

Raffaella Gelletti, Roberto Jodice, Giovanni Mauro, Daniela Migliardi,
Denis Picco, Michela Pin, Elisa Tomasinsig, Luca Tommasoni

C.E.T.A. – Centro di Ecologia Teorica ed Applicata di Gorizia

Damiana Chinese, Barbara Monaco, Gioacchino Nardin, Patrizia Simeoni

Università degli Studi di Udine - Dipartimento di Energetica e Macchine

Energia dalle biomasse

Le tecnologie, i vantaggi
per i processi produttivi,
i valori economici
e ambientali



PROGETTO
N. VIMPRESA

24



Unione Europea
Obiettivo 2 - FESR



Ministero dell'Economia
e delle Finanze



REGIONE AUTONOMA
FRIULI VENEZIA GIULIA

Lo studio è stato ideato
e coordinato dal
Servizio Trasferimento
Tecnologico di
AREA Science Park
e finanziato con il
contributo del
Fondo Europeo per
lo Sviluppo Regionale.

Copyright © 2006 by
Consorzio per l'AREA di ricerca scientifica e tecnologica di Trieste
AREA Science Park
Padriciano, 99 - 34012 Trieste

prima edizione: Aprile 2006

I marchi citati nella presente pubblicazione sono di proprietà dei rispettivi titolari
progetto grafico: Mariangela Paludo
redazione: Luca Borraccino
coordinamento: Giada Cadei
stampato presso la Tipografia Filacorda Udine



AREA Science Park

per la diffusione dell'innovazione

AREA Science Park, dal 2005 Ente pubblico di ricerca nazionale di primo livello del MIUR, è uno dei principali parchi scientifici multi-settoriali d'Europa.

Ospita attualmente 84 centri, società e istituti, con oltre 1800 addetti impegnati in attività di ricerca e sviluppo, trasferimento tecnologico, formazione e servizi qualificati.

Suo obiettivo principale è favorire lo sviluppo del territorio attraverso la leva dell'innovazione e del trasferimento tecnologico, grazie alla creazione di un legame stabile tra il mondo della ricerca e il sistema imprenditoriale.

In particolare nella zona Obiettivo 2 del Friuli Venezia Giulia AREA ha attivato "Progetto Novimpresa", un'iniziativa cofinanziata da Unione Europea, Stato e Regione che offre alle imprese del territorio numerosi servizi a sostegno dello sviluppo tecnologico e della loro competitività.

Dall'attività a fianco delle imprese sono stati evidenziati alcuni temi di particolare interesse per gruppi di imprese o settori produttivi. In questa collana vengono pubblicati i risultati degli approfondimenti e degli studi.

AREA Science Park - Progetto Novimpresa
Padriciano, 99 - 34012 Trieste
tel. 040.375.5125 - fax 040.226698
e-mail: novimpresa@area.trieste.it
www.area.trieste.it - www.area.trieste.it/novimpresa

Indice

AREA Science Park per la diffusione dell'innovazione	p. IV
Presentazione	p. IX
Introduzione	p. XI
Capitolo 1	
Identità della biomassa	p. 1
1.1 Definizioni e classificazione	p. 2
1.2 Origine e natura	p. 3
1.2.1 Il comparto forestale e agroforestale	p. 3
1.2.2 Il comparto agricolo	p. 8
1.2.3 Il comparto zootecnico	p. 21
1.2.4 I residui delle attività industriali	p. 23
1.2.5 I residui urbani	p. 27
1.3 Forme commerciali	p. 29
1.3.1 Le biomasse combustibili allo stato solido	p. 29
1.3.2 Le biomasse combustibili allo stato liquido	p. 38
1.3.3 Le biomasse combustibili allo stato gassoso	p. 42
Capitolo 2	
Applicazioni tecnologiche	p. 45
2.1 Metodi e processi di preparazione del combustibile	p. 45
2.1.1 Tecniche di condizionamento e di preparazione delle biomasse lignocellulosiche	p. 45
2.1.2 La fermentazione metanica per la produzione di biogas	p. 54

2.1.3	La fermentazione alcolica da glucidi semplici e complessi	p. 66
2.1.4	La conversione chimica degli oli	p. 72
2.1.5	La biogenesi dell'idrogeno	p. 76
2.2	Metodi e processi termochimici di conversione energetica	p. 78
2.2.1	La produzione di energia termica	p. 78
2.2.2	La produzione di energia elettrica	p. 99
2.2.3	La cogenerazione	p. 111
2.2.4	La trigenerazione	p. 125
2.2.5	L'utilizzo diretto di oli vegetali nei motori a combustione interna	p. 130

Capitolo 3

Aspetti economici

		p. 135
3.1	I costi di produzione dei combustibili da biomassa	p. 135
3.1.1	L'ottenimento della materia prima	p. 135
3.1.2	Le fasi di preparazione del combustibile	p. 138
3.2	I prezzi di vendita dei combustibili da biomassa	p. 144
3.3	Valutazione economica degli impianti energetici alimentati a biomassa	p. 146
3.4	Principali strumenti d'incentivo	p. 148
3.4.1	Gli incentivi alla produzione di biomasse energetiche da colture dedicate	p. 148
3.4.2	Gli incentivi ai biocarburanti	p. 150
3.4.3	Gli incentivi alla produzione di energia elettrica: i certificati verdi	p. 152
3.4.4	Altri strumenti: la leva fiscale	p. 153

Capitolo 4

Aspetti ambientali

		p. 155
4.1	La riduzione delle emissioni in atmosfera	p. 155
4.1.1	Il bilancio delle emissioni di anidride carbonica (CO ₂)	p. 157
4.1.2	Confronto tra le emissioni inquinanti dei principali combustibili di origine vegetale e fossile	p. 160
4.2	Altri benefici ambientali	p. 163
4.3	Il bilancio energetico dei combustibili da biomassa	p. 164

Capitolo 5

Esempi applicativi di utilizzo delle biomasse a fini energetici

- | | |
|--|--------|
| 5.1 Centrale termica a cippato di legna a servizio dell'Istituto Scolastico IPSSC di via Baden Powell, nel comune di Monfalcone (GO) | p. 167 |
| 5.1.1 Dimensionamento della caldaia a biomassa | p. 168 |
| 5.1.2 Caratteristiche costruttive e schema di funzionamento della caldaia | p. 169 |
| 5.1.3 Circuiti e dispositivi di sicurezza | p. 170 |
| 5.1.4 Caratteristiche e dimensionamento del deposito di cippato | p. 171 |
| 5.2 Centrale termica a cippato di legna a servizio della sede della Riserva Naturale Regionale della Foce dell'Isonzo, nel comune di Staranzano (GO) | p. 172 |
| 5.2.1 Dimensionamento della caldaia a biomassa | p. 173 |
| 5.2.2 Caratteristiche costruttive e schema di funzionamento della caldaia | p. 174 |
| 5.2.3 Circuiti e dispositivi di sicurezza | p. 175 |
| 5.2.4 Caratteristiche e dimensionamento del deposito di cippato | p. 176 |
| 5.3 Impianto dimostrativo con ciclo ORC integrato ottimizzato a Lienz (Austria) | p. 177 |
| 5.4 Teleriscaldamento e cogenerazione da legno cippato a Fondo – Val di Non (TN) | p. 180 |
| 5.5 Impianto dimostrativo per lo sfruttamento di energia e materiali da reflui zootecnici presso l'azienda "Francesco Ricchieri" di Fiume Veneto (PN) | p. 182 |
| 5.5.1 Sezioni operative dell'impianto | p. 184 |

Capitolo 6

Allegati

- | | |
|---|--------|
| 6.1 Allegato 1: schede colturali delle principali specie a fini energetici | p. 187 |
| 6.1.1 Colture da biomassa lignocellulosica | p. 187 |
| 6.1.2 Colture oleaginose | p. 200 |
| 6.1.3 Colture alcoligene | p. 208 |

6.2 Allegato 2: composizione chimica media di alcune biomasse	p. 215
6.3 Allegato 3: disponibilità di biomasse a fini energetici nella regione Friuli Venezia Giulia	p. 219
6.3.1 Le biomasse forestali	p. 219
6.3.2 Le biomasse agro-forestali	p. 221
6.3.3 I residui agricoli	p. 222
6.3.4 Le colture oleaginose dedicate	p. 224
6.3.5 Le colture alcoligene dedicate	p. 225
6.3.6 Il comparto industriale	p. 226
6.3.7 I rifiuti	p. 228
 Glossario	 p. 229
 Bibliografia	 p. 241

Presentazione

Ricerca, conoscenza, creazione di innovazione: è questa la catena del valore in cui si inserisce l'impegno quotidiano di AREA Science Park a favore del mondo produttivo regionale.

Da quasi un decennio, attraverso Progetto Novimpresa, la nostra sfida è sostenere la competitività delle imprese aiutandole ad anticipare e a rispondere ai cambiamenti e alle trasformazioni tecnologiche in atto. Come? Conoscendole direttamente, in un rapporto "faccia a faccia" che crea fiducia, raccogliendo sul campo le loro esigenze di innovazione, trasformando idee, conoscenza e risultati della Ricerca in progetti di innovazione con ricadute concrete, impegnando le migliori competenze disponibili in sforzi progettuali che creano reale valore per l'impresa.

Consapevoli che i temi del risparmio energetico e del ricorso a fonti rinnovabili, quali soluzioni per rispondere alla domanda crescente di energia, all'aumento dei prezzi dei combustibili tradizionali e alle difficoltà di approvvigionamento, risultano oggi di particolare interesse e attualità, abbiamo realizzato e pubblichiamo il manuale *Energia dalle biomasse*.

Le innovazioni tecnologiche degli ultimi anni hanno riportato l'attenzione sulle enormi possibilità offerte dalle biomasse non solo nel settore del riscaldamento ma anche in quello della produzione di energia in cogenerazione, dello sfruttamento del biogas e, soprattutto, nel settore dei biocarburanti.

Obiettivo del manuale è fornire una panoramica il più possibile ampia sulla natura e sulle caratteristiche delle biomasse e dei combustibili da esse derivati, nonché sulle potenzialità offerte dalle diverse tecnologie di sfruttamento energetico (rendimenti, potenzialità d'impiego, fattori di criticità), anche dal punto di vista della redditività degli investimenti. La presentazione di esempi applicativi delle tecnologie descritte

sulla base di esperienze condotte sia in ambito regionale che extraregionale, consente inoltre ai lettori di verificare la fattibilità di alcune ipotesi realizzative.

Un nuovo esempio concreto di come AREA voglia mettere al servizio della competitività dell'Impresa un sistema collaudato di operatori del trasferimento tecnologico, esperienze e strumenti.

Una tradizione di innovazione che accompagna le imprese nel futuro.

prof.ssa Maria Cristina Pedicchio

Presidente

AREA Science Park Trieste

Introduzione

La tematica dell'impiego delle fonti rinnovabili di energia è ritornata di attualità, soprattutto nell'ultimo anno, alla luce dei ben noti avvenimenti quali l'aumento dei prezzi dei combustibili fossili e le difficoltà del loro approvvigionamento. Si tratta di un interesse ciclico, se visto nell'arco degli ultimi trent'anni, dovuto a momenti contingenti di aumento dei prezzi del petrolio, alla fonte.

Questa volta però vi è piena coscienza che la crisi è strutturale, ossia non più contingente, ma dovuta al sistema dei consumi di energia (elevati) della nostra società, alla diminuzione contestuale delle disponibilità delle fonti fossili e all'aumento della domanda a livello mondiale. Il ricorso alle fonti rinnovabili e all'uso efficiente dell'energia si impone quale scelta strategica, irreversibile.

E l'assunto assume una importanza di rilievo nel nostro Paese, che importa oltre l'80% del fabbisogno di energia dall'estero, in termini di combustibili, di carburanti e anche di energia elettrica.

Il presente manuale, realizzato su iniziativa di AREA Science Park, di cui sono autori i tecnici del CETA, suscita un'attenzione particolare poiché attiene alla produzione e all'impiego delle biomasse, una tra le fonti rinnovabili di energia di più spiccato interesse, poiché diffusa su tutto il territorio nazionale, già ampiamente sperimentata con l'ausilio di tecnologie che attualmente risultano consolidate e "mature".

L'argomento è però restato patrimonio di un numero ristretto di operatori, per lo più circoscritti alla filiera legno/energia, ossia al comparto dell'impiego delle risorse forestali legnose e a quello dell'utilizzo dei residui legnosi ottenuti nelle industrie di lavorazione del legno stesso (segherie, mobilifici, ecc.). A livello nazionale la produzione complessiva di biomasse per scopi energetici è stimata in 3.255 ktep, su 14.092 ktep ottenuti da fonti rinnovabili (dati 2003), pari al 23,01%.

Attualmente l'interesse si è aperto anche alle altre materie prime di origine vegetale e animale, nell'ottica di un recupero completo di

tutte le risorse disponibili: combustibili legnosi di origine forestale e agricola, effluenti degli allevamenti zootecnici e reflui organici agroindustriali che producono biogas, biocarburanti di “nuova” concezione quali il biodiesel e il bioalcohol.

Per quanto attiene alle previsioni sullo sviluppo della bioenergia nei prossimi anni, i documenti programmatici redatti dalle amministrazioni pubbliche competenti sono relativamente scarni poiché si basano su un livello di informazione di base certamente carente.

Volendo fornire un dato indicativo in merito alla disponibilità del territorio destinabile alle colture energetiche, si può assumere, nell’ottica di un quadro di riferimento e non di una valutazione puntuale, la stima di oltre 1 milione di ha il territorio che potrebbe essere destinato alla riconversione a colture annuali o poliennali per la produzione di biomassa da energia. Uno studio recente, elaborato dal CETA a livello nazionale, stima che entro pochi anni, attuando una politica di interventi decisa e mirata, potrebbero essere ottenute energie dalle biomasse agricole e forestali pari ad oltre il 6% dei consumi odierni, con un incremento dall’attuale 12% rappresentato da tutte le rinnovabili al 18% complessivo. La dimensione è sicuramente rilevante.

Il manuale assume una valenza ulteriore poiché non limita la trattazione esclusivamente alla produzione di biomasse, nelle differenti filiere, ma la estende alle tecnologie di immediato riscontro applicativo, ossia concretamente utilizzabili dagli utenti finali, siano essi di piccola o grande taglia. Compendia altresì le tecnologie che potranno essere perfezionate ed impiegate nel breve-medio periodo, previo un ulteriore sforzo tecnologico, alle varie scale applicative.

Di rilievo è stato l’impegno degli autori nel considerare e descrivere le tecnologie di piccola e media dimensione produttiva, anche con la finalità di impiegare le risorse al livello territoriale consono, in un ambito di piena sostenibilità ambientale.

È un testo rivolto agli operatori del Friuli Venezia Giulia, ma non solo ad essi, poiché la trattazione induce un interesse scientifico e tecnico che supera i limiti territoriali regionali.

Luigi Rossi

*Direttore Unità Biotecnologie,
Protezione della Salute e degli Ecosistemi
ENEA - Centro Ricerche Casaccia Roma*

Principali unità di misura e fattori di conversione

Unità di misura	simbolo	grandezza	
Caloria	cal	calore	
Joule	J	calore	
Wattora	Wh	energia	

Equivalenze tra unità di misura di energia e calore

	kJ	kcal	kWh
1 kJ	1	0,2388	0,000278
1 kcal	4,1868	1	0,001163
1 kWh	3.600	860	1

Capitolo 1

Identità della biomassa

Il termine *biomassa* riunisce una gran quantità di materiali di natura estremamente eterogenea. Con alcune eccezioni, si può dire che è biomassa tutto ciò che ha matrice organica. Sono da escludere le plastiche e i materiali fossili che, pur rientrando nella chimica del carbonio, non hanno nulla a che vedere con la caratterizzazione che qui interessa dei materiali organici.

La biomassa rappresenta la forma più sofisticata di accumulo dell'energia solare. Mediante il processo di fotosintesi, infatti, i vegetali sono in grado di convertire l'energia radiante in energia chimica e stoccarla sotto forma di molecole complesse, a elevato contenuto energetico. Per tale motivo la biomassa è considerata una risorsa rinnovabile e inesauribile, se opportunamente utilizzata, ovvero se il ritmo di impiego della stessa non superi la capacità di rigenerazione delle formazioni vegetali.

Al contempo la biomassa è anche una fonte energetica considerata neutrale ai fini dell'incremento delle emissioni di gas a effetto serra: durante il processo di crescita i vegetali, mediante la fotosintesi, contribuiscono alla sottrazione dell'anidride carbonica atmosferica e alla fissazione del carbonio nei tessuti. A seguito della combustione della biomassa si generano emissioni di anidride carbonica, tuttavia la quantità emessa è pari a quella assorbita dalla pianta e rientra pertanto nel ciclo naturale. Per

DEFINIZIONE DI BIOMASSA SECONDO IL DECRETO LEGISLATIVO 29 DICEMBRE 2003, N. 387

Biomassa: "la parte biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali ed animali) e dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali ed urbani".

questo motivo l'impiego a fini energetici della biomassa è considerata una delle priorità di sviluppo delle politiche post Kyoto.

1.1 Definizioni e classificazione

La definizione di biomassa data dalla direttiva 2001/77/CE sulla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili e recepita a livello nazionale dal decreto legislativo 29 dicembre 2003, n. 387, riunisce un'ampia categoria di materiali di origine vegetale e animale, compresa la parte biodegradabile dei rifiuti.

Per semplicità le biomasse idonee alla trasformazione energetica, sia che essa avvenga utilizzando direttamente la biomassa o previa trasformazione della stessa in un combustibile solido, liquido o gassoso, possono essere suddivise per comparto di provenienza nei seguenti settori:

- comparto forestale e agroforestale: residui delle operazioni selvicolturali o delle attività agroforestali, utilizzazione di boschi cedui, ecc;
- comparto agricolo: residui colturali provenienti dall'attività agricola e dalle colture dedicate di specie lignocellulosiche, piante oleaginose, per l'estrazione di oli e la loro trasformazione in biodiesel, piante alcoligene per la produzione di bioetanolo;
- comparto zootecnico: reflui zootecnici per la produzione di biogas;
- comparto industriale: residui provenienti dalle industrie del legno o dei prodotti in legno e dell'industria della carta, nonché residui dell'industria agroalimentare;
- rifiuti urbani: residui delle operazioni di manutenzione del verde pubblico e frazione umida di rifiuti solidi urbani.

Si comprende quindi che nel termine biomassa sono raggruppati materiali che possono essere anche molto diversi tra loro per caratteristiche chimiche e fisiche. Di conseguenza anche le loro utilizzazioni, a fini energetici, possono essere molteplici. In linea generale, come si vedrà in dettaglio nel capitolo 3, i processi di trasformazione possono essere raggruppati in due diverse categorie: i processi di conversione biochimica permettono di ricavare energia attraverso reazioni chimiche dovute alla presenza di enzimi, funghi e altri micro-organismi che si formano nella biomassa mantenuta in particolari condizioni; i processi di conversione termochimica hanno come fondamento l'azione del calore che permette lo sviluppo delle reazioni chimiche necessarie a trasformare la materia in energia. I fattori discriminanti che indirizzano la scelta verso uno dei

due processi sono il rapporto carbonio/azoto (C/N) e il tenore di umidità alla raccolta: quando il rapporto C/N è inferiore a 30 e il contenuto di umidità supera valori del 30% si utilizzano generalmente processi biochimici, in caso contrario sono più idonei processi termochimici.

Di seguito vengono descritte nel dettaglio le diverse tipologie di biomassa, suddivise per comparto di provenienza, e le principali caratteristiche a fini energetici delle stesse. Successivamente saranno approfonditi i sistemi tecnologici di conversione energetica.

1.2 Origine e natura

1.2.1 *Il comparto forestale e agroforestale*

Il principale strumento tecnico della selvicoltura naturalistica è costituito da operazioni di taglio e di eliminazione di alcune piante (albe-

SELVICOLTURA E SISTEMI SELVICOLTURALI

La **selvicoltura** è definita come la scienza e la pratica di coltivare i boschi, applicando i principi dell'ecologia forestale all'impianto (distribuzione), alla rinnovazione (ricostituzione del bosco) ed agli interventi attuati per condizionare la struttura, la composizione specifica dei popolamenti forestali, lo stato fitosanitario in un'ottica di equilibrio tra le esigenze economiche della società e le esigenze ecologiche della foresta.

Per **sistema selvicolturale** si intende invece l'insieme delle operazioni attuate per la coltivazione, l'utilizzazione e la rinnovazione del bosco. I singoli interventi si distinguono principalmente in funzione della forma di governo del bosco adottata.

Per **governo del bosco** si intende il modo in cui questo si rinnova. Le due modalità di rinnovo del bosco sono a ceduo e a fustaia. Nella forma di *governo a ceduo* l'accrescimento delle piante viene interrotto con tagli periodici. La rinnovazione del bosco, in questo caso, avviene principalmente tramite propagazione vegetativa ovvero dal ricaccio delle piante dalle singole ceppaie. Le gemme che ricacciano dalle ceppaie si chiamano polloni e la modalità di propagazione è tipica delle latifoglie. Il *governo a fustaia* si ha invece quando il bosco è formato da piante lasciate crescere fino alla maturità e la rinnovazione del bosco avviene, per lo più, mediante propagazione sessuata (tramite seme).

ri, ma anche arbusti) che consentano l'utilizzazione della produzione legnosa senza inficiare il processo di perpetuazione del bosco. Le operazioni che vengono eseguite contribuiscono a "regolare" la concorrenza tra piante della stessa età o di età diversa nonché di controllare la composizione, la struttura spaziale (distribuzione orizzontale e verticale) e l'evoluzione della comunità vegetale. I residui forestali, risultanti dai diversi tipi di intervento selvicolturale, vengono comunemente indicati come biomassa forestale.

Le operazioni interessanti ai fini del prelievo di biomassa forestale a fini energetici comprendono sia interventi selvicolturali in boschi governati a fustaia sia interventi in boschi governati a ceduo. Nel primo caso un esempio di operazione può essere il prelievo degli assortimenti minori, comunemente lasciati in bosco, in seguito a interventi di taglio degli assortimenti forestali maggiori (diametro dei tronchi maggiore a 18 cm) per usi commerciali.

Ulteriore fonte di approvvigionamento è costituita dal materiale legnoso derivante dai tagli intercalari ovvero dagli interventi applicati alle giovani fustaie o alle fustaie in via di ricostituzione per aumentarne la stabilità, per regolamentarne la composizione specifica e per accrescerne la produzione di valore. Anche l'utilizzazione dei boschi cedui rappresenta sicuramente una fonte importante di biomassa forestale: i cedui italiani, infatti, costituiti nella quasi totalità da piante ceduate a ceppaia, sono destinati per lo più alla produzione di biomassa combustibile e di pali per uso agricolo.

Un'ulteriore fonte di approvvigionamento di biomasse legnose è rappresentata dai materiali di provenienza agroforestale, ossia dalle biomasse che derivano da attività di forestazione in ambito prettamente agricolo. Le fonti di biomassa a fini energetici, in questo caso, sono principalmente da ricondursi ai residui derivanti dalle utilizzazioni a fini commerciali di coltivazioni legnose, alle utilizzazioni delle formazioni lineari (come siepi e filari o piccoli boschetti) nonché alle utilizzazioni delle formazioni boschive dedicate realizzate su superfici agricole. Per quest'ultima si fa riferimento principalmente, alla pioppicoltura: i residui possono derivare sia dalle potature eseguite nel corso del ciclo di crescita della pianta, sia dagli scarti delle utilizzazioni a fini commerciali (comunemente viene utilizzato il tronco, mentre le ramaglie vengono lasciate in campo).

Le caratteristiche fisiche delle biomasse legnose rilevanti a fini energetici sono il tenore di umidità e la densità. Questi due fattori, accanto alla composizione chimica del materiale, incidono infatti sul potere calorifico del legno.

IL POTERE CALORIFICO INFERIORE (p.c.i.)

Il potere calorifico inferiore (p.c.i.) esprime la quantità di calore che si sviluppa con la combustione completa di 1 kg di legno, considerando l'acqua allo stato di vapore a 100 °C, ossia considerando la sola quota parte di calore effettivamente utilizzabile.

Il p.c.i. si misura in Kcal/Kg.

L'umidità viene definita dal rapporto tra la quantità d'acqua contenuta nel legno e il peso dello stesso. Questa variabile assume un'importanza significativa perché, oltre ad agire sui meccanismi di combustione, ha un'influenza sulle caratteristiche chimiche del legno e sul suo peso specifico. La quantità d'acqua contenuta nel materiale varia in funzione di diversi fattori quali la specie, l'età, la parte di pianta considerata (rami, fusti, ecc.), la stagione del taglio, ecc. In generale si hanno tenori di umidità più bassi nelle latifoglie rispetto alle conifere, nelle parti basse rispetto alle parti alte della pianta, in estate rispetto all'inverno.

L'UMIDITÀ

L'umidità, riferita allo stato umido, viene definita come segue:

$$U_{anidro} = \frac{M_{anidro} - M_{umido}}{M_{anidro}} \times 100$$

dove M_{umido} è il peso della biomassa tal quale (umida) e M_{anidro} è il peso della biomassa allo stato anidro, ovvero della sostanza secca.

La densità è la massa per unità di volume e si misura in kg/m³. Può essere calcolata considerando il legno allo stato fresco o il legno allo stato secco. La densità rappresenta il più comune indicatore di qualità del combustibile legnoso perché il potere calorifico del legno è direttamente proporzionale ad essa. Anche la densità è variabile. Essa varia in funzione delle condizioni stagionali, della specie (generalmente risulta più elevata la densità delle latifoglie rispetto alle conifere), dell'età, della parte della pianta, della forma di governo del bosco. La densità del legno, in linea generale, varia tra 800 e 1.120 kg/m³, se riferita allo stato fresco, e tra 360 e 810 kg/m³, se riferita allo stato secco¹.

¹ Zilli, 2002.

LA DENSITÀ

La densità si misura come segue:

$$D = M_{umido} / V_{umido}$$

dove M_{umido} è il peso e V_{umido} è il volume della biomassa umida.

Relativamente alle principali caratteristiche analitiche che qualificano la biomassa forestale e agroforestale a fini energetici, assume rilievo la composizione chimica del legno.

I principali polimeri costituenti la biomassa legnosa sono:

- la lignina, che conferisce rigidità alla pianta, è presente in percentuali che variano dal 20 al 30% del peso secco e ha un alto potere calorifico (circa 6.000 kcal/kg);
- la cellulosa, il principale componente del legno (costituisce circa il 50% del peso secco), ha anch'essa un potere calorifico elevato (pari a circa 3.900 kcal/kg);
- l'emicellulosa, presente nella parete cellulare delle piante negli spazi lasciati liberi dalla cellulosa, costituisce dal 10 al 30% del legno e ha un potere calorifico più modesto.

Rispetto alla sua composizione elementare, il legno è costituito quasi interamente da tre elementi: il carbonio (49-51%), l'ossigeno (41-45%) e l'idrogeno (5-7%). Al contempo presenta relativamente basse quantità di azoto (0,05-0,4%), di zolfo (0,01-0,05%) e di altri elementi minerali che vanno a costituire le ceneri (0,5-1,5%)².

La quantità e soprattutto il rapporto tra gli elementi costituenti la biomassa sono molto importanti al fine di verificarne il valore come combustibile. In particolare sono molto importanti il rapporto tra idrogeno (H) e carbonio (C), e quello tra ossigeno (O) e carbonio (C), nonché le quantità di azoto e ceneri: in linea generale un alto contenuto di carbonio e idrogeno determina un alto potere calorifico, mentre elevate presenze di ossigeno, azoto e ceneri hanno un effetto opposto³.

² Alberti, 2002; Righini, 2003.

³ APAT, 2003.

Nella tabella 1 vengono riassunte le principali caratteristiche chimico-fisiche ed energetiche della biomassa legnosa. Ulteriori specifiche concernenti le principali essenze legnose vengono fornite nel paragrafo 6.2 (Allegato 2).

Tabella 1 - Principali caratteristiche chimico-fisiche della biomassa legnosa

Composizione	
Cellulosa	50% della ss
Emicellulosa	10-30% della ss
Lignina	20-30% della ss
Caratteristiche fisiche ed energetiche	
Umidità	25-60% sul t.q.
Densità di massa	800-1.120 kg/m ³
p.c.i. (considerando un'umidità del 12-15%)	3.600-3.800 kcal/kg

ss = sostanza secca

La biomassa proveniente dal bosco viene venduta sul mercato in pezzature molto diverse per forma e grado di umidità. In taluni casi viene avviata alla produzione di forme densificate (pellet e bricchetti), come si vedrà nel dettaglio nel paragrafo 3.1). Le pezzature più comuni sono i tronchetti di legno (l'assortimento più utilizzato negli ambienti rurali o montani, dove la raccolta della legna e il suo stoccaggio in ciocchi di opportune dimensioni è un'attività che sopravvive alle attrattive offerte dalle moderne tecnologie per il riscaldamento residenziale) e il cippato.

L'ampia disponibilità della fonte a livello nazionale (è sufficiente pensare che il 32,3% del territorio nazionale è coperto da boschi e foreste) rende interessante lo sfruttamento energetico delle biomasse forestali. Tuttavia il principale elemento di criticità al reperimento della biomassa in bosco può essere rappresentato dalle difficoltà logistiche e in particolare dalla presenza o meno di una viabilità forestale fruibile dai comuni mezzi di raccolta e trasporto e sufficientemente sviluppata. Soprattutto in ambito montano le formazioni boschive non sono sempre facilmente raggiungibili: in condizioni di pendenze elevate il recupero del materiale legnoso richiede una densità di strade piuttosto alta per garantire un agevole accesso dei mezzi. In alternativa spesso si rende necessaria la realizzazione di infrastrutture apposite come teleferiche o risine, utili al trasporto in condizioni orografiche accidentate con un aggravio dei costi di reperimento della biomassa.

1.2.2 Il comparto agricolo

Il comparto agricolo svolge, e svolgerà, un ruolo sempre più preponderante nella produzione di combustibili da biomassa. Questo comparto, infatti, può fornire un'ampia gamma di materiali che possono trovare utilmente impiego a fini energetici, che comprende sia prodotti residuali di altre coltivazioni sia materiali derivanti da coltivazioni specialistiche dedicate alla produzione di biomassa combustibile. I principali prodotti del settore agricolo sono:

- i residui colturali legnosi provenienti dalla gestione di vigneti e frutteti;
- altri residui colturali, di natura composita, provenienti dalle coltivazioni di cereali e altri seminativi;
- le biomasse lignocellulosiche da colture arboree ed erbacee dedicate;
- i prodotti delle colture oleaginose (semi, ecc.) per la produzione di oli vegetali e biodiesel;
- i prodotti delle colture alcoligene (tubercoli, granella, ecc.) per la produzione del bioetanolo.

I residui agricoli

I residui agricoli comprendono l'insieme dei sottoprodotti derivanti dalla coltivazione di colture, generalmente a scopo alimentare, altrimenti non utilizzabili o con impieghi alternativi marginali. Non tutti i residui provenienti da questo comparto sono utilmente destinabili alla produzione di energia sia a causa delle loro caratteristiche fisiche ed energetiche sia a causa di barriere economiche (costi di raccolta, bassa densità per unità di superficie) che ne limitano le possibilità di impiego. Sono ritenuti idonei alla trasformazione energetica⁴ i seguenti prodotti residuali:

1. paglie dei cereali autunno-vernini (frumento tenero e duro, orzo, avena, segale);
2. stocchi, tutoli e brattee di mais;

⁴ In questa sede non viene trattata la granella da mais per produzione energetica, in quanto considerata prodotto agricolo principale. Pare comunque opportuno sottolineare che, qualora la presenza di micotossine e aflattossine nella granella sia superiore ai limiti posti dalla regolamentazione UE, si può considerare la possibilità di utilizzare questo prodotto come biocombustibile (Gubbiani, Lazzari, 2004).

3. paglia di riso;
4. sarmenti di potatura della vite;
5. ramaglia di potatura dei fruttiferi;
6. frasche di olivo.

Le paglie dei cereali autunno-vernini (frumento tenero e duro, orzo, avena e segale)

Le paglie che restano sul campo dopo la trebbiatura rappresentano il principale sottoprodotto dei cereali autunno-vernini, coltivati per la produzione di granella. Sebbene questo materiale frequentemente venga lasciato sul campo per essere interrato oppure venga raccolto e utilizzato come lettiera o, più raramente, come alimento per gli animali, può trovare utilità anche a fini energetici: la paglia è infatti caratterizzata da un p.c.i. che varia tra 3.300-4.200 kcal/kg di sostanza secca (ss) e ha un'umidità alla raccolta del 14-20%. Tuttavia la quantità disponibile, per ettaro di superficie, è piuttosto bassa e varia tra 3 e 6 t/ha anno, in proporzione alla quantità di granella raccolta. Quando è prevista la raccolta, le paglie vengono lasciate in andane (file parallele) dalla mietitrebbiatrice e, successivamente, confezionate in balle. Il periodo utile per tale operazione è di 15-45 giorni dopo la raccolta della granella, in funzione del periodo di trebbiatura (giugno-luglio), dell'andamento climatico e dell'ordinamento colturale (tale periodo si riduce a pochi giorni qualora il cereale preceda una coltura di secondo raccolto come nel caso, ad esempio, dell'orzo seguito dal mais).

La paglia di riso

Le caratteristiche energetiche della paglia di riso sono buone: la biomassa presenta un p.c.i. di 3.700-3.800 kcal/kg di ss e un'umidità alla raccolta del 20-30%. La produttività media varia da 3 a 5 t/ha anno. La paglia di riso tuttavia è un residuo agricolo che presenta un recupero relativamente problematico. La raccolta, che deve avvenire dopo quella del prodotto principale, si effettua infatti nel periodo autunnale, caratterizzato da un'elevata piovosità, e su terreni con difficoltà di sgrondo delle acque. Attualmente la paglia di riso viene utilizzata come lettiera per animali. Il suo impiego come combustibile avviene generalmente nell'ambito dello stesso ciclo produttivo del prodotto principale e, in particolare, in fase di essiccazione dello stesso.

Stocchi, tutoli e brattee di mais

I sottoprodotti del mais da granella sono gli stocchi, i tutoli e le brat-

tee di mais. I tutoli e le brattee di mais hanno un p.c.i. di 4.000-4.300 kcal/kg di ss e un'umidità alla raccolta del 30-55%. Il quantitativo complessivamente raggiungibile, raccolto direttamente dalla mietitrebbiatrice, varia tra 1,5 e 2,5 t/ha, in base alle condizioni della coltura al momento della trebbiatura e alle caratteristiche costruttive della barra di raccolta.

Gli stocchi sono caratterizzati da un p.c.i. di 3.700-3.800 kcal/kg di ss e da un'umidità alla raccolta del 40-60%. La produttività è di circa 4-5 t/ha anno. Attualmente sono utilizzati per lo più come lettiera negli allevamenti ma possono trovare impiego anche a fini energetici. Possono essere recuperati successivamente alla raccolta della granello. Il periodo utile per la raccolta risulta essere indicativamente di 30-40 giorni, se tale operazione è effettuata prima dell'inverno, di 50-90 giorni se l'intervento è realizzato nella primavera successiva (nel caso del mais in monosuccessione). La raccolta tardo-autunnale generalmente comporta maggiori criticità dovute all'elevato tasso di piovosità media tipico di questo periodo che aumenta l'umidità del prodotto e quindi ne riduce la qualità (sviluppo con muffe, perdite di sostanza secca sia in *pre* che in *post* raccolta, imbrattamento con fango), oltre a generare difficoltà nella transitabilità del terreno. La raccolta meccanica degli stocchi non presenta particolari difficoltà tecnico-operative: i cantieri di lavoro attualmente adottati prevedono la trinciatura (riduzione del materiale in piccole scaglie) e l'andanatura (disposizione del materiale in campo lungo file lineari) prima del confezionamento in balle cilindriche. In taluni casi alla trinciatura segue il trasporto diretto allo stoccaggio.

Sottoprodotti delle colture arboree da frutto (vite, ulivo, altri fruttiferi)

Derivano dalle operazioni di potatura dei frutteti che si eseguono in epoche e con cadenze variabili in funzione delle colture attuate, nel periodo di riposo vegetativo. Nella pratica, tale materiale viene allontanato dall'appezzamento per evitare lo sviluppo di possibili fitopatologie. La possibilità di recuperare i residui di potatura (samenti di vite, frasche di ulivo, ramaglie di frutteti) per un loro utilizzo a fini energetici è legata alla possibilità di procedere alla raccolta del materiale e, quindi, in funzione alla densità d'impianto, alle modalità di potatura e al conseguente accrescimento delle piante (la forma di allevamento) nonché alla disposizione (grado di frammentazione e pendenza) del terreno.

Le principali caratteristiche chimico-fisiche delle biomasse agricole

vengono sintetizzate nella tabella che segue⁵. Per una caratterizzazione più dettagliata si veda il paragrafo 6.2 (Allegato 2).

Tabella 2 - Principali caratteristiche chimico-fisiche dei residui colturali

Sottoprodotto agricolo	Umidità alla raccolta (%)	Produzione media (t/ha)	Rapporto C/N	Ceneri (% in peso)	p.c.i. (kcal/kg ss)
Paglia frumento tenero	14-20	3-6	120-130	7-10	4.100-4.200
Paglia frumento duro	14-20	3-5	110-130	7-10	4.100-4.200
Paglia altri cereali autunno-vernini	14-20	3-5,5	60-65	5-10	3.300-3.400
Paglia riso	20-30	3-5	60-65	10-15	3.700-3.800
Stocchi mais	40-60	4,5-6	40-60	5-7	4.000-4.300
Tutoli e brattee di mais	30-55	1,5-2,5	70-80	2-3	4.000-4.300
Sarmenti vite	45-55	3-4	60-70	2-5	4.300-4.400
Frasche di olivo	50-55	1-2,5	30-40	5-7	4.400-4.500
Residui fruttiferi	35-45	2-3	47-55	10-12	4.300-4.400

Sebbene i residui colturali rappresentino una fonte energetica facilmente accessibile vanno considerate alcune criticità legate allo sfruttamento degli stessi e in particolare gli impieghi alternativi del materiale, la bassa produttività per unità di superficie e la composizione chimica delle biomasse.

Per quanto riguarda il primo aspetto, legato al ruolo agronomico dei residui colturali, c'è da rilevare che le pratiche agricole normalmente in uso trattano in maniera differente i diversi residui: se i residui di potatura vengono comunque raccolti e asportati dal campo, i residui colturali del mais, sono normalmente lasciati sul campo e interrati; questa operazione permette infatti l'apporto di sostanze organiche al terreno al fine di migliorarne la struttura e di mantenerne la fertilità. Sebbene l'interramento di tale materiale sia una pratica valida in linea generale, non lo è in senso assoluto: l'interramento della paglia, ad esempio, nonostante a volte venga comunque eseguito, può alterare l'equilibrio del terreno a causa dell'elevato rapporto tra carbonio

⁵ Riva, 1990; ITABIA, 1999.

e azoto (rapporto C/N) che rende successivamente necessario l'arricchimento del terreno con composti azotati di origine chimica. La destinazione dei residui agricoli a fini energetici deve quindi essere valutata di volta in volta, tenendo presente che essa non è consigliabile quando ciò comporti dei risvolti negativi a livello agronomico. Un'approfondita conoscenza delle caratteristiche chimico-fisiche del terreno agricolo si rivela dunque sempre necessaria al fine di definire correttamente un equilibrato livello di asportazione⁶.

Un secondo aspetto riguarda le quantità disponibili per unità di superficie. Queste in genere sono relativamente modeste e spesso non giustificano la raccolta, l'asportazione e il trasporto della biomassa alla centrale termica. Il basso peso specifico del materiale inoltre fa aumentare il costo di trasporto per unità trasportata (il trasporto è un punto chiave della logistica) e diventa importante, quindi, anche la distribuzione sul territorio di tali residui.

Per quanto attiene infine alla composizione chimica dei residui agricoli va evidenziato che un alto contenuto in cenere può comportare complicazioni in fase di impiego della biomassa: in linea generale la presenza di ceneri aumenta il pericolo della formazione di scorie e depositi a danno dei bruciatori ed aumenta le emissioni di particolato.

Le colture dedicate

La necessità di dare una visione multifunzionale all'agricoltura attraverso la tutela del territorio e l'utilizzo di modelli culturali a basso input, attribuisce alle colture dedicate un ruolo strategico nelle attuali politiche agricole. A ciò si somma la necessità di favorire lo sviluppo di un'alternativa alle produzioni con finalità alimentari per le quali sono prevedibili, a breve, situazioni assai complesse sul piano della competitività economica, soprattutto a causa dell'allargamento dei mercati e di una prevedibile minor protezione comunitaria a questo tipo di colture.

Con il termine "colture dedicate", o "colture energetiche", si fa riferimento a coltivazioni allestite allo scopo di produrre biomassa da destinare alla produzione di energia elettrica e/o termica.

Le colture dedicate possono essere raggruppate in tre categorie principali:

1. colture da biomassa lignocellulosica;

⁶ Le fonti bibliografiche indicano coefficienti di asportazione alquanto variabili (30-70%).

2. colture oleaginose;
3. colture alcoligene.

Nella tabella 3 si riporta un elenco delle principali specie utilizzabili e dei biocombustibili da esse ottenibili⁷.

Tabella 3 - Specie utilizzabili per le coltivazioni energetiche e loro caratterizzazione

	Specie	Ciclo di produzione	Prodotto intermedio	Prodotto trasformato
Lignocellulosiche	Kenaf	Erbacea annuale	Fibra	Legno e fibre sminuzzate (chips) Fascine di residui
	Canapa	Erbacea annuale	Fibra	
	Miscanto	Erbacea poliennale	Fibra	
	Canna comune	Erbacea poliennale	Fibra	
	Sorgo da fibra	Erbacea annuale	Fibra	
	Cardo	Erbacea poliennale	Fibra	
	Panico	Erbacea poliennale	Fibra	
	Robinia	Legnosa poliennale	Legno	
	Ginestra	Legnosa poliennale	Legno	
	Eucalitto	Legnosa poliennale	Legno	
	Salice	Legnosa poliennale	Legno	
	Pioppo	Legnosa poliennale	Legno	
Oleaginose	Colza	Erbacea annuale	Semi oleosi	Olio vegetale
	Girasole	Erbacea annuale	Semi oleosi	
	Soia	Erbacea annuale	Semi oleosi	
	Ricino	Erbacea annuale	Semi oleosi	
	Cartamo	Erbacea annuale	Semi oleosi	
Alcoligene	Barbabietola da zucchero	Erbacea annuale	Rizoma	Zuccheri/alcoli
	Sorgo zuccherino	Erbacea annuale	Stelo	
	Topinambur	Erbacea poliennale	Tubercolo	
	Mais	Erbacea annuale	Granella	
	Frumento	Erbacea annuale	Granella	

⁷ ITABIA, 2004.

Colture da biomassa lignocellulosica

Le colture lignocellulosiche comprendono specie erbacee o legnose caratterizzate dalla produzione di biomassa costituita da sostanze solide composte principalmente da lignina e/o cellulosa. Queste colture possono essere suddivise in tre gruppi.

Colture erbacee annuali

Comprendono specie erbacee caratterizzate da un ciclo di vita annuale. Le più interessanti si trovano nel genere dei sorghi, oltre a mais, kenaf, canapa, ecc. Le specie ritenute più adatte alle condizioni pedoclimatiche della regione Friuli Venezia Giulia sono il mais, il sorgo da fibra e, in misura minore, il kenaf.

Queste colture offrono il vantaggio di non occupare il terreno agricolo in modo permanente, perciò si inseriscono bene nei cicli tradizionali di rotazione colturale e possono essere coltivate anche su terreni tenuti a riposo secondo il *set-aside* rotazionale. Tale flessibilità di coltivazione è un fattore importante per quanto riguarda l'impatto che può avere la coltivazione di specie a destinazione energetica sugli agricoltori: il fatto che il terreno non sia vincolato in modo duraturo li rende infatti più propensi alla coltivazione di specie per loro inusuali.

Colture erbacee poliennali

Il numero delle specie erbacee poliennali sfruttabile per la produzione di biomasse lignocellulosiche è molto elevato. Le più importanti, anche in relazione alle condizioni pedoclimatiche locali, sono la canna comune, il miscanto e il panico.

Queste specie presentano un maggior impatto sull'organizzazione dell'azienda agricola in quanto occupano il suolo per diversi anni (10-15 anni) e presentano un elevato costo d'impianto. A loro vantaggio risulta invece il fatto che una volta entrata in produzione, la coltura fornisce una notevole quantità di biomassa per più anni e con bassi costi aggiuntivi (rispetto alle specie annuali). Inoltre, il loro impatto ambientale non è alto poiché queste specie sono generalmente poco esigenti: richiedono cioè aggiunte modeste di prodotti chimici quali fertilizzanti, antiparassitari, ecc. e leggere lavorazioni del terreno.

Colture arboree

Le coltivazioni energetiche legnose sono costituite da specie selezionate per l'elevata resa in biomassa e per la capacità di rapida ricrescita in seguito al taglio. Le specie legnose coltivate a scopi energetici hanno generalmente turni di ceduzione brevi (2-3 anni) e presenta-

no un'elevata densità d'impianto variabile dalle 6.000 alle 14.000 piante/ha. Si parla in questo caso di *Short Rotation Forestry* (SRF). Generalmente nelle SRF si utilizzano specifici cloni appositamente selezionati e la ceduzione delle piante, annuale o biennale, è completamente meccanizzata mediante l'utilizzo di apposite cippatrici⁸. Tra le colture arboree coltivabili a turno breve sono ritenuti interessanti i salici, i pioppi, la robinia, gli eucalitti e la ginestra (arbustiva). Le specie ritenute più adatte alle condizioni pedoclimatiche della regione Friuli Venezia Giulia sono la robinia e il pioppo.

I principali parametri analitici di interesse ai fini della caratterizzazione delle specie lignocellulosiche sono riportati nel paragrafo 6.2 (Allegato 2). Nella tabella 4 sono sintetizzate le caratteristiche fisiche ed energetiche delle principali specie vegetali.

Tabella 4 - Principali parametri produttivi ed energetici della biomassa da colture dedicate

	Produzione di sostanza fresca	Umidità media alla raccolta	Produzione di sostanza secca	p.c.i.
	(t/ha anno)	(%)	(t/ha anno)	(kcal/kg di ss)
Sorgo da fibra	50-100	25-40	20-30	4.000-4.050
Kenaf	70-100	25-35	10-20	3.700-3.900
Miscanto	40-70	35-45	15-30	4.200-4.250
Canna comune	45-110	35-40	15-35	3.950-4.150
Panico	25-60	35-45	10-25	4.100-4.200
Pioppo	20-30	50	10-15	4.100-4.200

RAPPORTO TRA P.C.I. E UMIDITÀ DELLA BIOMASSA

È opportuno sottolineare che il p.c.i. della biomassa è fortemente influenzato dal contenuto in acqua della biomassa: il p.c.i. diminuisce all'aumentare dell'umidità del materiale, non solo perché diminuisce la quantità di sostanza secca effettivamente presente nell'unità di peso considerata, ma anche perché una parte dell'energia liberata nel processo di combustione viene assorbita dall'evaporazione dell'acqua e quindi si rende indisponibile per l'uso termico desiderato. L'importanza del contenuto di acqua nella biomassa e delle ricadute che ha sulla filiera verrà sottolineata nella sezione di preparazione e condizionamento della biomassa.

⁸ Mareschi et al., 2005.

Le biomasse lignocellulosiche da colture dedicate, esattamente come le biomasse di origine forestale e i residui agricoli, possono trovare impiego come combustibili nei moderni impianti di riscaldamento, autonomi o centralizzati. Più raramente vengono utilizzate per la produzione combinata di energia termica ed elettrica in impianti di cogenerazione. Per l'alimentazione di impianti automatizzati con i prodotti delle SRF e delle coltivazione erbacee poliennali, quali canna comune e miscanto, si preferisce generalmente procedere alla cippatura del materiale raccolto al fine di renderlo omogeneo per dimensioni. Le rimanenti colture sono più adatte alla densificazione in bricchetti e pellet. Sebbene tale mercato non esiste ancora in quanto, ad oggi, la materia prima esclusiva per tale produzione è il legno.

Il principale ostacolo alla diffusione delle colture dedicate a fini energetici è oggi rappresentato dalla scarsa conoscenza delle opportunità che possono offrire al mondo agricolo. Tuttavia la riforma della Politica Agricola Comunitaria (PAC), che contrarrà ulteriormente la redditività delle colture alimentari, *in primis* quella del mais, consentiranno nuove opportunità alle colture energetiche.

Alcuni fattori devono però essere attentamente valutati nella scelta delle specie più indicate.

In generale, le biomasse di origine erbacea provenienti da colture perennanti, a parità di quantità di biomassa prodotta, sono caratterizzate da costi di produzione decisamente inferiori rispetto alle biomasse provenienti da colture legnose. Il vantaggio di costi inferiori della materia prima non compensa però una serie di ostacoli che ne limitano decisamente l'utilizzo nella produzione di calore ed elettricità: tra i principali si riscontra la minor efficienza durante la combustione, se comparata con l'utilizzo di biomassa legnosa⁹, ma anche il minor peso specifico, il minor potere calorifico per unità di peso e il maggiore contenuto di ceneri e di altri composti indesiderati in quanto corrosivi, quali potassio (K), fosforo (P), zolfo (S), o inquinanti quali zolfo (S), azoto (N) e cloro (Cl)¹⁰.

Le strategie per ridurre nella biomassa le concentrazioni di questi elementi includono: l'utilizzo di piante con ciclo fotosintetico C_4 in luogo di piante con ciclo fotosintetico C_3 , in quanto più efficienti nell'uso della risorsa idrica (la silice, in forma di acido silicico, è

⁹ Samson, Mehdi, 1998.

¹⁰ Kavalov, Peteves, 2004.

CENERI E MICROINQUINANTI: IMPLICAZIONI IN FASE DI COMBUSTIONE

Elevati contenuti in cenere implicano un tendenziale aumento del numero medio degli interventi di gestione della caldaia e in particolare di quello relativo allo svuotamento del box delle ceneri, un contestuale aumento del pericolo di formazione di scorie e depositi (con la conseguente possibile formazione di incrostazioni negli scambiatori di calore e l'inevitabile riduzione del rendimento finale della caldaia), ed un aumento delle emissioni di particolato.

Elevate concentrazioni di alcuni importanti microelementi possono comportare invece problemi agli impianti (rischi di corrosione, ecc.) e la produzione di emissioni inquinanti in atmosfera: un elevato contenuto di cloro (Cl) e zolfo (S), ad esempio, è potenzialmente responsabile della formazione di acido cloridrico (HCl) e ossidi di zolfo (SO_x), che oltre a comportare rischi di corrosione, sono inquinanti atmosferici.

Un aumento del contenuto di potassio (K) porta invece ad un abbassamento del punto di fusione delle ceneri e quindi aumenta il pericolo di formazione di depositi e scorie fuse (*clinker*) nella caldaia; inoltre si ha un aumento della quantità degli aerosols che si formano durante la combustione, con conseguente imbrattamento del boiler e un incremento delle emissioni di particolato¹¹.

infatti facilmente traslocata alla pianta mediante assorbimento dell'acqua); evitare l'utilizzo di fertilizzanti contenenti cloro; preferire la coltivazione su terreni sabbiosi piuttosto che argillosi (è stato dimostrato infatti che, nel primo caso, il contenuto di ceneri alla raccolta è inferiore¹²). Infine, la raccolta effettuata nel tardo inverno, ove il ciclo colturale lo rende possibile come nel caso delle colture erbacee perennanti, favorisce la traslocazione di elementi quali il potassio e il cloro dagli apparati epigei (parte aerea della pianta) agli apparati radicali, riducendo in tal modo la concentrazione di questi inquinanti nella biomassa raccolta¹³. Per alcune specie (graminacee), inoltre, la silice è presente in maggiore quantità nelle fo-

¹¹ Obernberger, Thek, 2002.

¹² Sander, 1997.

¹³ Samson et al., 2000.

glie e nelle infiorescenze e quindi la permanenza in campo della coltura in inverno, periodo durante il quale la pianta subisce la defogliazione, garantisce un deciso decremento del contenuto di silice e di ceneri nel raccolto¹⁴.

In conclusione una adeguata scelta delle colture da impiegare, della tipologia di terreno e una opportuna tecnica agronomica, in particolar modo nell'individuazione del periodo ottimale di raccolta, influenzano fortemente la qualità finale della biomassa erbacea.

Culture oleaginose

Le colture oleaginose e le colture alcoligene si differenziano dalle colture finora trattate poiché non forniscono direttamente il biocombustibile, bensì la materia prima da cui ricavare lo stesso attraverso trasformazioni chimiche e biochimiche (vedi il paragrafo 3.2).

Tra le colture oleaginose vanno annoverate molte specie, diffuse su scala mondiale, sia arboree (la palma da cocco), sia erbacee (il girasole, il colza e la soia).

In linea generale le colture oleaginose producono semi caratterizzati da un elevato contenuto in oli: nel girasole il contenuto in oli è in media del 48% con punte del 55% mentre nel colza è in media del 41% con picchi del 50%. I semi di soia presentano delle concentrazioni inferiori comprese, in media, tra il 18 e il 21%; per tale motivo, ai fini della destinazione energetica, questa coltura risulta spesso sfavorita rispetto alle precedenti.

Gli oli grezzi ottenuti dalle colture oleaginose sono caratterizzati da un elevato potere calorifico inferiore (in media di 9.400 kcal/kg), per cui possono essere utilizzati come biocarburanti, in sostituzione del gasolio, per la produzione di energia termica ed elettrica e in cogenerazione. La loro conversione in biodiesel ne consente l'impiego anche per l'autotrazione¹⁵.

Le rese colturali in termini di disponibilità di biocarburante per ettaro sono riportate nella tabella 5. Ulteriori dettagli, relativamente alle esigenze edafiche (del suolo) e climatiche delle colture, sono riportati nel paragrafo 6.1 (Allegato 1).

¹⁴ Samson, Mehdi, 1998.

¹⁵ www.cti2000.it

Tabella 5 - Rese delle colture oleaginose in termini di produzione di semi, di olio grezzo e di biodiesel¹⁶

Coltura oleaginosa	Resa in semi	Resa in olio grezzo estratto	Resa in biodiesel
	t/ha	t/ha	t/ha
Colza	2,7	1,0	0,9
Girasole	3,0	1,1	1,0

Colture alcoligene

Con il termine alcoligene ci si riferisce a quelle colture atte alla produzione di biomassa dagli elevati contenuti in carboidrati fermentescibili che possono essere destinati, mediante un processo di fermentazione, alla produzione di bioetanolo da utilizzarsi quale biocarburante in sostituzione della benzina o dei composti antidetonanti (ad esempio MTBE).

La materia prima da avviare alla filiera di produzione del bioetanolo può essere costituita da zuccheri semplici (in primis saccarosio e glucosio), o da zuccheri complessi (amido) ed è ottenuta, rispettivamente, dalle colture dedicate saccarifere o da quelle amilacee.

Tra le colture saccarifere, quelle ritenute adatte alle condizioni del terreno e del clima in Italia, sono la barbabietola da zucchero e il sorgo zuccherino, tra le colture amilacee il frumento tenero, soprattutto nell'Italia meridionale, e il mais, in particolare nell'Italia settentrionale.

Le colture saccarifere presentano un elevato contenuto in zuccheri semplici: l'estratto zuccherino fermentescibile nella barbabietola costituisce in media il 20% della biomassa secca raccolta, nel sorgo il 18%.

Le colture amilacee contengono l'amido in forma di granuli e i residui di glucosio che lo compongono possono essere idrolizzati e, successivamente, fermentati a bioetanolo: il frumento tenero presenta un contenuto in amido corrispondente al 70%, il mais pari al 78%.

Le principali caratteristiche delle colture alcoligene saccarifere e amilacee menzionate, in termini di resa in bioetanolo per ettaro di superficie coltivata, sono illustrate nella tabella 6.

¹⁶ www.cti2000.it/biodiesel.htm

Tabella 6 - Rese produttive delle colture alcoligene in termini di bioetanolo¹⁷

Coltura	Resa in bioetanolo
	t/ha
Barbabietola da zucchero	5,5
Sorgo zuccherino	4,5
Frumento tenero	2,5
Mais	3-6

Ulteriori approfondimenti in merito alle colture energetiche dedicate sono esposti nel paragrafo 6.1 (Allegato 1) dove sono presentati, in schede, per ogni singola specie le principali caratteristiche botaniche e morfologiche, alcuni cenni sulle tecniche colturali, le potenzialità produttive nell'ambito del territorio regionale.

Il ricorso alle colture dedicate per la produzione del bioetanolo si presta, tuttavia, ad alcune osservazioni. Uno studio, condotto dall'ENEA in collaborazione con l'Università degli Studi dell'Aquila, infatti, solleva il tema dell'impegno, in termini di superficie agricola investita, necessario a sostenere tali coltivazioni. Nello studio si evidenzia come, nell'ipotesi di utilizzare in Italia il bioetanolo come biocarburante in sostituzione dei combustibili fossili, si dovrebbero destinare alle colture alcoligene 60.000-70.000 km² di terreno agricolo, pari al 40% della SAU (Superficie Agricola Utilizzata) e al 20% dell'intero territorio nazionale¹⁸.

Contestualmente, è necessario sottolineare come la concorrenza rappresentata dal settore alimentare costituisca un forte elemento di freno allo sviluppo in Italia della filiera del bioetanolo a partire da queste colture.

Assume pertanto un'importanza crescente, la possibilità di valorizzare in termini energetici i residui produttivi il cui reperimento incide in misura molto più contenuta sui costi di produzione del biocarburante. A questo scopo si prestano gli scarti della produzione ortofrutticola, che si possono avvalere delle stesse tecnologie impiegate per le materie prime derivanti dalle colture dedicate saccarifere e amilacee. Un ruolo di notevole rilievo può essere svolto anche dai residui lignocellulosici provenienti dalle lavorazioni agricole e dalla frazione organica dei rifiuti solidi urbani; per tali materie prime la filiera produttiva è in corso di ottimizzazione.

¹⁷ INRA, TEAGSC Crop Research Center, McALoon, NREL, 2000.

¹⁸ Zimbardi et al., 2002.

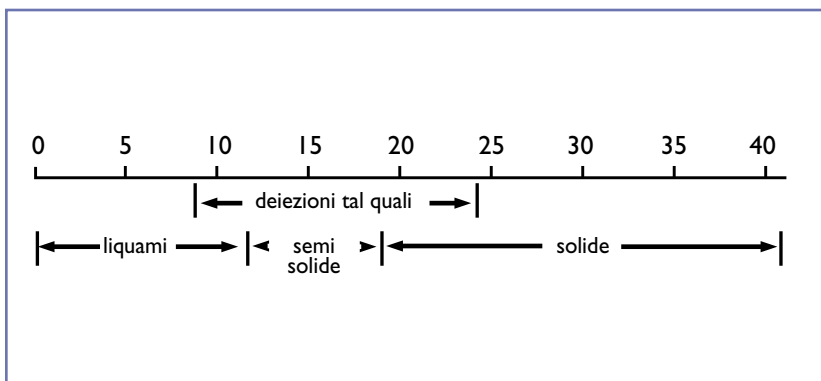
1.2.3 Il comparto zootecnico

Con il termine deiezioni zootecniche vengono definiti i prodotti di scarto (o reflui) di un allevamento, risultato della miscela di feci, urine, acqua, lettiera, peli, residui alimentari, ecc. Si parla invece di deiezioni tal quali o propriamente dette, quando ci si riferisce solamente al sottoprodotto fisiologico degli animali (feci e urine).

Le deiezioni zootecniche presentano una composizione estremamente variabile non solo in funzione dell'origine (bovina, suina, avicola, ecc.), ma anche in funzione delle modalità di allevamento e di gestione. In particolare l'apporto di acqua e quindi, all'opposto, il contenuto in sostanza secca, gioca un ruolo determinante nella scelta della modalità di trattamento/smaltimento più idonea.

In figura 1 viene illustrata la classificazione delle deiezioni zootecniche sulla base del contenuto in sostanza secca.

Figura 1 - Classificazione delle deiezioni zootecniche in funzione del contenuto di sostanza secca



Le deiezioni zootecniche, ricadenti nella definizione di liquame, sono quelle che meglio si prestano allo sfruttamento energetico mediante digestione anaerobica in quanto il loro contenuto di sostanza secca è inferiore al 10-12%.

Il potenziale energetico dei liquami zootecnici è in diretto rapporto con il contenuto in sostanza organica. Infatti è proprio la sostanza organica che, attraverso il processo di fermentazione o di digestione anaerobica (vedi par. 3.3.1), dà luogo alla formazione di biogas, combustibile ad alto potere calorifico.

Come si evince dai dati riportati nella tabella 7, è questo il caso dei liquami bovini e suini, caratterizzati appunto da un elevato tenore di sostanza organica (o solidi volatili).

Tabella 7 - Rendimento in biogas di liquami bovini e suini

Materiale	Sostanza secca (ss)	Sostanza organica (solidi volatili - sv)	Rendimento biogas
	%	% sulla ss	Nm ³ /kg SV
Liquame suino	3-8	70-80	0,25-0,50
Liquame bovino	5-12	75-85	0,20-0,30

Oltre alla quantità di sostanza organica presente è altrettanto importante considerare la qualità del materiale in quanto tale aspetto può condizionare il rendimento in biogas e il contenuto in metano. I fattori di particolare rilievo sono:

- **composizione del materiale:** condiziona la velocità di degradazione (degradabilità) che, in senso decrescente, può essere così schematizzata: lignina → cellulosa → grassi → proteine → carboidrati. Un liquame bovino, a maggior contenuto di materiale cellulosico, presenta una velocità di degradazione superiore a un liquame suino più ricco in grassi che, tra l'altro, sono la sostanza che consente di ottenere maggiori rendimenti di biogas;
- **presenza di elementi essenziali:** il carbonio, l'azoto, il fosforo e lo zolfo sono elementi essenziali alla crescita dei batteri responsabili del processo di fermentazione. Il rapporto tra carbonio e azoto (C/N) non deve mai superare il valore di 35, con un ottimo di 30;
- **presenza di elementi tossici:** sono spesso micronutrienti quali sodio (Na⁺), potassio (K⁺), calcio (Ca²⁺), magnesio (Mg²⁺), ammonio (NH⁴⁺), zolfo (S²⁻) che, se presenti in eccesso, possono indurre tossicità. Anche i metalli pesanti quali rame (Cu²⁺), nichel (Ni²⁺), cromo (Cr), zinco (Zn²⁺), piombo (Pb²⁺) possono risultare dannosi se presenti in concentrazioni superiori a 1 mg/l. Altre sostanze capaci di bloccare la digestione sono i detergenti e i composti chimici di sintesi.

1.2.4 I residui delle attività industriali

L'industria del legno

L'industria del legno produce tre tipologie di scarti di lavorazione:

- **scarti di legno vergine** provenienti da segherie, carpenterie e falegnamerie, ecc. e costituiti da residui di legno naturale di varia pezzatura (segatura, trucioli, cippato, ecc.);
- **scarti di legno trattato** provenienti dalla produzione di pannelli a base di legno e dalla produzione di mobili e arredi in legno costituiti da residui con presenza di colle e/o prodotti vernicianti (compreso polverino di levigatura o sagomatura);
- **scarti di legno impregnato** provenienti dalla produzione di manufatti particolari, quali pali telefonici e traversine ferroviarie, e costituiti da residui legnosi impregnati con preservanti a base di sali¹⁹.

Ai fini energetici, salvo nel caso di impianti dotati di tecnologia anti-inquinamento, possono essere utilizzati solo i residui e i sottoprodotti legnosi non trattati chimicamente (ad esempio residui da scortecciatura, taglio, pressatura, ecc.) o trattati con prodotti non contenenti metalli pesanti o composti alogenati organici (questi ultimi sono tipici del legno trattato con preservanti o con altre sostanze chimiche²⁰). Tali raccomandazioni sono dettate dalla necessità di evitare che in fase di combustione possano svilupparsi gas nocivi.

Le principali caratteristiche dei residui derivanti dal comparto dell'industria del legno sono sintetizzate nella tabella 8.

Tabella 8 - Caratteristiche peculiari dei principali residui dell'industria del legno

Tipologia di lavorazione	Tipologia di scarto	Umidità	Granulometria
Segheria	Cippato	Elevata (50%)	Grossolana
	Segatura	Elevata (50%)	Fine
Falegnameria/Mobilifici	Trucioli	Bassa (15-17%)	Grossolana
	Segatura	Bassa (15-17%)	Fine
	Polverino	Bassa (15-17%)	Fine

¹⁹ www.federlegno.it/servizi/una/pdf.combustionelegno.pdf: Settore legno-arredamento: l'importanza della combustione degli scarti legnosi. Il caso del Triveneto.

²⁰ www.cti2000.it: "Raccomandazione CTI sui biocombustibili solidi: Specifiche e Classificazione". CTI R03/01, aprile 2003.

In base a uno studio condotto da Cerullo e Pellegrini²¹, la produzione di scarti legnosi da parte del sistema legno arredamento italiano ammonta a oltre 4,6 milioni di tonnellate all'anno, di cui il 55% è legno non trattato. Questa grande quantità di residui ha già, allo stato attuale, un mercato: in linea di massima è utilizzato a fini energetici oppure quale materia prima secondaria per la produzione di pellet, di pannelli e nella produzione di carta. Le aziende compiono la scelta tra le diverse destinazioni in funzione alle necessità energetiche degli impianti, alle capacità di investimento in tecnologie per il riutilizzo dei materiali, alle condizioni di mercato nonché agli obblighi di legge²².

C'è inoltre da dire che il mercato energetico delle biomasse legnose soffre la concorrenza proprio del settore che le fornisce una quota parte della materia prima. L'industria, e quindi il mercato, dei pannelli truciolari e dell'MDF (*Medium Density Fibreboard*) assorbe quote consistenti di scarti legnosi: i primi vengono realizzati in parte con materiale non "vergine", come i residui di imballaggi, mobilio, edilizia, ecc., unitamente a biomasse "più pulite", purché reperibili a condizioni convenienti; l'MDF è costituito da materiale lignocellulosico ridotto allo stato di pura fibra, poi ricompattato ad elevata temperatura, al fine di ottenere un prodotto con particolari caratteristiche fisico-meccaniche, utilizzando prevalentemente materiale di alta qualità derivante direttamente dalle risorse forestali.

