



REGIONE SICILIANA
ASSESSORATO INDUSTRIA

ENERGIA dalle **biomasse**

Tecnologie e prospettive



SICENEA
pura energia di Sicilia



Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente

Energia dalle biomasse

Tecnologie e prospettive

Energia dalle biomasse
Tecnologie e prospettive

2008 ENEA
Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente
Lungotevere Thaon di Revel, 76 - Roma

ISBN 88-8286-171-6



REGIONE SICILIANA
ASSESSORATO INDUSTRIA

Energia dalle biomasse

Tecnologie e prospettive

a cura di

Francesco Paolo Vivoli

contributo ai testi di

Enzo Benanti, Giacobbe Braccio

Nicola Colonna, Vincenzo Motola



Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente

Presentazione

Il volume viene pubblicato nell'ambito del programma SICENEA, finanziato dall'Assessorato Industria della Regione Siciliana per promuovere una maggiore consapevolezza riguardo i problemi energetici e ambientali e sensibilizzare all'impiego delle fonti rinnovabili e all'uso razionale dell'energia nei vari settori produttivi e civili.

Obiettivo di rilievo del programma è sollecitare l'attenzione di Enti locali, Imprese, progettisti, installatori e energy manager sulle opportunità di sviluppo e crescita di un mercato e un'industria locale delle fonti rinnovabili e dell'efficienza energetica, in grado di incidere sulla crescita di competitività del sistema produttivo regionale.

Le biomasse, ovvero ogni sostanza organica di origine biologica, in forma non fossile, prodotta direttamente o indirettamente dalla fotosintesi, possono essere impiegate per la produzione di energia utilizzando diversi processi di conversione.

Questo volume ha l'obiettivo di fornire, in particolar modo ai tecnici operanti nel settore energetico siciliano, un'ampia panoramica sulla natura delle biomasse, sugli aspetti tecnici, economici e normativi correlati al loro sfruttamento a fini energetici e sulle potenzialità offerte dalle diverse tecnologie.

Indice

Premessa	9
Capitolo Uno	
Le biomasse e la conversione energetica	12
1.1 Comparto forestale e agroforestale	14
1.2 Comparto agricolo	14
1.3 Comparto zootecnico	18
1.4 Comparto industriale	18
1.5 Comparto dei rifiuti	19
1.6 I vantaggi delle biomasse e le problematiche connesse al loro utilizzo ..	20
1.7 Le tecnologie di conversione energetica della biomassa	22
Capitolo Due	
La conversione biochimica	24
2.1 La digestione anaerobica	25
Biomasse impiegabili nel processo di digestione anaerobica	27
Codigestione	29
Le tecnologie di digestione anaerobica applicabili	30
2.2 Biocarburanti	37
Il bioetanolo	37
Il biodiesel	46
Capitolo Tre	
La conversione termochimica	54
3.1 L'essiccazione della biomassa	55
3.2 Pirolisi e tecnologie applicabili	56
3.3 Il processo HTU (Hydro Thermal Upgrading)	64
3.4 La gassificazione	64
Gassificatori a letto fisso	69
Gassificatori a letto fluido	72
3.5 La combustione	76
Impianti per la produzione di elettricità	78
Impianti per la produzione di energia termica	91

Capitolo Quattro	
Aspetti ambientali	108
4.1 Il bilancio delle emissioni	109
4.2 Confronto tra le emissioni inquinanti dei principali combustibili di origine vegetale e fossile	111
4.3 Altri benefici ambientali	113
Capitolo Cinque	
Aspetti economici	116
5.1 Gli incentivi alla produzione di biomasse energetiche da colture dedicate	117
5.2 Gli incentivi ai biocarburanti	118
5.3 Gli incentivi alla produzione di energia elettrica	120
Capitolo Sei	
La Sicilia e le biomasse	124
6.1 Il programma di sviluppo rurale	125
6.2 Il progetto Fi.Sic.A.	128
6.3 Il potenziale di biomasse in Sicilia	130
Bibliografia	134

Premessa

Negli ultimi decenni, lo stile di vita dei paesi industrializzati ha modificato sensibilmente il panorama e le prospettive energetiche a livello mondiale. La sempre maggiore richiesta di energia infatti, unitamente all'impennata dei prezzi del petrolio, all'incertezza dell'approvvigionamento e ai timori connessi con il riscaldamento globale, ha reso ancora più chiara la consapevolezza che questa risorsa oggi non può più considerarsi come un qualcosa di scontato.

Mossa da queste motivazioni, la Comunità Europea si è pertanto impegnata ad accrescere nel mix degli approvvigionamenti, attraverso un quadro normativo organico, il ricorso alle energie rinnovabili; le quali, integrando e in parte sostituendo le fonti fossili, permettono di realizzare sia la diversificazione nell'approvvigionamento energetico, che la riduzione delle emissioni di carbonio. In quest'ottica trova spazio una proposta integrata in materia di energia e cambiamenti climatici (nota come "pacchetto 20-20-20") che, varata dall'UE il 23 gennaio 2008, pone per il 2020 i seguenti obiettivi:

- riduzione delle emissioni di gas serra di almeno il 20% rispetto ai livelli del 1990;
- raggiungimento di un consumo di energia da fonti rinnovabili pari al 20% del totale;
- riduzione dei consumi energetici del 20% rispetto alle proiezioni attuali;
- incremento dell'uso dei biocarburanti nei trasporti con una quota minima obbligatoria del 10% dei consumi totali.

Come è facile comprendere si tratta di obiettivi molto ambiziosi dato che attualmente la quota delle energie rinnovabili in Europa è mediamente pari all'8,5%. Appare chiaro dunque che per poter raggiungere l'obiettivo del 20% entro il 2020 saranno necessari notevoli sforzi da parte di tutti i settori dell'economia e di tutti gli Stati membri. Per far sì che lo sforzo necessario sia ripartito equamente, la commissione ha stilato una serie di obiettivi nazionali, calcolati per ciascun paese applicando una componente fissa di base e una componente variabile in funzione del PIL di ogni membro. L'Italia dovrà così, entro il 2020, soddisfare il 17% dei propri consumi finali di energia ricorrendo alle risorse rinnovabili, (nel 2007 queste rappresentavano il 7,3% dei consumi interni lordi) e nello stesso tempo ridurre le emissioni di CO₂ del 13% rispetto ai valori del 2005.

Per raggiungere questi target è previsto l'intervento in tre settori: quello relativo alla produzione di energia elettrica, quello del riscaldamento e del raffreddamento e quello dei trasporti. Ogni stato membro avrà perciò la possibilità di decidere, in relazione alle proprie esigenze, in quale misura ciascuno di questi comparti andrà a contribuire al conseguimento del relativo obiettivo nazionale. Se da un lato dunque i paesi dell'Unione godono della massima discrezionalità nella scelta della composizione del proprio mix energetico, la stessa cosa non vale invece per i biocarburanti per i quali è fissato, come visto, un sotto-target vincolante che pone gli stati membri nella condizione di sostituire, entro il 2020, almeno il 10% della benzina e del gasolio usato in autotrazione. Questo obiettivo di per sé è ancora più ambizioso di quello inerente le FER nel loro complesso, se si considera che nel 2005 la quota di biocarburanti era dell'1,08% nell'UE a 27 membri e pari a solo lo 0,43% in Italia (Fonte: Eurostat).

