human labour.

Diesel consumption of foragers and tractors was determined by measuring the volume of fuel used to fill up fuel tanks to the brim.

## Results

Field tests have allowed, primarily, performance of the Claas Jaguar equipped with a GBE2 header and to evaluate some characteristics of the wood chips and calculate operating costs. **Table 1** shows the most important information about the five plantations in which the field tests were carried out. Altogether, the test was carried out on 69,2 hectares, the GBE2 harvested 3700 green tones (gt), and the valid time of the study lasted 77 h. Shape and area of the plantations are variables, twin row plantations take up about 40% of the total area of the trials. Between the 5 plantations there is strongly variability in the distance of the storage squares.

The results are shown in **Table 2**.

Yields range from 16,7 to 33,71  $t_{od}/ha$  with an average of 24,84  $t_{od}/ha$ . The yields reported are net (harvest losses were not analyzed) and show the good levels of productivity reached by Italian farmers with this young energy crop. Average values of moisture content (between 50,4 and 64,8%) and bulk density (between 118,8 and 169,2  $kg_{od}/m^3$ ) are in agreement with values reported in the bibliography [33,34,35,23].

Test on stools show how the diameter of the most developed stool widely varies (average between 51,2 – 104,0 mm). Basal diameter is not a large problem in plantations with twin rows in which headers worked without breaking and in lateral rows in which the stems are biggest. In single row plantations, basal diameter is larger and the survey detected the presence of large shoots with considerable diameter (145 mm); nevertheless, the GBE2 header was carried out properly during harvest. The HHV ranges from 18,83 MJ/ $kg_{od}$  for the 4 plantations with AF2 clones and 19,22 MJ/ $kg_{od}$  for the plantation with Pegaso clones. On the contrary, considering the average moisture content for the 5 fields, the LHV ranges from 6,50 and 6,69 MJ/ $kg_{wb}$  for AF2 clones and reaches 6,68 MJ/ $kg_{wb}$  for the Pegaso clones.

Regarding particle sizing, in all the 5 cases, the chip woods produced by the GBE<sub>2</sub> header are classifiable as P16 because 80% of their weight is composed of chips with a diameter larger than 3,5 mm and lesser than 45 mm. A statistical analysis, conducted to detected significant differences between characteristics of chipped wood from the two plantation systems, shows that moisture content and particle sizing of chips produced in thin rows and in single row plantations are not statistically different (both with  $\alpha = 0,01$  and  $\alpha = 0,05$ ); instead, there are significant differences ( $\alpha = 0,01$ ) between bulk density and average basal diameter, which are higher in single row plantations.

**Table 3** reports results about foragers fitted with GBE<sub>2</sub> headers. In the 5 situations, effective field capacity (EFC) and theoretical field capacity (TFC) are highly variable and range, respectively, from 0,77 to 1,67 ha/h and from 1,18 and 2,15 ha/h with a global utilization index ( $\mu_{MO}$  - %, obtained by EFC/TFC ratio) ranging between 43 and 86%. Taking into account the yields in the 5 plantations, it is possible to observe that the range of variation for work productivity is smaller than for EFC.

**Figure 2** shows a breakdown of work times for twin and single row plantations; relocation time from farm to field is excluded because it does not depend on the harvest system. In all situations, harvest operations were carried out without tremendous difficulties; maintenance times were very modest in every case (2 - 5 %). A non-negligible share of the working time (11 %) was wasted in plantations with double rows owing to incorrect sizing of transport systems; many times, the lack of trailers obliged the forager to wait.

With a SRC harvest area ranging from 50 to 450 ha/yr, considering the annual use of the forager tractors and trailers not only on SRC but also on others traditional crops (further 600 h/years) and taking in account EFC for the harvester of 1 ha/h and a yield of 60  $t_{wb}/ha$  (**Figure 3**), the following results were achieved:

- economic harvest and transport cost vary from 15,05 to 26,85 €/ $t_{od}$ ,
- energetic input from 212 and 228 MJ/ $t_{od}$ ,

- GHGs emissions from 15,7 and 18,2 kg CO<sub>2</sub> eq/t<sub>od</sub>.

Best performance is reached when the operations of harvest and transport are carried out in a wide SRC area. Over 300 hectares results become almost unrelated to SRC area harvested; however, still, harvest and transport cost add up to a non-insignificant fraction (27 %) of selling price (35 €/t<sub>wb</sub>). On the contrary, energetic input for harvest and transport operations corresponds to a small part of the output (3-4% of the LHV of the chips).

Taking in account use on other crops both for forager fitted with GBE2 headers, tractors and trailers, based on the results obtained in the 5 different plantations, harvest cost can be assessed (**Figure 4**) in plantations using the following:

- high yield (54,6 t<sub>wb</sub>/ha, U=55%) and low field capacity of the harvester (EFC = 0,77 he/h);
- low yield (36,9 t<sub>wb</sub>/ha, U=55%) and high field capacity (EFC = 1,67 he/h).

The area of the triangle identified by the three costs (economic on axe Z, energetic on axe Y, environmental on axe X) represents the index of full sustainability (ISF) of the chosen solution. Assuming that the same weight is associated with the three aspects (multi-criteria analysis), by comparing the area of the triangles, it is possible to detect the best solution between 2 different solutions (**Table 4**). In the considered situations, low yields linked to high EFC allows a reduction in economic cost, energetic input, and GHG emission, which leads to a lower index of full sustainability (IFS = 58,2 vs 63,1).

## Conclusions

The field tests conducted over a wide area prove the effectiveness and the adaptability of the harvest system, adopted by contractors to harvest biennial SRC plantations, based on a forager Class Jaguar fitted with a GBE2 header.

The performance of the harvesters can be affected by characteristics of poplar plantations, more specifically, stem density, planting system, and shape and yield of the field. These parameters can strongly influence the productivity of the machine. Machine productivity can be decrease dramatically based on mechanical breakdowns and an under sized transport system; chip wood transport needed a careful logistical evaluation.

Regarding the skill of the GBE2 header to manage stools with a basal diameter > 12 cm, the results are positive; properly equipped, the harvester was able to work in the presence of stumps. Regarding the skill of the GBE2 header to manage stools with a basal diameter > 12 cm, the results are positive; properly equipped, the harvester was able to work in presence of stumps with large stems at cut height.

With efficient plantation design and a proper-sized transport system (number and volume of trailers) without mechanical failures or problems linked to the development of the crop, in a biennial poplar SRC plantation, the productivity of the harvest-transport system can reach 65 t<sub>wb</sub>/h and the overall cost can be lower than 20 €/t<sub>od</sub>.

Regarding economic performance, it must be underline that these results can be reached only when the harvester, the tractors, and the trailers are utilized in large SRC areas and over other crops in order to reduced fixed costs.

## References

- [1] Facciotto G, Pinazzi P. Short rotation forestry: use and potentialities. *Alberi e Territorio* 2007; 3: 24-29.
- [2] Dubuisson X, Sintzoff I. Energy and CO<sub>2</sub> balances in different power generation routes using wood fuel from short rotation coppice. *Biomass & Bioenergy* 1998; 15: 379-390.
- [3] Walle IV, Camp NV, Van de Castele L, Verheyen K, Lemeur R. Short-rotation forestry of birch, maple, poplar and willow in Flanders (Belgium) II. Energy production and CO<sub>2</sub> emission reduction potential. *Biomass & Bioenergy* 2007; 31: 276-283.

- [4] Ericsson K, Rosenqvist HK, Nilsson LJ. Energy crop production costs in the EU. *Biomass & Bioenergy* 2009; 33: 1577-1586.
- [5] Fiala M, Bacenetti J. Production cost and profit of chipped wood from poplar short rotation. *Proceedings AGENG2008, Hersonissos (Crete22-25) June 2009*; 1-11.
- [6] Fiala M, Bacenetti J. Pioppo da biomassa in rotazione biennale. *Sherwood* 2010; 165: 43-47.
- [7] Mitchell C.P, Stevens E.A, Watters M.P. Short-rotation forestry – operations, productivity and costs based on experience gained in the UK. *Forest Ecology and Management* 1999; 121: 123-136
- [8] Schroeder W, Kort J, Savoie P, Preto F. Biomass Harvest from Natural Willow Rings around Prairie Wetlands. *BioEnergy Research* 2009, 2: 95-105.
- [9] Mitchell C.P, Hudson J.B. Harvesting systems for short rotation coppice plantations Biomass for energy and industry. *Proceedings of an international conference held in Florence, Italy, 5-9 October 1992*.
- [10] Seixas F, Couto L, Rummer R. Harvesting short-rotation wood crops (SRWC) for energy. *Biomass & Energy* 2006; 3, 1-16.
- [11] Spinelli R, Nati C, Magagnotti N. Harvesting Short-Rotation Poplar Plantations for Biomass Production *Croatian Journal Of Forest Engineering*, 2008, 29, 129-139
- [12] Spinelli R., Nati C., Magagnotti N. Efficienza complessiva di cantieri di meccanizzazione integrale di SRC (Short Rotation Forestry) in Lombardia. *Raccogliamo l'energia*. 2006 Regione Lombardia, 54, 1-64.
- [13] Savoie P, Lavoie F, D'Amours L. Development of Two Headers for a Versatile Woody Brush Harvester-Baler. *Applied Engineering in Agriculture* 2009; 25: 811-817.
- [14] Spinelli R, Nati C, Magagnotti N. Using modified foragers to harvest short-rotation poplar plantations. *Biomass & Bioenergy* 2009; 33: 817-821.
- [15] Bolli P, Scotton M. *Lineamenti di tecnica della meccanizzazione agricola*. Bologna: Edagricole; 1987.
- [16] Pellizzi G. *Meccanica e Meccanizzazione agricola*. Bologna: Edagricole; 1996.
- [17] UNI. Solid biofuels - Determination of bulk density, UNI CEN/TS 15103 2010; 1-16.
- [18] UNI. Solid biofuels, Methods for the determination of particle size distribution, Part 1: Oscillating screen method using sieve apertures of 3,15 mm and above, UNI CEN/TS 15149-1 2006; 1-17.
- [19] ISO. Test sieves — Technical requirements and testing - Part 2: Test sieves of perforated metal plate, ISO 3310-2 1999, 1-15. [20] UNI. Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 1: Total moisture - Reference method, UNI CEN/TS 14774 2010; 1-12.
- [21] UNI. Solid biofuels. Fuel specifications and classes, UNI CEN/TS 14961 2005; 1-45.
- [22] UNI. Solid biofuels - Determination of calorific value, UNI CEN/TS 14918 2010; 1-64.
- [23] Richardson J, Bjorheden R, Hakkila P, Lowe AT, Smith CT. *Bioenergy from Sustainable Forestry: Guiding Principles and Practice*. Kluwer Academic Publishers; 2002.
- [24] Hellrig B, Grigolato S. Il potere calorifico del legno. *Proceedings "Le biomasse agricole e forestali nello scenario energetico nazionale"*. Progetto Fuoco 2004, Verona 18-19 March; 1-14.
- [25] CTI. *Biocombustibili specifiche e classificazione*. 2003, R03/1: 1-54.
- [26] Lazzari M, Mazetto F. *Prontuario di Meccanica Agraria e Meccanizzazione*. Reda; 2005.
- [27] Slessor M, Wallece I. Energy consumption per tonne of competing agricultural products available to the EC (Commission of the European Communities, ed.). *Information on Agriculture* 1982; 85: 1-168.
- [28] Sartori L. et al. Energy Use and Economic Evaluation of a Three Year Crop Rotation for Conservation and Organic Farming in NE Italy. *Biosystem Engineering* 2005; 91 (2): 245-256
- [29] *Assoelettrica. L'industria elettrica italiana tra presente e futuro*. Roma 2007.
- [30] Jarach M. Sui valori di equivalenza per l'analisi e il bilancio energetici in agricoltura. *Rivista di Ingegneria Agraria* 1985; 2: 102-114.
- [31] Lal R. Carbon emissions from farm operations. *Environmental International* 2004; 30: 981-990.
- [32] Centro Tematico Nazionale Atmosfera Clima ed Emissioni in Aria. *Manuale dei Fattori Emissivi Nazionali*. 2002; Bozza Rapporto n.01: 1-193.
- [33] Tharakan PJ, Volk TA, Abrahamson LP, White EH. Energy feedstock characteristics of willow and hybrid poplar clones at harvest age. *Biomass & Bioenergy* 2003; 25: 571-580.
- [34] Guidi W, Piccioni E, Ginanni M, et al. Bark content estimation in poplar (*Populus deltoides* L.) short-rotation coppice in Central Italy. *Biomass & Bioenergy* 2008; 32: 518-524.

- [35] Kenney WA, Sennerby-Forsse L, Layton P. A review of biomass quality research relevant to the use of poplar and willow for energy conversion. *Biomass* 1990; 21: 163–88.

**Table 1** – Characteristics of the SRF plantations

Field	AUA	Plantations	Distance	Clone	Planting system	Plant density	Yield
	[ha]		[shape]				
A	13,3	Regular	2200	Pegaso	Twin Row	14100	726,5
B	21,89	Irregular	250	AF2	Single Row	5550	1300,3
C	15,87	Regular	200	AF2	Single Row	7100	585,6
D	2,40	Regular	3980	AF2	Single Row	5.550	152,3
E	15,7	Irregular	1930	AF2	Twin Row	9.520	945,9

(#) distance between fields and storage square

**Table 2** – Main statistic for 5 test fields

Field	-	A	B	C	D	E	Average	Std.Dev	CV	Min	Max
Yield	[t <sub>wb</sub> /ha]	54,6	59,4	36,9	69,5	60,4	56,56	12,25	22%	36,9	69,5
	[t <sub>od</sub> /ha]	21,9	20,9	16,7	33,7	31,0	24,84	7,18	29%	16,7	33,71
Moisture content	[%]	59,9	64,8	54,7	51,5	50,4	56,25	6,04	11%	50,4	64,8
Bulk Density	[kg <sub>wb</sub> /m <sup>3</sup> ]	343,7	337,3	270,9	348,8	329,9	326,15	31,65	10%	270,9	348,8
	[kg <sub>od</sub> /m <sup>3</sup> ]	137,7	118,8	122,8	169,2	163,7	142,47	23,09	16%	118,8	169,2
Average Ø	[cm]	7,24	10,40	8,56	9,90	5,12	8,24	2,14	26%	5,12	10,40

**Table 3** – Main statistic for GBE2 Header

Field	-	-	A	B	C	D	E	Average	Std.Dev	CV	Min	Max
Effective Field Capacity	EFC	ha/h	0,77	1,08	1,67	0,83	0,94	1,06	0,364	34%	0,77	1,67
Theoretical Field Capacity	TFC	ha/h	1,78	1,95	1,95	1,95	1,88	1,90	0,077	4%	1,78	1,95
Global Utilization Index	μ <sub>OM</sub>	%	43%	55%	86%	43%	50%	55%	0,177	32%	43%	86%
Effective Machine Productivity	WP	t <sub>wb</sub> /h	42,20	64,21	61,77	52,38	56,49	55,4	8,70	16%	42,20	64,21

**Table 4** – Performances for the situations reported in Figure 4

Field	Costs			FSI
	Economic	Energetic	Environmental	
	€/t <sub>od</sub>	MJ/100 kg <sub>od</sub>	kg CO <sub>2</sub> eq/t <sub>od</sub>	
A	19,07	27,94	20,59	63,1
C	19,78	25,23	18,95	58,2