Tale concorrenza comporta una certa difficoltà a reperire la biomassa grezza, tanto che l'approvvigionamento avviene spesso all'estero, a un prezzo sostenuto.

L'industria della cellulosa e della carta

I residui di produzione dell'industria cartaria sono idonei al recupero sia di materia che di energia. Tali residui si presentano principalmente sotto forma di fanghi e sono generalmente prodotti dal processo di depurazione delle acque, sia chimico-fisico che biologico. Gli scarti di lavorazione, gli sfridi e i foglietti, sono invece riavviati direttamente in testa all'impianto e rimessi in produzione.

Minore importanza hanno i rifiuti di vario genere, quali scarti di fer-

²¹ Cerullo, Pellegrini, 2002.

²² APAT, 2003.

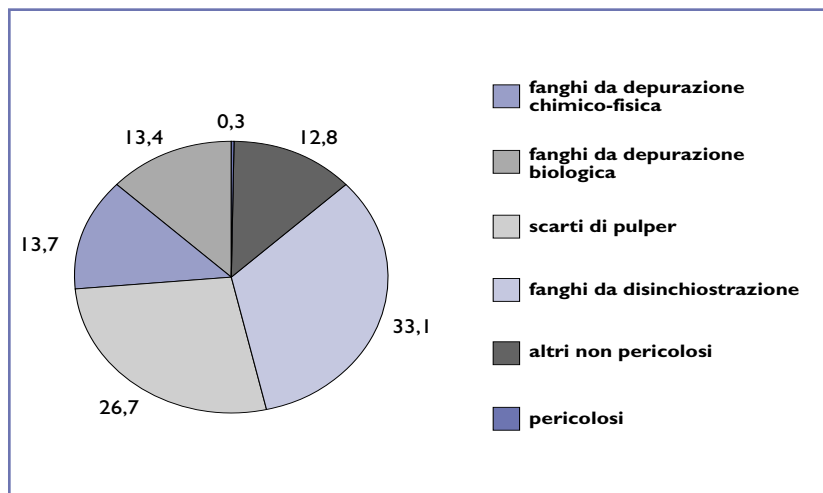
ro, legno e plastica provenienti dalla gestione degli imballaggi, gli oli esausti e i rifiuti assimilabili agli urbani²³.

Una menzione a parte va fatta per i residui del processo di riciclo della carta da macero. Si tratta essenzialmente di scarti di pulper (derivanti dalla separazione della fibra dalle impurità più grossolane) e fanghi di disinchiostrazione (ottenuti a seguito della separazione dell'inchiostro dalla fibra cellulosica).

Negli ultimi anni si è registrato un incremento nella generazione di rifiuti dovuto, essenzialmente, al potenziamento delle capacità di trattamento degli impianti di depurazione delle acque e all'aumentato impiego del macero, caratterizzati da un più elevato contenuto di impurità e di fibra non riutilizzabile.

Nel grafico riportato in figura 2 è presentata l'attuale tipologia di rifiuti di cartiera²⁴ dove si evidenzia come la maggior parte dei residui della produzione della carta siano fanghi.

Figura 2 - Tipologia dei residui di cartiera



La mancanza di un quadro normativo certo non ha comunque permesso lo sviluppo di forme avanzate di trattamento dei rifiuti, come già avvenuto in altri Paesi della Comunità Europea. È da segnalare

²³ APAT, ARPA, 2003.

²⁴ ARPA FVG, Assocarta, Associazione degli Industriali, 2005.

infatti come, in Italia, la percentuale di residui dell'industria cartaria avviati al recupero energetico è pari al 12,5%, mentre la media europea (Italia inclusa) si attesta su un valore superiore al 50%²⁵. Inoltre, non tutti i residui da produzione cartaria sono riconosciuti quale combustibile adeguato e pulito (Direttiva Europea 2000/76²⁶) e ciò comporta l'obbligo dello smaltimento in discarica di residui altrimenti utilizzabili per il recupero di energia.

L'industria agroalimentare

Alcuni materiali di scarto provenienti dalle lavorazioni dell'industria agroalimentare si prestano al trattamento mediante digestione anaerobica per il loro elevato carico organico e il loro alto tenore di umidità. I principali scarti dell'industria agroalimentare, che possono essere sfruttati per il recupero energetico mediante biometanazione con una produzione specifica di biogas compresa tra 0,25-0,35 m³/kg ss, vengono di seguito riportati.

Settore lattiero caseario

Il rifiuto principale della lavorazione del formaggio è indubbiamente il siero. Esso costituisce infatti circa l'80-90% del latte lavorato; derivano pertanto ingenti quantità, prodotte giornalmente. Dato l'elevato carico organico, un litro di siero corrisponde a una quantità di refluo equiparabile a quello prodotto da 40-45 abitanti equivalenti (A.E.)²⁷. Da secoli il metodo più diffuso di utilizzazione del siero è il conferimento per alimentazione animale, in particolare per quella suina, grazie al suo elevato contenuto calorico e proteico. Oggi, tuttavia, la graduale riduzione del prezzo di vendita del siero ha favorito la ricerca di alternative per la valorizzazione di questo materiale, sia attraverso il recupero delle proteine, sia attraverso la valorizzazione energetica mediante produzione di biogas da digestione anaerobica (in codigestione con altri substrati al fine di evitare una eccessiva acidificazione). Il rendimento in biogas è stimato mediamente in 0,35 Nm³/kg ss.

²⁵ Assocarta, 2004.

²⁶ Direttiva Europea 2000/76 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 4 dicembre 2000 sull'incenerimento dei rifiuti.

²⁷ A.E. (*abitante equivalente*): unità che genera un carico organico giornaliero di 60 gBOD/giorno.

Comparto della macellazione

La produzione di carne per l'alimentazione umana comporta la parallela produzione di una grande quantità di rifiuti e sottoprodotti che, in linea indicativa, rappresentano circa il 40-50% del peso vivo dell'animale di partenza. Gli effluenti presentano alti carichi organici dovuti alla presenza di sangue, grasso e materiale stercorario, oltre che di deiezioni. La qualità degli effluenti, comunque, dipende dalle precauzioni che vengono adottate nel recupero/gestione del sangue, dei grassi e dei contenuti intestinali.

Lavorazione e conservazione di pesce

Le attività che riguardano la preparazione di pesce fresco e dei molluschi finalizzate alla produzione di prodotti congelati o in scatola, producono effluenti ricchi di residui a base di carne, sotto forma per lo più di acque di lavaggio.

Industria delle bevande

Rivestono particolare interesse i residui a elevato carico organico (zuccheri, alcol, ecc.) provenienti dalla lavorazione di succhi di frutta, birra (lieviti esausti e acque di lavaggio), distillati (borlande di distillazione, acque di lavaggio).

Industria saccarifera

Gli effluenti derivati in particolare dalla fase di lavorazione del melasso, grazie all'elevato contenuto in sostanza organica, possono venire utilizzati per lo sfruttamento a scopi energetici mediante digestione anaerobica con produzione di biogas.

1.2.5 I residui urbani

Data la composizione merceologica dei rifiuti solidi urbani (RSU), evidenziata nella tabella 9, le componenti che rientrano nella definizione di biomassa e che quindi possono essere considerate fonti rinnovabili d'energia, comprendono tutta la frazione verde biodegradabile, che può essere suddivisa in una componente formata da scarti lignocellulosici e da una componente organica umida.

Tabella 9 - Composizione merceologica dei rifiuti²⁸

Frazioni merceologiche dei rifiuti solidi urbani	Valori percentuali
Sottovaglio	11,7-12,7
Frazione organica	25,4-29,8
Scarti lignocellulosici	3,6-5,8
Carta e cartoni	21,8-24,7
Plastiche leggere	6,9-8,3
Plastiche pesanti	2,7-3,8
Vetro e inerti pesanti	6,7-7,6
Tessili	5,4-6,0
Metalli	2,8-3,5
Cuoio e gomma	2,4-3,3
Pannolini	1,7-2,8

Fanno parte degli scarti lignocellulosici i residui urbani che derivano dalla gestione di giardini e di viali pubblici e privati interni ai centri abitati. Una notevole quantità di biomassa è ricavabile da tali operazioni, che vengono condotte con regolarità dalle Amministrazioni locali, attraverso la raccolta differenziata, mediante la creazione di apposite aree di ritiro o mediante il ritiro su chiamata dell'azienda municipalizzata. Le caratteristiche analitiche di queste biomasse sono fortemente disomogenee e variano in funzione della percentuale di frazione erbacea o legnosa presente. Si tratta comunque di una biomassa con contenuto di umidità e pezzatura molto variabile. Sebbene questa frazione di rifiuti urbani, quando raccolta in modo differenziato, venga avviata generalmente a compostaggio, può trovare utilmente impiego, dopo condizionamento, in impianti per la produzione di calore e/o elettricità mediante combustione.

La frazione organica dei rifiuti a maggiore contenuto di umidità può invece trovare utilmente impiego nella produzione di biogas, sfruttando i processi di fermentazione in condizioni di anaerobiosi (digestione anaerobica). Tali processi si verificano anche nelle discariche con un elevato livello di compattazione del materiale. In questi casi, mediante appositi sistemi di captazione (discariche controllate), è possibile il collettamento e l'accumulo del biogas che può venire in tal modo impiegato a scopi energetici.

²⁸ www.federambiente.it

1.3 Forme commerciali

1.3.1 Le biomasse combustibili allo stato solido

Le biomasse lignocellulosiche, prima di essere immesse sul mercato, subiscono generalmente un processo di trasformazione più o meno complesso volto a conferire loro caratteristiche fisiche ed energetiche idonee all'impiego nei più comuni impianti energetici. Le principali forme commerciali per tale categoria di biomasse sono: legna da ardere (in ciocchi o tronchetti), cippato, pellet e bricchetti.

Legna da ardere

La legna è generalmente venduta in ciocchi o tronchetti, con pezzature che vanno dai 50 ai 500 mm, e tenori in umidità inferiori al 50% a seconda del tempo e della tipologia di stagionatura a cui è sottoposta la biomassa. L'utilizzo di questa tipologia di biocombustibile, operata quasi esclusivamente a livello domestico in piccoli impianti alimentati manualmente, è oramai in declino a favore di forme densificate quali bricchetti e, soprattutto, pellet. Le caldaie a legna, infatti, oltre e non offrire possibilità di automazione nel caricamento del combustibile hanno in genere una minore efficienza energetica (50-60% comparata con 75-90% per caldaie a chips e pellet legnosi).

Cippato

Per rendere omogenea la composizione dei materiali, legnosi e non, e renderli quindi adatti anche all'alimentazione automatica degli impianti energetici, si può ricorrere alla cippatura, operazione meccanica che riduce gli assortimenti in scaglie di piccole dimensioni denominate *chips*, da cui il nome. Tale operazione può essere applicata indifferentemente alle biomasse legnose e a quelle erbacee.

Figura 3 - A sinistra cippato di coltura erbacea poliennale (*Arundo donax*); a destra cippato di biomassa legnosa



La geometria dei chips varia con le tecniche di taglio adottate, in funzione delle dimensioni richieste dal tipo di impianto di trasformazione energetica e, soprattutto, del suo sistema di alimentazione: essi hanno tipicamente una lunghezza variabile da 15 a 50 mm, una larghezza pari a circa la metà della lunghezza e uno spessore variabile da un quinto a un decimo della lunghezza. Una dimensione tipica è 40x20x3mm. L'omogeneità (ottenuta con la calibratura tramite vagli) è il parametro più importante per i chips destinati alla combustione, dato che la presenza di chips di dimensioni disomogenee provoca spesso fastidiosi blocchi dei sistemi d'alimentazione degli impianti.

Il tenore di umidità desiderato è tipicamente ottenuto previo stoccaggio in cumulo, per un tempo idoneo: le tecnologie disponibili per la combustione del cippato accettano biomassa con un'umidità massima del 50%. Importante è anche il tenore di umidità della biomassa di partenza che deve essere compreso tra il 25% e il 50%: valori al di sotto o al di sopra di queste soglie possono infatti causare problemi al funzionamento della cippatrice.

Sul mercato italiano esistono delle cippatrici di varia potenza in grado di lavorare legname di diversa qualità e dimensione (fino a diametri di 30 cm), con capacità di lavoro variabili da qualche tonnellata fino a qualche decina di tonnellate l'ora, sia automotrici, sia portate da trattori agricoli. Le cippatrici si distinguono per il sistema di taglio che può essere a disco (più diffuso e usato nelle cippatrici portate di piccole potenze) o a tamburo (disponibili in versioni molto pesanti e potenti)²⁹. Per la trinciatura di biomasse erbacee spesso si usano falciatrici-caricatrici, macchine che operano direttamente in campo tagliando alla base i fusti, sminuzzandoli e spingendoli, mediante sistema a pistone, direttamente sul rimorchio.

Forme densificate: il pellet

Con il termine pellet si intende un biocombustibile densificato, normalmente di forma cilindrica, ottenuto comprimendo della biomassa polverizzata con o senza l'ausilio di agenti leganti di pressatura.

²⁹ Spinelli, Hartsough, 2001.

Il grande interesse che sta suscitando il pellet, la cui produzione nazionale è stata stimata attorno alle 240.000 tonnellate nella stagione 2004/2005 e con un *trend* in forte crescita³⁰, risiede nel fatto che esso si comporta, nella movimentazione, similmente ai fluidi. Ciò permette un elevato grado di automazione degli apparecchi e degli impianti di combustione, al punto che nelle modalità di impiego essi si avvicinano agli impianti alimentati con olio combustibile, kerosene o GPL, e, per il solo esercizio, persino a quelli del gas naturale. Questa importante proprietà del pellet è dovuta alla particolare forma, dimensione e omogeneità dei suoi elementi, che possono venir convogliati al forno di combustione per mezzo di semplici congegni meccanici (es. coclee), con tutti i vantaggi in fatto di regolazione automatica, dosatura e alimentazione continua.

Figura 4 - Pellet



Ad oggi, il mercato del pellet è a esclusivo appannaggio della biomassa legnosa, in particolare di quella proveniente dai comparti di prima e seconda lavorazione del legno; tuttavia, diversi sono gli studi rivolti a sviluppare la filiera del pellet da colture erbacee o da una miscela di queste con biomasse legnose. Tuttavia la diversa qualità della biomassa di partenza, soprattutto in termini di potere calorifico e di contenuto in ceneri, porta a una inevitabile diversa qualità finale del pellet, come diversa sarà la destinazione d'uso. Invariata, invece, risulta essere la tecnologia e la filiera di produzione del pellet per le due diverse tipologie di biomassa (vedi paragrafo 3.1).

³⁰ Riva, 2004.

I VANTAGGI DEL PELLET

Rispetto alle biomasse non densificate, come la segatura, il cippato, le ramaglie, ecc., il pellet presenta notevoli vantaggi che gli permettono di essere molto più apprezzato sul mercato, rispetto al materiale di partenza. Tra i più importanti ricordiamo i seguenti:

Elevata densità apparente (*bulk density*): questo fattore, che può variare tra i 650 ed i 780 kg/m³, dipende dalla forma e dalle dimensioni del materiale, dall'umidità e dalla porosità. Il pellet presenta mediamente una densità 7 volte superiore alla segatura e 3 volte superiore al cippato³¹, e ciò ne ottimizza il trasporto e lo stoccaggio.

Basso contenuto in umidità: le normative austriaca e svedese prescrivono un limite massimo del 10%. Tale valore è stato preso come riferimento anche dal Comitato Termotecnico Italiano (Raccomandazione CTI R04/05) sulla qualità del pellet. Il basso contenuto idrico migliora il rendimento della combustione e contribuisce a ridurre i costi di trasporto; un ulteriore vantaggio si ha nello stoccaggio del combustibile che non rischia di incorrere in fenomeni fermentativi.

Alto potere calorifico per unità di peso: il potere calorifico del pellet è determinato dalla composizione e dalla struttura della biomassa impiegata per la sua fabbricazione. Il pellet di legno ha un p.c.i. di circa 4.000 kcal/kg, valore energetico elevato tra i biocombustibili.

Equivalenza energetica tra pellet e combustibili fossili

	Pellet us=9%	gasolio	gasolio	olio combust.	gas naturale	GPL	carbone
	kg	litri	kg	kg	m3	kg	kg
1 kg di pellet $u_s=9\%$	1,00	0,46	0,40	0,41	0,49	0,37	0,58
1 litro di gasolio	2,17	1,00	0,86	0,89	1,06	0,80	1,25
1 kg di gasolio	2,52	1,16	1,00	1,04	1,24	0,93	1,46
1 kg di olio combustibile	2,43	1,12	0,96	1,00	1,19	0,89	1,40
1 m3 di gas naturale	2,04	0,94	0,81	0,84	1,00	0,75	1,18
1 kg di GPL	2,72	1,26	1,08	1,12	1,33	1,00	1,57
1 kg di carbone	1,73	0,80	0,69	0,71	0,85	0,64	1,00
p.c.i. (kWh/quantità)	4,70	10,19	11,86	11,40	9,59	12,79	8,14

Omogeneità del materiale sia dal punto di vista delle caratteristiche fisiche che qualitative: le prime, unite alle piccole dimensioni del pellet, permettono una facilità di movimentazione del prodotto mediante coclee,

³¹ Nocentini, Faini, 2004.

nastri trasportatori o sistemi pneumatici di aspirazione e la possibilità di utilizzo in caldaie automatizzate, mentre le seconde permettono una migliore regolazione della combustione e un miglior controllo delle emissioni. Inoltre il vantaggio di un prodotto standardizzato, quale si vuol far diventare il pellet facendo rispettare precise norme qualitative, e riportando le informazioni sulle caratteristiche chimico-fisiche in etichetta, riduce il rischio di incorrere in materiale di scarsa qualità (eccessiva umidità, impurità, contenuto in ceneri, pezzatura disomogenea, ecc.).

Flessibilità operativa nella produzione: un impianto di pellettizzazione può operare con diverse tipologie di materiale lignocellulosico, riuscendo così a sfruttare tutte le possibili fonti di biomassa, dagli scarti di segheria, con qualità omogenea e produzione costante nel tempo, alle colture dedicate e ai residui colturali che sono

In Italia attualmente mancano specifiche normative volte a regolamentare la produzione di pellet, con riferimento sia alle caratteristiche dell'assortimento sia ai requisiti degli apparati utilizzatori; ciò è probabilmente dovuto al fatto che lo sviluppo del mercato del pellet nel nostro Paese è recente. Le uniche norme tecniche e legislative attualmente in vigore sono atte a regolamentare il materiale d'origine e il relativo utilizzo su impianti termici generici.

IL DECRETO COMBUSTIBILI

Il "DPCM Combustibili"³², che individua le biomasse combustibili e le relative condizioni di utilizzo ai fini dell'impiego negli impianti di combustione civile e industriali, ammette come materia prima per la produzione di biocombustibili le seguenti fonti:

- coltivazioni dedicate (energetiche);
- trattamento esclusivamente meccanico di coltivazioni non dedicate;
- interventi selvicolturali, da manutenzioni forestali e da potatura;
- lavorazione esclusivamente meccanica di legno vergine e costituito da corteccia, segatura, trucioli, chips, refili e tondelli di legno vergine, granulati e cascami di legno vergine, di sughero vergine, tondelli, non contaminati da inquinanti, aventi le caratteristiche previste per la commercializzazione e l'impiego;
- lavorazione esclusivamente meccanica di prodotti agricoli aventi le caratteristiche previste per la commercializzazione e l'impiego.

³² Decreto della Presidenza del Consiglio dei Ministri – DPCM 8 marzo 2002: "Disciplina delle caratteristiche merceologiche dei combustibili aventi rilevanza ai fini dell'inquinamento atmosferico, nonché delle caratteristiche degli impianti di combustione". (GU n. 154 del 3/7/02)

Il Comitato Termotecnico Italiano (CTI), anticipando il legislatore nella definizione di una specifica normativa di regolamentazione, ha fornito una raccomandazione per la caratterizzazione del pellet a fini energetici, che ha la finalità di migliorare le condizioni di commercio di questo materiale e di migliorare i rapporti tra gli attori del sistema (costruttori di impianti di pellettizzazione, produttori di pellet, costruttori di impianti di combustione, commercianti e utenti finali). In tale documento il CTI fornisce una caratterizzazione del pellet mediante l'individuazione di 4 categorie distinte, definite in funzione della materia prima d'origine e delle caratteristiche fisiche e chimiche del prodotto finito. Due di queste categorie (B e C) contemplano anche l'uso di biomassa derivante da colture e residui erbacei, nonché da residui agroindustriali (tabella 10). È da ricordare che le direttive europee n. 2000/76 e n. 2001/80 CEN/TC 335 contemplano anche l'uso di scarti dell'industria agroalimentare.

Forme densificate: il bricchetto

Al pari della pellettizzazione, la bricchettatura rappresenta una tecnologia di rilevante interesse in quanto, riducendo notevolmente la densità del materiale, consente di concentrare elevate riserve energetiche in un volume contenuto. Il bricchetto, infatti, è un biocombustibile, solitamente in forma di parallelepipedo o cilindro, ottenuto comprimendo della biomassa polverizzata con o senza l'ausilio di additivi di pressatura.

La densificazione della biomassa in bricchetti, presenta gli stessi vantaggi e svantaggi della trasformazione in pellet: in seguito al processo di bricchettatura si ottiene infatti un miglioramento delle caratteristiche fisiche della biomassa (densità, omogeneità, ecc.), una riduzione dei volumi, una riduzione dei costi di stoccaggio e trasporto e un miglioramento del comportamento durante la combustione. Al contempo però il processo di bricchettatura, al pari della pellettizzazione, necessita di un preventivo condizionamento del materiale e in particolare dell'essiccazione della biomassa fino a valori di umidità pari all'8-10%, al fine di ottenere bricchetti con umidità del 6-8%, condizione per la quale questi mostrano buona resistenza, non si fessurano e il processo di bricchettatura offre buone rese. È necessaria anche una fase di triturazione della biomassa, sino ad ottenere una granulometria di 6-8 mm, per raggiungere il migliore grado di compattazione del materiale e le migliori rese di bricchettatura.

Nella tabella 11 vengono presentate alcune caratteristiche di biomasse bricchettabili e il grado di idoneità alla bricchettatura.

Tabella 10 - Caratterizzazione del pellet su proposta del CTI³³

Parametro	Unità	Categoria					
		A senza additivi		A con additivi		B	C
Origine(a)	-	-Tronchi di latifoglie -Tronchi di conifere -Legno non trattato dell'industria del legno privo di corteccia -Legno non trattato post-consumo privo di corteccia -Miscela e miscugli delle categorie precedenti				-Biomassa legnosa non trattata -Biomassa erbacea non trattata -Frutti e semi non trattati -Miscela e miscugli delle categorie precedenti(b)	-Materie prime ammesse per la categoria B
Diametro (D)	mm	D = 6 ± 0,5	D = 8 ± 0,5	D = 6 ± 0,5	D = 8 ± 0,5	D = 6 ± 0,5 D = 8 ± 0,5	10 ± 0,5 ≤ D ≤ 25 ± 1,0
Lunghezza (L)	mm	D ≤ L ≤ 5 x D	D ≤ L ≤ 4 x D	D ≤ L ≤ 5 x D	D ≤ L ≤ 4 x D	D ≤ L ≤ 5 x D D ≤ L ≤ 4 x D	D ≤ L ≤ 4 x D
Umidità	% peso t.q.	≤ 10		≤ 10		≤ 10	≤ 15
Ceneri	% peso s.s.	≤ 0,7		≤ 0,7		≤ 1,5	Indicare il valore
Durabilità meccanica	% peso	≥ 97,7		≥ 97,7		≥ 95,0	≥ 90,0
Polveri	% peso	≤ 10		≤ 10		≤ 10	Indicare il valore

(segue)

³³ "Raccomandazione CTI sui biocombustibili solidi: Specifiche e Classificazione". CTI R03/01, aprile 2003. www.cti2000.it

(*continua*)

Parametro	Unità	Categoria			
		A senza additivi	A con additivi	B	C
Agenti leganti	% peso m.p.	Non presenti	Indicare tipologia e q.tà (c)	Indicare tipologia e q.tà (c)	Indicare tipologia e q.tà (c)
Azoto	% peso s.s.	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3	Indicare valore
Cloro	% peso s.s.	≤ 0,03	≤ 0,03	Indicare il valore	Indicare valore
Zolfo	% peso s.s.	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	Indicare valore
Densità apparente BD	Kg/m ³	620 ≤ BD ≤ 720	620 ≤ BD ≤ 720	600 ≤ BD ≤ 720	≥ 550
p.c.i.	MJ/kg t.q. (kcal/kg t.q.)	≥ 16,9 (≥ 4.039)	≥ 16,9 (≥ 4.039)	≥ 16,2 (≥ 3.870)	Indicare il valore

t.q. = tal quale; s.s. = sostanza secca; m.p. = massa pressata

(a) Definizioni tratte dalla classificazione CEN per le biomasse; tra le materie prime consentite sono escluse quelle che hanno subito un trattamento diverso da quello meccanico secondo quanto stabilisce la legislazione vigente.

(b) Vanno indicate le tipologie e le percentuali in peso delle diverse biomasse impiegate.

(c) Sono ammessi soltanto alcuni agenti leganti, come ad esempio amido di mais, olio vegetale grezzo estratto mediante spremitura meccanica ecc.

È necessario specificarne tipologia e quantità impiegata.

Tabella 11 - Caratteristiche di idoneità alla bricchettatura per alcune biomasse

Biomassa	Granulometria	Umidità	Ceneri	Idoneità
segatura	fine	<10	1,3	ottima
paglia	irregolare	10-15	1,5	ottima
cippato	irregolare	10-20	-	buona
pula di riso	fine	10	22,4	buona
gusci di noce	grossolana	<10	6,0	ottima
cotone	irregolare	10-15	4,6	buona
gusci di caffè	regolare	10	4,3	ottima

I bricchetti possono essere utilizzati in sostituzione della legna da ardere e del carbone, adeguando opportunamente alcuni parametri operativi, come ad esempio la distribuzione dell'aria primaria e secondaria: rispetto a questi due combustibili, infatti, i bricchetti richiedono una maggior quantità di aria secondaria e una minore quantità di aria primaria³⁴.

I bricchetti sono considerati un combustibile "migliore" rispetto alla legna non compattata in quanto hanno una capacità termica maggiore, ossia trattengono il calore per un periodo maggiore e mantengono la temperatura elevata all'interno del forno in modo tale da consentire una combustione agevole del combustibile nuovo in ingresso.

Le applicazioni più frequenti di questo tipo di combustibile sono sia di carattere domestico che industriale.

IDONEITÀ DELLE BIOMASSE LIGNOCELLULOSICHE ALLA TRASFORMAZIONE IN FORME COMMERCIALI

Le diverse tipologie di biomasse lignocellulosiche (arboree, erbacee perenni, erbacee annuali), si prestano in modo differente alla diverse lavorazioni.

- **Biomasse legnose:** si prestano sia alla vendita in ciocchi o tronchetti di legna, dopo una semplice operazione di parziale essiccazione naturale, sia alla cippatura, sia, ancora, alla trasformazione in pellet o bricchetti. Nel primo caso l'utilizzo è limitato ai piccoli impianti di riscaldamento domestici, mentre la cippatura è eseguita quando la biomassa è destinata all'impiego in grandi impianti industriali di generazione di calore. I bricchetti si presentano quali ottimi sostituti della legna da ardere. I pellet di bassa qualità, non idonei al commercio di biocombustibili per l'alimentazione dei piccoli impianti, possono essere efficacemente utilizzati in impianti industriali³⁵.

³⁴ Grover, Mishra, 1996.

³⁵ Kavalov, Peteves, 2004.

- **Biomasse erbacee:** si prestano alla produzione di chips o pellet. Tuttavia, vista la minor qualità del combustibile che si ottiene, sia esso cippato o densificato, non si rende appropriato l'utilizzo nei piccoli impianti, ma è consigliabile l'utilizzo negli impianti di grandi dimensioni dotati di opportuni accorgimenti per ottimizzare la combustione. Un possibile scenario futuro è la miscelazione di biomasse erbacee e legnose al fine di sfruttare sinergicamente le peculiarità dei due combustibili.

1.3.2 Le biomasse combustibili allo stato liquido

Gli oli vegetali

Gli oli estratti dai semi di colza e girasole sono, a tutti gli effetti e senza ulteriori modifiche, dei combustibili e, come tali, possono trovare un impiego nel settore energetico analogamente a quanto avviene per i combustibili liquidi di origine fossile. Le principali caratteristiche energetiche, poste a confronto con quelle del gasolio, sono riportate nella tabella 12.

Tabella 12 - Confronto tra le proprietà come carburanti degli oli combustibili vegetali e del gasolio³⁶

Parametri	Unità di misura	Oli combustibili vegetali	Gasolio
p.c.i.	kcal/kg	9.000-9.500	10.200
Flashpoint	°C	230-290	60
Numero di cetano	-	30-40	54
Densità	kg/m ³	0,915	0,839
Viscosità a 38°C	mm ² /s	27-53	2,7

Le attuali applicazioni energetiche degli oli vegetali sono relative all'impiego in motori diesel. L'alimentazione di impianti di produzione energetica in sostituzione al gasolio pone tuttavia alcune problematiche: i bruciatori devono essere parzialmente modificati per sopperire alla maggiore viscosità degli oli vegetali rispetto a quella del gasolio. Gli interventi richiesti, in particolare, sono a carico degli ugelli di polverizzazione ai quali devono essere cambiate le geometrie (al fine di ottenere l'angolazione, ottimale, di 45°), della temperatura di preriscaldamento (che deve essere impostata a 65°C) e della pressione di atomizzazione (che deve essere pari a 2,2 MPa)³⁷.

³⁶ www.biodiesel.org

³⁷ www.cti2000.it/biodiesel.htm

L'elevata viscosità esclude, allo stato attuale, l'applicazione degli oli vegetali tal quali per l'autotrazione. In questo caso, infatti, sarebbero necessarie importanti modifiche nella progettazione dei motori. In Germania e in Austria, tuttavia, sono in atto alcune esperienze per il loro utilizzo in mezzi nautici e in flotte vincolate, rese possibili da una forte politica di defiscalizzazione di tale tipo di biocarburanti.

Il biodiesel

La limitazione dell'utilizzo degli oli vegetali in alcune tipologie di motori, e in particolare di quelli per autotrazione, imposta dall'elevata viscosità del combustibile, è superabile mediante la trasformazione degli oli in biodiesel.

Gli oli vegetali sono costituiti prevalentemente da trigliceridi. La loro viscosità è più alta di quella dei carburanti di origine fossile: per gli oli vegetali è in media pari a 40 mm²/s, per il gasolio è pari a 3 mm²/s. La trasformazione in biodiesel ha l'effetto di convertire i trigliceridi in esteri metilici. Ciò riduce la viscosità del prodotto. La miscela di esteri metilici, denominata biodiesel, ha una viscosità simile a quella del gasolio, corrispondente in media a 5 mm²/s.

A fronte, quindi, di capitali investiti superiori a quelli necessari all'avvio della filiera finalizzata all'utilizzo energetico diretto degli oli vegetali, si ampliano i possibili scenari di impiego.

Come biocarburante, il biodiesel presenta alcune proprietà simili a quelle del gasolio; il confronto è riportato nella tabella 13.

Tabella 13 - Confronto tra le proprietà come carburanti del biodiesel e del gasolio³⁸

Parametri	Unità di misura	biodiesel	Gasolio
p.c.i.	kcal/kg	8.900	10.200
Flashpoint	°C	85-178	63
Viscosità a 38°C	mm ² /s	4,78	3,12
Numero di cetano	-	48-56	54
Densità	kg/m ³	885	839

³⁸ www.cti2000.it/biodiesel.htm

I principali impieghi del biodiesel come prodotto energetico prevedono la sostituzione del gasolio per l'autotrazione dei mezzi dotati di motori diesel e per l'alimentazione delle caldaie e dei gruppi elettrogeni. L'impiego del biodiesel come carburante per l'autotrazione appare particolarmente interessante sia perché è già teoricamente possibile alimentare i motori diesel attualmente in commercio con una miscela di gasolio e biodiesel, sia perché vi è attualmente un forte interesse da parte della Commissione Europea a sviluppare la filiera dei biocarburanti.

La direttiva 2003/30 del Parlamento Europeo e del Consiglio dell'8 maggio 2003 sulla promozione dell'uso dei biocarburanti o di altri carburanti rinnovabili nei trasporti prevede che ogni Stato membro fissi i suoi obiettivi relativi alla quota di biocarburanti immessi sul mercato, che dovranno essere basati sui livelli di riferimento della direttiva stessa, ossia 2% sul totale di biocarburanti (benzina e diesel) immessi entro il 31 dicembre 2005 e 5,75 % entro il 31 dicembre 2010. Il **decreto legislativo 128/2005** recepisce a livello nazionale la direttiva 2003/30 e stabilisce per l'Italia l'obiettivo dell'1% al 31 dicembre 2005 e del 2,5% al 31 dicembre 2010.

Attualmente in Italia il biodiesel può essere utilizzato solo per miscele con il gasolio solo fino al 5%. Alcuni studi, condotti in Austria e in Germania, hanno evidenziato come non siano necessarie delle modifiche sulla componentistica del motore per l'utilizzo del biodiesel in miscela fino al 30%³⁹. L'impiego del biodiesel puro richiede, invece, la sostituzione delle guarnizioni in gomma con altre in materiali compatibili (rame, acciaio al carbonio, ottone, gomme fluorurate, gomma alto nitrilico, polietilene).

È infine possibile impiegare il biodiesel, puro o in miscela, nei bruciatori a gasolio. In questo caso sono necessari alcuni interventi, peraltro di modesta entità, soprattutto a carico degli ugelli di polverizzazione al fine di cambiarne l'angolazione (quella ottimale è a 60° con apertura centrale), della regolazione del rapporto tra l'aria e il carburante (è necessaria una minore quantità di aria immessa sulla prima fiamma, nel caso di bruciatori multistadio) e infine della pompa volumetrica (pressione di mandata leggermente superiore, 1-1,5 atm)⁴⁰.

³⁹ www.ufop.de

⁴⁰ www.cti2000.it

Il bioetanolo

Il bioetanolo è un carburante di origine vegetale, ottenuto dalla fermentazione alcolica di zuccheri e carboidrati più complessi, quali l'amido, la cellulosa e l'emicellulosa. Per la produzione di bioetanolo appaiono particolarmente interessanti le opportunità offerte dalla coltivazione dedicata di specie vegetali ad alto contenuto di zuccheri e carboidrati fermentescibili, come quelle descritte nel paragrafo 2.2.2.

Il bioetanolo presenta delle caratteristiche chimico-fisiche che lo rendono un carburante affine alla benzina, alla quale può essere miscelato o, in alcuni casi e mediante opportuni accorgimenti, sostituito nell'alimentazione degli autoveicoli. Nella tabella 14 sono poste in evidenza le principali caratteristiche energetiche del bioetanolo a confronto con quelle della benzina.

Tabella 14 - Confronto tra le proprietà come carburanti del bioetanolo e della benzina⁴¹

Parametri	Unità di misura	Bioetanolo	Benzina
p.c.i.	kcal/kg	6.500	10.500
Flashpoint	°C	13	21
Temperatura di ebollizione	°C ad 1 atm	78	105

L'utilizzo del bioetanolo anidro (con residuo di acqua del 5%) in sostituzione alla benzina è attualmente una realtà in Brasile, dove i motori sono stati predisposti a questo uso già a partire dagli anni Settanta, quando è emerso in tutta la sua gravità il problema della sicurezza degli approvvigionamenti. Gli interventi che si rendono necessari in tale ipotesi di impiego riguardano la regolazione delle valvole e la sostituzione dei componenti suscettibili di corrosione. Negli USA e in Canada il bioetanolo anidro è utilizzato invece in miscela con la benzina al 10% in motori non modificati e all'85% in motori predisposti. Questi ultimi, denominati con la sigla FFV (*Flexible Fuel Vehicles*) possono essere alimentati indifferentemente con delle miscele di benzina e bioetanolo o con la sola benzina, poiché sono dotati della regolazione automatica dei tempi di iniezione e dei rapporti di miscelazione tra l'aria e il carburante⁴². Alcuni ulteriori studi

⁴¹ www.eere.energy.gov; www.visionengineer.com/env/alt_bioethanol_prop.php

⁴² www.abengoabioenergy.com

condotti in Europa e negli USA hanno evidenziato come sia possibile l'impiego del bioetanolo in miscela fino al 23,5% senza intervenire sulla componentistica del motore. Allo stato attuale in Europa è consentita la presenza del bioetanolo anidro, ossia privo di acqua residua, nella benzina in concentrazione fino al 5%.

Quale alternativa all'uso del bioetanolo è possibile impiegare l'ETBE (*Etil Ter Butil Etere*), composto da esso derivato, che trova impiego come antidetonante ad alto numero di ottani. L'ETBE può essere utilizzato in sostituzione del benzene e dell'MTBE (*Metil Ter Butil Etere*), entrambi composti che presentano criticità per la salute umana e per l'ambiente: il benzene infatti è un prodotto con effetti cancerogeni mentre l'MTBE presenta un'alta capacità inquinante soprattutto a carico delle acque sotterranee. Rispetto ad essi, l'ETBE presenta un minore impatto sull'ambiente e sulla salute umana; oltre a ciò ha il vantaggio di presentare un numero di ottano più elevato (se usato in miscela con la benzina al 15% conferisce alla stessa un numero di ottano pari a 110, valore più elevato rispetto al 95-98 tipico degli antidetonanti tradizionali⁴³).

È stata infine dimostrata la possibilità di impiegare il bioetanolo anche in miscela al gasolio: fino a miscele del 15% non è necessaria alcuna modifica ai motori diesel.

1.3.3 Le biomasse combustibili allo stato gassoso

Il biogas

Il biogas è un combustibile ad elevato potere calorifico (4.500-6.500 kcal/m³ in funzione della composizione chimica del gas) ottenuto in seguito alla digestione anaerobica della sostanza organica. L'energia racchiusa nei legami chimici dei composti organici viene infatti rilasciata durante il processo di degradazione e immagazzinata principalmente nelle molecole di metano (CH₄) che, assieme a quella di anidride carbonica (CO₂), sono le principali costituenti del biogas. Altre sostanze presenti in minor percentuale sono l'ossido di carbonio (CO), l'azoto (N₂), l'idrogeno (H₂), l'idrogeno solforato (H₂S).

⁴³ www.visionengineer.com/env/alt_bioethanol_prop.php

La composizione media del biogas è rappresentata nella tabella 15.

Tabella 15 - Composizione media del biogas

Componenti	% (su gas secco)
Metano (CH₄)	50-80
Anidride carbonica (CO₂)	35-45
Idrogeno solforato (H₂S)	0,02-0,2
Vapore d'acqua	saturazione
Idrogeno, ammoniaca	tracce
Ossigeno, azoto	tracce

Equivalenza energetica tra 1 m³ di biogas e i principali combustibili

benzina	0,8 l
alcol etilico	1,3 l
metano	0,7 m ³
carbone di legna	1,4 kg
legna	2,7 kg

POTERE CALORIFICO DEL BIOGAS: 4.500 - 6.500 kcal/Nm³

Prima del suo utilizzo a fini energetici il biogas deve essere sottoposto a opportuni trattamenti (vedi l'approfondimento al paragrafo 3.3.1) necessari ad aumentare la percentuale di metano a discapito di quella degli altri gas al fine di accrescerne il potere calorifico. Infatti il potere calorifico finale del gas è determinato dalla concentrazione di metano nella miscela: maggiore è la percentuale di questo gas e maggiore è il p.c.i.; effetto contrario è determinato dalla presenza di anidride carbonica, azoto e acqua. Il trattamento a cui è sottoposto il biogas ha la funzione, inoltre, di ridurre la presenza di sostanze che si comportano da agenti corrosivi, quali ad esempio l'idrogeno solforato, che possono causare sensibili danni agli impianti di utilizzazione.

Come evidenziato nella tabella 16 la scelta del trattamento o dei trattamenti più opportuni dipende sia dalle caratteristiche di partenza del biogas sia dalle utilizzazioni previste.

Tabella 16 - Trattamento del biogas in funzione dell'utilizzo previsto

Inquinante	Conseguenza	Trattamento	Utilizzo
Acqua	Formazione di condensa che provoca malfunzionamenti; azione corrosiva potenziale	Separatori di condensa apparati frigoriferi di condensazione	In caldaia Cogenerazione ≅ gas naturale
H ₂ S	Corrosione dei motori, elementi elettrici	Filtri di ossidi di ferro Filtri di carbone attivo Biofiltri Lavaggio con NaOH Lavaggio con soluzione di sali di ferro	In caldaia* Cogenerazione* ≅ gas naturale
CO ₂	La rimozione della CO ₂ è necessaria per aumentare il tenore di metano del biogas (≅ gas naturale)	Assorbimento in acqua con successivo strippaggio ed emissione in atmosfera; Membrane semipermeabili che trattengono selettivamente il CH ₄	≅ gas naturale

* solo in caso di presenza eccessiva di H₂S

Attualmente i principali impieghi del biogas sono relativi alla produzione di energia termica e/o elettrica. Nel dettaglio è possibile produrre:

- calore, sotto forma d'acqua calda, di vapore o d'aria calda, con un rendimento energetico medio dell'80-85%;
- elettricità, generalmente in motori con turbine a vapore o con turbine a gas, per gli impianti di più ampia capacità, il cui rendimento medio è del 30-35%;
- produzione combinata di calore e di elettricità (cogenerazione) in motori endotermici con rendimenti medi complessivi dell'80-85%; (rendimento termico medio: 50% rendimento elettrico medio: 35%). Questa risulta attualmente la soluzione più comunemente adottata.

Altre possibilità di applicazione emergenti sono:

- la produzione di carburante per veicoli;
- la produzione di gas naturale per iniezione nella rete pubblica di trasporto e distribuzione;
- la produzione di freddo (trigenerazione), per esempio con macchine ad assorbimento;
- l'utilizzo in forni industriali come combustibile primario o ausiliario.

Capitolo 2

Applicazioni tecnologiche

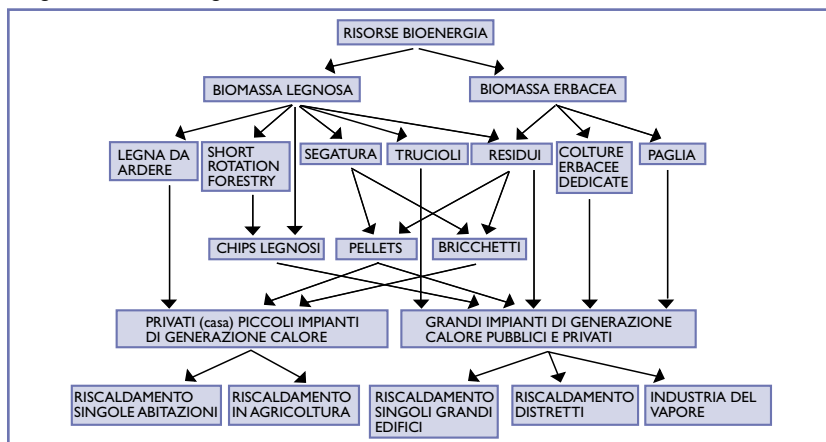
2.1 Metodi e processi di preparazione del combustibile

2.1.1 *Tecniche di condizionamento e di preparazione delle biomasse lignocellulosiche*

La preparazione del combustibile è un passaggio fondamentale per rendere idonea la biomassa al suo impiego nella maggior parte degli impianti di produzione energetica. Una generazione efficiente di energia dalle biomasse richiede infatti una combinazione ottimale tra il combustibile e la tecnologia utilizzata in quanto il processo di trasformazione energetica deve essere propriamente registrato in conformità alle caratteristiche del combustibile impiegato.

In figura 5 è schematizzato il percorso, dalla materia prima all'impiego energetico, dei biocombustibili di origine lignocellulosica.

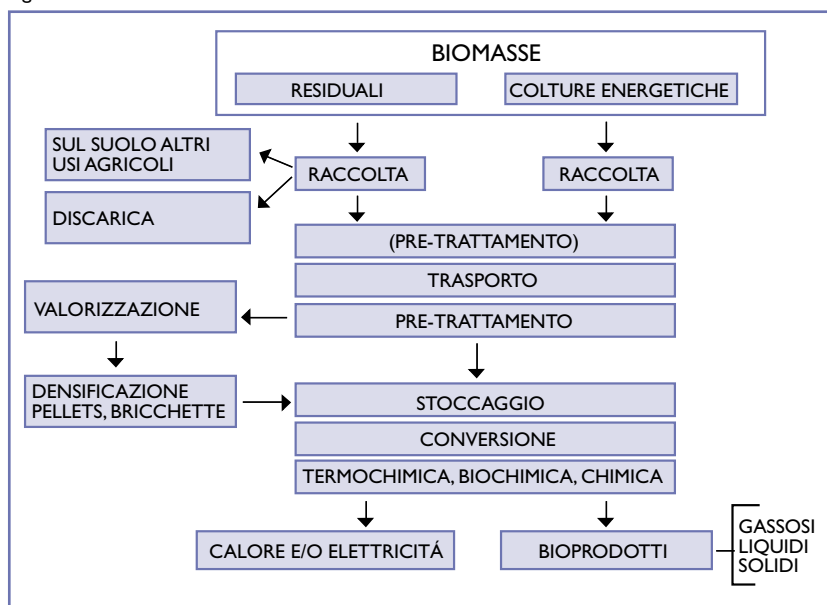
Figura 5 - Possibili e praticabili percorsi tecnologici delle biomasse lignocellulosiche finalizzati alla generazione di energia



I percorsi attinenti all'utilizzo della biomassa legnosa sono ben conosciuti e sviluppati; non altrettanto lo sono quelli riguardanti la biomassa erbacea essendo abbastanza innovativi e con un numero di esperienze ancora limitato. La volontà è comunque quella di sviluppare le tecnologie per lo sfruttamento di queste biomasse al fine di poterle utilizzare quali fonti rinnovabili d'energia alla stregua del legno.

La filiera delle biomasse lignocellulosiche, dalla raccolta alla trasformazione, segue un percorso comune a tutte le tipologie di materiale, ben riassunto nella figura 6.

Figura 6 - Filiera delle biomasse dalla raccolta alla trasformazione



I fattori che incidono sui pre-trattamenti del combustibile sono relativi alla forma e alla misura della biomassa a disposizione, nonché al tenore di umidità della biomassa di partenza.

Per quanto riguarda la forma e le misure, le biomasse possono trovarsi in forma di polveri, segatura, cippato, ramaglie e perfino tronchi. Le biomasse legnose provenienti dal bosco o da colture dedicate sono generalmente disponibili in forma di pezzi di legno di varia forma e dimensione che possono essere successivamente ridotti in cippato; le biomasse erbacee possono essere analogamente ridotte in chips, quando la specie lo permette (come ad esempio per canna comune e miscanto), o conferite come

materiale imballato (come per il panico e alcuni tipi di residui colturali, quali ad esempio la paglia); i residui di prima o seconda lavorazione del legno sono tipicamente in forma di polveri e segature.

Un'altra importante distinzione riguarda il contenuto di umidità. Una pianta forestale appena tagliata presenta un contenuto di umidità di circa il 50%, come anche il cippato ottenuto dalle *Short Rotation Forestry* (SRF). Gli scarti di lavorazione dell'industria del legno possono avere umidità variabile tra il 15% e il 40%, a seconda della tipologia di scarto. Valori di umidità inferiori si hanno nelle colture erbacee poliennali, se vengono raccolte in inverno/primavera; in questo caso il cippato presenta una umidità compresa tra il 20-30%. Colture erbacee annuali, come ad esempio il sorgo da fibra, tipicamente presentano invece elevate concentrazioni di acqua alla raccolta, con tassi di umidità anche del 60-70%.

L'essiccazione della biomassa

L'operazione di essiccazione è funzionale alla riduzione del contenuto di umidità della biomassa prima che essa possa essere idoneamente sottoposta ad un processo termo-chimico di conversione energetica. Ci sono tre diversi modi per diminuire il contenuto di umidità nella biomassa, i quali possono essere adottati anche in successione al fine di ottimizzare i costi e i consumi energetici:

- **essiccazione naturale della materia prima:** la biomassa legnosa, composta dai tronchi e dalle ramaglie raccolte in bosco, può essere lasciata ad essiccare direttamente in loco sia in forma tal quale sia previa riduzione in tronchetti; il grado di umidità finale dipende essenzialmente dalla durata della fase di stagionatura e può variare dal 40 al 55% dopo la prima stagione, fino ad arrivare a valori del 18-25% dopo due stagioni. Per quanto concerne invece le colture erbacee perennanti un parziale decadimento del contenuto d'acqua nelle piante è fisiologico al termine della stagione vegetativa, nei mesi tardo invernali. La raccolta effettuata in questo periodo consente di ottenere biomassa già sostanzialmente secca. Per quanto riguarda infine le altre colture erbacee, come il sorgo da fibra o il panico, alla quali si applica una raccolta mediante fienagione a due tempi, l'impiego di macchine falcia-condizionatrici consente di rompere e schiacciare gli steli, permettendo una più veloce ed efficace disidratazione naturale e consentendo in tal modo di ottenere un'umidità finale della balla a valori compresi tra il 35% e il 40%.

- **essiccazione naturale della materia lavorata:** essa si applica soprattutto al cippato, in particolar modo a quello proveniente dalle *Short Rotation Forestry*, caratterizzato da un contenuto di umidità elevato. I chips possono essere stoccati all'aperto, in estate, o al coperto nei periodi invernali. Lo stoccaggio estivo all'aperto è preferibile, in quanto più economico, data la bassa densità del materiale e le ampie superfici necessarie per l'essiccamento. Il contenuto di acqua nella biomassa, dopo essiccazione in cumulo, può passare dal 50% al 30%. L'altezza del cumulo di chips non deve essere in ogni caso superiore ai 7-8 metri a causa del naturale riscaldamento delle parti interne della massa (sopra i 60°C) che può innescare fenomeni di autocombustione. Il processo di essiccamento si accompagna alla naturale decomposizione biologica della biomassa con una conseguente perdita di peso del materiale. La biomassa persa a causa della degradazione biologica può essere elevata in particolare con biomassa molto umida e nei primi mesi di stoccaggio. In tali casi si possono registrare perdite anche superiori al 5% al mese, per poi scendere, dopo il terzo/quarto mese, a perdite dell'1-2%.
- **essiccazione forzata della materia lavorata:** si ottiene mediante l'esposizione della biomassa a sorgenti di calore (tipicamente aria calda) in modo forzato. L'utilizzo di questa tipologia di essiccamento, proprio perché è fonte di consumi d'energia, riduce l'efficienza energetica complessiva e aumenta i costi. Dovrebbe essere pertanto adottata solo in particolari casi: in linea di massima è applicata quando l'essiccazione naturale non è sufficiente ad ottenere il tenore di umidità voluto (come ad esempio nel processo di pellettizzazione) oppure quando l'energia termica necessaria al processo di essiccazione è ottenuta impiegando calore residuo da altri processi di lavorazione e che, in caso contrario, verrebbe dissipato.

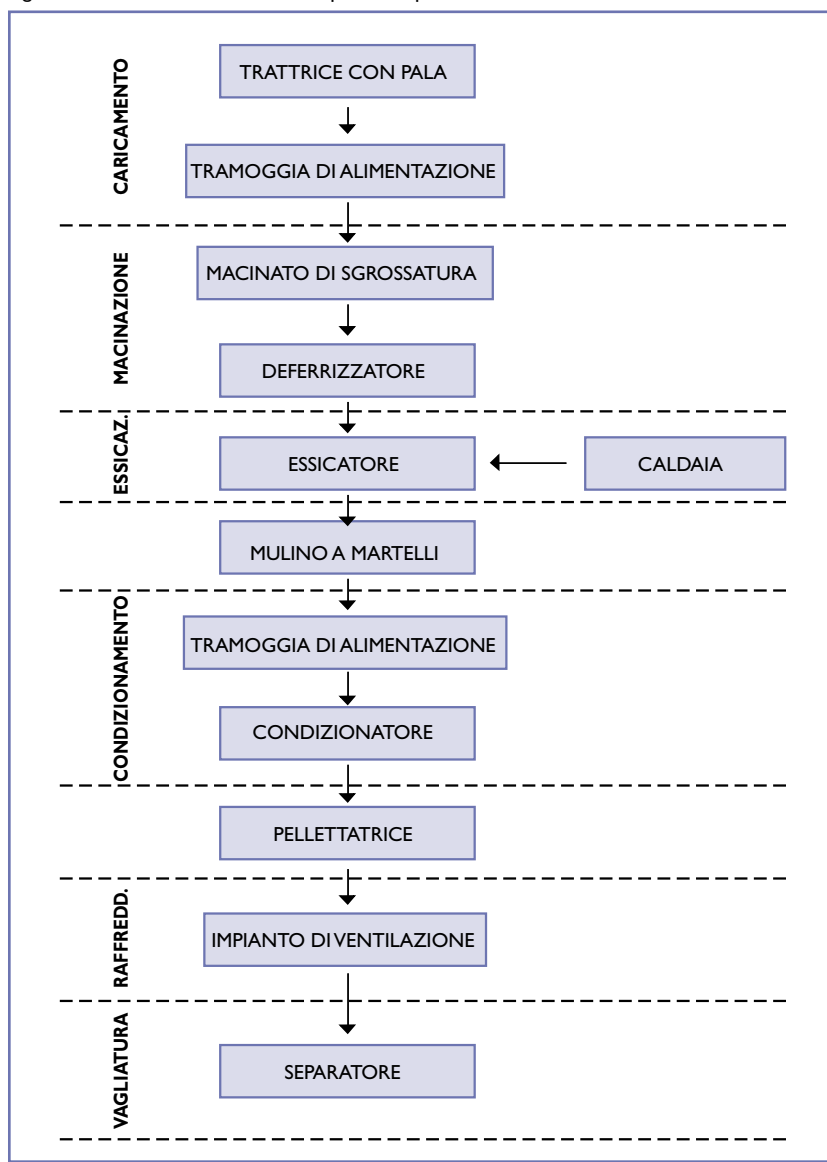
La fabbricazione del pellet

La tecnologia della fabbricazione del pellet a partire dal legno o da altro tipo di biomassa lignocellulosica, deriva dalla molto più antica impiantistica dell'industria mangimistica.

In maniera schematizzata il processo di fabbricazione del pellet viene suddiviso nelle seguenti fasi: essiccazione, triturazione, pellettizzazione, raffreddamento, separazione, immagazzinamento/insaccamento. In alcuni casi (quando la tipologia di biomassa lo richiede), a monte dell'es-

siccazione si rendono necessarie altre due importanti fasi: la macinazione di sgrossatura e la deferrizzazione. Lo schema a blocchi di un impianto industriale per la produzione di pellet è rappresentato nella figura 7.

Figura 7 - Schema a blocchi di un impianto di pellettizzazione



La prima **macinazione** della biomassa è prevista nel caso in cui il materiale da lavorare si presenti in forma grossolana (ad esempio in tronchetti o ramaglie), in tal caso, mediante l'ausilio di un rotore a coltelli, la biomassa subisce una riduzione volumetrica in scaglie.

Prima dell'introduzione nel macinatoio, il materiale grezzo viene solitamente separato, mediante l'azione di appositi magneti, da eventuali elementi ferrosi (**defferrizzazione**) che, se introdotti nella trafilatura, potrebbero causare ingenti danni.

Con le tecnologie più diffuse, il materiale grezzo inoltre non può essere pressato se presenta un contenuto elevato di umidità: è quindi necessario, dopo la macinazione primaria, eseguire un'**essiccazione** attraverso l'esposizione ad aria calda, vapore e acqua. In questo modo viene conferito al materiale il grado di umidità appropriato e viene data possibilità alla lignina, contenuta nella materia prima, di svolgere il ruolo di materiale legante. Le tecnologie per l'essiccamento della biomassa prevedono per lo più l'utilizzo di essiccatoi rotativi, nelle varianti in equicorrente e controcorrente. Per ciascun tipo di variante il riscaldamento può essere diretto o indiretto. Negli essiccatoi a riscaldamento diretto il materiale umido entra in contatto con i gas caldi che possono essere costituiti dai prodotti della combustione (essiccazione a fumi diretti) o da aria riscaldata (essiccazione ad aria calda). Il primo metodo più semplice ed economico, viene adottato quando il materiale può entrare in contatto con i prodotti della combustione, mentre il secondo viene adottato nel caso in cui il materiale non debba entrare in contatto con i prodotti della combustione. Nel caso del riscaldamento indiretto, il tamburo è montato in una cassa a fuoco rivestita con mattoni refrattari ed è riscaldato esternamente.

Al termine di questa fase l'umidità raggiunge un valore massimo del 10%, valore che permette di effettuare le fasi successive del trattamento. Alcune tecnologie utilizzate per la pellettizzazione non prevedono l'utilizzo del calore per estrarre l'umidità dalla biomassa: esistono in commercio macchinari in grado di lavorare con umidità dei materiali in ingresso variabile dal 10% al 35%, che provvedono all'estrazione dell'acqua in eccesso per depressione⁴⁴. La capacità produttiva di questi macchinari, contraddistinti da un consumo elettrico relativamente ridotto, risulta comunque fortemente influenzata dal contenuto iniziale di umidità della biomassa.

⁴⁴ Grassi, 2004.

Nella seconda fase di macinazione, o prima fase di macinazione, se il materiale in entrata al ciclo produttivo è già di piccole dimensioni (trucioli, segatura, chips legnosi o erbacei, ecc.), il materiale viene triturato per ridurre e uniformarne la grandezza fino a circa 3 mm (**triturazione**). Queste dimensioni permettono l'alimentazione alla pellettatrice di un flusso costante che conferisce al prodotto caratteristiche standardizzate. Spesso in questa fase vengono impiegati mulini a martello.

Il materiale triturato viene quindi avviato alla sezione di **condizionamento**, dove viene preparato per entrare nella trafila della pellettizzatrice. In questa fase possono anche essere incorporati agenti leganti o additivi (melasso e grassi). Un sistema molto utilizzato per il condizionamento della biomassa è l'impiego di vapore acqueo secco in modo da ammorbidire le fibre legnose ed effettuare una parziale gelatinizzazione della biomassa. Ciò conferisce al pellet una maggior compattezza e, al contempo, una maggior lubrificazione alla trafila nella fase di pellettizzazione.

La **pellettizzatrice**, che agisce per compressione, ha quali elementi principali degli stampi perforati (comuni a tutti i processi di estrusione) cilindrici o piani, detti anche matrici, attraverso i cui fori la biomassa condizionata viene spinta ad elevata pressione (fino a 200 atmosfere) mediante idonei sistemi a rulli. Negli impianti con matrici cilindriche l'estrusione generalmente avviene verso l'esterno, ma esistono anche pellettizzatrici con direzione di estrusione opposta. Il pellet si forma grazie alle trasformazioni che subisce la lignina presente nella biomassa: tali trasformazioni si verificano nel passaggio delle fibre attraverso i fori di estrusione quando la temperatura aumenta sino a 90°C; a queste temperature la lignina fluidifica ed esce dalle strutture cellulari; ciò consente alle fibre di legarsi tra loro. L'estruso che fuoriesce dai fori delle matrici, materiale compresso e bachelizzato in superficie, viene tagliato alla lunghezza voluta da apposite lame, generalmente fisse.

Il maggior produttore di pellet in Norvegia ha recentemente sviluppato e sperimentato un impianto di produzione che conferisce al pellet caratteristiche di maggior durezza, maggior peso specifico, minor sensibilità all'umidità e minore contenuto in polveri. Il processo di produzione innovativo, denominato *Steam Explosion* (SE), prevede il condizionamento della biomassa in un reattore mediante l'uso di vapore saturo ad alta pressione. La riduzione improvvisa della pressione nel reattore fa "esplodere" la biomassa riducendola in fibre e facendone

fuoriuscire la lignina ammorbidita. Ciò rende la biomassa estremamente facile da pellettizzare. I maggiori vantaggi di questo processo riguardano la più elevata qualità del pellet, la riduzione degli impatti ambientali e il raddoppio della capacità oraria della pellettatrice⁴⁵.

La sezione di **raffreddamento** del prodotto estruso e tagliato a misura, è importante: al fine di ridurre l'umidità sprigionata in fase di pressatura e di ridurre la temperatura del pellet in uscita dalla macchina che raggiunge valori di circa 90-95°C. Inoltre durante la fase di raffreddamento si ha l'indurimento del prodotto. Ciò contribuisce a migliorare le potenzialità di preservarne le caratteristiche qualitative nel tempo. Il raffreddamento del pellet avviene tramite impianti di ventilazione.

Nella sezione di **separazione** viene infine eliminato il pellet non integro che viene reimmesso nel sistema di estrusione, al fine di evitare successivi problemi di intasamento causati da un eccesso di polveri nei contenitori per lo stoccaggio.

Al termine del ciclo il pellet viene immagazzinato in silos o insaccato (fase di **immagazzinamento/insaccamento**). In questo secondo caso, viene solitamente utilizzata una macchina pesatrice/insaccatrice automatica collocata in coda alla linea di produzione. Il basso contenuto in acqua finale del pellet (circa 10%) consente una conservazione non problematica dal punto di vista dello sviluppo di muffe e batteri.

Il trasporto del pellet infine non presenta criticità: il pellet infatti, a differenza di altri combustibili, non causa danni all'ambiente in caso di dispersione accidentale del prodotto; l'ecosistema non viene alterato e non sono necessarie operazioni di bonifica. Inoltre non ci sono pericoli di esplosioni o contaminazioni.

La fabbricazione dei bricchetti

Una linea completa di bricchettatura è solitamente formata da stadi successivi che trasformano la biomassa grezza, con caratteristiche di umidità e pezzatura variabili, in un bricchetto standardizzato pronto per essere immesso sul mercato.

Le fasi in cui si compone la linea, sono molto simili a quelle della pellettizzazione, sebbene la tecnologia è relativamente più semplice. In linea generale si procede con un pre-trattamento della biomassa, seguito dalla compattazione e trasformazione in bricchetti.

⁴⁵ Geisshofer et al., 2000.

La fase di **pre-trattamento** comprende a sua volta la triturazione, l'essiccazione e il riscaldamento della biomassa al fine di raggiungere le caratteristiche di granulometria e contenuto d'acqua ottimali.

Il prodotto ottenuto viene quindi convogliato alla bricchettatrice mediante un sistema di alimentazione costituito da un tubo mantenuto in depressione o da un nastro trasportatore. La biomassa pretrattata viene compattata e trasformata in bricchetti all'interno della bricchettatrice. A seconda della pressione applicata i sistemi di **bricchettatura** si distinguono in sistemi a bassa, media e alta pressione. Mentre i primi due prevedono la miscelazione delle biomasse con una sostanza legante, quelli ad alta pressione vengono applicati alla biomassa tal quale dato che le forze di coesione tra le particelle, quindi l'effetto legante, si sviluppano in seguito alle elevate pressioni esercitate.

Tra i sistemi di bricchettatura ad alta pressione, le tecnologie più utilizzate sono⁴⁶:

- bricchettatura a vite;
- bricchettatura a pistone (meccanica e oleodinamica).

Nel processo di bricchettatura a vite, la biomassa viene estrusa in continuo per effetto della rotazione di una o più viti senza fine all'interno di una camera tronco conica. L'effetto combinato della pressione elevata e della temperatura esercitata (la camera viene riscaldata durante il processo) migliora l'adesione tra le particelle. La parziale carbonizzazione della superficie esterna del bricchetto, dovuta alla elevata temperatura di processo, e la presenza di un foro centrale allo stesso, tipico di questo sistema, migliorano la successiva accensione del fuoco e la combustione del materiale. La bricchettatura con pistone meccanico consente invece la compattazione della biomassa per mezzo di un pistone alternativo mosso da un motore elettrico attraverso un manovellismo. I bricchetti prodotti hanno mediamente un diametro di 60 mm. La bricchettatura con pistone a circuito oleodinamico prevede invece un sistema a due pistoni che comprimono il materiale in direzioni ortogonali e che vengono azionati dall'olio mantenuto in pressione in un circuito chiuso.

Il sistema a pistone è il più utilizzato nella realtà in quanto consente di trattare una biomassa con maggiore umidità e il migliore controllo della pressione applicata. In commercio esistono diverse soluzioni

⁴⁶ Grover, Mishra, 1996.

tecnologiche a circuito oleodinamico che vanno da una produzione di 30-50 kg/h a 1.000-1.200 kg/h. I bricchetti presentano un diametro variabile da 50 a 90 mm e lunghezze da 50 a 300 mm.

Tabella 17 - Confronto tra la pressa a vite e a pistone

Caratteristica		Pressa a pistone	Pressa a vite
Umidità ottimale della biomassa	(%)	10-15	8-9
Usura della parti meccaniche	-	bassa	elevata
Prodotto bricchettato		in blocchetti	in continuo
Consumo medio di energia	(kWh/t)	50	60
Peso specifico bricchetto	(kg/m ³)	1.000-1.200	1.000-1.400
Comportamento a combustione del bricchetto		medio	molto buono
Carbonizzazione esterna		assente	presente
Omogeneità del bricchetto		scarsa	buona

La trasformazione finale del prodotto ottenuto dalla fase di bricchettatura comprende le fasi di eventuale taglio del bricchetto, solo per i sistemi a vite dove il materiale esce in continuo (in quelli a pistone vengono invece prodotti blocchetti di lunghezza predefinita), di eventuale raffreddamento, solo per sistemi a vite con riscaldamento (nel caso di bricchettatrice a pistone il bricchetto subisce infatti solo un lieve aumento della temperatura), di confezionamento e di stoccaggio finale dei bricchetti.