In risposta alle indicazioni fornite dall'Unione Europea con il "pacchetto 20-20-20" lo stato italiano ha emanato nel settembre 2007 un *position paper* nel quale viene riportata una valutazione preliminare delle massime potenzialità nazionali riguardo la produzione di energia da fonti rinnovabili. Partendo dai livelli di sfruttamento attuali e considerando fattori quali il territorio, il clima, la dotazione di risorse naturali e il livello tecnologico è stato possibile stimare un potenziale massimo teorico al 2020 di circa 20,97 Mtep. In questa proiezione rientrano ovviamente anche le biomasse impiegate sia per la produzione di energia elettrica, per la quale si ritiene si possano raggiungere al 2020 anche i 14,5 TWh contro i 6,16 TWh del 2005, che per la generazione di energia termica e frigorifera, con un potenziale verosimilmente pari a 9,32 Mtep (1,88 Mtep nel 2005). Non va poi dimenticato l'utilizzo delle biomasse nella sintesi dei biocarburanti per i quali, come detto, è stato fissato un target estremamente ambizioso considerando l'attuale livello di sfruttamento. Per raggiungere infatti l'obiettivo del 10% al 2020 si stima sia necessario impiegare una superficie agricola pari a 5 milioni di ettari, corrispondenti al 16,7% del territorio nazionale o al 60% circa della superficie attualmente coltivata a seminativi. È evidente dunque che al di là dei possibili risvolti negativi sulle filiere alimentari, l'Italia, per poter raggiungere la soglia del 10%, dovrà necessariamente ricorrere alle importazioni da paesi esteri dotati di grandi territori coltivabili non utilizzati. Le possibilità a livello nazionale indicano infatti una produzione massima non superiore a 800.000–1.000.000 di tonnellate all'anno di biocarburanti contro i 5,5 milioni necessari per rientrare negli obiettivi europei.

Dalle stime appena viste appare dunque evidente che, per incrementare la produzione di biomasse a fini energetici (così come in generale di ogni altra FER), è necessario intraprendere nel nostro paese uno sforzo importante che venga equamente ripartito sul territorio attraverso un maggior coordinamento tra stato e regioni. La Sicilia, in relazione alle proprie potenzialità e alle proprie peculiarità territoriali, dovrà quindi fissare i propri obiettivi e definire *roadmaps* chiare ed efficienti da qui al 2020. Fondamentale è anche il perfezionamento tecnologico da attuare sui dispositivi di sfruttamento e conversione energetica delle biomasse così da incrementarne i livelli di efficienza e abbatterne i costi di sviluppo e gestione. In questo ambito indispensabile è poi la necessità di disporre di incentivi differenziati per tecnologia e mirati a favorire soprattutto la ricerca e le applicazioni che si trovano ancora oggi in fase di sperimentazione.

Questo volume comincia con l'individuare i principali comparti di provenienza di questa risorsa rinnovabile, disponibile in varie forme e con proprietà chimico-fisiche assai differenti, passando poi ad una dettagliata analisi dello stato dell'arte delle tecnologie di conversione energetica delle biomasse, sia di quelle industrialmente disponibili sia di quelle in corso di sviluppo e messa a punto e che presentano le più interessanti possibilità di ingegnerizzazione a breve e medio termine.

In particolare, tra le tecnologie biochimiche, la trattazione si sofferma sul processo di digestione anaerobica, per la produzione di biogas da sostanze ad elevato carico organico, e sulle tecniche di preparazione di biocarburanti come etanolo e biodiesel a partire rispettivamente da colture alcoligene e oleaginose. Vengono quindi affrontati i processi termochimici di pirolisi, gassificazione e combustione diretta con

particolare attenzione alle tecnologie impiantistiche oggi più affermate, e alle applicazioni per la produzione di energia elettrica e di energia termica. Un capitolo è dedicato ai vantaggi ambientali connessi allo sfruttamento energetico delle biomasse e un altro individua i principali strumenti di incentivazione riconosciuti sia a livello nazionale che europeo.

Un ultimo capitolo, infine, è dedicato alla situazione nella Regione Siciliana, in relazione agli aspetti normativi e alle misure previste dal Programma di Sviluppo Rurale (PSR) 2007-2013, e ai progetti dimostrativi avviati, concludendo con la stima del potenziale di produzione annua di biomassa residuale agricola e forestale nelle province della Sicilia.



Capitolo **Uno**

Le biomasse e la conversione energetica

Secondo il decreto legislativo 29 dicembre 2003, n. 387 (che recepisce a livello nazionale la direttiva europea 2001/77/CE sulla promozione di energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili) per biomassa si intende la parte biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui provenienti dall'agricoltura, dalla silvicoltura e dalle industrie connesse; nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani. Più semplicemente si può affermare che, in ambito energetico, la biomassa è qualsiasi sostanza organica, di origine vegetale o animale, da cui sia possibile ricavare energia o attraverso un impiego diretto o previa trasformazione in un combustibile solido, liquido o gassoso.

Appare dunque evidente che quando si parla di biomassa in realtà si intende un insieme di materiali con caratteristiche molto diverse tra loro, ma che tuttavia presentano una natura comune che li vede essere 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, stoccandola sotto forma di molecole complesse, a elevato contenuto energetico come carboidrati, lignina, proteine e lipidi. In questo modo vengono fissate complessivamente

circa $2 \cdot 10^{11}$ tonnellate di carbonio all'anno, con un contenuto energetico equivalente a 70 miliardi di tonnellate di petrolio, circa 10 volte l'attuale fabbisogno energetico mondiale. Per tale motivo la biomassa è considerata una risorsa rinnovabile e inesauribile, se opportunamente utilizzata, ovvero se il ritmo di impiego della stessa non supera la capacità di rigenerazione delle formazioni vegetali. In realtà le biomasse non sono illimitate quantitativamente, ma per ogni tipologia utilizzata la disponibilità dipende dalla superficie ad essa destinata, nonché dalle condizioni climatiche e ambientali le quali tendono a limitare in ogni regione le specie che vi possono crescere in modo conveniente ed economico. L'utilizzo a fini energetici delle biomasse può essere vantaggioso quando queste si presentano concentrate nello spazio e disponibili con sufficiente continuità nell'arco dell'anno, al contrario invece, un'eccessiva dispersione sul territorio o una troppo concentrata stagionalità dei raccolti rendono più difficili e onerose le operazioni di raccolta, trasporto e stoccaggio. Le biomasse impiegate a fini energetici sono disponibili in varie forme che vengono tipicamente suddivise in funzione del comparto di provenienza.

[1.1] Comparto forestale e agroforestale

Si fa in questo caso riferimento ai residui, perlopiù di tipo legnoso, delle operazioni selvicolturali o delle attività agroforestali. La biomassa legnosa che si ricava da questo comparto per poter essere destinata a fini energetici deve possedere requisiti specifici in termini di densità, composizione chimica e tenore di umidità. Questi fattori infatti, variabili in funzione della specie, dell'età e delle condizioni stagionali, incidono in maniera rilevante sul potere calorifico del legno e quindi sono determinanti nell'efficienza e nella qualità dei processi di combustione a cui i prodotti del comparto forestale vengono quasi esclusivamente destinati. Nella **tabella 1.1** si riassumono le principali caratteristiche chimico fisiche della biomassa legnosa.

La biomassa legnosa viene generalmente immessa sul mercato in pezzature molto diverse sia per forma che per grado di umidità, quelle più comuni, nonostante il sempre maggiore interesse verso prodotti densificati come pellets e bricchetti, rimangono comunque il cippato e i tradi-

zionali tronchetti di legno. Quest'ultimi, in particolare, rappresentano 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 sempre più moderne tecnologie per il riscaldamento residenziale.