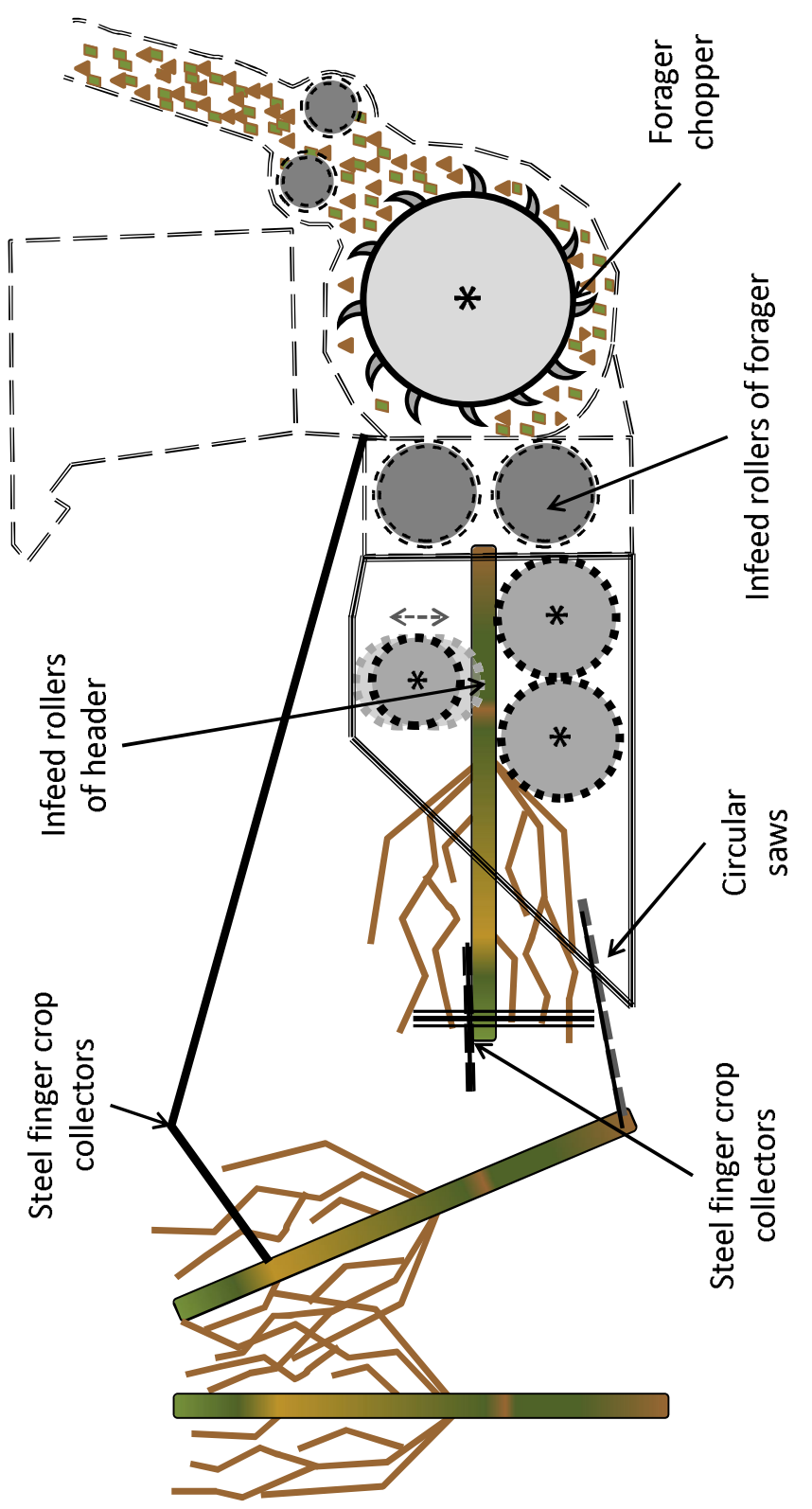


Figure 1



Figure 2

	Chipping	Maintenance	Bend	Waiting
Single row	71%	2%	24%	3%
Twin row	68%	5%	16%	11%

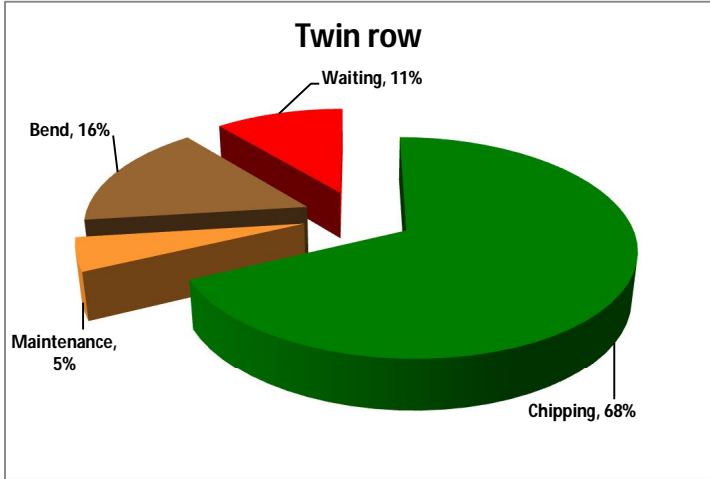
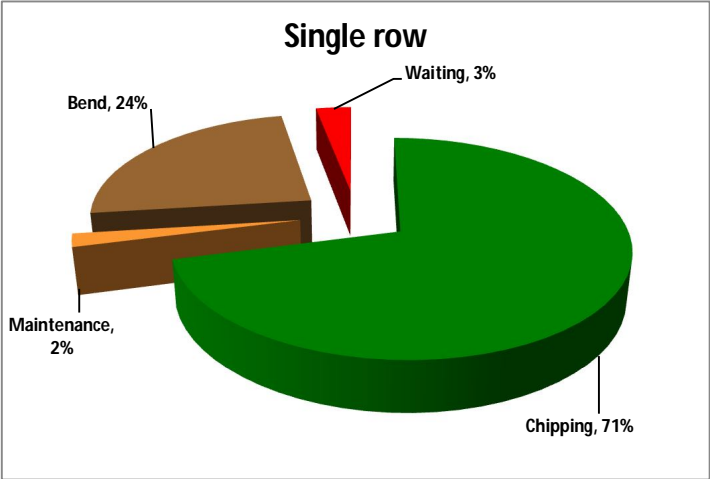


Figure 2 – Breakdown of working time (re location time excluded) for the two planting systems

Figure 3

	450	400	350	300	250	200	150	100	50	ha
Economic	15.1	15.2	15.4	15.6	16.0	16.7	17.8	20.0	26.8	€/t <sub>cod</sub>
Energetic	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	GJ/t <sub>cod</sub>
Environmental	15.7	15.8	15.9	16.0	16.1	16.3	16.6	17.0	18.2	kg CO <sub>2</sub> eq/t <sub>cod</sub>

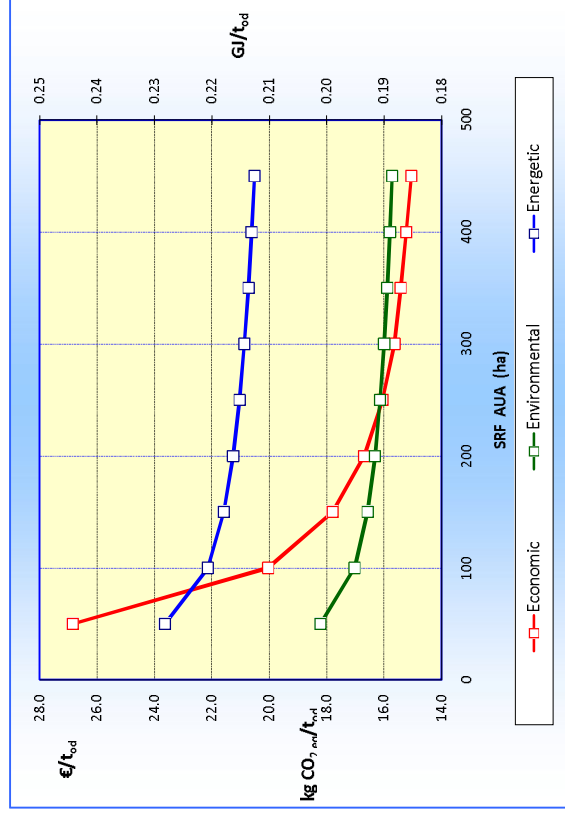
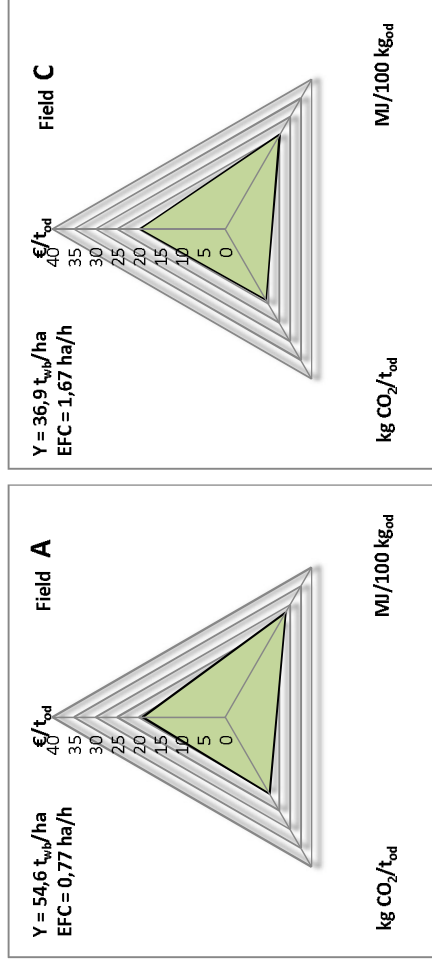


Figure 3 – Production “costs” (economic, energetic and environmental) depending on SFR area

Caption

	C	A
Economic	19.8	19.1
Energetic	25.2	27.9
Environmental	18.9	20.6

$\text{€}/\text{t}_{\text{od}}$   
 $\text{MJ}/100\text{kg}_{\text{od}}$   
 $\text{kg CO}_2\text{eq}/\text{t}_{\text{od}}$



Caption  
**Figure 4** – Performances (economic – energetic – environmental) of harvest and transport system in different operative conditions

**Figure 1** – Header GBE2 fitted on the front of a common forager harvester

**Figure 2** – Breakdown of working time (re location time excluded) for the two planting systems

**Figure 3** – Production “costs” (economic, energetic and environmental) depending on SFR area

**Figure 4** – Performances (economic – energetic – environmental) of harvest and transport system in different operative conditions

## SHORT ROTATION COPPICE IN NORTHERN ITALY: COMPREHENSIVE SUSTAINABILITY

Fiala, M. <sup>1</sup>, Bacenetti, J. <sup>1</sup>, Scaravonati, A. <sup>2</sup>, Bergonzi, A. <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dept of Agricultural Engineering, University of Milan; Via Celoria 2, 20133 Milano, Italy, +39 0250316868, marco.fiala@unimi.it

<sup>2</sup> Rinnova Green Energy Srl; Via Rottaiolo 3, 26040 Scandolara Ravara (CR)

**ABSTRACT:** Short Rotation Coppice (SRC), subdivided into SRF – plantation with a short cutting frequency (1 or 2 yrs) and in MRF – plantation with a medium cutting time (5 yrs), takes up about 7,000 hectares, mainly in Lombardy and Veneto Regions; over the years the development of specific poplar clones for biomass and the improvement of cultivation technique have made it possible to obtain remarkable increases in yield. Nevertheless, in bibliography the information concerning this crop is not always clear and unanimous.

On the basis of the cultivation technique carried out in Northern Italy, an economic, energetic and Environmental (EEE) evaluation of the poplar MRF field-chain phase has been carried out. Data on a poplar plantation growth in Po Valley area have been considered; mainly: duration 10 years; cutting time 5-years; biomass yield 40 t<sub>WB</sub>/ha-year (at 55% of moisture content w.b.).

In these conditions a ratio between output and input energy of 30 and between GHG absorption and GHG emission of 56 with a production cost of 60 €/t<sub>DM</sub> was pointed out. Besides the positive energy and environmental balances, even the economical sustainability of MRF, with a gain of 820 €/ha-year, appears interesting.

Keywords: Short Rotation Forestry (SRF), Poplar, Energy Crops, Energy balance, Sustainability, CO<sub>2</sub> balance.

### 1 INTRODUCTION

In Italy the contribution of agro-energy to national energy demand is still moderate; nevertheless, even if slowly, its relevance has increased in recent years. Agro-energy seems like a possible and, theoretically, interesting alternative to traditional crops allowing a diversification of income sources. Compared with other energy sources, the dedicated crops offer the advantage of extremely intense field management that ensures the highest yield, as well as, the shortest wait time. Cultivation of biomass crop on arable lands allows for increased energy production and should be quite profitable for the environment (groundwater protection, ecological planning, phyto-remediation, green house gases adsorption, etc). This is especially the case for woody crops, including Short Rotation Coppice (SRC).

Over the last 20 years, in Italy, supported by favourable public grant programs, SRC has grown to comprise about 6,500 ha, mainly in the Po Valley area. The Regions Lombardy and Veneto have been the first to give subsidies for SRC and now account for almost all the Italian land area dedicated to this energy crop, 4,000 and 1,300 ha respectively.

In Italy the woody species suitable for SRC are *Populus* spp, *Salix* spp, black locust and eucalyptus, however most plantations consist of specific poplar clones; this arboreus specie is historically well-known by Italian farmers and has proven the most adaptable for bio-fuel production. Over the years the development of new specific clones for biomass production (at the moment the most important are: AF2, Monviso and Pegaso) and improvement in cultivation techniques have made it possible to obtain remarkable yield increases. Regarding the crop management, several systems with different cutting times have been used: first, 1-year and, later, 2-years and 5-6 years. Different cutting times require different plant densities and different lane width. SRC can thus be subdivided into SRF – plantation with short cutting frequency (1 or 2 years) and in MRF – plantation with medium cutting frequency of (> 5 years) (Figures 1 and 2).

Planting systems are different too, with highly variable plant density: 10,000-14,000 plants/ha (annual

plantation with twin rows), 5,000 - 6,000 plants/ha (biennial plantation with single rows) and 1,000 - 1,800 plants/ha (in MRF).

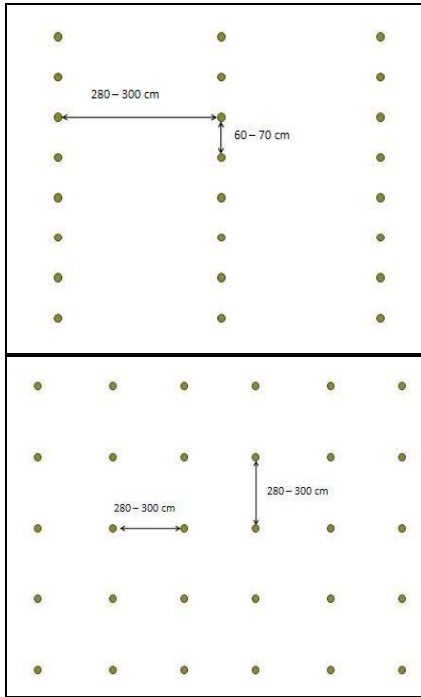


Figure 1: Two-years poplar plantation



Figure 2: Five-years poplar plantation

In plantations with medium cutting time the distance between stumps in the row is quite similar to the width of lanes. Figure 3 shows the most widespread planting systems adopted in Italy for SRF and MRF. In either, the lane allows for use of conventional tractors.