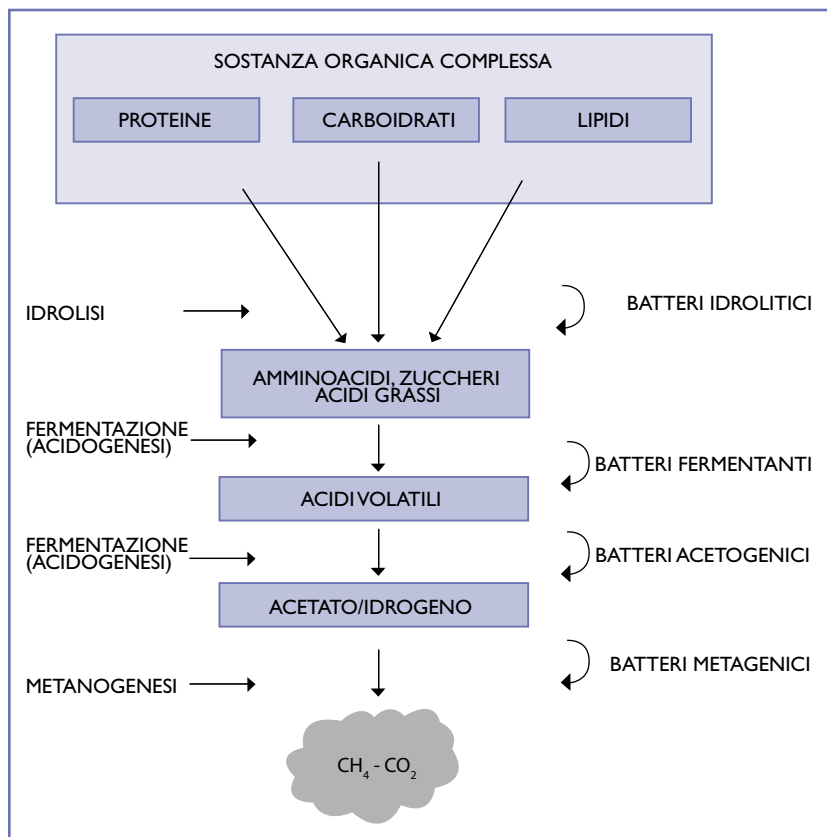
2.1.2 La fermentazione metanica per la produzione di biogas

La fermentazione metanica, nota anche come digestione anaerobica, è un processo naturale complesso che consiste nella biodegradazione della sostanza organica in condizioni di assenza di ossigeno (anaerobiosi), con formazione di biogas.

Come illustrato nella figura 8, il processo di digestione anaerobica avviene in tre fasi successive a carico di diversi gruppi batterici che agiscono in serie. Nella prima fase (idrolisi) i batteri idrolitici spezzano i composti organici complessi, cioè carboidrati, proteine e grassi, in sostanze più semplici. Successivamente (fase di fermentazione), tali sostanze vengono trasformate, in un primo stadio, in acidi organici mediante reazioni di acidogenesi e quindi in acetato, anidride carbonica e idrogeno, attraverso processi di acetogenesi.

Nell'ultima fase, quella più delicata (metanogenesi), i batteri metanigeni trasformano i prodotti formati nella fase precedente in metano (CH_4) ed anidride carbonica (CO_2), principali costituenti del biogas. Complessivamente quindi la componente organica viene degradata liberando l'energia chimica in essa contenuta sotto forma di biogas, in misura variabile dal 30 all'85%.

Figura 8 - Fasi del processo di digestione anaerobica



Come è possibile intuire, l'esito del processo, quindi la produzione di biogas, dipende dall'azione coordinata e sequenziale di tutti i gruppi microbici coinvolti. A tale scopo è indispensabile che l'ambiente di reazione sia il risultato di un compromesso tra le esigenze dei singoli gruppi coinvolti, mediante uno stretto controllo dei principali parametri di processo, come sarà successivamente esposto in dettaglio.

Il processo di digestione anaerobica può avvenire in tre “fasce” di temperatura e quindi in condizioni di “psicrofilia”, “mesofilia” o “termofilia”.

PSICROFILIA: la temperatura del processo si mantiene inferiore ai 20°C. I sistemi che operano in queste condizioni vengono denominati anche “a freddo”.

MESOFILIA: la temperatura del processo è compresa tra 20-40°C.

TERMOFILIA: quando la temperatura del processo è compresa tra 50-65°C.

Da un punto di vista strettamente tecnico è possibile riprodurre e forzare i processi sopra descritti in ambienti confinati come ad esempio in un reattore anaerobico (per la digestione di liquami o reflui ad elevato carico organico) o in una discarica controllata (per la digestione della componente organica di rifiuti solidi).

Verranno di seguito descritte le principali tipologie impiantistiche di reattori anaerobici più diffusi.

Tipologie impiantistiche applicabili a liquami o reflui

Le tipologie impiantistiche dei sistemi di digestione anaerobica attualmente disponibili vanno da sistemi estremamente semplificati, applicati per lo più al trattamento di reflui zootecnici in scala aziendale, a quelli molto sofisticati ad elevato contenuto tecnologico, che si prestano per lo più al trattamento di reflui industriali (filtri anaerobici, reattori UASB, ecc.).

Impianti semplificati

Questa tipologia di impianto trova grandi possibilità applicative nel settore zootecnico, grazie alla semplicità costruttiva e gestionale. Essi infatti sono costituiti da una vasca di stoccaggio, spesso preesistente, dotata di copertura gasometrica.

I sistemi più semplici sono quelli “a freddo”(psicrofili) e sono caratterizzati da rendimenti variabili in funzione della stagione dell’anno e

dei tempi di permanenza elevati, tipicamente intorno ai 60 giorni. Indicativamente per un liquame suino le produzioni annuali di biogas sono circa $25 \text{ m}^3/100 \text{ kg}$ di peso vivo.

I sistemi dotati invece di sistema di riscaldamento, con calore fornito dall'impiego del biogas, consentono di mantenere un regime di mesofilia ($35\text{-}37^\circ\text{C}$) e di ottenere rendimenti più elevati e più costanti durante l'anno, con tempi di ritenzione più ridotti e pari mediamente a 20 giorni. Le produzioni annuali di biogas da liquame suino, in questo caso, si aggirano intorno ai $35 \text{ m}^3/100 \text{ kg}$ di peso vivo.

Le coperture gasometriche hanno il compito di trattenere e di accumulare il biogas e possono essere principalmente a cupola o galleggianti:

- **Copertura a cupola semplice:** non è pressurizzata ed è costituita da un telone di materiale flessibile ancorato sul perimetro della vasca. Il gas, essendo a pressione molto bassa, viene estratto e inviato agli utilizzi per mezzo di una soffiante.
- **Copertura a cupola a doppia o tripla membrana:** sono fissate al bordo della vasca e costruite con due o tre strati sovrapposti di membrane; le membrane più esterne costituiscono una camera d'aria che funge da elemento di spinta pneumatica sulla membrana più interna che racchiude il biogas (figura 9). Lo scarico del biogas è realizzato con valvole di sovrappressione, regolate da appositi sensori.
- **Copertura galleggiante:** sono membrane dotate di un sistema di zavorra realizzato con tubi flessibili riempiti con acqua, per garantire la pressione di accumulo del biogas (figura 10).

Figura 9 - Impianto semplificato con copertura a cupola (fonte: CRPA)

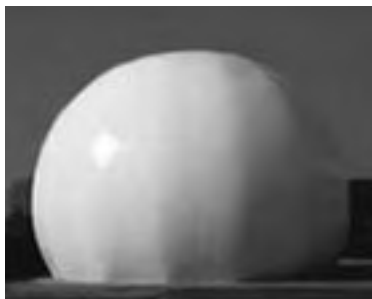


Figura 10 - Copertura gasometrica galleggiante (fonte: CRPA)



In caso di necessità di una maggiore capacità di accumulo di biogas è possibile ricorrere all'utilizzo di gasometri esterni, di forma sferica, costituiti da due o tre membrane di volume regolabile (figura 11).

Figura 11 - Gasometro



Sulla base di un censimento effettuato alla fine del 2004, gli impianti di tipo semplificato costituivano il 70% degli impianti di digestione anaerobica presenti in Italia; nel 1999 risultavano il 24%⁴⁷.

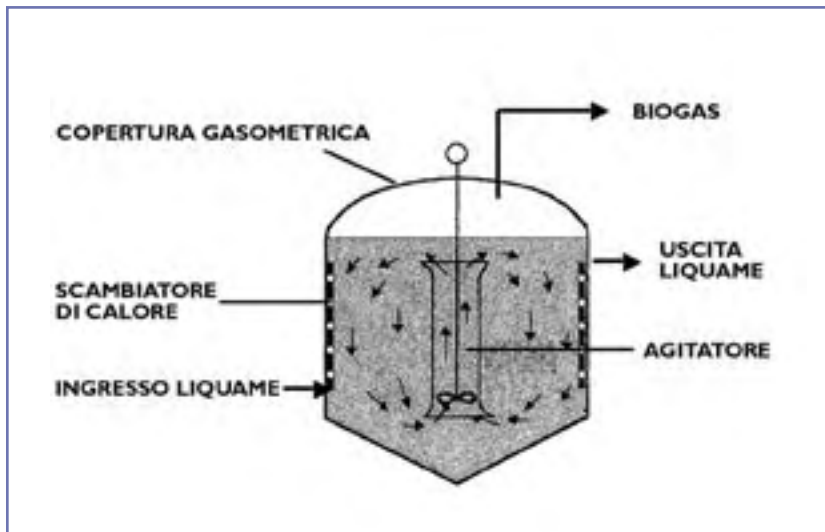
Reattori miscelati

Rappresentano la tipologia di digestore più classica (figura 12). La loro struttura, in cemento armato o in acciaio, è configurata a forma di silos.

⁴⁷ Centro Ricerche Produzioni Animali (CRPA) – Reggio Emilia.

Sono reattori riscaldati con funzionamento in regime di mesofilia o di termofilia, per cui sono muniti di sistema di riscaldamento costituito da uno scambiatore di calore e di coibentazione perimetrale.

Figura 12 - Schema di reattore a miscelazione completa



Il materiale da digerire viene miscelato mediante agitatori meccanici a basso regime di rotazione (15-50 rpm⁴⁸). A seconda del numero e della posizione dell'agitatore, il reattore può essere completamente o parzialmente miscelato.

Un altro sistema di miscelazione può essere quello di tipo idraulico (*gas-lifter*). Tale sistema consiste nel ricircolo dello stesso biogas compresso ed è attuabile in casi di basso rischio di formazione di schiuma.

Sulla sommità del reattore è posizionata la calotta gasometrica (gasometro), per lo più costituita da un telo polimerico che ha il compito di trattenere il biogas, protetto da una copertura in acciaio o cemento armato.

Questa tipologia di reattore consente il trattamento di liquami con un contenuto in sostanza secca < 10%, con tempi di permanenza medi in funzione della composizione del substrato e della temperatura di processo, compresi tra 15-35 giorni.

⁴⁸ Rivoluzioni per minuto.

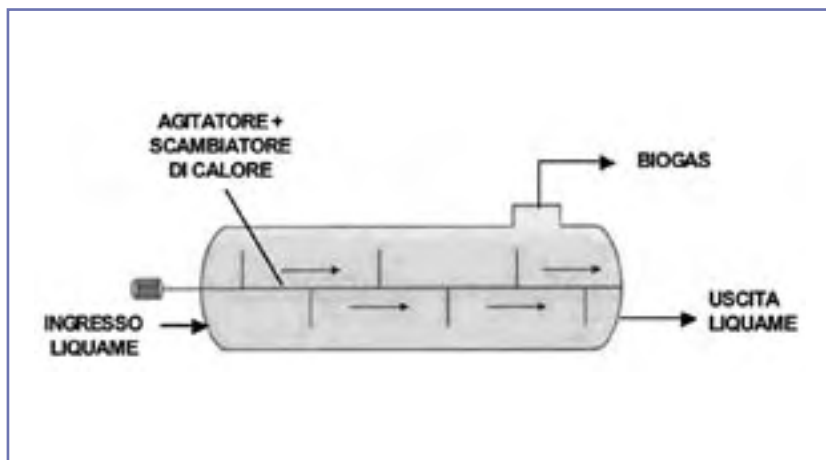
Le configurazioni impiantistiche più diffuse sono quelle a flusso continuo, preferite a quelle a flusso discontinuo (*batch*). In caso di separazione della fase di digestione e dello stoccaggio è possibile ottenere un ulteriore recupero del biogas nella fase di stoccaggio qualora tale vasca venga dotata di copertura gasometrica.

Reattori “plug-flow”

Sono reattori con scorrimento del liquame a flusso orizzontale, dotati di sistema di riscaldamento, agitatori e gasometro (figura 13).

Vengono utilizzati esclusivamente a scala ridotta, in quanto motivi tecnici ed economici ne limitano il volume a un massimo di 300-400 m³. Questi sistemi sono particolarmente adatti al trattamento di liquami con contenuto in sostanza secca fino al 13%, e ciò consente di ottenere rendimenti in biogas superiori rispetto ai reattori miscelati, a parità di temperatura.

Figura 13 - Schema di reattore plug-flow

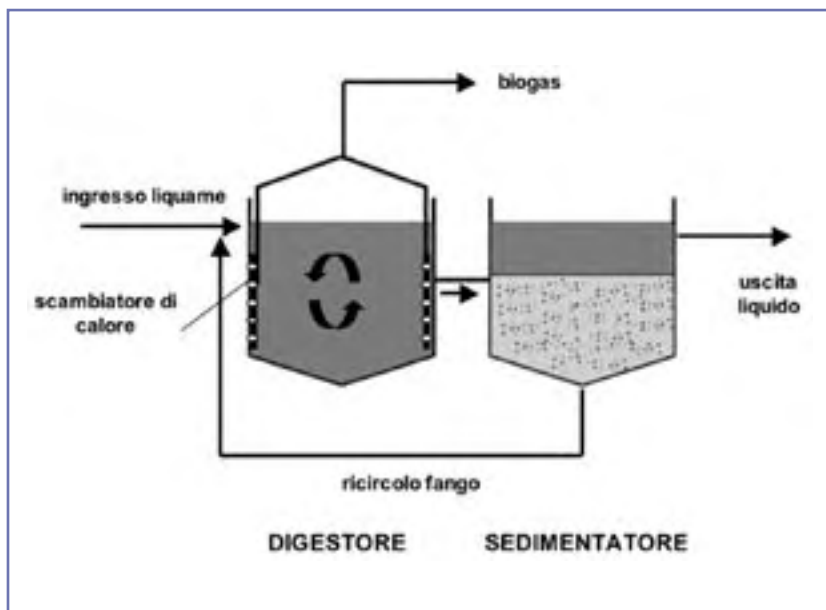


Nelle tipologie impiantistiche descritte sino ad ora, il tempo di permanenza idraulico (HRT) risulta pari al tempo di permanenza della biomassa attiva all'interno del reattore (Φ). Al fine di consentire una sosta più lunga dei microrganismi, senza dover necessariamente aumentare eccessivamente il volume del reattore, alcune soluzioni propongono il disaccoppiamento di questi due parametri mediante diverse configurazioni, di seguito presentate.

Reattori per contatto

Analogamente ad un sistema a fanghi attivi, il fango anaerobico fatto decantare in un sedimentatore viene ricircolato nel reattore (figura 14). Il tempo di permanenza idraulico (HRT) risulta così dell'ordine di ore. Tuttavia l'esigenza di degassificare il fango prima della sedimentazione (onde evitare problemi in quella fase), ha limitato l'applicazione di questa tecnologia.

Figura 14 - Schema di reattore per contatto

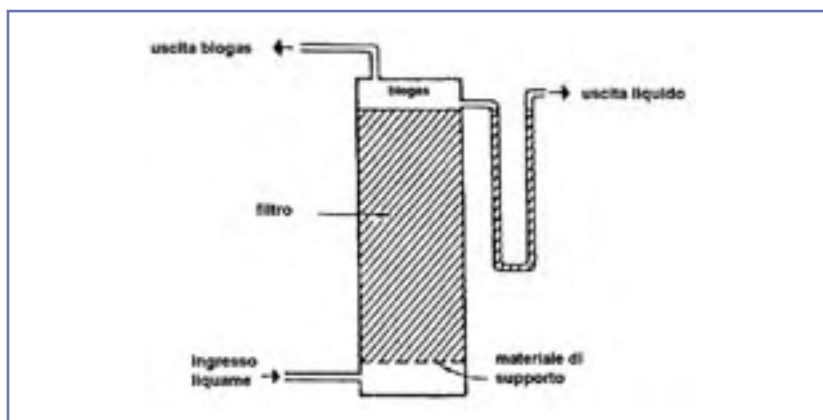


Filtro anaerobico

La biomassa attiva viene immobilizzata su materiale inerte (pietra, plastica), posto all'interno del reattore (figura 15). Oltre a consentire ridotti tempi di permanenza idraulica ($HRT = 1-2$ giorni), questa soluzione permette di ottenere una elevata superficie attiva per unità di volume.

Al fine di evitare fenomeni di intasamento, questi sistemi si prestano al trattamento di reflui a basso contenuto in sostanza secca ($< 2\%$); risultano quindi particolarmente adatti al trattamento di reflui di tipo industriale ad elevato carico organico.

Figura 15 - Schema di un filtro anaerobico

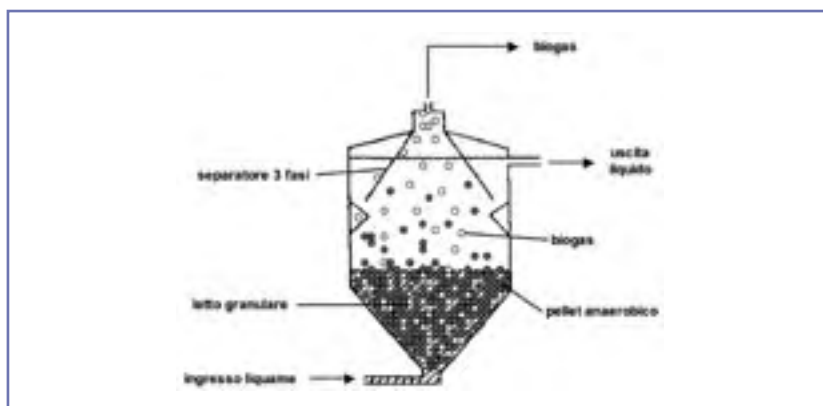


Reattore UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)

La biomassa aggregata in granuli viene trattenuta all'interno del reattore (figura 16). Il refluo pre-riscaldato attraversa dal basso verso l'alto il letto anaerobico. Nella parte superiore del reattore un separatore a tre fasi permette la divisione del biogas, il liquido e i granuli, che sedimentano nuovamente verso la base.

Questi sistemi sono particolarmente adatti al trattamento di reflui ad elevato carico organico ridotto contenuto in solidi (reflui di zuccherifici, industria di succhi di frutta, distillerie, ecc.). I tempi di permanenza idraulica (HRT) sono dell'ordine di qualche ora.

Figura 16 - Schema di reattore UASB



La codigestione

Gli sviluppi nel trattamento dei rifiuti degli ultimi decenni hanno determinato l'insorgenza di impianti di codigestione.

CODIGESTIONE: è l'utilizzo simultaneo di diverse tipologie di substrato (co-substrati) in diversa proporzione. I co-substrati utilizzabili possono essere liquami zootecnici, fanghi di depurazione, frazione organica di RSU, residui agricoli, rifiuti dell'industria agroalimentare, ecc.

Generalmente i sistemi di codigestione sono costituiti da reattori a miscelazione completa, dove il substrato viene normalmente diluito fino a ottenere una concentrazione di sostanza secca compresa tra 8 e 15%.

La presenza di questa tipologia di impianti, per lo più di tipo consortile, non solo consente di ottenere maggiori rendimenti di biogas, ma determina anche la possibilità di ricavare un introito extra per il gestore dell'impianto.

Gli impianti consortili a grande scala presentano maggiori vantaggi economici rispetto a quelli di piccola taglia, con tempi di ritorno dell'investimento compresi tra 3 e 10 anni. Tuttavia la condizione per ottenere un successo economico è una accurata progettazione e gestione, con un occhio di riguardo anche per gli aspetti e le problematiche ambientali e gestionali relative allo smaltimento/riutilizzo del materiale digerito.

I parametri di processo

Data la complessità delle reazioni biochimiche che avvengono all'interno dei reattori anaerobici risulta di estrema importanza effettuare il monitoraggio di alcuni parametri di processo fondamentali, come ad esempio temperatura, pH, tempo di permanenza idraulico, produzione di biogas, composizione del biogas, acidità volatile, alcalinità (tabella 18).

Tabella 18 - Principali parametri di processo

Temperatura	- sistemi in condizioni di termofilia → $t^{\circ} = 50-65^{\circ}\text{C}$ - sistemi in condizioni mesofilia → $t^{\circ} = 20-40^{\circ}\text{C}$ - sistemi in condizioni psicrofilia o "a freddo" → $t^{\circ} < 20^{\circ}\text{C}$
pH	deve essere compreso da un minimo di 6,6-7,6, ad un massimo di 7,5-8,5.
Tempo di permanenza idraulico (HRT)	esprime il tempo medio trascorso dal substrato nel digestore e deve essere superiore al tempo di raddoppiamento dei batteri, che è funzione delle caratteristiche di biodegradabilità del substrato.
Produzione di biogas	è un parametro valido in caso di carico organico pressoché costante
Qualità del biogas	un forte aumento nel contenuto di CO_2 (per es. > 40% per i liquami suini), può essere sintomo di malfunzionamento.
Acidità volatile	deve essere orientativamente < 15 meq/l.
Alcalinità	deve essere orientativamente > 50 meq/l il rapporto tra alcalinità e acidità volatile deve risultare almeno di 2-3:1.

Il collettamento del biogas in discariche di rifiuti solidi

La gestione dei rifiuti e particolarmente lo smaltimento finale in discariche controllate con un elevato livello di compattazione del materiale, consentono l'instaurarsi delle condizioni di anaerobiosi necessarie alla produzione di biogas in seguito alla decomposizione della frazione organica presente nei rifiuti. In questi casi è possibile, mediante adeguati sistemi di captazione e di collettamento, intercettare il biogas prodotto. Come di seguito spiegato ciò risulta necessario fondamentalmente per motivi di sicurezza sebbene tale pratica apra la possibilità allo sfruttamento del potenziale energetico.

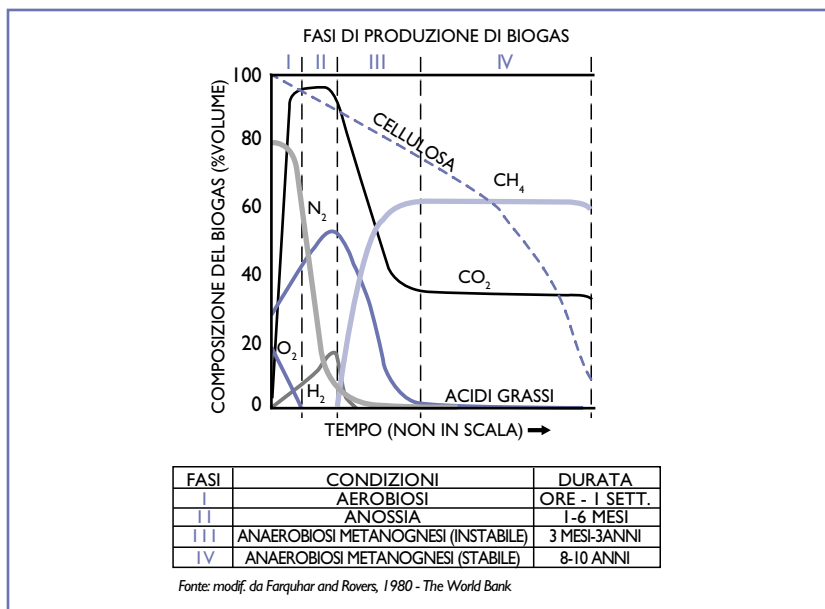
Da una stima effettuata dall'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente degli Stati Uniti (U.S.EPA)⁴⁹, le discariche provocano la maggior percentuale di emissioni di metano - pari al 34% - da fonti antropogeniche.

Il processo di generazione del biogas può essere schematizzato in quattro fasi caratteristiche di tutto il ciclo di vita della discarica (figura 17). La durata delle varie fasi dipende dalle condizioni presenti in

⁴⁹ www.epa.org

discarica (composizione del rifiuto, umidità, carica batterica, pH, caratteristiche progettuali, ecc.) e dalle condizioni climatiche esterne.

Figura 17 - Fasi del processo di produzione di biogas e relativa composizione



Durante la prima fase, che inizia subito dopo lo smaltimento dei rifiuti e che si svolge in condizioni di aerobiosi, viene principalmente prodotta CO₂.

La seconda fase, anossica (cioè in assenza di ossigeno libero, ma ricco di ossigeno combinato ad altri elementi chimici come ad es. NO₃⁻, NO₂⁻, SO₄⁼, ecc.), è caratterizzata da una forte diminuzione della concentrazione di ossigeno e dalla produzione di CO₂, H₂ e acidi volatili. Nella terza fase, anaerobica, inizia la generazione di CH₄ associata a una riduzione della CO₂ precedentemente prodotta.

Nella quarta e ultima fase la produzione di biogas raggiunge condizioni di quasi stazionarietà e la composizione del biogas rimane pressoché costante (circa il 50% di CH₄, circa 50% di CO₂ e tracce di altri gas come ad esempio H₂S, mercaptani, ecc.).

Sulla base di monitoraggi effettuati su diverse discariche degli Stati Uniti, indicativamente vengono riportate produzioni di biogas comprese tra 0,05 e 0,40 m³/kg di rifiuto smaltito (Ham, Barlaz, 1989).

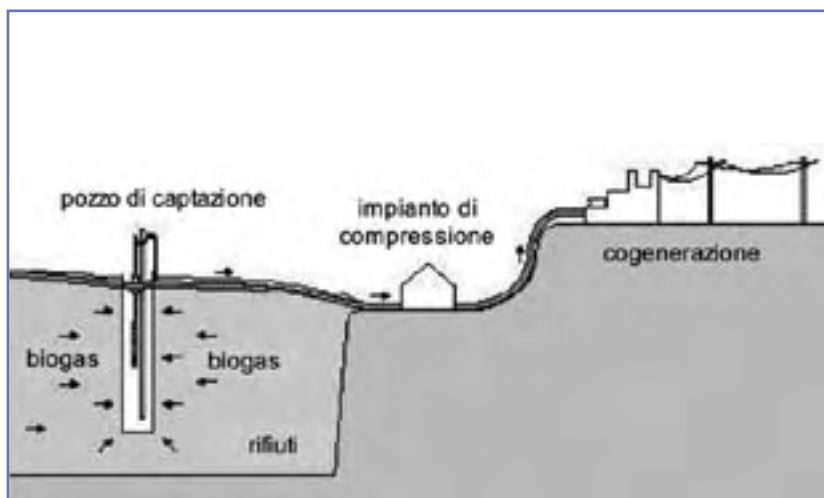
La presenza del CH₄ nelle discariche di rifiuti deve essere monitorata

attentamente a causa delle sue caratteristiche esplosive in ambienti confinanti, non appena la sua concentrazione risulta essere compresa tra il 5% e il 15%. Per di più, oltre alla già nota pericolosità del metano come gas a effetto serra, esso risulta dannoso sia per l'uomo (può provocare asfissia in ambienti chiusi), sia per la vegetazione (a causa dell'asfissia delle radici se in contatto col gas nel sottosuolo).

Per motivi di sicurezza quindi le discariche controllate sono dotate di un sistema di collettamento del biogas costituito da una serie di pozzi verticali, dai quali si dipartono a raggiera delle tubazioni fessurate disposte orizzontalmente. Il gas viene raccolto e asportato grazie alla pressione alla quale è sottoposto all'interno del corpo della discarica.

Alla semplice soluzione di bruciare il biogas in una torcia di combustione oggi sta sempre di più prendendo piede la possibilità di sfruttare il biogas a fini energetici (figura 18).

Figura 18 - Filiera di produzione di energia da biogas prodotto in discarica controllata di rifiuti solidi urbani (RSU)



2.1.3 La fermentazione alcolica da glucidi semplici e complessi

La finalizzazione energetica della fermentazione alcolica non è una scoperta di recente acquisizione; già nel 1938, infatti, su forte impulso

da parte di Henry Ford la produzione del Kansas (USA) di bioetanolo per l'autotrazione era di circa 54.000 t/anno⁵⁰. Tale risultato, per quanto transitorio e ridimensionato già nel secondo dopoguerra, fu possibile poiché questo processo biotecnologico è uno di quelli di più antica scoperta da parte dell'uomo ed è stato ampiamente consolidato nei secoli nell'ambito delle filiere alimentari.

Dal momento che la valorizzazione energetica del bioetanolo è destinata a confrontarsi con la concorrenza da parte sia delle collocazioni alimentari del prodotto fermentato, sia dell'utilizzo per l'autotrazione dei carburanti di origine fossile, nel tempo la filiera produttiva si è intensamente articolata per massimizzare la diversificazione delle materie prime. Per rendere competitiva la filiera energetica la principale tendenza seguita dall'evoluzione tecnologica è stata indirizzata soprattutto allo sfruttamento delle materie prime non destinabili all'alimentazione umana.

Il bioetanolo può essere attualmente prodotto dai carboidrati semplici (glucosio, saccarosio, mannosio) e dai polisaccaridi a catena lunga (amido, cellulosa, emicellulosa). Le materie prime possono derivare, pertanto, dalle colture dedicate alcoligene siano esse saccarifere (barbabietola da zucchero, canna da zucchero, sorgo zuccherino) o amidacee (frumento tenero e granoturco), nonché dai residui lignocellulosici. È evidente come rispetto alle colture dedicate, che richiedono delle lavorazioni specifiche ed evidenziano, dunque, dei costi elevati per il reperimento della materia prima, i residui lignocellulosici costituiscano l'ipotesi economicamente più interessante.

La filiera produttiva è articolata in tre sezioni ciascuna delle quali è caratterizzata da un livello di maturità differente e da soluzioni tecnologiche peculiari.

Il bioetanolo può essere prodotto dagli zuccheri semplici, provenienti dalle colture dedicate saccarifere (barbabietola da zucchero, canna da zucchero e sorgo zuccherino), dai cereali da granella (frumento tenero e granoturco) o dalle materie prime lignocellulosiche derivate dalle lavorazioni agricole.

⁵⁰ www.assodistil.it

La sezione saccarifera della filiera per la produzione del bioetanolo

La sezione saccarifera è finalizzata alla conversione energetica degli zuccheri ottenuti dalla barbabietola da zucchero, dalla canna da zucchero e dal sorgo zuccherino. Allo stato attuale la sezione è tecnologicamente matura sebbene, per la sua realizzazione, essa sia influenzata significativamente dalla concorrenza esercitata dalla filiera alimentare.

Da un punto di vista tecnologico, la filiera energetica ricalca in linea generale quella alimentare e prevede l'estrazione degli zuccheri dai tessuti vegetali, la loro fermentazione e la distillazione dell'etanolo.

La **fermentazione** è condotta generalmente dal lievito *Saccharomyces cerevisiae*. Viene attuata riproducendo in bioreattori le condizioni ideali per favorire il suo metabolismo di tipo anaerobico (ossia in presenza di basse concentrazioni di ossigeno), alla temperatura compresa tra 5-25°C e in un intervallo di pH variabile tra 4,8 e 5,0⁵¹.

La separazione dell'etanolo avviene per **distillazione**, ossia sfruttando le diverse temperature di ebollizione dei componenti presenti nella miscela precedentemente ottenuta: al termine della distillazione si ricava etanolo in concentrazione pari al 95% in peso con un contenuto residuo in acqua del 5%.

Per conseguire delle concentrazioni di etanolo prossime al 100%, sebbene ciò comporti un significativo incremento nei costi di produzione, si possono adottare i processi della distillazione frazionata o, in alternativa, della separazione tramite pervaporazione.

La distillazione frazionata è eseguita aggiungendo alla miscela di partenza il benzene: in questa ipotesi l'etanolo al termine della separazione presenta un residuo in acqua pari all'1% in peso.

Nella separazione tramite pervaporazione la miscela a valle della fermentazione è portata in fase di vapore e filtrata attraverso delle membrane di materiale selettivo idrofilo; al termine della separazione l'etanolo presenta un residuo in acqua del 3% in peso⁵².

La sezione saccarifera della filiera assume particolare rilievo in Brasile dove il bioetanolo è ottenuto dalla canna da zucchero. Ad essa è attribuibile la quasi totalità del bioetanolo prodotto.

⁵¹ Sheoran et al., 1999.

⁵² Ikegami et al., 2004; Ortiz et al., 2005.

La sezione amidacea della filiera per la produzione del bioetanolo

Nella sezione amidacea il bioetanolo è ottenuto a partire da materie prime ricche di amido. In questo caso è necessario trattare l'amido attraverso una reazione di idrolisi, per rendere fermentescibile il glucosio in esso contenuto.

A questo scopo le cariossidi (grani) di frumento e di mais sono triturate e disidratate dando origine alla pasta d'amido. L'amido è successivamente gelificato con vapore diretto alla temperatura di 175°C e alla pressione di 2 atm. L'idrolisi è generalmente condotta utilizzando un enzima, denominato amilasi, che ha la proprietà di liberare le molecole di glucosio incluse nelle catene di amido. Questo trattamento è condotto a una temperatura inferiore a 60°C, e la resa in zuccheri fermentescibili è dell'80%.

La restante parte della sezione amidacea è del tutto simile a quella saccarifera.

Tale sezione riveste un ruolo di primo piano, soprattutto nel mercato statunitense per la produzione del bioetanolo.

Il principale sottoprodotto della sezione amidacea della filiera è costituito dai residui ricchi in olio, proteine e fibre, noti come DDGS (*Distillers Dried Grains with Soluble*), che sono destinati alla preparazione dei mangimi zootecnici.

La sezione cellulosica della filiera per la produzione del bioetanolo

La produzione di bioetanolo in questo caso è ottenuta a partire da materie cellulosiche ovvero ad alto contenuto di cellulosa ed emicellulosa. La sezione richiede ancora importanti investimenti nel settore della ricerca per l'ottimizzazione tecnologica di diversi punti della filiera.

Sebbene attualmente non vi sia a livello mondiale una produzione industriale di etanolo di origine cellulosica, la possibilità di valorizzare attraverso questa via i residui lignocellulosici sta alimentando molteplici attività di ricerca e sviluppo, soprattutto negli USA, dove per ora sono realizzate soltanto in scala di laboratorio o pilota. L'importanza, che è riservata in questa sede alla sezione cellulosica va interpretata come una prospettiva futura auspicabile soprattutto in considerazione dei modesti costi per il reperimento della materia prima.

Dei principali componenti della biomassa lignocellulosica (cellulosa, emicellulosa e lignina), soltanto la cellulosa e l'emicellulosa sono costituite da zuccheri fermentescibili e, dunque, possono essere utilizzate per la produzione dell'etanolo. Uno dei punti critici che caratterizza perciò questa sezione della filiera è la separazione fisica della cellulosa e dell'emicellulosa dalla lignina. Questa finalità può essere perseguita mediante trattamenti chimico-fisici (il più studiato utilizza il vapore saturo ad alta pressione ed è denominato *steam explosion*), chimici (con acidi) e meccanici (con sistemi di presse).

La successiva idrolisi dell'emicellulosa e della cellulosa può essere eseguita per via chimica o enzimatica. L'idrolisi chimica acida può essere condotta in un'unica fase con acido solforico (H_2SO_4) concentrato (in concentrazione del 70-77%), addizionato al materiale cellulosico in rapporto 1,25:1 e alla temperatura di 50°C, oppure in due stadi applicando acido solforico diluito: il primo stadio è diretto all'attacco dell'emicellulosa (opera con H_2SO_4 in concentrazione del 0,7% e a una temperatura di 190°C) mentre il secondo è finalizzato all'attacco della cellulosa (opera con H_2SO_4 in concentrazione dello 0,4% e a una temperatura di 215°C).

Con l'idrolisi enzimatica la scissione delle catene di cellulosa ed emicellulosa avviene utilizzando invece enzimi detti cellulasi, scoperti nel microrganismo *Trichoderma reesei* ma individuati successivamente anche in molti altri gruppi microbici, tra cui alcuni batteri anaerobici (*Clostridium* spp. e *Ruminococcus* spp.), alcuni attinomiceti (*Cellulomonas* spp. e *Thermobifida* spp.) e alcuni funghi (*Humicola insolens*)⁵³. Questa soluzione è ritenuta generalmente preferibile rispetto a quella chimica.

In seguito al processo di idrolisi della cellulosa si ottengono molecole di glucosio, ossia uno zucchero a sei atomi di carbonio facilmente fermentescibile; l'idrolisi dell'emicellulosa fornisce anche zuccheri a cinque atomi di carbonio che sono fermentati ad etanolo con maggiore difficoltà.

La resa complessiva in bioetanolo di questa sezione è un elemento di ancora elevata criticità, soprattutto per quanto concerne l'emicellulosa. Per ovviare a questo limite, sono in fase di studio alcuni microrganismi, da utilizzare in alternativa al tradizionale *Saccharomyces cerevisiae*, tra cui *Thermoanabacter mathranii* ed *Escherichia coli*.

⁵³ Lynd et al., 2002.

L'evidente complessità di questa sezione della filiera grava significativamente sulla sua economicità. Per tale motivo sono in corso di ottimizzazione alcune soluzioni dirette a semplificarla da un punto di vista impiantistico. Le principali soluzioni studiate sono le seguenti:

- **SHF** (*Separated Hydrolysis and Fermentation*). Sono previsti quattro reattori per i quattro stadi del processo produttivo: la produzione dell'enzima cellulasi, l'idrolisi enzimatica della cellulosa e dell'emicellulosa, la fermentazione degli zuccheri a sei atomi di carbonio, la fermentazione degli zuccheri a cinque atomi di carbonio.
- **SSF** (*Simultaneous Saccharification and Fermentation*). Sono previsti tre reattori ed è introdotta una certa simultaneità tra gli stadi del processo: un reattore per la produzione delle cellulasi, un reattore per l'idrolisi enzimatica della cellulosa e dell'emicellulosa e per la contemporanea fermentazione degli zuccheri a sei atomi di carbonio, un reattore per la fermentazione degli zuccheri a cinque atomi di carbonio.
- **SSCF** (*Simultaneous Saccharification and Co-Fermentation*). È incrementato il grado di simultaneità e sono previsti due reattori: uno per la produzione delle cellulasi, l'altro per l'idrolisi enzimatica della cellulosa e dell'emicellulosa e per la fermentazione degli zuccheri.
- **DCM** (*Direct Microbial Conversion*). L'intero processo produttivo è realizzato in un unico reattore ed è caratterizzato da una completa simultaneità tra la produzione delle cellulasi, l'idrolisi della cellulosa e dell'emicellulosa e la fermentazione degli zuccheri^{54,55}.

Il principale sottoprodotto della sezione cellulosica della filiera produttiva del bioetanolo è rappresentato dalla lignina, destinabile alla valorizzazione energetica, al pari delle materie prime lignocellulosiche di altra provenienza.

⁵⁴ Lynd, 1996.

⁵⁵ Lynd et al., 2002.

2.1.4 *La conversione chimica degli oli*

Le materie prime utilizzate per la produzione del biodiesel sono gli oli ottenuti dalle colture di colza, girasole, soia, ecc... e quelli recuperati dagli usi alimentari mediante opportuni sistemi di raccolta differenziata. Nel primo caso il processo attuato è quello dell'estrazione degli oli vegetali, nel secondo caso si parla invece di rigenerazione degli oli vegetali. I prodotti ottenuti al termine dei due processi possono essere utilizzati direttamente quali combustibili oppure possono essere sottoposti alla reazione di transesterificazione per l'ottenimento del biodiesel.

Nonostante il recupero energetico degli oli alimentari esausti possa rappresentare una soluzione particolarmente interessante, anche in ragione del valore aggiunto di questa filiera che concorre alla riduzione della produzione di rifiuti e all'alleggerimento del carico inquinante in ingresso negli impianti di depurazione delle acque reflue civili, allo stato attuale sono le colture dedicate ad incidere più significativamente sulla disponibilità della risorsa. È, quindi, in direzione della conversione alle colture energetiche dei terreni a riposo (ai sensi degli incentivi concessi nell'ambito del *set aside no-food* – vedi paragrafo 4.4) oppure dei terreni destinati attualmente ad altri seminativi (ai sensi degli incentivi promossi attraverso la riserva di premi sulla base dell'art. 69 della PAC – vedi paragrafo 4.4), che sono rivolte le principali decisioni di politica agricola comunitaria.

L'estrazione degli oli vegetali

Le fasi di estrazione degli oli vegetali dalle colture oleaginose, in linea generale, sono le seguenti:

1. pulizia (con elettrovagli e magneti);
2. macinazione;
3. riscaldamento e condizionamento (80-90°C, umidità 7%);
4. estrazione meccanica (presse idrauliche o a vite) o chimica (solventi);
5. purificazione per depurazione o per raffinazione (neutralizzazione degli acidi grassi liberi) nell'eventualità di destinare gli oli alla produzione di biodiesel.

I semi derivanti dalle colture dedicate oleaginose sono puliti tramite elettrovagli e magneti, per eliminare gli eventuali materiali grossolani residui della raccolta e successivamente sono decorticati. La successiva macinazione consente la fuoriuscita degli oli dalle cellule. La lisi delle cellule, la diffusione della materia grassa dai semi e la separazione dalle componenti di natura proteica sono favorite dal riscaldamento e dal condizionamento, condotti a 80-90°C e ad un tenore di umidità del 7-10%.

L'estrazione degli oli dai semi macinati può essere realizzata per via meccanica o per via chimica. La scelta tecnologica è dettata principalmente dal contenuto in materia grassa: per contenuti superiori al 20% in peso è preferita l'estrazione meccanica, che richiede dei costi d'investimento minori; per contenuti in materia grassa inferiori al 20% in peso generalmente si propende per l'estrazione chimica.

L'estrazione meccanica si avvale di presse a vite o di presse idrauliche e lascia un residuo di materia grassa del 5-12%.

L'estrazione chimica prevede invece l'impiego di solventi organici. Quelli a più largo impiego nell'estrazione di oli a fini energetici sono il tricloroetilene, l'esano, il solfuro di carbonio, il propano, l'etano, il pentano e i fluidi supercritici, ossia gas (ad esempio CO₂ e SO₂) liquefatti a pressioni elevate e a temperature basse. La resa dell'estrazione chimica è influenzata dalle condizioni in cui è condotta. Allo stato attuale sono ritenuti ottimali un rapporto seme-solvente pari a 1:18, una temperatura dell'ambiente di reazione di 50°C, nonché tempi di contatto pari a due ore per il colza e un'ora per il girasole. In queste ipotesi il residuo di materia grassa non estratta è pari all'1%. La modalità di contatto è scelta in base alla granulometria, ottenuta nel corso della macinazione: per granulometrie fini, prossime a farine, è preferita l'immersione, per granulometrie più grossolane è adottata la percolazione in controcorrente per gravità. Le estrazioni chimiche possono essere condotte in continuo o in discontinuo (*batch*): la prima soluzione tecnologica è giustificata per impianti che trattino almeno 250-500 t/giorno.

Le due soluzioni estrattive possono essere integrate. Nonostante un più elevato costo di investimento la resa è prossima al 100%. In questa ipotesi, inizialmente la materia prima macinata è sottoposta a un'estrazione meccanica parziale che lascia un residuo di materia grassa del 20-24%; ad essa subentra poi l'estrazione chimica.

Al termine della fase estrattiva la quantità di olio grezzo è in media del 37% in peso. Le caratteristiche qualitative dell'olio grezzo ottenuto non sono però compatibili con l'eventuale conversione chimica in

biodiesel. In questo caso si rende pertanto necessaria la purificazione degli oli. Essa può essere condotta secondo due modalità, la depurazione e la raffinazione, che si differenziano per il livello qualitativo conseguito, più elevato nel secondo caso. I due processi si diversificano a valle di una comune fase di centrifugazione.

La depurazione è diretta alla rimozione delle impurità (cere, resine, pigmenti e mucillagini) presenti nell'olio grezzo ed è condotta con acido solforico, con soluzioni acquose di sali oppure mediante la percolazione attraverso delle terre adsorbenti.

La raffinazione è diretta a rimuovere le impurità operando invece con soluzioni saline, con acido fosforico oppure con acido citrico. Inoltre la raffinazione riduce l'acidità degli oli per neutralizzazione che può essere condotta per via fisica (a una temperatura di 240-260°C e in condizioni di sottovuoto - 1 mbar) oppure per via chimica (operando con sodio idrossido a una temperatura di 60-80°C e a pressione atmosferica). La migliore qualità dell'olio raffinato, rispetto a quello depurato, è riconducibile soprattutto alla riduzione dell'acidità degli oli grezzi. Per tale motivo questo processo è quello più usato nella pratica.

Al termine della purificazione la resa in olio vegetale è del 34,4%.

Il principale sottoprodotto dell'estrazione degli oli vegetali è il pannello proteico; la sua resa produttiva pari al 58% in peso e le sue applicazioni in zootecnia assumono importanza nell'ambito dell'analisi costi-benefici in fase di valutazione della fattibilità dell'avvio della filiera⁵⁶.

La rigenerazione degli oli vegetali di origine alimentare

Tra gli oli vegetali esausti di origine alimentare che possono essere recuperati per la valorizzazione energetica, vanno annoverati quelli provenienti dalle lavorazioni industriali (da forni e friggitrici) e dalle utenze domestiche (oli di frittura e oli per la conservazione degli alimenti). L'utilizzo alimentare, tuttavia, provoca un parziale deterioramento delle materie prime, che necessitano quindi di una rigenerazione a monte della trasformazione in biodiesel.

⁵⁶ www.cti2000.it

La rigenerazione si articola in fasi successive: la rimozione delle impurità grossolane mediante le fasi successive di filtrazione, neutralizzazione e disidratazione.

Gli oli vegetali esausti rigenerati possono essere assimilati a quelli ottenuti dalle colture dedicate e da questo punto in poi seguono la medesima filiera.

La transesterificazione

La reazione di sintesi del biodiesel è nota come transesterificazione, processo in cui gli oli reagiscono con il metanolo, in presenza di un catalizzatore, per formare estere metilico e, come prodotto secondario, glicerina grezza. In altri termini la reazione comporta la rottura delle molecole di trigliceridi costituenti i grassi vegetali per ottenere una miscela di esteri metilici degli acidi grassi. Tale processo ha come principale risultato quello di ridurre la viscosità degli oli di partenza rendendoli compatibili con alcuni usi energetici e in particolare con l'uso del biodiesel come carburante per l'autotrazione.

A fronte di una resa media della conversione degli oli vegetali in biodiesel pari al 98%, le soluzioni impiantistiche per la sua realizzazione sono diversificate, a seconda delle condizioni imposte nell'ambiente di reazione. La scelta tecnologica scaturisce principalmente dalla valutazione delle quantità da trattare, della periodicità con cui le materie prime sono disponibili nel bacino afferente e della qualità degli oli in ingresso nell'impianto.

Le principali tecnologie, che si distinguono soprattutto per la temperatura e la pressione di processo, sono le seguenti:

- **Impianto a temperatura ambiente.** Il processo è svolto a 20°C a pressione atmosferica, tramite la catalisi da parte del potassio idrossido o del sodio idrossido. È indicato per il trattamento *in batch*, con produzioni di biodiesel fino a 3.000 t/anno. Il tempo di reazione è di 8 ore.
- **Impianto a temperatura medio-alta.** La reazione è condotta a 70°C a pressione atmosferica, tramite catalisi con potassio idrossido o sodio idrossido. È indicato per il trattamento in continuo ed *in batch*, con produzioni fino a 25.000 t/anno. Il tempo di reazione è di 1 ora.
- **Impianto ad alta temperatura e pressione.** La transesterificazione è eseguita a 200°C, alla pressione di 50 MPa. Questa soluzione impiantistica presenta dei costi di installazione e di gestione più elevati ed è giustificata per produzioni superiori alle 25.000 t/anno, sia in continuo, sia *in batch*. Rispetto alle soluzioni precedenti,

consente il trattamento di oli ad elevata acidità (fino al 4%), poiché adotta la catalisi acida con acido fosforico.

In tutte le soluzioni tecnologiche sono previsti il recupero del metanolo in eccesso per distillazione sottovuoto (*stripping*) e il suo riutilizzo in testa all'impianto.

Il principale sottoprodotto della transesterificazione è il glicerolo, caratterizzato da una resa dell'11%, che ha un'elevato valore economico per le sue applicazioni farmaceutiche e cosmetiche.

2.1.5 La biogenesi dell'idrogeno

L'idrogeno non è una fonte primaria di energia ma un vettore energetico. L'idrogeno infatti, pur essendo presente in natura in enormi quantità nella forma semplice, H_2 , è pressoché inesistente o è disperso in altri gas, come ad esempio nell'atmosfera, in percentuali molto basse (in questo caso prossime allo 0,01%). L'idrogeno molto più frequentemente si presenta legato ad altri elementi in una molecola più o meno complessa. Per produrre idrogeno nella forma H_2 è pertanto necessario operare su tali molecole attraverso processi che richiedono un consumo energetico molto spesso talmente elevato da non compensare l'energia ricavabile dalla combustione di questo elemento. Tali considerazioni, nella situazione attuale, non rendono vantaggioso questo tipo di approvvigionamento energetico. Rimane tuttavia indispensabile il sostegno al settore della ricerca affinché vengano individuati i processi tecnologici che rendano fattibile lo sviluppo di questa filiera.

Per la produzione di idrogeno, attualmente, si opera mediante *steam reforming*, l'ossidazione parziale degli idrocarburi di origine petrolifera oppure mediante elettrolisi dell'acqua. La biogenesi (ovvero la produzione biologica dell'idrogeno) è invece limitata a una nicchia strettamente sperimentale e non significativa nella produzione su scala mondiale dell'idrogeno. Tuttavia, rispetto ai processi chimici, la biogenesi dell'idrogeno offre prospettive più sostenibili.

La biogenesi dell'idrogeno molecolare (H_2) ha luogo in alcuni organismi procarioti (batteri anaerobici e cianobatteri) ed eucarioti (alghe verdi) come prodotto di vie metaboliche⁵⁷.

⁵⁷ Schlegel, Schneider, 1978; Aoyama, 1997.

È stato evidenziato come alcuni batteri fotosintetici non sulfurei producano l'idrogeno molecolare gassoso nel corso della loro crescita a partire da numerosi substrati organici e, contestualmente, come altri batteri sulfurei utilizzino per la stessa finalità le forme inorganiche dello zolfo, *in primis* i solfuri. I cianobatteri, ad esempio, si sono dimostrati in grado di produrre l'idrogeno molecolare in presenza della radiazione solare ad opera di un enzima, detto nitrogenasi, come meccanismo di protezione nei confronti del potere ossidante dell'ossigeno⁵⁸.

La fotobiogenesi dell'idrogeno, scoperta in particolare nelle alghe verdi, è un processo che risulta promettente⁵⁹. Nel corso della fase luminosa della fotosintesi clorofilliana un enzima, detto idrogenasi, prende parte a una reazione di ossidoriduzione che genera una molecola di idrogeno gassoso. Attualmente la potenzialità tecnologica di questo processo non è espressa, poiché tale enzima è reversibile e inattivato per *feedback* negativo dall'accumulo dell'ossigeno molecolare, che avviene nel corso della fotosintesi stessa. È, dunque, in direzione della separazione spaziale o temporale a livello cellulare dell'idrogeno e dell'ossigeno che le principali attività di ricerca si stanno concentrando⁶⁰.

Una maggiore maturità caratterizza, invece, la sintesi dell'idrogeno attraverso la gassificazione tradizionale e supercritica e la digestione anaerobica della biomassa; ciascuna di esse porta a uno stadio intermedio, caratterizzato dalla produzione di un gas (*syngas* nel caso della gassificazione, *biogas* nel caso della digestione anaerobica), a cui segue un trattamento di *steam reforming*, diretto a incrementare la frazione di idrogeno molecolare presente nella miscela gassosa⁶¹.

⁵⁸ Mitsui et al., 1983.

⁵⁹ Melis et al., 2000.

⁶⁰ Benemann, 1996.

⁶¹ Van Thuijl, Van Ree, De Lange, 2003.

2.2 Metodi e processi termochimici di conversione energetica

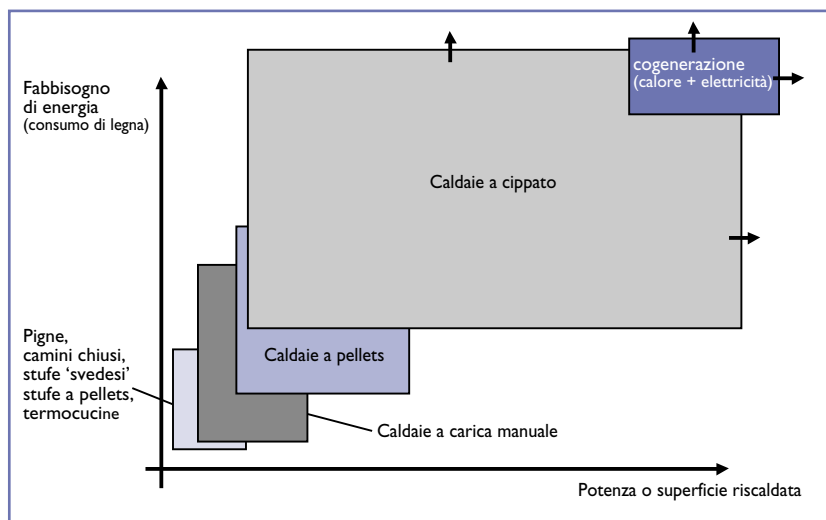
2.2.1 La produzione di energia termica

Tipologie impiantistiche

Le tipologie di generatori termici alimentati a legno disponibili sono fondamentalmente tre e si differenziano sulla base della forma fisica delle tre principali categorie di combustibili vegetali (figura 19):

- legna da ardere in ciocchi;
- legno sminuzzato (cippato);
- pastiglie di legno macinato e pressato (pellet).

Figura 19 - Campi di applicazione delle tecnologie di combustione della biomassa ligneocellulosica



Per potenzialità medio-basse (indicativamente fino a 100-200 kW) è ancora possibile il caricamento manuale con combustibile ridotto in tronchetti. La norma dei sistemi medio-grandi, e la regola per quelli più grandi, è di avere la camera di combustione alimentata con legno sminuzzato attraverso sistemi automatici (a coclea, a nastro) che trasportano il combustibile dal deposito locale (silo) alla camera di combustione.

Caldaie per la combustione di legna in ciocchi

La combustione della legna da ardere rimane la forma più diffusa di conversione energetica delle biomasse. Tuttavia, a causa della necessità di carica manuale dei ciocchi, le caldaie a legna hanno potenza limitata e trovano un impiego ottimale per il riscaldamento di case isolate comprendenti uno o pochi appartamenti.

Attualmente la tipologia di caldaie più diffusa per legna in ciocchi è quella a fiamma inversa (figura 20) in cui la camera di combustione è situata sotto il vano in cui viene caricata la legna. Queste caldaie sono provviste di sistemi per la circolazione forzata dell'aria comburente: il ventilatore può essere posto sul lato anteriore della caldaia, veicolando l'aria comburente all'interno e facendola fluire attraverso il combustibile fino allo scarico dei fumi (ad aria soffiata); in altri modelli il ventilatore è situato sulla bocca di uscita dei fumi e aspira i gas combusti creando una depressione in caldaia che consente il richiamo dell'aria comburente dall'esterno (ad aria aspirata).

Figura 20 - Caldaia a fiamma inversa per la combustione di legna in ciocchi (fonte AIEL)



Una parte dell'aria (primaria) viene introdotta in caldaia immediatamente sopra la griglia sulla quale è appoggiata la legna. L'aria primaria permette l'avvio della combustione (gassificazione), con formazione di uno strato di braci a contatto della griglia e lo sviluppo di gas

combustibili derivanti dalla pirolisi del legno (monossido di carbonio e idrogeno); questi ultimi, trascinati in basso attraverso la griglia, giungono nella camera sottostante dove l'aria secondaria consente il completamento della combustione attraverso un suo moderato eccesso. L'esatto quantitativo di aria, la temperatura e la turbolenza elevate nella camera di combustione, nonché la permanenza dei gas caldi nel focolare per un tempo sufficiente al completamento delle reazioni termochimiche di combustione, rappresentano i fattori essenziali al fine di una combustione ottimale.

L'inversione della fiamma consente di avere una combustione progressiva della legna, che non prende totalmente fuoco nel vano di carico, ma brucia in prossimità della griglia: ciò rende la potenza erogata dalla caldaia più stabile nel tempo e permette un maggior controllo della combustione (a tutto vantaggio del rendimento termico e delle emissioni inquinanti). I modelli più avanzati, dotati di sistemi di regolazione a microprocessore, raggiungono rendimenti termici superiori al 90% alle condizioni di potenza nominale.

La regolazione dell'aria di combustione avviene in base al fabbisogno di ossigeno misurato nei fumi con la sonda lambda (vedi glossario) che consente di ottimizzare l'afflusso di aria durante il funzionamento della caldaia a legna. In generale il locale dove è alloggiata la caldaia deve avere sezioni libere, comunicanti con l'esterno e non intercettabili, per consentire il passaggio d'aria necessaria alla combustione.

Caldaie a cippato

Gli impianti a cippato sono totalmente automatizzati e non hanno limiti dimensionali, potendo raggiungere potenze anche di diversi MW termici. I rendimenti sono analoghi a quelli delle caldaie a gas/gasolio. Per le caratteristiche di automazione e risparmio di esercizio, gli impianti a cippato sono particolarmente indicati per il riscaldamento di edifici di dimensioni medie o grandi quali alberghi, scuole, condomini, ospedali, centri commerciali o più unità abitative collegate da una rete di teleriscaldamento.

Poiché il caricamento del combustibile in caldaia avviene in modo automatico, è necessario che accanto al locale caldaia venga predisposto un locale (silo) per lo stoccaggio del combustibile, in grado di garantire l'alimentazione del generatore termico per 1-3 giorni. Dal silo di alimentazione il cippato viene estratto automaticamente e convogliato, per mezzo di una coclea dosatrice, nella caldaia, dove avviene la combustione mediante l'immissione di aria primaria e secondaria.

La combustione avviene in caldaie a griglia che può essere:

- fissa, per bruciare materiali fini e a basso contenuto di umidità;
- mobile, per bruciare combustibili a pezzatura grossolana, ad alto contenuto di ceneri e a umidità fino al 50% in peso di acqua, quali ad esempio le biomasse forestali fresche di taglio.

Nei sistemi più avanzati, il flusso di cippato e la combustione sono regolati in continuo da un microprocessore in base alla richiesta di energia dell'utenza e alla temperatura e concentrazione di ossigeno dei fumi. Il sistema può modulare la potenza erogata mantenendo la combustione ottimale anche con combustibili diversi. L'accensione del cippato può avvenire sia manualmente, sia automaticamente per mezzo di dispositivi sia elettrici che a combustibile liquido. In alcuni modelli esiste la funzione di mantenimento braci che consente alla caldaia di mantenere una piccola quantità di braci accesa durante le pause di funzionamento, permettendo così la riaccensione immediata al riavvio dell'impianto.

Importanti dispositivi di sicurezza che dovrebbero essere sempre installati negli impianti termici a cippato riguardano il sistema di alimentazione del combustibile e sono volti a impedire eventuali ritorni di fiamma dalla caldaia al silo di stoccaggio. Un primo essenziale sistema ha lo scopo di interrompere la continuità fisica del flusso del cippato dal silo alla caldaia. Per questo motivo gli impianti a cippato comprendono sovente una tramoggia di caduta del combustibile interposta tra due differenti coclee, delle quali una proviene dal silo e l'altra porta il materiale in caldaia. Il flusso del cippato, in caduta libera nella tramoggia, può essere facilmente interrotto in caso di emergenza da una serranda tagliafiamma, oppure da una valvola stellare che mantiene permanentemente la separazione fisica tra due ambienti.

Nella parte terminale della coclea proveniente dal silo può inoltre essere installata una valvola di sicurezza termica collegata all'acquedotto che, in caso di emergenza, immette acqua nel canale della coclea impedendo il propagarsi del ritorno di fiamma.

Condizioni favorevoli al ritorno di fiamma verso il silo si possono instaurare quando nel focolare si verifica una pressione positiva, mentre il rischio è minimo se la camera di combustione viene costantemente mantenuta in depressione. Per tale motivo diversi modelli di caldaie a cippato sono dotati di dispositivi atti al controllo della depressione nel focolare.

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DEGLI IMPIANTI A CIPPATO

Per il dimensionamento degli impianti di riscaldamento a cippato possono essere seguiti criteri simili a quelli relativi ad impianti convenzionali a gas/gasolio. Nel caso in cui si preveda di installare o di mantenere in esercizio una caldaia a gas/gasolio con funzione di scorta o emergenza, la caldaia a cippato può essere dimensionata intorno al 70% della potenza di picco stimata. Ciò consente di risparmiare sui costi di acquisto e di installazione. Poiché i picchi di fabbisogno di potenza sugli impianti di riscaldamento sono generalmente di breve durata, e limitati ad alcuni giorni del mese più freddo, con questo accorgimento si riesce comunque a coprire, con l'energia da biomassa, in generale oltre il 90% del fabbisogno totale di calore.

Nel caso in cui un'unica caldaia a cippato debba provvedere al riscaldamento di numerose utenze collegate da una rete di teleriscaldamento, la potenza della caldaia a biomassa corrisponde alla somma delle potenze di tutte le utenze allacciate moltiplicata per un coefficiente di contemporaneità (inferiore a 1) che tenga conto delle caratteristiche del prelievo termico delle varie utenze. Il valore di questo coefficiente va valutato caso per caso, ed è spesso compreso tra 0,6 e 0,7.

Caldaie a pellet

L'elevata densità energetica e la facilità di movimentazione rendono il pellet il combustibile vegetale più indicato per impianti di riscaldamento automatici di tutte le dimensioni. Esso può essere utilizzato nelle caldaie a cippato oppure in caldaie appositamente progettate.

In tutti i casi l'accensione è automatica e molto rapida, per mezzo di una resistenza elettrica. Nei sistemi più avanzati la regolazione dell'aria comburente e del flusso di combustibile vengono effettuate automaticamente ad opera di un microprocessore. Tali caratteristiche di semplicità d'uso e di automazione conferiscono agli impianti di riscaldamento a pellet un elevato livello di affidabilità.

L'elemento qualificante per la sicurezza di una caldaia a pellet è costituito dai dispositivi contro il ritorno di fiamma dal bruciatore verso il serbatoio. Il sistema più diffuso consiste nell'interporre un tratto di caduta libera del pellet tra la coclea di trasporto e la caldaia. Questo tratto è generalmente costituito da un tubo flessibile. Altri si-

stemi prevedono serrande tagliafiamma o valvole stellari. In caso di mancanza di corrente elettrica o di guasto della pompa di circolazione, il rischio di ebollizione dell'acqua è molto minore rispetto alle caldaie a legna, per la piccola quantità di combustibile presente nel focolare. Tuttavia, poiché in molti casi le caldaie a pellet sono predisposte anche per la combustione di legna da ardere e sono dotate di scambiatore di calore di emergenza, è buona pratica operativa allacciare questo a una presa di acqua fredda e installare una valvola di sicurezza termica, come già descritto per le caldaie a legna.

CALDAIE COMBinate PELLET/GASOLIO

È anche possibile utilizzare il pellet in alcuni modelli di caldaie a gasolio, per mezzo di speciali bruciatori. I bruciatori per pellet da utilizzare in caldaie a gasolio si applicano sulla parte anteriore della caldaia. Essi vengono alimentati dall'alto e bruciano il pellet sviluppando una fiamma orizzontale che si proietta nella caldaia, al pari di quanto avviene negli impianti a gasolio.

Figura 21 - Caldaia a cippato o a pellet di piccola e media potenza (fonte AIEL)

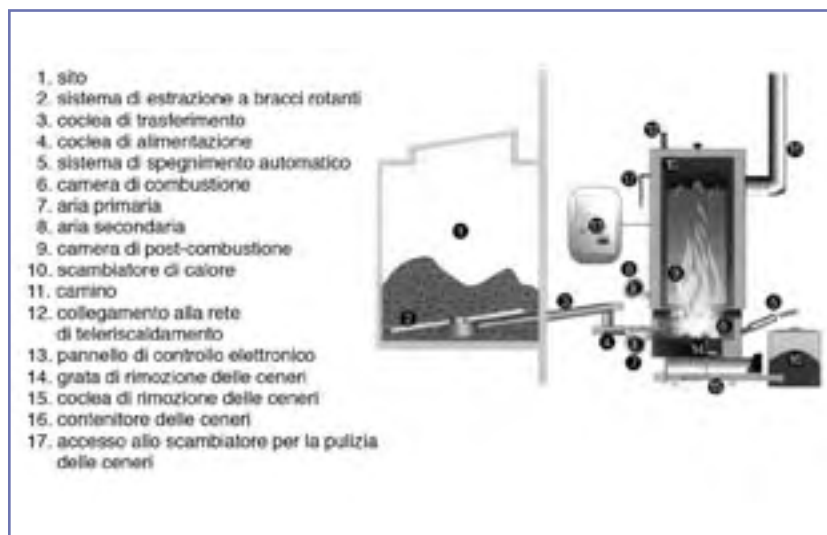
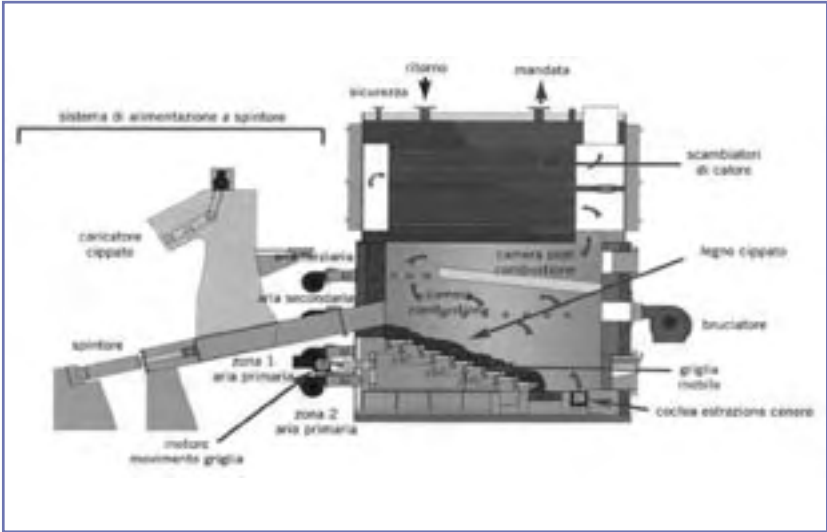


Figura 22 - Caldaia a cippato o a pellet di grande potenza (fonte AIEL)



Modelli principali di camere di combustione

Impianto a griglia fissa

Impianto ad alimentazione inferiore per combustibile secco: consiste in una caldaia ad alimentazione inferiore. La speciale struttura del focolare impedisce la formazione di scorie anche nel caso di materiale molto secco e trucioli.