L'aspetto che rende forse più interessante lo sfruttamento energetico delle biomasse forestali è sicuramente l'ampia disponibilità di questa fonte a livello nazionale, basti ricordare infatti che ben il 32% del territorio italiano è coperto da boschi e foreste. Tuttavia però non mancano elementi di criticità legati soprattutto all'attività di reperimento di questa risorsa che richiede ad esempio una viabilità forestale sufficientemente sviluppata e fruibile dai comuni mezzi di raccolta e trasporto. L'assenza in molti casi delle necessarie infrastrutture, come ad esempio nelle aree montane dove si sviluppano formazioni boschive in zone accidentate e a pendenza elevata, pone difficoltà logistiche non indifferenti che si traducono inevitabilmente in un aggravio dei costi di raccolta.

[1.2] Comparto agricolo

Questo comparto fornisce un'ampia gamma di materiali che possono trovare facilmente impiego a fini energetici; ad esso fanno riferimento sia i residui delle attività agricole a scopo alimentare altrimenti non utilizzabili (paglie di cereali, stocchi, sarmenti di vite, ramaglie di potatura, ecc.), che le colture energetiche dedicate. Si tratta in quest'ultimo caso di biomasse coltivate specificatamente per

Tabella 1.1 – Principali caratteristiche 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

Fonte: AREA Science Park

lo sfruttamento energetico o per la realizzazione di combustibili; queste possono essere sia terrestri, di natura lignocellulosica, alcoligena o oleaginosa; oppure possono essere biomasse acquatiche, e in questo caso tipicamente si parla di alghe o microalghe.

Per quanto riguarda i residui colturali c'è da dire che, sebbene rappresentino una fonte energetica facilmente accessibile, ad essi si possono ricondurre alcune criticità legate soprattutto al loro sfruttamento e in particolare agli impieghi alternativi ai quali possono essere destinati, alla loro bassa produttività per unità di superficie e alla loro composizione chimica. Un primo aspetto da non sottovalutare quindi è che attraverso l'impiego energetico di alcuni residui colturali (tipicamente derivati del mais), che normalmente vengono interrati nello stesso campo in cui si sono raccolti, si sottrae a questi siti produttivi un prezioso apporto di sostanze organiche indispensabili per migliorare la struttura e mantenere la fertilità dei terreni. 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 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, ricordando che essa, in linea generale, non è consigliabile quando comporta dei risvolti negativi a livello agronomico; un'approfondita conoscenza delle caratteristiche chimico-fisiche del terreno si rivela dunque sempre necessaria al fine di definire correttamente il giu-

sto quantitativo di materiale che è possibile eventualmente asportare per destinarlo alla produzione di energia. Un secondo fattore di criticità nei riguardi di un impiego intensivo dei residui agricoli a fini energetici è sicuramente quello legato alle 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. 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 infatti, la presenza di ceneri determina un incremento nella formazione di scorie e depositi, con conseguente danno per i bruciatori, nonché un aumento delle emissioni di particolato in atmosfera. Le principali caratteristiche dei sottoprodotti agricoli sono riassunte in **tabella 1.2**.

Come è possibile notare si hanno sostanzialmente due differenti categorie di residui agricoli: quelli di natura erbacea e quelli di natura arborea. Tra i primi il prodotto più comune è sicuramente la paglia derivante dalla coltivazione dei cereali autunno vernini; questa, nonostante le criticità mostrate in precedenza, risulta essere in realtà un buon combustibile, grazie soprattutto al bassissimo tenore di umidità, al p.c.i. paragonabile con quello del legno e alla possibilità di compprimerla in rotoballe o presse di forma regolare, facilmente alimentabili in caldaia. Alla seconda categoria fanno invece parte tutte le porzioni legnose che con le periodiche operazioni di potatura vengono asportate dagli impianti arborei. Allo stato attuale però non esistono sistemi automatici di raccolta (se non alcuni prototipi messi a punto per i sarmenti della

Tabella 1.2 – Principali caratteristiche dei sottoprodotti agricoli

Sottoprodotto	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

Fonte: ITABIA – Italian Biomass Association

vite e le frasche dell'olivo), pertanto per questa categoria di materiali la filiera è tutta da costruire, anche nei casi in cui la vicinanza oggettiva degli impianti renderebbe questa fonte di approvvigionamento davvero competitiva. Come precedentemente ricordato il comparto agricolo fornisce, oltre a residui colturali di vario genere, anche un'altra tipologia di biomassa la quale, prodotta con coltivazioni specificatamente destinate all'impiego energetico, può avere natura lignocellulosica, oleaginosa o alcoligena.

Le colture lignocellulosiche comprendono specie erbacee caratterizzate da un ciclo di vita annuale (canapa, sorgo, kenaf), specie erbacee poliennali (canna comune, miscanto, panico) e specie legnose (ginestra, pioppo, salice). 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, mentre più raramente vengono utilizzate per la produzio-

ne combinata di energia termica ed elettrica in impianti di cogenerazione. Alcuni fattori devono però essere attentamente valutati prima di scegliere la specie che maggiormente si adatta a subire un processo di combustione. In linea generale si può dire che le biomasse erbacee poliennali sono caratterizzate da costi di produzione decisamente inferiori rispetto alle biomasse provenienti da colture legnose; questo aspetto però non compensa una serie di ostacoli che di fatto limitano decisamente l'utilizzo delle perenni erbacee nella produzione di calore ed elettricità. Tra i principali inconvenienti si riscontra ad esempio la minor efficienza durante la combustione, se comparata con l'utilizzo di biomassa legnosa, 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, fosforo, zolfo, azoto e cloro.

Particolare attenzione deve essere invece rivolta alle specie arboree dedicate, come

il pioppo, la ginestra, il salice, la robina e l'eucalipto, coltivate come ceduo a brevissimo turno (Short Rotation Forestry – SRF) e, data la loro elevata velocità di accrescimento, tagliate ogni 1–3 anni. In generale la densità di impianto è molto elevata (8.000–12.000 piante/ha), così come la meccanizzazione che copre di fatto tutte le fasi colturali: dall'impianto delle talee, alla raccolta che viene effettuata con falcia-trincia-caricatrici di ultima realizzazione che permettono di ottenere circa 30 ton/ora di biomassa. Il prodotto principale è costituito da cippato di legno fresco che può avere varie destinazioni d'uso tra cui soprattutto l'industria della carta, del pannello truciolare e, ovviamente, dell'energia. Un altro vantaggio della SRF è poi quello di non richiedere particolari attenzioni sotto il profilo dell'assistenza nutrizionale e fitosanitaria; basta infatti solamente apportare al terreno non più di 4–6 kg di elementi nutrienti (N–P–K) per tonnellata di s.s. asportata così da mantenere un adeguato livello di fertilità e un buon livello di produzione annua (variabile mediamente da 11 ton s.s./ha, con il turno annuale, a 22 ton s.s./ha con il turno triennale).

Le colture oleaginose e alcoligene invece, a differenza delle biomasse finora citate, non sono impiegate direttamente come biocombustibile, ma adoperate

come materia prima per ricavarne, attraverso specifici processi biochimici, combustibili alternativi quali biodiesel e bioetanolo, da utilizzare nei motori a combustione interna in alternativa ai tradizionali derivati del petrolio. Tra le colture oleaginose vanno annoverate molte specie, diffuse su scala mondiale, sia di natura arborea, come la palma da cocco, sia di natura erbacea, come il girasole, la colza o la soia. Tra le colture alcoligene ritenute tipicamente idonee alle condizioni pedoclimatiche italiane si ricordano invece: la barbabietola da zucchero e il sorgo zuccherino per quanto riguarda le specie saccarifere, ovvero quelle costituite da zuccheri semplici (in primis saccarosio e glucosio), il frumento e il mais per quanto riguarda le specie amilacee, cioè quelle caratterizzate da zuccheri in forma complessa (amido).