**Figure 3:** Most widespread planting systems for biannual SRF (up) and MRF (below)

At present, even if the best quality bio-fuel comes from 5-year plantations, the larger part of Italian SRC is based 2-years cuts. In the near future MRF plantations will be more widespread because of the better quality of chips (due mainly to lower ash content) [10].

## 2 SRC: ECONOMIC, ENERGETIC AND ENVIRONMENTAL EVALUATION

Wood chip produced from SRC is a raw material with a low market value (sale prices range from 60 to 110 €/t<sub>dm</sub>): the economic sustainability of this crop is highly dependent on reduction of production costs. This aim can be reached through high yields as well as the complete mechanization of all field operations. Among these, the harvest is the most tricky because of new, sophisticated equipments with high operating costs [20] [22] [23] [24] [26]. The need for high yields requires high inputs during the crop cycle that can lessen both energetic and environmental sustainability.

Thus besides economic sustainability there are also energetic and environmental aspects that must be considered. Taking into account the considerable public

grants given to the main agro-energy chains, it is appropriate to evaluate not only economic sustainability (often achieved by means of public subsidies), but also energetic and environmental sustainability. In this way a Comprehensive Sustainability could be estimated. Nevertheless, though the literature provides information about this wood-crop [2] [3] [7] [8] [19] it is not always clear and unanimous. Regarding SRC energy performance, several values of woody biomass production are reported (Table I).

Discrepancies in results can be attributed mainly to differences in following factors:

- species cultivated,
- calculation methodology,
- cultivation techniques (i.e. field operations, type and rate of fertilizers/herbicides, etc.),
- biomass yield,
- selection of agro-energy chain phases/operations (i.e. storage, transport, drying, conversion process, etc).

Few studies have been conducted to investigating the environmental aspects of energy-crop cultivations; but a number of software tools to assess economic and energy performance of bio-energy production have been recently developed.

Nevertheless, most of these tools lack flexibility; their analysis is often restricted to a single type of bio-energy chain only the main operations of a chain. This makes it difficult to apply them to the several agro-energy chains actually in use.

Moreover, in the future it will become more and more important to be able to evaluate the energy-environmental sustainability of each bio-energy chain. Already, before allowing public subsidies, a couple of Italian regions are calling for energy and environmental evaluations of some bio-energy chains.

The aim of this job, 20 years after SRC introduction in Italy, is to clarify the economic, energy and environmental sustainability of these plantations and, specifically, of MRF poplar biomass plantations in northern Italy. For this purpose a specific software tool has been developed; capable of providing unbiased information on these three aspects of “Comprehensive Sustainability” of this bio-energy chain.

Input required by the software are details of: (i) farm (area, agricultural machinery fleet, crop system, etc.), (ii) cultivation technique (mechanization operations and sequence; input rate and market prices, energetic and carbon equivalent) and (iii) the characteristics of products and byproducts (yields, market prices, lower heating value, moisture content).

For the economic evaluation the method of fixed and variable costs [9] [16] is used while for energy balance computation the software uses Gross Energy Requirement (GER) methodology [25], also considering manpower an input [21]. The environmental analysis takes into account the same inputs as energy balance evaluating them by a specific carbon equivalent (CE, kg CO<sub>2</sub> equivalent/kg) [15] or by an average emission factor (0.575 kg CO<sub>2</sub> eq/kWh) [4].

To calculate economic net income the software considers chip-wood selling as well as public subsidies coming from the Rural Development Program (RDP) and Common Agricultural Policy (CAP). Lower Heating Value (LHV) of biomass harvested is taken into account for energy aspects while for environmental output above and below-ground biomass (estimated as a fraction of

above-ground) are computed in addition to the biomass released into the soil.

On the bases of carbon percentage of each biomass and considering the molecular weight of carbon and

carbon dioxide, the amount of absorbed CO<sub>2</sub> is calculated.

**Table I :** Poplar and willow SRF: estimated energy ratio (EROEI: Energy Returned On Energy Invested) reported in literature

SPECIES	CUTTING TIME [years]	DURATION [years]	YIELD [ $t_{dm}/ha\cdot yr$ ]	EROEI	AUTHORS
Poplar, Willow	6	18	14-22	14-19	Turhollow and Perlack [27]
Poplar, Willow	3	16	8-12	29	Matthews [18]
Poplar	4	23	10-15	22-26	Dubuisson and Sintzoff [6]
Willow	4	24	9	25	Borjesson [5]
Poplar, Willow	3	16	12	2-5	Matthews [18]
Poplar	2	8	20	13	Manzone [17]
Willow	3	9-21	10-15	17-53	Keolaian [13]
Willow, Poplar	4	20	3,5-5,9	1,4-8,8	Walle et al. [28]
Willow	3-4	23	10	40-58	Heller et al. [11]

### 3 A CASE STUDY

In this paper, with respect to the operating conditions of the Po Valley area, results concerning the conversion from cereals (maize) to poplar MRF (5-years cutting time, duration 10 years) of 40 ha (50% of total farm AUA – Agricultural Used Area) are reported.

The cultivation technique has been described by Rinnova Green Energy in a recent publication. Transplanting, by contractors in early spring (Figure 4), is based on plant rods put into soil previously fertilized with manure (50 t/ha), ploughed and tilled.



**Figure 4:** Planter machine for MRF plantations coupled with tractors, plant rods are loaded on the platform near to the operators.

Mechanical weed control consists of harrowing in the first 3 years of every cutting time. Chemical weed control is limited to the following treatments: 2 after transplanting, 2 during the growing season after harvest and 1 in the second and sixth years. Nitrogen fertilization is applied, after the cut, using 300 kg/ha of urea

Pest and disease management requires 1 treatment with pesticide against harmful insects during the first 2

years after transplanting and after harvest. In the same years 2 irrigations (400 m<sup>3</sup>/ha each) are scheduled. The harvest (downing of trees - Figure 5, stacking, chipping and transport of chips to farm temporary storage) as well as final restoring of the soil, are done by contractors.

Table II shows the operations required during the entire MRF poplar cultivation-cycle; Table III shows rate, market prices and energy and environmental equivalents for the various production factors.

Inputs for which specific economic, energy and environmental costs are not available, have been replaced with similar ones.



**Figure 5:** Feller for MRF. After 5-years the shoots basal diameter can reach 25 cm.

In the study case, the software tool considers:

- a biomass yield of 40  $t_{wb}/ha\cdot yr$  (moisture content = 55%, LHV = 18,5 GJ/ $t_{dm}$ , carbon in above and below-ground biomass = 50%, ratio root/stem = 0,2);
  - a chip-wood sale price of 35 €/ $t_{wb}$ ;
- and, about public grants:
- the decoupling cap (400 €/ha·yr);
  - the planting subsidy provided by Lombardy Region (1000 €/ha).

**Table II** : Machines and mechanization planning on surface intended for SRC and for traditional crops

OPERATION	MACHINE		COUPLING TYPE, MACHINE SIZE	WORKING YEARS [TIMES PER YEAR]	
				On AUA <sub>MRF</sub>	On AUA <sub>MAIZE</sub>
Pre-planting Fertilization	Manure Spreader	Agricultural Machinery Fleet	TP, 10 t, 10 m <sup>3</sup>	1 [1]	From 1 to 10 [1]
Primary soil cultivation	Plough	Agricultural Machinery Fleet	P, double-shovel	1 [1]	From 1 to 10 [1]
Secondary soil cultivation	Rotary harrow	Agricultural Machinery Fleet	PP, 2,40 m	1 [1]	From 1 to 10 [1]
Transplanting	Planting Machine	Contractor	T, bifilar	1 [1]	-
Chemical Weed Control	Spraying machine	Agricultural Machinery Fleet	PP, 15 m, 1000 dm <sup>3</sup>	1-6 [2] 2-7 [1]	From 1 to 10 [1]
Pests and Diseases Management	Spraying machine	Agricultural Machinery Fleet	PP, 15 m, 1000 dm <sup>3</sup>	1-2-6-7 [1]	
Cover Fertilization	Fertilizer Spreader	Agricultural Machinery Fleet	PP, 1500 dm <sup>3</sup>	6 [1]	From 1 to 10 [1]
Mechanical Weed Control	Rotary harrow	Agricultural Machinery Fleet	PP, 2,40 m	1-2-6-7 [2] 3-8 [1]	-
Harvest Operations	Harvester, Chipper, Trailer	Contractor	SPM, T, PP	5-10 [1]	-
Soil Final Restoration	Hoeing machine	Contractor	P, 1,2 m	10 [1]	-

Notes: PP = coupling with pto; P = coupling without pto; T = trailed coupling; SPM = self-propelled machine

**Table III** : Production factors utilized within simulation: rate, market price, energy (EE) and carbon (CE) equivalents

PRODUCTION FACTORS	QUANTITY		COST		ENERGY EQUIVALENT		CARBON EQUIVALENT	
	Unit	Rate	Unit	Price	Unit	Energy content	Unit	CE
Planting material	Plant rod/he	1650	€/plant rod	1,1	MJ/kg	37,00 [12]	kg CO <sub>2</sub> eq/MJ	0,575 [4]
Organic Manure	t/he	50	€/t	2,25	MJ/t	100,00 [12]	kg CO <sub>2</sub> eq/kg	0
N fertilizer (covering)	kg/he	200	€/kg	0,3	MJ/kg	74,00 [12]	kg CO <sub>2</sub> eq/kg <sub>EA</sub>	1,3 [1]
Herbicide	kg/he	12	€/kg	21	MJ/kg	201,80 [1]	kg CO <sub>2</sub> eq/kg <sub>EA</sub>	9,1 [1]
Pesticide (pyrethroid)	kg/he	4	€/kg	89	MJ/kg	603,00 [1]	kg CO <sub>2</sub> eq/kg <sub>EA</sub>	11,7 [1] [15]
Water	m <sup>3</sup> /he	1600	€/m <sup>3</sup>	0,07	MJ/m <sup>3</sup>	0	kg CO <sub>2</sub> eq/kg	0
Diesel Fuel	-	-	€/kg	0,79	MJ/kg	51,50 [12]	kg CO <sub>2</sub> eq/kg	3,14 [15]
Lubricant	-	-	€/kg	4,00	MJ/kg	83,70 [12]	kg CO <sub>2</sub> eq/kg	2,94 [15]
Manpower	-	-	€/h	15,00	MJ/h	2,30 [21]	kg CO <sub>2</sub> eq/MJ	0,575 [4]
Tractors	-	-	-	-	MJ/kg	92,00 [12]	kg CO <sub>2</sub> eq/MJ	0,575 [4]
Ag-machines	-	-	-	-	MJ/kg	69,00 [12]	kg CO <sub>2</sub> eq/MJ	0,575 [4]

Notes: Infra square brackets the Reference number



4 RESULTS

Results show that, cultivating 50% of the farm area with MRF, the production cost of chip-wood reaches 1070 €/ha-yr (59.5 €/t<sub>dm</sub>). This cost makes possible a net income of 820 €/he-yr (46.1 €/t<sub>dm</sub>) and a revenue/cost ratio of 1.8. The energy input is 5,4 GJ/ha-yr (0.30 GJ/t<sub>dm</sub>) while the energy gain is highly positive (272 GJ/ha-yr - 15,1 GJ/t<sub>dm</sub>).

The specific GHG emission is 40 kg CO<sub>2</sub> eq/t<sub>dm</sub> (0.7 t CO<sub>2</sub> eq/ha-yr) with a positive net balance of 2.16 t CO<sub>2</sub> eq/t<sub>dm</sub> (39 t CO<sub>2</sub> eq/ha-yr).

Comprehensive Sustainability is expressed by all 3 results obtained by the simulation (Figure 6). The smaller the area of the triangle identified by the three costs (economic, energetic, environmental) the higher the energy-crop sustainability.

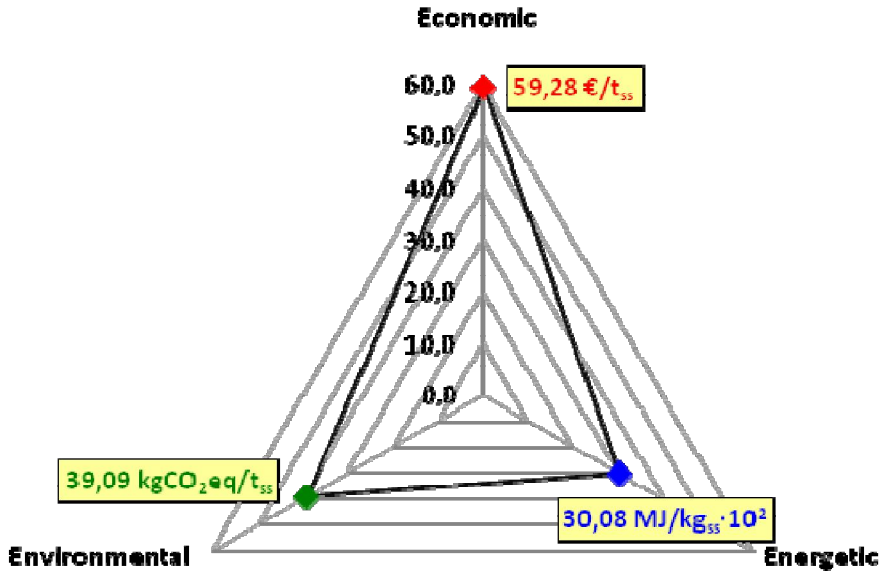


Figure 6: The Comprehensive Sustainability triangle; on vertices: economical cost (red), energy input (blue) and GHGs emission (green).

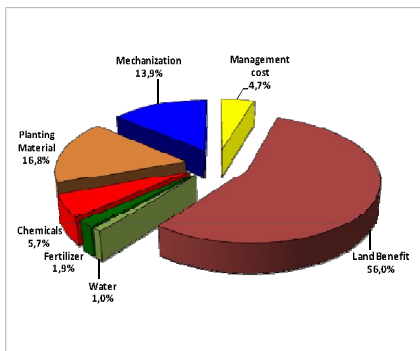


Figure 7: Economic costs allocation, land is the most important items

Output/Input energy ratio (EROEI) is equal to 40 and is strongly favourable as is as the ratio of absorbed to emitted GHG, at 56.

Figures 7, 8 and 9 show economic costs, energy inputs and CO<sub>2</sub> emissions.

Concerning economic aspects, the most relevant expense is for the benefit land (56.0%) followed by the planting material purchase (16.8%) and expense for mechanization (13.9%).

Regarding the energy and environmental issues of MRF cultivation the benefit land is not considered; the most important items are: the use of N-fertilizer and field operations mechanization involving an high oil consumption. Fertilizers account for 41.0% of total energy inputs and for 50.5% of CO<sub>2</sub> emissions while for mechanization these proportions are 43.3% and 30.1% respectively. Concerning mechanization, the basic way to reduce oil consumption is to optimize tractor-machine coupling [14].