Tabella 19 - Caratteristiche principali degli impianti a griglia fissa ad alimentazione inferiore per combustibile secco

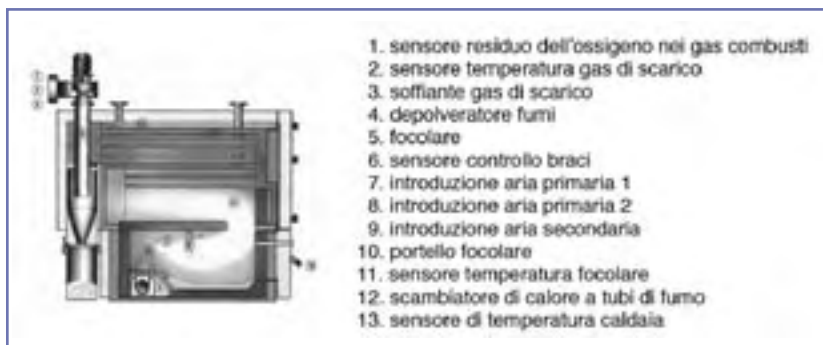
Gamma di potenze ottimali	10-3.000 kW
Campo di regolazione della potenza	20-100%
Umidità relativa del combustibile	10-37%
Contenuto ceneri	fino a 1%
Rendimento nominale utile	da 75 a 80%

Impianto ad alimentazione inferiore per combustibile umido: per le gamme di potenza medio-piccole gli impianti ad alimentazione inferiore costituiscono un sistema valido anche per la combustione di biomassa proveniente dal bosco. I vantaggi principali sono un'ottima possibilità di regolazione e una costruzione compatta.

Tabella 20 - Caratteristiche principali degli impianti a griglia fissa ad alimentazione inferiore per combustibile umido

Gamma di potenze ottimali	10-3.000 kW
Campo di regolazione della potenza	25-100%
Umidità relativa del combustibile	20-55%
Contenuto ceneri	fino a 2%
Rendimento nominale utile	da 70 a 75%

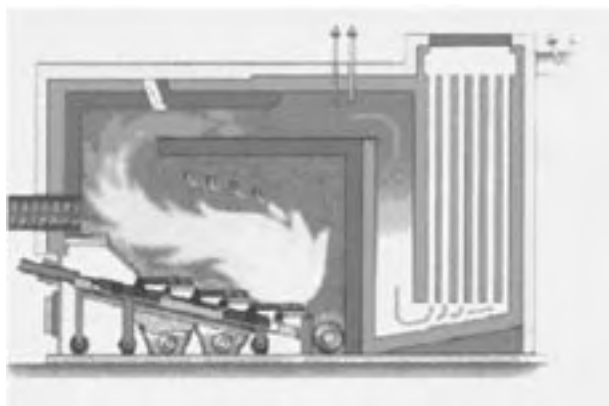
Figura 23 - Camera di combustione ad alimentazione inferiore (fonte: Requisiti tecnici per impianti a cippato superiori a 350 kW, Energia e Ambiente)



Impianto a griglia mobile

Con movimento di avanzamento-arretramento: nella manutenzione dei boschi e nelle segherie vengono prodotti gli assortimenti legnosi più disparati, a volte con alto contenuto d'acqua o cortecce. Se si vuole utilizzare convenientemente tali assortimenti legnosi, direttamente dal bosco alla caldaia, la griglia mobile ad avanzamento-arretramento è il sistema ideale (figura 24). Questo tipo di impianto è di facile manutenzione e ha un'elevata tollerabilità di combustibile.

Figura 24 - Caldaia a griglia mobile con movimento traslatorio alternato (fonte: Requisiti tecnici per impianti a cippato superiori a 350 kW, Energia e Ambiente)



La caldaia a griglia mobile viene utilizzata negli impianti di potenza maggiore, anche per la combustione di legno secco.

Tabella 21 - Caratteristiche principali degli impianti a griglia mobile

Gamma di potenza ottimale	50-3.000 kW
Campo di regolazione della potenza	30-100%
Umidità relativa del combustibile	9-60%
Contenuto ceneri	fino a 10%
Rendimento nominale utile	da 80 a 85%

Con movimento di rotazione: si tratta di caldaie indicate per ogni tipo di biomassa e per potenze elevate (oltre i 2.000 kW). In questa situazione l'avanzamento si realizza per gravità sagomando e disponendo opportunamente gli elementi della griglia (figura 25). I rendimenti sono intorno al 70%. Nella fattispecie la camera di combustione rotante migliora la combustione e quindi il rendimento nominale utile della caldaia; in generale è caratterizzata da maggiori eccessi d'aria rispetto alle tipologie precedenti.

Figura 25 - Caldaia a griglia mobile con movimento rotatorio (fonte: Requisiti tecnici per impianti a cippato superiori a 350 kW, Energia e Ambiente)



Principi di dimensionamento di impianti termici a biomassa

Il generatore termico a biomassa

Per dimensionare la caldaia è necessario calcolare il fabbisogno termico in condizioni di progetto ovvero la potenza dell'impianto da installare; questa sarà fondamentalmente funzione della temperatura esterna di progetto e delle dispersioni dell'edificio.

Il corretto dimensionamento dell'impianto è un punto critico: l'eccessivo sovradimensionamento di una caldaia a biomassa può infatti ridurre sensibilmente il rendimento medio stagionale dell'impianto. Ciò è dovuto al fatto che anche durante le fasi di *stand-by* la caldaia deve rimanere in temperatura per essere in grado di riprendere il carico alla richiesta. Nei grandi impianti può essere utile suddividere la potenza tra più caldaie; questa possibilità, oltre ad ovviare in parte al problema del sovradimensionamento (potendo parzializzare, ad esempio, il carico a seconda delle stagioni), serve anche ad aumentare la sicurezza dell'impianto in caso di anomalie o guasti ad un generatore. Analogamente, è possibile affiancare all'impianto a biomassa un'altra caldaia a combustibile tradizionale, da utilizzare per integrare le punte di richiesta, per emergenza o

eventualmente durante le stagioni di basso carico, ad esempio nel caso si debba fornire una quantità di acqua sanitaria o di altri servizi in misura insufficiente per mantenere in marcia vantaggiosamente la caldaia a biomassa.

Le caldaie a biomassa hanno costi di investimento molto superiori alle caldaie tradizionali alimentate a gas/gasolio; è quindi opportuno installare le caldaie a biomassa per la base del carico della domanda di energia termica e caldaie tradizionali per le punte del carico e in caso di malfunzionamento delle prime.

Il silo di stoccaggio per impianti a cippato o a pellet

Il silo va dimensionato sulla base della potenza e del rendimento della caldaia, delle caratteristiche del combustibile e dell'autonomia richiesta. Il volume utile del silo deve contenere il combustibile necessario al funzionamento della caldaia per il periodo che intercorre fra una fornitura e quella successiva, più un'opportuna scorta (dell'ordine del 20%). Tale volume deve essere determinato in funzione del consumo durante il periodo di tempo calcolato nelle condizioni di massimo carico termico medio effettivo.

Il silo di stoccaggio del cippato dovrebbe essere posto in un vano adiacente al locale caldaia o situato nelle immediate vicinanze: infatti una delle più importanti condizioni per la fattibilità di un impianto di riscaldamento a cippato è la disponibilità di un ambiente per lo stoccaggio situato in posizione accessibile ai mezzi di trasporto del combustibile. Al fine di facilitare le operazioni di scarico del cippato dai mezzi di trasporto, il silo è spesso situato al di sotto del piano stradale.

Il silo di stoccaggio può essere ricavato da un locale preesistente o costruito *ex novo*. In ogni caso deve essere accuratamente protetto da infiltrazioni di acqua.

Sul fondo del silo viene posizionato l'estrattore del cippato che preleva il combustibile e lo convoglia nel canale della coclea di trasporto. Nei piccoli impianti, per potenze fino a 300-500 kW e capienze fino a circa 100 m³, viene generalmente usato un estrattore a braccio rotante che richiede una sezione del silo circolare o quadrata.

Per impianti di maggiore potenza vengono usati estrattori a fondo mobile, costituiti da una o più rastrelliere parallele ad azionamento idraulico che, con un lento movimento traslatorio alternato, veicolano il cippato nel canale della coclea (figura 26).

Figura 26 - Sistemi di estrazione del cippato (fonte ITABIA)



Le caldaie a pellet di piccola potenza sono dotate di un serbatoio per il combustibile di capacità generalmente limitata a qualche centinaio di litri. Nei sistemi più semplici questo contenitore viene caricato a mano svuotandovi sacchetti di pellet. Per aumentare l'autonomia e quindi l'affidabilità è opportuno predisporre un silo di stoccaggio, nel quale il pellet viene scaricato direttamente da un'autobotte. In base al potere calorifico del pellet e ai rendimenti di conversione, il consumo orario di combustibile alla potenza nominale della caldaia è di circa $0,25 \text{ kg/h}$ ($0,35 \text{ dm}^3/\text{h}$) per kW di potenza.

Se invece il silo è situato più lontano, fino a dieci metri e oltre dal locale caldaia, il trasporto può essere effettuato con coclee flessibili o con sistemi pneumatici (figura 27). In ogni caso va posta la massima cura nel preservare il silo di stoccaggio da infiltrazioni di acqua che possono provocare il rigonfiamento del pellet fino a renderlo inservibile.

Il sistema basato sulla consegna del pellet sfuso è analogo a quello in uso per il rifornimento del gasolio e, per rapidità e semplicità, è il più indicato per tutti gli impianti di riscaldamento a pellet. Il rifornimento può essere effettuato fino a 20-30 metri dal luogo in cui si ferma il camion.

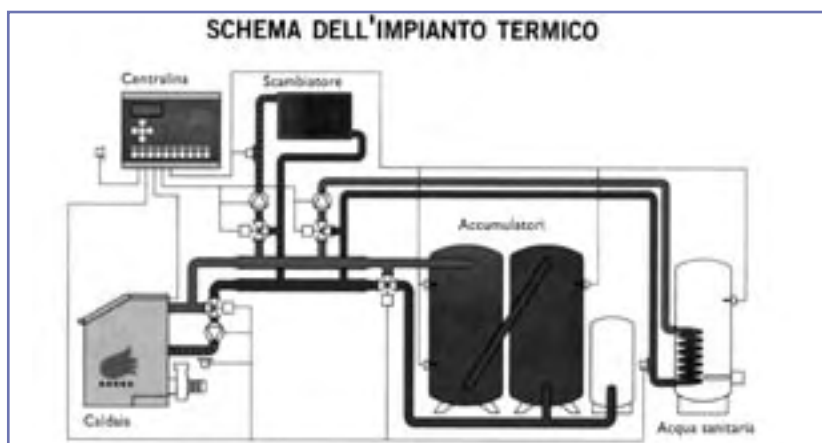
Figura 27 - Sistemi di alimentazione delle caldaie a pellet (fonte ITABIA)



L'accumulo termico inerziale

L'installazione ottimale di una caldaia a legna prevede la presenza di un accumulatore inerziale: esso è costituito da un serbatoio d'acqua termicamente isolato, collegato direttamente alla mandata della caldaia tramite un'apposita pompa. L'acqua contenuta nell'accumulatore è pertanto la stessa che circola in caldaia e nell'impianto di riscaldamento (figura 28).

Figura 28 - Schema ottimale di un impianto di riscaldamento alimentato da caldaia a biomassa: sono presenti l'accumulo termico inerziale, il bollitore per l'acqua sanitaria e la centralina di controllo (fonte AIEL)



L'accumulatore inerziale svolge le seguenti importanti funzioni:

- consente alla caldaia di funzionare in modo regolare, evitando interruzioni dovute a una insufficiente richiesta di energia da parte dell'impianto di riscaldamento; l'energia accumulata si renderà disponibile nel momento in cui il progressivo esaurimento del combustibile determinerà una riduzione della potenza erogata dalla caldaia; inoltre il funzionamento senza interruzioni riduce la fumosità delle emissioni e lo sporcamento del camino, protegge la caldaia da dannose formazioni di condensati catramosi, aumentando il rendimento globale dell'impianto;
- costituisce un "volano" termico per l'impianto di riscaldamento e fa aumentare il comfort di esercizio, rendendolo simile a quello di impianti automatici a gas/gasolio.

Ai fini del dimensionamento dell'accumulatore, in linea generale, è possibile affermare che la cubatura dell'edificio da riscaldare influisce sulla dimensione dell'accumulatore in modo negativo: a parità di caldaia a legna, tanto più piccola è l'abitazione e tanto più grande dovrà essere l'accumulatore per compensare i minori assorbimenti termici delle utenze. In alcuni modelli avanzati di caldaie a legna con regolazione a microprocessore la temperatura dell'accumulatore viene rilevata in diversi punti e la potenza erogata può essere automaticamente ridotta per evitare una troppo rapida saturazione dell'accumulatore inerziale.

Produzione di acqua calda sanitaria

Il sistema più semplice di produzione di acqua calda sanitaria consiste nell'utilizzare un bollitore con scambiatore interno collegandolo all'impianto mediante una pompa e un termostato. Il sistema può essere attuato sia in impianti dotati di accumulatore inerziale sia in impianti privi di questo. Un accumulatore inerziale termicamente ben isolato consente durante l'estate di ricaricare più volte il bollitore sanitario senza dover riaccendere la caldaia. Particolare attenzione va dedicata al dimensionamento dell'impianto, tenendo conto che le caldaie a legna, a differenza di quelle a gas o a gasolio, devono per quanto possibile funzionare in continuo e senza interruzioni.

Aspetti ambientali dei generatori termici a biomassa

Il camino è un importante componente dell'impianto di riscaldamento a legna. La sua funzione non è solamente quella di allontanare e disperdere i fumi, ma di assicurare, grazie a un adeguato tiraggio, il buon funzionamento della caldaia. Il tiraggio può essere naturale o forzato; il primo è tanto migliore quanto più caldi rimangono i fumi che percorrono il camino: per questo motivo il camino dovrebbe essere dotato di un buon isolamento termico. Un altro motivo importante per isolare termicamente il camino è quello di evitare che la temperatura dei fumi scenda al di sotto della soglia di condensa, nel qual caso si potrebbe verificare un rapido sporcamento delle pareti del camino stesso, fino a giungere all'intasamento. Ottime prestazioni sono fornite dalle canne fumarie in acciaio inossidabile coibentate.

I valori di concentrazione degli inquinanti emessi in forma gassosa e di particolato devono essere mantenuti entro i limiti previsti dal DPCM 8 marzo 2002, che determina anche le dotazioni minime richieste per gli impianti termici a biomasse (tabella 22 e tabella 23).

Tabella 22 - Dotazioni minime richieste per gli impianti termici a biomasse dal DPCM 8 marzo 2002

	Potenza termica nominale (P) (MW)			
	P>1	P>3	P>6	P>20
Alimentazione automatica combustibile	✓	✓	✓	✓
Misura in continuo di Temperatura e O ₂ in camera di combustione		✓	✓	✓
Regolazione automatica aria/combustibile		✓	✓	✓
Bruciatore pilota			✓	✓
Misura in continuo di T, CO, NO _x ed H ₂ O _{vap} nell'effluente gassoso			✓	✓
Misura in continuo di polveri e Carbonio Organico Totale nell'effluente gassoso				✓

Tabella 23 - Valori limite delle emissioni inquinanti in funzione della taglia dell'impianto fissati dal DPCM 8 marzo 2002 [mg/Nm³]

	Potenza termica nominale complessiva installata (P) MW			
	0,15<P≤3	3<P≤6	6<P≤20	P>20
Polveri totali	100	30	30	30
Carbonio Organico Totale (COT)	-	-	30	20
Monossido di carbonio (CO)	350	300	250	200
Ossidi di azoto (espressi come NO ₂)	500	500	400	400
Ossidi di zolfo (espressi come SO ₂)	200	200	200	200

I valori limite di emissione vanno in ogni caso verificati in base alla normativa vigente.

Per poter mantenere i valori delle polveri al di sotto dei valori limite di emissione si può ricorrere all'utilizzo di filtri a maniche se i fumi sono secchi. Per quanto riguarda la depolverizzazione dei fumi, i multicicloni bastano per la gran parte delle situazioni, essendo in grado di portare entro i parametri richiesti la maggior parte dei casi. Con necessità particolari, o per maggiori esigenze, oltre al separatore a multiciclone si possono aggiungere svariati sistemi di filtrazione: da quelli elettrostatici, ai lavaggi, alla condensazione, ad altri apparati sempre comunque costosi e quindi applicabili solo a grandi impianti dove se ne ammortizza e giustifica il costo.

Il teleriscaldamento è solitamente associato agli impianti di cogenerazione: a livello urbano un unico impianto di questo tipo è in grado di produrre energia elettrica e, contestualmente, di fornire calore ad uno o più quartieri, rendendo superflue le caldaie condominiali. Il teleriscaldamento a cogenerazione è definito dalla norma UNI 8887.

Il teleriscaldamento è una soluzione impiantistica che può garantire rilevanti economie di scala nella produzione dell'energia e benefici non solo per le aziende, ma anche per le utenze, grazie alla semplicità, comodità, sicurezza (poiché non si distribuisce combustibile bensì acqua calda) e alle tariffe più convenienti rispetto ad altri sistemi di riscaldamento (eliminando l'onere d'acquisto del combustibile, l'utente paga il calore "già pronto all'uso", a consumo effettuato). È possibile stimare un risparmio complessivo che va dal 5 al 20% l'anno, secondo il combustibile utilizzato; i prezzi sono fissati concedendo di norma uno sconto rispetto ai vettori concorrenziali con formule di tipo "binomio" (quota fissa di potenza e quota variabile legata ai consumi). Inoltre non sono più necessarie tutte le infrastrutture legate ai tradizionali sistemi individuali di produzione interna del calore: la caldaia, la cisterna del gasolio, la canna fumaria, gli scarichi di sicurezza, tutte infrastrutture che occupano spazio e necessitano di periodiche e costose manutenzioni; infine le apparecchiature della sotto-centrale sono semplici, quindi gli oneri di manutenzione si riducono al minimo. È bene però precisare che la convenienza economica deve essere di volta in volta verificata tenendo conto di aspetti che sono diversi per ogni impianto, quali la disponibilità del materiale, la numerosità e densità delle utenze, ecc...

Nei moderni impianti di teleriscaldamento la contabilizzazione del calore può essere ottenuta attraverso sub-contatori individuali controllati dall'utente.

I vantaggi per l'utente non sono solo economici: l'assenza di combustibili e di fiamme dirette in locali annessi agli edifici da riscaldare, sostituiti dalla fornitura diretta di acqua calda o surriscaldata, rendono il teleriscaldamento un sistema intrinsecamente sicuro ed esente da rischi di scoppi o crolli, incendi, fughe di gas e avvelenamento da fumi. La combustione, infatti, viene realizzata presso la centrale di cogenerazione, ubicata in un luogo lontano dalle abitazioni e comunque sotto il controllo di personale specializzato.

Il teleriscaldamento aggiunge al valore dell'edificio un oggettivo pregio, in quanto va nella moderna direzione di dare al cittadino il "prodotto finito" lasciando agli esperti industriali, controllati dai pubblici amministratori del territorio, la scelta e la manipolazione delle materie prime (combustibili). Esso permette di attuare una razionale politica nell'uso delle fonti energetiche con ampia possibilità di adattamento alle mutevoli situazioni del mercato energetico nazionale ed internazionale.

Dal punto di vista ambientale, inoltre, i vantaggi sono molteplici e riconducibili in primo luogo agli ottimi risultati di efficienza e di risparmio conseguibili: il teleriscaldamento contribuisce validamente al miglioramento della qualità dell'aria negli ambiti territoriali più compromessi, come i centri urbani; l'inquinamento termico delle acque da raffreddamento di centrali termiche tradizionali (acqua di fiumi o di mare) può essere minimizzato se il calore viene recuperato anziché disperso. In generale è possibile affermare che pochi e grandi impianti adeguatamente localizzati determinano alterazioni ambientali meno marcate rispetto alla miriade di impianti condominiali di ridotta potenzialità sparsi sul territorio: l'elevata efficienza dei generatori impiegati nella centrale cogenerativa e la costante sorveglianza degli stessi da parte di personale specializzato, contribuiscono, unitamente alla presenza di apparecchiature per il controllo della combustione e della depurazione dei fumi di scarico più sofisticati, a un determinante beneficio ambientale che si traduce in minori emissioni in atmosfera e pertanto nella diminuzione dell'effetto serra e delle piogge acide.

Aspetti tecnici dei generatori di energia termica

In un impianto di teleriscaldamento si trovano normalmente più centrali termiche, ognuna delle quali è normalmente composta da più unità produttive per ragioni di modularità di costruzione e di esercizio e con funzioni di riserva. Le caldaie possono essere a vapore (con scambiatore vapore di caldaia/acqua di rete) o ad acqua calda o surriscaldata (nel caso in cui l'acqua di rete si riscaldi nell'attraversare direttamente le caldaie).

L'opportunità di suddividere la potenza complessiva su più unità deriva, anche per impianti di modeste dimensioni, dalla convenienza di esercire il più possibile, e per tutto il periodo di funzionamento, le caldaie a carichi elevati con conseguenti alti rendimenti: per caldaie

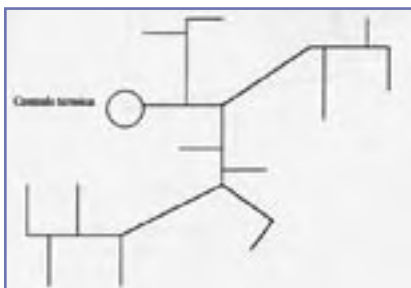
di grosse dimensioni, complete di preriscaldatori d'aria, si arriva a rendimenti di circa il 90%. Il rendimento effettivo medio annuo delle caldaie di condominio è, invece, un dato estremamente variabile; concorre a farne abbassare il valore una molteplicità di fattori come il dimensionamento eccessivo della caldaia e quindi una marcia a carichi troppo parzializzati, la cattiva regolazione, la scarsa manutenzione, l'insufficiente coibentazione, il funzionamento a temperatura troppo alta, la combinazione caldaia-preparatore d'acqua calda per uso igienico-sanitario, ecc. Si può pertanto stimare, in via prudenziale, che la differenza di rendimento fra le utenze funzionanti con impianto autonomo a gas o a combustibile liquido e quello delle stesse utenze allacciate al teleriscaldamento, sia di circa il 15%. Le perdite di distribuzione non superano il 6-8%, in termini annui.

Aspetti tecnico-impiantistici delle reti di distribuzione

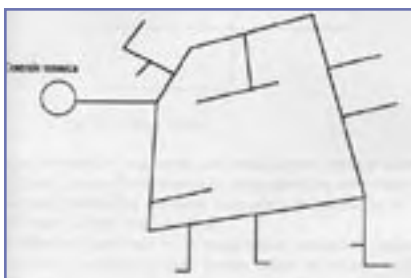
La rete di trasporto e distribuzione

La rete di trasporto e distribuzione viene realizzata con due tubazioni affiancate di uguale diametro: una per la mandata e una per il ritorno. Una volta ceduto il calore, l'acqua del teleriscaldamento ritorna in centrale per essere riportata alla massima temperatura e per ripercorrere successivamente il suo ciclo. La rete può essere configurata secondo quattro soluzioni principali: ramificata, ad anello, a maglie e inversa. Tra queste la rete ramificata è quella più diffusa e consente il minor sviluppo di tubazioni tra tutte le configurazioni. Per contro è quella che garantisce la minore affidabilità in caso di disfunzione del servizio. La rete a maglie, adatta per zone più densamente edificate, consente una continuità di servizio maggiore a scapito di un costo più elevato. La rete inversa, analogamente a quella ad anello, si presta all'alimentazione di utenze distribuite uniformemente in una certa area e si differenzia, da quelle precedentemente viste, per il percorso del fluido termovettore al suo interno.

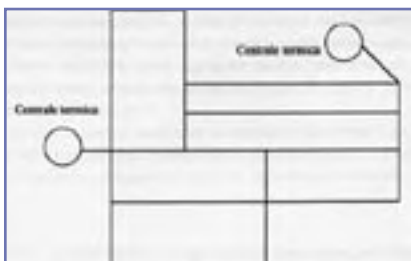
Per il trasporto del calore possono essere utilizzati diversi tipi di fluidi, quali l'acqua, il vapore e i fluidi diatermici.



Schematizzazione di una rete ramificata



Schematizzazione di una rete ad anello



Schematizzazione di una rete a maglie

Il sistema di regolazione

Un altro aspetto sicuramente di primaria importanza per la realizzazione e la gestione di un sistema di teleriscaldamento è quello riguardante la regolazione dello stesso affinché sia garantito l'equilibrio tra l'energia termica circolante in rete e quella richiesta dall'utenza. Per fare ciò è necessario operare su diversi livelli e precisamente su:

- *regolazione in corrispondenza dell'utenza*, che è quella che definisce la potenza termica necessaria in rete; effettuando la somma delle richieste di energia che si susseguono nel tempo da parte di tutte le sottostazioni, si ottengono le curve del carico termico del sistema nel corso della singola giornata e dell'anno; il sistema di regolazione situato in corrispondenza delle sottostazioni è piuttosto complesso dato che, oltre a dosare il calore prelevato dall'utenza,

a seconda delle necessità deve anche garantire la sicurezza dell'esercizio e il rispetto dei limiti contrattuali riguardo al prelievo di potenza termica;

- *regolazione della rete di distribuzione*, che avviene ricorrendo principalmente a due metodi che comportano, l'uno la variazione della portata (la portata prelevata nelle varie sottostazioni varia in funzione dei fabbisogni istantanei e questo modifica l'andamento delle pressioni in rete) e l'altro la variazione della temperatura del fluido termovettore;
- *regolazione dell'impianto di produzione del calore*, attraverso la quale si verifica che la potenza termica prodotta sia in equilibrio con quella richiesta dalla rete.

Le sottostazioni

Le sottostazioni sono l'insieme dei componenti che servono a prelevare il calore proveniente dalle reti di teleriscaldamento e utilizzarlo per usi sanitari e di riscaldamento.

Gli elementi che sostituiscono una sottostazione sono:

- gli scambiatori a piastre;
- le pompe di circolazione;
- il vaso d'espansione;
- il contabilizzatore del calore;
- gli organi di telecontrollo e di sicurezza.

Figura 30 - A sinistra: sottostazione per medie e grandi utenze. A destra: sottostazione per utenze domestiche monofamiliari (fonte Intensys APV)



LA CONTABILIZZAZIONE E LA RIPARTIZIONE DEL CALORE TRA LE UTENZE ALLACCIATE

Se la sottostazione è al servizio di più utenze, sussiste il problema della corretta suddivisione del corrispettivo del calore prelevato; tale problema può essere risolto nel modo più semplice - ma impreciso - attraverso la ripartizione in millesimi del volume dell'edificio tra le singole utenze, tenendo eventualmente conto dell'esposizione dei vari appartamenti: in questa maniera si toglie però al singolo utente la possibilità di gestire autonomamente il proprio consumo.

In alternativa è possibile installare un contatore di calore in corrispondenza di ogni singola utenza, ma ciò è realizzabile solo negli impianti del tipo "a zone" e non in quelli "a colonne montanti" poiché in quest'ultimo caso sarebbero necessari un numero elevatissimo di contatori (in pratica uno per ogni corpo scaldante).

Un altro sistema molto semplice è quello di misurare la portata d'acqua calda che attraversa l'impianto dell'utenza e da questa grandezza ricavare l'energia prelevata; il costo dell'apparecchiatura necessaria a raggiungere lo scopo è in questo caso molto contenuto ma, per contro, il metodo risulta piuttosto approssimativo.

2.2.2 La produzione di energia elettrica

La gassificazione

La gassificazione è una tecnologia di conversione termochimica per mezzo della quale un combustibile solido è trasformato in un combustibile gassoso, caratterizzato da facilità di combustione completa senza la richiesta di elevati eccessi d'aria, facilità di accensione, facilità di trasporto e pulizia della combustione. Lo svantaggio è la spesa energetica richiesta dal processo di gassificazione, che implica un minor contenuto energetico del gas prodotto rispetto a quello del materiale di partenza.

Tra i processi di conversione termochimica, in cui le biomasse vengono trasformate in combustibili gassosi o solidi grazie a reazioni che vengono fatte avvenire ad elevata temperatura, la gassificazione è il processo che desta il maggior interesse: non è ancora una tecnologia diffusa a livello commerciale, anche se nell'ultimo decennio sono stati messi in funzione diversi impianti che utilizzano sistemi di gassificazione.

Il gas da gassificazione di biomassa prende il nome di *producer gas* ed è costituito da una miscela di monossido di carbonio, idrogeno, anidride carbonica, metano, tracce di idrocarburi (etilene, etano), vapori, azoto (nella gassificazione in aria) e contiene vari contaminanti, come particelle di cenere e di *char* (agglomerato di natura complessa costituito prevalentemente da carbonio), *tar* (miscela complessa di idrocarburi condensabili) e oli.

Il *producer gas* può essere prodotto mediante combustione parziale della biomassa (utilizzando aria od ossigeno) o mediante gassificazione pirolitica (utilizzando vapore). Con la gassificazione in aria viene prodotto un gas a basso potere calorifico, mentre con la gassificazione in ossigeno o in vapore un gas a medio potere calorifico. Nella gassificazione pirolitica (o a riscaldamento indiretto) si rende necessaria una fornitura esterna di calore.

In tutti i processi di gassificazione sono presenti, con modalità diverse a seconda della tecnologia utilizzata, le seguenti quattro fasi: essiccazione, pirolisi, ossidazione e riduzione. L'**essiccazione** è l'eliminazione per evaporazione del contenuto d'acqua della biomassa quando questa è introdotta nel reattore. La **pirolisi** è la decomposizione della biomassa che avviene in seguito all'esposizione a elevate temperature in assenza di ossigeno: i prodotti sono gas di pirolisi e *char*. Nella fase di **ossidazione** avvengono le reazioni esotermiche che forniscono il calore necessario alle reazioni di **riduzione** (endotermiche), dalle quali si formano i costituenti del *producer gas*.

REAZIONI ESOTERMICHE E REAZIONI ENDOTERMICHE

Le **reazioni esotermiche** sono quelle che avvengono con rilascio di energia. In questo tipo di trasformazione è necessario soltanto un piccolo apporto di energia dall'esterno per rompere i legami tra gli atomi dei reagenti e avviare la reazione. Le **reazioni endotermiche** sono invece quelle che comportano l'assorbimento di una certa quantità di energia dall'esterno: oltre a quella necessaria per rompere i legami tra gli atomi reagenti (energia di attivazione) è necessaria dell'energia in più per formare i legami dei prodotti, più forti di quelli dei reagenti. Le reazioni esotermiche sono più comuni di quelle endotermiche proprio perché necessitano di apporto minore di energia dall'esterno, vale a dire, della sola energia di attivazione.

Sono state sviluppate diverse tecnologie di gassificazione, che si differenziano principalmente per il modo con cui la biomassa viene messa a contatto con l'agente gassificante; è possibile distinguere due principali classi di reattori: a letto fisso (*updraft* e *downdraft*) e a letto fluido. Il 75% dei gassificatori esistenti in commercio sono *downdraft*, il 20% sono a letto fluido (BFB e CFB), il 2,5% sono *updraft* e il 2,5% di altri tipi.

Gassificatori a letto fisso

Sono la tecnologia più antica e collaudata per la gassificazione. Le dimensioni massime sono limitate e le velocità di reazione sono basse: il loro utilizzo è limitato alle piccole potenze. Sono affetti da numerosi problemi, tra cui il rischio di intasamenti nel letto. Il materiale di alimentazione deve avere granulometria uniforme e un basso contenuto di particelle fini, per evitare intasamenti e garantire "spazio vuoto" sufficiente al passaggio dei gas attraverso il letto.

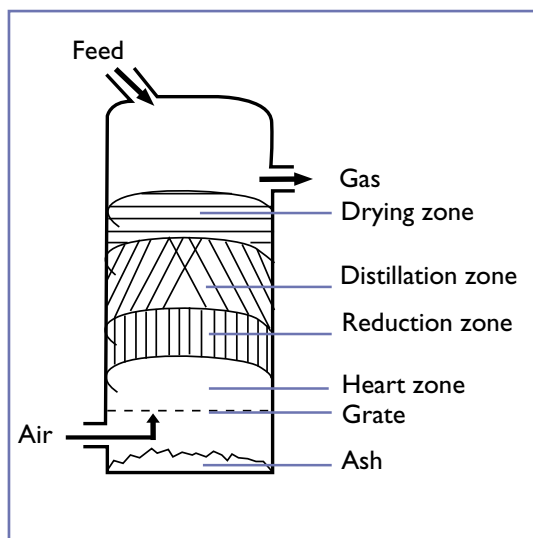
Gassificatori *updraft* o controcorrente

Il reattore è costituito da un cilindro in acciaio e rivestito internamente con materiale refrattario. Nella parte superiore sono presenti il sistema di alimentazione della biomassa e di uscita del *producer gas*. Nella parte inferiore del reattore è presente una griglia che ha la funzione di sostenere il letto di materiale solido, lasciando passare l'aria immessa dal basso e la cenere che scende e viene raccolta nel fondo.

I vantaggi principali di questo tipo di gassificatore sono:

- la semplicità costruttiva e di funzionamento;
- l'elevata capacità di combustione del *charcoal*, il cui residuo finale è minimo;
- l'ottimo scambio termico interno tra le correnti opposte di biomassa e di *producer gas* che comporta basse temperature di uscita dello stesso e quindi un'alta efficienza termica;
- l'efficace essiccazione del combustibile grazie allo scambio termico interno: ciò permette l'utilizzo di combustibili con una elevata umidità (fino al 60%).

Figura 31 - Gassificatore updraft

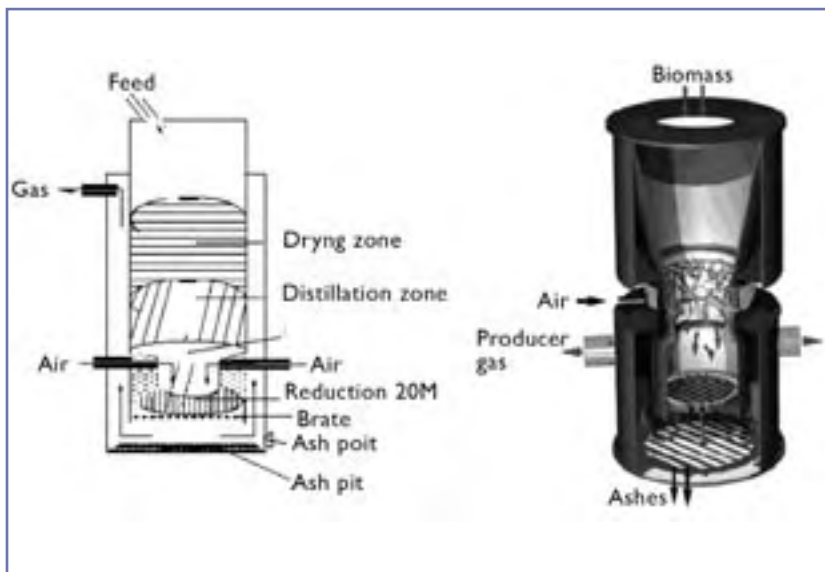


Il principale difetto è il grande contenuto di *tars* nel *producer gas*. I *tars* si formano principalmente durante la pirolisi e in questo tipo di gassificatore i gas di pirolisi si uniscono al *producer gas* senza essere prima bruciati. I *tars* sono la causa di molti problemi negli impianti alimentati dal *producer gas*, in quanto condensano facilmente e provocano intasamenti. Ciò è di importanza minore se il gas è utilizzato in una caldaia, mentre l'utilizzo in turbine o motori richiede una pulizia accurata del gas. Nei gassificatori *updraft* i requisiti per la granulometria della biomassa di alimentazione sono meno severi che nei gassificatori *downdraft*, in quanto i rischi di intasamento sono minori. Essi possono arrivare a portate massime dell'ordine di 4 t/h di materiale secco.

Gassificatori *downdraft* o equicorrente

Nei gassificatori *downdraft* la corrente di *producer gas* è discendente e quindi concorde con quella del combustibile solido. Il gas lascia il reattore dal basso. Generalmente sono provvisti di una gola a forma di V, al vertice della quale si trova la zona di ossidazione: lo scopo è quello di creare una zona compatta a elevata temperatura dove far passare i gas di pirolisi e realizzare il *cracking* dei *tars*; l'aria viene immessa direttamente in questa zona attraverso un tubo centrale di alimentazione o mediante ugelli posizionati sulle pareti della gola.

Figura 32 - Gassificatore downdraft



Il pregio principale dei gassificatori *downdraft* è il basso contenuto di *tar* del *producer gas*.

I difetti maggiori sono:

- l'elevato contenuto di particelle solide nel *producer gas*, conseguenza del fatto che il gas di pirolisi passa attraverso la zona di ossidazione, dove raccoglie cenere e polvere;
- la presenza della gola, che impone requisiti più severi per la granulometria della biomassa, in quanto sono più facili gli intasamenti;
- l'umidità della biomassa, che deve essere bassa (minore del 35%) in quanto l'essiccazione interna è meno efficiente rispetto ai gassificatori *updraft*;
- la temperatura relativamente alta del gas in uscita che riduce l'efficienza termica.

Allo stato attuale la portata massima per un gassificatore *downdraft* è dell'ordine di 500 kg/h di biomassa secca. I gassificatori *downdraft* atmosferici sono attraenti per le applicazioni in piccola scala fino a circa $1,5 \text{ MW}_{\text{th}}$.

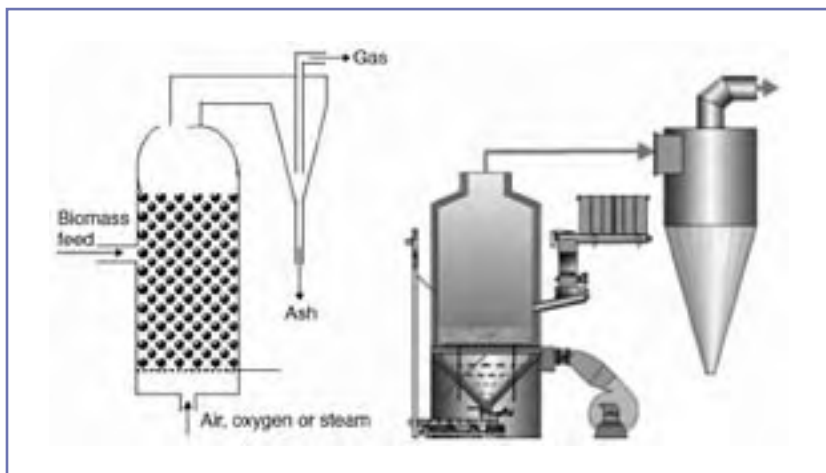
Gassificatori a letto fluido

Un letto fluido è una sospensione di particelle solide in una corrente ascendente di gas. Il gas viene introdotto in pressione dal fondo del reattore, mentre le particelle sono immesse dall'alto. Quando il solido rimane in sospensione si parla di condizione di fluidizzazione che viene raggiunta per una determinata velocità del gas in cui il letto fluido, composto da fase solida e da fase gassosa, si comporta come un liquido. Applicata alla gassificazione, la tecnologia del letto fluido garantisce un'ottima miscelazione tra la biomassa (ridotta in piccole particelle) e l'agente gassificante, con il conseguente aumento delle velocità di reazione. Nel letto può essere presente anche materiale inerte fluidizzante (sabbia silicea, allumina, ossidi refrattari), con la funzione di uniformare la temperatura facilitando il trasferimento di calore tra le particelle di combustibile. Un problema tipico del letto fluido è la sinterizzazione della sabbia silicea dovuta alle elevate temperature e alla reazione con i metalli alcalini (Na e K) contenuti nella cenere. In presenza di biomasse con alto contenuto di cenere al posto della sabbia silicea è quindi necessario utilizzare allumina o composti metallici (ad esempio sabbia cromitica). Nelle applicazioni in cui è necessario l'uso di catalizzatori (per favorire la gassificazione o per modificare la composizione del gas), il materiale inerte può essere sostituito dal catalizzatore. A differenza di quanto avviene nel letto fisso, il letto fluido è caratterizzato da una temperatura uniforme in tutto il reattore (tipicamente di 800-850°C). Il contenuto di *tar* nel *producer gas* è intermedio tra quello che si ottiene dal gassificatore *updraft* e dal gassificatore *downdraft*. All'uscita del reattore il gas ha inoltre un più alto contenuto di particelle solide (*char*, cenere, sabbia).

Gassificatori a letto fluido bollente (BFB: Bubbling Fluidized Bed)

L'altezza del letto è limitata (1÷2 m) e la velocità del gas è la minima necessaria a mantenere in sospensione la fase solida (0,8÷2 m/s). Al di sopra del letto esiste una regione dove si ha unicamente fase gassosa. All'interno del letto avviene la formazione di bolle di gas che, liberandosi in superficie, ricordano il fenomeno dell'ebollizione dei liquidi; ciò provoca un'agitazione interna nel letto, con un'ulteriore miscelazione tra le fasi. Nei reattori BFB in genere non è presente materiale inerte. Le temperature sono più alte rispetto ai letti fluidi circolanti e perciò si ha un minor contenuto di *tar* nel *producer gas*, ma anche il maggior pericolo di fusione delle ceneri.

Figura 33 - Gassificatore BFB



Le caratteristiche del letto fluido bollente sono:

- alte velocità di reazione;
- migliore controllo della temperatura rispetto al letto fisso;
- elevato contenuto di particelle solide nel *producer gas*;
- basso contenuto di *tar* nel *producer gas*;
- portate massime dell'ordine di 10-15 t/h di biomassa secca;
- flessibilità per la granulometria della biomassa di alimentazione;
- a parità di dimensioni, i gassificatori a letto fluido hanno potenze maggiori di quelli a letto fisso;
- facilità di accensione e spegnimento;
- possono essere aggiunti al letto catalizzatori per il *cracking* dei *tars*;
- a parità di portata, il diametro del reattore è significativamente maggiore rispetto ai gassificatori CFB;
- perdite di carbonio nella cenere.

I gassificatori atmosferici a letto fluido bollente sono adatti a diversi tipi di biomassa e ad applicazioni con potenze medio piccole fino a 25 MW_{th}.

Gassificatori a letto fluido circolante (CFB: Circulating Fluidized Bed)

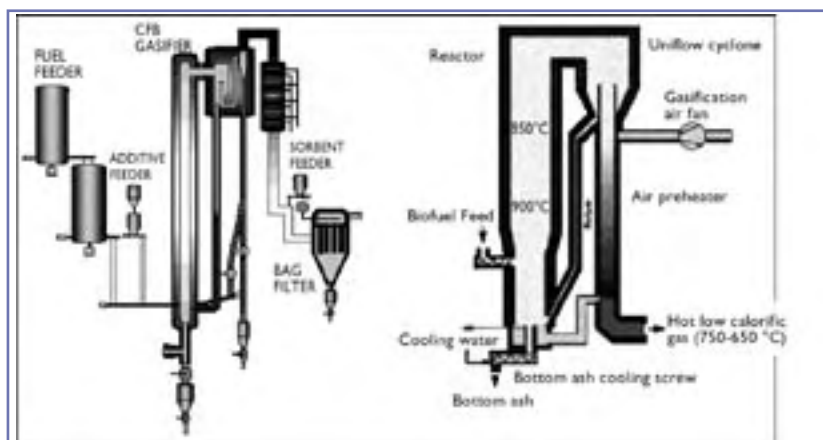
Il reattore si sviluppa in altezza (fino 8 m) e ha un diametro limitato. La velocità del gas è elevata (superiore a 4 m/s): come conseguenza le particelle solide (*char* e sabbia) sono trascinate fino a uscire dalla

colonna principale, per poi essere separate dal gas mediante un ciclone e reintrodotti nel fondo del reattore.

Nel letto si possono distinguere, a partire dal basso, tre zone:

- fase densa: è caratterizzata da elevata densità e dalla formazione di bolle di gas;
- fase intermedia: è la zona più instabile, caratterizzata da regioni a diversa densità;
- fase diluita: la miscelazione del solido nel gas è omogenea e la densità è bassa.

Figura 34 - Gassificatore CFB



Per l'effetto dello strato limite, la velocità è minore alle pareti, lungo le quali le particelle ricadono dando luogo a un'ulteriore miscelazione. I gassificatori CFB differiscono dai gassificatori BFB fondamentalmente per le seguenti caratteristiche:

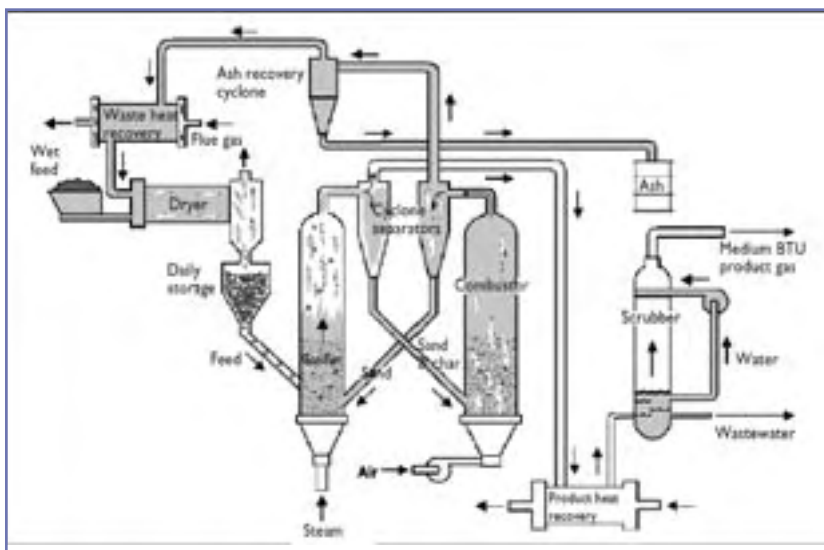
- utilizzo per portate di biomassa maggiori di 15 t/h;
- per le basse potenze, costi più elevati rispetto ai gassificatori BFB;
- difficoltà di realizzazione del *cracking* catalitico dei *tars* all'interno del letto.

I gassificatori atmosferici a letto fluido circolante sono adatti ad una grande varietà di biomasse, con potenze che vanno pochi MW_{th} fino a 100 MW_{th}. In futuro potranno essere realizzati gassificatori CFB con potenze anche maggiori. Questa tecnologia sembra essere la più adatta per le applicazioni in larga scala.

Gassificatori dual bed per gassificazione pirolitica

La gassificazione non avviene mediante ossidazione parziale, ma attraverso riscaldamento indiretto della biomassa (gassificazione pirolitica). L'impianto è costituito da due reattori a letto fluido: un gassificatore CFB e un combustore (BFB o CFB). Nel gassificatore il calore necessario per la decomposizione della biomassa è ceduto dalla sabbia in ricircolo nell'impianto, che viene riscaldata nel combustore. Come gas fluidizzante si utilizza vapore. Il *producer gas* in uscita dal gassificatore trascina le particelle di sabbia e *char*, che vengono separate da un ciclone e portate al combustore, dove il *char* viene bruciato. Il calore generato è assorbito dalla sabbia che viene trascinata all'esterno del combustore dai gas di scarico. Un secondo ciclone provvede alla separazione della sabbia dal gas esausto, permettendone la reintroduzione nel gassificatore dove cede alla biomassa il calore assorbito.

Figura 35 - Gassificatore dual bed



La complessità del processo rende difficile la realizzazione di impianti di grandi dimensioni e mantiene elevati i costi di investimento. Il vantaggio principale di questo tipo di gassificatore è l'utilizzo di vapore che permette di produrre un gas a medio potere calorifico (grazie all'elevato contenuto di metano) senza l'utilizzo di ossigeno. La conversione del carbonio in gas è bassa, in quanto parte del *char* deve essere utilizzata per la combustione. Il contenuto di *tars* nel *producer*

gas è elevato: è comunque possibile l'aggiunta nel letto di catalizzatori per il *cracking* dei tars.

Gassificatori a letto fluido pressurizzato

Quando il *producer gas* viene utilizzato come combustibile negli impianti a turbina a gas deve essere immesso nel combustore ad alte pressioni (10-25 bar). Se la gassificazione avviene in un reattore atmosferico, il gas caldo deve essere raffreddato e compresso, con una sostanziale spesa di energia. Il raffreddamento del gas prima della compressione è necessario perché:

- la temperatura del gas aumenterebbe ulteriormente in seguito alla compressione;
- la resistenza al calore delle parti del compressore è limitata;
- i gas caldi occupano volumi maggiori e richiedono un lavoro di compressione maggiore.

L'alternativa è la gassificazione a letto fluido pressurizzato, con la quale viene prodotto direttamente gas ad alta pressione. I vantaggi di questa soluzione sono:

- il basso consumo energetico interno (e quindi rendimenti maggiori), in quanto viene risparmiata la compressione del gas;
- alle alte pressioni diminuisce la tendenza a sinterizzare della cenere;
- i gassificatori pressurizzati hanno dimensioni più contenute dei gassificatori atmosferici;
- poiché il gas non viene raffreddato prima dell'utilizzo si riduce il pericolo di condensazione.

I difetti sono:

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

Applicazioni del producer gas

L'utilizzo più interessante del gas riguarda la produzione di energia elettrica. Il campo della produzione di energia elettrica dalle biomas-

se è attualmente dominato dagli impianti a vapore, caratterizzati però da bassi rendimenti, nei quali si realizza la combustione diretta della biomassa.

Un'opzione interessante per l'utilizzo di *producer gas* è il *co-firing* con combustibili tradizionali in impianti a vapore. Questa tecnologia permette un notevole risparmio di combustibili fossili ed è caratterizzata da bassi costi di investimento (in quanto applicabile in impianti esistenti dopo piccole modifiche).

La tecnologia che sembra presentare il potenziale maggiore è quella dei cicli combinati gas-vapore integrati con la gassificazione (IGCC: *Integrated Gasification Combined Cycle*). In impianti con potenze dell'ordine delle decine di MW, è stato previsto il raggiungimento di rendimenti globali molto elevati (fino al 50%). I progetti finora proposti per un utilizzo commerciale sono essenzialmente di tre tipi:

- gassificazione atmosferica a letto fluido con aria e pulizia del gas mediante lavaggio a umido;
- la gassificazione pressurizzata a letto fluido con aria e pulizia a caldo del gas;
- la gassificazione atmosferica a riscaldamento indiretto con lavaggio umido.

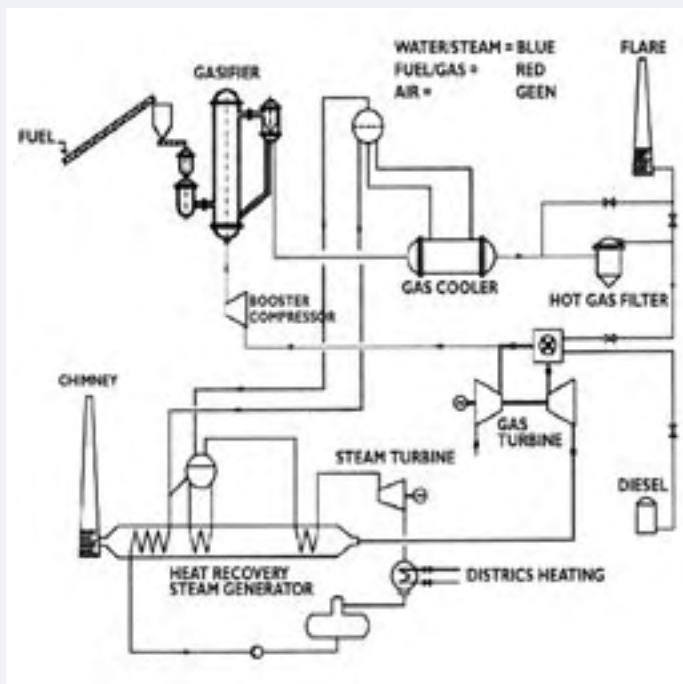
Attualmente i sistemi IGCC non sono ancora competitivi a livello commerciale, ma lo possono diventare a breve termine, soprattutto grazie alla possibilità di realizzare impianti di cogenerazione. Nei Paesi industrializzati, le possibili applicazioni riguardano l'industria della carta. Nei Paesi in via di sviluppo potenziali applicazioni includono l'industria dello zucchero e del metanolo ottenuti da canna da zucchero.

ALCUNE ESPERIENZE REALIZZATE:

L'impianto con sistema IGCC a Varnamo (Svezia). È un impianto a ciclo combinato gas-vapore di 18 MW_{th} integrato con gassificatore CFB pressurizzato (IGCC). Il gassificatore opera a 20 bar e a 950-1.000°C e produce un gas a basso potere calorifico (5-6 MJ/Nm³). Per questo motivo i combustori della turbina sono stati maggiorati. Come materiale di alimentazione si utilizzano cippato di legno e cortecce. L'aria per la gassificazione viene in parte compressa dal compressore del ciclo Joule, in parte da un booster che la porta a 20 bar. La pulizia del *producer gas*

avviene a caldo mediante filtri ceramici. Il gas esausto uscente dalla turbina a gas passa attraverso uno scambiatore per la generazione di vapore (HRSG: *Heat Recovery Steam Generator*). L'impianto produce anche calore per teleriscaldamento attraverso il condensatore del ciclo a vapore.

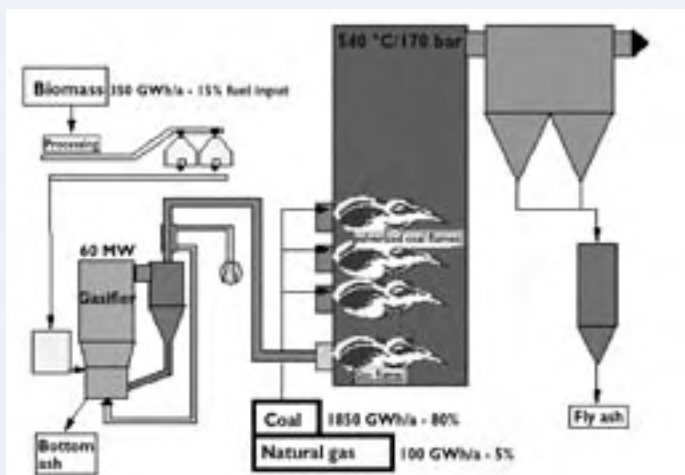
Figura 36 - Schema dell'impianto IGCC di Varnamo in Svezia (fonte: Stahl, Neergaard, 1998)



L'impianto con sistema di co-firing: Lahti (Finlandia). È un impianto a ciclo Rankine per la produzione di energia elettrica (200 MW_e) e calore (250 MW_{th}). La caldaia, originariamente alimentata con solo carbone, è attualmente alimentata contemporaneamente con polverino di carbone (50%), gas naturale (35%) e *producer gas* (15%). Il *producer gas* viene prodotto da un gassificatore atmosferico CFB integrato all'impianto, alimentato con biomassa umida e rifiuti solidi urbani e industriali. La biomassa (cortecce, cippato, segatura, scarti di legno non trattato) è costituita mediamente per il 20-60% da acqua per il 40-80% da combustibile e per l'1-2% da cenere. Come agente gassificante è utilizzata aria, che viene immessa mediante un compressore dopo

essere stata pre-riscaldata. La temperatura del letto fluido è circa 850°C. Per la separazione delle particelle solide viene utilizzato un ciclone. Prima dell'immissione nella caldaia, il gas attraversa uno scambiatore che serve a pre-riscaldare l'aria. Nel processo il biocombustibile non viene essiccato prima dell'immissione nel gassificatore (l'umidità può arrivare fino al 60%). Nella caldaia i bruciatori del *producer gas* sono montati sotto i bruciatori del carbone. Quando il biocombustibile è umido, il potere calorifico del *producer* è molto basso (2,2 MJ/Nm³, con umidità del 50%). Dal punto di vista ambientale, l'aggiunta del gassificatore ha portato a una diminuzione delle emissioni di NO_x, di SO_x e di polveri, mentre ha portato a un aumento delle emissioni di HCl.

Figura 37 - Schema del generatore di vapore dell'impianto di Lahti (fonte: Krvela M., Lathi Energia 2002)



2.2.3 La cogenerazione

La cogenerazione (CHP: *Combined Heat and Power Production*) è la generazione di energia elettrica ed energia termica nello stesso sistema di produzione. Secondo la **Legge 10/91** (art.1 – comma 3) la cogenerazione – intesa come produzione combinata di energia elettrica (o meccanica) e di calore – è considerata fonte di energia assimilata alle fonti rinnovabili.

LA DEFINIZIONE DI COGENERAZIONE SECONDO LA NORMATIVA NAZIONALE

La norma **UNI 8887/1987** definisce il processo di cogenerazione come *“l'insieme delle operazioni volte alla produzione combinata di energia meccanica/elettrica e calore, entrambi considerati effetti utili, partendo da una qualsivoglia sorgente di energia. Il processo di cogenerazione deve realizzare un più razionale uso dell'energia primaria rispetto a processi che producono separatamente le due forme di energia. La produzione di energia meccanica/elettrica e calore deve avvenire in modo sostanzialmente interconnesso in cascata”*.

La **Delibera AEEG n. 42/02** definisce l'impianto di produzione combinata di energia elettrica e calore come *“un sistema integrato che converte l'energia primaria di una qualsivoglia fonte di energia nella produzione congiunta di energia elettrica e di energia termica (calore) entrambe considerate effetti utili, conseguendo, in generale, un risparmio di energia primaria ed un beneficio ambientale rispetto alla produzione separata delle stesse quantità di energia elettrica e termica. In luogo della produzione di energia elettrica in forma congiunta alla produzione di energia termica, è ammessa anche la produzione di energia meccanica”*.

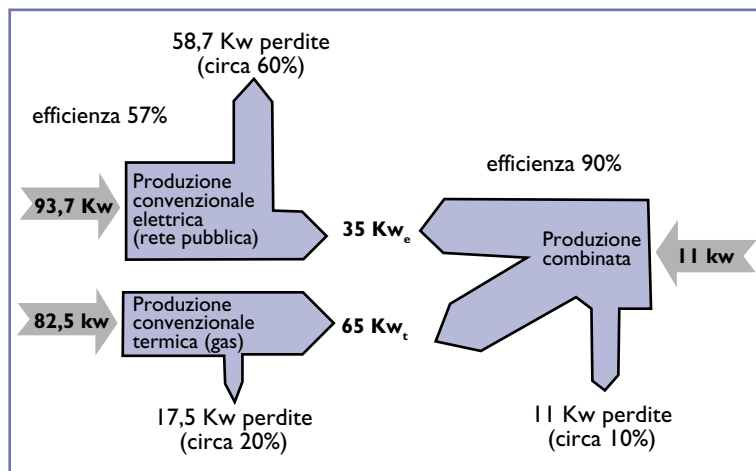
La produzione di energia meccanica o elettrica e di calore deve avvenire in modo sostanzialmente interconnesso, implicando un legame tecnico e di mutua indipendenza tra produzione elettrica e utilizzo in forma utile del calore, anche attraverso sistemi di accumulo. Il calore generato viene trasferito all'utilizzazione in forme diverse, tra cui vapore, acqua calda, aria calda, e può essere destinato a usi civili di riscaldamento, raffrescamento o raffreddamento o a usi industriali in diversi processi produttivi.

L'analisi del risparmio energetico attribuibile a un impianto di cogenerazione richiede delle semplificazioni. Infatti, dovendo confrontare i consumi energetici di un impianto di cogenerazione con i consumi energetici che si avrebbero con la produzione separata delle stesse quantità di energia elettrica e di calore utile, è necessario far riferimento alle modalità tecnico-produttive con le quali tali quantità di energia verrebbero generate separatamente.

La figura 38 rappresenta in maniera semplificata l'efficienza della cogenerazione confrontata con la produzione separata di energia elettrica e termica: si può affermare, in prima approssimazione, che la

cogenerazione richiede tipicamente solo il 75% dell'energia primaria necessaria alla generazione tradizionale di calore ed energia elettrica. Ciò riduce il consumo di combustibile con evidenti benefici dal punto di vista ambientale.

Figura 38 - Efficienza della cogenerazione in confronto con un sistema tradizionale di produzione separata di energia termica ed elettrica



L'entità del risparmio di energia primaria fornito dalla produzione mediante cogenerazione può essere calcolato secondo la formula riportata nella Direttiva 2004/8/CE.

Vantaggi e limiti della cogenerazione

Dalle semplici considerazioni appena esposte risulta evidente come gli impianti per la produzione combinata di energia elettrica e calore consentano un uso più completo delle fonti energetiche, in particolar modo attraverso l'associazione della produzione di energia pregiata (elettricità) con il recupero del calore residuo.

I principali vantaggi conseguibili sono di natura:

- *economico-strategica*: la cogenerazione comporta un miglioramento dei rendimenti globali di utilizzo e quindi una diminuzione dei consumi (a parità di potenza) delle fonti energetiche tradizionali, limitando così la dipendenza da queste ultime;

- *ambientale*: a parità di energia utile ricavata, si usa una minor quantità di combustibile e si ha un'emissione più contenuta di prodotti della combustione;
- *di salvaguardia delle risorse*: la cogenerazione consente un utilizzo più efficiente delle risorse energetiche tradizionali (petrolio, carbone, gas naturale), riducendone gli sprechi.

Il limite principale della cogenerazione riguarda la corrispondenza tra produzione e domanda, sia sul lato elettrico, che su quello termico: risulta necessario quindi ottenere rendimenti complessivi il più elevati possibile ma anche usare razionalmente le energie prodotte. Le utenze assorbono l'energia elettrica e il calore con leggi sostanzialmente indipendenti e, considerando che l'elettricità non è praticamente accumulabile e il calore lo è solo per brevi periodi, la cogenerazione è proponibile quando le domande di energia elettrica e termica sono contemporanee. Inoltre, poiché i massimi rendimenti di un impianto cogenerativo variano a seconda della soluzione impiantistica adottata e si attuano nell'intorno di un determinato valore del rapporto energia elettrica/energia termica, è necessario che la domanda di elettricità e calore da parte dell'utenza si collochi all'interno del campo di valori del rapporto caratteristico della macchina impiegata. Sotto il profilo logistico, affinché si realizzi una convenienza economica per l'impianto, le utenze termiche ed elettriche devono trovarsi nelle vicinanze del sistema di generazione energetica, in particolare per quanto riguarda la rete di distribuzione del calore.

I limiti applicativi possono essere così sintetizzati:

- la cogenerazione è tanto più vantaggiosa quanto minore è la temperatura del calore richiesto;
- il sistema cogenerativo è economicamente e tecnicamente vantaggioso solo se la potenza richiesta dall'utenza supera una determinata soglia minima, variabile con la tipologia costruttiva dell'impianto stesso.

La diffusione dei sistemi cogenerativi è stata finora ostacolata soprattutto dagli alti costi iniziali di impianto imputabili alla maggiore complessità di tali sistemi, se confrontati coi costi dei sistemi tradizionali.

Analisi comparativa dei sistemi cogenerativi

Gli elementi fondamentali di un sistema di cogenerazione, che si ritrovano in tutte le soluzioni impiantistiche, sono:

- il motore primo che attua la conversione dell'energia termica introdotta in energia meccanica;
- il generatore elettrico accoppiato al motore primo che trasforma l'energia meccanica in energia elettrica;
- gli scambiatori di calore intermedi nella rete termica;
- gli scambiatori di calore dispersivi, atti a dissipare il calore in eccesso rispetto alle esigenze dell'utenza;
- eventuali dispositivi di introduzione aggiuntiva di calore (post-combustori e caldaie supplementari);
- le reti di distribuzione del calore (ad uno o più livelli termici);
- la strumentazione di regolazione e controllo dell'impianto;
- l'impianto elettrico di allacciamento allo stabilimento;
- i sistemi di antinquinamento e di insonorizzazione della centrale cogenerativa.

La realizzazione di un tale sistema può avvenire secondo tre possibili cicli termodinamici di base:

- ciclo di turbina a vapor d'acqua;
- ciclo di turbina a gas;
- ciclo di motore diesel, a cui competono organizzazioni impiantistiche differenti.

Ciascuna tipologia di impianto è caratterizzata da un suo specifico campo di applicazione, all'interno del quale si realizzano i massimi rendimenti termodinamici e/o la massima convenienza economica, aspetti che verranno debitamente messi in luce. Le principali caratteristiche dei diversi sistemi cogenerativi sono riportate nelle tabelle seguenti.