La coltura energetica ideale deve avere un ridotto fabbisogno di apporti chimici e nutrizionali, bassi livelli umidità alla raccolta, soprattutto nel caso di specie lignocellulosiche, e in generale un'ottima efficienza nell'utilizzazione della radiazione solare. La resa potenziale, infatti, è sicuramente uno dei parametri più importanti da prendere in considerazione nella scelta della miglior tipologia di coltura da impiantare, scelta che comunque non deve trascurare l'aspetto riguardante anche la qualità del prodotto. Le colture energetiche sono potenzialmente impiantabili sia nei terreni "set-aside" cioè messi a riposo forzato perché eccedentari per quel che riguarda le produzioni alimentari, sia nei terreni marginali ovvero non più utilizzati da almeno un decennio, per motivi perlopiù di natura ambientale, sociale, economica e strutturale, la cui disponibilità risulta oggi in costante aumento a causa soprattutto della riduzio-

Figura 1.1
Un impianto di short rotation forestry al momento della raccolta



ne delle attività agricole. Quest'ultima condizione, insieme alle continue ricerche volte ad aumentare i livelli di produttività e a migliorare le tecnologie di meccanica agraria per la raccolta, lo stoccaggio e il trasporto all'industria di trasformazione, rendono sempre più diffusa la convinzione che la bioenergia derivata da colture energetiche assumerà nei prossimi anni un ruolo sempre più rilevante. Ciò permetterà di valorizzare pienamente le risorse naturali e le potenzialità produttive del nostro sistema agricolo e forestale, e costituirà un passo importante per l'affermazione di un nuovo ruolo dell'agricoltura, produttrice non solo di alimenti, ma di una vasta gamma di materie prime per l'industria e l'energia, nel quadro più generale di un migliorato rapporto fra le attività produttive, la tecnologia e l'ambiente.

[1.3] Comparto zootecnico

Fanno parte di questo settore le biomasse che vanno sotto il nome di deiezioni zootecniche con le quali si intende comunemente l'insieme dei prodotti di scarto (o reflui) di un allevamento, risultato della miscela di feci, urine, acqua, lettiera, peli e residui alimentari. Quando invece si parla di deiezioni tal quali o propriamente dette, ci si riferisce tipicamente al solo

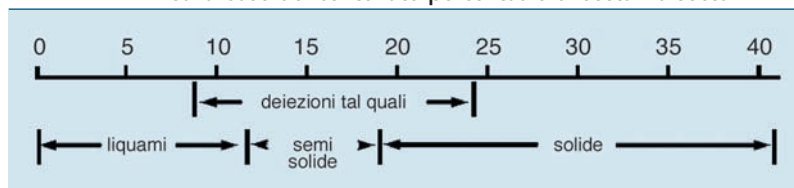
sottoprodotto fisiologico degli animali: quindi feci e urine. Le deiezioni zootecniche presentano una composizione estremamente variabile non solo in funzione dell'origine (bovina, suina, avicola, ecc.), ma anche in funzione delle modalità di allevamento e di gestione dello stesso; è bene qui ricordare ad esempio che il quantitativo di acqua e quindi, all'opposto, il contenuto in sostanza secca, giocano un ruolo determinante già nella scelta del sistema di trattamento più idoneo. In figura 1.2 viene illustrata la classificazione delle deiezioni zootecniche sulla base del contenuto percentuale in sostanza secca; è possibile già anticipare come la porzione che ricade nella definizione di liquame (suino, bovino) sia quella che meglio si presta allo sfruttamento energetico mediante il processo di digestione anaerobica che verrà successivamente descritto.

[1.4] Comparto industriale

Rientrano in questo comparto sia i residui provenienti dalle industrie per la lavorazione del legno e della carta, che quelli derivati dalle industrie agroalimentari. Quando si fa riferimento all'industria del legno si individuano generalmente tre tipologie di scarti di lavorazione:

- *scarti di legno vergine*, costituiti da residui di legno naturale di varia pezzatura (segatura, trucioli, cippato, ecc.) provenienti da segherie, carpenterie e falegnamerie;
- *scarti di legno trattato*, costituiti da residui con presenza di colle e/o prodotti vernicianti provenienti tipicamente da industrie, come i mobilifici, dove si producono pannelli a base di legno;

Fig. 1.2
Suddivisione delle deiezioni zootecniche sulla base del contenuto percentuale di sostanza secca



- *scarti di legno impregnato*, costituiti da residui legnosi impregnati con preservanti a base di sali che vengono in genere utilizzati nella produzione di manufatti particolari, quali pali telefonici o traversine ferroviarie.

A scopo energetico, salvo nel caso di impianti dotati di particolari sistemi di controllo delle emissioni e abbattimento degli inquinanti, possono essere utilizzati come biocombustibili solo i residui e i sottoprodotti legnosi non trattati chimicamente o trattati con prodotti che però non contengano sostanze tossiche come metalli pesanti o composti alogenati organici. Ciò esclude di fatto l'impiego energetico degli scarti di legno impregnato, che in realtà rappresentano solo una piccola percentuale di tutti i residui legnosi prodotti in ambito industriale. Gli scarti di legno vergine o trattato invece, perlopiù provenienti da segherie e mobilifici, hanno allo stato attuale un vasto mercato che li vede impiegati soprattutto nell'industria della carta e dei truciolati e in minore misura per fini energetici o come materia prima per la produzione di pellet. Una così vasta richiesta di residui legnosi comporta non poche difficoltà di approvvigionamento, il quale, in assenza di un sufficiente mercato interno, viene fatto spesso all'estero con un conseguente aggravio in termini di costi sostenuti. Si possono poi ricondurre al comparto industriale tutti quei materiali di scarto provenienti dalle lavorazioni dell'industria agroalimentare i quali, per il loro elevato carico organico e il loro alto tenore di umidità, si prestano particolarmente al recupero energetico mediante digestione anaerobica attraverso la quale è possibile ottenere una produzione specifica di biogas compresa mediamente tra 0,25 e 0,35 m³/kg ss.

Tra i residui dell'industria agroalimentare si ricordano il siero, proveniente dal settore lattiero caseario, gli scarti di macellazione della carne o di lavorazione del pesce, gli effluenti derivanti dalla fase di trattamento del melasso nell'industria saccarifera, nonché tutti i residui, ad alto contenuto organico, che si producono nelle industrie di lavorazione di bevande come succhi di frutta, birra e distillati.

[1.5] Comparto dei rifiuti

Si considerano in questo caso sia i residui delle operazioni di manutenzione del verde pubblico, tipicamente di natura lignocellulosica, che la frazione umida di rifiuti solidi urbani. Il recupero di questo materiale a scopo energetico permette di cambiare completamente la prospettiva da cui considerare l'annosa questione dello smaltimento e della gestione dei rifiuti; questi infatti, nell'ottica di uno sfruttamento energetico, non vengono più guardati come scarti di cui doversi liberare nel modo più indolore possibile, ma come un bene, come una ricchezza da sfruttare opportunamente. Gli scarti vegetali, nonostante presentino caratteristiche fortemente disomogenee che variano in funzione della percentuale di frazione erbacea o legnosa presente, possono trovare utilmente impiego, dopo condizionamento, in impianti per la produzione di calore e/o elettricità mediante combustione. La frazione organica dei rifiuti solidi urbani, a maggiore contenuto di umidità, può essere invece utilizzata nella produzione di biogas, sfruttando i processi di fermentazione in condizioni di anaerobiosi (digestione anaerobica).