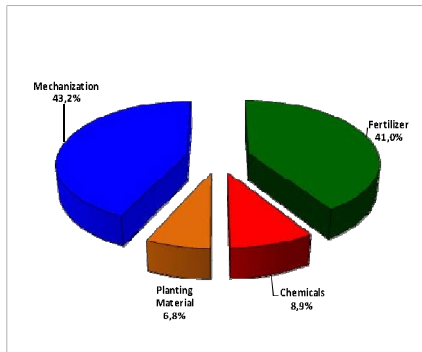


Figure 8: Energy input allocation

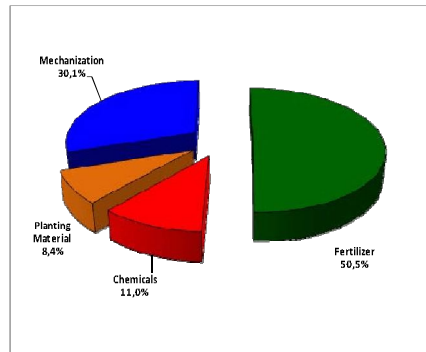


Figure 9: GHG emission allocation

## 5 CONCLUSIONS

Regarding the field phase of the energy-chain, the poplar MRF plantation, in the conditions considered (10 years rotations with harvested every 5-years, yield of 40 t<sub>WB</sub>/ha-year, moisture content of 55%), appears very interesting from an energy and environmental point of view. EROEI are greater than 40 and the ratio of GHG absorptions/emission reaches 56. Direct energy inputs account for 57% of the total energy requirement while indirect input account for 43%.

Poplar MRF is also profitable in economic terms with the greatest gains in respect to traditional crops. These results concern a high yield polar-MRF, using specific biomass clones, planted in fertile soil, irrigated and well managed.

In regard to SRC results reported in recent publications, MRF lead better outcomes: it requires fewer field operations and lower levels of production factors while reaching higher yields.

Even though in Italy the largest SRF area is actually cultivated with 2-years plantations, in the near future the larger part of new plantations will be run with the 5-years system.

A large SRC diffusion are possible only if economic results will be advantageous for farmers. Considering the drop in agricultural subsidies, this will be possible only with high biomass yields and an increase in chip-wood market value.

Finally, MRF can contribute to solving the problem of traditional cultivation surplus and to improving the relations between agriculture and the environment. The availability of public subsidies for this bio-energy crop seem justified by its good energy and environmental performance.

## 6 REFERENCES

- [1] Audsley E. et al., Estimation of greenhouse gas emissions from agricultural pesticide manufacture and use, Cranfield University, 2009, p. 1-20
- [2] Bechini L., Castoldi N., On-farming monitoring of economic and environmental performances of cropping systems: Results of 2-years study at the

- field scale in northern Italy, *Ecological Indicators*, 2009, 9, p. 1096-1113
- [3] Biemann S. et al., Energy recovery by crops in dependence on the input of mineral fertilizer. Final Report, 1999, p. 1-49
- [4] Bini G., Magistro S., Manuale dei fattori di emissione nazionali, Centro Tematico Nazionale Atmosfera Clima ed Emissioni Aria, Bozza Rapporto n.1, 2002, p. 1-193
- [5] Borjesson P., Energy analysis of biomass production and transportation. *Biomass & Bioenergy*, 1996, 11 (4), p. 305-314
- [6] Dubuisson X., Sintzoff I., Energy and CO<sub>2</sub> balances in different power generation routes using wood fuel from short rotation coppice. *Biomass & Bioenergy*, 1998, 15, p. 379-390
- [7] Ericsson K. et al., Energy crop production costs in the EU. *Biomass & Bioenergy*, 2009, 33, p. 1577-1586
- [8] Giontella D., Danieli P., Analisi della sostenibilità di un modello agricolo-zootecnico, XVI Congresso della Società Italiana Ecologia, 2006, p. 1-11, available online at <http://www.ecologia.it/congressi/XVI/articles/>
- [9] Fiala M., Bacenetti J., Production cost and profit of chipped wood from poplar short rotation, Proceedings AGENG2008, Hersonissos (Crete) 22-25 June 2009, pp. 11.
- [10] Guidi W. et al., Bark content estimation in poplar (*Populus deltoides* L.) short-rotation coppice in Central Italy. *Biomass & Bioenergy*, 2008, 32, p. 518-524
- [11] Heller et al., Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping systems. *Biomass & Bioenergy*, 2003, 25, p. 147-165
- [12] Jarach M., Sui valori di equivalenza per l'analisi e il bilancio energetici in agricoltura. *Rivista di Ingegneria Agraria*, 1985, 2, p. 102-114
- [13] Koeleian G., Volk T., Renewable energy from willow biomass crops: Life cycle energy, environmental and economic performance. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2005, p. 1-23
- [14] Koga N. et al., Fuel consumption-derived CO<sub>2</sub> emissions under conventional and reduced tillage cropping systems in northern Japan. *Agriculture Ecosystem & Environment*, 2003, 99, p. 213-219

- [15] Lai R., Carbon emission from farm operations. *Environment International*, 2004, 30, p. 981-990
- [16] Lazzari M., Mazzetto F., *Prontuario di Meccanica Agraria e Meccanizzazione*, REDA, 2005
- [17] Manzone M. et al., Energetic and economic evaluation of a poplar cultivation for the biomass production in Italy. *Biomass & Bioenergy*, 2009, 33, p. 1258-1264
- [18] Matthews R., Modelling of energy and carbon budgets of wood fuel coppice systems. *Biomass & Bioenergy*, 2001, 21, p. 1-19
- [19] Mitchell C.P. et al., Short-rotation forestry – operations, productivity and costs based on experience gained in the UK. *Forest Ecology and Management*, 1999, 121, p.123-136
- [20] Mitchell C. P., Hudson J. B., Harvesting systems for short rotation coppice plantations Biomass for energy and industry. *Proceedings International Conference*, Florence, Italy, 5-9 October 1992.
- [21] Sartori L. et al, Energy Use and Economic Evaluation of a Three Year Crop Rotation for Conservation and Organic Farming in NE Italy, *Biosystem Engineering*, 2005, 91(2), p. 245-256
- [22] Savoie P., Lavoie F., D'Amours L., Development of Two Headers for a Versatile Woody Brush Harvester-Baler, *Applied Engineering in Agriculture*. 2009, 25, p. 811-817
- [23] Schroeder W. et al., Biomass Harvest from Natural Willow Rings around Prairie Wetlands. *BioEnergy Research*, 2009, 2, p. 95-105
- [24] Seixas F. et al., Harvesting short-rotation wood crops (SRWC) for energy. *Biomass & Energia*, 2006, 3, p. 1-16
- [25] Slesser M., Wallece I., Energy consumption per tonne of competing agricultural products available to the EC (Commission of the European Communities, ed.), *Information on Agriculture*, 1982, 85, p. 168
- [26] Spinelli R. et al., Using modified foragers to harvest short-rotation poplar plantations. *Biomass & Bioenergy*, 2009, 33, p. 817-821
- [27] Turhollow F., Perlack D., Emissions of CO<sub>2</sub>, from energy crop production. *Biomass & Bioenergy*, 1991, 1(3), p. 129-135
- [28] Walle I.V. et al., Short-rotation forestry of birch, maple, poplar and willow in Flanders (Belgium) II. Energy production and CO<sub>2</sub> emission reduction potential. *Biomass and Bioenergy*, 2007, 31, p. 276-283



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO  
VIA FESTA DEL PERDONO, 7 - 20122 MILANO

# Pioppo da biomassa in rotazione biennale

## Un'indagine sulla sostenibilità complessiva

di MARCO FIALA

JACOPO BACENETTI

Le *Short Rotation Forestry* (SRF) a finalità energetica sono state ormai da tempo introdotte e studiate nel nostro Paese. E' oggi possibile delinearne un quadro complessivo valutandone la sostenibilità non solo dal punto di vista economico, ma anche sotto l'aspetto energetico e ambientale. L'articolo porta un caso di applicazione del modello SEA (Sostenibilità Economico-energetica e Ambientale), ideato presso il Dipartimento di Ingegneria Agraria di Milano per valutare la sostenibilità complessiva delle SRF. Mentre dal punto di vista energetico e ambientale tale coltura pare interessante, dal punto di vista economico i risultati non appaiono soddisfacenti.

A circa 20 anni dall'introduzione in Italia delle SRF a finalità energetica, le informazioni raccolte permettono di eseguire un'analisi dettagliata dei risultati conseguibili qualora un agricoltore decidesse di dedicare parte della propria superficie aziendale a tale coltura. Lo sviluppo di cloni di pioppo specificatamente selezionati per biomassa da energia e la messa a punto di una tecnica colturale adatta ai nostri areali hanno permesso il sensibile incremento dello scoss per ettaro; tuttavia, considerando che il bio-combustibile cippato da SRF spunta sul mercato prezzi piuttosto bassi (attualmente tra 60 e 100 €/t di sostanza secca, in funzione della qualità, che corrispondono a 30-50 €/t di cippato tal quale al 50% di umidità) la sostenibilità economica della coltura dipende in forte misura dalla minimizzazione dei costi di produzione. Obiettivo quest'ultimo che non può prescindere dalla completa meccanizzazione delle operazioni di campo. Recentemente, per tutte le colture energetiche, oltre al raggiungimento della sostenibilità economica destano crescente attenzione e assumono maggiore importanza la sostenibilità energetica e quella ambientale. Ne è prova il fatto che alcune Regioni, nei propri PSR, vincolano il riconoscimento di contributi all'ottenimento di un

bilancio energetico positivo e, talvolta, attribuiscono alle domande pervenute punteggi e priorità diversi proprio in funzione dei risultati energetici correlati.



## MODELLO DI CALCOLO

Le informazioni reperibili sulle SRF da energia sono molteplici; tuttavia, molte di esse sono generiche, non sempre risultano chiare e, talvolta, appaiono addirittura in contrasto tra loro e tali da rendere difficoltoso un giudizio obiettivo sulla coltura (ERICSSON *et al.* 2009, FIALA 2008, MANZONE *et al.* 2009, MATTHEWS 2001). Per poter valutare analiticamente le prestazioni sia economiche, sia energetiche, sia ambientali di tutte le filiere agro-energetiche diffuse nel nostro Paese (e, quindi, anche del pioppo da biomassa in rotazione biennale) nel Dipartimento di Ingegneria Agraria dell'Università degli Studi di Milano è

stato sviluppato un software specifico, denominato SEA - Sostenibilità Economico-energetica e Ambientale (FIALA e BACENETTI 2009a). In sintesi, per il calcolo dei risultati economici il modello SEA utilizza la metodologia dei Costi Fissi e Costi Variabili (FIALA e BACENETTI 2009a, LAZZARI e MAZZETTO 2005) mentre, per la valutazione energetica, fa riferimento al metodo GER (*Gross Energy Requirement*) (SLESSER e WALLECE 1982), che considera le sole fonti energetiche di origine fossile con la differenza tuttavia di computare tra gli input anche la manodopera (SARTORI *et al.* 2005). L'analisi della sostenibilità ambientale è condotta sulla base dei medesimi input di quella

Operazione	Macchine operatrici		Tipo Accoppiamento Dimensione (1)	Anno di impiego e n. passaggi (tra parentesi)	
				su SRF	su mais
Concimazione di fondo	Spandiletame	parco aziendale	TP, 10 t, 10 m <sup>3</sup>	1 (1)	da 1 a 10 (1)
Lavorazione primaria	Aratro versoio	parco aziendale	P, bivomere	1 (1)	da 1 a 10 (1)
Lavorazione secondaria	Erpice rotativo	parco aziendale	PP, 2,40 m	1 (1)	da 1 a 10 (1)
Trapianto talee	Trapiantatrice	impresa di servizi	T, bifila	1 (1)	-
Diserbo	Irroratrice	parco aziendale	PP, 15 m, 1.000 dm <sup>3</sup>	1-3-5-7-9 (1)	da 1 a 10 (1)
Controllo parassiti e patogeni	Irroratrice	parco aziendale	PP, 15 m, 1.000 dm <sup>3</sup>	1-3-5-7-9 (1)	da 1 a 10 (1)
Concimazione N	Spandiconcime centrifugo	parco aziendale	TP, 1.500 dm <sup>3</sup>	3-5-7-9 (1)	da 1 a 10 (1)
Diserbo meccanico	Erpice rotativo	parco aziendale	PP, 2,40 m	1-3-5-7-9 (1)	-
Raccolta (taglio e cippatura)	FTC + Testata specifica	impresa di servizi	Semovente	2-4-6-8-10 (1)	-
Trasporto allo stoccaggio aziendale (a 2 km)	3 Rimorchi	2 parco az. e 1 impresa di servizi	T, 22 m <sup>3</sup>	2-4-6-8-10 (1)	da 1 a 10 (1)
Ripristino finale terreno	Zappatrice	impresa di servizi	P, 1,2 m	10 (1)	-

(1) Accoppiamento: PP = portato con pdp; P = portato senza pdp; T = trainato; TP = trainato con pdp (AA.VV. 2009).

Tabella 1 - Meccanizzazione culturale: macchine operatrici e loro impiego.

Operazione	Unità di misura	Trattori	Operatrici
Capacità di lavoro	ha/h	-	Variabile in relazione alla MO
Potenza richiesta	kW	-	Variabile in relazione alla MO
Consumo materiali	kg/h	-	Variabile in relazione alla MO
Impiego annuo	h/anno	massimo 800	Variabile in relazione alla SAU e Capacità Operativa o della MO
Tipologia	-	Gommati, 2RM o 4RM in relazione all'operazione da svolgere	-
Potenza nominale	kW	Variabile in relazione alla MO accoppiata	-
Tipo accoppiamento	-	-	Variabile in relazione alla MO
Consumo specifico minimo gasolio	g/kWh	220	-
Carico motore con Cs minimo	%	85	-
Valore a nuovo	€	Variabile in relazione alla potenza	Variabile in relazione alla MO
Tasso di deprezzamento	%	12,5	Variabile in relazione alla MO
Tasso di interesse	%	4	4
Durata fisica	h	12.000	Variabile in relazione alla MO
Durata economica	anni	12	Variabile in relazione alla MO
Costo gasolio	€/kg	0,79	0,79 (1)
Costo lubrificante	€/kg	4,00	4,00 (1)
Numero addetti	-	1	Variabile in relazione alla MO
Costo orario addetti	€/h	15,00	12,50
Coeff. spese varie	%	1,5	Variabile in relazione alla MO
Coeff. manutenzione e riparazione	%	80	Variabile in relazione alla MO

MO: mano d'opera.

(1) solo per macchine operatrici semoventi.