Tabella 24 - Tavola riassuntiva delle tecnologie dei sistemi cogenerativi

sistema cogenerativo	vantaggi	svantaggi	taglie disponibili
turbina a gas	alta affidabilità basse emissioni calore disponibile di elevata qualità sistemi di raffreddamento non necessari	richiede gas ad alta pressione o compressori interni basse efficienze a basso carico diminuzione degli output all'aumentare della temperatura ambiente	da 500kW a 40MW
microturbina	numero ridotto di parti in movimento dimensioni compatte e peso leggero basse emissioni sistemi di raffreddamento non necessari	costi elevati efficienza meccanica relativamente bassa cogenerazione limitata ad applicazioni a bassa temperatura	da 30kW a 350kW
motore alternativo ad ignizione diretta	elevata efficienza associata a flessibilità di parzializzazione del carico tempi di avviamento brevi costi di investimento relativamente bassi	cogenerazione limitata ad applicazioni a bassa temperatura elevati costi di manutenzione emissioni relativamente alte	< 5MW
motore alternativo ad accensione per compressione/diesel	utilizzabili in modo isolato con buone capacità di inseguimento del carico possono essere revisionati in loco dai normali operatori operano con gas a bassa pressione	devono essere raffreddati anche se il calore recuperato non viene utilizzato alti livelli di rumorosità alle basse frequenze	alte velocità (1200 rpm) ≤ 4MW basse velocità (60- 275 rpm) ≤ 65MW
turbina a vapore	elevata efficienza globale può utilizzare qualunque combustibile soddisfacimento di più richieste di calore alta affidabilità e tempi lunghi di esercizio possibilità di variare il rapporto En. Elettrica/En. Termica	lento avviamento basso rapporto En.Elettrica/En. Termica	da 50kW a 250MW
celle a combustibile	basse emissioni e bassa rumorosità alta efficienza a livello del carico modularità	costi elevati bassa durezza e densità di potenza trattamento combustibili se non utilizzato idrogeno	da 200 kW a 250kW

tecnologia	turbina a vapore	motore diesel	motore a gas naturale	turbina a gas	microturbina	cella a combustibile
efficienza energetica	15-38%	27-45%	22-40%	22-36%	18-27%	30-63%
efficienza globale	80%	70-80%	70-80%	70-75%	65-75%	65-80%
efficienza elettrica effettiva	75%	70-80%	70-80%	50-70%	50-70%	60-80%
taglie tipiche (MW _e)	0,2-800	0,03-5	0,05-5	1-500	0,03-0,35	0,01-2
rapporto tipico En.Ele/En. Ter	0,1-0,3	0,5-1	0,5-1	0,5-2	0,4-0,7	1-2
funzionamento a carico parziale	possibile	buono	possibile	scarso	possibile	buono
costi di installazione (\$/kW _e)	300-900	900-1500	900-1500	800-1800	1300-2500	2700-5300
costi di gestione (\$/kW _{he})	<0,004	0,005-0,015	0,007-0,02	0,003-0,0096	0,01	0,005-0,04
disponibilità	~100%	90-95%	92-97%	90-98%	90-98%	>95%
ore di manutenzione	>50000	25000-30000	24000-60000	30000-50000	5000-40000	10000-40000
tempo di avviamento	1 ora-1 giorno	10 secondi	10 secondi	10 minuti-1 ora	60 secondi	3 ore-2 giorni
pressione del combustibile (psi)	-	<5	1-45	120-500	40-100	0,5-45
combustibili utilizzabili	tutti	diesel, oli esausti	gas naturale, biogas, propano, gas di scarica	gas naturale, biogas, propano, olio comb.	gas naturale, biogas, propano, olio comb.	idrogeno, gas naturale, propano, metanolo
rumorosità	alta	alta	alta	moderata	moderata	bassa
utilizzi dell'energia termica	vapore a bassa o alta pressione	acqua calda, vapore a bassa pressione	acqua calda, vapore a bassa pressione	acqua calda, surriscaldata, vapore a bassa o alta pressione	acqua calda o surriscaldata, vapore a bassa pressione	acqua calda, vapore a bassa o alta pressione
densità energetica (kW/m ²)	>100	35-50	35-51	20-500	5-70	5-20

Questo tipo di impianti è basato sul ciclo termodinamico Rankine-Hirn a vapore surriscaldato. Gli impianti industriali con turbine a vapore reali forniscono calore di recupero ad alta temperatura sebbene siano caratterizzati da valori del rendimento termico globale bassi. Dal momento che tali turbine utilizzano il vapore proveniente da un opportuno generatore, esse permettono l'adozione di qualsiasi combustibile, in particolar modo di quelli non pregiati.

La tecnologia degli impianti a vapore è ormai matura e ciò comporta un'elevata affidabilità di esercizio unita alla facilità di condotta e ad una maggior efficacia del sistema di regolazione. Grazie al buon bilanciamento ottenibile dei rotori, le rumorosità sono estremamente basse, come basso risulta anche il consumo di lubrificanti (cosa che si traduce in moderati oneri di manutenzione).

Accanto alla scarsa flessibilità, gli impianti a vapore presentano una complessità d'impianto: necessitano infatti di una progettazione accurata e devono essere adattati ad ogni caso specifico di applicazione. Gli schemi impiantistici possibili in cogenerazione sono sostanzialmente due:

- impianti a contropressione, o a recupero totale;
- impianti a condensazione e spillamento, o a recupero parziale.

Impianti a contropressione

Questa soluzione impiantistica è caratterizzata dal fatto che l'intera portata di vapore generato viene fatta espandere in turbina finché il vapore non ha raggiunto le condizioni entalpiche tali da soddisfare la richiesta di energia termica; attraverso degli scambiatori il calore viene poi prelevato, provocando la condensazione del fluido operatore. Successivamente, inviato ad un serbatoio di condensa, il fluido ritorna tramite un'apposita pompa al generatore di vapore.

Un'alternativa a questo schema, sovente adottata, è quella di collocare a valle della turbina un "condensatore caldo", in cui il calore viene ceduto ad un fluido ausiliario (ad esempio acqua surriscaldata) che alimenta la rete delle utenze termiche.

Questo tipo di configurazione richiede un andamento del carico elettrico parallelo al diagramma del carico termico, fatto che risulta fortemente penalizzante per quelle utenze con andamento temporale dei carichi molto diverso.

Impianti a condensazione e spillamento

Per ovviare alla limitazione che gli impianti a contropressione presentano nella regolazione dei carichi termico ed elettrico, il ciclo termodinamico può essere modificato permettendo al diagramma del carico elettrico di avere un andamento diverso da quello termico. La modifica consiste nell'estrarre dalla turbina una parte del vapore che si trova a una pressione sufficiente a soddisfare i fabbisogni di energia termica degli scambiatori di processo; la restante parte viene fatta espandere fino alla pressione di condensazione.

Poiché la portata del vapore spillato può essere variata (in genere fino a un massimo del 30% della portata totale), si realizza una parziale indipendenza tra le produzioni di energia elettrica e termica. Il sistema acquista quindi una maggiore flessibilità di esercizio, a scapito però di un minor risparmio di combustibile nelle condizioni di carico parziale.

Cogenerazione con turbina a gas

Il motore primo è costituito da una turbina a gas azionata dai fumi provenienti da un'apposita camera di combustione. Il fluido di lavoro compie complessivamente le trasformazioni termodinamiche di un ciclo Brayton.

Le turbine a gas sono macchine relativamente giovani, il cui sviluppo ha subito un notevole impulso negli ultimi 50 anni. Nel corso degli ultimi decenni si sono superati i rendimenti a ciclo semplice dell'ordine del 30%, adottando temperature di ingresso in turbina maggiori di 1.000°C (1.400÷1.500°C) e rapporti di compressione maggiori di 11. Negli impianti cogenerativi che utilizzano la turbina a gas esiste la possibilità di effettuare una post-combustione per incrementare la produzione di energia termica: infatti i gas di scarico in uscita dalla turbina presentano un contenuto di ossigeno molto elevato che può essere utilmente impiegato come comburante in un ulteriore combustore. Questi impianti sono caratterizzati da una larga indipendenza della potenza termica disponibile da quella meccanica prodotta, il che si traduce in una maggiore flessibilità di esercizio. Inoltre, grazie alla buona standardizzazione dei componenti, questi impianti sono caratterizzati da semplicità costruttiva e tempi di realizzazione e di consegna piuttosto brevi, il che incide positivamente sui costi di installazione. Anche gli standard di automazione oggi raggiunti comportano basso fabbisogno di personale e costi di manutenzione limi-

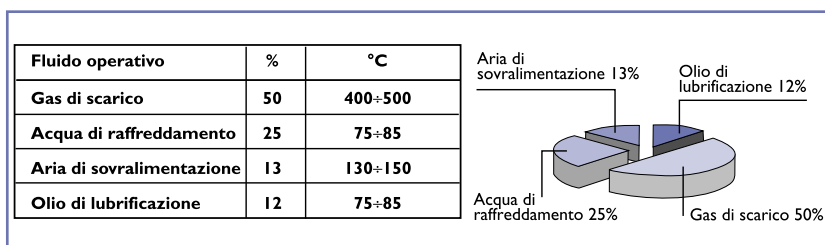
tati. Una grossa limitazione connessa con le turbine a gas è la necessità di impiego di combustibili pregiati, quali gas e oli leggeri, al fine di evitare fenomeni di corrosione e abrasione delle palette della turbina. Per contro, ciò ha anche i suoi lati positivi: utilizzando il gas metano come combustibile, i gas di scarico hanno un impatto ambientale minimo, essendo praticamente inerti, e possono venire impiegati direttamente in molti processi industriali, in particolare nell'essiccazione. Ai fini economici e di valutazione degli investimenti, c'è da osservare come, data la grande dinamica della tecnologia delle turbine a gas, il superamento tecnologico di questi impianti è assai rapido a causa della continua evoluzione delle tecniche costruttive.

Cogenerazione con motori endotermici alternativi

Questa soluzione impiantistica prevede l'utilizzazione di motori ad accensione comandata (secondo il ciclo Otto) oppure ad accensione spontanea (basata sul ciclo Diesel).

Essi provvedono alla generazione di energia meccanica – convertita poi in elettrica – tramite apposito alternatore. Il recupero termico viene invece effettuato su tutti i fluidi operanti nel motore: aria di sovralimentazione, acqua di raffreddamento, olio di lubrificazione, gas di scarico. Il maggior recupero di calore si ottiene dai gas di scarico (circa la metà del totale) e dall'acqua di raffreddamento delle camicie dei cilindri.

Figura 39 - Incidenza percentuale dei fluidi operativi sul recupero termico in un motore alternativo a combustione interna



Un impianto ad energia totale basato su motori alternativi è caratterizzato da una totale indipendenza della generazione elettrica da quella termica, dal momento che le utenze termiche vengono alimentate con i cascami energetici della produzione elettrica. I motori endotermici realizzano elevati rendimenti nella produzione di elettricità,

anche ai carichi parziali, garantendo una grande prontezza nel seguire le variazioni del carico elettrico. Rispetto alle turbine a gas, i motori alternativi dispongono di un'ampia gamma di combustibili: sia liquidi (nafta pesanti) che gassosi (metano, GPL), compresi gas poveri, gas d'altoforno, da biomasse, di distillazione del carbone. Il grande punto di forza della soluzione di cogenerazione impostata sui motori endotermici, specie per le taglie minori, è la modularità con cui i gruppi vengono realizzati. Ciascuna unità viene equipaggiata con generatore elettrico, con sezioni per il recupero del calore e con tutti i componenti ausiliari, ed assemblata in un unico gruppo direttamente alla produzione. Questa spinta modularità agevola la manutenzione, riducendo i rischi di interruzioni complete del servizio, garantendo nel contempo flessibilità di installazione e di esercizio. Per contro si assiste a un aumento dell'incidenza dei costi di manutenzione (particolarmente per l'olio di lubrificazione), la cui quota percentuale può andare dal 2 al 4% dei costi di investimento.

Il principale aspetto negativo della scelta motoristica risiede però nella scarsa capacità di soddisfare utenze termiche richiedenti calore ad alta temperatura (oltre i 140°C). Dal punto di vista dell'impatto ambientale, i motori alternativi sono caratterizzati da rumorosità e vibrazioni maggiori di quelle delle altre macchine, inoltre si hanno significative emissioni di NO_x , da limitare con appositi dispositivi secondo la normativa in vigore. Si possono ottenere sensibili riduzioni degli incombusti e delle percentuali di CO e NO_x facendo ricorso alla sovralimentazione, la cui adozione comporta anche un aumento della potenza specifica e una riduzione del consumo specifico.

Cogenerazione con cicli combinati gas-vapore.

Un'ulteriore evoluzione dei sistemi di cogenerazione già analizzati si basa sull'utilizzo contemporaneo di una o più turbine a gas e di una turbina a vapore. Dal punto di vista termodinamico si utilizzano perciò un ciclo Rankine combinato a un ciclo Brayton.

I gas prodotti in camera di combustione, dopo essersi espansi in turbina con conseguente produzione di energia meccanica/elettrica, essendo dotati di temperature elevate, vengono inviati a un generatore di vapore. Il vapore prodotto viene dapprima utilizzato per azionare una turbina a vapore e poi inviato alle utenze per assolvere il servizio termico.

Gli impianti a ciclo combinato possono essere realizzati secondo due modalità:

- senza combustione (*unfired*): il vapore viene prodotto dai gas di

scarico della turbina a gas tramite un semplice scambiatore di calore; in questi impianti la potenza erogata dalla turbina a gas è maggiore della potenza erogata dalla turbina a vapore, con rapporti compresi tra:

$$0,35 \leq \frac{P_{TV}}{P_{TG}} \leq 0,7;$$

- con caldaia di recupero (*fully fired*): si fa uso di una caldaia nella quale viene attivata una ricombustione indipendente dei gas; essa utilizza un combustibile meno pregiato di quello adoperato per la sezione gas. In questa tipologia di impianti la sezione a vapore prevale su quella a gas.

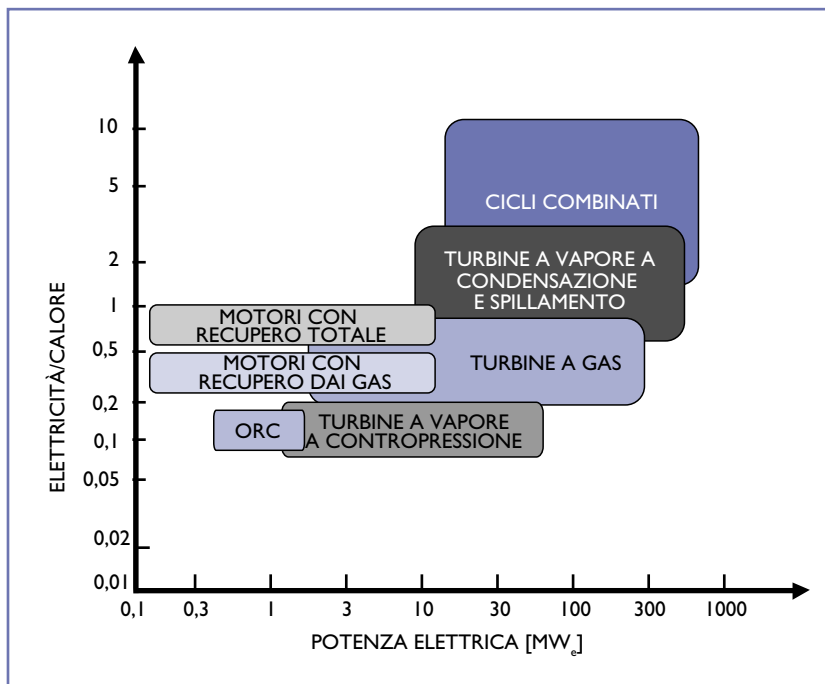
Volendo utilizzare il carbone come combustibile, una tecnologia interessante attualmente adottata è quella con ciclo combinato con gassificazione del carbone integrato (IGCC): aggiungendo questa ulteriore complicazione impiantistica si possono ottenere combustibili poveri da usare nel generatore di vapore, con conseguente riduzione dei costi di esercizio, nel caso in cui la sezione d'impianto a valle della turbina a gas alimentata col gas povero proveniente dal processo di gassificazione si integri in un normale circuito di cogenerazione. Ma la convenienza economica si realizza solo per potenze molto elevate e dunque i campi applicativi di tale soluzione sono piuttosto limitati. In tutti i casi, gli impianti a ciclo combinato consentono di realizzare rendimenti di produzione elettrica molto elevati, da 44% a 50% con punte addirittura del 60%. Sono inoltre caratterizzati da una buona flessibilità di esercizio e possibilità di modulazione dei carichi termici, specie considerando l'eventualità di utilizzare la post-combustione. Per contro, si tratta di impianti che hanno alti costi di installazione, data la loro complessità. A ciò si aggiunga che, sebbene la caldaia di recupero possa essere alimentata con nafte pesanti o altri combustibili a basso costo, la sezione gas richiede grossi quantitativi di combustibili pregiati, il che fa lievitare inevitabilmente i costi di esercizio globali.

Cogenerazione con ciclo Rankine a fluido organico

I turbogeneratori basati sul ciclo Rankine a fluido organico (ORC: *Organic Rankine Cycle*) sono una soluzione molto promettente per la cogenerazione a biomassa, con potenza nominale tipicamente compresa tra 400 e 1.500 kW_e per unità. I vantaggi di questa tecnologia

sono l'elevata disponibilità, i costi di manutenzione contenuti, il funzionamento completamente automatico senza intervento di personale e l'alta efficienza elettrica. Questi impianti sono adatti alla produzione – competitiva dal punto di vista economico – di energia elettrica, soprattutto in relazione agli incentivi per la produzione di energia da fonti rinnovabili.

Figura 40 - Campi di applicazione della tecnologia ORC e dei vari sistemi cogenerativi



Il principio di generazione di energia elettrica attraverso un ciclo ORC corrisponde al ciclo Rankine convenzionale: la differenza sostanziale consiste nell'utilizzo di un fluido di lavoro organico avente proprietà termodinamiche più favorevoli rispetto all'acqua. La biomassa è bruciata in una caldaia costruita seguendo le tecniche consolidate in uso per le caldaie ad acqua calda.

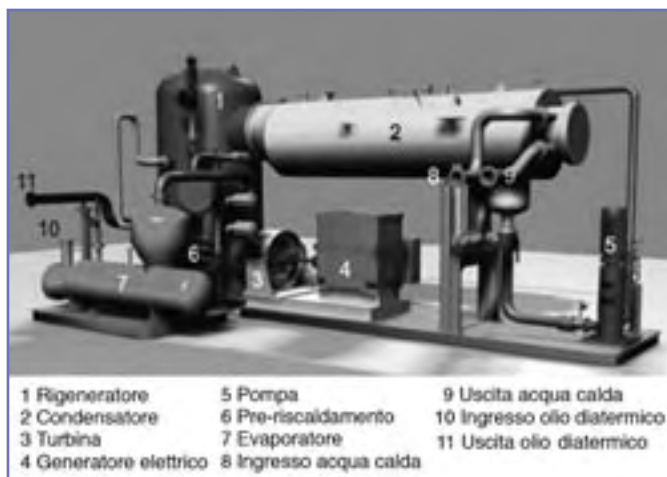
Il processo ORC è connesso alla caldaia attraverso un circuito a olio diatermico. I vantaggi legati all'utilizzo di questo fluido termovettore sono:

- la bassa pressione nella caldaia;

- l'elevata inerzia termica (stabilità nei cambiamenti di carico);
- la semplicità e la sicurezza di regolazione e controllo;
- la temperatura utilizzata (circa 300°C) nella parte calda dell'impianto assicura lunga durata all'olio diatermico;
- consente il funzionamento senza un operatore patentato (come invece è richiesto per i sistemi a vapore).

Il fluido di lavoro organico pressurizzato viene vaporizzato e surriscaldato per mezzo dell'olio diatermico nell'evaporizzatore e successivamente espanso in una turbina assiale direttamente connessa al generatore asincrono. In un secondo momento, il fluido organico passa attraverso un rigeneratore (dove avviene un recupero di calore) prima di entrare nel condensatore. La condensazione del fluido di lavoro avviene a un livello di temperatura che permette l'utilizzazione del calore recuperato in sistemi di teleriscaldamento o in processi industriali.

Figura 41 - Impianto ORC da 1000 kW_{el} (fonte: Turboden Srl, Brescia)



Per ottenere un'elevata efficienza elettrica dell'unità ORC stessa, è necessario tenere la pressione in uscita dalla turbina più bassa possibile così da minimizzare la temperatura al condensatore: ciò può essere realizzato ottimizzando le operazioni di controllo della rete di teleriscaldamento e attraverso un'adequata integrazione idraulica.

Per realizzare tale obiettivo, l'ORC dovrebbe essere connesso direttamente al ritorno della rete di teleriscaldamento e la temperatura dell'acqua di alimentazione in uscita dall'ORC dovrebbe essere tenuta più bassa possibile, mettendo l'economizzatore di acqua calda e la caldaia dell'ORC a valle. Seguendo questo approccio, l'ORC può lavorare a temperature dell'acqua che si aggirano sugli 80°C. Gli impianti ORC sono abbastanza silenziosi (le emissioni sonore più alte sono da attribuire al generatore incapsulato e ammontano a circa 85 dB(A) a una distanza di 1 metro). Dal momento che il ciclo ORC è chiuso e che non sussistono perdite del mezzo di lavoro, i costi d'esercizio sono bassi. I costi per il consumo di lubrificanti e le spese di manutenzione sono moderati. Il tempo di vita delle unità ORC è maggiore di venti anni.

2.2.4 La trigenerazione

L'uso razionale delle fonti primarie di energia, i benefici derivanti da un sistema di produzione dell'energia elettrica meno centralizzato, le opportunità offerte dall'introduzione del nuovo mercato dell'energia elettrica e non ultimo il risparmio energetico, sono le tematiche che, soprattutto oggi, destano maggiore attenzione verso forme di conversione dell'energia che impiegano impianti di cogenerazione di piccola taglia. La cogenerazione distribuita, intesa come produzione combinata di energia elettrica e calore *in loco*, consentendo una migliore utilizzazione dell'energia primaria, determina un aumento di efficienza globale da parte dell'intero sistema elettrico ed energetico, abbattendo inoltre i costi di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica e alleggerendo il sistema di produzione nazionale.

Cogenerazione e trigenerazione

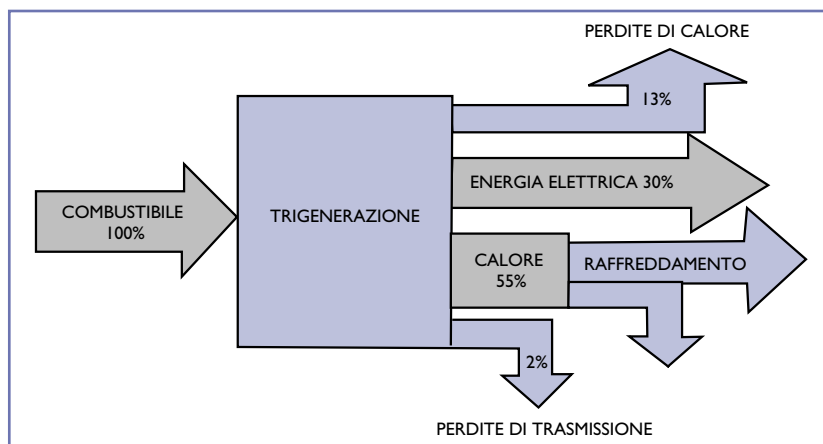
La cogenerazione rappresenta una delle tecnologie più efficienti per un uso razionale delle risorse energetiche, consentendo uno sfruttamento ottimale delle stesse. Essa trova un impiego ottimale nel settore industriale e negli edifici, laddove esiste una richiesta contemporanea di elettricità e calore e le ore previste di funzionamento d'impianto sono pari almeno a 4.000 ore/anno.

Non sempre però l'impianto di cogenerazione è posto a servizio di una struttura industriale che richieda, oltre a una fornitura di energia elettrica, anche un'adeguata fornitura di energia termica che consenta di impiegare, senza sprechi, tutta la produzione energetica dell'im-

pianto. Anche nell'impiego civile, nel quale la produzione termica dell'impianto di cogenerazione è destinata essenzialmente al riscaldamento delle strutture residenziali, la richiesta di calore, in particolare nei Paesi a clima temperato, è limitata ai mesi invernali. Esiste invece una significativa richiesta di freddo per il condizionamento estivo degli edifici durante i mesi estivi.

La trigenerazione è il sistema di produzione congiunta di energia elettrica, termica e frigorifera mediante l'utilizzo di un solo combustibile. La trigenerazione (CHCP: *Cogeneration of Heat, Cooling and Power*) unisce alle due funzioni della cogenerazione anche quella di condizionamento dell'aria e di raffrescamento. Il raffrescamento è prodotto tramite l'impiego del normale ciclo frigorifero in grado di trasformare l'energia termica in energia frigorifera, realizzando la trasformazione di stato del fluido refrigerante in combinazione con una sostanza utilizzata quale assorbente.

Figura 42 - Diagramma di processo della trigenerazione



L'acqua refrigerata così ottenuta può essere utilizzata per il condizionamento degli ambienti industriali, degli uffici o delle abitazioni adiacenti ecc. Come nel caso dei sistemi di cogenerazione, anche la trigenerazione offre grandi risparmi energetici dovuti alla produzione congiunta di energia elettrica, calore e raffrescamento.

I sistemi per la trigenerazione consentono di produrre energia elettrica recuperando e convertendo il calore residuo in freddo.

Sistemi ad assorbimento - Refrigerazione ad assorbimento con bromuro di litio o ammoniaca

Nello schema generale, questi impianti sono costituiti da sistemi di cogenerazione (CHP) combinati con un gruppo frigorifero ad assorbimento. Il gruppo frigorifero, ovvero l'apparato che produce freddo utilizzando il calore del processo di cogenerazione, costituisce una parte fondamentale dell'impianto di trigenerazione. I gruppi ad assorbimento basano il loro funzionamento sui principi della condensazione e dell'evaporazione per produrre freddo, utilizzando una serpentina di raffreddamento per l'espansione del refrigerante.

Nella sua forma più semplice una macchina ad assorbimento è costituita da un evaporatore, da un assorbitore, da un condensatore, da un generatore, da alcune pompe e da una serie di dispositivi di controllo. L'operazione, propria dei sistemi di refrigerazione, di sfruttare il calore latente di alcuni fluidi nelle loro fasi di cambiamento di stato, per sottrarre calore da una sorgente fredda e trasferirlo in una a più elevata temperatura, nel processo ad assorbimento si compie lasciando evaporare e alternativamente condensare il fluido refrigerante contenuto in una soluzione con il fluido solvente dal quale viene assorbito. La soluzione utilizzata dal ciclo è solitamente una miscela: generalmente acqua (solvente/refrigerante) e bromuro di litio (soluto), oppure ammoniaca (solvente/refrigerante) e acqua (soluto).

Nell'evaporatore, in cui è mantenuta una bassa pressione, il refrigerante evapora assorbendo calore dal fluido da raffreddare e si concentra. Tutto il resto del ciclo ha la funzione di recuperare il solvente-refrigerante che deve essere riusato. L'igroscopicità del bromuro di litio provoca l'assorbimento del vapor d'acqua da parte della soluzione concentrata che è presente nell'assorbitore, proveniente dal generatore.

La soluzione così si diluisce e viene quindi pompata nel generatore, dove una maggiore temperatura, mantenuta dall'apporto di calore proveniente dall'acqua surriscaldata calda o dal vapore d'alimentazione, provoca l'ebollizione della soluzione. Tale fenomeno dà luogo alla fuoriuscita di vapor d'acqua dalla soluzione e al conseguente arricchimento di quest'ultima, che viene convogliata nell'assorbitore dove riprende il ciclo.

Il vapor d'acqua sprigionatosi nel generatore affluisce nel condensatore nel quale, dapprima, condensa in virtù della sottrazione di calore effettuata da parte dell'acqua di condensazione e, poi, viene avviato nell'evaporatore dove riprende il ciclo. Per aumentare l'efficienza

della trasmissione di calore, il refrigerante, cioè l'acqua che circola all'interno dell'evaporatore e la soluzione concentrata che circola nell'assorbitore, vengono spruzzate sui fasci tubieri.

L'assorbitore e il generatore sostituiscono il compressore elettrico presente nei normali gruppi frigoriferi a compressione di vapore. L'apporto energetico dell'elettricità richiesto nelle macchine con compressore è sostituito, nel ciclo ad assorbimento, da energia termica con temperatura a partire da 85°C.

Il refrigerante e la soluzione assorbente utilizzati nel ciclo di assorbimento costituiscono una coppia di lavoro. A tutti gli effetti le coppie di lavoro effettivamente utilizzate nei processi industriali sono quella bromuro di litio/acqua e quella ammoniaca/acqua. La coppia ammoniaca/acqua è maggiormente impiegata nelle applicazioni di refrigerazione industriale con basse temperature di evaporazione, sotto lo 0°C, mentre la coppia acqua/bromuro di litio è ampiamente usata per applicazioni di condizionamento dell'aria, dove non sono necessarie temperature sotto lo 0°C. I livelli di pressione nella macchina ammoniaca/acqua sono generalmente maggiori della pressione atmosferica, mentre le macchine acqua/bromuro di litio funzionano di solito in un vuoto parziale.

L'efficienza di una macchina frigorifera ad alimentazione termica viene misurata attraverso il coefficiente termico di prestazione (COP), definito come rapporto tra il calore assorbito dal ciclo frigorifero attraverso l'evaporatore e il calore richiesto per far funzionare il ciclo stesso. Le macchine standard, qualora vengano sfruttate tutte le opportunità di recupero del calore, presentano un coefficiente di prestazione (COP) di circa 0,7 per il sistema acqua/bromuro di litio e intorno a 0,6 per il sistema ammoniaca/acqua.

Il COP può essere significativamente migliorato utilizzando i sistemi denominati a doppio effetto che incorporano due blocchi di generatore-assorbitore in fasi diverse affinché il calore fornito venga recuperato due volte. Al primo generatore il calore ha una temperatura di circa 170°C e viene rilasciato dal corrispondente condensatore per motorizzare il secondo generatore a una temperatura più bassa, circa 100°C.

La temperatura minima della fonte di calore, di norma fornita dal sistema di cogenerazione, per i sistemi di raffrescamento a bromuro di litio/acqua, deve essere pari a 60-80°C per i sistemi a singolo effetto e di 150°C per i sistemi a doppio effetto. I sistemi ad ammoniaca richiedono invece una temperatura minima della sorgente termica pari a 100-120°C (sistema monostadio o a singolo effetto).

Le potenze frigorifere tipiche delle macchine ad assorbimento sono dell'ordine di parecchie centinaia di kW.

Refrigerazione ad adsorbimento

La macchina frigorifera ad adsorbimento utilizza, quale fluido di processo, l'acqua. Il principio dell'adsorbimento consiste nell'impiego di un materiale igroscopico, solitamente gel di silice, allo stato solido il quale è in grado di trattenere vapore d'acqua e di rilasciarlo quando viene fornito calore. Il calore richiesto per il rilascio dell'acqua può essere fornito a temperatura relativamente bassa, fino a circa 50°C; la tecnologia risulta infatti adatta anche per applicazioni particolari quali il raffrescamento mediante energia solare. La macchina è divisa in una parte a bassa pressione (dell'ordine di 0,01 bar), che ospita l'evaporatore, alla quale corrisponde una temperatura di evaporazione ridotta (dell'ordine di 12°C). L'ambiente da refrigerare si trova allora a una temperatura superiore rispetto a quella di evaporazione (normalmente come condizione di progetto si assume 26°C in estate) e può fornire il calore richiesto per l'evaporazione del fluido frigorifero. La zona a pressione superiore ospita invece il condensatore. Il processo richiede che la temperatura di condensazione del fluido sia superiore alla temperatura dell'ambiente esterno (in estate fino a 35-40°C), in modo che il fluido possa cedere calore. Nelle condizioni specificate una pressione di 0,1 bar è sufficiente per fare avvenire la condensazione. Evaporatore e condensatore sono separati da due camere che svolgono le trasformazioni termodinamiche, sostituendo la compressione meccanica tipica delle macchine a compressione di vapore. Le due camere sono poste alternativamente in contatto l'una con l'evaporatore e l'altra con il condensatore; alla camera in contatto con il condensatore è fornito calore, mentre dalla seconda è asportato calore. Un sistema di valvole automatiche mosse alternativamente consente di mantenere tra il condensatore e l'evaporatore la necessaria differenza di pressione, nonché di effettuare la commutazione di funzionamento delle due camere. Attualmente solo poche aziende asiatiche sono in grado di produrre macchine frigorifere ad adsorbimento.

Le tipiche condizioni operative con una temperatura di alimentazione della sorgente calda di circa 80°C consentono di raggiungere un COP pari a circa 0,6, pur se il funzionamento delle macchine è comunque garantito anche a temperature pari a 60°C. Il *range* delle potenze frigorifere di queste macchine è compreso tra i 50 e i 500 kW.

La semplicità costruttiva delle macchine frigorifere ad adsorbimento e la loro robustezza rappresentano indubbi vantaggi. Non sussiste alcun pericolo per la cristallizzazione e, di conseguenza, non esistono limiti per la temperatura dell'acqua di raffreddamento.

All'interno della macchina non è prevista una pompa per la soluzione e il consumo elettrico è limitato. Gli svantaggi sono costituiti dalle dimensioni, tutt'altro che trascurabili, e dal peso. Inoltre, a causa del numero limitato di produttori, il prezzo delle macchine frigorifere ad adsorbimento è relativamente elevato. Per le future generazioni di queste macchine è auspicabile un miglioramento delle prestazioni degli scambiatori di calore all'interno dei due compartimenti e una conseguente riduzione del loro peso e del loro volume.

Cogenerazione o trigenerazione con utilizzo di biogas

Il biogas derivante dai fenomeni connessi alla trasformazione anaerobica delle sostanze organiche contenuti nei rifiuti è costituito, mediamente, dal 50-60% di metano, da anidride carbonica, composti solforati e acqua. Dopo la captazione e la depurazione può essere utilizzato come energia primaria per alimentare i motori endotermici di un sistema di cogenerazione. Oltre a grandi impianti per il recupero del biogas dalle discariche per alimentare cogeneratori collegati a reti di teleriscaldamento e raffrescamento, oggi esiste la possibilità di avere sistemi di piccola/media taglia, con diverse varianti funzionali, *ad hoc* per utenti privati e consorzi che dispongono di rifiuti organici dai quali è possibile ricavare biogas.

2.2.5 L'utilizzo diretto di oli vegetali nei motori a combustione interna

La produzione di energia attraverso l'utilizzo diretto di oli vegetali in motori diesel negli ultimi anni ha destato notevole interesse, tanto che numerose aziende costruttrici hanno avviato sperimentazioni in merito all'impiego di oli vegetali nei loro motori. L'impiego infatti di bio-oli nei motori diesel deve essere valutato con attenzione in riferimento anche ai diversi oli vegetali, al fine di determinarne le caratteristiche di combustione e le emissioni. Gli oli vegetali possono essere prodotti da colza, girasole, noce di cocco o soia. Il loro impiego come carburanti per motori diesel viene proposto in considerazione delle loro buone qualità di combustione.

La loro elevata viscosità si traduce tuttavia in una limitata atomizzazione, nel rischio di blocco dell'iniettore e nella contaminazione dell'olio lubrificante tanto che spesso tali oli vengono utilizzati in miscela con il gasolio. In questo caso, però, le emissioni di CO, idrocarburi e particolato risultano superiori a quelle derivanti dall'impiego di carburante diesel puro.

ESPERIENZE...

Le prime esperienze nell'utilizzo di oli vegetali nei motori diesel sono dovute allo stesso Rudolf Diesel che utilizzò quale combustibile per il suo motore olio di arachidi. In occasione dell'Esibizione Universale di Parigi del 1900, la Otto Company presentò un piccolo motore capace di funzionare sia con gasolio che con olio vegetale o animale.

Diversi anni dopo l'ingegnere francese Gautier fece dei test approfonditi su motori diesel marini da 250/550 kW a basso numero di giri (390/420) alimentati con olio di arachidi, di palma e di ricino valutando la risposta del motore in varie condizioni di funzionamento. I risultati che ottenne non furono molto diversi da quelli rilevati durante la sperimentazione negli attuali motori diesel, con variazioni non significative per quanto riguarda il comportamento termodinamico del motore e i suoi consumi.

Anche durante la Seconda guerra mondiale furono realizzate alcune esperienze d'impiego di oli vegetali in motori edotermici: 100 t/mese di olio di palma furono consumate nel porto di Abidjan (Costa d'Avorio) in motori da 40 a 700 kW; mentre olio di arachidi fu utilizzato come carburante per i camion adibiti ai trasporti tra Dakar e Algeri (3.500 km). Lo sviluppo tecnologico degli ultimi decenni ha portato a un uso quasi esclusivo dei combustibili fossili. I combustibili vegetali furono infatti abbandonati a causa principalmente dell'alto costo produttivo e della qualità non costante del prodotto. L'orientamento tecnologico fu fortemente influenzato anche dalla politica di sviluppo dei Paesi industrializzati legata ai bassi costi del combustibile fossile e alla massimizzazione della produzione agricola alimentare.

I motori diesel hanno subito una forte evoluzione che, se da una lato ne ha migliorato le prestazioni, dall'altro ha reso la macchina più sensibile alle caratteristiche del combustibile utilizzato, soprattutto per ciò che riguarda gli iniettori e i sistemi di controllo, a tal punto da renderla poco flessibile per l'utilizzo con carburanti diversi dal gasolio. A partire dal 1990 sono stati realizzati vari impianti di esterificazione degli oli vegetali, soprattutto a livello comunitario, grazie anche al surplus alimentare e alle produzioni *no-food* ottenute sui terreni a *set-aside*. Gli oli infatti possono essere utilizzati come combustibili nello stato in cui vengono estratti oppure dopo esterificazione. L'impiego di esteri di oli vegetali (ottenuti per reazione degli oli con alcol) riveste grande interesse dal momento che essi sono caratterizzati da una minore viscosità e da un più elevato numero di cetano rispetto agli oli

vegetali e consentono pertanto l'impiego diretto del combustibile nei motori tradizionalmente alimentati a gasolio (autotrazione, produzione di energia).

La semplicità tecnica del processo di produzione degli oli vegetali, rispetto ai corrispondenti esteri metilici, li rende particolarmente interessanti per quelle realtà (Paesi in via di sviluppo) dove i principali obiettivi sono l'autoproduzione di energia a bassi costi e il massimo vantaggio energetico (l'energia per estrarre l'olio è una minima parte rispetto all'energia contenuta nell'olio).

Tuttavia anche nei Paesi industrializzati l'olio grezzo può essere utilizzato in impianti di media taglia (5-15 MW_e) con motori diesel per la produzione di calore ed elettricità.

Problematiche d'impiego

L'uso degli oli vegetali come carburanti nei motori diesel presenta alcuni inconvenienti (deposito sugli iniettori, usura delle parti metalliche, gelificazione degli oli nei *carter*, produzione di elevata fumosità, aumento del consumo nel tempo), che tuttavia possono essere risolti con una messa a punto specifica del motore e un impianto di alimentazione opportunamente modificato.

L'elevata viscosità dell'olio vegetale rappresenta infatti uno dei problemi più significativi in merito all'impiego degli SVO (*Straight Vegetable Oil*⁶²), poiché può essere causa di una combustione incompleta dovuta all'incapacità degli iniettori ad atomizzare l'olio grezzo. Le prestazioni del motore non sono pertanto costanti e nel lungo periodo i componenti più utilizzati, quali gli iniettori, le valvole e le fasce elastiche, possono essere deteriorati. Si formano normalmente depositi di carbone nella camera di combustione e l'olio lubrificante si contamina facilmente.

L'olio vegetale grezzo può dunque essere utilizzato nei motori sia puro che in miscela con gasolio, ma obbliga ad eseguire alcune modifiche meccaniche e tecniche a causa della sua elevata viscosità. Esistono alcuni motori concepiti per funzionare a olio, ma sono di difficile reperimento sul mercato, quindi allo stato attuale è conveniente:

⁶² La definizione "olio vegetale non modificato o SVO" (*Straight Vegetable Oil*), a volte anche citato come olio vegetale puro PPO (*Pure Plant Oil*) è, secondo quanto indicato nelle direttive della Commissione Europea, il termine usato per definire "olio vegetale puro dalle piante oleifere". Si tratta in effetti di olio vegetale invariato come l'olio del seme di ravizzone, l'olio di semi della senape, l'olio del seme di girasole, ecc.

- utilizzare l'iniezione indiretta e iniettori autopulenti;
- prevedere un sistema di pre-riscaldamento del combustibile per non ostruire i filtri (attorno ai 60°C);
- favorire l'accensione del motore con gasolio in ambienti freddi;
- aumentare il flusso di carburante per mantenere potenza e coppia simili a quelle dell'alimentazione a gasolio;
- utilizzare olio lubrificante con alto potere detergente;
- evitare frequenti accensioni e spegnimenti, che potrebbero causare problemi dovuti alla particolare curva di distillazione dell'olio.

Aspetti ambientali

La letteratura scientifica in merito alle prestazioni ambientali dei motori alimentati a olio vegetale è alquanto limitata. La maggior parte di questi studi fin oggi realizzati, tuttavia, sono stati sviluppati utilizzando motori standard senza alcuna modifica che consentisse di ottimizzare la combustione in funzione del combustibile. Il quadro che emerge dalle prove sui motori modificati indica invece che le emissioni della maggior parte delle sostanze inquinanti sono piuttosto più basse nel caso degli oli vegetali, mentre c'è un aumento nelle emissioni di NO_x e di particelle ultra fini. Tuttavia, poiché lo zolfo è praticamente assente dal combustibile, le emissioni dovute all'impiego di oli vegetali dovrebbero essere facilmente ridotte con l'impiego di sistemi di *after-treatment* del gas di scarico, consentendo miglioramenti significativi nelle emissioni, se confrontate con il campione non trattato. Per quanto riguarda le emissioni di CO_2 , i test eseguiti mostrano che i livelli dell'emissione sono simili a quelli del diesel fossile. Bisogna ricordare però che nel caso degli oli vegetali la CO_2 restituita in atmosfera dal processo di combustione è pari a quella assorbita durante le fasi di accrescimento della pianta, come avviene per i combustibili lignocellulosici. In tal senso, la riduzione indicativa dell'emissione di CO_2 rispetto a diesel fossile, considerando l'intero ciclo di vita, è compreso nel range di 80-96%. Secondo la normativa tedesca relativa alla classificazione di rischio dell'acqua, infine, l'olio vegetale risulta inoffensivo nel caso di infiltrazione in acqua freatica; ciò significa che eventuali sversamenti d'olio non causano danno significativo all'ambiente. Il biodiesel invece appartiene a una categoria classificata a rischio di contaminazione dell'acqua come il petrolio greggio viscoso, l'olio pesante e un certo numero di altri oli minerali e chimici.

Aspetti economici e di mercato

Esperienze in merito all'impiego industriale di oli vegetali per l'alimentazione di motori diesel hanno avuto avvio già nei primi anni Novanta. Al momento attuale è possibile reperire sul mercato motori diesel adatti all'impiego con oli vegetali di taglie comprese tra 1 e 10 MW di potenza elettrica. I costi per impianti di produzione di energia elettrica da oli vegetali sono stimati tra i 500 e i 1.000 euro per kW di potenza installata, in funzione dell'economia di scala riconosciuta agli impianti di taglia più grossa.

Capitolo 3

Aspetti economici

3.1 I costi di produzione dei combustibili da biomassa

3.1.1 L'ottenimento della materia prima

La filiera delle biomasse forestali

Il costo di acquisizione della biomassa di origine forestale è determinato dalle seguenti componenti: il costo di approvvigionamento in bosco del materiale legnoso (comprensivo delle fasi di cantiere quali il taglio, l'allestimento e il carico all'imposto), il condizionamento, il trasporto e lo stoccaggio del combustibile.

Escludendo in questa sede la disamina dei costi relativi al trasporto e allo stoccaggio della biomassa, per il numero delle variabili in gioco (distanza percorsa, tipo di automezzo, costo orario operaio, tipo di biocombustibile, ecc.), di seguito sono riportati, a titolo di esempio, i costi medi relativi alle fasi di approvvigionamento e di condizionamento del combustibile. Tali dati sono stati reperiti nell'ambito di una serie di prove ed esperienze di valutazione dei costi di produzione in campo, successivamente confrontati con i valori forniti dalla bibliografia⁶³. Resta inteso che tali costi hanno valore puramente indicativo in quanto essi sono fortemente soggetti alle condizioni del mercato energetico. Inoltre, questi dati, presentano un'elevata variabilità interna (la deviazione standard varia tra valori da 4 a oltre 10 €/t), imputabile alle diverse condizioni in cui si svolgono le operazioni di cantiere forestale.

⁶³ Montibeller, 2005; Verani, Sperandio, 2005; Spinelli, Nati, Magagnotti, 2003; Pedrollo, 2001; Vettraino, Carlino, Rosati, 2005; Socris, 2003.

Per quanto attiene alla fase di cantiere, sono state trattate distintamente le filiere produttive relativamente alle diverse fonti di approvvigionamento in quanto, anche in questo caso, i costi possono variare sensibilmente.

Tabella 26 - Costi indicativi delle operazioni di cantiere forestale

FILIERA PRODUTTIVA	Abbattimento e allestimento	Esbosco	Totale
	€/t	€/t	€/t
Ceduo – taglio raso	14-20	11-15	25-35
Interventi in fustaia	30-42	17-19	47-61
Diradamento fustaia	17-23	17-19	34-42
Filari agricoli	12-14	16-18	28-32

La filiera dei residui colturali

La produzione di biomassa combustibile a partire dai residui agricoli è un'operazione semplice e relativamente economica sia perché le macchine impiegate in fase di raccolta e condizionamento sono già normalmente in uso nella maggior parte delle aziende agricole sia perché non vi sono criticità particolari che possano incidere sul costo complessivo. A questa filiera non vengono infatti imputati i costi di produzione del prodotto principale il quale ha un mercato diverso e in assenza del quale non si svilupperebbe la filiera energetica dei sottoprodotti.

Vengono di seguito riportati alcuni costi indicativi della fase di raccolta e condizionamento del materiale secondo modalità diverse. Anche in questo caso sono escluse le operazioni di trasporto relative al conferimento del materiale.

Tabella 27 - Costi indicativi della raccolta e condizionamento dei residui agricoli

FILIERA PRODUTTIVA	Raccolta e condizionamento
	€/t
Trinciatura stoppie	4-5
Imballatura e carico di rotoballe	10-13,5
Imballatura e carico di balle parallelepipedo grandi	4-5
Cippatura (residui di potatura)	6-11

Non essendo attualmente sviluppata la preparazione di pellet a partire dai residui colturali non si dispongono di costi relativi a questa fase.

La filiera delle colture dedicate

I costi di produzione delle colture energetiche dedicate sono fortemente eterogenei e dipendono in gran parte dalla coltura (erbacea o arborea), dalla durata dell'impianto (annuale o pluriennale) e dal fabbisogno di input colturali della singola specie.

In generale, le colture annuali sono caratterizzate da elevati costi di produzione. Essendo infatti la biomassa energetica il prodotto principale di queste colture, il costo di produzione è comprensivo di tutte le operazioni agronomiche (lavorazioni, fertilizzazioni, irrigazioni, ecc.) necessarie allo sviluppo e alla crescita delle piante.

Nella tabella 28 sono presentati i costi indicativi di produzione agronomica di alcune colture erbacee annuali. Nel calcolo sono esclusi i costi della manodopera.

Tabella 28 - Costo di produzione di alcune colture erbacee annuali nel Nord Italia⁶⁴

	Costo totale (€/ha)	Resa (t/ha)	Costo a tonnellata (€/t)
Semi di colza	437	2,4	175
Semi di girasole	377	3,1	122
Radici di barbabietola da zucchero	8387	50,4	17
Granella di frumento tenero	593	4,5	132
Granella di mais	328	10	33

Le colture poliennali, rispetto a quelle a ciclo annuale, sono caratterizzate da costi unitari inferiori. A fronte infatti di maggiori spese di impianto, imputabili al maggiore costo del materiale di propagazione (ad esempio, è elevato quello dei rizomi di canna comune e delle talee di pioppo in *Short Rotation Forestry*) e alle più onerose operazioni di impianto, i bassi costi di gestione e la produttività sostanzialmente costante nel tempo riducono fortemente la spesa per unità di biomassa prodotta.

Nella tabella 29 sono esposti i costi di produzione di alcune colture poliennali con ciclo decennale.

⁶⁴ INEA, 2004.

Tabella 29 - Costo di produzione di alcune colture poliennali (€/ha per anno) considerando un ciclo decennale⁶⁵

	Canna comune	Miscanto	SRF Pioppo
Costi mezzi tecnici (€/ha per anno)	383	126	186
Costi mezzi meccanici (€/ha per anno)	690	519	530
Costo totale (€/ha per anno)	1.073	645	716
Resa (t/ha)	30,9	22,6	17,2
Costo a tonnellata (€/t di s.s.)	34,6	28,8	41,6

Nonostante i maggiori costi della biomassa prodotta le colture dedicate presentano dei vantaggi non trascurabili sia in termini economici, in quanto forniranno all'agricoltore nuove opportunità di reddito in assenza delle sovvenzioni tradizionali alle colture alimentari, sia in termini ambientali, in quanto la diversificazione colturale migliora il paesaggio e la biodiversità delle campagne e, rispetto a colture più esigenti, si ha una riduzione degli impatti ambientali dell'agricoltura.

3.1.2 Le fasi di preparazione del combustibile

La produzione del pellet

Un'analisi economica della filiera di produzione del pellet deve tener conto delle molteplici fonti e tipologie di materiale a disposizione. In base alla qualità della biomassa lignocellulosica, alla pezzatura, alla percentuale di umidità, alla volontà dell'imprenditore di operare con una o con diverse qualità di biomassa e ulteriori fattori, varieranno i costi di acquisto della materia prima, i costi di investimento degli impianti e i costi per l'energia impiegata durante la pellettizzazione. Attualmente il mercato del pellet è basato nella quasi totalità da pellet originato da biomassa legnosa derivante dagli scarti dell'industria del legno. In seguito verranno presentati i risultati di alcuni studi relativi all'analisi economica della filiera del pellet a partire da questa tipologia di materiale, sebbene gli stessi impianti possano operare, applicando le opportune tecnologie, con tutte le altre tipologie di biomasse lignocellulosiche.

⁶⁵ Bonari et al., 2004.

In uno studio di Paviz e Pettenella⁶⁶ sono stati stimati i costi di produzione del pellet ipotizzando tre filiere produttive a partire da differenti tipologie di biomassa.

Tabella 30 - Costo di produzione del pellet in funzione della tipologia di materia prima

	Impianto 1	Impianto 2	Impianto 3
Dimensione pellettificio	Piccola	Media	Grande
Tipologia di biomassa	Residui legnosi autoprodotti (segatura secca e trucioli)	Acquisto differenti tipologie di biomassa	Acquisto segatura asciutta
Operazioni preliminari necessarie	Frantumazione	Frantumazione Essiccazione	-
Costo della biomassa (€/t)	0	20	60
Consumo energetico (kWh/t)	110	200	110
Costo dell'energia impiegata (€/t)	17,49	31,80	15,90
Valore impianto a nuovo (€)	146.000	1.320.000	2.000.000
Valore impianto finale (€)	9.730	88.000	100.000
Costo di ammortamento (€/anno)	13.627	123.200	190.000
Produzione annua (t)	400	6.000	25.000
Costo di ammortamento (€/t)	34,07	20,23	7,60
Costo del personale (€/t)	4	15	12,10
Costo totale di produzione (€/t)	55,53	87,03	95,60

Da ricordare che il Comitato Termotecnico Italiano (CTI) indica un costo di produzione del pellet variabile tra i 50 e i 160 €/t a fronte di un prezzo all'ingrosso compreso tra 110 e i 210 €/t e un prezzo al dettaglio compreso tra 210 e 300 €/t. Il prezzo di produzione cala nel caso di pellettifici che impiegano segatura e cascami⁶⁷.

⁶⁶ Paniz, Pettenella, 2004.

⁶⁷ www.cti2000.it: Attività PROBIO 2000 (II° anno) della Regione Lombardia. Energia dall'agricoltura – Pellet. Allegato 3: La produzione del pellet di legno – Analisi tecnico-economica di una filiera per la produzione del pellet di legno. Gennaio 2004.

Lo sviluppo di nuove tecnologie permette una sensibile riduzione dei costi di investimento e di produzione grazie alla possibilità di pelletizzare materiale grezzo con umidità superiori al 35% e con un innalzamento della temperatura più moderato⁶⁸ che consente di evitare i passaggi di essiccazione del materiale, che avviene in maniera simultanea al processo di densificazione e di raffreddamento del pellet a fine processo.

La produzione del bricchetto

La filiera del bricchetto si sviluppa in modo molto simile a quella del pellet: i costi da sostenere per la realizzazione di un impianto di bricchettatura, e quindi il costo finale del prodotto, sono fortemente influenzati dalla tipologia di biomassa utilizzata.

Uno studio di Sorlini e Zoni⁶⁹, a seconda della potenzialità della macchina, indica costi di produzione variabili tra 0,14 a 0,26 €/kg, rispettivamente per impianti con bricchettatrice con produttività di 350 e 50 kg/h.

La produzione del bioetanolo

La trattazione degli aspetti economici relativi al bioetanolo necessita di una differenziazione nelle tre sezioni della filiera, come descritte nel corso dell'elaborato, poiché il contenuto e la maturità tecnologici risultano profondamente diversi e incidono significativamente sui costi di approvvigionamento e di condizionamento del combustibile, nonché sui costi di investimento e di gestione degli impianti.

La sezione saccarifera della filiera del bioetanolo

Questa sezione della filiera produttiva del bioetanolo è influenzata da una forte concorrenza nell'utilizzazione della materia prima dall'industria alimentare e ciò concorre a mantenerne un prezzo relativamente alto.

Nel caso della barbabietola da zucchero i costi di acquisto della materia prima sono stimati in 324 €/1.000 litri di bioetanolo prodotti. Tale valore può scendere nell'eventualità di colture con destinazione

⁶⁸ Grassi, 2004.

⁶⁹ Sorlini, Zoni, 2001.

esclusivamente energetica in considerazione degli incentivi previsti dalla PAC nell'ambito del *set aside no-food*, fino a valori prossimi a 200 €/1.000 litri⁷⁰.

I costi relativi alla conversione industriale sono stimati in 218 €/1.000 litri di bioetanolo prodotti, con un'incidenza della materia prima prossima al 50% dell'importo complessivo⁷¹ (tabella 31).

Tabella 31 - Costi di produzione del bioetanolo per la sezione saccarifera

	Ipotesi senza incentivi	Ipotesi con incentivi
	€/1.000 litri	€/1.000 litri
Acquisto materia prima	324	200
Conversione industriale	218	218
Ricavi dai sottoprodotti	3	3
Costi produttivi totali	539	415

La sezione amidacea della filiera del bioetanolo

Il principale vantaggio di questa sezione è rappresentato dal fatto che, allo stato attuale, le colture amidacee sono già parte del panorama agricolo europeo e che la filiera si avvale di soluzioni tecnologiche già mature e disponibili.

Anche in questo caso, tuttavia, il costo della materia prima è un elemento che incide sensibilmente sul costo finale del bioetanolo. In base alle fonti consultate il grano fa registrare dei costi pari a 343 €/1.000 litri di bioetanolo, che potrebbero però ridimensionarsi a 220 €/1.000 litri nell'ipotesi di usufruire degli incentivi nell'ambito del *set aside no-food*⁷².

I costi relativi alla trasformazione industriale sono stati stimati in 284 €/1.000 litri di bioetanolo, con un ricavo dai sottoprodotti pari a 145 €/1.000 litri (tabella 32). Questi valori mettono in evidenza come l'incidenza della materia prima sui costi finali del prodotto energetico

⁷⁰ Statistic and Prospects, Directorate for Agriculture, European Commission.

⁷¹ Enguidanos et al., 2002.

⁷² Statistic and Prospects, Directorate for Agriculture, European Commission.

sia maggiore del 60%⁷³. L'analisi economica della filiera evidenzia inoltre come un importante margine di ricavo possa derivare anche dai sottoprodotti.

Tabella 32 - Costi di produzione del bioetanolo per la sezione amidacea

	Ipotesi senza incentivi	Ipotesi con incentivi
	€/1.000 litri	€/1.000 litri
Acquisto materia prima	343	220
Conversione industriale	284	284
Ricavi dai sottoprodotti	145	145
Costi produttivi totali	482	359

La sezione cellulosica della filiera del bioetanolo

Da un punto di vista tecnologico questa sezione è in fase di ottimizzazione. I costi legati alla produzione del bioetanolo di origine cellulosica presentano, di conseguenza, un importante margine di miglioramento che risulta profondamente influenzato dagli investimenti che il mondo scientifico intenderà attuare nel breve e medio termine nel settore della ricerca e dello sviluppo. I dati attualmente disponibili sui costi di produzione sono da ritenersi pertanto puramente indicativi della situazione contingente e sono destinati a subire importanti fluttuazioni.

È evidente come in questo caso vi sia una forte incidenza della conversione industriale sul costo complessivo del prodotto energetico, corrispondente al 63,7%.

Per quanto riguarda le proiezioni future nel medio-lungo termine, le indicazioni fornite dal NREL (*US National Renewable Energy Laboratory*) propendono per la possibilità di una riduzione dei costi di produzione del bioetanolo di origine cellulosica entro il 2015 di 0,12 €/litri⁷⁴.

⁷³ Enguidanos et al., 2002.

⁷⁴ "Outlook for biomass ethanol production and demand", Department of Energy (USA).

Tabella 33 - Costi di produzione del bioetanolo per la sezione cellulosica

	Costi
	€/1.000 litri
Acquisto materia prima	240
Conversione industriale	355
Ricavi dai sottoprodotti	38
Costi produttivi totali	557

La produzione del biodiesel

Anche la produzione del biodiesel, al pari di quella del bioetanolo, comporta costi di produzione diversi in funzione della filiera produttiva considerata, a sua volta influenzata dalla materia prima in ingresso al processo: oli vegetali di diversa provenienza, oli esausti, ecc.

A titolo di esempio sono esposti di seguito i costi di produzione del biodiesel presupponendo impianti di differente taglia e che impiegano differenti materie prime. I valori sono desunti dal mercato statunitense dove sono più frequenti le applicazioni. Non si dispongono di dati relativi alla situazione italiana per la scarsità di esperienze realizzate nel contesto nazionale. Va sottolineato come nel mercato statunitense il costo di produzione risulti generalmente inferiore a quello riscontrato nell'Unione Europea.

Tabella 34 - Costi per la realizzazione di alcuni impianti di biodiesel⁷⁵

	Olio vegetale esausto	Oli e grassi animali	Oli da colture dedicate	Olio di soia
Taglia impianto (l/anno)	45.317.000	45.317.000	45.317.000	45.317.000
Capitale investito (€)	11.600.000	10.400.000	11.600.000	9.600.000
Costi operativi (€)	13.019.000	16.900.000	15.182.500	20.303.500
Costi del biodiesel (€/l)	0,29	0,37	0,34	0,45

⁷⁵ "Statewide Feasibility Study for a Potential New York State Biodiesel Industry", Final report of "Renewable & Indigenous Energy R&D Program" (RFP 734-02).

La taglia d'impianto incide sul costo di produzione del biodiesel grazie alla possibilità di godere di alcune economie di scala al crescere della potenzialità produttiva dell'impianto. Per taglie d'impianto più piccole (11.500.000 litri/anno), per le diverse filiere produttive, il costo in media può crescere fino a 0,03 €/litri.

La produzione di biodiesel dalle colture dedicate di colza e girasole è influenzata dal costo per il reperimento della materia prima; esso incide per percentuali variabili tra il 50 e l'80%⁷⁶ sul costo totale. In linea generale il costo di produzione a partire dal girasole è di poco inferiore a quello ottenuto impiegando quale materia prima la soia.

3.2 I prezzi di vendita dei combustibili da biomassa

La continua crescita del prezzo del petrolio e di conseguenza del prezzo dei prodotti derivati dal petrolio o dei combustibili il cui prezzo, a livello nazionale, è fissato in base al prezzo del petrolio (ad esempio il gas metano) sta rapidamente spostando la convenienza economica verso l'utilizzo a fini energetici delle biomasse in sostituzione dei combustibili fossili. A dimostrazione di ciò è sufficiente procedere con un confronto tra i prezzi di mercato, per unità energetica prodotta (kWh), dei principali combustibili dal quale emerge che il costo dell'energia da biomassa è, in tutti i casi, nettamente inferiore a quello delle fonti fossili.

A titolo di esempio sono riportati in tabella 35 i prezzi di mercato di alcuni combustibili da biomassa, quelli per i quali già attualmente esiste un mercato, e alcuni combustibili di origine fossile. I dati, aggiornati ad ottobre 2005, sono ovviamente indicativi della situazione contingente. È presumibile che in futuro il costo dei prodotti di origine petrolifera possa ulteriormente salire.

Per alcuni combustibili derivati dalle biomasse, come anticipato, non esiste ancora un sistema di mercato in grado di esprimere un prezzo di riferimento significativo. È il caso ad esempio dei residui agricoli, delle biomasse dedicate e di alcuni prodotti da essi derivati (cippato e pellet da erbacee). Tale prezzo è stato pertanto stimato sulla base delle esperienze degli autori. In altri casi, come ad esempio in quello del biodiesel, è possibile prendere come riferimento il prezzo del car-

⁷⁶ "Statewide Feasibility Study for a Potential New York State Biodiesel Industry", Final report of "Renewable & Indigenous Energy R&D Program" (RFP 734-02),

burante su mercati esteri dove già attualmente viene venduto sebbene non siano possibili immediati confronti con il prezzo delle fonti energetiche nazionali a causa principalmente della diversa struttura del sistema delle imposte. Sul mercato tedesco, il biodiesel in miscela con il gasolio è venduto, alla pompa, a un prezzo di 0,740 €/l (prezzo aggiornato ad ottobre 2005).

Tabella 35 - Prezzi medi di mercato per unità energetica resa dei principali combustibili

	udm	p.c.i.	Prezzo medio di mercato ⁷⁷	Prezzo medio unitario
		kWh/udm	€/udm	€/kWh
Carburanti				
Benzina	l	8,9	1,34	0,15
Gasolio per autotrazione	l	9,9	1,22	0,12
GPL per autotrazione	l	7,2	0,60	0,08
Combustibili per uso riscaldamento				
Gasolio per riscaldamento	l	9,9	1,14	0,11
GPL per riscaldamento (sfuso)	l	7,2	0,97	0,13
Metano	Nm ³	9,6	0,3-0,6	0,03-0,06
Combustibili per uso industriale				
Olio combustibile fluido BTZ 1%S	kg	11,4	0,70	0,06
Olio combustibile denso BTZ	kg	11,2	0,37	0,03
Combustibili da biomasse				
Legna secca da ardere all'imposto	kg	4,3	0,04-0,06	0,01-0,014
Legna secca da ardere franco acquirente	kg	4,3	0,09-0,13	0,02-0,03
Cippato di legna (U =12-15%)	kg	4,3	0,04-0,05	0,01-0,012
Cippato da erbacee (U = 25)	kg	3,5	0,03-0,04	0,009-0,01
Pellet	kg	4,6	0,20-0,25	0,043-0,055

⁷⁷ I prezzi di riferimento per i prodotti petroliferi sono quelli diffusi dal Ministero delle Attività Produttive e sono calcolati alla data del 17 ottobre 2005.

3.3 Valutazione economica degli impianti energetici alimentati a biomassa

Le valutazioni di natura economica in merito all'impiego a fini energetici della biomassa possono essere effettuate stimando, a partire dal costo di investimento iniziale necessario a dotarsi dell'impianto e dai successivi costi annui di gestione e di alimentazione della caldaia al netto dei risparmi conseguibili dalla sostituzione dei combustibili tradizionali, i principali risultati economici e finanziari per la valutazione degli investimenti. Gli indici normalmente utilizzati sono il Valore Attuale Netto (VAN), il tempo di ritorno dell'investimento (o *payback*) e il tasso interno di rendimento.

PRINCIPALI INDICI ECONOMICI

Il **Valore Attuale Netto (VAN)** è uno strumento finanziario utilizzato per dare indicazioni sulla "bontà" di un investimento, ovvero sulla sua redditività. Il procedimento di calcolo del VAN tiene conto del costo del denaro (il tasso di interesse medio di mercato) e della durata dell'investimento e rappresenta, sinteticamente, il valore che hanno al momento attuale i flussi di cassa negativi (costi) e positivi (ricavi o risparmi) che si generano nel corso degli anni.

Il **Tempo di Ritorno dell'Investimento (TRI)** stima il numero degli anni necessari a far sì che i flussi di cassa netti generati dall'investimento (ovvero la differenza tra ricavi e costi annuali), coprano la somma investita.

Il **Tasso Interno di Rendimento (TIR)** è un altro criterio utilizzato per valutare la redditività di un investimento. Il TIR rappresenta il tasso che rende l'operazione equa, ovvero è il tasso al quale il valore attuale dei ricavi futuri equivale al valore attuale dei costi futuri. Per dare un giudizio sulla redditività dell'investimento è necessario confrontare il TIR con tassi di rendimento di investimenti alternativi, di uguale durata e livello di rischio.

A titolo di esempio si riportano nella tabella 36 i principali risultati economici stimati nell'ipotesi di realizzare una caldaia a cippato. I dati presi come riferimento sono quelli relativi all'impianto dimostrativo a cippato di legna realizzato presso un istituto scolastico sito a Monfalcone (GO) di cui si parla in modo maggiormente approfondito al paragrafo 6.1. Preme sottolineare che i dati esposti sono da intendersi come esempio puramente indicativo. La variabilità relativa ai costi d'impianto e spesso anche a quelli del combustibile (nel caso di combustibile autoprodotta, ad esempio, i costi da considerare dovrebbero essere

quelli di produzione e non quelli di mercato), nonché le economie di scala conseguibili con la taglia d'impianto, rendono appropriata un stima basata sui costi effettivi del singolo caso considerato.