[1.6] I vantaggi delle biomasse e le problematiche connesse al loro utilizzo

In molti paesi, tra cui purtroppo anche l'Italia, le biomasse che si producono diffusamente sul territorio e che non hanno come fine specifico lo sfruttamento energetico, sono viste più come rifiuti che come fonti rinnovabili, e non rientrano pertanto in adeguati circuiti di raccolta. Gli agricoltori, gli allevatori e le industrie agroalimentari tendono generalmente a disfarsi dei sottoprodotti bruciandoli o abbandonandoli nell'ambiente, creando così un danno sia ambientale che economico. La decomposizione incontrollata delle biomasse porta infatti al rilascio in atmosfera di gas climalteranti come CO₂ e CH₄, che potrebbero invece essere opportunamente trattenuti, con la possibilità inoltre di utilizzare il metano a fini energetici. Analogamente la combustione nei campi di sostanze vegetali determina un rilevante quantitativo di emissioni inquinanti che potrebbero essere sensibilmente ridotte se i sottoprodotti agricoli venissero bruciati in appositi impianti da cui sarebbe possibile ottenere, come ulteriore vantaggio, anche la produzione di energia. La valorizzazione energetica delle biomasse permette poi di sottrarre allo smaltimento in discarica decine di milioni di tonnellate di residui ogni anno, garantendo di conseguenza anche in questo caso risparmi non indifferenti. I maggiori problemi nella sensibilizzazione ad un utilizzo proficuo delle biomasse si hanno soprattutto per il contesto agricolo che in Italia è costituito perlopiù da piccole aziende, estese pochi ettari, e da una proprietà non sufficientemente motivata ad associarsi per intraprendere

forme innovative di impresa quale può essere l'energy farm o la semplice vendita dei residui colturali come combustibili. In ambito agro-industriale, invece, le difficoltà che si incontrano sono minori in quanto le biomasse in gioco (nocioli, sanse esauste, segatura, ecc.) per loro natura, si trovano già concentrate in siti industriali, costituendo un rifiuto da smaltire onerosamente oppure un combustibile da valorizzare. Questa classe di biomasse, a differenza di quelle di origine agricola, maggiormente dispersa sul territorio e a bassa intensità energetica, per accessibilità e consistenza, è candidata ad essere impiegata elettivamente per la produzione di energia.

Le piena diffusione delle biomasse come fonti alternative, richiede un'ottimizzazione della filiera cioè della sequenza di operazioni e procedimenti che consentono di ottenere energia partendo dalla materia prima vegetale o animale. Il processo di ottimizzazione dei diversi segmenti si realizza in generale riducendo i costi e massimizzando i benefici finali; questi obiettivi però possono essere raggiunti solo in seguito ad una attenta analisi territoriale che identifichi nello specifico le condizioni di approvvigionamento della materia prima. È necessario verificare infatti la piena disponibilità di biomassa sul territorio e qualora questa presenti il carattere della stagionalità, è bene diversificare le fonti, servendosi di materiale boschivo, di residui agroalimentari e dell'industria del legno, di pellets o di colture dedicate. La riduzione dei costi e quindi la possibilità di rendere la biomassa competitiva nei confronti sia dei combustibili tradizionali che verso utilizzi non energetici, si realizza attraverso interventi specifici su i diversi segmenti di filiera.

È bene meccanizzare le operazioni di rac-

colta, sminuzzare la materia prima per aumentarne la densità prima della fase di trasporto e migliorare quest'ultima ad esempio creando infrastrutture (strade, piste) per garantire così un più facile accesso agli addetti, alle macchine e alle attrezzature.

Interventi auspicabili sono poi quelli mirati alla ottimizzazione della fase di stoccaggio da farsi in funzione della capacità dell'impianto di conversione, delle caratteristiche e dei tempi di rifornimento della materia prima e sulla base del degrado a cui va incontro col passare del tempo la biomassa immagazzinata. Infine appare evidente la necessità di aumentare l'efficienza energetica al fine di ridurre sia i costi di produzione che le emissioni; in questo senso un ruolo da protagonista è svolto da i sistemi di cogenerazione eventualmente integrati, la dove possibile, con reti di teleriscaldamento o teleraffrescamento.

Come già detto uno sviluppo armonico dell'intera filiera delle biomasse nel suo complesso, consente positive ricadute sul territorio con vantaggi a livello economico, sociale e ambientale. Tra questi si ricorda:

A livello economico

- La diversificazione dell'offerta energetica e quindi la riduzione dell'energia importata.
- La riconversione, diversificazione e integrazione delle fonti di reddito nel settore agricolo.
- La valorizzazione economica dei sottoprodotti e dei residui organici, attualmente in gran parte smaltiti in maniera non corretta.
- Il risparmio nei costi di depurazione e smaltimento per i residui prodotti da attività agroindustriali e industriali.

- La possibilità di stimolare la crescita delle industrie operanti nel settore della bioenergia.

A livello sociale

- L'apertura del mercato dell'energia agli operatori agricoli.
- La creazione di opportunità occupazionali in aree con elevato tasso di disoccupazione.
- La possibilità di contrastare fenomeni di spopolamento delle campagne e degrado di aree marginali.

A livello ambientale

- La riduzione delle emissioni di sostanze clima alteranti come ad esempio la CO₂. L'utilizzazione delle biomasse per fini energetici, infatti, non contribuisce ad aumentare il fenomeno dell'effetto serra in quanto la quantità di anidride carbonica rilasciata durante la decomposizione, sia che essa avvenga naturalmente, sia per effetto della conversione energetica, è equivalente a quella assorbita durante la crescita della biomassa stessa; non vi è, quindi, alcun contributo netto all'aumento del livello di CO₂ in atmosfera, a meno naturalmente della porzione prodotta dalle attività di raccolta e trasporto.
- La riduzione delle emissioni in atmosfera dei principali inquinanti di origine fossile (SO_x, CO, benzene) grazie all'impiego, in alternativa ai prodotti petroliferi, di biocombustibili derivanti da sostanze vegetali.
- La riforestazione dei terreni marginali, con un contributo al controllo dell'erosione e del dissesto idrogeologico di zone collinari o montane.
- La razionalizzazione delle cure colturali boschive favorendo così la prevenzione degli incendi.