Tabella 2 - Parametri tecnico-economici adottati per i mezzi meccanici.

energetica, valutati in funzione del loro Fattore Emissivo Specifico (LAI 2004) o, in suo difetto, sulla base di un Fattore Emissivo Unitario Medio (0,575 kg CO<sub>2</sub> equivalenti/kWh) (Assoelettrica 2007) che indica la quantità di gas a effetto serra (GHG) emessa per unità di energia consumata nel ciclo di produzione. Il modello SEA opera su scala aziendale ed esegue l'analisi ipotizzando la conversione di quote crescenti di SAU aziendale da colture alimentari a pioppo SRF; il parco macchine disponibile in azienda viene, dunque, impiegato su entrambe le tipologie colturali. In funzione delle caratteristiche specifiche dello scenario ipotizzato (SAU aziendale, coltivazioni praticate, tecnica colturale adottata, meccanizzazione delle operazioni di campo ecc.) vengono calcolati per unità di massa di cippato: costo di produzione e profitto (€/t<sub>ss</sub>), input e output energetici (MJ/t<sub>ss</sub>), GHG emessi e assorbiti (t CO<sub>2</sub> equivalenti/t<sub>ss</sub>).

## SRF BIENNALE

I risultati di seguito riportati si riferiscono a una tipica azienda irrigua della Pianura Padana. Tale azienda possiede una SAU complessiva di 80 ha e ha convertito 40 ha da mais da granella a pioppo SRF biennale, il cui cippato è a destinazione energetica (bio-combustibile).

Il sesto di impianto del pioppo è a fila singola, con densità di 5.560 piante/ha (distanza sulla fila 60 cm; interfila 3 m); la coltivazione prevede l'impiego di AF2, clone fra i migliori in termini di resa in biomassa. La durata complessiva del ciclo colturale è 10 anni. La tecnica colturale adottata per il pioppo biennale è quella definita nel disciplinare di

produzione recentemente pubblicato (AA.VV. 2009). Nel caso in studio la messa a dimora, eseguita da contoterzisti, avviene - a inizio primavera - tramite talee, su suolo precedentemente letamato (50 t/ha), arato e amminutato. La lotta alle infestanti prevede, negli anni successivi all'impianto e alla ceduzione, un intervento con erbicida e due passaggi con erpice. La fertilizzazione azotata di copertura si effettua con concimi minerali apportando 80 kg/ha di N dopo ogni taglio. Il controllo di patogeni e parassiti prevede un intervento nell'anno di messa a dimora e dopo ogni ceduzione (negli altri anni del ciclo colturale si ipotizza non venga superata la soglia di intervento). L'irrigazione è effettuata dopo la messa a dimora in maggio-giugno (400 m<sup>3</sup>/ha) e dopo ogni ceduzione. Le operazioni di raccolta sono eseguite a cantieri riuniti (taglio-cippatura dei polloni mediante FTC semovente dotata di apposita testata e trasporto all'accumulo aziendale, mediamente distanti 2 km dagli appezzamenti interessati alla SRF) da contoterzisti che attuano anche il ripristino del terreno a fine ciclo. La Tabella 1 riporta le operazioni impiegate nel corso del ciclo colturale, le loro principali caratteristiche e il tipo di accoppiamento, gli anni in cui è eseguita l'operazione nonché il numero di interventi effettuati per ciascun anno, sia sul pioppo SRF, sia sul mais che occupa la restante superficie aziendale. In Tabella 2 sono riportati i parametri tecnico-economici adottati per il calcolo dei costi di meccanizzazione, mentre in Tabella 3 sono indicate le dosi, i costi e gli equivalenti energetici dei fattori produttivi (diretti e indiretti) impiegati sul pioppo SRF; infine, la Tabella 4 riporta il Fattore Emissivo Specifico per il gasolio. Oltre ai

Fattore Produttivo	Dose		Valore economico		Valore energetico	
	Unità misura	Quantità	Unità misura	Prezzo	Unità misura	Contenuto Energetico
Materiale di impianto	talee/ha	5.560	€/talea	0,15	MJ/kg	37 <sup>(1)</sup>
Letame per concimazione di fondo	t/ha	50	€/t	2,25	MJ/t	100 <sup>(1)</sup>
Concimazione azotata in copertura	kg/ha/intervento	80	€/kg	0,3	MJ/kg	74 <sup>(1)</sup>
Erbicidi	kg/ha/intervento	5	€/kg	14	MJ/kg	201 <sup>(1)</sup>
Antiparassitari	kg/ha/intervento	2,5	€/kg	89	MJ/kg	603 <sup>(1)</sup>
Acqua	kg/ha/intervento	400	€/m <sup>3</sup>	0,05	MJ/m <sup>3</sup>	0 <sup>(1)</sup>
Gasolio	-	-	€/kg	0,79	MJ/kg	51,50 <sup>(1)</sup>
Lubrificante	-	-	€/kg	4,00	MJ/kg	83,70 <sup>(1)</sup>
Manodopera	-	-	€/h	15,00	MJ/h	2,30 <sup>(1)</sup>
Trattore	-	-	€	Variabile	MJ/kg	92 <sup>(2)</sup>
Macchine operatrici	-	-	€	Variabile	MJ/kg	89 <sup>(2)</sup>

(1) Input Diretti; (2) Input Indiretti (AA.VV. 2009, FIALA e BACENETTI 2009b, JARACH 1985, LAI 2004, SARTORI *et al.* 2005).

**Tabella 3** - Dosi, valori economici ed energetici dei fattori produttivi (diretti e indiretti) impiegati sul pioppo SRF.

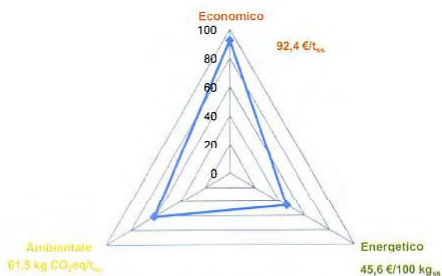
Gas	Fattori Emissivi (kg CO <sub>2</sub> /MJ)	GWP <sup>(1)</sup>
CO <sub>2</sub>	0,074	1
CH <sub>4</sub>	4·10 <sup>-6</sup>	21
N <sub>2</sub> O	2,8·10 <sup>-5</sup>	310

(1) Global Warming Potential (GWP): misura il contributo di un gas all'effetto serra ed è calcolato per uno specifico periodo di tempo. Questo indice è basato su una scala relativa che confronta il gas considerato con un'uguale massa di CO<sub>2</sub>, il cui GWP è, per definizione, pari a 1.

**Tabella 4** - Il Fattore Emissivo Specifico per il gasolio (3,6 kg di CO<sub>2</sub> eq/kg di gasolio) si calcola a partire dal suo Potere Calorifico Inferiore (42,7 MJ/kg), tenuto conto dei fattori emissivi dei singoli GHG e dei corrispondenti GWP.

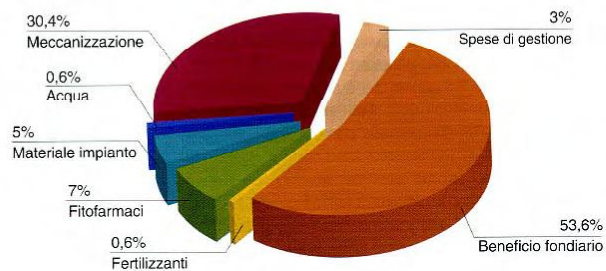
Fattore Produttivo	Quantità		Costo	
	talee/ha	€/ha	€/ha	€/ha
Materiale di impianto	5.560	835,00		
Letame per concimazione di fondo	50	125,00		
Concimazione azotata in copertura	320	96,00		
Erbicidi	20	280,00		
Antiparassitari	10	890,00		
Acqua	2.000	100,00		
Gasolio	311	300,00		
Lubrificante	2,6	10,00		
Manodopera	45	670,00		

**Tabella 5** - Input diretti impiegati nel corso dell'intero ciclo colturale del pioppo SRF: quantità e costi.

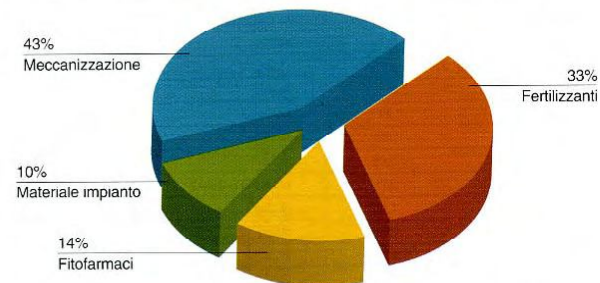


**Gráfico 1** - La sostenibilità complessiva è espressa dalla terna di risultati ottenuti dall'applicazione del modello SEA e riferiti alla sostanza secca del cippato. Quanto più l'area del triangolo identificato dai vertici "costo economico - costo ambientale - costo energetico" è ridotta, tanto maggiore risulta la sostenibilità complessiva della coltura.

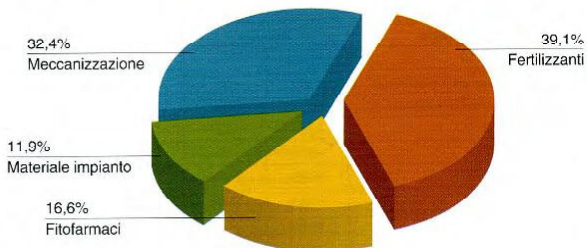
LEGENDA: costo economico (arancione), costo energetico (verde) e costo ambientale (azzurro) per unità massa di sostanza secca prodotta.



**Gráfico 2** - Incidenza delle diverse voci nella formazione del costo economico (produzione).



**Gráfico 3** - Incidenza delle diverse voci nella formazione del costo energetico (input diretti e indiretti).



**Gráfico 4** - Incidenza delle diverse voci nella formazione del costo ambientale (emissioni di GHG).

costi relativi all'acquisto dei fattori produttivi e alla meccanizzazione delle operazioni di campo, l'analisi considera un beneficio fondiario di 700 €/ha-anno (terreno irriguo) (INEA 2009) nonché spese generali di gestione dell'azienda, assunte pari a 50 €/ha-anno. Nei calcoli si considerano: una resa cippato tal quale di 35 t<sub>cc</sub>/ha-anno (U = 55%; PCI = 18,5 GJ/t<sub>ss</sub>; Carbonio nella biomassa = 50%) (CTI 2003), un prezzo di vendita di 30 €/t<sub>cc</sub> e, relativamente ai contributi economici, il disaccoppiato PAC (100 €/ha-anno) e il contributo per l'impianto previsto dal PSR 2007-2013 della Regione Lombardia (di 1.000 €/ha).

## RISULTATI

Dedicando al pioppo SRF 40 ha della SAU aziendale e continuando a coltivare mais da granella sul restante 50%, il costo di produzione del cippato raggiunge 1.460 €/ha-anno (corrispondenti a circa 93 €/t<sub>ss</sub>). Il ricavo complessivo, inteso come la somma della vendita del bio-combustibile sul mercato e dei contributi percepiti per la coltura raggiunge 1.550 €/ha-anno (circa 98 €/t<sub>ss</sub>): la possibilità di ottenere un reddito positivo è esclusivamente legata alla presenza di contributi. Solo con questi ultimi il rapporto ricavi/costi diventa leggermente superiore a 1, permettendo un guadagno assai limitato (86 €/ha-anno ovvero 5,5 €/t<sub>ss</sub>). In Tabella 5 sono riportate, per tutti i fattori di produzione a logorio totale, le quantità complessivamente impiegate nel corso dell'intero ciclo produttivo della SRF e la corrispondente spesa economica. L'input energetico raggiunge 7,2 GJ/ha (0,46 GJ/t<sub>ss</sub>) e l'output 242,8 GJ/ha; il saldo è positivo, pari a 236 GJ/ha (circa 15 GJ/t<sub>ss</sub>). Il bilancio energetico della fase di campo della filiera è dunque positivo e l'EROEI (*Energy Returned On Energy Invested*) è nettamente favorevole raggiungendo il valore di 34. Infine, per quanto riguarda l'emissione e l'assorbimento di GHG nel corso del ciclo colturale, le emissioni raggiungono 0,97 t CO<sub>2</sub>/ha-anno (61,5 kg CO<sub>2</sub> eq/t<sub>ss</sub>) a fronte di assorbimenti netti di 33,7 t CO<sub>2</sub> eq/ha-anno (2,14 t CO<sub>2</sub> eq/t<sub>ss</sub>). Limitatamente alla fase della filiera, quindi, il conteggio analitico della massa di GHG porta a un rapporto assorbimenti/emissioni di 36. Nel Gráfico 1 sono evidenziati il costo di produzione del bio-combustibile (€/t<sub>ss</sub>), l'input energetico (MJ/100kg<sub>ss</sub>) e le emissioni (kgCO<sub>2</sub> eq/t<sub>ss</sub>) correlate. I valori di queste tre grandezze, riportati su tre assi, costituiscono i vertici di un triangolo la cui superficie risulta tanto minore quanto maggiore è la sostenibilità della coltura, valutata complessivamente dall'insieme di tre indicatori. Nei Grafici 2, 3 e 4 è, invece, indicata l'incidenza delle diverse voci sui costi, rispettivamente, economico, energetico, ambientale. Per quanto riguarda il costo di produzione, il beneficio fondiario rappresenta la parte preponderante (53,6%), seguito dalle spese relative alla meccanizzazione delle operazioni di campo (30,4%). Relativamente invece agli input energetici e all'emissione di GHG, le voci prevalenti risultano: la meccanizzazione, responsabile del 43% della spesa energetica totale e del 32,4% dell'emissioni e l'apporto di concimi N (rispettivamente, 33% e 39,1%). Considerando il "peso" che il consumo di gasolio ha nella determinazione della spesa energetica e delle emissioni legate alla meccanizzazione agricola, appare del tutto evidente la grande importanza che assume un corretto accoppiamento trattore-macchina operatrice.



## CONCLUSIONI

A seguito della diffusa e drastica riduzione dei contributi previsti dai PSR, il pioppo SRF da biomassa in rotazione biennale garantisce **profitti assai modesti**. E' evidente che, in assenza di adeguate prestazioni economiche, i buoni risultati energetici e ambientali connessi alla fase di campo della filiera **non bastano a incentivare gli operatori agricoli verso tale coltura**. Relativamente alle prestazioni energetiche e ambientali qui esposte, occorre rimarcare che esse si riferiscono alla sola fase di campo della filiera, la piena valutazione della sostenibilità della filiera pioppo SRF-energia si potrà avere solo quando saranno contabilizzate - con approccio metodologico identico - anche le fasi successive (trasporto, stoccaggio, conversione energetica).

Tale necessario completamento comporterà, peraltro, il calcolo delle emissioni di CO<sub>2</sub> evitate a causa dell'impiego del bio-combustibile in sostituzione di combustibili fossili. Va, inoltre, evidenziato che, secondo le regole di contabilità dettate dal IPCC PK, tutte le biomasse utilizzate sono considerate come immediatamente ossidate; ciò comporta che, tenuto conto delle emissioni conseguenti alla gestione della piantagione, il ciclo di coltivazione risulta a bilancio negativo. Gli scarsi risultati economici ottenibili dalle SRF biennali risultano **sicuramente penalizzati dal basso prezzo di vendita del cippato**, principalmente causato dalla sua scarsa qualità in relazione agli standard richiesti dagli ormai numerosi impianti di combustione di piccola-media taglia. Difatti e non a caso, nel corso degli ultimi anni, **l'interesse si è via via spostato verso il pioppo da biomassa con turni di ceduzione più lunghi (Medium Rotation Forestry MRF, 5-6 anni)** che permette la produzione di bio-combustibile di qualità più elevata, soprattutto grazie alla migliore omogeneità e al minor contenuto in ceneri (elevato rapporto legno-corteccia).