Tabella 36 - Principali risultati economici stimati per una caldaia alimentata a cippato con una potenza nominale di 300 kW

Costo caldaia da 300 kW	€	56.000
Opere civili, elettriche e meccaniche	€	94.000
Costo installazione	€	10.000
IVA 10%	€	16.000
Totale investimento	€	176.000
Costi di gestione e manutenzione	€/anno	6.500
Costo combustibile	€/anno	7.500
Totale costi annuali	€/anno	14.000
Risparmio da non uso di combustibili fossili (gasolio)	€/anno	41.000
Totale risparmi annuali	€/anno	41.000
VAN (dopo 15 anni al tasso del 4%)	€	107.000
Tempo di ritorno dell'investimento	anni	7,5
Tasso Interno di Rendimento	%	11%

È riportato di seguito un esempio relativo alla produzione di energia termica ed elettrica impiegando oli vegetali in un motore cogenerativo. Nel caso esposto si ipotizza l'autoconsumo della produzione termica. La produzione elettrica viene in parte autoconsumata e in parte ceduta alla rete a un prezzo medio di 0,6 €/kWh. Il costo di acquisto del combustibile vegetale (olio di girasole e colza) è stato stimato pari a 0,55 €/l. La taglia d'impianto è tra le più piccole di quelle attualmente in commercio per questa tipologia di motori.

Tabella 37 - Principali risultati economici stimati per un impianto di cogenerazione alimentato a olio di girasole e colza con una potenza nominale elettrica di 5.300 kW_e

Costo motore da 5.300 kW _e	€	3.000.000
Opere accessorie e installazione	€	1.500.000
IVA 10%	€	450.000
Totale investimento	€	4.950.000
Costi di gestione e manutenzione	€/anno	200.000
Costo combustibile	€/anno	5.200.000
Totale costi annuali	€/anno	5.400.000
Risparmio di energia termica	€/anno	120.000
Risparmio di energia elettrica	€/anno	500.000
Cessione alla rete di energia elettrica	€/anno	2.050.000
Ricavi di vendita da Certificati Verdi	€/anno	4.100.000
Totale risparmi e ricavi annuali	€/anno	6.770.000
VAN (dopo 8 anni al tasso del 4%)	€	3.900.000
Tempo di ritorno dell'investimento	anni	4,5
Tasso Interno di Rendimento	%	17,5%

3.4 Principali strumenti d'incentivo

3.4.1 *Gli incentivi alla produzione di biomasse energetiche da colture dedicate*

Un importante strumento di sostegno alle colture energetiche dedicate è rappresentato dalla riforma della Politica Agricola Comunitaria (PAC): attraverso il suo più recente Regolamento 1782/2003/CE del 29 settembre 2003, si aprono infatti varie forme di incentivazione alla coltivazione di biomasse energetiche. Nel dettaglio, i principali strumenti di incentivazione sono i seguenti:

- *Coltivazione su terreni ritirati dalla produzione dei seminativi (set aside no-food)*: attualmente ai sensi dell'art. 55 del Regolamento 1782/2003 è stabilita l'esenzione dall'obbligo di ritiro dalla produzione, im-

sto dall'art. 54, quando le superfici sono destinate alla produzione di prodotti non destinati al consumo umano o animale. In questa categoria rientrano quindi anche le colture energetiche dedicate. Il Regolamento n. 1773/2004 (articoli dal 143 al 169) stabilisce le norme per l'uso delle superfici ritirate dalla produzione a scopo non alimentare. Le disposizioni specifiche riguardano l'obbligo dei contratti fra agricoltore e primo trasformatore, il versamento della cauzione, la definizione delle rese minime da ottenere, l'individuazione del sistema dei controlli. L'obbligo del contratto è superato se l'agricoltore utilizza le produzioni come combustibili all'interno della propria azienda agricola o come materia prima per la trasformazione in biocarburanti o per la produzione di biogas, quando la trasformazione avviene all'interno dell'azienda agricola stessa. L'obbligo inoltre non sussiste quando i terreni ritirati sono destinati alla coltivazione di specie contenute in un elenco fornito in allegato al Regolamento (rientrano ad esempio le SRF e il miscanto).

- *Regime di aiuto per le colture energetiche su terreni abbinati a diritti standard*: come da Regolamento 1782/2003 (articoli dal n. 88 al n. 92), disciplinato dal Regolamento 1773/2004 (capitolo 8, articoli dal 23 al 44). L'aiuto, fissato nella misura di 45 € per ettaro, ed entro una superficie massima garantita a livello comunitario pari a 1.500.000 ettari, è concesso alla produzione di colture energetiche, ovvero di prodotti destinati alla trasformazione in biocarburanti o di biomasse per la produzione di energia elettrica e termica. Il premio è concesso soltanto per le superfici la cui produzione è oggetto di un contratto stipulato tra l'agricoltore e l'industria di trasformazione, ad eccezione del caso in cui la trasformazione sia effettuata dall'agricoltore stesso all'interno dell'azienda. Le superfici che godono di questo incentivo non possono essere considerate ritirate dalla produzione, ossia non possono essere inserite tra le superfici a *set aside* (caso precedente).
- *Coltivazione con premio ai sensi dell'articolo 69 del Regolamento 1782/2003*: l'art. 69 del Regolamento 1782/2003 consente di trattenere fino al 10% degli aiuti e di utilizzare le risorse derivanti da questa operazione per sostenere tipi specifici di agricoltura che siano diretti alla tutela dell'ambiente e al miglioramento della qualità e della commercializzazione dei prodotti agricoli. Tale pagamento supplementare non è compatibile con l'aiuto per le colture energetiche o con l'aiuto per la messa a riposo, con o senza produzioni alimentari.

- *Contributi nell'ambito del Piano di Sviluppo Rurale*: a livello regionale, la politica agricola è regolamentata attraverso il Piano di Sviluppo Rurale (PSR). Esso si configura come un documento programmatico, emesso in attuazione del Regolamento 1257/1999/CE nell'ambito di Agenda 2000 e rappresenta uno strumento per l'attivazione di misure atte a sostenere la competitività delle imprese, lo sviluppo del territorio rurale, la salvaguardia e la valorizzazione delle risorse ambientali. Nell'ambito del PSR del Friuli Venezia Giulia, in vigore per il periodo 2000-2006, lo sviluppo delle colture energetiche rientra in due diverse misure:

- misura F (misure agroambientali), sottomisura F1 (diffusione di sistemi di produzione agricola a basso impatto ambientale), azione 2 (sensibile riduzione dell'impiego di concimi e fitofarmaci mediante l'introduzione delle colture da biomassa per la produzione di energia e per altri usi industriali). La misura si applica all'intero territorio regionale e la superficie minima di adesione è di un ettaro. L'aiuto è concesso per unità di SAU (superficie agricola utilizzata) ed è pari a 600 €/anno per ettaro. L'aiuto non può essere concesso su terreni ritirati dalla produzione;
- misura H (imboschimento delle superfici agricole), azione 4 (impianti di cloni selezionati, ecc. a ciclo breve). Tale misura prevede un sostegno finanziario per le spese di impianto. L'importo è commisurato ai costi effettivamente sostenuti dal beneficiario e non può eccedere i 5.000 €/anno per ettaro. Per il soggetto privato tale contributo è pari all'80% delle spese, mentre per il soggetto pubblico è pari al 100%.

3.4.2 *Gli incentivi ai biocarburanti*

Nel corso della trattazione è emerso come i costi di produzione dei biocarburanti siano elevati, soprattutto per quanto concerne le voci relative al reperimento della materia prima.

Per sopperire a questo fattore di ritardo il legislatore europeo ha promosso delle iniziative per incentivare sia la conversione agricola in direzione delle colture energetiche, sia la defiscalizzazione dei prodotti energetici di origine vegetale (bioetanolo, ETBE, biodiesel).

In materia di defiscalizzazione, la Direttiva 2003/96/CE del Consiglio del 27 ottobre 2003 ristruttura il quadro comunitario per la tassazione

dei prodotti energetici e dell'elettricità e modifica il quadro comunitario relativo alle accise sugli oli minerali, anche mediante l'abrogazione della Direttiva 92/81/CE, per consentire l'applicazione di aliquote ridotte sulle miscele contenenti biocombustibili.

La Legge Finanziaria 2005 (L. 311/2004) stabilisce per l'Italia l'esenzione totale dell'accisa per 200.000 tonnellate all'anno di biodiesel e l'allocatione di 219 milioni di euro per la riduzione dell'accisa per 350.000 tonnellate di bioetanolo in tre anni (2005-2007).

La defiscalizzazione dei biocarburanti costituisce uno strumento valido per incrementare la loro competitività, poiché le tasse incidono per percentuali rilevanti sul prezzo alla pompa dei carburanti.

La struttura del prezzo della benzina e del gasolio, rispetto alla situazione rilevata il 17 ottobre 2005.

	Benzina	Gasolio
Costo di produzione	0,548	0,600
Accisa	0,564	0,413
I.V.A. 20 %	0,222	0,203
Prezzo alla pompa	1,334	1,216

L'incentivo per la diffusione dei biocarburanti in contesto nazionale è funzionale al rispetto degli obiettivi che lo Stato italiano ha fissato per incrementare la presenza dei biocarburanti nel mercato dei carburanti nazionali (su indicazione della Direttiva 2003/30/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio dell'8 maggio 2003 sulla promozione dell'uso dei biocarburanti o di altri carburanti rinnovabili nei trasporti). Essa prevede che ogni Stato membro fissi i suoi obiettivi relativi alla quota di carburanti immessi sul mercato, che dovranno essere basati sui livelli di riferimento della Direttiva stessa, ossia 2% sul totale di carburanti (benzina e gasolio) immessi entro il 31 dicembre 2005 e 5,75% entro il 31 dicembre 2010.

Il D.Lgs. 128/05 ha recepito tale Direttiva e ha fissato gli obiettivi nazionali nei valori dell'1,0% al 31 dicembre 2005 e del 2,5% al dicembre 2010.

3.4.3 Gli incentivi alla produzione di energia elettrica: i certificati verdi

Il Decreto 79/99, che liberalizza il mercato dell'energia elettrica, introduce al contempo uno strumento di sostegno alle fonti rinnovabili imponendo, a carico di produttori e importatori di energia elettrica, l'obbligo di immettere nella rete una quota di energia prodotta da fonti rinnovabili e concedendo la precedenza al dispacciamento dell'energia prodotta da impianti che utilizzano tali fonti e l'assoluta priorità nelle piccole reti isolate. In particolare l'obbligo è rivolto a produttori e/o importatori di energia elettrica da fonti fossili i quali devono garantire l'immissione nella rete di una quota di energia da fonti rinnovabili, inizialmente fissata pari al 2%, dell'energia prodotta e/o importata, al netto della cogenerazione, degli autoconsumi di centrale e delle esportazioni, per quote eccedenti i 100 GWh annui. Successivamente, con D.Lgs n. 387 del 29/12/2003, è stato previsto un incremento della quota obbligatoria dello 0,35% annuo a decorrere dal 2004 e fino al 2006. Tale obbligo può essere soddisfatto mediante autoproduzione oppure acquistando i relativi diritti da altri operatori.

Il decreto introduce lo strumento dei "certificati verdi" quali attestati dell'avvenuta produzione di energia da fonti rinnovabili in impianti entrati in esercizio o potenziati, limitatamente alla producibilità aggiuntiva, in data successiva all'entrata in vigore del decreto stesso. Ogni certificato verde attesta la produzione di 50 MWh elettrici da fonti rinnovabili (come da Legge n. 239 del 23/08/2004); è questa, attualmente, la taglia minima di produzione che dà diritto al certificato verde.

I certificati sono liberamente negoziabili in un sistema di mercato, dove la domanda è costituita dall'obbligo introdotto dal D.Lgs. 79/99, mentre l'offerta è rappresentata dai certificati emessi a favore di impianti privati che hanno ottenuto la qualificazione dal Gestore della rete (GRTN). Per l'anno 2002 il valore della domanda è stato di 3,3 TWh, riferita a 35 operatori soggetti a quest'obbligo, mentre l'offerta è stata di circa 1,2 TWh. Per l'anno 2003, il valore della domanda è cresciuto a 3,46 TWh, riferita a 42 operatori, mentre l'offerta è cresciuta a 1,3 TWh. Per l'anno 2004 il valore della domanda è stato pari a 3,89 TWh, mentre l'offerta è stata di 2,89 TWh.

La domanda residuale è coperta annualmente dal GRTN che emette certificati propri. Il prezzo al quale il GRTN offre i propri certificati verdi rappresenta il valore di riferimento per il mercato. Tale prezzo per l'anno 2005 è stato pari a 10,892 EuroCent/kWh.

3.4.4 Altri strumenti: la leva fiscale

Con Legge 449/1997 e successive leggi finanziarie sono state introdotte alcune agevolazioni fiscali a favore degli interventi volti al risparmio energetico e all'impiego delle fonti rinnovabili di energia.

In particolare, la detrazione fiscale spettante per gli interventi di recupero del patrimonio edilizio, in misura pari al 41% (come da finanziaria 2006) degli importi a carico del contribuente, da ripartire in dieci quote annuali di pari importo, spetta anche per gli interventi inerenti l'installazione di impianti di riscaldamento a uso civile alimentati a biomassa, purché con un rendimento superiore al 70%. La detrazione si applica sulla quota effettivamente a carico del contribuente, quindi sulla somma effettivamente versata per l'acquisto degli impianti al netto dell'eventuale contributo in conto capitale usufruito.

È stato inoltre previsto l'assoggettamento del costo degli impianti a un'aliquota IVA agevolata, pari al 10%.

²² Piano Nazionale per la riduzione delle emissioni di gas responsabili dell'effetto serra, 2002.

Capitolo 4

Aspetti ambientali

4.1 La riduzione delle emissioni in atmosfera

Il principale beneficio di carattere ambientale derivante dall'impiego delle biomasse a fini energetici è connesso alla sostituzione delle fonti fossili con fonti rinnovabili. Ciò si ripercuote sia in termini di riduzione dell'impiego di fonti che per loro natura sono esauribili, sia in termini di riduzione delle emissioni inquinanti prodotte dal processo di combustione. La combustione di prodotti petroliferi libera infatti nell'atmosfera l'anidride carbonica immagazzinata nei tessuti vegetali miliardi di anni fa, con un riflesso immediato sull'aumento della concentrazione di gas serra e di altri inquinanti inquinanti quali ad esempio gli ossidi di azoto e di zolfo, polveri, ecc. Sebbene anche la combustione delle biomasse generi emissioni inquinanti in atmosfera, in linea generale, esse sono meno pericolose ed emesse in minore quantità rispetto a quelle generate dalla combustione delle fonti fossili.

Per tale motivo le biomasse sono state indicate come una delle possibili strategie per la mitigazione dei cambiamenti climatici in atto e, più in generale, per la riduzione degli impatti ambientali connessi all'impiego delle fonti energetiche di origine fossile.

GLI EFFETTI SULL'UOMO E SULL'AMBIENTE PROVOCATI DAI PRINCIPALI INQUINANTI ATMOSFERICI

Anidride carbonica: è innocua per l'uomo ma la variazione della sua concentrazione in atmosfera provoca danni all'ambiente in quanto influenza notevolmente l'effetto serra. La presenza di gas serra nell'atmosfera terrestre consente la filtrazione di parte delle radiazioni solari dirette verso la terra e, al contempo, ostacola la dispersione di parte delle radiazioni che una volta assorbite dalla superficie terrestre vengono riemesse sotto forma di raggi infrarossi (calore) verso lo spazio.

Ciò consente il mantenimento del clima terrestre entro valori che permettono la vita. Una variazione della composizione atmosferica per effetto dell'aumento della concentrazione dei gas serra ostacola però eccessivamente il riverbero di calore verso lo spazio, provocando in tal modo un continuo innalzamento della temperatura della terra.

Ossidi di azoto: l'ossido di azoto (NO) e il biossido d'azoto (NO₂) sono le specie presenti in concentrazioni più elevate. Si originano dalla reazione dell'azoto contenuto nei combustibili fossili con l'ossigeno atmosferico quando si raggiungono temperature elevate. Il biossido d'azoto presente in atmosfera può essere ossidato ad acido nitrico (HNO₃), composto quest'ultimo piuttosto volatile e solubile nelle nuvole e nella pioggia. Tale composto può dare luogo al fenomeno delle "piogge acide" con conseguenze negative a danno, soprattutto, della vegetazione (danni all'apparato fogliare, rallentamento del processo di fotosintesi) e dei manufatti (corrosione di alcuni materiali, in particolare quelli da costruzione, con alto contenuto di calcare, marmo, ecc.).

Anidride solforosa: il biossido di zolfo o anidride solforosa è riconosciuto come pericoloso inquinante dell'atmosfera urbana. Viene originato nei processi di combustione dall'ossidazione di materiali contenenti zolfo (es. prodotti petroliferi). È pericoloso per l'uomo in quanto irritante delle vie respiratorie. Produce inoltre danni alla vegetazione (defoliazione e inaridimento). È inoltre responsabile del fenomeno delle piogge acide.

Polveri sospese: sono date dall'insieme delle particelle solide o liquide sospese nell'aria, le cui dimensioni possono variare da pochi angstrom a qualche centinaio di micron. La pericolosità delle polveri è legata, oltre che all'occlusione delle vie respiratorie, alla possibile presenza di microinquinanti che possono essere tossici o cancerogeni (ad esempio gli idrocarburi policiclici aromatici, amianto, alcuni metalli pesanti). Gli effetti sulla salute umana dipendono dalla dimensione e dalla composizione chimica delle particelle inalate o ingerite. Sono particolarmente dannose le PM10, ovvero le particelle con dimensione inferiore a 10 micron, che rappresentano la frazione inalabile.

Composti organici volatili: comprendono diversi elementi caratterizzati da natura organica (cioè contenenti carbonio) e volatilità. Vi fanno parte migliaia di elementi che, a seconda della struttura, possono essere suddivisi in ciclici o aciclici e aromatici. Dal punto di vista degli effetti sulla salute, gli idrocarburi aromatici sono i più pericolosi. Tra questi il più importante è il benzene, che, a seconda della dose assunta, può provocare un'intossicazione acuta e anche la morte, oltre ad avere effetti cancerogeni. Sono pericolosi per la salute umana anche gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA), formati da uno o più anelli benzenici, i quali hanno un forte effetto cancerogeno.

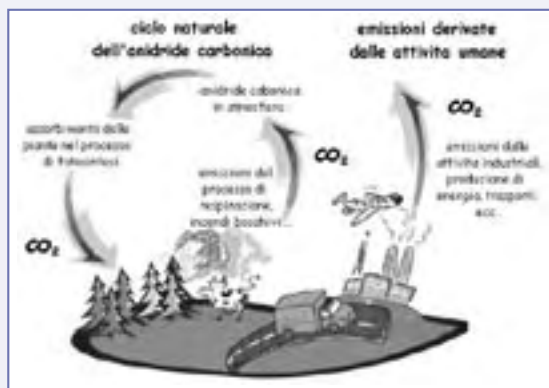
4.1.1 Il bilancio delle emissioni di anidride carbonica (CO₂)

Le biomasse sono fonti energetiche considerate neutrali ai fini dell'effetto serra in quanto la loro combustione non comporta un incremento della concentrazione atmosferica di anidride carbonica. Il ciclo della CO₂, infatti è chiuso poiché le quantità di anidride carbonica emessa in fase di combustione equivale a quella assorbita dai vegetali durante il processo di crescita.

IL RUOLO DELLE BIOMASSE NELLA RIDUZIONE DELL'ANIDRIDE CARBONICA

Le biomasse possono contribuire alla mitigazione degli effetti dell'aumento della concentrazione di anidride carbonica (CO₂) in atmosfera in due modi:

- Immobilizzazione della CO₂ atmosferica nei tessuti. Le biomasse contribuiscono alla sottrazione dell'anidride carbonica atmosferica e alla fissazione del carbonio nei tessuti vegetali, sia negli apparati epigei (tronchi, steli, foglie, ecc.), sia negli apparati ipogei (apparati radicali annuali o perennanti, ecc.) per effetto del processo di fotosintesi clorofilliana.
- Sostituendo le fonti fossili nella produzione di energia. L'anidride carbonica rilasciata nella combustione è nuovamente fissata dalla biomassa in fase di crescita. Il ciclo dell'anidride carbonica si chiude però solo se il ritmo di impiego della vegetazione non supera la capacità di ricrescere della stessa.



Il ciclo dell'anidride carbonica⁷⁸

⁷⁸ Tratto da: www.ekes.org

Il bilancio della CO₂, tuttavia non è nullo se si considera l'intero ciclo di vita dei combustibili da biomassa, indipendentemente da quale sia il comparto di provenienza. Va rilevato infatti che le fasi di produzione, di lavorazione e di trasporto delle biomasse sono spesso responsabili di impatti negativi sull'ambiente determinati da consumi di energia e materie necessari a sostenere i processi.

Le emissioni generate nelle fasi di produzione della materia prima sono maggiori nelle filiere delle biomasse da colture dedicate, seguite dai residui forestali e, per finire, dai residui agricoli e da quelli industriali. Nel primo caso le principali fonti di emissione sono determinate dall'impiego dei mezzi agricoli (macchine per la lavorazione del terreno, ecc.) e dall'eventuale impiego di fertilizzanti, diserbanti, ecc.: tali emissioni possono essere minimizzate adottando pratiche agricole poco invasive e scegliendo le specie vegetali più adatte alle condizioni pedoclimatiche locali. Per quanto concerne invece la filiera delle biomasse forestali i principali fattori di emissione sono rappresentati dalle macchine impiegate nelle fasi di taglio, allestimento (sramatura, depezzatura, scortecciatura, ecc...), concentramento (trasporto della biomassa lungo vie attrezzate fino al punto di raccolta per il trasferimento fuori foresta) ed esbosco.

Le fasi di trasformazione della biomassa a cui si riconducono i maggiori consumi energetici (e le maggiori emissioni in atmosfera) sono quelle connesse all'essiccazione della biomassa (filiera produttiva del pellet e dei bricchetti). Il consumo energetico, e quindi la quantità di emissioni, è funzione del grado di umidità della biomassa in ingresso, delle tecnologie adottate (vedi paragrafo 3.1.1) e della fonte energetica impiegata (l'impatto è massimo nell'ipotesi di impiegare energia elettrica e minimo nel caso in cui si utilizzino residui di lavorazione delle biomasse stesse). È piuttosto complessa ed energivora anche la produzione di biocarburanti, sia bioetanolo che biodiesel.

Una fase comune a tutte le filiere che può presentare un impatto anche molto rilevante sull'ambiente è quella del trasporto della biomassa: la densità della biomassa trasportata, la modalità di trasporto, le capacità dei singoli mezzi e la distanza tra il luogo di produzione e il sito di trasformazione e/o combustione incidono sulla percorrenza media dei mezzi e sul numero di viaggi e quindi, indirettamente, sulla quantità di emissioni rilasciate in atmosfera. Da qui la necessità di sostenere lo sviluppo di filiere locali in grado di produrre, trasformare e consumare la biomassa in ambiti territoriali quanto più circoscritti.

Nella tabella 38 è riassunto il bilancio delle emissioni di anidride carbonica delle principali filiere produttive dei combustibili da biomassa. Le emissioni evitate sono state stimate in funzione del combustibile fossile sostituito (carbone, gasolio, metano) tenendo conto dei rispettivi poteri calorifici.

Tabella 38 - Emissioni di anidride carbonica evitate e prodotte [$\text{t CO}_2/\text{m}^3$] per le principali filiere dei combustibili da biomassa

	Emissioni evitate	Emissioni prodotte	Bilancio medio
Biomassa legnosa	kg CO_2/m^3	kg CO_2/m^3	kg CO_2/m^3
Tronchetti	450-750	40-55	400-700
Cippato (essiccato all'aria)	200-350	25-35	170-320
Pellet e bricchetti	650-1100	90-95	560-1000
Residui agricoli	kg CO_2/ha	kg CO_2/ha	kg CO_2/ha
Paglia cereali autunno-vernini	300-1100	20-75	350-1050
Stocchi, tutoli e brattee di mais	800-1600	50-110	720-1520
Paglia di riso	300-850	25-65	250-800
Sottoprodotti di colture arboree da frutto	1200-6000	15-60	1250-5950
Biomasse lignocellulosiche da colture dedicate	kg CO_2/ha	kg CO_2/ha	kg CO_2/ha
Sorgo da fibra	22.000-50.000	700-1800	20.000-48.000
Kenaf	10.000-35.000	700-1600	9.000-34.000
Miscanto	17.000-58.000	500-1500	16.000-57.000
Canna comune	16.000-66.000	500-1500	15.000-65.000
Panico	11.000-50.000	500-1500	10.000-49.000
Pioppo	11.000-28.000	500-1500	10.000-27.000
Biocarburanti	kg CO_2/kg biocarburante	kg CO_2/kg biocarburante	kg CO_2/kg biocarburante
Bioetanolo da amilacee	2	0,5-1,1	0,9-1,5
Bioetanolo da saccarifere (barbabietola)	2	0,4-1,1	0,9-1,6
Biodiesel da girasole	2,7	1,2-1,5	1,2-1,5
Biodiesel da colza	2,7	0,8-2,4	0,3-0,9

4.1.2 *Confronto tra le emissioni inquinanti dei principali combustibili di origine vegetale e fossile*

Il bioetanolo

L'utilizzo del bioetanolo in autotrazione, puro o in miscela con la benzina, favorisce il miglioramento delle emissioni in atmosfera generate dal traffico veicolare in quanto riduce la quantità dei gas inquinanti emessi. La migliore qualità delle emissioni è legata alla maggiore presenza di ossigeno nella composizione chimica del bioetanolo, pari al 34,7% in peso, rispetto alla benzina. L'ossigeno permette una combustione completa del carburante, con evidenti riflessi sulla quantità dei composti incombusti, oltre che nella durata media dei motori.

In via generale la riduzione delle emissioni aumenta all'aumentare della percentuale di bioetanolo in miscela con la benzina. In alcuni casi però la riduzione delle emissioni aumenta in modo più che proporzionale. Il monossido di carbonio, ad esempio, fa registrare delle rimozioni nelle emissioni in atmosfera tanto più importanti quanto maggiore è la presenza del bioetanolo nella miscela. Di segno contrario è la tendenza relativa alle emissioni degli ossidi di azoto (NO_x), che aumentano all'aumentare della presenza di ossigeno nel carburante⁷⁹.

È emerso infatti che l'utilizzo del bioetanolo, proprio a causa del maggiore tenore di ossigeno, sia responsabile talora di un aumento delle emissioni di alcuni gas inquinanti quali gli ossidi di azoto e l'acetaldeide. Le emissioni di ossidi di azoto si ritiene possano essere ridotte, già entro i prossimi 15 anni, introducendo miglioramenti nell'abbattimento catalitico. La presenza dell'acetaldeide, composto cancerogeno, è tollerata anche se in elevate concentrazioni (l'incremento raggiunge valori fino al 400% per miscele e al 35% con la benzina⁸⁰) poiché tale composto è caratterizzato da un potere cancerogeno da 10 a 60 volte inferiore rispetto a quello dei principali inquinati originati dalla combustione dei prodotti di origine fossile⁸¹, quali ad esempio il benzene.

Anche l'utilizzo del bioetanolo come antidetonante (ETBE), in sostituzione al benzene o all'MTBE, contribuisce a ridurre le emissioni in

⁷⁹ Natural Resources Defence Council (NRDC) "Growing energy", Dic. 2004.

⁸⁰ US Department of Energy (DOE) - National Renewable Energy Laboratory.

⁸¹ Natural Resources Defence Council (NRDC) "Growing energy", Dic. 2004.

atmosfera di alcuni pericolosi inquinanti. A titolo di esempio, sono esposte nella tabella 39 le variazioni percentuali nelle emissioni atmosferiche nell'ipotesi di utilizzare il bioetanolo in miscela al 5,5% con la benzina e l'ETBE in sostituzione dei normali antidetonanti in percentuale pari al 15%.

Tabella 39 - Variazioni percentuali di alcune emissioni inquinanti nell'uso del bioetanolo o dell'ETBE rispetto alla benzina

	Bioetanolo in miscela al 5,5%	ETBE in percentuale al 15%
Inquinante	Variazione	Variazione
Monossido di carbonio	- 10%	- 3%
Composti organici volatili	- 5%	- 7%
Ozono	nr	- 20%
Benzene	- 25%	- 28%
Butadiene	- 11%	- 14%
Formaldeide	+ 2%	+ 29%
Acetaldeide	+ 67%	+ 21%

nr = dato non riportato

Il biodiesel

Anche il consumo di biodiesel, analogamente a quanto riportato per il bioetanolo, può contribuire a ridurre l'impatto ambientale, soprattutto in ambito urbano, legato all'uso dei veicoli. In considerazione di un contenuto in ossigeno (11% in peso) più elevato di quello del gasolio, il biodiesel è soggetto infatti a una combustione migliore alla quale sono associate ridotte emissioni di monossido di carbonio, di particolato e di idrocarburi incombusti. Le riduzioni dei principali inquinanti sono migliori adottando alcuni accorgimenti nelle caratteristiche costruttive dei motori: le emissioni di monossido di carbonio, ad esempio, sono più accentuate nei motori a combustione diretta (40% rispetto al 15-20% dei motori a iniezione indiretta); le emissioni di particolato nei gas di scarico sono correlate al regime di rotazione e sono minori nei regimi alti rispetto a quelli bassi⁸². Le emissioni di

⁸² US Department of Energy (DOE) - National Renewable Energy Laboratory.

ossidi di zolfo, infine, vengono del tutto evitate in quanto la materia prima non contiene composti solforati.

Contrastanti sono gli effetti relativi agli idrocarburi: si riducono infatti le emissioni di idrocarburi monociclici aromatici (dal 20 all'80%), di idrocarburi policiclici aromatici (fino al 98%) e di acetaldeide (tra il 20 e il 40%) mentre aumentano quelle degli idrocarburi a catena corta (tra il 10 e il 20%). Gli ossidi di azoto presentano invece aumenti variabili tra il 5 e il 23%⁸³. I gas di scarico dei motori alimentati a biodiesel, inoltre, evidenziano un odore caratteristico, attribuito alla presenza dell'acroleina.

Nella tabella 40 sono sintetizzati i valori relativi alle variazioni dei principali gas inquinanti nella combustione del biodiesel, puro o in miscela, rispetto al gasolio.

Tabella 40 - Variazione percentuale di alcune emissioni atmosferiche rispetto al gasolio⁸⁴

Inquinante	Riduzione	
	Biodiesel al 100%	Biodiesel al 20%
Monossido di carbonio	- 42,3%	- 12,6%
Particolato	- 55,4%	- 18,0%
Idrocarburi incombusti	- 56,3%	- 11,0%

Il biogas

Come accennato, l'utilizzo del biogas prodotto dalla digestione anaerobica a fini energetici permette di ridurre le emissioni atmosferiche connesse all'impiego delle fonti fossili. Nella tabella 41 è riportato il confronto tra le emissioni generate da diversi combustibili per unità di energia prodotta.

Tabella 41 - Confronto tra le principali emissioni del biogas rispetto ai principali combustibili fossili

	SO ₂ [kg/TJ]	NO _x [kg/TJ]	Polveri [kg/TJ]
Oli minerali	140	90	20
Gas	3	90	2
Carbone minerale	300	150	20
Biogas	3	50	3

⁸³ www.cti2000.it/biodiesel.html

⁸⁴ US Department of Energy (DOE) - National Renewable Energy Laboratory.

4.2 Altri benefici ambientali

È importante sottolineare che l'impiego a fini energetici della biomassa generalmente si accompagna a ulteriori benefici ambientali connessi alla realizzazione di una filiera di produzione e impiego che dispiega i suoi effetti positivi anche sui comparti di provenienza della materia prima (ad esempio lo sfruttamento delle biomasse dedicate contribuisce all'economia delle zone rurali) o sulle componenti ambientali correlate (ad esempio la produzione di biomasse da colture dedicate può contribuire al miglioramento della qualità dei suoli). Per quanto riguarda le **biomasse forestali**, ad esempio, una corretta gestione del bosco garantisce il mantenimento delle principali funzioni di questo ecosistema quali ad esempio la funzione di protezione (il bosco stabilizza il terreno e la neve, regola il regime idrico riducendo i rischi idrogeologici, ecc...), la funzione ricreativa (il bosco fornisce zone adatte al tempo libero nonché conferisce qualità al paesaggio) e la funzione di produzione (il bosco viene normalmente utilizzato per ricavare legname da opera, per usi energetici o per altri usi privati). Le operazioni di esbosco, quali il diradamento delle fustaie o il taglio delle formazioni boschive a ceduo, possono inoltre contribuire alla riduzione del rischio di eventi dannosi per l'ecosistema forestale quali ad esempio gli incendi boschivi, le infestazioni di insetti, ecc...

Lo sfruttamento energetico delle **culture dedicate** presenta positivi risvolti agroecologici. Lo sviluppo di tali colture può dispiegare benefici effetti sull'inquinamento dei suoli e delle falde acquifere in quanto tali colture, rispetto a quelle alimentari, presentano minori fabbisogni di fertilizzanti, diserbanti, ecc.; può contribuire alla conservazione del suolo e alla riduzione dei fenomeni di erosione superficiale grazie alle azioni di copertura del terreno dall'azione battente della pioggia e di trattenimento del suolo grazie agli apparati radicali; può favorire il miglioramento della qualità paesaggistica dei territori rurali introducendo una diversificazione colturale. Non è infine da dimenticare il ruolo che queste colture possono svolgere per il mondo agricolo che può trovare nuove opportunità di reddito.

Lo sfruttamento dei prodotti della digestione anaerobica rappresenta un'opportunità di rilievo non solo perché orientata all'ottenimento di una fonte energetica rinnovabile (**il biogas**) ma, più in generale, perché volta a garantire la corretta gestione agronomica dei liquami zootecnici. È sufficiente pensare che l'impatto ambientale generato dallo spandimento dei reflui provenienti dagli allevamenti zootecnici intensivi⁸⁵ negli anni si è accentuato in relazione alla

maggiore concentrazione degli allevamenti e al modificato uso del suolo. Il processo di digestione anaerobica favorisce invece la stabilizzazione dei liquami dovuta alla mineralizzazione della sostanza organica, la riduzione della carica patogena, la riduzione delle sostanze fitotossiche nonché l'abbattimento degli odori. Inoltre, più in generale, si ha un miglioramento delle proprietà fertilizzanti del materiale digerito grazie alla riduzione del rapporto C/N e alla maggior presenza di azoto ammoniacale prontamente disponibile per la nutrizione delle piante, un miglioramento delle caratteristiche del suolo per l'incremento o la stabilizzazione dell'humus presente, una riduzione del volume dei fanghi prodotti (dal 50 al 75%) e una riduzione di uso del suolo rispetto a sistemi di tipo aerobico convenzionali.

Oltre a ciò la captazione del biogas e la sua utilizzazione a fini energetici consente di ridurre le emissioni in atmosfera di metano (CH_4) che, come noto, ha un'incidenza sull'effetto serra 21 volte superiore a quello dell'anidride carbonica: premesso che vengano minimizzate le perdite in metano nella fase di stoccaggio (ad es. dotando di copertura la vasca di accumulo), la riduzione è stata stimata in oltre il 50%, rispetto alle emissioni che si originano da una gestione convenzionale dei liquami (stoccaggio senza copertura e spandimento agronomico).

4.3 Il bilancio energetico dei combustibili da biomassa

Ai fini di valutare la sostenibilità dal punto di vista energetico dell'impiego delle biomasse in sostituzione ai combustibili fossili, ovvero la capacità delle stesse di fornire più energia di quanta spesa per la loro produzione, trasformazione e trasporto, è importante analizzare il bilancio energetico delle diverse filiere. Un indicatore spesso utilizzato è il rapporto tra l'*output* energetico, ovvero l'energia resa dal combustibile da biomassa, e l'*input* energetico, ovvero l'energia consumata nel ciclo produttivo dello stesso. Tale rapporto pone in evidenza infatti la capacità del biocombustibile di "ripagare" l'energia spesa per ottenerlo.

⁸⁵ Se si confronta con un refluo di tipo urbano, un liquame zootecnico genera un refluo molto più concentrato; un liquame suinicolo ad esempio produce un inquinamento pari a circa 3 abitanti equivalenti.

Tabella 42 - Rapporto tra energia resa ed energia risparmiata nella filiera delle biomasse energetiche

	Energia resa/energia consumata
Biomassa legnosa	
Tronchetti	8-8,7
Cippato (essiccato all'aria)	7,8-8,3
Pellet e bricchetti	13-15,4
Residui agricoli	
Paglia cereali, stocchi, tutoli e brattee di mais	18
Cippato da biomasse dedicate	
Erbacee annuali	7-8
Erbacee poliennali	10-11,5
Legnose	7-9,5
Pellet da biomasse dedicate	
Erbacee annuali	3,5-6
Erbacee poliennali	4-8,5
Legnose	3-5
Biocarburanti	
Bioetanolo da amilacee	1,2-3,7
Bioetanolo da saccarifere (barbabietola)	1-1,7
ETBE da barbabietola	1,3
Biodiesel da girasole	2,3
Biodiesel da colza	2,4
Biogas	2-3

Capitolo 5

Esempi applicativi di utilizzo delle biomasse a fini energetici

5.1 Centrale termica a cippato di legna a servizio dell'Istituto Scolastico IPSSC di via Baden Powell, nel comune di Monfalcone (GO)

L'intervento, realizzato nel comune di Monfalcone (GO) nell'ambito delle attività di studio e sperimentazione del Programma Nazionale Biocombustibili (PROBIO), ha previsto la trasformazione di una centrale termica alimentata a gasolio, a servizio di un complesso scolastico di proprietà della Provincia di Gorizia, in una innovativa caldaia alimentata a cippato di legna della potenza di 300 kW.

L'istituto interessato dall'intervento è l'I.P.S.S.C. di via Baden Powell, Monfalcone (GO).

Scheda tecnica dell'edificio

Indirizzo:	Via Baden Powell, Monfalcone
Proprietario:	Provincia di Gorizia
Destinazione d'uso:	Edificio scolastico, scuola secondaria
Descrizione edificio:	Edificio risalente agli anni '70, su due livelli fuori terra, con tetto piano, vetrate a nastro, pareti in pannelli prefabbricati in calcestruzzo, tetto piano
Dimensioni:	Superficie in pianta: 1.450 m ²
Volumetria riscaldata:	10.585 m ³

Scheda dell'impianto di riscaldamento in uso prima dell'intervento

Centrale termica (CT): Corpo di fabbrica separato, annesso alla palestra con una caldaia a gasolio Belleli PR I, potenza termica resa 349 kW, potenza al focolare 387 kW

Uso: Solo riscaldamento invernale

Dimensioni CT: 5,9 m x 7,3 m x h 3,3 m

Distribuzione: Tubazioni interrato attraverso il cortile, distribuzione interna all'edificio parte sotto traccia, parte a vista, insolazioni non ottimali

Terminali: In corso di sostituzione, nuovi corpi scaldanti ventilconvettori, in parte radiatori

5.1.1 Dimensionamento della caldaia a biomassa

Le problematiche di dimensionamento principali sono state le seguenti:

- stima dei fabbisogni energetici dell'edificio;
- calcolo della potenza massima necessaria alle condizioni di progetto della potenza media;
- adozione di soluzioni realizzative compatibili con gli spazi e i volumi esistenti.

I fabbisogni termici dell'edificio sono stati stimati sulla base dei consumi medi annui registrati negli ultimi anni antecedenti l'intervento: la centrale termica a gasolio negli ultimi tre anni ha registrato consumi medi di gasolio compresi tra 30.000 e 40.000 litri anno, con un orario di funzionamento di 10 ore al giorno, con punte di 12 ore.

Sulla base del fabbisogno termico stimato la potenza media prelevata dalla centrale termica è risultata di poco inferiore ai 200 kW mentre la potenza massima alle condizioni di progetto è stata calcolata in 320 kW, con funzionamento intermittente. Per tale motivo è stato scelto un generatore di calore di potenza resa nominale da 300 kW, con possibilità di modulazione della potenza da 80 a 300 kW.

L'eventuale modesto deficit di potenza massima rispetto ai valori calcolati è gestito eliminando l'intermittenza nei periodi più freddi e

mantenendo un bruciatore a gasolio anche con funzioni di sicurezza. Per limitare ulteriormente i pendolamenti di funzionamento (problemi dovuti allo spegnimento e alla riaccensione del combustibile, messa a regime della combustione, ecc.), è stato inserito un volano termico costituito da un serbatoio d'accumulo da 3.000 litri che consente di assorbire il calore prodotto in circa 15 minuti di funzionamento alla potenza minima.

5.1.2 Caratteristiche costruttive e schema di funzionamento della caldaia

La caldaia scelta per l'intervento è una caldaia a cippato di legna a funzionamento automatico regolato da specifico quadro elettrico a microprocessore. La caldaia è composta dal corpo con camera di combustione rotativa ad asse orizzontale, con funzione di depolveratore, scambiatore di calore a tubi di fumo, ventilatore soffiante d'estrazione fumi dalla caldaia.

Il combustibile viene fatto affluire da una coclea primaria con dispositivi d'arresto e di sicurezza, quale la valvola di spegnimento con iniezioni d'acqua e la farfalla automatica; nella coclea primaria è incorporato un dispositivo a flusso d'aria calda per il pre-riscaldamento e la modesta deumidificazione del combustibile.

La combustione del cippato avviene in due fasi: nella prima si ha l'ignizione del combustibile solido, una prima combustione, con trasformazione del materiale legnoso in gas ancora combustibili, CO, e con la produzione di ceneri e residui solidi; nella seconda parte della combustione si ha l'ossidazione più completa possibile dei gas precedentemente sviluppati. Alla fine del processo i fumi, già depurati delle polveri e della cenere, vengono espulsi dal ventilatore soffiante che li immette nel camino.

La combustione primaria avviene in una apposita cassetta di combustione con griglia di combustione oscillante; sotto quest'ultima si trova la griglia di raccolta ceneri e l'accenditore automatico a resistenza elettrica. Dalla camera di combustione primaria il gas sviluppato passa alla camera di combustione rotativa, posta superiormente; qui, grazie all'apporto controllato di aria comburente secondaria, avviene la combustione completa dei prodotti della gassificazione. Al termine di questa si attua l'abbattimento delle polveri per iniezione e forza centrifuga. I fumi caldi di risulta attraversano lo scambiatore di calore principale e vengono estratti forzatamente dalla soffiante fumi.

Il generatore di calore è caratterizzato da un consistente volume d'acqua, pari a circa 900 litri, di molto superiore a quello di una caldaia a combustibili fossili, liquidi o gassosi.

All'interno del volume d'acqua dello scambiatore principale è inserito lo scambiatore d'emergenza a serpentino che interviene in caso di sovratemperatura dell'acqua di caldaia; tale scambiatore è alimentato da acqua di acquedotto a perdere, azionata da una valvola termostatica di scarico termico con bulbo immerso nel corpo caldaia.

La caldaia è inoltre corredata di un quadro di comando e controllo, con microprocessore, a cui sono collegati i motori ausiliari, i sensori, i dispositivi di controllo e di sicurezza.

Visto che era già disponibile, si è deciso di utilizzare uno dei due bruciatori a gasolio preesistenti quale sistema ausiliario in grado di garantire una sorgente energetica alternativa in caso di indisponibilità del cippato a causa di un mancato approvvigionamento o a causa di disservizi del sistema di deposito e alimentazione.

5.1.3 Circuiti e dispositivi di sicurezza

I dispositivi di sicurezza adottati sono i seguenti: valvole di sicurezza con pressione di taratura 3 bar presso stato di sicurezza, doppio termostato di esercizio e sicurezza a riarmo manuale, circuito idraulico di raffreddamento d'emergenza alimentato da acqua d'acquedotto e comandato da valvola di scarico termico.

Per la sicurezza nei confronti della propagazione dell'incendio sono installati due dispositivi sulla coclea d'alimentazione combustibile: un secondo blocco combustibile e tagliafuoco a comando automatico termostatico, iniezione d'acqua a caduta nel meccanismo di alimentazione proveniente da serbatoio indipendente e comandata da valvole di scarico termico.

I circuiti idraulici sono caratterizzati da alcune peculiarità, per cui questo tipo di impianti differiscono dagli equivalenti serviti da caldaie a gas o a gasolio: vi è una divisione tra circuito primario di caldaia e circuiti secondari di alimentazione delle utenze termiche e il punto di scambio tra primario e secondario è dato dal serbatoio di accumulo termico. Sul circuito primario è inserita una valvola a tre vie che assicura sempre il mantenimento in temperatura del corpo caldaia: in caso di ritorno troppo freddo dall'impianto questa valvola limita la portata dall'impianto e tende a ricircolare l'acqua in caldaia; grazie a questo dispositivo vengono evitati sia shock termici allo

scambiatore che riduzioni troppo marcate della temperatura dei fumi, che porterebbero a fenomeni di condensa indesiderati.

La caldaia funziona con una impostazione di temperatura a punto fisso per ottimizzare la combustione; vi è però una regolazione dell'aduzione di combustibile, pilotata dal microprocessore, che consente di modulare la potenza generata secondo le esigenze del carico.

La regolazione climatica è affidata ai circuiti secondari che sono dotati di valvole miscelatrici a tre vie, comandate da regolatori climatici.

5.1.4 Caratteristiche e dimensionamento del deposito di cippato

Sulla base dei consumi energetici medi stagionali è stato stimato un fabbisogno annuo di 150 t di legna sotto forma di cippato, corrispondenti a circa 300 m³. L'incertezza relativamente alle caratteristiche del combustibile approvvigionato ha sconsigliato l'adozione di un silo troppo capiente, a causa dei fenomeni di fermentazione che si possono innescare della possibile formazione di blocchi e la conseguente difficoltà di movimentazione del cippato in caso di stoccaggi troppo prolungati.

Ci si è perciò orientati su una autonomia compresa tra 15 e 30 giorni, in funzione delle diverse condizioni climatiche invernali. La capacità utile prescelta, di circa 60 m³, corrisponde grosso modo alla capienza di due trasporti su autocarro.

È stato realizzato un deposito seminterrato in calcestruzzo con una sporgenza dal terreno inferiore al metro e una profondità sotto il piano di campagna non superiore ai 2 metri.

Il deposito è dotato di un doppio rastrello di movimentazione del cippato che aumenta la velocità di trasporto e la sistemazione all'interno del silo. Qualora si fosse impiegato il consueto rastrello singolo vi sarebbero state difficoltà nel distribuire il carico anche di soli 20 sec in un tempo ragionevole.

Tale sistema consente il trasferimento progressivo del cippato verso la tramoggia d'estrazione posta nel vano macchine adiacente al deposito: qui sarà spostato con un altro meccanismo ortogonale ai precedenti, in modo da renderlo disponibile alla coclea d'estrazione e alimentazione dalla centrale termica, che sale obliquamente, uscendo dal silo e pervenendo alla centrale termica.

La copertura del silo è stata impermeabilizzata con guaina bitumosa a caldo con finitura ardesiata, stesa in due strati incrociati, con lembi sovrapposti.

5.2 Centrale termica a cippato di legna a servizio della sede della Riserva Naturale Regionale della Foce dell'Isonzo, nel comune di Staranzano (GO)

La centrale a cippato posta a servizio della Riserva Naturale Regionale della Foce dell'Isonzo offre un caso rappresentativo di una realizzazione di piccolo taglio.

Il progetto, nel suo complesso, prevede la realizzazione di una centrale termica alimentata a biomassa, di un impianto fotovoltaico per la produzione di energia elettrica e di un impianto solare termico per la produzione di acqua calda.

La realizzazione della centrale termica è prevista a servizio dell'edificio rappresentato dal Centro Visite della Riserva (Casa Bonazza). Tale edificio è già dotato di impianti termici: è servito in parte da un circuito radiatori (con funzionamento solo invernale) e in parte da un circuito ventilconvettori, originariamente previsto anche per il funzionamento estivo. Esiste anche un circuito in teleriscaldamento, realizzato con tubazioni d'acciaio, che serve l'edificio che funge da museo, osservatorio e punto di ristoro, posto a una distanza di circa 60 m dal centro visite.

In origine la sorgente termica dell'impianto di riscaldamento era costituita da due cogeneratori a motore alternativo, ciclo Otto (ormai dismessi) a cui potevano essere collegate due pompe di calore con la facoltà di separarle dall'impianto e non farle funzionare. Recentemente è stata inoltre installata una caldaia a condensazione a GPL della potenza di 60 kW. Tale caldaia è stata mantenuta anche nella configurazione impiantistica a biomasse.

Scheda tecnica dell'edificio

Indirizzo:	Casa Bonazza, Isola della Cona, Staranzano
Proprietario:	Comune di Staranzano
Destinazione d'uso:	Centro visite, foresteria, laboratori
Descrizione edificio:	Edificio risalente agli anni '70, su due livelli fuori terra, con tetto piano, vetrate a nastro, pareti in pannelli prefabbricati in calcestruzzo, tetto piano
Dimensioni:	Superficie in pianta: 410 m ² Volumetria riscaldata: 2.950 m ³

Scheda dell'impianto di riscaldamento in uso prima dell'intervento

Centrale termica (CT): Caldaia condensazione a GPL, posta all'esterno, potenza termica resa 24-60 kW

Uso: Riscaldamento invernale e produzione acqua calda sanitaria

Dimensioni CT: 3,2 m x 3,4 m x h 2,6 m

Distribuzione: Tubazioni interrate verso l'osservatorio principale, distribuzione interna all'edificio sotto traccia, insolazioni secondo L.10/91

Terminali: Ventilconvettori, radiatori

5.2.1 Dimensionamento della caldaia a biomassa

Non esistendo dati storici sui consumi di combustibile i fabbisogni energetici sono stati stimati su base stagionale deducendone la ripartizione della potenza richiesta all'impianto di produzione di calore. Dai calcoli eseguiti risulta che il complesso utilizza una potenza termica media di circa 22 kW e che la potenza massima necessaria alle condizioni di progetto è pari a 50 kW, con funzionamento intermittente. I valori di riferimento sono riportati nella seguente tabella:

Tabella 43 - Valori di riferimento al dimensionamento della caldaia

	novembre	dicembre	gennaio	febbraio	marzo	aprile	stagionale
Temperatura media esterna (°C)	10	6,5	4,3	5,8	9	13	
Potenza media percentuale	40%	54%	63%	57%	44%	30%	
Fabbisogno energetico (MJ)	35.000	56.000	64.000	50.000	32.000	15.000	252.000
Volume cippato (smc)	9,2	14,7	16,8	13,2	8,4	4	66

Nello specifico, la caldaia a biomassa concorrerà a soddisfare il fabbisogno termico del complesso centro visite-osservatorio e sarà in grado di coprire almeno l'80% della richiesta di energia termica annua; la quota rimanente, pari a un massimo del 20% del fabbisogno termico, costituito dai picchi di richiesta caratteristici delle giornate più fredde dell'inverno, sarà coperto mediante l'utilizzo a integrazione della caldaia a GPL già presente presso la sede del centro visite utenze che verrà pertanto integrata nell'impianto termico, anche in ragione del fatto che è praticamente nuova.

5.2.2 Caratteristiche costruttive e schema di funzionamento della caldaia

La caldaia a cippato ha una potenza di targa pari a 50 kW; di seguito sono elencate le sue caratteristiche principali:

- processo di combustione con alte rese e basse emissioni;
- combustione priva di fumi;
- modulazione della potenza in funzione del carico termico richiesto;
- spegnimenti e riaccessioni automatizzati e veloci;
- possibilità di adeguare e modificare con facilità i parametri di combustione in funzione del tipo di combustibile;
- pulizia ed estrazione della cenere automatizzata;
- possibilità di telecontrollo di tutto il sistema;
- certificazioni europee (EN 303-5) sulla costruzione, sul rendimento e sulle emissioni.

Le principali caratteristiche prestazionali e costruttive della macchina prescelta sono:

- | | |
|----------------------------------|----------|
| ● potenza nominale: | 50 kW |
| ● rendimento a potenza nominale: | 91,9 |
| ● larghezza: | 765 mm |
| ● altezza: | 1.580 mm |
| ● profondità: | 940 mm |
| ● diametro condotto fumi: | 180 mm |

La caldaia è realizzata in acciaio speciale per caldaie. Lo scambiatore termico si presenta come fascio di tubi posti verticalmente. Nei tubi dello scambiatore termico si trovano i turbolatori che servono sia per agitare i gas combusti che a far sì che la pulizia dello scambiatore termico avvenga in maniera completamente automatica e il rendimento sia costante.

Il dispositivo di pulizia automatica può essere programmato per far muovere i turbolatori con tempi impostabili a piacere. Un isolamento a doppia lana di vetro riduce al minimo le perdite di calore.

La struttura del bruciatore è la seguente:

- piatto di combustione primaria alimentato dal basso con intercapedine e iniezione di aria primaria;
- piastre laterali inox per la combustione secondaria con intercapedine, raffreddamento ad aria e ugelli per aumentare la turbolenza dell'aria secondaria;
- ventilatore radiale con regolazione elettronica del numero di giri;
- coclea di alimentazione rivestita di metallo duro alle estremità di carico e di spinta, montata su cuscinetti a sfere;
- involucro in piastre refrattarie atte a mantenere alta la temperatura nel bruciatore.

L'accensione del combustibile avviene in maniera completamente automatica tramite un soffiante ad aria calda.

La cenere prodotta in fase di combustione cade dalla griglia mobile propria del bruciatore e dallo scambiatore termico, nella parte inferiore della caldaia. Sotto la griglia mobile un altro disco forato pressa la cenere che cade nel cassetto sottostante. Il contenitore della cenere, a seconda del combustibile usato e della potenza richiesta dall'impianto, va svuotato circa da 2 a 4 volte al mese.

5.2.3 Circuiti e dispositivi di sicurezza

I dispositivi di sicurezza adottati nella soluzione proposta prevedono i seguenti elementi:

- interruttore di limitazione della temperatura a 100°C per evitare il surriscaldamento della caldaia;
- una saracinesca antincendio;

- sensore meccanico di livello del combustibile con dispositivo elettronico di sorveglianza per la misurazione della velocità di combustione;
- dispositivo di estinzione di emergenza, composto da un serbatoio d'acqua di 15 litri dotato di sensore di livello di riempimento minimo e di un sensore termico per l'estinzione automatica della combustione;
- dispositivo di sorveglianza della temperatura all'interno del silo o del serbatoio del combustibile.

5.2.4 Caratteristiche e dimensionamento del deposito di cippato

Sulla base dei consumi energetici medi stagionali è stato stimato un fabbisogno annuo di 20 t di legna sotto forma di cippato, corrispondenti a circa 66 m³.

Ci si è orientati su un'autonomia non superiore ai 30-40 giorni, in funzione delle diverse condizioni climatiche invernali. La capacità utile prescelta, di circa 14 m³, corrisponde grosso modo alla capienza di un trasporto su autocarro di medie dimensioni.

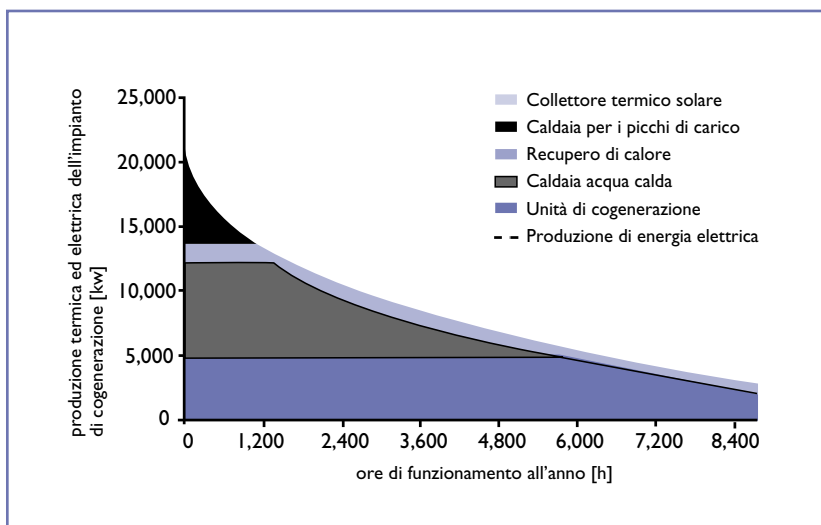
Il dispositivo di estrazione diretta da silo è costituito da un rotore paralleli del diametro di 2,5 m, composto da un disco in lamiera d'acciaio con due lame intercambiabili realizzate in acciaio per molle è fissato su un meccanismo di trasmissione a vite costantemente lubrificato. L'azionamento del dispositivo di estrazione avviene tramite un motore esterno a trifase (da 0,55 kW) posto a lato della caldaia all'inizio della coclea di estrazione. Una saracinesca antincendio, dotata di una guarnizione, è posta sotto al terminale della coclea di estrazione. In caso di mancanza di corrente elettrica si chiude automaticamente e garantisce assoluta sicurezza contro i pericoli di combustione nel serbatoio. Una cellula fotoelettrica controlla ed evita il riempimento eccessivo del serbatoio.

La sezione deposito è dotata di tetto scorrevole completamente apribile per il carico dall'alto del cippato tramite pala meccanica o nastro trasportatore. La sezione deposito cippato è realizzata con due pareti in grigliato aperto fatto con tavole in legno massiccio rimovibili: queste aperture assicurano la ventilazione della massa combustibile, migliorandone le caratteristiche di essiccazione, impedendo fenomeni fermentativi e riducendo con ciò i problemi di agglomerazione del cippato.

5.3 Impianto dimostrativo con ciclo ORC integrato ottimizzato a Lienz (Austria)

L'impianto di cogenerazione a biomassa di Lienz, localizzato nel Tirolo orientale, fornisce energia elettrica e termica attraverso una rete di teleriscaldamento. I sistemi di riscaldamento civili e industriali sostituiti sono principalmente caldaie a gasolio: è evidente il beneficio ambientale che ne è conseguito.

Figura 43 - Produzione annuale di energia termica ed elettrica dell'impianto di cogenerazione e teleriscaldamento di Lienz⁸⁶



La caldaia a olio diatermico, con una potenza nominale di 6.000 kW_{th}, copre il carico di base; la caldaia ad acqua calda, con una potenza nominale di 7.000 kW_{th}, serve a coprire i carichi medi, mentre i picchi di domanda sono soddisfatti da una caldaia a gasolio.

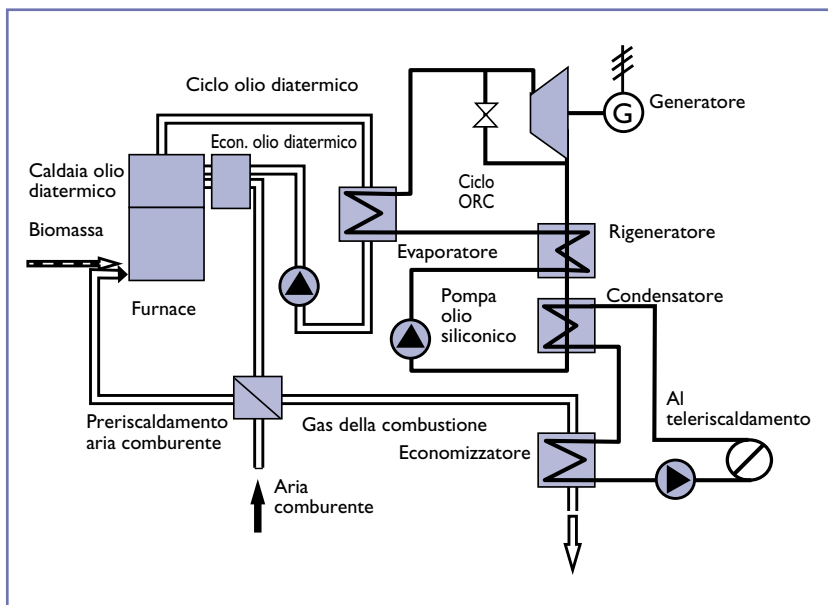
L'unità di recupero del calore, con una potenza nominale di 2.000 kW_{th}, comprende un economizzatore a olio diatermico, localizzato a valle della caldaia a olio diatermico, e un economizzatore ad acqua calda che recupera energia dai gas di scarico di entrambe le caldaie a biomassa. L'unità di recupero del calore aumenta l'efficienza globale

⁸⁶ Obernberger, Thonhofer, Reisenhofer, 2002.

dell'impianto. Il collettore a pannelli solari, situato sul tetto dell'impianto, ha una superficie di 630 m^2 e fornisce una potenza termica di circa $350 \text{ kW}_{\text{th}}$. La parte più innovativa dell'impianto di Lienz consiste nel sistema a ciclo Rankine a fluido organico che ha una potenza nominale elettrica di 1.000 kW_e e una potenza termica nominale di $4.400 \text{ kW}_{\text{th}}$.

L'efficienza globale elettrica dell'impianto di cogenerazione è stata aumentata considerevolmente attraverso un approccio innovativo di interconnessione della caldaia a olio diatermico con un economizzatore a olio diatermico e un pre-riscaldatore d'aria. In questo modo l'efficienza termica della caldaia a biomassa utilizzando olio diatermico raggiunge l'82%. L'aumento di efficienza termica si traduce in un aumento dell'efficienza elettrica globale dell'impianto di cogenerazione a circa il 15%. Il rendimento elettrico netto dell'impianto ORC è circa 18% in corrispondenza del carico nominale e di circa 16,5% al 50% del carico con una temperatura dell'acqua di 85°C . La domanda elettrica dell'impianto per gli ausiliari (pompe) ammonta a 60 kW in condizioni nominali. La caldaia a olio diatermico a biomassa, l'economizzatore a olio diatermico e il pre-riscaldatore d'aria sono dotati di un sistema di pulizia automatico ad aria compressa.

Figura 44 - Schema impiantistico della tecnologia ORC adottata a Lienz



L'analisi economica di questo tipo di impianto ha suddiviso i costi in quattro tipologie:

- costi del capitale, basati su costi di investimento aggiuntivi che considerano solo la spesa maggiore per il sistema cogenerativo confrontata con un sistema tradizionale di combustione della biomassa con caldaia ad acqua calda e la stessa produzione di energia termica;
- costi di gestione, relativi al costo del personale e ai costi di manutenzione;
- costi imputabili al consumo di combustibile, agli ausiliari, ecc.;
- altri costi, come ad esempio costi di amministrazione o assicurazione.

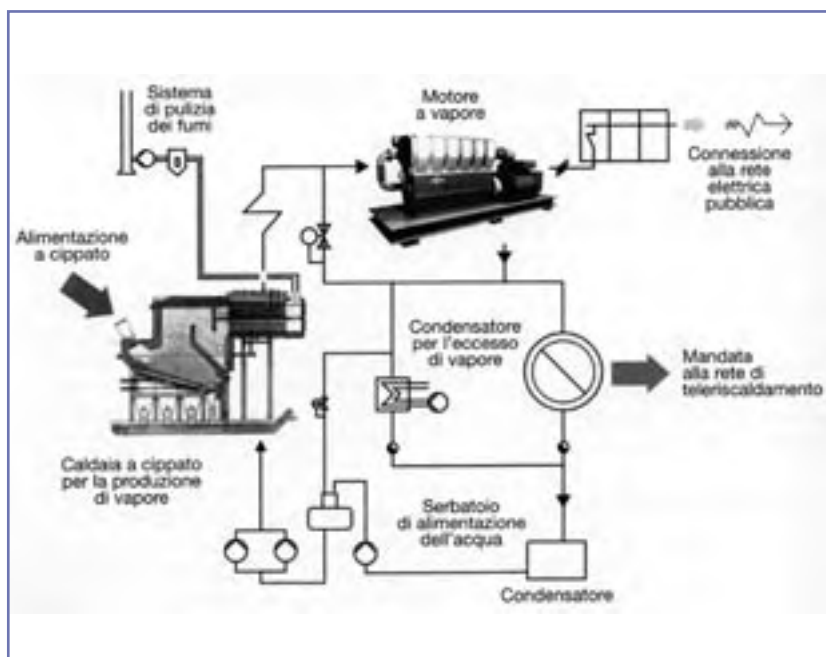
Tabella 44 - Dati tecnici dell'impianto ORC di Lienz

Dati tecnici dell'impianto di cogenerazione a biomassa		
Collettore termico solare	630	m ²
Potenza nominale - caldaia olio diatermico	6.000	kW
Potenza nominale - economizzatore olio diatermico	500	kW
Potenza nominale - caldaia acqua calda	7.000	kW
Potenza nominale - economizzatore acqua calda	1.500	kW
Potenza nominale - caldaia gasolio (picchi)	11.000	kW
Massima potenza termica - collettore solare	350	kW
Produzione di energia termica da biomassa	60.000	MWh/a
Produzione di energia termica da energia solare	250	MWh/a
Produzione di energia elettrica da biomassa	7.200	MWh/a
Dati tecnici del processo ORC		
Potenza termica in ingresso - ORC a carico nominale	5.560	kW
Potenza elettrica netta in uscita - ORC a carico nominale	1.000	kW
Potenza termica in uscita - ORC a carico nominale	4.440	kW
Efficienza elettrica netta - ORC a carico nominale	18	%
Efficienza termica a carico nominale	80	%
Perdite elettriche e termiche	2	%
Fluido termovettore - Olio diatermico		
Temperatura in ingresso	300	°C
Temperatura in uscita	250	°C
Fluido di lavoro - Olio silicico		
Fluido di raffreddamento - Acqua		
Temperatura in ingresso	80	°C
Temperatura in uscita	60	°C

5.4 Teleriscaldamento e cogenerazione da legno cippato a Fondo – Val di Non (TN)

L'impianto realizzato a Fondo – Val di Non (TN) prevede la produzione di energia termica per il riscaldamento delle utenze domestiche (la popolazione residente è di circa 1.500 abitanti) e industriali e la produzione di energia elettrica mediante un motore a vapore (in totale 220 utenze). L'impianto utilizza come combustibile scarti di segheria compatibilmente con la disponibilità locale e i residui legnosi derivanti dalle lavorazioni forestali e dalla pulizia dei boschi. Lo stoccaggio del cippato ha una capacità di 5.500 m³ che consente un'autonomia di alimentazione di circa 25 giorni. Il carico del materiale avviene attraverso una pala meccanica che lo scarica in due silos; il sistema di alimentazione a spintore alimenta le caldaie in modo automatico.

Figura 45 - Schema impiantistico dell'impianto di Fondo⁸⁷



⁸⁷ Alpengywood / Interreg III B.

Nella centrale termica sono installati due generatori di vapore, completi dei dispositivi per il trattamento dei fumi e del caricatore del combustibile. Il vapore generato dalla caldaia fluisce attraverso il motore e fornisce l'energia necessaria per la conversione. Lo stesso vapore fuoriuscente dal motore è fatto affluire in uno scambiatore vapore/acqua per l'alimentazione della rete di teleriscaldamento. Il motore a vapore è avviato manualmente. Il gruppo motore e il relativo alternatore sono controllati automaticamente e disattivati a distanza in caso di errore.