Nonostante tuttavia il crescente interesse maturato nei confronti delle biomasse e il pressoché unanime riconoscimento dei vantaggi legati alla loro diffusione, nel contesto economico italiano queste risorse non hanno ancora pienamente raggiunto una dimensione di mercato. Ciò è riconducibile ad una complessa serie di fattori e barriere, che ne rallentano tuttora lo sviluppo. Tra queste vanno ricordate ad esempio quelle di natura tecnologica: malgrado infatti la maggior parte delle tecnologie siano state già ampiamente sviluppate, alcune di queste rimangono a livello pre-commerciale in quanto richiedono ancora attività di studio e perfezionamento. Tra i principali ostacoli alla diffusione delle bioenergie vi è poi il prezzo di mercato dei combustibili fossili che, nonostante i continui rincari, rimane tuttavia sufficientemente basso da rendere ancora poco competitiva qualsiasi altra fonte di energia. Tale mancanza di competitività è legata in realtà anche all'attuale sistema dei prezzi, che non tiene conto delle esternalità e dei costi sociali connessi allo sfruttamento delle risorse fossili (danni alla salute pubblica, degrado dei monumenti, cambiamento climatico, ecc.). Un'altra importante barriera di natura economica è poi quella legata agli ancora troppo alti costi iniziali di investimento per tali tecnologie che soffrono del loro carattere innovativo e dell'attuale limitata diffusione sul mercato. A tutto questo si aggiungono poi i consueti ostacoli di natura istituzionale e politica che, almeno fino al recente passato, hanno reso difficile l'avvio dell'iniziativa privata nel mercato dell'energia, nonché l'interazione tra settori diversi, come quello agricolo e quello energetico. Come diretta conseguenza di tutto ciò, la diffusione delle bioenergie ha sofferto della man-

canza di informazione e consapevolezza sull'argomento, sia a livello di classe politica, sia a livello di opinione pubblica. È innegabile comunque che, negli ultimi anni, dopo la Conferenza di Kyoto, la Conferenza Nazionale Energia e Ambiente, la pubblicazione del PNERB e del Libro Bianco per le Rinnovabili, questo panorama stia lentamente mutando e che, dunque, i tempi possano a breve essere maturi per un considerevole rilancio del settore bioenergetico.

[1.7]

Le tecnologie di conversione energetica della biomassa

La *conversione energetica* delle biomasse viene attuata mediante due differenti tipologie di processi: processi biochimici e processi termochimici. I primi permettono di ottenere energia grazie alle reazioni chimiche prodotte da enzimi, funghi e microrganismi, che si formano nella sostanza trattata sotto particolari condizioni. Tali processi sono particolarmente adatti per tutte quelle biomasse che presentano un rapporto C/N < 30 e un'umidità alla raccolta superiore al 30%; sono quindi sicuramente utilizzabili le colture acquatiche, alcuni sottoprodotti colturali, i reflui zootecnici nonché la frazione organica dei rifiuti solidi urbani (FORSU). I processi di conversione termochimica sono basati, invece, sull'azione del calore il quale trasforma la biomassa di partenza o direttamente in energia termica, attraverso un comune processo di combustione, o in altri prodotti, solidi, liquidi o gassosi, successivamente impiegabili sempre a scopi energetici. Nei processi termochimici sono utilizzabili le biomasse di natura ligneo-cellulosica in cui il rapporto C/N abbia valori superiori

a 30 e il contenuto d'umidità non superi il 30%. Le biomasse più adatte a subire questa tipologia di processi sono la legna e tutti i suoi derivati (segatura, trucioli, ecc.), i più comuni sottoprodotti colturali di tipo ligno-cellulosico (paglia di cereali, residui di potatura della vite e dei fruttiferi, ecc.) e taluni scarti di lavorazione (lolla, pula, gusci, noccioli, ecc.). Nei capitoli successivi verranno descritte sia le tecnologie con-

solidate e già utilizzate su scala industriale, come la combustione diretta, l'estrazione di oli, la fermentazione alcolica e la digestione anaerobica, sia le tecnologie ancora in fase di sperimentazione come la gassificazione, la pirolisi e la digestione aerobica, per le quali è necessario ancora condurre attività di ricerca e sviluppo al fine di ridurre i costi e aumentare i rendimenti di conversione.



A photograph of a sugarcane field. The stalks are tall and green, with some lower leaves showing signs of aging and turning brown. The background is a bright, overcast sky. A semi-transparent white horizontal band is overlaid across the upper portion of the image, containing the text 'Capitolo Due'.

Capitolo **Due**

La conversione biochimica

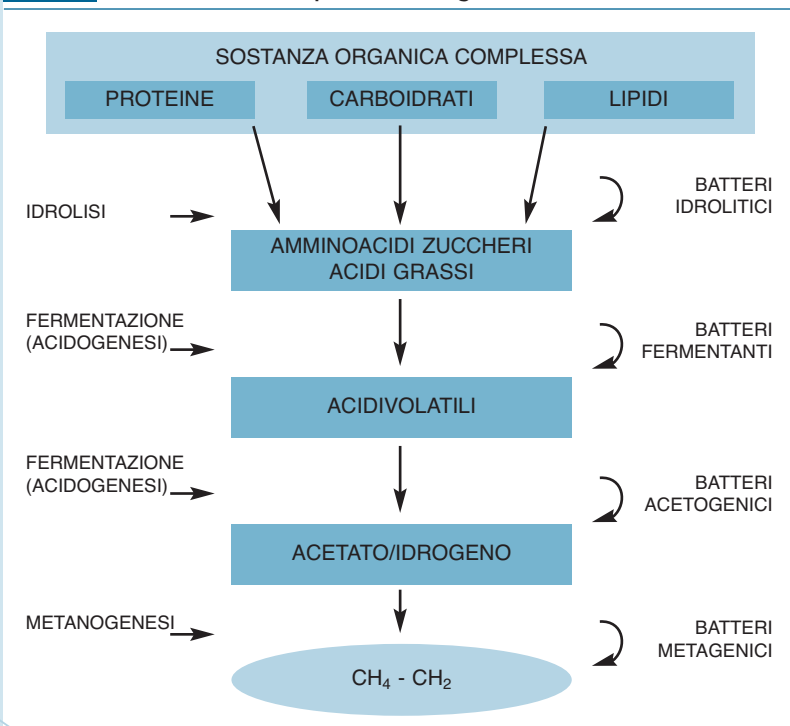
[2.1] La digestione anaerobica

La digestione anaerobica è un processo biologico complesso per mezzo del quale dei microrganismi; operando in assenza di ossigeno e all'interno di reattori a temperatura costante, trasformano la sostanza

organica, contenuta sia nei vegetali che nei sottoprodotti di origine animale, in biogas ovvero in una miscela costituita principalmente da metano (50–70%) e anidride carbonica (20–30%). La concentrazione di queste sostanze nel biogas, che contiene in realtà anche piccole percentuali di idrogeno, monossido di carbonio, idrocarburi saturi e tracce di acido solfidrico e ammoniacale, dipende quasi esclusivamente dal tipo di sostanza organica digerita e dalle condizioni nelle quali si realizza la digestione. Come illustrato in figura 2.1, il processo di digestione anaerobica si realizza in tre fasi distinte nelle quali lavorano in serie diversi ceppi batterici.

La prima fase è quella idrolitica, essa avviene ad opera dei batteri idrolitici che riducono i carboidrati, le proteine e i lipidi contenuti nella sostanza organica di partenza rispettivamente in monosaccaridi, aminoacidi e acidi grassi, ovvero in composti organici più semplici. Successivamente, nella 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. Per finire si ha poi la fase metanigena, in cui i batteri metanigeni, appunto, convertono i prodotti precedentemente formati in meta-

Fig. 2.1 Fasi del processo di digestione anaerobica



no (CH_4) e anidride carbonica (CO_2), che rappresentano, come detto, i principali costituenti del biogas. Quest'ultimi batteri poi, oltre ad avere un tasso di crescita particolarmente lento, lavorano in maniera ottimale solo con pH compreso tra 7 e 7,5; ciò di fatto rende la fase di conversione/metanizzazione particolarmente delicata e difficile da realizzare tanto che essa rappresenta indubbiamente lo step maggiormente limitante per l'intero processo di conversione biochimica. Complessivamente dunque, attraverso il meccanismo della digestione anaerobica, la componente organica delle biomasse trattate viene degradata liberando, sotto forma di biogas, l'energia chimica in essa contenuta, in misura variabile generalmente dal 30 all'85%. 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 ceppi batterici, compromesso che può realizzarsi mediante uno stretto controllo dei principali parametri di processo, come ad esempio temperatura, pH, tempo di permanenza idraulico del substrato nel digestore, produzione e composizione del biogas, acidità volatile e alcalinità.