Sebbene non siano ancora disponibili analisi dettagliate al riguardo, tale soluzione, beneficiando di una certa semplificazione della tecnica culturale e della possibilità di spuntare prezzi di vendita superiori a quelli attuali, sembrerebbe in grado di garantire un sensibile miglioramento dei risultati economici. Sulla base di ciò, parrebbe interessante l'applicazione del modello SEA anche a pioppo MRF (5 anni); applicazione che sarà oggetto di un prossimo contributo.

## Bibliografia

AA.VV., 2009 - **Disciplinare di produzione del pioppo e ciclo breve a turno biennale**. Biomasse Europa, 1-5 pp. [www.biomasseeuropa.com/files/0000/0051/Disciplinare\\_del\\_pioppo\\_biennale.pdf](http://www.biomasseeuropa.com/files/0000/0051/Disciplinare_del_pioppo_biennale.pdf)

ASSOELETTRICA, 2007 - **L'industria elettrica italiana tra presente e futuro**. Roma, 13/06/2007. [www.assoelettrica.it/relazioni\\_annuali\\_2007.html](http://www.assoelettrica.it/relazioni_annuali_2007.html)

COMITATO TERMOTECNICO ITALIANO, 2003 - **Biocombustibili: specifiche e classificazione**. R03/1, 53 pp.

ERICSSON K., ROSENQVIST H.K., NILSSON L.J., 2009 - **Energy crop production costs in the EU**. Biomass & Bioenergy, 33, 1577-1586.

FIALA M., 2008 - **Costo di produzione e profitto del pioppo da cippato**. Estimo e Territorio, 11, 21-26.

FIALA M., BACENETTI J., 2009a - **Filiere agro-energetiche a confronto: bilancio economico, energetico e ambientale**. Proceedings AIIA 2009 Ricerca e innovazione nell'ingegneria agraria dei biosistemi agro/territoriali, Ischia (NA), 11 pp. 12-16 Settembre 2009.

FIALA M., BACENETTI J., 2009b - **Production cost and profit of chipped wood from poplar short rotation**. Proceedings AGENG 2008, Hersonissos (Crete), 22-25. June 2009, 11 pp.

INEA, 2009 - **Il sistema Agricolo Italiano**. Supplemento a Agrisolo del 15/05/2009, 95 pp.

JARACH M., 1985 - **Sui valori di equivalenza per l'analisi e il bilancio energetici in agricoltura**. Rivista di ingegneria agraria, 2, 102-114.

LAI R., 2004 - **Carbon emission from farm operations**. Environment International 30, 981-990.

LAZZARI M., MAZZETTO F., 2005 - **Prontuario di Meccanica Agraria e Meccanizzazione**. Reda.

MANZONE M., AIROLDI G., BALSARI P., 2009 - **Energetic and economic evaluation of a poplar cultivation for the biomass production in Italy**. Biomass & Bioenergy, 33, 1258-1264.

MATTHEWS R., 2001 - **Modelling of energy and carbon budgets of wood fuel coppice systems**. Biomass & Bioenergy, 21, 1-19.

SARTORI L., BASSO B., BERTOCCO M., OLMIERO G., 2005 - **Energy Use and Economic Evaluation of a Three Year Crop Rotation for Conservation and Organic Farming in NE Italy**. Biosystem Engineering, 91 (2), 245-256.

SLESSER M., WALLACE I., 1982 - **Energy consumption per tonne of competing agricultural products available to the EC (Commission of the European Communities, ed.)**. Information on Agriculture, 85, 168.

## INFO. ARTICOLO

**Autori:** Marco Fiala, Professore Associato, Docente di "Energetica per l'Agricoltura", Facoltà Agraria, Università degli Studi di Milano. E-mail [marco.fiala@unimi.it](mailto:marco.fiala@unimi.it)

**Jacopo Bacenetti**, Dottorando in "Innovazione Tecnologica per le Scienze Agro-alimentari ed Ambientali" presso la Scuola di Dottorato dell'Università degli Studi di Milano. E-mail [jacopo.bacenetti@unimi.it](mailto:jacopo.bacenetti@unimi.it)

**Parole chiave:** Legno-energia, Short Rotation Forestry (SRF), pioppo, Energy Crops, bilancio economico-energetico-ambientale, sostenibilità complessiva.

**Abstract:** *Poplar clones for biomass with a biennial rotation. A research about its sustainability. Short Rotation Forestry (SRF) takes up about 7,000 hectares, mainly in Lombardy and Veneto Regions; over the years the development of specific poplar clones for biomass and the improvement of cultivation technique have made it possible to obtain remarkable increases in yield. Nevertheless, in bibliography the information concerning this crop is not always clear and agreed. On the basis of the cultivation technique carried out in Northern Italy, an Economic, Energetic and Environmental (EEE) evaluation of the poplar SRF field-chain phase has been carried out. In the case study (a poplar plantation growth in Po Valley area), the model runs using the following main parameters: duration 10 years; cutting time 2-years; biomass yield 35 tDM/ha-year (at 55% of moisture content w.b.). Besides the positive energy and environmental balances, the economical sustainability of SRF, with a gain of only 96 €/ha-year, appears far from farmer's interest.*



# Meccanizzazione forestale in un cantiere svedese

[ DI JACOPO BACENETTI E MARCO FIALA\* ]

Con la Direttiva 2009/28/Ce l'Unione europea ha previsto la riduzione, entro il 2020, del 20% delle emissioni di gas a effetto serra, un incremento del 20% dell'efficienza energetica e il raggiungimento del 20% di energia prodotta da fonti rinnovabili. Quest'ultimo obiettivo, ancora molto lontano per l'Italia, è già una realtà presso Paesi partner, tra i quali la Svezia, nazione la cui bolletta energetica (50,6 Mtep, per il 2007) dipende assai poco (35%) dai combustibili fossili e vede un forte contributo delle fonti energetiche rinnovabili, biomasse in particolare. In figura 1 è riportata, per la Svezia e l'Italia (183,5 Mtep, nel 2007), la ripartizione tra le diverse fonti di approvvigionamento. In Svezia, l'energia elettrica è quasi esclusivamente generata in impianti nucleari mentre le biomasse si impiegano soprattutto per generare calore; negli ultimi 30 anni, la produzione di materiale legnoso a destinazione energetica è più che raddoppiata, da 47 TWh a 100 TWh.

## [ LO STATO DELLA SELVICOLTURA

Sebbene la Svezia sia il Paese europeo con la maggiore superficie destinata a Short rotation forestry (circa 15.000 ha a salice), il contributo predominante nella produzione di biocombustibili è fornito da biomassa forestale.

Con una superficie complessiva di 45 milioni di ha (una volta e mezza l'Italia) 28 dei quali classificati come foreste (80% produttive), la Svezia si presenta tra i Paesi europei con la maggiore incidenza (62%) di boschi. Circa metà delle foreste svedesi è di proprietà privata

Prove di taglio ed esbosco con l'impiego di harvester e forwarder

mentre la restante parte è posseduta da grandi società operanti nel settore forestale (25%) e dallo Stato (25%); i piccoli proprietari sono prevalenti nel sud del Paese mentre nel nord dominano le società forestali.

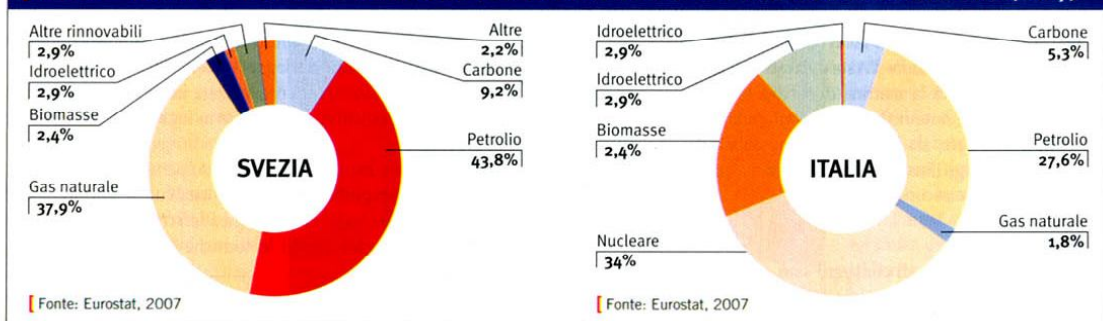
La favorevole orografia del territorio permette il pieno sfruttamento di questa enorme risorsa, rendendo la selvicoltura un importante tassello dell'economia nazionale; sebbene il settore abbia sempre rivestito un ruolo fondamentale, la selvicoltura svedese ha mostrato un forte incremento a partire dal 1920, soprattutto nel centro-sud del Paese, con la piantumazione di migliaia di ettari di terreni abbandonati.

Il volume forestale complessivo in piedi è stimato in 3 miliardi di m<sup>3</sup>; le conifere predominano con circa l'80%, fornito dall'abete rosso (*Picea abies* L.) e dal pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.), rispettivamente con 1.230 e 1.140 milioni di m<sup>3</sup>. Tra le specie decidue la betulla (*Betula* sp.) è la più diffusa con 360 milioni di m<sup>3</sup>.

La durata delle rotazioni per i boschi di conifere è variabile, al sud, tra 60 e 100 anni, al nord, tra 80 e 130 anni. Le principali cause di queste differenze sono da attribuire alle condizioni climatiche e alla fertilità del suolo che peggiorano all'aumentare della latitudine; nella Svezia meridionale, le rotazioni sono più brevi in quanto si ottengono incrementi dell'ordine di 8-9 m<sup>3</sup>/ha all'anno, cioè 2-3 volte maggiori di quelli riscontrabili al nord. Considerando un incremento medio nazionale di 5,3 m<sup>3</sup>/ha all'anno, la crescita volumetrica di biomassa legnosa è stimata in 121 milioni di m<sup>3</sup>/anno.

Secondo i dati dell'Agenzia svedese delle Foreste, nel 2008, sono

[ FIG. 1 - FONTI ENERGETICHE IMPIEGATE PER LA COPERTURA DEI FABBISOGNI DI ENERGIA (2007)



[ 1 - Operazione di **ripuntatura** che viene attuata per favorire la rinnovazione naturale del bosco.

[ 2 - Taglio di maturità di una fustaia mista (abete rosso, pino silvestre) nello Svealand. Sotto le piante portaseme resta un'abbondante volume di biomassa che può essere avviato alla filiera legno-energia.



stati raccolti 69 milioni di m<sup>3</sup> di legname (corteccia esclusa). Di questo, 32,6 milioni (47,2%) sono stati utilizzati come legname da opera, 30 milioni (43,5%) per produrre pasta di legno, 5,9 milioni (8,5%) come legna da ardere e 0,5 milioni (0,7%) come altri assortimenti. Le principali operazioni che si attuano nel corso del ciclo forestale sono:

- la pulizia del bosco e l'eventuale rinnovazione artificiale;
- i tagli intercalari (sfolliti, ripuliture e diradamenti);
- il taglio di maturità.

La rinnovazione può essere naturale o artificiale; la decisione su quale soluzione adottare avviene 1-3 anni dopo il taglio di maturità. Nel caso di rinnovazione naturale l'unica operazione meccanica che viene effettuata è la ripuntatura del terreno (foto 1); questa tecnica tuttavia, seppur meno dispendiosa rispetto alla rinnovazione artificiale, allunga il periodo di rotazione.

Nel corso degli anni, prima del taglio finale vengono eseguiti 2-3 interventi di diradamento, a seconda delle condizioni di crescita; il diradamento, oltre a migliorare la qualità finale del legname, può consentire di ottenere modesti ricavi economici anche prima del taglio di maturità.

L'abbattimento delle piante mature avviene con il taglio di maturità al termine della rotazione, generalmente non tutte le piante vengono abbattute: per favorire la rinnovazione naturale vengono lasciate alcune piante portaseme in numero variabile tra 50 e 100 piante/ha, in funzione delle condizioni pedo-climatiche e della specie (foto 2). Le piante portaseme verranno successivamente abbattute, 10-25 anni dopo il taglio di maturità, a rinnovazione avvenuta e con soprassuolo ormai affrancato.

Dopo i diradamenti, ma anche dopo il taglio di maturità, si rende disponibile in foresta una grande quantità di biomassa residuale (cimali, rami, piccole piante, ceppaie, che complessivamente rappresentano il 25-30% della biomassa legnosa totale) che non è valorizzabile come legname da opera ma può essere agevolmente destinata alla trasformazione energetica anche in considerazione del fatto che per l'esbosco pos-

sono essere efficacemente utilizzate le stesse operatrici impiegate per l'esbosco.

L'interesse per i residui forestali, già alto negli anni '70 durante la crisi energetica, è notevolmente cresciuto negli ultimi tempi, causa l'aumento del prezzo del petrolio e il varo da parte del Governo svedese di apposite misure atte alla sua valorizzazione. Ne deriva che sempre più cospicua risulta la frazione di biomassa forestale destinata alla filiera legno-energia, a tutto beneficio della bolletta energetica nazionale.

Con riferimento alla tabella 1, nel 2008 a fronte di una disponibilità di circa 15,5 Mt<sub>se</sub>/anno di biomassa residuale (energeticamente equivalenti a 89,4 TWh), il materiale effettivamente recuperato dalle foreste svedesi è stato notevolmente inferiore (1,21 Mt<sub>se</sub>/anno, equivalenti a 7 TWh).

Uno dei motivi di tale differenza risiede nel fatto che, causa la scarsa qualità del materiale ottenibile, la raccolta delle ceppaie è attuata solo in poche foreste (foto 3a e 3b).

#### [ MACCHINE ABBATTITRICI PER LA RACCOLTA

Nonostante la differenza fra foreste del nord e del sud della Svezia, la meccanizzazione delle operazioni in esse eseguite nel corso degli anni non presentano sostanziali differenze, fatta eccezione che al meridione è più frequente il ricorso a imprese agro-meccaniche o a forme di associazionismo. I diradamenti e il taglio finale delle piante prevedono l'impiego delle medesime operatrici (foto 4); si tratta di macchine abbattitrici (*harvester*) che, oltre al taglio basale delle piante, eseguono la sramatura e il sezionamento del fusto.

La successiva raccolta dei tronchi avviene a opera di una *forwarder* che solleva i fusti e li accumula a bordo foresta dove verranno poi caricati su autocarri gommati per essere portati al luogo di utilizzazione.

Rami e cimali possono venir raccolti anch'essi mediante un *forwarder* che li accumula a bordo strada dove in 8-9 mesi essiccano parzialmente e vengono cippati; in alternativa, sono immediatamente trasportati tali quali alla centrale dove vengono cippati

[ TAB. 1 - DISPONIBILITÀ POTENZIALE DI BIOMASSA RESIDUALE NELLE FORESTE SVEDESI

BIOMASSA RESIDUALE	MASSA [10 <sup>6</sup> T <sub>SS</sub> /ANNO]	EQUIVALENTE ENERGETICO [TWH]
Cimali e rami da taglio finale	7,62 (49,1%)	44,1 (51,4%)
Cimali e rami da diradamenti	2,26 (14,6%)	12,4 (14,5%)
Piante intere da primo diradamento	2,14 (13,8%)	9,30 (10,8%)
Ceppaie	3,50 (22,5%)	19,9 (23,3%)
TOTALE	15,52 (100%)	85,7 (100%)



3a e 3b - Raccolta delle ceppaie mediante apposita pinza estirpatrice.

poco prima della trasformazione in energia. In entrambi i casi la sminuzzatura avviene a opera di cippatrici a tamburo di grande potenza e produttività.