Tutto il sistema di cogenerazione, compresa la rete di teleriscaldamento, è telegestito e telecontrollato. I rendimenti elettrici si attestano attorno al 18-19%. Il sistema di trattamento dei fumi è composto da due batterie a cicloni per l'abbattimento delle polveri e da un elettrofiltro. In condizioni di funzionamento alla massima potenzialità dei due bruciatori a biomassa si producono all'incirca 170-200 kg/h di cenere. L'energia proveniente dalla combustione della biomassa produce vapore con pressione di 15 bar ridotta a 0,5 bar. Nel cogeneratore il vapore è immesso in uno scambiatore vapore/acqua ed è introdotto in un sistema di tubazioni nella rete di teleriscaldamento. Ogni utenza allacciata alla rete preleva l'energia (acqua calda di mandata) tramite una sottostazione composta da uno scambiatore di calore, da una valvola meccanica, da manometro, termometro e contacalorie.

Tabella 45 - Dati tecnico-economici dell'impianto di Fondo (TN)

Dati tecnico – economici	
Potenza delle caldaie	3,5 MW _t + 2,5 MW _t
Tipo di caldaia	a griglia mobile
Consumo annuale di combustibile	7.500 t (umidità: 35-40%)
Prezzo del combustibile	45 €/t
Lunghezze rete di distribuzione stradale	5,5 km
Lunghezza stacchi di allacciamento	2,6 km
Volumetria lorda riscaldata	183.750 m ³
Potenza elettrica di cogenerazione installata	220 kW
Produzione di energia elettrica (3.556 ore/anno)	1.200 MWh
Energia media annua erogata	7.000 MWh/anno
Rendimento medio annuo delle caldaie	90%
Investimento complessivo	6.040.000 €

5.5 Impianto dimostrativo per lo sfruttamento di energia e materiali da reflui zootecnici presso l'azienda "Francesco Ricchieri" di Fiume Veneto (PN)

L'intervento consiste in un impianto per il trattamento di liquami bovini prodotti presso l'azienda "Francesco Ricchieri", sita nel comune di Fiume Veneto e di proprietà della Provincia di Pordenone.

L'azienda, dal netto carattere sperimentale, ospita l'Associazione Nazionale Allevatori Bovini di Razza Pezzata Rossa Italiana (A.N.A.P.R.I.), la cui attività è rivolta al miglioramento della razza bovina Pezzata Rossa, selezionando i futuri maschi riproduttori attraverso il *performance-test* individuale. Inoltre l'azienda ospita parte delle prove condotte in provincia di Pordenone dal Centro Regionale per la Sperimentazione Agraria.

L'azione si inserisce all'interno del Programma Nazionale Biocombustibili (PROBIO), con lo scopo di fornire a livello dimostrativo un'alternativa ambientalmente più compatibile all'attuale pratica dello spandimento dei liquami zootecnici tal quali sul terreno.

È stata proposta, in altri termini, un'azione che coniugasse l'applicazione di tecnologie "tradizionali" con altre aventi un netto carattere innovativo e che nell'insieme costituiscano un sistema integrato, ossia una filiera di depurazione e di recupero energetico con fasi fortemente interconnesse tra loro.

Gli obiettivi specifici dell'intervento sono:

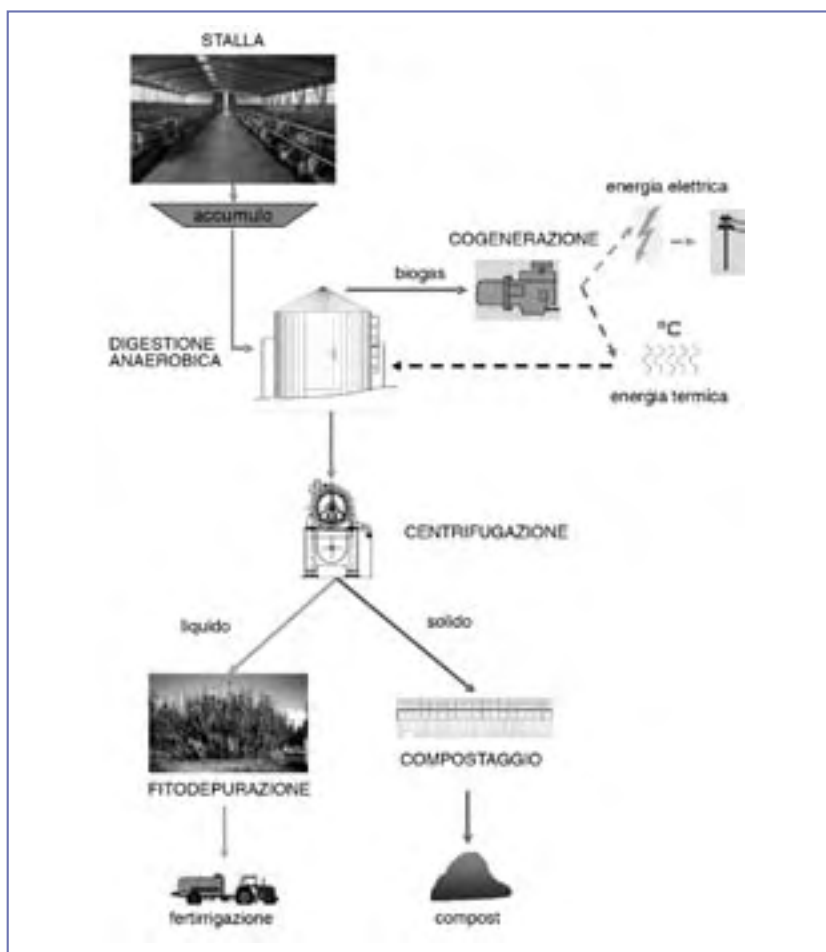
- ottenere una frazione chiarificata a basso contenuto di sostanza organica, sanitizzata e deodorizzata, a elevato potere fertilizzante, da utilizzarsi agronomicamente anche con impianti irrigui;
- ottenere una frazione solida stabilizzata, igienizzata, facilmente trasportabile anche a distanza da utilizzare come ammendante organico (compost);
- produrre energia da biogas in grado di soddisfare il fabbisogno di energia termica ed elettrica dell'impianto stesso e di altre utenze aziendali;
- ridurre l'impatto ambientale conseguente allo stoccaggio e alla distribuzione agronomica dei liquami, importante soprattutto per gli allevamenti siti in prossimità di centri abitati.

Il progetto, dimensionato per il trattamento di 7 m³/giorno di liqua-

mi prodotti da 220 tori allevati in azienda, si compone essenzialmente di cinque sezioni operative (figura 46):

1. digestione anaerobica;
2. separazione solido-liquido;
3. fitodepurazione della frazione liquida;
4. compostaggio della frazione solida;
5. cogenerazione.

Figura 46 - Schema di flusso del processo



5.5.1 Sezioni operative dell'impianto

Digestione anaerobica

Il liquame tal quale (ss = 12%) subisce un trattamento di digestione anaerobica che consente da un lato di ottenere un materiale stabilizzato e deodorizzato e, dall'altro, il biogas utilizzato per la contestuale produzione di energia elettrica e termica in un cogeneratore.

Il trattamento del refluo viene attuato in un digestore a miscelazione completa, monostadio, operante in regime di mesofilia ($t^{\circ} = 35-37^{\circ}\text{C}$).

Tabella 46 - Caratteristiche tecniche della sezione di digestione anaerobica

Temperatura di processo	35-37°C (mesofilia)
Volume utile	300 m ³
HRT	40 giorni
Materiale	acciaio inox
Copertura gasometrica	telo polimerico
Coibentazione	perimetrale
Miscelatore	1 x 10 kW

Separazione dei solidi

Il refluo digerito viene avviato a una sezione per la separazione meccanica dei solidi costituita da un estrattore centrifugo ad asse orizzontale (*decanter*).

I liquami digeriti in entrata presentano un contenuto di sostanza secca dell'ordine del 5%; in uscita si ottiene una frazione ispessita con un contenuto in sostanza secca del 20-25%.

Tabella 47 - Caratteristiche tecniche della sezione di separazione dei solidi

Capacità	3-4 m ³ /h
Potenza installata	7,68 kW
Dosaggio flocculanti	Si
ss frazione ispessita	20-25%

Fitodepurazione a flusso verticale

La frazione liquida in uscita dalla centrifugazione viene depurata in un impianto di fitodepurazione con lo scopo di abbattere ulteriormente il carico organico residuale, ridurre l'azoto ammoniacale, sanificare e deodorizzare ulteriormente la frazione liquida.

Tabella 48 - Caratteristiche tecniche della sezione di fitodepurazione

Tipologia	flusso sub-superficiale verticale
Superficie utile	250 m ²
Portata giornaliera	5 m ³ /g
Impermeabilizzazione	guaina PEAD
Substrato	ghiaia-sabbia
Distribuzione del refluo	intermittente
Specie vegetale coprente	canna comune (<i>Arundo donax</i> L.)

L'acqua in uscita dalla fitodepurazione viene stoccata e utilizzata a fini fertirrigui mediante spandimento nei campi aziendali.

Compostaggio

I solidi ottenuti dopo la centrifugazione del liquame digerito subiscono una ulteriore stabilizzazione e mineralizzazione mediante il processo di compostaggio, con l'obiettivo di ottenere un ammendante organico. Il materiale da compostare, con aggiunta di altre biomasse (comprese quelle ottenute dalla fitodepurazione), viene disposto in andane (file) e rivoltato periodicamente per un periodo di circa 4 settimane.

Il compost così ottenuto presenta caratteristiche qualitative e analitiche conformi ai requisiti della normativa, ai fini dell'utilizzo in agricoltura.

Tabella 49 - Caratteristiche tecniche della sezione di compostaggio

Lunghezza tunnel	25 m
Copertura	film plastico
Larghezza andana	2 m
Altezza andana	1,2 m
Rivoltamenti	2 volte/settimana
Macchina rivoltatrice	15 kW

Cogenerazione

Il biogas prodotto dalla digestione anaerobica, in quantità pari a 250-300 m³/giorno, viene utilizzato in un cogeneratore dalla potenza elettrica di 20 kW_e, in grado di garantire una produzione di energia termica sotto forma di acqua a 85°C, e di energia elettrica.

Nel periodo più freddo dell'anno (gennaio/febbraio) l'energia termica prodotta viene utilizzata quasi esclusivamente per la termostatazione del digestore. Nel restante periodo dell'anno il surplus di energia termica può essere utilizzato nell'impianto di essiccazione artificiale dei foraggi in alternativa all'utilizzo di combustibili di origine fossile.

L'energia elettrica viene autoconsumata e la parte in eccedenza viene ceduta alla rete di distribuzione.

La produzione di energia elettrica consente l'emissione di due *certificati verdi*.

Tabella 50 - Caratteristiche tecniche della sezione di separazione dei solidi

Disponibilità annua di biogas	90.000 m ³
Potenza elettrica	20 kW _e
Potenza termica	30 kW _t
Ore annue di funzionamento	6.000 ore
Rendimento elettrico di funzionamento	28%
Rendimento termico di funzionamento	45%
Energia elettrica annua producibile	120.000 kWh
Energia termica annua producibile	180.000 kWh

Capitolo 6

Allegati

6.1 Allegato 1: schede colturali delle principali specie a fini energetici

Vengono presentate alcune schede riguardanti le principali colture dedicate, interessanti nell'ambito della regione Friuli Venezia Giulia. Sono dapprima presentate le colture da biomassa lignocellulosica, con una suddivisione tra le biomasse erbacee, annuali (kenaf e sorgo da fibra) e perennanti (canna comune, miscanto, panico), e le biomasse legnose (pioppo e robinia); in seguito, verranno presentate le colture oleaginose (girasole e colza) e le colture zuccherine e alcoligene (barbabietola da zucchero, frumento tenero, mais e sorgo zuccherino).

6.1.1 Colture da biomassa lignocellulosica

Kenaf (Hibiscus cannabinus L.)

L'ibisco cannabino (*Hibiscus cannabinus L.*), più noto col nome inglese di origine persiana kenaf, è una dicotiledone annuale appartenente alla famiglia delle *Malvacee*, tribù *Hibisceae*; il gruppo racchiude oltre 150 specie, diffuse soprattutto nelle regioni tropicali di tutti i continenti, con utilizzazioni alimentari, ornamentali e per la produzione di fibra.

Figura 47 - Campo di kenaf



Caratteristiche botaniche e morfologiche

Il kenaf è una pianta erbacea annuale, longinotturna, generalmente autoimpollinante, a stelo eretto, cilindrico o subangoloso, glabro o con piccole spine, di altezza variabile da 1 a 4 metri a seconda della varietà e delle condizioni di coltura. Anatomicamente il fusto è composto da una parte esterna corticale, che fornisce la fibra lunga, da una parte centrale legnosa (kenapulo), a fibra corta, al centro è presente una piccola quantità di midollo. I fiori sono solitari, ermafroditi, posti all'ascella delle foglie e portati da brevi peduncoli. La radice è fittonante con radici avventizie che possono raggiungere la profondità anche di 2 m ed espandersi lateralmente per 50-60 cm.

Ciclo biologico ed esigenze pedoclimatiche

La durata del ciclo biologico dipende dalla varietà ed è influenzata da condizioni climatiche e pedologiche e in particolare dalla risposta al fotoperiodo; ogni varietà, infatti, ha una soglia rappresentata dalla lunghezza del periodo di buio sotto alla quale non fiorisce. Esistono varietà ultra-precoci (ciclo 70-100 giorni), varietà medio-precoci (100-120 giorni) e varietà tardive (120-160 giorni) che alle nostre latitudini non sempre raggiungono la fioritura per il sopraggiungere del freddo. Le condizioni di sviluppo ottimali si hanno con temperature relativamente elevate, piogge abbondanti, forte soleggiamento e giorno lungo. Una soddisfacente germinazione può essere ottenuta con temperatura del terreno attorno ai 12°C mentre la temperatura base per l'emergenza è di 9°C. La temperatura minima per l'accrescimento è di 16°C e quella ottimale è di 25-26°C.

La coltura si avvantaggia di una disponibilità idrica ben distribuita durante il ciclo vegetativo, ma è in grado di superare periodi di siccità con un temporaneo rallentamento della crescita; può vantare una resistenza alla siccità migliore di mais e canapa.

Riguardo le caratteristiche del terreno il kenaf non è particolarmente esigente adattandosi anche a condizioni molto diversificate; in genere fornisce le più elevate produzioni in terreni profondi, freschi e ben dotati di azoto, a granulometria fine e in grado di mantenere una buona riserva di acqua utile. Non tollera ristagni idrici, specie nelle fasi iniziali di sviluppo.

Tecnica colturale

Il kenaf è una coltura che si semina in primavera inoltrata ed è raccolta a fine autunno o a fine inverno; ne consegue che nell'avvicendamento colturale potrà seguire tanto un cereale autunno-vernino

quanto una coltura primaverile estiva quale mais, soia e bietola. Da evitare, in precessione o in successione, specie suscettibili od ospiti del nematode galligeno *Meloidogine* spp.

La lavorazione principale del terreno, e i successivi lavori di preparazione del letto di semina, non differiscono da quelli normalmente praticati per altre colture da rinnovo seminate nella primavera avanzata quali, ad esempio, mais e sorgo.

La scelta dell'epoca di semina varia in funzione della zona di produzione: negli areali settentrionali la semina non va anticipata oltre la prima decade di maggio. La semina può essere effettuata con seminatrici da frumento o, preferibilmente, con quelle di pneumatiche di precisione, con una densità variabile da 20 a 40 piante/m². La concimazione azotata sembra non influenzare la produttività della pianta. La coltura del kenaf è generalmente effettuata in asciutto, nelle zone dove la piovosità naturale è in grado di soddisfare le sue esigenze idriche.

Per quanto riguarda il diserbo, il kenaf è soggetto a competizione con le malerbe solo nelle fasi giovanili. In seguito l'ombreggiamento che riesce ad esercitare risulta efficace nel contenere la maggior parte delle infestanti a nascita tardiva.

Epoca e modalità di raccolta sono strettamente legate alla destinazione del prodotto e alle caratteristiche richieste dall'utilizzatore. Nel caso la coltura sia destinata alla produzione di energia, l'epoca di raccolta deve essere, compatibilmente con le condizioni ambientali, la più tardiva possibile per consentire un più elevato livello di produzione di sostanza secca. La raccolta può essere effettuata mediante una falcia-condizionatrice e successiva rotoimballatura, o mediante una falcia-trincia-caricatrice a fine inverno, con una umidità inferiore al 20%.

I livelli produttivi sono estremamente variabili e si va da 7 a 20 t/ha/anno di sostanza secca.

Sorgo da fibra (Sorghum bicolor L.)

Il sorgo da fibra appare una coltura di estremo interesse, sia per fini energetici che cartari, viste le elevate rese che può raggiungere nel nostro ambiente e per la relativamente semplice tecnica colturale. Appartenente alla specie *Sorghum bicolor* (famiglia delle *Poaceae*), come quello da granella, da zucchero e da scope, il sorgo si adatta alla coltivazione in zone temperate come coltura a ciclo primaverile-estivo. Nelle varietà da fibra la parte esterna del culmo è fibrosa, mentre

la parte centrale appare spugnosa. Dal punto di vista morfologico, tra sorgo da fibra e sorgo zuccherino non si rilevano differenze sostanziali, tanto che spesso la linea di demarcazione tra l'uno e l'altro è piuttosto incerta. La composizione analitica della pianta, invece, diverge notevolmente tanto da giustificarne il differente impiego, infatti i due tipi estremi mostrano una diversa destinazione del carbonio organicato durante la fotosintesi: nel tipo da fibra prevale la produzione di carboidrati strutturali, in particolare di cellulosa; nel tipo da zucchero, invece, almeno il 30% di tutta la sostanza secca accumulata è costituito da zuccheri semplici (saccarosio, glucosio e fruttosio). Il sorgo è originario dell'Africa centro-orientale (Sudan, Etiopia) e attualmente molto diffuso in Africa e negli USA. Poco diffusa in Europa, la sua coltivazione in Italia è limitata alle Marche, Emilia Romagna, Toscana e Molise.

Figura 48 - Sorgo da fibra



Caratteristiche botaniche e morfologiche

Il sorgo da fibra è una pianta erbacea, C_4 , brevidiurna, annuale, con ciclo primaverile-estivo. Presenta un apparato radicale fascicolato, un fusto eretto di altezza medio-alta (da 0,5 a 7 m). Le foglie sono di forme varie in dipendenza dei tipi e l'infiorescenza è un panico a impollinazione autogama.

Esigenze pedoclimatiche

Il sorgo presenta un minimo di temperatura per la germinazione di 13°C, mentre una ottimale di accrescimento di 24-25°C. Predilige terreni di medio impasto ed è moderatamente tollerante alla salinità. Il sorgo da fibra è una coltura caratterizzata da un'elevata efficienza nell'uso dell'acqua e può essere coltivata nel nostro ambiente in condizioni di limitato sussidio idrico, intervenendo in particolare dopo la semina per favorire una pronta emergenza delle piantine nel caso di mancanza di piogge. Per quanto riguarda la concimazione azotata risultano sufficienti limitati apporti (100 kg /ha di N) per determinare concreti incrementi della produzione di sostanza secca.

Tecnica colturale

La semina del sorgo si effettua da fine aprile a maggio con una seminatrice di precisione e con una temperatura del terreno di almeno 15°C. Le densità di investimento ottimali variano tra le 20 e le 30 piante/m² con una interfila di 45 cm.

Riguardo la scelta varietale i materiali più adatti alla produzione di fibra ligno-cellulosica sono ibridi. Da prove sperimentali si rileva una certa variabilità nella resa in biomassa, compresa mediamente tra le 15 e oltre le 40 t/ha di sostanza secca. Tra gli ibridi che hanno fornito le migliori performances vanno citati, oltre all'ABF 20 prodotto da A.Biotec, con una produzione superiore a 40 t/ha di sostanza secca, H 173, H 132, H 252, della Protosemences (Francia) e Abetone della Mycogens (USA). Queste varietà associano alla alta resa in biomassa un contenuto in sostanza secca alla raccolta di circa il 30% e una buona resistenza all'allettamento. Nel nostro areale di coltivazione si prediligono ibridi a ciclo medio-tardivo (periodo emergenza-fioritura superiore a 90 giorni) capaci di sfruttare tutto il periodo di vegetazione a loro disposizione e fornire la massima resa con la presenza della minore quantità di granella al momento della raccolta.

La raccolta può essere effettuata 10-20 giorni prima della fase di fioritura quando risulta massimo l'accumulo di sostanza secca e cellulosa nel culmo e va eseguita prima delle piogge autunnali al fine di evitare un innalzamento dell'umidità del prodotto e un precoce deterioramento della qualità della biomassa.

La tecnica di raccolta può essere mediante una rotoimballatura, previa asciugatura a terra della biomassa, o mediante falcia-trincia-caricatrice; in tal caso la biomassa presenterà elevati contenuti di umidità e, non risultando conservabile, andrà utilizzata immediatamente.

Canna comune (Arundo donax L.)

Graminacea perenne, la canna comune (*Arundo donax* L.) è una specie tipica delle regioni mediterranee dove la si può rinvenire allo stato spontaneo oppure coltivata in piccole superfici, prevalentemente per la produzione di sostegni per la vite o per colture ortive. In Italia vegeta dal piano sempreverde al submontano, in terreni freschi, lungo i fiumi, in collina, in prossimità del mare, in boscaglie dette “canneti”.

Figura 49 - Veduta di canneto di *Arundo donax*



Caratteristiche botaniche e morfologiche

Il genere *Arundo* conta sei specie, diffuse nei paesi caldi. In Italia si ritrova anche la Canna del Reno (*Arundo Plinti Turra*) e la *Phragmites*. La canna comune si differenzia da queste per il rizoma grosso e tuberoso e i culmi rivestiti per gran parte dalle guaine. Il culmo termina con un'ampia pannocchia deformata da tre spighette peduncolate, ognuna con tre fiori che non fruttificano. La parte ipogea è costituita da un ricco sistema di rizomi di notevoli dimensioni e radici fascicolate che possono estendersi molto in profondità. I fusti, che si sviluppano in un'annata, possono raggiungere un'altezza di 6-7 m. La specie, essendo sterile, si propaga per via vegetativa mediante rizomi, talee di fusto e piantine micropropagate. Grazie all'elevata capacità produttiva la coltura può a ben diritto ascriversi tra quelle più interessanti per la produzione di energia.

Esigenze pedoclimatiche

La canna comune è sensibile alle basse temperature. Queste possono compromettere anche la vitalità dei rizomi quando sono posti a poca

profondità. Non è una pianta acquatica e teme il ristagno idrico. Relativamente ai terreni, è ampiamente adattabile, preferisce quelli profondi, sabbiosi, ricchi di sostanza organica con una reazione alcalina e ricchi di calcio. Non sono adatti quelli argillosi, superficiali, impermeabili.

Tecnica colturale

Nel caso in cui il materiale di propagazione sia rappresentato da rizomi, l'impianto è da effettuare tra febbraio e marzo, epoca nella quale le gemme risultano ancora dormienti e le temperature minime giornaliere sono di norma di qualche grado sopra 0°C. Le talee, invece, devono essere messe a dimora più tardi, cioè al rigonfiamento delle gemme.

In un impianto con rizomi la densità di impianto ottimale è attorno ai 15.000 rizomi/ha, anche per l'elevato costo unitario dei rizomi che non rende conveniente una densità superiore di impianto. I rizomi vengono piantati in file, con una distanza di 1,5 m tra le file e 0,5 m sulla fila.

Diverse sperimentazioni su canna comune hanno messo in luce le potenzialità di questa coltura. Le rese produttive mostrano che a partire dal secondo anno si possono ottenere rese superiori alle 40 t/ha di sostanza secca. L'effetto dell'apporto idrico risulta apprezzabile solo in presenza di una falda freatica molto profonda.

La propagazione e l'impianto rappresentano due aspetti della tecnica agronomica non ancora risolti e che di certo influenzano notevolmente l'economicità della coltura. Sono in corso studi rivolti all'individuazione di soluzioni adeguate per la raccolta dei rizomi.

La raccolta della biomassa avviene in autunno o in inverno mediante una macchina falcia-trincia-caricatrice. Nel caso di una raccolta invernale si ha una lieve perdita di sostanza secca, vista la perdita dell'apparato fogliare, potendo contare però su di un contenuto di umidità inferiore (circa 40%).

Miscanto (Miscanthus sinensis L.)

Il miscanto (*Miscanthus sinensis L.*) appartiene alla famiglia delle *Graminaceae*. È una pianta originaria del Sud-Est dell'Asia e fu inizialmente introdotta in Europa, una cinquantina di anni fa, come pianta ornamentale.

Caratteristiche botaniche e morfologiche

Il miscanto è una graminacea perenne, cespitosa, con ciclo fotosintetico C₄, caratterizzato da un ricco sistema di radici e rizomi, e da

germogli che raggiungono un'altezza variabile dai 3 ai 5 metri. Le foglie sono alterne e hanno una lunghezza che va dai 30 ai 135 cm. I fiori sono raccolti in spighe. Grazie all'elevato ritmo di accrescimento e alla considerevole capacità produttiva in termini di biomassa, la specie è divenuta oggetto di numerose ricerche atte a verificare la possibilità di una sua utilizzazione industriale quale fonte alternativa di materiale lignocellulosico per impieghi energetici o cartari.

Figura 50 - Canneto di *Miscanthus sinensis* L.



Esigenze pedoclimatiche

Il miscanto si è ben adattato ai climi temperati e risulta essere resistente alle basse temperature; i germogli e le foglie possono risultare danneggiati a temperature prossime a 0°C, mentre i rizomi, se ben sviluppati, possono rimanere vitali a temperature inferiori a 0°C, anche per un lungo periodo. Relativamente ai terreni, è ampiamente adattabile, preferisce quelli profondi, sabbiosi, ricchi di sostanza organica. Il miscanto si avvantaggia notevolmente dell'apporto idrico e quindi estrinseca appieno le proprie potenzialità produttive in comprensori irrigui.

Tecnica colturale

L'interesse per questa specie è recente e di conseguenza sono molto scarsi gli studi relativi alla variabilità genetica sia per i caratteri morfologici che produttivi. Attualmente il genotipo più utilizzato in tutte le prove sperimentali, non solo in Italia, è il *Giganteus*. Quest'ultimo deriva dall'incrocio interspecifico tra un *M. sinensis* e un *M. sacchariflorus*. Le diverse sperimentazioni pluriennali effettuate con tale ge-

notipo indicano che le rese medie nel periodo di massimo accumulo di sostanza secca sono pari a circa 30 t/ha/anno a partire dall'anno successivo a quello di impianto.

La varietà attualmente più diffusa, la *Giganteus*, essendo sterile, deve essere propagata per via vegetativa, utilizzando rizomi o piantine micro-propagate. A tal riguardo, per effettuare il passaggio alla fase di coltura estensiva occorre in primo luogo mettere a punto le due diverse tecniche di propagazione; la scelta, poi, dell'una o dell'altra tecnica deve essere effettuata sulla base di una attenta valutazione dei costi di produzione del materiale. La moltiplicazione per rizomi si può realizzare mediante estirpazione meccanica su piante madri di un anno: esiste la possibilità di frammentare le ceppaie in rizomi di dimensioni accettabili mediante una zappatrice rotativa e di poter utilizzare le macchine in commercio, opportunamente modificate, per la raccolta dei rizomi da terra.

L'epoca di impianto del miscanto è marzo-aprile, con sesti di impianto di 0,5 x 0,5 metri, con un investimento di 4 piante per metro quadrato. L'irrigazione è indispensabile nell'anno di impianto. Apporti crescenti di concime azotato non determinano rilevanti incrementi di biomassa, vista la presenza di un apparato radicale avventizio ben sviluppato che permette alla coltura di mobilitare i nutrienti dagli strati più profondi del suolo.

L'epoca di raccolta ottimale è nel periodo invernale (gennaio, febbraio e marzo a seconda dell'andamento stagionale), nonostante si verifichi un calo produttivo dovuto alla perdita di foglie e infiorescenze. Il taglio effettuato in questo periodo offre diversi vantaggi: un ampliamento dell'epoca di raccolta, un migliore utilizzo delle macchine operatrici, una più precoce ripresa vegetativa della coltura e soprattutto la possibilità di raccogliere un materiale a basso contenuto di umidità. Infatti, nel corso dell'inverno si verifica una progressiva diminuzione dell'umidità della biomassa, fino al 20-30%. Nel caso del miscanto, effettuando la raccolta a marzo, si esclude la necessità di una ulteriore essiccazione e ciò consente lo stoccaggio per lunghi periodi.

Panico (Panicum virgatum L.)

Il panico (*Panicum virgatum L.*) appartiene alla famiglia delle graminacee (*Poacea*). Si tratta di una pianta erbacea, C₄, rizomatosa, perenne, nativa del Nord America dove si è diffusa dal 55° N di latitudine sino al Messico come importante specie erbacea nelle praterie. È una pianta molto utilizzata in America per la produzione di energia, di fibra, per scopi alimentari e come pianta ornamentale.

Caratteristiche botaniche e morfologiche

Basandosi sulle caratteristiche morfologiche e gli habitat di preferenza, vengono definiti due ecotipi di panico: *Lowland*, generalmente distribuito nelle pianure alluvionali, di più elevata taglia e maggior velocità di sviluppo, e l'ecotipo *Upland*, diffuso in genere sugli altipiani siccitosi. La pianta presenta culmi eretti, di forma tondeggianti, molto robusti e può superare i 2 m di altezza. Le foglie sono di colore grigio verde, glabre, lunghe 10-60 cm, larghe 3-15 mm, finemente scanalate; con nervatura centrale biancastra e nettamente marcata. L'infiorescenza è a pannocchia molto grande, lassa (15-50 cm) con numerose ramificazioni divise. Il panico si presenta con grandi cespi e con numerosi rizomi corti e striscianti. La riproduzione avviene sia mediante rizomi che mediante seme.

Esigenze pedoclimatiche

Il panico è una coltura poco esigente, si adattata a resistere in condizioni di stress idrico e a lunghi periodi di freddo intenso. Riguardo le caratteristiche del terreno, il panico in genere predilige suoli umidi e limosi.

Tecnica colturale

La lavorazione principale del terreno e i successivi lavori di preparazione non differiscono da quelli normalmente praticati per altre colture da rinnovo seminate nella primavera avanzata, quali, ad esempio, mais e sorgo.

L'epoca di semina varia da maggio a metà luglio, con una densità variabile da 200 a 400 piante per metro quadrato. La scelta di una così elevata densità di semina non va a influenzare la produzione finale di sostanza secca, ma migliora la densità delle piante e quindi la copertura del terreno. Il panico richiede una preparazione del letto di semina ottimale al fine di ottenere una buona emergenza delle piante. Il primo anno di coltura è necessario il controllo delle malerbe.

La concimazione azotata sembrerebbe non influenzare la produttività della pianta, altro fattore che mette in evidenza la moderata necessità di input di questa coltura.

È possibile trovare varietà provenienti dall'America che si adattano alle condizioni climatiche dei nostri areali. Risulta estremamente importante la latitudine di origine della varietà al fine di determinare l'adattamento della coltura: in genere varietà originatesi a basse latitudini possono avere una maggior produzione in sostanza secca, ma possono anche aumentare l'eventualità di mancato attecchimento il primo anno e di mostrare un calo della produzione negli anni successivi.

Il primo anno di coltura sono attesi livelli di produzione in sostanza secca da 6 a 12 t/ha, mentre negli anni successivi si passa da 14 a 24 t/ha di sostanza secca.

Pioppo (Populus spp. L.)

Appartengono alla famiglia delle *Salicaceae* che comprende i due generi *Salix* e *Populus*. *Populus alba* e *P. nigra* sono specie indigene e il loro areale comprende l'Europa centro-meridionale, l'Asia occidentale e l'Africa settentrionale; *P. deltoides* è originario dell'America del Nord tra le pianure centro-occidentali e l'oceano Atlantico; *P. x euramericana* è un ibrido tra il *P. nigra* e il *P. deltoides*.

Caratteristiche botaniche e morfologiche

Si tratta di alberi di media grandezza (15-20 m); hanno foglie alterne, semplici e caduche palminervie e di varia forma (subtriangolare nel *P. nigra*, palmato-lobate nel *P. alba*). I fiori sono unisessuali e riuniti in amenti peduncoli; il frutto è una capsula che si apre a maturità.

Esigenze pedoclimatiche

I pioppi sono entità eliofile e igrofile, necessitano di una temperatura media annua compresa tra gli 8,5°C e i 17°C e precipitazioni annue di almeno 700 mm; temono le siccità estive prolungate e vegetano bene su terreni non troppo tenaci e con un pH compreso tra 5,5 e 7,5, mentre rifuggono da quelli troppo pesanti o sciolti.

Figura 51 - Pioppo in Short Rotation Forestry



Tecnica colturale

Nella *Short Rotation Forestry* (SRF) si utilizzano ibridi di pioppo selezionati per sopportare le elevate densità di impianto e per ottenere accrescimenti particolarmente rapidi. La raccolta, che può essere annuale, biennale, o quadriennale, è completamente meccanizzata, e non prevede la rimozione dell'apparato radicale. Nel caso di raccolta biennale, sono previsti 4-5 raccolti per una durata complessiva dell'impianto di 8-10 anni. Alla fine del ciclo l'eliminazione della ceppaia non presenta particolare laboriosità essendo sufficiente un passaggio con una particolare fresa sul terreno; non c'è quindi la necessità di scalzare la ceppaia, con i conseguenti costi onerosi. Le piantagioni hanno una densità che varia dalle 6.000 alle 14.000 piante/ha. Il materiale può essere disposto in campo su file semplici o su file binate.

I lavori di impianto, così come tutte le altre operazioni, sono completamente meccanizzati. Vengono messe a dimora talee legnose di circa 22 cm di lunghezza che, in seguito ad opportune cure colturali, nell'arco di una/due stagioni vegetative danno origine a piante pronte per la trinciatura.

Nel caso di trinciatura annuale si vanno a raccogliere piante alte 4 metri, mentre nel caso di trinciatura biennale le piante hanno raggiunto altezze nell'ordine di 7-8 metri. La raccolta si esegue durante il periodo di riposo vegetativo, da novembre ad aprile. È importante che le operazioni di raccolta siano eseguite con un terreno in buone condizioni onde evitare che le macchine operatrici danneggino l'apparato radicale delle piante, compromettendo la futura produzione. I polloni hanno uno sviluppo molto vigoroso grazie ai robusti apparati radicali delle ceppaie e sono in grado di raggiungere in una sola stagione vegetativa, in condizioni ottimali, l'altezza di 6-7 metri.

La preparazione del letto di impianto prevede un'aratura a 30 cm e, nel caso non si abbiano impianti con telo pacciamante biodegradabile, si necessita di un trattamento diserbante antigerminativo in emergenza. Durante il ciclo vegetativo sono necessari degli interventi di pulizia dell'interfila mediante erpicatura. Nella concimazione gli apporti vanno calcolati in base alle asportazioni relative alla raccolta utile del prodotto e al tipo di terreno.

Diverse sono le problematiche con questi impianti a ciclo breve: si ricorda che si necessita di cloni che resistano a sesti di impianto fitti, e che presentino resistenza a diversi patogeni fungini e non (*Venturia* sp., *Melampsora* sp., *Marssonina* sp., necrosi corticale, macchie brune, virus del mosaico). Importanti risultano anche i trattamenti contro gli insetti dannosi e un accurato controllo delle infestanti il primo anno di coltura.

Diversi sono i cloni disponibili sul mercato al giorno d'oggi, specificatamente selezionati per la loro adattabilità alle diverse condizioni pedoclimatiche. In generale si tratta di cloni che presentano una spiccata dominanza apicale, una elevata tolleranza alle avversità e un periodo vegetativo che si aggira attorno ai 165 giorni.

La raccolta si effettua a 2-4 anni dall'impianto, quando il diametro al colletto è al massimo di 10 cm. Si interviene durante il riposo vegetativo, con due modalità di raccolta: una eseguita con macchine falciatrinchia-caricatrici che permette l'ottenimento di un prodotto cippato con alto contenuto in umidità (50-55%) e pertanto facilmente deteriorabile; la seconda prevede la raccolta di piante intere con la formazione di cataste a bordo campo consentendo l'essiccazione naturale all'aria del materiale. La produzione in sostanza secca annualmente si aggira sulle 10-12 t/ha.

Robinia (Robinia pseudoacacia L.)

La robinia (*Robinia pseudoacacia L.*), appartenente alla famiglia delle *Leguminosae*, è originaria dell'America nord-orientale (Monti Appalachi) ed è stata introdotta in Europa agli inizi del '600. È una specie rustica, frugale, in grado di migliorare il terreno attraverso la fissazione dell'azoto atmosferico.

Caratteristiche botaniche e morfologiche

La robinia presenta un fusto eretto e slanciato, alto fino a 20 m. Le foglie sono caduche, alterne, imparipennate, formate da 5-12 paia di foglioline. I fiori, con corolla bianca e papilionacea, sono portati in grappoli penduli all'ascella delle foglie. I frutti sono legumi schiacciati, coriacei, lisci e di color bruno.

Esigenze pedoclimatiche

È una specie rustica, caratterizzata da una notevole adattabilità pedoclimatica, nei nostri climi può vegetare dal livello del mare fino ad oltre 1.000 m di quota. Predilige suoli liberi da calcare, sciolti e ben drenati, ma si adatta anche a quelli compatti. Nelle prime fasi di sviluppo può tollerare un certo grado di ombreggiamento, in seguito diviene spiccatamente eliofila.

Tecnica colturale

L'impianto prevede l'utilizzo di semenzali di un anno a radice nuda. La messa a dimora viene effettuata con le comuni trapiantatrici fore-

stali o per l'orticoltura. In questo ultimo caso, il materiale deve essere sottoposto a potatura allo scopo di ridurre a 10 cm l'apparato epigeo e quello ipogeo. Nelle *Short Rotation Forestry* (SRF), la densità è di 10.000-15.000 piante per ettaro. Il materiale può essere disposto in campo su file semplici o su file binate. La specie non necessita di concimazioni azotate, avvantaggiandosi della fissazione simbiotica dell'azoto atmosferico ad opera di batteri del genere *Rhizobium*. Fosforo e potassio vengono invece somministrati durante i lavori preparatori del terreno. La lotta alle malerbe si effettua con diserbo chimico al momento della preparazione del terreno; in seguito, dopo la messa a dimora delle talee, si interviene con prodotti residuali con azione antigerminello; nell'interfila vanno eseguite delle sarchiature. L'irrigazione della coltura non è economicamente proponibile, sono previsti interventi di soccorso nelle primavere particolarmente siccitose per favorire l'attecchimento delle talee e dei semenzali.

La raccolta va effettuata a 2-4 anni dall'impianto, quando il diametro al colletto è al massimo di 10 cm. Si interviene durante il riposo vegetativo, con due modalità di raccolta: una eseguita con macchine "falciatrice-trincia-caricatrici" che permette l'ottenimento di un prodotto cippato con alto contenuto in umidità (50-55%) e pertanto facilmente deteriorabile; la seconda prevede la raccolta di piante intere con la formazione di cataste a bordo campo consentendo l'essiccazione naturale all'aria del materiale (combustibile più asciutto). Nel caso della robinia, al termine del ciclo produttivo, quando si effettua la triturazione delle ceppaie, occorre prevedere anche un trattamento con un dissecante per eliminare il ricaccio dei polloni. La produzione in sostanza secca si aggira sulle 5 t/ha.

6.1.2 Colture oleaginose

Girasole (Helianthus annuus L.)

Il girasole, *Helianthus annuus*, appartiene alla famiglia delle *Asteraceae* (*Compositae*), ed è la più importante tra le 100 specie del genere *Helianthus*. Il nome "girasole" deriva dal caratteristico movimento eliotropico che le piante di questa specie presentano durante la fase giovanile: esse possono ruotare, mediante torsione del peduncolo, in modo da mantenere l'apice sempre rivolto verso il sole. All'alba le calatidi sono rivolte verso Est, poi iniziano a ruotare per trovarsi, al tramonto, rivolte verso Ovest; durante la notte il peduncolo si torce in senso opposto. Questa particolare caratteristica cessa prima che le

calatidi giungano a maturazione, dopo di che le calatidi rimangono costantemente rivolte verso Nord - Nord Est.

Figura 52 - Fiore di girasole



Caratteristiche botaniche e morfologiche

Il girasole è una pianta erbacea annuale, caratterizzata da un notevole sviluppo dei suoi organi, sia per quanto riguarda la lunghezza dello stelo che la larghezza dell'infiorescenza. Il fusto si presenta eretto, tendenzialmente cilindrico, robusto, rugoso, ispido e ripieno all'interno di midollo. Le specie da olio hanno in genere un'altezza compresa tra 0,6 e 2,2 metri. Il fusto è eretto solo a maturazione e si piega nella parte terminale per il peso della calatide. Le foglie (presenti in numero variabile tra 12 e 40) sono alterne, grandi, semplici, lungamente picciolate, cordate od ovate, acute, dentate. Il girasole presenta un'infiorescenza terminale a capolino detta "calatide", costituita da un ricettacolo discoidale piatto circondato da una doppia o plurima serie di brattee. Nelle varietà coltivate le calatidi hanno un diametro di 15-50 cm e sono formate da 700-3.000 fiori (nelle varietà da olio). L'impollinazione è entomofila. Il frutto è un achenio (frutto secco indeiscente) di forma allungata, costituito da un pericarpo duro e fibroso aderente al seme, di colore variabile dal bianco al nero, molto spesso grigio scuro, con striature più o meno chiare a seconda della varietà.

L'apparato radicale è fascicolato e molto sviluppato, soprattutto nei primi 40 cm di terreno.

Esigenze pedoclimatiche

Il girasole è una pianta a ciclo primaverile estivo che dimostra buona adattabilità e non presenta esigenze eccessive. Essendo originaria di ambienti a clima temperato, predilige temperature relativamente alte; le esigenze termiche sono maggiori nelle prime fasi di crescita e diminuiscono leggermente alla maturazione: la temperatura ottimale di germinazione è di 15°C, per le prime fasi di sviluppo di 18°C, mentre per la fioritura e maturazione di 18-22°C.

Il girasole non ama i substrati troppo sciolti, in quanto tendenzialmente sterili e incapaci di trattenere l'acqua, e quelli pesanti e freddi; predilige terreni di medio impasto, profondi oppure quelli organici. È moderatamente tollerante della salinità.

Tecnica colturale

Nonostante il suo apparato radicale abbia struttura fittonante, il girasole non possiede forte capacità penetrativa nel terreno, pertanto necessita di adeguati interventi preparativi, in particolar modo nei terreni più tenaci. Per quanto riguarda le concimazioni si prevede la distribuzione di 100 unità/N/ha in un'unica distribuzione di copertura al momento della sarchiatura o, in alternativa, dosi lievemente superiori in pre-semina; per il fosforo si distribuiscono 50 unità/P/ha localizzate alla semina o, in alternativa, 70 a pieno campo. È possibile eliminare del tutto la concimazione fosfatica nei terreni ben dotati (orientativamente al di sopra di 20 ppm di P Olsen); per il potassio vale il principio di non concimare i terreni a dotazione medio-buona, intervenendo solo in quelli carenti con una dose di circa 60 unità per ettaro, più che compensativa delle reali asportazioni.

L'epoca ottimale per la semina varia dalla fine di marzo ad aprile. La densità è compresa tra 50.000 e 70.000 piante/ha; si possono impiegare seminatrici da mais o da barbabietola. La distanza tra le file è quindi normalmente compresa tra i 45 e i 70 cm. La quantità di seme necessaria varia da 5 a 7 kg/ha. Per quanto riguarda la lotta alle malerbe, il girasole, grazie alla rapidità del suo sviluppo, ha normalmente effetto soffocante sulle erbe infestanti; va tuttavia protetto nelle fasi iniziali del ciclo. La lotta viene effettuata con sarchiature, finché l'altezza delle piante lo permette (40 cm), e/o con trattamenti chimici.

La raccolta viene fatta quando gli acheni, il cui contenuto in acqua è inferiore al 10%, si staccano facilmente dalla calatide; ciò avviene circa 15-20 giorni dopo la maturazione completa che si raggiunge quando la calatide e le foglie si presentano secche e gli steli sono di color bruno. In Italia il girasole viene raccolto dalla metà di agosto (nelle

zone più calde) alla metà di settembre, utilizzando le mietitrebbiatrici da frumento adattate o con testata da mais dotata di spartitore per ogni fila.

Come è noto il legislatore comunitario ha posto in essere il Regolamento (CE) n. 2461/1999 della Commissione, in data 19/11/1999, recante modalità d'applicazione del regolamento (CE) n. 1251/1999 sull'uso di superfici ritirate dalla produzione per ottenere materie prime per la fabbricazione di prodotti non destinati al consumo umano o animale.

Sulla scia di quanto previsto dal legislatore comunitario, l'Agea (Agenzia per le erogazioni in agricoltura) ha ritenuto opportuno emanare la Circolare 1 marzo 2004, n. 5 (in G.U. n. 58 del 10/03/2004) che stabilisce per ogni Provincia italiana le rese preventive da applicare ai terreni a riposo e destinati alla trasformazione industriale per uso non alimentare. Le rese sono considerate rappresentative e applicabili alla campagna 2004/2005 per i contratti delle colture che risultano coltivate su terreni ritirati dalla produzione allo scopo di ottenere materiali per la fabbricazione nella Comunità di prodotti non destinati al consumo umano o animale.

Vengono qui di seguito riportate le rese preventive del girasole non food da applicare ai terreni messi a riposo, nella regione Friuli Venezia Giulia per la campagna 2004/2005 (tabella 51).

Tabella 51 - Rese preventive per zone omogenee per la coltura del girasole (t/ha)

Provincia	Nome zona	Resa 04/05 (t/ha)
Udine	Montagna int.	1,33
Udine	Collina int.	1,85
Udine	Pianura	2,41
Gorizia	Collina int.	1,25
Gorizia	Pianura	2,43
Trieste	Collina lit.	1,20
Pordenone	Montagna int.	1,10
Pordenone	Collina int.	1,82
Pordenone	Pianura	2,22

Colza (*Brassica Napus* L.)

Il colza (*Brassica napus* L. var. *oleifera* D.C.) appartiene al gruppo delle piante oleaginose, in particolare alla famiglia delle *Cruciferae* e al genere *Brassica*. Spontanea in Europa e nel nord-ovest dell'Africa, si ritiene sia stata addomesticata dopo che fu apprezzato il valore nutritivo del seme di questa malerba, spesso infestante dei campi di cereali.

Figura 53 - Piante di colza (fonte: www.kulak.ac.be)



Caratteristiche botaniche e morfologiche

Il colza coltivato è una pianta erbacea annuale. L'apparato radicale è fittonante, non molto profondo e si espande soprattutto nei primi 35-40 cm di suolo. Il fusto si presenta eretto e ramificato, normalmente raggiunge un'altezza di 1,5 m e differenzia circa 20 foglie; nei primi stadi di crescita si presenta molto raccorciato ed è formato da una rosetta di foglie; negli stadi successivi gli internodi superiori dello stelo si allungano (levata).

L'infiorescenza a grappolo è terminale, formata da 150-200 fiori ermafroditi, aventi la struttura tipica delle *Cruciferae*. La fioritura è scalare basipeta, procede cioè dalla base verso l'apice dei vari rami dell'infiorescenza, e dura circa un mese. Il colza è autofertile ed entomofilo, ed è possibile sia la fecondazione autogama che allogama. Il frutto che si

sviluppa dal fiore fecondato è una siliqua (frutto secco deiscente). La deiscenza delle silique ha da sempre rappresentato un grave problema pratico, in quanto la sgranatura alla raccolta comporta ingenti perdite di prodotto. Proprio per risolvere questo inconveniente sono state selezionate nuove varietà di colza che presentano un grado di indeiscenza sufficiente a consentire un certo ritardo nella raccolta senza eccessivo danneggiamento. I semi sono piccoli, lisci e sferici, con tegumento di colore bruno rossastro che diventa più scuro col procedere della maturazione.

Biologia

Nel clima italiano il ciclo biologico del colza è autunno-primaverile. Seminato tra la fine di settembre e i primi di ottobre, emerge dal terreno dopo 10-15 giorni con le due foglie cotiledonari; successivamente emette nuove foglie che formano una rosetta. È proprio questo lo stadio di massima resistenza al freddo (6-8 foglie, fittone di 15-20 cm e colletto del diametro di 6-7 mm): fino a diversi gradi sotto zero (-15°C), purché non vi siano ristagni d'acqua.

Nel corso dell'inverno, sotto l'azione delle basse temperature (vernalizzazione) avviene il viraggio dell'apice, che cessa di formare foglie per formare gli abbozzi fiorali. È fondamentale dire che le varietà autunnali non entrano nella fase riproduttiva se non sono state sottoposte a un periodo di vernalizzazione che si realizza con la permanenza, per almeno 40 giorni, a temperature inferiori a 10°C.

La levata inizia nella seconda metà di marzo, quando il fusto è lungo circa 20 cm ed è già visibile l'infiorescenza principale. Nella prima decade di aprile, nonostante la pianta non abbia terminato la crescita vegetativa, inizia la fioritura; non è raro osservare sulla stessa infiorescenza la presenza contemporanea di fiori in boccio, fiori in antesi e silique.

Dopo 30-40 giorni dalla fecondazione i semi cominciano a riempirsi di materiali di riserva: il contenuto di olio raggiunge il massimo valore dopo circa 60 giorni. Il seme giunge a maturazione dopo 80 giorni dalla fioritura. Alla maturità delle silique la pianta si presenta in gran parte defogliata e con la parte terminale dello stelo e delle ramificazioni secche.

Esigenze pedoclimatiche

Il colza è una pianta microterma e non necessita quindi di temperature elevate per svilupparsi. Lo zero di vegetazione è a 6-8°C. Questa coltura teme periodi siccitosi soprattutto durante le fasi di levata e fioritura. Il colza predilige climi temperati, umidi, non troppo soleggiati.

giati. La pianta, nel complesso, non è particolarmente esigente: predilige terreni profondi, freschi, fertili e leggeri, si adatta a quelli argillosi, calcarei e torbosi, purché ben drenati. Tollera sufficientemente la salinità e il pH del terreno.

Tecnica colturale

Nelle regioni asciutte del Centro-Nord Italia il colza può avvicinarsi al frumento. Conseguono ottimi risultati dopo leguminose pratensi o da granella mentre non risulta conveniente la successione a se stesso, soprattutto quando si verificano attacchi di *Phoma lingam*, agente fungino responsabile del cancro del fusto delle *Brassicaceae*.

Particolare attenzione deve essere riservata alla preparazione del letto di semina, in quanto i semi sono di dimensioni ridotte. Normalmente viene eseguita un'aratura di media profondità (25-30 cm). Nel caso in cui il terreno si presentasse troppo soffice al momento della semina è necessaria una rullatura.

Il colza ha fabbisogni nutritivi abbastanza contenuti. Alla fine del ciclo la coltura contribuisce ad arricchire il terreno di sostanza organica e di elementi nutritivi con l'abbondante massa dei suoi residui colturali. Si sottolinea anche che, compiendo buona parte del suo ciclo nei mesi freddi e piovosi, esplora attivamente il terreno, intercettando e assorbendo nitrati, contribuendo così a limitare i rischi di lisciviaggio.

Le concimazioni consigliate sono di 80-120 unità N/ha in un'unica distribuzione alla ripresa vegetativa di fine inverno; di 50 unità P/ha in pre-semina a pieno campo, o localizzate; è possibile eliminare del tutto la concimazione fosfatica nei terreni ben dotati (P Olsen oltre 20 ppm). Normalmente non necessita di concimazione con potassio.

Il colza presenta un seme di dimensioni minute che richiede un letto di semina ben preparato in quanto la profondità di deposizione deve essere necessariamente minima. Il periodo per la semina varia in funzione dell'ambiente di coltivazione. In linea generale si opera in modo da far raggiungere alla pianta lo stadio di rosetta al sopraggiungere dei primi freddi. Per quanto riguarda le coltivazioni italiane, la data consigliabile è compresa tra la metà di settembre e quella di ottobre. La semina viene effettuata a file continue, distanti 15-20 cm, con 10-12 kg/ha di seme, alla profondità di 2-3 cm, adottando una seminatrice da grano. Con l'impiego di seminatrici pneumatiche di precisione si può ridurre la quantità di seme a 5-8 kg/ha e adottare una distanza tra le file fino a 45 cm e 2-2,5 cm sulla fila, in maniera da consentire la sarchiatura meccanica, particolarmente efficace per il controllo di infestanti (soprattutto crucifere). Molto importante è assi-

curare una densità ottimale alla raccolta intorno alle 40 piante/m², tenendo presente che densità elevate predispongono le piante all'allettamento e le rendono più soggette a danni da freddo.

La raccolta viene effettuata quando l'umidità del seme è inferiore al 14%, in tali condizioni le piante sono secche e i semi sono neri. La data è compresa, al Nord Italia, tra la seconda e la terza decade di giugno. Si impiegano mietitrebbie con testata per frumento opportunamente regolate.

Le attuali produzioni medie sono dell'ordine di 2,6 t/ha, con punte di oltre 3 t/ha nel Nord Italia. Queste ultime, quindi, sono da ritenere un obiettivo fattibile per le superfici a *set-aside*. A questo proposito si sottolinea che le rese medie nel Centro-Europa (Francia-Germania) variano dalle 3 alle 4 t/ha a seconda del clima.

Anche per il colza si riporta la Circolare 1 marzo 2004, n. 5 (in G.U. n. 58 del 10/03/2004) dell'Agea (Agenzia per le erogazioni in agricoltura) riguardante le rese preventive da applicare ai terreni a riposo e destinati alla trasformazione industriale per uso non alimentare. Le rese, qui riferite quelle riguardanti la regione Friuli Venezia Giulia (tabella 52), sono considerate rappresentative e applicabili alla campagna 2004/2005 per i contratti delle colture che risultano coltivate su terreni ritirati dalla produzione allo scopo di ottenere materiali per la fabbricazione nella Comunità di prodotti non destinati al consumo umano o animale.

Tabella 52 - Rese preventive per zone omogenee per la coltura del colza (t/ha)

Provincia	Nome zona	Resa 04/05 (t/ha)
Udine	Montagna int.	1,00
Udine	Collina int.	1,75
Udine	Pianura	1,80
Gorizia	Collina int.	1,00
Gorizia	Pianura	1,86
Trieste	Collina lit.	1,00
Pordenone	Montagna int.	1,00
Pordenone	Collina int.	1,19
Pordenone	Pianura	1,32

6.1.3 Colture alcoligene

Barbabetola da zucchero (Beta vulgaris var. saccharifera)

Pianta base per la produzione di zucchero, venne sfruttata solo dal 1700 per questa sua attitudine, permettendo allo zucchero, una volta prodotto solo da canna da zucchero, di diventare un prodotto di uso generalizzato. Lo zucchero prodotto è il saccarosio, ovvero un disaccaride composto da glucosio e fruttosio.

Caratteristiche botaniche e morfologiche

La barbabietola da zucchero appartiene alla famiglia delle *Chenopodiaceae* e ha un ciclo biologico biennale. Nel primo anno si sviluppa una rosetta di foglie ampie, spesse, lisce o bollose. Nel corso dell'inverno si arresta la vegetazione, riprendendo nella primavera del secondo anno con lo sviluppo di un fusto florale di circa un metro di altezza, provvisto di numerose ramificazioni portanti fiori verdastri. I semi, piccoli e bruni, sono racchiusi in un involucri rugoso, detto glomerulo.

Nella coltura per la produzione dello zucchero, la barbabietola è matura per la raccolta nel primo anno, quando il fittone ha cessato di ingrossarsi e di accumulare saccarosio, e le foglie ingialliscono. La radice fittonante, di forma conica, ha un contenuto medio in saccarosio pari al 15% del suo peso.

Esigenze pedoclimatiche

La coltivazione della barbabietola si avvantaggia particolarmente di terreni profondi e permeabili, capaci di trattenere elevate quantità d'acqua, ma ben drenati. La tessitura del terreno influenza il risultato nelle sue componenti produttive e qualitative, in quanto nei terreni limoso-sabbiosi si conseguono tenori zuccherini contenuti, ma elevate rese, mentre nei terreni argillosi si verifica un andamento opposto. Buona tolleranza ai terreni salini.

Riguardo le esigenze climatiche, la temperatura minima di germinazione ed emergenza è di 6°C; temperature comprese tra i 10°C e i 20°C e alta intensità luminosa favoriscono l'accumulo dello zucchero nel fittone.

Tecnica colturale

La preparazione del terreno per la barbabietola viene fatta seguendo le normali pratiche agricole e in funzione della tipologia di terreno: è

da ricordare che il fittone deve poter penetrare in profondità senza trovare strati che ne limitino lo sviluppo e che la coltura è sensibile ai ristagni idrici. Si procede quindi a una lavorazione superficiale, unita a una rippatura, specie in terreni argillosi, al fine di garantire un profilo omogeneo e con buona riserva d'acqua.

La scelta relativa all'epoca di semina è correlata alla natura dei terreni, infatti, nei terreni freddi che presentano inizialmente uno sviluppo rallentato della vegetazione, risulta opportuno posticipare le semine alla prima decade di marzo. Negli altri terreni le semine procedono dalla seconda metà di febbraio. La profondità ottimale di semina è correlata all'epoca di semina: nelle semine più precoci si hanno profondità pari a 2-3 cm, in quelle tardive 3-4 cm. Gli investimenti hanno l'obiettivo finale di 10-12 piante/m², con una distanza tra le file di 45 cm. L'avvicendamento è essenziale per la barbabietola, infatti, visto l'elevato numero di parassiti (cercospora e nematodi), la coltura deve tornare sullo stesso terreno ogni quattro anni e nella rotazione non si possono prevedere colture come colza o altre crocifere in quanto ospiti di nematodi.

Per quanto riguarda la concimazione, la barbabietola necessita di 60-100 unità N/ha distribuite alla semina e ulteriori 40-60 unità N/ha in copertura se necessario, mentre il fosforo viene distribuito in maniera localizzata alla semina, 70-90 unità P₂O₅/ha, visto il suo effetto *starter*. In terreni normalmente dotati non si necessita di concimazione potassica. In certi areali del Friuli Venezia Giulia si possono riscontrare carenze di alcuni microelementi, come il boro o il manganese.

La qualità della barbabietola da zucchero è fortemente influenzata dalle modalità di raccolta delle radici. La tara per terra, le modalità di scollettatura, le ferite o rotture dei fittoni e la conservazione sono fattori che influenzano fortemente il prodotto finale. La raccolta si effettua tra agosto e i primi di settembre, mediante apposite macchine che provvedono alla scollettatura e defogliazione delle piante, alla estirpazione e al carico. La produzione in fittoni varia tra le 45 e le 50 t/ha.

Frumento tenero (Triticum aestivum L.)

Il frumento tenero (*Triticum aestivum* L.) appartiene alla famiglia delle *Graminaceae*. È una pianta che è stata, ed è, un alimento centrale per le popolazioni europee. La coltura risale a 6.000-10.000 anni fa, dapprima in Asia minore sino a diffondersi nel Mediterraneo. Ad oggi il

frumento tenero è coltivato dai 67°N, di Finlandia e Russia, ai 45°S dell'Argentina, e si trova anche in alcune zone tropicali e subtropicali come Kenya e Mozambico.

Figura 54 - Spighe di frumento tenero (fonte: www.cermis.it)



Caratteristiche botaniche e morfologiche

Il frumento tenero è un cereale autunno-vernino, microtermo. La pianta presenta un apparato radicale fascicolato e un fusto con nodi e internodi, e con foglie a bandiera. Le diverse fasi fenologiche prevedono la fuoriuscita del coleoptile dal seme, l'accestimento, la levata, la fioritura e la spigatura.

Il culmo può arrivare a 70-80 cm di altezza, a seconda delle condizioni ambientali e delle caratteristiche genetiche: altezze superiori possono aumentare il rischio di allettamento della pianta. Il culmo presenta 5-8 nodi e internodi ed è cilindrico e cavo. Dopo che la plantula ha emesso 3-4 foglie dai nodi basali si originano culmi secondari (accestimento). Le foglie sono da 5 a 8. L'apparato radicale fascicolato prevede la presenza iniziale delle radici primarie che vengono poi sostituite dalle radici avventizie, le quali si sviluppano dai primi nodi del fusto a 2-3 cm sotto la superficie del terreno. L'infiorescenza è una spiga al cui rachide seghettato sono attaccate 18-20 spighette. Il frutto è una cariosside amidacea.

Le diverse varietà di frumento vengono classificate mediante un indice sintetico di qualità (ISQ) che prevede, in base ad alcuni parametri tecnologici, la suddivisione nelle classi di destinazione d'uso: frumenti di forza (FF), frumenti panificabili superiori (FPS), fru-

menti panificabili (FP), frumenti da biscotto (FB) e frumenti per altri usi (FAU).

Esigenze pedoclimatiche

Il frumento tenero si adatta soprattutto ai terreni ben dotati, di medio impasto e argillosi, mentre dà produzioni scadenti in suoli sabbiosi, poveri o a reazione acida. Le varietà a semina invernale coltivate in Italia sopportano bene i freddi invernali e richiedono a partire dalla levata, temperature crescenti. In fase di maturazione il frumento si avvantaggia di un clima caldo e poco piovoso anche se gli eccessi di temperatura, accompagnati da vento caldo, possono determinare la formazione di granella striminzita e scarse rese. È una pianta con medie esigenze idriche, concentrate soprattutto nel periodo tra la levata e le prime fasi di maturazione; teme fortemente, specie nei periodi freddi, il ristagno di acqua nel terreno a seguito del quale si verificano sviluppo stentato per asfissia radicale e attacchi parassitari; teme inoltre i forti venti e i temporali primaverili in quanto causa di allettamento.

Tecnica culturale

La pratica più diffusa per la preparazione del letto di semina prevede una aratura, più o meno profonda, e successive operazioni di affinamento. Negli ultimi anni comunque si stanno mettendo in mostra dei sistemi alternativi, con lavorazioni semplificate del terreno, che vanno dalla riduzione della profondità dell'aratura tradizionale alla minima lavorazione, sino ai casi estremi di non lavorazione del terreno, tecnica conservativa radicale. Ciò al fine di ridurre i costi culturali e per risolvere alcuni problemi di tipo ambientale e agronomico.

L'epoca di semina, nel Nord Italia, va da ottobre ai primi di novembre e vengono utilizzati circa 180 kg di seme/ha. La profondità di semina va dai 3 ai 5 cm per i terreni umidi o sciolti rispettivamente. Riguardo alla scelta varietale, oltre alle caratteristiche qualitative, vanno considerate per i loro riflessi sulla qualità e sulla difesa, la fertilità della pianta, la resistenza all'allettamento e la sensibilità ai parassiti, che vanno correlate all'ambiente in cui si opera. Per quanto riguarda le concimazioni, come per le altre colture si rende necessaria una stima delle asportazioni della coltura. Si consigliano 50-80 unità N/ha in fase di accestimento della coltura e 70-90 unità N/ha in fase di levata; per quanto riguarda fosforo e potassio non si effettuano fertilizzazioni in terreni normalmente ben dotati, mentre si possono dare alla semina 70 e 60 unità/ha di fosforo e potassio, rispettivamente, nei rimanenti terreni.

La raccolta si esegue a maturazione piena della granella quando l'umidità della stessa è inferiore a 13,5%, che è il limite massimo per una buona conservazione. Il periodo di raccolta va da giugno a luglio. Le produzioni medie di granella sono di 8 t/ha (13% umidità). Da ricordare che, con il miglioramento genetico, è stato modificato l'*harvest index* del frumento tanto che oggi è 1:1, ciò a dire che per 1 t di granella si ha 1 t di paglia, la quale è un'altra importante fonte di biomassa.

Mais (Zea mais L.)

Originario delle zone a clima tropicale e subtropicale del continente americano, il mais è stato importato in Europa ai tempi di Cristoforo Colombo. Alcuni reperti archeologici e paleobotanici hanno permesso di stabilire con una certa sicurezza che il mais era già conosciuto in Messico fin dall'epoca preistorica (tra i 2500 e i 5200 anni a.C.). Introdotto in Spagna nel 1493, il mais si diffuse abbastanza rapidamente negli altri Paesi europei prima a scopo ornamentale, un secolo dopo come risorsa alimentare. Dall'Europa, soprattutto per opera dei Portoghesi, il mais si diffuse in Africa e in Asia, mentre fu portato in America settentrionale dagli Inglesi.

Caratteristiche botaniche e morfologiche

Il nome scientifico, *Zea mays* L., deriva dalla parola greca *Zao* che significa "vivere" e dalla parola *Mayze* che significa "pane"; in definitiva la traduzione del nome botanico del mais potrebbe essere "pane di vita". Il mais appartiene alla famiglia delle *Graminacee*, tribù delle *Maydeae*; si tratta di una pianta dotata di fotosintesi con sistema C_4 ed è caratterizzata da un'alta capacità produttiva. È una pianta monoica, di taglia notevole (2-4 m); l'infiorescenza maschile è un pannicolo, detto penacchio, ed è portato all'apice del fusto grosso e carnoso, detto stocco. L'infiorescenza femminile è una spadice detta impropriamente pannocchia, la quale è costituita da un grosso asse centrale, il tutolo, sul quale si inseriscono un numero variabile di file di spigchette riunite in coppie (14-20) e che hanno un solo fiore fertile. La fecondazione è allogama e anemofila. Il frutto è una cariosside.

La pianta ha un unico asse con una modesta capacità di accestimento. Le foglie sono disposte alternativamente sui due lati dello stocco, una per nodo; hanno portamento eretto con lamina di forma lanceolata e nervatura mediana grossa.