Il prodotto ottenuto da questa conversione biochimica è dunque un gas combustibile ad elevato potere calorifico che addirittura supera quello del syngas (proprio per l'alta concentrazione di metano) e che raggiunge un valore medio di circa 23 MJ/Nm³. Una volta estratto dal digestore il biogas prodotto viene raccolto, essiccato, purificato da sostanze non desiderate, compresso e immagazzinato per essere poi utilizzato come combustibile

in uno svariato numero di applicazioni. È possibile infatti impiegarlo nell'alimentazione di caldaie a gas per produrre calore, in motori a combustione interna (di derivazione navale e basso numero di giri) per produrre energia elettrica, in impianti turbogas o a ciclo combinato (di potenza superiore ai 5 MW_e), in sistemi di cogenerazione come le microturbine o ancora nei motori diesel predisposti in configurazione dual fuel. Generalmente poi una parte del biogas prodotto (circa il 30%) viene bruciato, all'interno dello stesso impianto, per mantenere in temperatura il reattore e consentire quindi lo svolgimento del processo di digestione. Un'ulteriore applicazione molto promettente è quella che riguarda la produzione di biometano ottenuto eseguendo sul biogas un processo di upgrading e compressione fino a 220 bar, il prodotto è puro al 98% e può essere impiegato con successo come carburante nei normali veicoli a metano. Dall'attività di digestione anaerobica si ottengono, oltre al biogas (utilizzabile come visto per fini energetici), anche due sottoprodotti: ovvero un liquido surnatante da trattare prima dello scarico e dei fanghi humificati e mineralizzati. Quest'ultimi contengono in forma mineralizzata, quindi non più degradabile, sostanze quali azoto, fosforo e potassio; inoltre essendo anche umificati sono praticamente metastabili ovvero non putrescibili, inodore e soggetti a una decomposizione molto lenta; hanno quindi tutte le proprietà di un ottimo fertilizzante e proprio per questo sono utilizzabili in agricoltura pur se nei limiti imposti dalla normativa, in quanto il contenuto residuo di azoto nel digestato prodotto dagli impianti a biogas deve essere conteggiato nella redazione dei piani di concimazione, al fine di evitare di superare la soglia

di unità di azoto ad ettaro soprattutto nelle aree classificate come vulnerabili secondo la direttiva europea sui nitrati..

Biomasse impiegabili nel processo di digestione anaerobica

Come precedentemente accennato, la digestione anaerobica può essere applicata su sostanze organiche sia di natura vegetale che di natura animale, risultano quindi impiegabili:

- *Liquame suino*: questo tipo di effluente zootecnico è caratterizzato da un contenuto di sostanza secca o solidi totali (1–6%) e di sostanza organica o solidi volatili estremamente variabile a causa delle differenti tipologie di allevamento comunemente presenti sul territorio.
- *Liquame bovino*: ad esso, nelle stalle, viene aggiunta spesso della paglia la quale determina un incremento nel contenuto di solidi totali rispetto a quanto visto per il liquame suino (8–15%). L'effetto di diluizione della sostanza organica è comunque minimo rispetto a quello che si ha con le deiezioni suine anche a causa del fatto che normalmente le zone calpestate dal bestiame vengono pulite e risciacquate con basse quantità di acqua. Come nel caso dei suini, anche nelle deiezioni bovine il contenuto di solidi totali dipende fortemente dal sistema di allevamento degli animali.
- *Deiezioni avicole (pollina)*: tra le varie deiezioni avicole, la pollina di galline ovaiole è quella che più si presta alla digestione anaerobica, perché l'allevamento in gabbie non prevede l'uso di lettiera. Le deiezioni asportate fresche presentano un contenuto in solidi totali del 18–20% e alto contenuto di azoto. L'ammoniaca, che si libera in presenza

di acqua per idrolisi enzimatica, può raggiungere alte concentrazioni, inibire il processo di digestione e dare luogo a forti emissioni nella fase di stoccaggio del digestato. Inoltre, frequentemente la pollina contiene inerti che sedimentando possono causare problemi operativi e ridurre il volume utile dei reattori.

- *Colture non alimentari ad uso energetico*: la coltivazione di piante specifiche da avviare alla digestione anaerobica per la produzione di biogas può essere, in Europa, una soluzione per ridurre la sovrapproduzione agricola, ma anche una valida alternativa per l'utilizzo di aree incolte e a riposo (set aside) o di aree irrigate con acque recuperate dai depuratori urbani. Nel corso degli ultimi anni molti studi sono stati effettuati su mais, sorgo, foraggi (ma anche altre colture hanno dimostrato di possedere un buon potenziale) per valutarne le caratteristiche ai fini del loro utilizzo energetico e per stabilirne la resa in biogas. Le tecnologie impiantistiche attualmente in via di sviluppo sono orientate all'utilizzo di tali sostanze, sia liquide che solide, come co-substrati alle deiezioni animali al fine di ottimizzare la produzione di biogas e favorire il riciclo dei nutrienti.
- *Scarti organici e acque reflue dell'agro-industria*: tipici sottoprodotti e scarti agro-industriali sono ad esempio, il siero di latte, contenente proteine e zuccheri dall'industria casearia, e i reflui liquidi dall'industria che processa succhi di frutta o che distilla alcool. Di interesse per la digestione anaerobica sono anche diversi scarti organici liquidi e/o semisolidi dell'industria della carne (macellazione e lavorazione della carne), quali grassi, sangue, contenuto

stomacale, budella (vedi Regolamento CE n. 1774/2002 “Norme sanitarie relative ai sottoprodotti di origine animale non destinati al consumo umano”). Tali residui, ad esempio, possono essere addizionati sempre come co-substrati nella digestione di liquami zootecnici e/o fanghi di depurazione.

- *Fanghi di depurazione*: sono il residuo del processo di depurazione delle acque reflue urbane e industriali e sono costituiti da biomassa batterica e da sostanza inerte, organica e inorganica. Il principale obiettivo che si pone la digestione anaerobica dei fanghi di depurazione è quello di stabilizzare la sostanza organica presente, distruggendo gli eventuali microrganismi patogeni, e rendendo così più facile lo smaltimento finale. In questo caso quindi, la produzione di biogas assume in realtà un ruolo secondario e addirittura, a causa delle problematiche connesse alle attuali normative italiane di riferimento, l’impiego dei fanghi di depurazione, come cosubstrato in digestori aziendali di liquami zootecnici è generalmente sconsigliato.
- *Frazioni organiche di rifiuti urbani*: nei rifiuti urbani domestici la percentuale di frazione organica umida è compresa in

genere tra il 25 e il 35% in peso. La composizione media di questa frazione se derivante da raccolta differenziata secco-umido non differisce in modo sostanziale dall’organico raccoglibile da utenze selezionate, quali mercati all’ingrosso dell’ortofrutta e dei fiori, mercati ittici e rionali, esercizi commerciali di generi alimentari, punti di ristoro (pizzerie, ristoranti, ristorazione collettiva); per il quale la presenza di piccole quantità di plastica e vetro è in genere inferiore al 5% sul totale. Queste frazioni organiche presentano un elevato grado di putrescibilità e umidità (> 65%) che le rende particolarmente adatte alla digestione anaerobica; tuttavia però l’utilizzo di tale substrato non è consigliabile, a causa delle problematiche connesse alle attuali normative italiane di riferimento, per la codigestione in impianti di biogas aziendali per liquami zootecnici. Utilizzando poi i rifiuti di origine organica nel processo di digestione oltre ad avere un vantaggio energetico con la produzione di biogas, si ottiene anche una sensibile riduzione delle emissioni liquide e gassose prodotte durante la fase di decomposizione in discarica.