La capacità operativa del cantiere dipende dalle condizioni di lavoro, dal tipo di operazione (diradamento o taglio di maturità), dalla composizione e dalla produttività della foresta. Per meglio comprendere l'organizzazione delle operazioni di abbattimento ed esbosco attuate nelle fustaie di conifere dello Svealand (Svezia centro-meridionale), nel corso del mese di maggio è stato monitorato un cantiere tipico di abbattimento-esbosco formato da un *harvester* e da un *forwarder* operante su una parcella forestale di circa 3 ettari. La distanza media percorsa dal *forwarder* per ogni carico è stata di circa 300 metri. Nel caso specifico, in terreno pianeggiante con una provvigione stimata di 290 m<sup>3</sup>/ha e tempi di lavoro di 8-9 h/giorno, il cantiere ha mostrato una capacità operativa di circa 1 ha/giorno.

L'*harvester* (foto 4 e tabella 2), che esegue l'abbattimento e l'allestimento delle piante, è costituito da una motrice dotata di 2 ruote e da un telaio gommato su cui è montata la testata abbattitrice; il suo costo varia fortemente a seconda della testata accoppiata e indicativamente è di 500.000 €. Operativamente, la testata abbattitrice (foto 5) afferra la

pianta alla base per mezzo di una robusta pinza metallica e la taglia mediante una sega a catena. Immediatamente dopo il taglio e

4 - Harvester in azione in una fustaia matura in cui predominano le conifere.

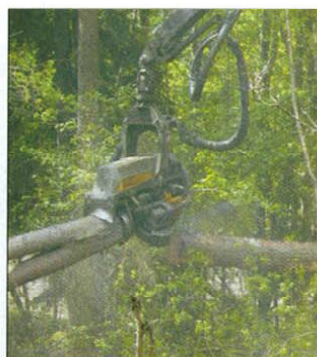


senza aver rilasciato la pianta, la testata - grazie alla presenza di 3 rulli cingolati - fa scorrere il fusto a cavallo dei due bracci metallici della pinza che, essendo dotati di coltelli, procedono alla sramatura. Il sezionamento del fusto è attuato tramite la medesima sega a catena con cui avviene l'abbattimento.

La macchina è dotata di un sistema automatico per la selezione dei fusti che opera in funzione della specie, del diametro e della conformazione del tronco; il compito dell'operatore è limitato all'inserimento e al controllo dei parametri richiesti, oltre che ovviamente all'abbattimento. Il collegamento in tempo reale con i database dell'Agenzia forestale svedese (Skogsstyrelsen) permettono all'operatore di conoscere con esattezza quali aree della foresta non possono essere sfruttate in quanto sottoposte a vincoli ambientali e, contestualmente, consentono la raccolta di informazioni sul legno prodotto. Tali dati, controllando la qualità e la quantità del materiale, permettono di eseguire previsioni sul prezzo di riferimento dei diversi legnami valido sia per i rivenditori, sia per le industrie di trasformazione.

TAB. 2 - CARATTERISTICHE TECNICHE DEL FORWARDER IMPIEGATO

CARATTERISTICA	VALORE
Massa (kg)	16.600
Lunghezza x Larghezza (m)	10,55 X 2,99
Operatori (n°)	1
Lunghezza pianale (m)	6,1
Superficie pianale (m <sup>2</sup> )	5,4
Capacità di carico (kg)	14.000
Volume di carico (m <sup>3</sup> )	15-20
Potenza motore (kW)	205
Capacità serbatoio (l)	200
Lunghezza braccio (m)	9
Momento di sollevamento (kNm)	106
Angolo di rotazione (°)	360



5 – Testata abbattitrice, da sinistra verso destra: fase di posizionamento; particolare della sega a catena basale; fase di sramatura; fase di sezionamento del tronco.

Il *forwarder* (foto 6 e tabella 3) è costituito da due parti tra loro connesse: la motrice con 4 ruote e il pianale di carico anch'esso dotato di 4 ruote; il costo di acquisto della macchina è variabile a seconda delle specifiche dotazioni (indicativamente è di 300.000 €).

La raccolta dei tronchi sramati avviene grazie all'ausilio di un apposito braccio, azionato idraulicamente e lungo 9 m, che è in grado di compiere una rotazione di 360°. Il volume trasportato con ogni carico dipende dalla tipologia di materiale raccolto e dal suo diame-

tro; generalmente varia tra 10 e 20 m<sup>3</sup>, i valori più bassi si ottengono nel caso di diradamenti o per la raccolta dei residui mentre quelli più alti nel caso del taglio finale.

Nel caso osservato sono stati effettuati 10-12 carichi al giorno corrispondenti, considerando un volume di carico di 15-20 m<sup>3</sup>/carico, a circa 150-240 m<sup>3</sup>/giorno (17-28 m<sup>3</sup>/h).

Causa gli elevati investimenti correlati all'acquisto dell'*harvester* e del *forwarder*, la possibilità di ridurre il costo di taglio ed esbosco del



## IMPIANTI DI BIOGAS



**BTS**

part of  
TSenergyGROUP

**BIO** *accelerator*<sup>2</sup>

GLI IMPIANTI DI BIOGAS DI B.T.S. HANNO IL PIÙ ALTO RENDIMENTO BIOLOGICO SUL MERCATO (>80%).

	KTBL	$\eta$ [ETA] max	Differenza
$\eta$ - BIO (in %)	61	82,5	+35
Input (t/a silomais)	19.500	14.500	-5.000

CON L'IMPIANTO B.T.S. SI RISPARMIANO CA. 5.000 T/A DI SILOMAIS.



B.T.S. Italia Srl

Via S. Lorenzo 34, I-39031 Brunico (BZ)  
T +39 0474 37 01 19 - F +39 0474 55 28 36

Sede Operativa e Laboratorio

Via Bachelet 21  
I-46047 Porto Mantovano (MN)



**BTS**  
part of  
TSenergyGROUP

www.ts-energygroup.com



**[ 6 – Forwarder in fase di raccolta del materiale allestito dall'harvester.**

impiego su superfici elevate.

Relativamente al primo aspetto occorre sottolineare che, causa i non trascurabili costi di trasferimento del cantiere la maggior parte delle imprese agro-meccaniche non accetta commesse con volumi inferiori ai 500 m<sup>3</sup> di legname raccolto.

La figura 2 riporta, per il cantiere descritto, il costo unitario (€/m<sup>3</sup>) e il costo energetico (MJ/m<sup>3</sup>) in funzione della superficie dominata (ha) in due diverse condizioni operative. Considerando che nei mesi autunnali e in quelli primaverili le condizioni climatiche, soprattutto a causa della presenza di acqua sul terreno, possono rendere difficoltoso l'accesso in foresta al limite massimo d'impiego delle operatrici è stata dell'ordine di 450 ha/anno.

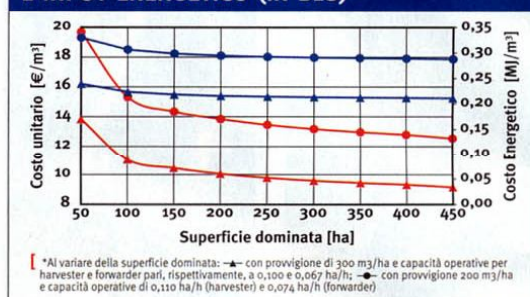
Nel primo caso la provvigione è di 300 m<sup>3</sup>/ha e le capacità di lavoro (Co) dell'harvester e del forwarder sono, rispettivamente, pari a 0,100 e 0,067 ha/h; nel secondo caso si hanno: provvigione minore (200 m<sup>3</sup>/ha) e capacità operative maggiori (rispettivamente, di 0,110 e 0,074 ha/h).

Causa la più elevata capacità di lavoro che le macchine riescono a raggiungere nelle foreste meno produttive, esprimendo il costo unitario per unità di superficie forestale (€/ha), gli oneri minori si registrano nelle fustaie con la provvigione minore (da 3.950 a 2.500 €/ha, passando da 50 a 450 ha/anno di superficie dominata) rispetto a quelle con 300 m<sup>3</sup>/ha di resa (da 4.150 a 2.750 €/ha).

Riferendo il costo al volume di legno lavorato, nel medesimo range di superficie dominata, il costo unitario diminuisce del 34-36%, più precisamente da 13,8 a

materiale è vincolata, oltre che dal contenimento delle distanze tra l'area da lavorare e il luogo di ricovero delle macchine, al loro

**[ FIG. 2 – COSTO UNITARIO (IN ROSSO) E INPUT ENERGETICO (IN BLU)\***



\*Al variare della superficie dominata: ▲ con provvigione di 300 m<sup>3</sup>/ha e capacità operative per harvester e forwarder pari, rispettivamente, a 0,100 e 0,067 ha/h; ● con provvigione 200 m<sup>3</sup>/ha e capacità operative di 0,110 ha/h (harvester) e 0,074 ha/h (forwarder)

9,1 €/m<sup>3</sup> con alte provvigioni e da 19,6 a 12,5 €/m<sup>3</sup> con basse provvigioni.

**[ IN ITALIA LE CONDIZIONI OPERATIVE SONO PENALIZZANTI**

Nel corso dell'ultimo secolo, in Svezia, un'attenta politica di sfruttamento e di conversione dei suoli abbandonati ha incrementato la produzione di legname da foresta. Tali scelte strategiche, unite alla favorevole orografia caratterizzata da suoli pianeggianti o poco declivi e a un'eccellente organizzazione del lavoro, hanno permesso alla selvicoltura svedese di diventare un settore trainante dell'economia svedese soprattutto in aree scarsamente popolate e poco industrializzate come quelle del Nord. L'assenza di particolari vincoli idro-geologici ha, inoltre, favorito lo sfruttamento attraverso il taglio raso (con o senza rilascio di piante portaseme) e ha portato allo sviluppo di macchine operatrici efficienti e in grado di garantire elevate produttività del lavoro. Anche nelle aree del Paese caratterizzate da una forte frammentazione della proprietà forestale il ricorso a forme di associazionismo o a imprese agro-meccaniche permette l'efficace meccanizzazione delle operazioni.

In tale contesto i costi di abbattimento ed esbosco del legname sono inferiori rispetto a quelli riscontrabili nella gran parte degli ambienti italiani, in cui le condizioni operative (pendenze, provvigioni, viabilità forestale ecc.) sono penalizzanti e tali da impedire l'utilizzo dei sistemi sopra descritti.

Sebbene attualmente meno del 10% della biomassa residua venga raccolta e utilizzata, è interessante sottolineare che, soprattutto per quanto riguarda rami e cimiali, il cantiere indicato costituisce il segmento iniziale anche della filiera energetica la cui attuazione non richiede alcuna variazione specifica.

\* Gli autori sono dell'Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Ingegneria Agraria

**[ TAB. 3 – CARATTERISTICHE TECNICHE DELL'HARVESTER DOTATO DI TESTATA ABBATTITRICE**

CARATTERISTICA	VALORE
Massa (kg)	24.000
Lunghezza x larghezza (m)	8,80 x 2,99
Operatori (m)	1
Potenza motore (kW)	240
Capacità serbatoio (l)	400
Lunghezza braccio (m)	11
Angolo di rotazione (°)	280
Portata idraulica (l/min)	300
Massa testata (kg)	1.300
Potenza richiesta testata (kW)	130
Lunghezza sega (mm)	750
Potenza richiesta dalla sega (kW)	45
Velocità rotazione sega (m/s)	40
Rulli di alimentazione (n°)	3

# Colza, la sostenibilità comincia dal campo

[ DI MARCO FIALA\* E JACOPO BACENETTI\*\* ]

Il ricorso a fonti energetiche rinnovabili può mitigare – a breve termine – gli effetti negativi legati all'uso massiccio di combustibili di origine fossile e, se correttamente indirizzato e gestito, induce interessanti ripercussioni anche per il settore agricolo.

Tra le diverse filiere oggi prospettate, quelle dei bio-carburanti – in particolare quella dell'olio vegetale puro e del biodiesel – sembrano essere quelle più facilmente adottabili in quanto connesse al sostanziale mantenimento dell'organizzazione aziendale.

La Direttiva Europea 2003/30/Ce stabilisce che i bio-carburanti entro il 2010 dovranno sostituire il 5,75% dei carburanti fossili (benzina e gasolio) consumati dal settore dei trasporti nel 2009; come noto, inoltre, la nel Libro Verde la Ue ha individuato come obiettivo di lungo termine (entro il 2020) il raggiungimento di una quota di sostituzione pari al 10%. Recentemente, poi, sono state definite le sanzioni amministrative per il mancato raggiungimento dell'obbligo di immissione nei consumi di una quota minima di bio-carburanti (Decreto numero 100, ministero dello Sviluppo economico del 23/4/2008).

In Italia, le colture interessanti per la produzione di olio puro (e, da esso, il biodiesel) sono il girasole, la soia e il colza. Quest'ultimo, più delle altre la cui destinazione prevalente è il settore alimentare, viene coltivata soprattutto per impieghi energetici; nel 2009 la superficie a colza è stata di 23.200 ha (localizzata principalmente in Friuli-Venezia Giulia 27%, Lombardia 20% e Lazio 18%), in forte crescita rispetto alle annate precedenti. La resa media nazionale è stata di circa 2,1 t/ha (2,63 t/ha nel 2008), registrandosi tuttavia cospicue differenze nelle diverse Regioni (Veneto: 3,3 t/ha; Emilia-Romagna 3,2 t/ha), con punte di 4,0-4,5 t/ha in aree particolarmente vocate.

L'interesse verso questa crucifera è andato via via crescendo sia per l'aumento della produzione di biodiesel nella Ue (so-

Prevalgono  
i vantaggi ambientali  
ed energetici  
piuttosto che  
quelli economici,  
più condizionati  
dalla trasformazione

prattutto in Germania e Austria), sia per i sempre più ridotti margini economici connessi alle tradizionali colture alimentari.

Fra le ragioni del crescente successo, non va peraltro trascurato che il colza permette la razionalizzazione della rotazione sulle aree a vocazione cerealicola e che, in un contesto produttivo in cui il costo dei mezzi tecnici è costantemente in crescita, si presenta come coltura a livelli di input contenuti. L'ottenimento di risultati economici soddisfacenti è evidentemente legato alla resa e al prezzo

di vendita del seme ma anche la tecnica culturale adottata gioca un ruolo importante. Peraltro, analogamente a tutte le altre filiere agro-energetiche, diventa fondamentale valutare – oltre alla sostenibilità economica – anche quella energetica e quella ambientale, componendo così un giudizio sulla "sostenibilità complessiva" della coltura articolato sui tre aspetti.

## IL MODELLO DI CALCOLO ADOTTATO

Per valutare analiticamente le prestazioni economiche, energetiche e ambientali del colza in Pianura Padana è stato utilizzato il software SEA sviluppato dal Dipartimento di Ingegneria Agraria dell'Università degli Studi di Milano per definire la sostenibilità complessiva delle filiere agro-energetiche attuate in Italia.