Il mais presenta radici seminali, la cui funzione si esaurisce nei primi

stadi (5-6 foglie aperte), radici avventizie del tipo fascicolato, che hanno origine dalla corona, e radici aeree che prendono origine dai primi 2-3 nodi fuori terra e hanno funzione di ancoraggio.

Esigenze pedoclimatiche

Il mais è una pianta a ciclo estivo e viene seminata in primavera per utilizzare maggiormente la stagione utile; è sensibile al freddo, specialmente durante i primi stadi di sviluppo. La temperatura minima di germinazione è di 10°C, mentre quella ottimale di sviluppo varia tra i 24-30°C, in funzione dello stadio vegetativo della pianta. Per quanto riguarda le esigenze pedologiche, ottimi sono i terreni profondi con pH tra 6 e 6,5.

Tecnica colturale

Il mais è coltura con esigenze idriche elevate, ha taglia grande e un apparato radicale che raggiunge 1,5-2 m di profondità. La lavorazione tradizionale si basa sull'aratura a 25 cm per terreni sciolti e a 30-35 cm in terreni pesanti. Dopo l'aratura occorre affinare il terreno con operazioni di erpicatura. La tendenza è di arare in autunno in modo che il terreno in primavera sia già in parte preparato.

L'epoca ottimale di semina si ha quando la temperatura media del suolo raggiunge almeno i 9-10°C, il che avviene normalmente nel mese di aprile. L'epoca di semina varia anche in funzione della classe dell'ibrido utilizzato; generalmente per ogni ibrido viene consigliato l'investimento ottimale: maggiore per gli ibridi precoci (7-8 piante/m²) rispetto agli ibridi più tardivi (5-6 piante/m²) e per la produzione di insilato rispetto alla produzione di granella. La semina del mais viene fatta con una distanza tra le file di 75 cm.

Il mais è una specie molto esigente che necessita orientativamente 200-250 kg/ha di N, 120 kg/ha di P₂O₅ e di 100 kg/ha di K₂O. L'azoto viene assorbito quasi esclusivamente in forma nitrica. Spesso la disponibilità idrica risulta uno dei fattori limitanti, dovendo essere forniti circa 300-400 m³/ha di acqua mediante irrigazione.

Per la raccolta di mais trinciato (silomais) si utilizza una falcia-trincia-caricatrice e si effettua nella seconda metà di agosto, a seconda della classe utilizzata, quando sopraggiunge la maturazione cerosa della granella. Le piante vengono trinciate intere, con una umidità attorno al 65%. Le produzioni in sostanza secca variano da 22 a 26 t/ha.

La raccolta della granella si effettua allo stato umido con una umidità compresa tra il 21-28%, in genere 10-15 giorni dopo la maturazione fisiologica. Una ulteriore riduzione di umidità in campo può portare

all'insorgenza di problematiche riguardo la presenza di aflatossine e altre micotossine. La raccolta si effettua con una trebbiatrice da mais. La produzione media di granella in Regione nel 2004 è stata di 7,7 t/ha, ma altamente variabile in funzione del terreno e degli input colturali, sino ad arrivare a produzioni di 14-15 t/ha.

Sorgo zuccherino (Sorghum bicolor L. var.saccharatum)

Il sorgo zuccherino appartiene alla specie *Sorghum bicolor* (famiglia delle *Poaceae*) come quello da granella, da zucchero e da scope. Dal punto di vista morfologico, tra sorgo da fibra e sorgo zuccherino non si rilevano differenze sostanziali, tanto che spesso la linea di demarcazione tra l'uno e l'altro è piuttosto incerta. La composizione analitica della pianta, invece, diverge notevolmente tanto da giustificarne il differente impiego: infatti i due tipi estremi mostrano una diversa destinazione del carbonio organicato durante la fotosintesi; nel tipo da fibra prevale la produzione di carboidrati strutturali, in particolare di cellulosa; nel tipo da zucchero, invece, almeno il 30% di tutta la sostanza secca accumulata è costituito da zuccheri semplici (saccarosio, glucosio e fruttosio).

Il midollo, nei tipi zuccherini, è ricco in saccarosio (15-20%), ma la presenza di glucosio e fruttosio liberi ostacola la cristallizzazione del saccarosio rendendo tecnicamente impossibile l'utilizzazione del sorgo zuccherino per la produzione di zucchero cristallizzato.

Il sorgo zuccherino è solitamente utilizzato come foraggio o per la produzione di melassa.

Le esigenze pedoclimatiche e le principali tecniche colturali sono del tutto simili a quelle del sorgo da fibra.

L'elevato contenuto in sostanze zuccherine e l'elevato contenuto in acqua degli steli delle piante causano grossi problemi per lo stoccaggio della biomassa raccolta, vista la facilità ad andare in contro a fenomeni fermentativi.

Per quanto riguarda la tipologia raccolta, oltre alle tecniche già accennate per il sorgo da fibra, sono state realizzate specifiche macchine atte alla raccolta della canna intera di sorgo che ne permette lo stoccaggio per 30 giorni ed evitare perdite di zuccheri.

Le produzioni in sostanza fresca si aggirano sulle 80 t/ha mentre quelle in zucchero tra le 7 e le 8 t/ha.

6.2 Allegato 2: composizione chimica media di alcune biomasse

Vengono presentati i valori tipici di alcuni biocombustibili.

Simboli e abbreviazioni:

d – sostanza secca

daf – secco e privo di ceneri

w/w – peso/peso

Tabella 53 - Valori informativi per biomassa legnosa vergine, senza o con modesta presenza di corteccia, foglie e aghi⁸⁸

Parametro	Unità di misura	Conifere		Latifoglie	
		Valore tipico	Variazione tipica	Valore tipico	Variazione tipica
Ceneri	% w/w d	0,3	0,2-0,5	0,3	0,2-0,5
p.c.i.	kcal/kg daf	4.600	4.500-4.700	4.500	4.400-4.600
Carbonio, C	% w/w daf	51	47-54	49	48-52
Idrogeno, H	% w/w daf	6,3	5,6-7,0	6,2	5,9-6,5
Ossigeno, O	% w/w daf	42	40-44	44	41-45
Azoto, N	% w/w daf	0,1	< 0,1-0,5	0,1	< 0,1-0,5
Zolfo, S	% w/w daf	0,02	< 0,01-0,05	0,02	< 0,01-0,05
Cloro, Cl	% w/w daf	0,01	< 0,01-0,03	0,01	< 0,01-0,03
Silicio, Si	mg/kg d	150	100-200	150	100-200

Tabella 54 - Valori informativi per cortecce vergini⁸⁹

Parametro	Unità di misura	Corteccia di Conifere		Corteccia di Latifoglie	
		Valore tipico	Variazione tipica	Valore tipico	Variazione tipica
Ceneri	% w/w d	4	2-6	5	2-10
p.c.i.	kcal/kg daf	4.800	4.500-5.000	4.800	4.500-5.000
Carbonio, C	% w/w daf	54	51-56	55	52-56
Idrogeno, H	% w/w daf	6,1	5,9-6,5	6,1	5,9-6,5
Ossigeno, O	% w/w daf	40	36-43	40	36-43
Azoto, N	% w/w daf	0,5	0,3-1,2	0,3	0,1-1,0
Zolfo, S	% w/w daf	0,1	0,02-0,2	0,1	< 0,02-0,2
Cloro, Cl	% w/w daf	0,02	< 0,01-0,05	0,02	< 0,01-0,05
Silicio, Si	mg/kg d	2.000	500-5.000	10.000	2.000-20.000

⁸⁸ CTI, 2003.

⁸⁹ CTI, 2003.

Tabella 55 - Valori informativi per biomassa legnosa vergine, residui di potatura⁹⁰

Parametro	Unità di misura	Conifere		Latifoglie	
		Valore tipico	Variazione tipica	Valore tipico	Variazione tipica
Ceneri	% w/w d	2	1-4	1,5	0,8-3
p.c.i.	kcal/kg daf	4.800	4.650-4.800	4.500	4.400-4.550
Carbonio, C	% w/w daf	52	50-53	52	50-53
Idrogeno, H	% w/w daf	6,1	5,9-6,3	6,1	5,9-6,3
Ossigeno, O	% w/w daf	41	40-44	41	40-44
Azoto, N	% w/w daf	0,5	0,3-0,8	0,5	0,3-0,8
Zolfo, S	% w/w daf	0,04	0,01-0,08	0,04	0,01-0,08
Cloro, Cl	% w/w daf	0,01	< 0,01-0,05	0,01	< 0,01-0,02
Silicio, Si	mg/kg d	3.000	200-10.000	150	75-250

Tabella 56 - Valori informativi per biomassa legnosa vergine, cedui a turno di rotazione breve⁹¹

Parametro	Unità di misura	Salice (Salix)		Pioppo	
		Valore tipico	Variazione tipica	Valore tipico	Variazione tipica
Ceneri	% w/w d	2	1,1-4		0,8-3
p.c.i.	kcal/kg daf	4.500	4.400-4.600		4.450-4.550
Carbonio, C	% w/w daf	49	47-51		47-51
Idrogeno, H	% w/w daf	6,2	5,8-6,7		5,8-6,7
Ossigeno, O	% w/w daf	44	40-46		40-46
Azoto, N	% w/w daf	0,5	0,2-0,8		0,2-0,8
Zolfo, S	% w/w daf	0,05	0,02-0,1		0,02-0,1
Cloro, Cl	% w/w daf	0,03	< 0,01-0,05		< 0,01-0,05
Silicio, Si	mg/kg d	-	2-7.200		

Tabella 57 - Valori informativi per residui colturali pagliosi, senza o con modesta presenza di granello⁹²

Parametro	Unità di misura	Paglia di grano, segale, orzo		Residui colturali del colza	
		Valore tipico	Variazione tipica	Valore tipico	Variazione tipica
Ceneri	% w/w d	5	2-10	5	2-10
p.c.i.	kcal/kg daf	4.400	4.200-4.650	4.400	4.200-4.650
Carbonio, C	% w/w daf	49	46-51	50	47-53
Idrogeno, H	% w/w daf	6,3	6,0-6,6	6,3	6,0-6,6
Ossigeno, O	% w/w daf	43	40-46	43	40-46
Azoto, N	% w/w daf	0,5	0,2-1,6	0,8	0,3-1,6
Zolfo, S	% w/w daf	0,1	< 0,05-0,2	0,3	< 0,05-0,8
Cloro, Cl	% w/w daf	0,4	< 0,1-1,2	0,5	< 0,1-1,2
Silicio, Si	mg/kg d	10.000	1.000-20.000	1.000	100-3.000

⁹⁰ CTI, 2003.⁹¹ CTI, 2003.⁹² CTI, 2003.

Tabella 58 - Valori informativi per la scagliola arundinacea (*Phalaris arundinacea*)⁹³

Parametro	Unità di misura	Raccolta estiva		Raccolta ritardata	
		Valore tipico	Variazione tipica	Valore tipico	Variazione tipica
Ceneri	% w/w d	6,4	2,5-10	5,6	2,0-9,5
p.c.i.	kcal/kg daf	4.550		4.450	
Carbonio, C	% w/w daf	49		49	
Idrogeno, H	% w/w daf	6,1		5,8	
Ossigeno, O	% w/w daf	43		44	
Azoto, N	% w/w daf	1,4		0,9	
Zolfo, S	% w/w daf	0,2		0,1	
Cloro, Cl	% w/w daf	0,6		0,1	
Silicio, Si	mg/kg d	12.000		18.000	

Tabella 59 - Valori informativi per fieno in genere e miscanto⁹⁴

Parametro	Unità di misura	Fieno in genere		Miscanto	
		Valore tipico	Variazione tipica	Valore tipico	Variazione tipica
Ceneri	% w/w d	7	4-10	4	1-6
p.c.i.	kcal/kg daf	4.400		4.400	
Carbonio, C	% w/w daf	49		49	
Idrogeno, H	% w/w daf	6,3		6,4	
Ossigeno, O	% w/w daf	43		44	
Azoto, N	% w/w daf	1,4		0,7	
Zolfo, S	% w/w daf	0,2		0,2	
Cloro, Cl	% w/w daf	0,8		0,2	
Silicio, Si	mg/kg d	15.000	3.000-25.000	-	2.000-10.000

Tabella 60 - Valori informativi per la paglia di mais⁹⁵

Parametro	Unità di misura	Paglia di mais	
		Valore tipico	Variazione tipica
Ceneri	% w/w d	11,5	9,7-13,5
p.c.i.	kcal/kg daf	4.950	4.850-5.000
Carbonio, C	% w/w daf	52,7	50,5-55,5
Idrogeno, H	% w/w daf	6,4	6,0-7,0
Ossigeno, O	% w/w daf	44,8	42,5-47,3
Azoto, N	% w/w daf	0,8	0,6-0,9
Zolfo, S	% w/w daf	0,09	0,07-0,13
Cloro, Cl	% w/w daf	-	-
Silicio, Si	mg/kg d	-	-

⁹³ CTI, 2003.⁹⁴ CTI, 2003.⁹⁵ CTI, 2003.

Tabella 61 - Valori informativi per paglia di girasole e ramaglie da potature di vite⁹⁶

Parametro	Unità di misura	Paglia di girasole		Ramaglie di potatura vite	
		Valore tipico	Variazione tipica	Valore tipico	Variazione tipica
Ceneri	% w/w d	11	8,8-12,9	2,6	2,2-3,1
p.c.i.	kcal/kg daf	3.900	3650-4.300	4.300	4.400-4.700
Carbonio, C	% w/w daf	45	42,7-46,8	48,5	47,6-49,3
Idrogeno, H	% w/w daf	5,1	4,8-5,6	6	5,9-6,0
Ossigeno, O	% w/w daf			44,5	43,7-45,4
Azoto, N	% w/w daf	1,1	0,3-1,9	0,83	0,77-0,88
Zolfo, S	% w/w daf	0,11	0,03-0,21	0,03	0,01-0,07
Cloro, Cl	% w/w daf	0,72	0,52-0,90	0,09	0,07-0,14
Silicio, Si	mg/kg d	-	-	-	-

Tabella 62 - Valori informativi per altre colture energetiche

Parametro	Unità di misura	Arundo donax ⁹⁷	Hibiscus cannabinus ⁹⁸	Sorgum bicolor ^{99*}	Panicum virgatum ¹⁰⁰
p.c.i.	kcal/kg daf	4.350	4.300	3.900	4.450
Ceneri	% w/w	3,40	3,60	5,60	10,1
Carbonio, C	% w/w daf	48,7	48,4	40,3	53,2
Idrogeno, H	% w/w daf	6,0	6,0	7,6	6,40
Ossigeno, O	% w/w daf	44,3	44,3	51,4	39,0
Azoto, N	% w/w daf	0,62	1,04	0,5	1,30
Zolfo, S	% w/w daf	0,12	0,15	0,1	0,11

* dati riferiti sulla sostanza secca con ceneri

⁹⁶ CTI, 2003.

⁹⁷ Miles *et al.*, 1995.

⁹⁸ Wilén, Moilanen, Kurkula, 1996.

⁹⁹ Angelini, Ceccarini, Bonari, 1999.

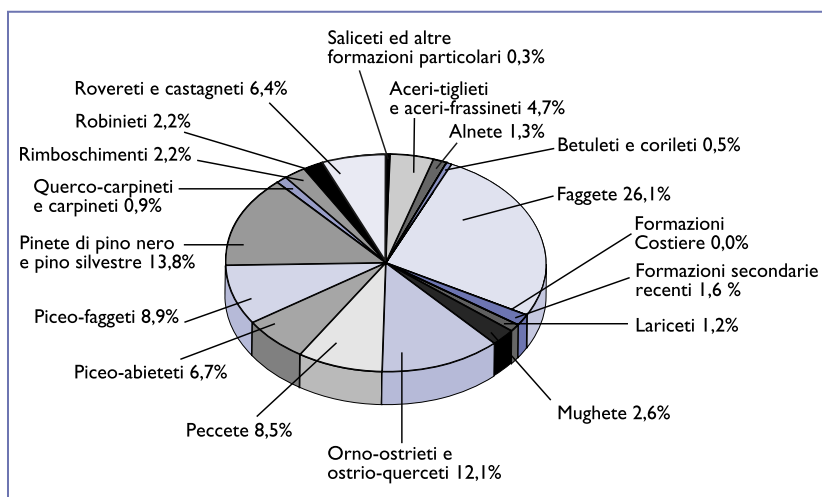
¹⁰⁰ http://edv1.vt.tuwien.ac.at/AG_HOFBA/BIOBIB/Biobib.htm (1997).

6.3 Allegato 3: disponibilità di biomasse a fini energetici nella regione Friuli Venezia Giulia

6.3.1 Le biomasse forestali

La superficie boscata della regione Friuli Venezia Giulia è pari a circa 285.000 ha (resinose 40%, latifoglie 60%) per un indice di boscosità pari al 36%, superiore all'indice nazionale (22,7%)¹⁰¹. Il tipo di governo prevalente è ad altofusto (circa il 67%), concentrato principalmente nella zona alpina. La restante parte è a ceduo composto (14%) e a ceduo semplice (19%)¹⁰² prevalentemente in zona prealpina e collinare. Circa 200.000 ha vengono gestiti, mentre il rimanente 30% è costituito da boschi che sono lasciati all'evoluzione naturale per fini di protezione idrogeologica e ambientale. I boschi vocati alla produzione legnosa sono prevalentemente di proprietà pubblica (collocati in genere nell'area alpina), anche se una consistente percentuale (oltre il 40%) è di proprietà privata (prevalentemente in area prealpina o collinare e caratterizzati da una marcata frammentazione della proprietà).

Figura 55 - Le formazioni forestali del Friuli Venezia Giulia



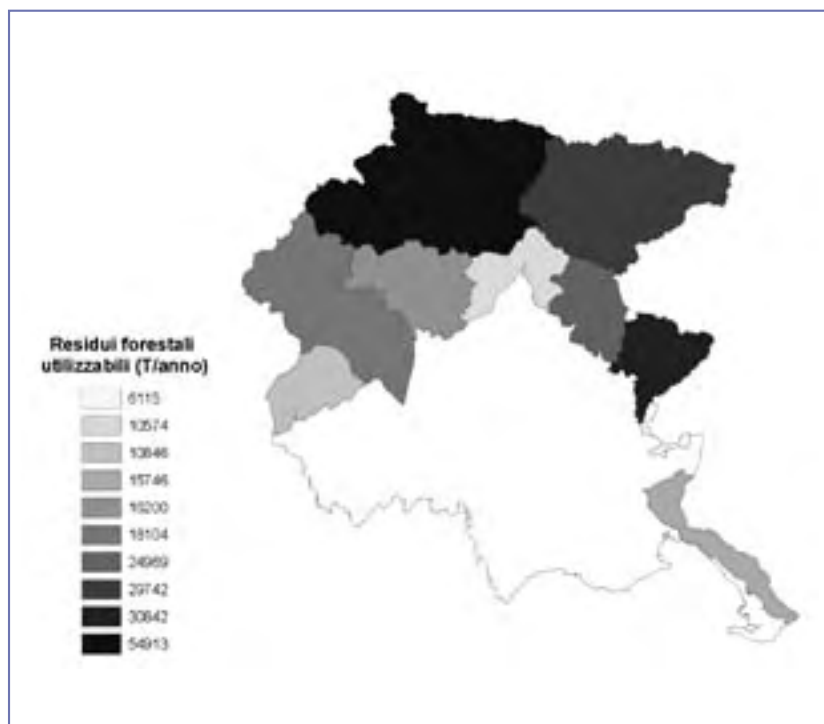
¹⁰¹ APAT, 2003.

¹⁰² ISTAT, 1997.

Le foreste di proprietà pubblica appartengono per la maggior parte agli enti comunali e sono interamente pianificate. Le principali formazioni forestali in Friuli Venezia Giulia¹⁰³ sono le seguenti (figura 55): 1) Carpineti e Quercio-Carpineti; 2) Rovereti e Castagneti; 3) Orno-Ostrieti e Orno-Querceti; 4) Aceri-Frassineti; 5) Faggete; 6) Pinete di Pino nero e Pino silvestre; 7) Piceo-Faggeti; 8) Abieteti; 9) Peccete; 10) Lariceti.

Applicando alle diverse formazioni forestali i rispettivi coefficienti di produttività e sulla base delle condizioni relative al tipo di gestione e all'accessibilità del territorio, si stima che i residui forestali utilizzabili in Friuli Venezia Giulia siano pari a circa 218.000 t/anno di sostanza fresca, corrispondenti a circa 220.000 m³/anno¹⁰⁴. L'incremento corrente annuo è stimato pari a circa 815.000 m³/anno.

Figura 56 - Residui forestali utilizzabili per bacino



¹⁰³ Del Favero, 1998.

¹⁰⁴ Giordano, 1955.

6.3.2 Le biomasse agro-forestali

L'estensione dei pioppeti nella regione Friuli Venezia Giulia può essere valutata pari a 6.300 ha, suddivisa tra i territori della Bassa e quella della Media Pianura Friulana dove la tessitura del suolo e la profondità della falda freatica garantiscono le condizioni ecologiche migliori per la pioppicoltura. La quantità di biomasse (sostanza fresca) derivabili possono essere valutate pari a circa 18.950 t/anno da residui di potatura e circa 11.300 t/anno da ceppaie, per un totale di 30.250 t/anno, corrispondenti a circa 37.500 m³/anno.

Per quanto concerne la biomassa legnosa derivabile da formazioni lineari e piccoli boschetti, localizzata prevalentemente nelle zone di pianura e collina, si stima che nel Friuli Venezia Giulia l'estensione dei filari (filari di alberi e siepi) sia pari a circa 4.619 km, dei boschetti pari a circa 380 ha, mentre delle aree rimboscate pari a 908 ha. La maggior parte di questa biomassa (il 60% del totale) viene già attualmente utilizzata come fonte di approvvigionamento di legna da ardere, principalmente da parte delle aziende agricole. La restante parte viene invece utilizzata a sostegno delle attività agricole come paleria. Partendo da queste considerazioni, la quantità di biomassa retraibile e utilizzabile a fini energetici viene stimata pari a circa 30.000 t/anno di sostanza fresca corrispondente a 29.500 m³/anno. Per quanto attiene alle piccole superfici boscate a ceduo, la produttività può essere stimata di 6.000 m³/anno¹⁰⁵ con un volume medio di circa 115 m³/ha (turno di 25 anni).

Tabella 63 - Disponibilità di biomassa forestale e agro-forestale in FVG

Disponibilità potenziale di biomassa forestale	35.000.000 m ³	815.000 m ³ /anno
di cui utilizzabile:		220.000 m ³ /anno
Disponibilità di biomassa agro-forestale	Pioppicoltura	37.500 m ³ /anno
	Siepi e boschetti	35.500 m ³ /anno
Prelievi ad uso energetico ¹⁰⁶		54.000 m ³ /anno
Disponibilità annua accessibile		239.000 m ³ /anno

¹⁰⁵ APAT, 2003.

¹⁰⁶ ISTAT, 2003.

6.3.3 I residui agricoli

In Friuli Venezia Giulia è particolarmente diffusa la coltivazione dei seminativi (i principali sono frumento tenero, mais, soia), presenti nel 90% delle aziende e sul 73,5% della SAU (superficie agricola utilizzata). Le coltivazioni legnose agrarie sono praticate dal 38,2% delle aziende, dedite prevalentemente alla coltura della vite, localizzata prevalentemente nella fascia collinare orientale (Collio), oltre che nell'area di Casarsa della Delizia. I dati disponibili sulle superfici coltivate, ripartite a livello comunale, riguardano le principali coltivazioni erbacee e legnose agrarie¹⁰⁷. Sulla base di questi dati sono state valutate dapprima le superfici coltivate relative alle colture dai cui residui si può derivare biocombustibile, quindi sono stati applicati i coefficienti di produzione e gli indici di asportazione per stimare (tabella 64) e localizzare (figure 57 e 58) la disponibilità di residui agrari a fini energetici.

Per quanto attiene alla disponibilità di materiale per scopi energetici, sono stati assunti differenti indici di disponibilità, a seconda delle tipologie delle colture. Per quelle legnose da frutto (drupacee, vite, pomacee e altri fruttiferi) il valore considerato è 0,2 (20%) poiché il residuo è costituito essenzialmente da scarti di potatura che per lo più vengono poi recuperati all'origine dall'agricoltore. Nel caso delle colture cerealicole invece il residuo è costituito da paglia e stocchi più facilmente recuperabili e utilizzabili per una ipotesi di recupero energetico centralizzato; l'indice di asportazione assunto è pari a 0,7 (70%)¹⁰⁸.

Tabella 64 - Stima della disponibilità dei residui del comparto agricolo utilizzabili a fini energetici

	Frumento (paglia)	Altri cereali	Vite (tralci)	Olivo (potature)	Fruttiferi (potature)
PN	3.056	106.160	5.109	5	621
GO	4.860	10.782	2.635	1	76
UD	17.254	198.010	5.525	9	746
TS	23	51	143	11	8
Totale	25.194	315.003	13.412	27	1.451

¹⁰⁷ ISTAT, 2002.

¹⁰⁸ CETA, 1994.

Figura 57 - Residui di biomasse agricole retraibili, derivanti da cereali (frumento e mais) su base comunale

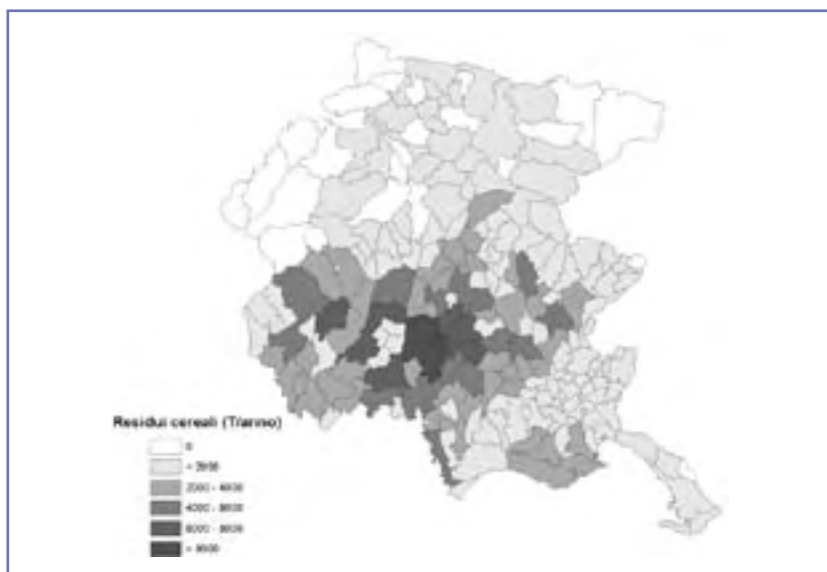
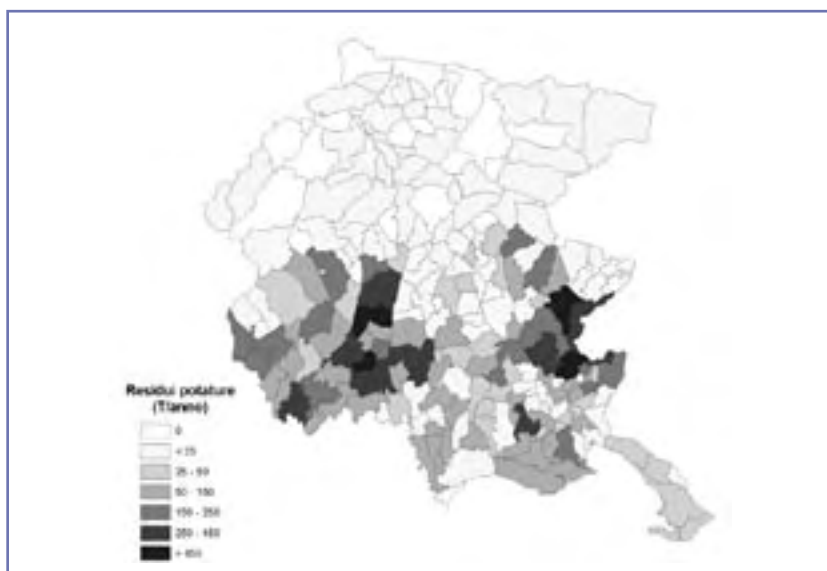


Figura 58 - Residui di biomasse agricole detraibili, derivanti da legnose (potature di vite, di olivo e di fruttiferi) su base comunale



6.3.4 Le colture oleaginose dedicate

A livello nazionale queste colture, in seguito alle regole della PAC di Agenda 2000, valide in pratica fino al raccolto 2004, hanno subito una netta riduzione dell'ettarato a causa della progressiva riduzione, fino alla completa abolizione, dell'aiuto differenziato: il girasole ha subito una contrazione di circa il 70%, la soia ha subito una contrazione del 45% e si è avuta conferma dell'abbandono pressoché totale del colza da parte dei produttori italiani.

Nel 2005 con la nuova riforma PAC e il pagamento unico aziendale, disaccoppiato dalla produzione, si è intravista una ripresa delle oleaginose a livello nazionale e soprattutto nel Centro Italia dove il girasole ha recuperato superfici sfruttando i terreni rimasti liberi in seguito ai disinvestimenti da grano duro¹⁰⁹.

A livello regionale dal 2001 si è registrata una progressiva contrazione delle superfici per le colture oleaginose (tabella 65): la limitata diffusione di girasole e colza hanno mitigato il calo delle superfici investite osservato a livello nazionale, ma decisa è stata la riduzione della superficie coltivata a soia.

Tabella 65 - Superfici riservate alle colture oleaginose in Friuli Venezia Giulia (ha) ¹¹⁰

	2001	2002	2003	2004	2005
Soia (ha)	36.030	34.920	31.000	27.220	27.220
Girasole (ha)	440	540	485	455	455
Colza (ha)	390	285	195	195	253

Sulla base delle superfici coltivate a girasole e colza nel 2004, anche se per utilizzo esclusivamente alimentare, e sui dati produttivi medi ricavati dai dati congiunturali sulle coltivazioni dell'ISTAT per l'anno 2004, è possibile stimare la produzione potenziale di olio combustibile o biodiesel in regione. Tale stima è riportata nella tabella 66.

¹⁰⁹ www.sementi.it

¹¹⁰ www.istat.it: dati congiunturali sulle coltivazioni 2001-2005 Friuli Venezia Giulia.

Tabella 66 - Stima della produzione potenziale di olio combustibile o biodiesel in Friuli Venezia Giulia nell'anno 2004

	Superficie (ha)	Produttività media (t/ha)	Produzione Totale (t)	Stima produzione olio combustibile (t)	Stima produzione biodiesel (t)
Girasole	455	2,42	1.100	407	363
Colza	195	2,04	397	147	131
Totale	650	-	-	554	494

6.3.5 Le colture alcoligene dedicate

Nella tabella 67 viene presentata la situazione, negli ultimi cinque anni, degli investimenti con colture potenzialmente alcoligene in regione; il sorgo zuccherino è pressoché assente.

Tabella 67 - Superfici destinate alle principali colture alcoligene in Friuli Venezia Giulia (ha) ¹¹¹

	2001	2002	2003	2004	2005
Frumento tenero (ha)	3.020	6.040	4.900	5.100	5.507
Mais (ha)	126.788	128.258	108.308	108.808	107.804
Barbabietola da zucchero (ha)	4.456	5.811	1.514	4.732	-

Sulla base delle superfici coltivate con le principali colture alcoligene nel 2004, anche se per utilizzo esclusivamente alimentare, e sui dati produttivi medi ricavati dai dati congiunturali sulle coltivazioni dell'ISTAT per l'anno 2004, è possibile stimare la produzione potenziale di bioetanolo in regione. Tale stima è riportata nella tabella 68.

¹¹¹ www.istat.it: dati congiunturali sulle coltivazioni 2001-2005 Friuli Venezia Giulia.

Tabella 68 - Stima della produzione potenziale di bioetanolo in Friuli Venezia Giulia nell'anno 2004

	Superficie (ha)	Produttività media (t/ha)	Produzione Totale (t)	Stima produzione bioetanolo (t)
Frumento tenero	5.100	4,88	24.900	9.450
Mais	108.308	7,72	836.100	275.900
Barbabietola da zucchero	4.732	73,74	348.900	34.890
Totale	118.140	-	-	320.250

6.3.6 *Il comparto industriale*

Industria del legno

In base a uno studio condotto da Cerullo e Pellegrini¹¹², la produzione di scarti legnosi da parte del sistema legno arredamento italiano ammonta ad oltre 4,6 milioni di tonnellate all'anno, sia vergini che trattati. Sul totale, i residui non trattati ammontano al 55%, pari a 2-2,5 milioni di tonnellate all'anno. Questa grande quantità di residui ha, attualmente, varie destinazioni: può essere utilizzata a fini energetici o può essere utilizzata quale materia prima secondaria per la produzione di pellet, di pannelli e nella produzione di carta.

In Friuli Venezia Giulia sono presenti due distinti distretti industriali per la lavorazione del legno: il Distretto Industriale della Sedia, costituito da oltre 1.000 aziende distribuite in un'area geografica ristretta, il cosiddetto Triangolo della Sedia, comprendente in via prioritaria i comuni di Manzano, San Giovanni al Natisone e Corno di Rosazzo ma con ramificazioni significative anche nei comuni limitrofi e il Distretto del Mobile comprendente un migliaio di aziende distribuite fra i comuni di Azzano X, Brugnera, Budoia, Caneva, Chions, Fontanafredda, Pasiano di Pordenone, Polcenigo, Prata, Pravisdomini, Sacile, tutti situati in provincia di Pordenone¹¹³.

Uno studio dell'Università degli Studi di Udine (Dipartimento di Energetica e Macchine) del 1997 ha valutato che il solo Distretto Indu-

¹¹² Cerullo, Pellegrini, 2002.

¹¹³ www.arpa.fvg.it

stiale della Sedia produce 140.000 t/anno di residui legnosi. Un analogo studio della Federlegno-Arredo Triveneto, nel 1998, ha valutato una produzione di scarti in tutto il Triveneto pari a 1.200.000 t/anno, con una percentuale del 75% degli scarti combusti per il recupero termico. La rimanente frazione è destinata al recupero in altre forme.

Attualmente si valuta che almeno il 50% della produzione di scarti sia già impiegato per la produzione di energia dalle aziende stesse, principalmente energia termica per svolgere alcune attività di processo e per il riscaldamento degli ambienti di lavoro¹¹⁴.

Industria della carta

Gli stabilimenti, secondo i dati raccolti da Assocarta relativi all'anno 2001, operanti nel settore cartario presenti in Italia sono oggi 200, con un numero di addetti di poco inferiore alle 25.000 unità.

Nella regione Friuli Venezia Giulia sono attualmente presenti 9 stabilimenti con un numero di addetti che si aggira sulle 1.500 unità. All'interno del territorio regionale vengono prodotti pressoché tutte le tipologie di carta ad eccezione fatta per la carta sottile da sigarette. Gli stabilimenti, sempre dislocati in vicinanza di fiumi o canali visti gli enormi quantitativi di acqua necessari per la produzione, sono:

- la Cartiera Burgo di Duino e la cartiera di Monfalcone in prossimità del canale Locovaz;
- lo stabilimento di Ovaro sulle sponde del torrente Degano;
- lo stabilimento di Moggio Udinese sulle sponde del fiume Fella;
- la Cartiera Burgo di Tolmezzo in prossimità del fiume Tagliamento;
- lo stabilimento di Basaldella nelle vicinanze del fiume Cormor e della Roggia di Udine;
- lo stabilimento di Cordenons in prossimità della Roggia Viazol;
- lo stabilimento di Rivignano in una zona ricca di risorgive, come anche quello di Portonogaro.

¹¹⁴ Cerullo, Pellegrini, 2002.

La quantificazione dei residui utilizzabili (in genere si considerano gli sfridi di lavorazione, quali possono essere le cortecce), risulta essere difficile: il consumo di fibra vergine, e quindi la conseguente produzione di sfridi di lavorazione, assume valori diversi a seconda della tipologia di prodotto che si considera ottenere e dalle materie prime utilizzate. Ci sono stabilimenti che producono l'impasto partendo esclusivamente da carta da macero e che quindi non hanno consumi di fibra vergine, altri che usano come materie prime sia la cellulosa che la pastalegno e infine certi che adoperano unicamente fibra vergine¹¹⁵.

6.3.7 I rifiuti

Nella tabella 69 sono sintetizzate le produzioni di rifiuti urbani e della raccolta differenziata nelle diverse province del Friuli Venezia Giulia nel 2003¹¹⁶, per quanto riguarda la frazione contraddistinta dal codice CER 20 02 (rifiuti prodotti da giardini e parchi) e in particolare il codice CER 20 02 01 che comprende i rifiuti biodegradabili.

Tabella 69 - Raccolta differenziata di rifiuti provenienti da giardini e parchi, frazione biodegradabile, nel Friuli Venezia Giulia nell'anno 2003 (t/ha)

	Frazione raccolta Codice CER 20 02 01 (t/anno)
Udine	12.481
Pordenone	9.254
Gorizia	3.568
Trieste	85
Friuli Venezia Giulia	25.388

¹¹⁵ Gruppo di lavoro nazionale APAT-ARPA. Analisi ambientale per comparto produttivo. Comparto cartario. Giugno 2003. www.apat.gov.it/site_files/Industria_Cartaria.pdf

¹¹⁶ Dati ARPA FVG – Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Friuli Venezia Giulia.

Glossario

A

Acetogenesi

Produzione di acido acetico (nonché di acido formico, CO_2 ed H_2), a partire dai substrati formatisi nel corso della fase di idrolisi e acidificazione (acidi organici volatili, e alcoli) da parte di batteri acetogenici.

Acidogenesi

Trasformazione biochimica della sostanza organica idrolizzata in acidi organici volatili da parte di batteri acidogeni.

Agenti leganti

Si esprime come la percentuale in peso della massa pressata e si riferisce al contenuto di agenti leganti aggiunti alla materia prima, allo scopo di migliorare la coesione delle particelle di biomassa e di favorire il processo di estrusione migliorando lo scorrimento del materiale all'interno della trafilatura. Sono ammessi come agenti leganti materiali come amido di mais, olio vegetale grezzo estratto mediante spremitura meccanica, melasso, ecc.

Anaerobico

Ambiente totalmente privo di ossigeno disciolto.

Anossico

Ambiente privo di ossigeno disciolto, ma ricco di ossigeno combinato (NO_3^- , NO_2^- , $\text{SO}_4^{=}$, ecc.).

Biocombustibile

Combustibile prodotto direttamente o indirettamente da biomassa.

Biodiesel

Combustibile liquido, ottenuto per reazione chimica dagli oli vegetali, estratti dalle colture dedicate oleaginose o recuperati dagli usi alimentari. È caratterizzato da impieghi energetici sovrapponibili a quelli del gasolio.

Bioetanolo

Combustibile liquido, ottenuto dalla fermentazione dei carboidrati, derivanti dalle colture dedicate alcoligene, dai residui della produzione ortofrutticola e della lavorazione agricola e dalla frazione organica degli RSU. Può essere utilizzato in sostituzione della benzina o convertito in ETBE e impiegato come antidetonante altottanico.

Biogas

Miscela gassosa costituita in prevalenza da anidride carbonica e metano, risultato dei processi di digestione anaerobica.

Biomassa

Rappresenta la forma più sofisticata di accumulo dell'energia solare. Secondo la direttiva 2001/77/CE si intende la parte biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali), dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani.

Bricchetto

Si intende un biocombustibile densificato, solitamente in forma di parallelepipedo o cilindro, ottenuto comprimendo la biomassa polverizzata con o senza l'ausilio di additivi di pressatura. In genere, il bricchetto è ottenuto utilizzando una pressa a pistone.

Catalizzatore

Sostanza in grado di aumentare la velocità di una reazione chimica, agevolandola dal punto di vista termodinamico, in quanto ne abbassa l'energia d'attivazione, apparentemente senza parteciparvi, dato che al termine della reazione la si ritrova inalterata.

Char

Agglomerato di natura complessa costituito prevalentemente da carbonio.

Cippato

Si intende la biomassa, di natura legnosa o erbacea, ridotta in particelle di piccole dimensioni, chips, mediante un'azione meccanica di taglio (cippatura).

Codigestione

Utilizzo simultaneo di diverse tipologie di substrato (co-substrati) in diversa proporzione. I co-substrati utilizzabili possono essere liquami zootecnici, fanghi di depurazione, frazione organica di RSU, residui agricoli, rifiuti dell'industria agro-alimentare, ecc.

Cogenerazione (CHP)

Si intende la produzione combinata, sequenziale o contemporanea, di energia elettrica e calore a partire da un'unica fonte energetica (CHP – *Combined Heat and Power production*).

Colture dedicate o energetiche

Si intendono le coltivazioni allestite allo scopo di produrre biomassa da destinare alla produzione di energia elettrica e/o termica. Possono essere suddivise in colture lignocellulosiche, colture oleaginose e colture alcoligene.

Contenuto in ceneri

Si esprime come la percentuale in peso sulla sostanza secca. È uno dei parametri fondamentali per la classificazione della biomassa: un elevato contenuto in ceneri crea problemi di gestione soprattutto nei

C piccoli impianti; influenza negativamente il contenuto in polveri nei fumi e quindi le prestazioni ambientali degli impianti.

Contenuto in polveri

Si esprime come percentuale in peso della massa pressata e rappresenta la frazione di polveri con diametro inferiore ai 3,15 mm che vengono generate dalle trafilare durante la produzione del pellet. È un parametro che rivela la qualità del processo produttivo e, come la durabilità, risulta legato a problemi di sicurezza (es. possibilità di incendi durante la movimentazione del materiale), di manutenzione/gestione degli impianti di combustione e di corretto funzionamento dei sistemi di trasporto e di alimentazione.

D

Densità apparente

Viene espressa in kg/m^3 . Rappresenta la massa dell'unità di volume del biocombustibile. È un parametro importante soprattutto per la commercializzazione della biomassa. Influisce sul rendimento dell'impianto in particolare per i dispositivi di alimentazione a "volume". Si utilizza per calcolare la densità energetica.

Densità energetica

È il rapporto tra il contenuto energetico della biomassa e il volume sterico in cui è compreso, che si esprime anche come rapporto tra il potere calorifico inferiore del volume solido e del volume apparente. È generalmente espresso in MJ/ms o kWh/ms.

Digestione anaerobica

Processo di fermentazione mediante il quale la sostanza organica viene trasformata in biogas (o in altro composto organico ridotto come etanolo, acido lattico, ecc.), in assenza di ossigeno.

Distillazione

È una tecnica di separazione di due o più componenti di una miscela, che sfrutta le differenze tra le loro temperature di ebollizione. Nel caso dell'etanolo in soluzione acquosa, porta a una miscela azeotropica, caratterizzata da una concentrazione di etanolo del 95% in peso e da un contenuto residuo in acqua del 5% (→ etanolo azeotropico).

La distillazione frazionata è eseguita, aggiungendo alla miscela di partenza, il benzene, che, avendo una temperatura di ebollizione inferiore sia a quella dell'acqua, sia a quella dell'etanolo, consente la completa disidratazione dell'etanolo stesso (contenuto residuo in acqua pari all'1% in peso).

Durabilità meccanica

Si esprime come la percentuale di combustibile densificato che rimane integro dopo una sollecitazione meccanica. Fornisce una indicazione sul grado di pressatura del materiale e sulla resistenza allo sfaldamento. È strettamente correlato a problemi di sicurezza (es. possibilità di incendi durante la movimentazione del materiale), di manutenzione/gestione degli impianti di combustione e di corretto funzionamento dei sistemi di trasporto e di alimentazione soprattutto nei piccoli impianti.

E

Energia

In generale, si misura in J (Joule); viene misurata anche in cal (calorie) e Wh (Wattora).

1 Wh = 3.600 J; 1 cal = 4.186 J; 1 Wh = 860 cal

Etanolo azeotropo o miscela azeotropica di etanolo

Soluzione di etanolo e acqua, ottenuta al termine della distillazione e caratterizzata dalla concentrazione dell'etanolo pari al 95% (v/v) e da un residuo d'acqua del 5% (v/v).

In generale, un azeotropo è una miscela di due o più liquidi, caratterizzata da un punto di ebollizione più basso o più alto di quello di ognuno dei componenti della miscela. Nel primo caso è detto azeotropo bassobollente, nel secondo azeotropo altobollente. La miscela azeotropica di etanolo e acqua è bassobollente.

In conseguenza di questa sua peculiarità, un azeotropo si comporta come una sostanza a sé; quando bolle, produce una miscela di vapori, la cui composizione è la stessa della fase liquida. A differenza, quindi, di una generica miscela di due liquidi diversi, un azeotropo non può venire separato nei suoi componenti per semplice distillazione.

Feedback

Influenza dei prodotti sull'andamento della reazione che li produce. È definito positivo, se l'aumento della concentrazione dei prodotti stimola la reazione della loro sintesi; è detto negativo se l'aumento della loro concentrazione inibisce la reazione di sintesi.

Fermentazione alcolica

Reazione biochimica tipica degli ambienti microaerobici e anaerobici, attraverso cui avviene la trasformazione dell'acido piruvico in alcol etilico (o etanolo) e anidride carbonica. L'organismo ne trae un vantaggio energetico, poiché ossida nuovamente a NAD^+ , il NADH formato nel corso della glicolisi. Nelle vie metaboliche aerobiche questo risultato è conseguito con un'efficienza nettamente superiore attraverso la fosforilazione ossidativa, che ha come principale attore l'ossigeno.

Flashpoint

È una misura dell'infiammabilità di un carburante, poiché esprime la temperatura più bassa alla quale può formarsi una miscela infiammabile con aria. A tale temperatura il vapore cessa di bruciare nel momento in cui la sorgente infiammabile è rimossa. L'unità di misura utilizzata è il grado centigrado.

Fluido supercritico

Si tratta di gas liquefatti a pressioni elevate e a temperature basse, utilizzati come solventi nel corso dell'estrazione chimica degli oli vegetali nella filiera produttiva del biodiesel. Possono essere utilizzati composti, quali l'anidride carbonica, l'ossido di azoto, l'anidride solforosa, l'etano, il propano, il butano.

Fotosintesi clorofilliana

Si tratta di un processo fotochimico che ha luogo nelle cellule vegetali, grazie alla presenza di clorofilla, e permette la trasformazione dell'energia luminosa in energia chimica, rendendo così possibile la sintesi di sostanze organiche complesse, partendo da sostanze inorganiche semplici. L'importanza della fotosintesi clorofilliana per tutti gli esseri viventi è dovuta al fatto di essere il meccanismo fondamentale in grado di trasformare il carbonio inorganico, inutilizzabile dagli organismi viventi, in carbonio organico assimilabile.

Gassificazione

È il processo di trasformazione di combustibili liquidi o solidi in prodotti gassosi utili sia come combustibili, sia come materia prima per diversi processi chimici. La gassificazione si può effettuare per pirolisi (limitatamente ai combustibili liquidi), oppure, secondo diversi tipi di reazione, con aria, ossigeno, vapor d'acqua in base al tipo di prodotto che si desidera ottenere. Nonostante nel processo di gassificazione vada persa una parte dell'energia del combustibile e a volte sia addirittura necessario somministrarne dall'esterno, l'operazione risulta conveniente in quanto la combustione con combustibili gassosi risulta più controllabile, non porta alla formazione di ceneri e permette il raggiungimento di temperature più elevate.

Idrolisi

Reazione chimica in cui una molecola è scissa in due o più parti per inserimento di una molecola di acqua. Nella filiera di produzione del bioetanolo è una fase necessaria ai fini dell'utilizzo dell'amido, della cellulosa e dell'emicellulosa, per ottenere degli zuccheri più semplici fermentescibili. Può essere condotta per via chimica (con un catalizzatore chimico) o enzimatica (con enzimi, ossia catalizzatori biologici) (→ catalizzatore).

Massa sterica

È impiegata per gli ammassi dei combustibili lignocellulosici tal quali (legna da ardere, cippato e pellet) che presentano al loro interno degli spazi vuoti, più o meno grandi in funzione della pezzatura e della forma. Si esprime in kg/unità di volume sterico (metro stero alla rinfusa e metro stero accatastato).

Massa volumica

Si riferisce al peso e al volume del corpo legnoso (corpo poroso) o al singolo pezzo di combustibile densificato (pellet e bricchetti); composti da un insieme di sostanze e da vuoti (lumi vascolari, ecc.) riempiti da aria e/o acqua. Si esprime in kg/m³.

Mesofilia

Condizioni in cui la temperatura di reazione è compresa tra 20 e 40°C, valori ottimali per lo sviluppo di microrganismi "mesofili".

Metanogenesi

Processo mediante il quale la sostanza organica viene trasformata in metano in assenza di ossigeno; in senso stretto viene indicata la fase finale del processo di digestione anaerobica in cui i batteri metanigeni trasformano acetato, idrogeno e anidride carbonica in metano.

Microanaerobiosi

Ambiente caratterizzato da una bassa pressione parziale di ossigeno, in cui prevalgono le reazioni biochimiche anaerobiche (ad esempio le fermentazioni).

N

Numero di cetano

È un parametro che esprime la qualità dell'inflammabilità di un carburante, posta a confronto con il comportamento di un idrocarburo ritenuto ideale, quale il cetano (C16), a cui è attribuito un numero di cetano pari a 100. Esso si riflette nel comportamento all'accensione e, quindi, influenza l'avviamento a freddo, la combustione e la rumorosità del motore. Più è alto il suo valore, maggiore è la prontezza del combustibile all'accensione. È espresso come numero puro.

Numero di ottano

Grandezza che misura la capacità di un carburante di resistere alla detonazione. Il numero di ottano si misura con appositi motori a rapporto di compressione variabile e numero di giri costante e fornito di un sistema di rivelazione acustico e di detonazione. Mediante questo motore si confronta il comportamento del carburante in esame con quello di un carburante di riferimento, costituito da una miscela di due idrocarburi a cui si attribuisce un numero di ottano convenzionale (n-eptano con un numero di ottano zero, isoottano con un numero di ottano di 100). Si dice che una benzina ha un numero di ottano pari a 95 quando il suo comportamento alla detonazione nel suddetto motore standard equivale a quello di una miscela che contiene il 95% di isoottano e il 5% di n-eptano.

Pellet

Si intende un biocombustibile densificato, normalmente di forma cilindrica, ottenuto comprimendo della biomassa polverizzata con o senza l'ausilio di agenti leganti di pressatura. In genere il pellet è ottenuto utilizzando un estrusore a trafilatura.

Pervaporazione

Tecnica di separazione dei componenti presenti in una miscela che opera, percolando la miscela stessa, portata in fase di vapore, attraverso delle membrane di materiale idrofilo selettivo. Nella filiera della produzione del bioetanolo questa strategia è utilizzata per ottenere l'etanolo quasi anidro (97% in peso).

Pirolisi

È il processo di scissione termica impiegato soprattutto nell'industria del petrolio per ridurre il peso molecolare degli idrocarburi attraverso la rottura dei legami carbonio-carbonio della molecola. Viene chiamato anche *cracking*. La pirolisi viene effettuata con metodi puramente termici o termico-catalitici (→ catalizzatore).

Potere calorifico

Esprime la quantità di calore che viene liberato nella combustione completa dell'unità in peso o in volume di un combustibile. Si distinguono un potere calorifico inferiore (p.c.i.) e un potere calorifico superiore (p.c.s.), a seconda che l'acqua, formata per combustione dell'idrogeno eventualmente presente nel combustibile, si consideri allo stato di vapore o di liquido. La differenza tra i due tipi di potere calorifico corrisponde appunto al calore di vaporizzazione dell'acqua formatasi nella combustione. Nella pratica interessa sempre il potere calorifico inferiore, perché i fumi vengono sempre scaricati in condizione di temperatura per cui l'acqua è presente sotto forma di vapore. Viene espresso in MJ/kg t.q. e per comodità anche in kcal/kg t.q.. Viene utilizzato per calcolare la densità energetica.

Psicrofilia

Condizioni in cui la temperatura di reazione si mantiene inferiore ai 20°C, valori ottimali per lo sviluppo di microrganismi "psicrofili".

Reforming

Processo di trasformazione tendente ad aumentare il numero di ottano di benzine mediante isomerizzazione e ciclizzazione degli idrocarburi costituenti le stesse.

Saponificazione

Reazione chimica che avviene tra i trigliceridi e l'idrossido di sodio o di potassio. I saponi che si ottengono sono duri nel caso si utilizzi il sodio idrossido, molli nel caso si impieghi il potassio idrossido. Nell'ambito della filiera del biodiesel è utilizzata per ridurre l'acidità degli oli prima di sottoporli alla trasformazione a biodiesel nella fase detta di neutralizzazione.

Sonda lambda

È il sensore, detto anche sensore ossigeno, che fornisce informazioni relative alla quantità di ossigeno presente nei gas di scarico, al fine di mantenere un'ottimale composizione della miscela aria-benzina.

Sostanza secca

Condizione nella quale il biocombustibile è privo d'acqua.

Sostanza secca senza ceneri (daf)

Condizione nella quale il biocombustibile è privo d'acqua e di materiale inorganico.

Tar

Miscela complessa di idrocarburi condensabili.

TEP – Tonnellata equivalente di petrolio

Unità di misura dell'energia adottata per misurare grandi quantità, ad esempio nei bilanci energetici e nelle valutazioni statistiche. Viene utilizzata per confrontare le risorse di energia che si possono ottenere

da fonti diverse. Equivale all'energia sviluppata dalla combustione di una tonnellata di petrolio. Essendo il potere calorifico del petrolio grezzo pari a 41.860 kJ/kg, un Tep equivale a $41.860 \cdot 10^3$.

Termofilia

Condizioni in cui la temperatura di reazione è compresa tra 50-65°C, valori ottimali per lo sviluppo di microrganismi "termofili".

Trigenerazione (CHCP)

Si intende il sistema di produzione congiunta di energia elettrica, termica e frigorifera a partire da un unico combustibile (CHCP – *Cogeneration of Heat, Cooling and Power*).

V

Vacuolo

Organulo cellulare tipico delle cellule vegetali, preposto all'immagazzinamento di alcuni prodotti anabolici, tra cui i grassi, e alla regolazione del turgore.

Viscosità cinematica

La viscosità cinematica è una proprietà fisica dei fluidi, che dipende dalla natura chimica del fluido stesso e dalla temperatura: è tanto maggiore, quanto più alta è la coesione che si instaura tra le molecole all'interno del fluido; nei liquidi decresce all'aumentare della temperatura, nei gas, invece, aumenta. L'unità di misura comunemente impiegata è mm^2/s (cSt = centi Stokes).

Bibliografia

Alberti M., 2002, *La gestione delle ceneri da biomassa: un problema da risolvere*. Progetto Fuoco, Verona

Angelini L., Ceccarini L., Bonari E., 1999, "Resa, composizione chimica e valutazione energetica della biomassa di specie erbacee annuali per la produzione di energia", in Bona S. (ed), *Atti XXXIII Convegno Annuale Società Italiana di Agronomia. Le colture non alimentari*, Legnaro (PD), 20-23 settembre 1999

Aoyama K., Uemura I., Miyake J., Asada Y., 1997, "Fermentative metabolism to produce hydrogen gas and organic compounds in a cyanobacterium, *Spirulina platensis*", *J. Ferment. Bioenerg.*, 83, pp. 17-20

APAT, 2003, "Le biomasse legnose: un'indagine sulla potenzialità del settore forestale italiano nell'offerta di fonti di energia", *Rapporti*, 30/2003, Roma, www.sinanet.apat.it

APAT, ARPA, 2003, *Analisi ambientale per comparto produttivo. Comparto cartario*, giugno, www.apat.gov.it/site/_files/Industria_Cartaria.pdf

ARPA FVG, Assocarta, Associazione degli Industriali, 2005, *Analisi ambientale del Comparto produttivo Cartario*, 01/08/2005, www.apat.gov.it

Assocarta, 2004, *Rapporto ambientale dell'industria cartaria italiana 2004*, www.assocarta.it

Benemann J.R., 1996, "Hydrogen biotechnology: progress and prospects", *Nature Biotechnol.*, 14, pp. 1101-1103

Bonari G., Picchi G., Guidi W., Piccioni E., Fraga A., Villani R., Ginanni M., 2004, "Le colture da energia", *Le colture dedicate ad uso energetico: il progetto Bioenergy Farm*, Quaderno ARSIA 6/2004

Cerullo S., Pellegrini A., 2002, "Stime sulle quantità di residui legnosi prodotti in Italia", *Atti convegno Programma Nazionale Biocombustibili – PROBIO – Pellet per l'energia: Mercato, Tecnologie, Normative, Prospettive*, Verona, 23 marzo 2002. Comitato Termotecnico Italiano Regione Lombardia-Agricoltura

CETA, 1994, *Banca dati delle biomasse recuperabili dai rifiuti civili ed agroalimentari prodotti nel Friuli-Venezia Giulia*

CTI, 2003, "Raccomandazione CTI sui biocombustibili solidi: Specifiche e Classificazione", CTI R03/01, aprile, www.cti2000.it

Del Favero R. (a cura di), 1998, *La vegetazione forestale e la selvicoltura nella regione Friuli-Venezia Giulia*, Vol. I, Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Direzione Regionale delle Foreste e della Caccia - Servizio della Selvicoltura, Udine

Enguidanos M., Soria A., Kavalov B., Jensen P., 2002, "Techno-economic analysis of bio-alcohol production in the EU: a short summary for decision-makers", European Commission, Report EUR 20280 EN

Geisshofer A., Hahn B., Hartmann H., Huber R., Kessler D., Jauschenegg H., Malisius U., Nillson B., Rapp S., Schmidl H., Whitfield J., 2000, *Woodpellets in Europe*, St. Pölten, Austria: Umbera GmbH

Giordano G., 1955, *Tecnologia del legno*, UTET, Milano

Grassi G., 2004, *Refined Bio-Fuels Pellets and Briquettes. Characteristics, uses and recent innovative production technologies*, LAMNET Latin America Thematic Network on Bioenergy (Project no. ICA4-CT-2001-10106), www.bioenergy-lamnet.org

Grover P.D., Mishra S.K., 1996, *Biomass briquetting: technologies and practices*, FAO Field Document n. 46, Bangkok, <http://www.rwedp.org/acrobat/rm46.pdf>

Gubbiani R., Lazzari M., 2004, "Combustione della granella di mais per produzione di calore per utenze civili", *Notiziario ERSa*, Anno XVII, n. 4

Ham R.K., Barlaz M.A., 1989, "Measurement and Prediction of Landfill Gas Quality and Quantity", in Chistensen T.H., Cossu R., Stegmann R., *Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact*, Academic Press, New York, pp. 155-158

Ikegami T., Kitamoto D., Negishi H., Iwakabe K., Imura T., Sano T., Haraya K., Yanagishita H., 2004, "Reliable production of highly concentrated bioethanol by a conjunction of pervaporation using a silicone rubber sheet-covered silicalite membrane with adsorption process", *Journal of chemical technology and biotechnology*, vol. 79, issue 8, pp. 896-901, www3.interscience.wiley.com

INEA, 2004, *L'agricoltura italiana conta*, www.inea.it/pubbl/itaco.cfm

ISTAT, 1997, *Coltivazioni agricole e foreste*

ISTAT, 2002, "Presentazione dei dati definitivi Friuli-Venezia Giulia", V° *Censimento dell'Agricoltura*

ISTAT, 2003, *Analisi dei prelievi forestali in Friuli Venezia Giulia*

ITABIA, 1999, "Le coltivazione da biomassa per un'energia alternativa", *Agricoltura*, n. 293

ITABIA, 2004, "Le biomasse per l'energia e l'ambiente", *Rapporto 2003*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, www.itabia.it

Kavalov B., Peteves S.D., 2004, *Bioheat applications in the European union: an analysis and perspective for 2010*, Petten, The Netherlands, European Commission, Directorate general, www.ie.jrc.cec.eu.int

Lynd L.R., 1996, "Overview and evaluation of fuel ethanol from cellulosic biomass: technology, economics, the environment and policy", *Ann. Rev. Energy Environ.*, 21, pp. 403-465

Lynd L.R., Weimer P.J., Van Zyl W.H., Pretorius I.S., 2002, "Microbial cellulose utilization: fundamentals and biotechnology", *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, Sept. 2002, pp. 506-577

Mareschi L., Paris P., Sabatti M., Nardin F., Giovanardi R., Manazzone S., Scarascia Mugnozza G., 2005, "Le nuove varietà di pioppo da biomassa garantiscono produttività interessanti", *L'Informatore Agrario*, 18, pp. 49-53

Melis A., Zhang L., Forestier M., Ghirardi M.L., Seibert M., 2000, "Sustained photo biological hydrogen gas production upon reversible inactivation of oxygen evolution in the green alga *Chlamydomonas reinhardtii*", *Plant Physiol.*, 122, pp. 127-136

Miles T.R., Miles Jr T.R., Baxter L., Bryers R.W., Jenkins B.M., Oden L.L., 1995, *Alkali deposits found in biomass power plants. A preliminary investigation of their extend and nature*, NREL/TP-433-8142, p. 82

Mitsui A., Philips E.J., Kumazawa S., Reddy K.J., Ramachandran S., Matsunaga T., 1983, "Progress in research toward outdoor biological hydrogen production using solar energy, sea water and marine photosynthetic microorganisms", *Annals of the New York Academy of Sciences*

Montibeller S., 2005, "Le biomasse: risorsa per il futuro", *Terra Trentina*, n. 2, febbraio, pp. 20-23, Trento

Nocentini G., Faini A., 2004, "Le azioni dimostrative e divulgative del progetto Bioenergy Farm", *Le colture dedicate ad uso energetico: il progetto Bioenergy Farm*. Quaderno ARSIA 6/2004

Obernberger I., Thek G., 2002, "Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour", *Proceedings of the 1st World Conference on Pellet*, Sept 2002, Stockholm, Sweden, pp. 115-122, Swedish Bioenergy Association (ed), Stockholm

Obernberger I., Thonhofer P., Reisenhofer E., "Description and Evaluation of the new 1,000 kW_{el} Organic Rankine Cycle process integrated in the biomass CHP plant in Lienz, Austria", *Euroheat & Power*, vol. 10/2002

Ortiz I., Gorri D., Casado C., Urtiaga A., 2005, "Modelling of the pervaporative flux through hydrophilic membrane", *Journal of chemical technology and biotechnology*, vol. 80, issue 4, pp. 397-405

Paniz A., Pettenella D., 2004, *Il mercato del pellet in Italia. Da prodotto di nicchia*

a biocombustibile di massa?, AIEL Associazione Italiana Energia dal Legno, Legnaro (PD), www.aiel.cia.it

Pedrolli M., 2001, *Disponibilità e costi di raccolta delle biomasse per usi energetici*, Provincia Autonoma di Trento, Servizio Foreste, Trento

Righini W., 2003, *Indagine conoscitiva sulle caratteristiche di campioni di biomasse legnose prelevate presso l'impianto della società Teleriscaldamento-Cogenerazione Valcamonica, Valchiavenna spa, Valtellina*

Riva G., 1990, *Approvvigionamento energetico e tecnologie di conversione*, Edizioni Agricole, Bologna

Riva G., 2004, "Il Pellet: aspetti generali", *Atti convegno Programma Nazionale Biocombustibili – PROBIO – Pellet per l'energia: Stato dell'arte e prospettive future. Progetto Fuoco*, Verona, 19 marzo 2004, Comitato Termotecnico Italiano Regione Lombardia-Agricoltura

Samson R., Mehdi B., 1998, "Strategies to reduce the ash content in perennial grasses", *Research reports. BioEnergy '98: Expanding BioEnergy Partnerships.*, R.E.A.P., Canada, www.reap-canada.com

Samson R., Mulkins L., Drisdelle M., Lapointe C., Duxbury P., 2000, "The use of Switchgrass Biofuel Pellets as a Greenhouse Gas Offset Strategy", *Bioenergy 2000 Conference*, Buffalo, New York, October 15-19, www.reap-canada.com

Sander B., 1997, "Properties of Danish biofuels and the requirements for power production", *Biomass and Bioenergy*, 12, 177-183

Schlegel H.G., Schneider K., 1978, *Hydrogenases: their catalytic activity, structure and function*, Göttingen, Germany, pp. 15-44

Sheoran S., Yadav B.S., Nigam P., Singh D., 1999, "Continuous ethanol production from sugarcane molasses using a column reactor immobilized *Saccharomyces cerevisiae* HAU-1", *Journal of basic microbiology*, vol. 38, issue 2, pp. 123-128, www3.interscience.wiley.com

SOCRIS, 2003, *Innovazione nell'uso della legna a fini energetici*, Obiettivo 2, Regione Emilia-Romagna

Sorlini S., Zoni S., 2001, *Stato dell'arte della bricchettatura ed eventuali applicazioni*, Punto Energia di Brescia – Università degli Studi di Brescia, www.energoclub.it

Spinelli R., Hartsough B., 2001, "Indagine sulla cippatura in Italia", *Contributi scientifico-pratici per una migliore conoscenza ed utilizzazione del legno*, XLI, CNR, Istituto per la ricerca sul legno, Firenze

Spinelli R., Nati C. Magagnotti N., 2003, *Raccolta di legno cippato dalle giovani peccete artificiali del Feltrino*, Associazione Montegrappa

Stahl K., Neergaard M., 1998, *IGCC Power Plant for Biomass Utilization*, *Biomass and Bioenergy*, pp. 205-211

Van Thuijl E., Van Ree R., De Lange T.J., 2003, "Biofuel production chains", framework of the EC-supported project "Clear Data Clean Fuels", NNE5 - 2001 - 00649

Verani S., Sperandio G., 2005, "La meccanizzazione nella raccolta della legna da ardere in alcune regioni dell'Italia meridionale", *Forest@2*, (2), pp. 233-241

Vettraino B., Carlino M., Rosati S., 2005, *La legna da ardere in Italia - Logistica, organizzazione e costi operativi*, Dossier CEAR

Wilén C., Moilanen A., Kurkula E., 1996, "Biomass feedstock analyses", *VTT publications*, 282

Zilli M., 2002, *Bosco ed Energia*. Editori Associati per la Comunicazione, Milano

Zimbardi F., Viola E., Gallifuoco A., De Bari I., Cantarella M., Barisano D., Braccio G., 2002, *Overview of the bioethanol production*, ENEA - Università degli Studi de L'Aquila