Per il calcolo dei risultati economici tale modello utilizza la metodologia dei costi fissi e dei costi variabili mentre, per la valutazione energetica, fa riferimento alla metodica Ger (*gross energy requirement*

– che considera solo le fonti energetiche di origine fossile) computando, peraltro, tra gli input anche la manodopera.

L'analisi della sostenibilità ambientale è condotta sulla base dei medesimi input di quella energetica valutati in funzione del loro Fattore Emissivo Specifico o, causa la sua frequente assenza, sulla base di un Fattore emissivo unitario medio (0,575 kg CO<sub>2</sub> equivalenti/kWh, secondo Assoelettrica) che indica la quantità di gas a effetto serra





(Ghg) emessa per unità di energia consumata nel ciclo di produzione.

SEA opera su scala aziendale ed esegue l'analisi ipotizzando la conversione di una quota della Sau da colture alimentari a coltura energetica; conseguentemente, il parco macchine aziendale trova impiego su entrambe le superfici che caratterizzano l'azienda.

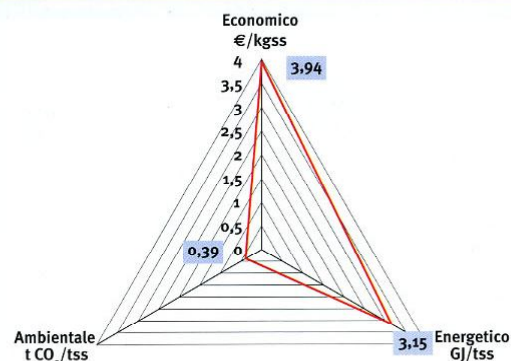
In funzione delle caratteristiche specifiche dello scenario ipotizzato (Sau aziendale, coltivazioni praticate, tecniche colturali adottate e meccanizzazione delle operazioni di campo) vengono calcolati: costo di produzione e redditività economica ( $\text{€}/t_{ss}$ ), input e output energetici ( $\text{MJ}/t_{ss}$ ) nonché quantità di gas a effetto serra emessa e assorbita per unità di prodotto ( $t\text{CO}_2/t_{ss}$ ).

#### [ L'ESEMPIO CONSIDERATO ]

In questo articolo vengono riportati i risultati ottenuti in un'azienda di pianura che, già da alcuni anni, ha inserito il colza nella rotazione colturale, ottenendo rese produttive di tutto rispetto. L'azienda, localizzata a Vignate (Mi), possiede una Sau complessiva di 600 ha; oltre al colza coltivato ogni anno su circa 100 ha, la rotazione prevede frumento, mais e soia.

La tecnica colturale adottata per il colza prevede - dopo la raccolta del frumento - la distribuzione a opera di un contoterzista di fanghi di depurazione ( $6,5 t/ha$ ), la lavorazione principale, eseguita con aratro a dischi (profondità di lavoro 25 cm), la fertilizzazione ( $120 \text{ kg}/ha$  di binario 18-46), il diserbo ( $2 \text{ kg}/ha$ ) e l'aminutamento del terreno con un passaggio con erpice a denti elastici. Alla semina, eseguita a inizio settembre con seminatrice meccanica utilizzando  $5 \text{ kg}/ha$  di semente ibrida (profondità: 2 cm; interfila: 20 cm; densità:  $110-120 \text{ semi}/m^2$ ), segue una rullatura. La concimazione di copertura prevede due interventi: il primo, a fine inverno, con solfato ammonico ( $50 \text{ kg}/ha$ ) e il secondo, a

#### [ FIG. 1 - LA SOSTENIBILITÀ COMPLESSIVA\* ]



\*Nota: la sostenibilità complessiva è espressa dalla tema di risultati ottenuti dall'applicazione del modello SEA. In pratica, quanto più l'area del "triangolo" identificato dai vertici "costi economico-costo ambientale-costo energetico" è ridotta, tanto più la sostenibilità complessiva della coltura è elevata.

inizio levata, con urea ( $140 \text{ kg}/ha$ ) in concomitanza con un secondo trattamento in post-emergenza di diserbo ( $2 \text{ kg}/ha$ ). La raccolta è eseguita con mietitrebbiatrice quando l'umidità dei semi è tra l'11 e il 14%, cercando il miglior compromesso tra essiccazione e contenimento della perdita di prodotto a seguito dell'apertura delle silique.

La tabella 1 riporta le operatrici impiegate nel corso del ciclo colturale, le loro principali caratteristiche e il tipo di accoppiamento, il numero di interventi eseguiti sul colza e sulle restanti colture.

Nella tabella 2 sono riportati i parametri tecnico-economici impiegati per il calcolo dei costi di meccanizzazione, mentre nella tabella 3 sono indicate le dosi, i costi e gli equivalenti energetici dei fattori produttivi (diretti e indiretti) impiegati sul colza.

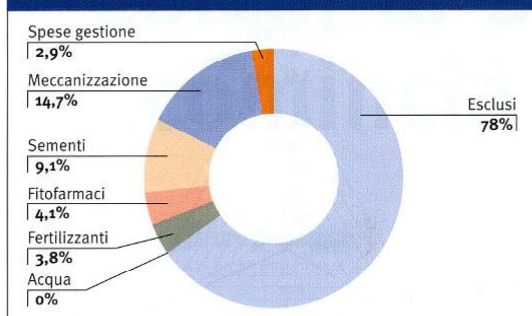
Oltre ai costi relativi all'acquisto dei fattori produttivi e alla meccanizzazione delle operazioni di campo l'analisi considera un beneficio fondiario pari - secondo l'Inea - al 3% del valore del

#### [ TAB. 1 - MACCHINE OPERATRICI E IMPIEGO NELLA MECCANIZZAZIONE COLTURALE ]

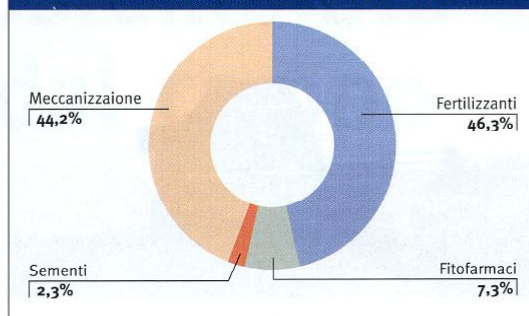
OPERAZIONE	MACCHINE OPERATRICI <sup>1</sup>	TIPO ACCOPP., DIMENSIONE (*)	PASSAGGI	
			SU COLZA	SU ALTRA SAU
Concimazione di fondo	Spandiliquame	T, 10 m <sup>3</sup>	1	0
Lavorazione 1 <sup>aria</sup>	Aratro a dischi	T, 4,5 m	1	1
Diserbo pre-emergenza	Irroratrice	TP, 24 m	1	1
Lavorazione 2 <sup>aria</sup>	Erpice a denti elastici	PP, 6 m	1	1
Semina	Seminatrice	T, 4 m	1	1
Rullatura	Rullo	T, 7 m	1	0
Diserbo post-emergenza	Irroratrice	TP, 24 m	1	1
Concimazione N	Spandiconcime centrifugo	TP, 2500 dm <sup>3</sup>	2	1
Raccolta	Mietitrebbiatrice	Semovente	1	1
Trasporto allo stoccaggio (5 km)	3 rimorchi	T, 22 m <sup>3</sup>	1	1

Note: <sup>1</sup> lo spandiliquame è di proprietà di un'impresa di servizi, tutti gli altri appartengono al parco macchine aziendale; Accoppiamento: (\*) PP = portato con pdp; P = portato senza pdp; T = trainato; TP = trainato con pdp

**FIG. 2 – INCIDENZA DELLE DIVERSE VOCI NELLA DETERMINAZIONE DEL COSTO DI PRODUZIONE**



**FIG. 3 – INCIDENZA DELLE DIVERSE VOCI NELLA DETERMINAZIONE DEL COSTO ENERGETICO**



terreno e spese generali di gestione aziendale per 40 €/ha.

L'intera produzione (resa: 4,0 t/ha; U: 12%; PCI: 26,1 GJ/t<sub>ss</sub>; C nella biomassa: 63%) è trasportato in un centro di stoccaggio mediamente distante 5 km dagli appezzamenti ed è venduta – con riferimento ai mercati internazionali (Marché à Terme International de France) – al prezzo di 282 €/t.

Oltre alla vendita dei semi, la coltura beneficia del disaccoppiato Pac (400 €/ha) e, beneficiava fino al 2009, del contributo per le colture energetiche (45 €/ha).

**TAB. 2 – PARAMETRI TECNICO-ECONOMICI ADOTTATI NELL'ANALISI**

OPERAZIONE	TRATTORI	OPERATICI
Capacità di lavoro (ha/h)	-	Var. MO
Potenza richiesta (kW)	-	Var. MO
Consumo materiali (kg/h)	-	Var. MO
Tipologia	2RM, 4RM	-
Potenza nominale (kW)	Var. MO	-
Tipo accoppiamento	-	Var. MO
Consumo specifico minimo (g/kWh)	220	-
Carico motore con Cs minimo (%)	85	-
Valore a nuovo (€)	Var. P.	Var. MO
Tasso di deprezzamento (%)	12,5	Var. MO
Tasso di interesse (%)	4	4
Durata fisica (h)	12.000	Var. MO
Durata economica (anni)	12	Var. MO
Costo gasolio (€/kg)	0,79	0,79 (*)
Costo lubrificante (€/kg)	4	4,00 (*)
Numero addetti	1	Var. MO
Costo orario addetti (€/h)	15	12,5
Coeff. spese varie (%)	1,5	Var. MO
Coeff. manutenzione e riparazione (%)	80	Var. MO

Note: (\*) solo per macchine operatrici semoventi; legenda: Var. MO: variabile in relazione alla macchina operatrice; Var. P: variabile in relazione alla potenza.

**IL COLZA SUL 17% DELLA SAU**

Riservando al colza 100 ha (17%) della Sau e coltivando sui rimanenti mais, frumento e soia, il costo di produzione della oleaginosa è 1.390 €/ha (corrispondenti a 394 €/t<sub>ss</sub>). Conseguentemente, il ricavo complessivo (prezzo di vendita e contributi) raggiunge 1.573 €/ha (447 €/t<sub>ss</sub>); il rapporto ricavi/costi è 1,13 con un guadagno limitato a circa 185 €/ha (52,5 €/t<sub>ss</sub>).

Per la fase di campo della filiera, l'input energetico raggiunge 11,1 GJ/ha (3,15 GJ/t<sub>ss</sub>), l'output 92 GJ/ha, con un saldo positivo di circa 79,6 GJ/ha (circa 15 GJ/t<sub>ss</sub>); pertanto, il bilancio energetico (Eroei, *energy returned on energy invested*) è favorevole, presentando valori di circa 8,2. Infine, per quanto riguarda l'emissione e l'assorbimento di gas serra nel corso del ciclo culturale le emissioni risultano pari a 1,37 t CO<sub>2</sub>/ha (390 kg CO<sub>2</sub> eq/t<sub>ss</sub>) con un assorbimento netto di 6,36 t CO<sub>2</sub> eq/ha (1,79 t CO<sub>2</sub> eq/t<sub>ss</sub>), con un rapporto assorbimenti/emissioni è 5,6.

**TAB. 3 – LIVELLI DEI FATTORI DI PRODUZIONE UTILIZZATI NELLA SIMULAZIONE**

FATTORE PRODUTTIVO	DOSE QUANTITÀ PER HA	COSTI PREZZO €	CONTENUTO ENERGETICO MJ
Materiale di impianto (kg) (1)	5	25	33
Fanghi per concimazione di fondo (t) (1)	65	0	42
Concimazione minerale di fondo (kg) (1)	120	30	45 (NP 18,46)
Concimazione azotata in copertura (kg) (1)	140	0,31	33 (urea)
Concimazione azotata in copertura (kg) (1)	50	0,24	16 (Solf. ammonico)
Erbicidi (kg) (1)	4	14	201
Gasolio (kg) (1)	-	0,79	51,5
Lubrificante (kg) (1)	-	4	83,7
Manodopera (h) (1)	-	15	2,3
Trattori (kg) (2)	-	-	92
Macchine operatrici (kg) (2)	-	-	69

Note: (1) = Input Diretti; (2) = Input Indiretti



In figura 1 sono riportati il costo di produzione ( $\text{€}/\text{kg}_{\text{ss}}$ ), l'input energetico ( $\text{GJ}/\text{t}_{\text{ss}}$ ) e le emissioni ( $\text{t CO}_2/\text{t}_{\text{ss}}$ ), mentre nelle Figure 2, 3 e 4, è indicata l'incidenza delle diverse voci nel determinare i costi, rispettivamente, economico, energetico, ambientale.

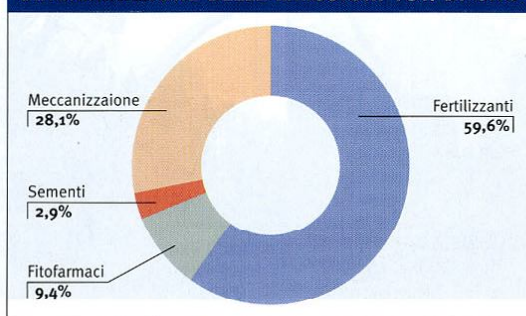
Per quanto riguarda il costo di produzione, il beneficio fondiario rappresenta la parte preponderante (65%), seguito dalle spese relative alla meccanizzazione delle operazioni di campo (15%). Pertanto, considerare o meno la remunerazione del capitale fondiario nella formazione del costo di produzione, assume grande importanza per l'entità del risultato finale. Relativamente agli altri aspetti della sostenibilità, la meccanizzazione e l'apporto di N sono le voci prevalenti sia tra gli input energetici (rispettivamente, 44% e 46%), sia tra le emissioni di  $\text{CO}_2$  equivalente (28% e 57%).

#### [ L'EFFETTO DELLA FASE DI TRASFORMAZIONE

Con i presupposti di calcolo adottati, i risultati ottenibili dalla coltivazione del colza non sono pienamente soddisfacenti dal punto di vista economico; il guadagno è, infatti, limitato e non appare in grado di stimolare di per sé l'interesse da parte degli agricoltori. Difatti, l'attuale prezzo di vendita, notevolmente inferiore a quello di fine 2008 (400  $\text{€}/\text{t}$ ), pur lasciando margine ha drasticamente ristretto il profitto. Relativamente agli aspetti energetici e ambientali – evidenziando a chiare lettere che l'analisi condotta riguarda la sola fase di campo della filiera – se ne dimostra la sostenibilità.

Va, tuttavia, sottolineato che – a differenza di altre filiere agro-energetiche le cui successive fasi risultano relativamente "semplici e

**FIG. 4 – INCIDENZA DELLE DIVERSE VOCI NELLA DETERMINAZIONE DELLE EMISSIONI TOT. DI GHG**



corte" (ne è un esempio la combustione diretta di biomasse lignocellulosiche) – per la filiera biodiesel, il seme costituisce la materia prima del processo industriale di trasformazione in bio-carburante.

Appare, quindi, del tutto evidente che la sostenibilità complessiva della filiera debba comprendere anche questa seconda fase e sia, comunque, destinata a peggiorare fino, secondo taluni Autori, a perdere di significato. ■

\*Facoltà Agraria, Università di Milano – marco.fiala@unimi.it

\*\* Scuola di Dottorato dell'Università degli Studi di Milano