Nella **tabella 2.1** è riportata la resa indi-

Tabella 2.1 – Resa indicativa in biogas per vari tipi di biomasse

Materiali	m ³ biogas/t SV
Deiezioni animali (suini, bovini, avicunicoli)	200 – 500
Residui colturali (paglia, coltetti barbabietole, ecc.)	350 – 400
Scarti organici agroindustria (siero, scarti vegetali, lieviti, fanghi e reflui di distillerie, birrerie e cantine, ecc.)	400 – 800
Scarti organici macellazione (grassi, contenuto stomacale e intestinale, sangue, fanghi di flottazione, ecc.)	550 – 1.000
Fanghi di depurazione	250 – 350
Frazione organica rifiuti urbani	400 – 600
Culture energetiche (mais, sorgo zuccherino, erba, ecc.)	550 – 750

cativa in biogas (m³ per ton di solidi volatili) per le varie biomasse e scarti organici destinabili al processo di digestione: in generale vale il principio secondo cui maggiore è il contenuto in sostanza organica del prodotto in digestione, maggiore è il suo potenziale energetico in termini di produzione di biogas.

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

- *La composizione del materiale:* questa condiziona la velocità di degradazione (degradabilità) del substrato; 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.
- *La 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. È necessario pertanto che questi elementi siano presenti nel digestato, ma nelle giuste proporzioni; si spiega così la necessità di avere, per il processo di digestione anaerobica una biomassa con rapporto tra carbonio e azoto (C/N) non superiore a 30.
- *Presenza di elementi tossici:* si tratta spesso micronutrienti quali sodio, potassio, calcio, magnesio, ammonio, zolfo che, se presenti in eccesso, possono indurre tossicità e ostacolare o addirittura bloccare il processo di digestione. Anche i metalli pesanti quali

rame, nichel, cromo, zinco, piombo possono risultare dannosi se presenti in concentrazioni superiori a 1 mg/l.

Codigestione

Sulla base dell'esperienza maturata con differenti tipologie di biomassa, è possibile affermare che le migliori prestazioni nel processo di conversione si raggiungono comunque utilizzando porzioni differenti di sostanza organica; proprio per questo ad esempio la codigestione di effluenti zootecnici con altri scarti organici, al fine di aumentare la produzione di biogas, è una pratica standard in Europa ormai da diversi anni. L'interesse che spinge gli operatori del settore verso la codigestione si giustifica in quanto la vendita di una maggior quantità di biogas, unitamente agli introiti ricevuti dai produttori del rifiuto organico utilizzato come co-substrato, permette di ottenere guadagni maggiori rispetto a quelli realizzabili utilizzando una sola specie organica. La miscelazione di diversi prodotti, inoltre, consente di compensare eventuali fluttuazioni stagionali nella disponibilità di biomassa, si mantiene così più stabile e costante il processo di conversione, evitando sovraccarichi o al contrario carichi inferiori alla capacità stessa del digestore. Diversi problemi tuttavia possono nascere da un utilizzo non congruo delle varie matrici; un'aggiunta incontrollata di oli e grassi, ad esempio, può determinare un'eccessiva formazione di schiume, mentre rifiuti contenenti considerevoli quantità di inerti, quali sabbia, pietre e terra, possono favorire la formazione di sedimenti nel digestore con conseguente riduzione del volume attivo o addirittura blocco di valvole e tubazioni. Se poi ad esempio si impiega come co-substrato un quantitativo eccessivo di deiezioni avi-

cole, a causa dell'elevata concentrazione di ammoniaca che queste determinano, è possibile che si arrivi addirittura alla morte dell'intera flora metanigena contenuta all'interno del reattore. Le matrici attualmente più utilizzate nella codigestione di effluenti zootecnici sono gli scarti organici agroindustriali e le colture energetiche. Gli scarti organici da utilizzare come cosubstrati provengono dalle più svariate fonti e possiedono quindi forti differenze nella composizione chimica e nella biodegradabilità. Alcune sostanze quali percolati, acque reflue, fanghi, oli, grassi e siero sono facilmente degradabili mediante digestione anaerobica senza richiedere particolari pretrattamenti, altre invece, come gli scarti di macellazione, i residui colturali e la frazione organica dei rifiuti solidi urbani, richiedono vari step di pre-trattamento tra i quali anche la necessità di effettuare una forte diluizione con il substrato base (effluenti zootecnici liquidi), al fine di limitare la formazione di metaboliti inibitori del processo di conversione (si veda ad esempio l'ammoniaca). Se poi si manda in codigestione la frazione organica dei rifiuti solidi urbani (FORSU) uno dei trattamenti innovativi di recente comparsa sul mercato è quello della pressatura-spremitura. Il materiale subisce in questo caso una vera e propria spremitura (ad opera di una coclea posta all'interno di un cilindro forato) attraverso la quale si separano due frazioni: la frazione liquida, ottima per l'invio a digestione anaerobica, e la frazione solida che viene invece destinata al compostaggio. Nonostante il grande interesse però, il ricorso a questo trattamento specifico è ad oggi ancora limitato soprattutto a causa del numero ridotto in Italia di impianti a doppia linea anaerobica-aerobica.

Le tecnologie di digestione anaerobica applicabili

L'esperienza accumulata nel corso degli anni, grazie a numerosi studi e applicazioni, ha condotto allo sviluppo di differenti tecnologie di digestione anaerobica, principalmente distinguibili in funzione del tenore di sostanza secca contenuta nel substrato alimentato al reattore. È possibile pertanto individuare due principali categorie di processi:

- *processi di digestione ad umido (wet)*, che si utilizzano quando il substrato in digestione ha un contenuto di sostanza secca inferiore al 10%; tipico è l'utilizzo di questa tecnologia per il trattamento di liquami zootecnici;
- *processi di digestione a secco (dry)*, che invece si applicano con substrati aventi un contenuto di sostanza secca superiore al 20%.

Si hanno in realtà anche dei processi a semisecco (*semi-dry*), molto meno comuni, che operano con substrati aventi un contenuto di parti solide intermedio ai valori precedentemente visti (quindi tra il 10% e il 20%). Il processo di digestione anaerobica può anche essere suddiviso in:

- *processo monostadio*, in cui le fasi di idrolisi, fermentazione acida e metanigena avvengono contemporaneamente in un unico reattore;
- *processo bistadio*, nel quale l'idrolisi e la fermentazione del substrato organico avvengono in un primo reattore, mentre la fase metanigena viene condotta separatamente in un secondo digestore.

Un'ulteriore distinzione tra le diverse tecnologie può essere fatta poi considerando sia la tecnica di alimentazione, che può essere in continuo o in discontinuo, che la modalità con la quale la biomassa si

dispone all'interno del reattore; in quest'ultimo caso infatti è possibile avere o un substrato completamente miscelato, oppure un substrato, in movimento lungo l'asse longitudinale, che attraversa fasi di processo via via diverse (flusso a pistone). La digestione anaerobica può, inoltre, essere condotta a diverse condizioni di temperatura: si hanno pertanto sia condizioni mesofile (con temperatura media di processo di circa 35 °C), che termofile (temperatura compresa tra 50 e 65 °C), le quali determinano in genere anche la durata (tempo di residenza) del processo di conversione. Mediamente in mesofilia si hanno tempi compresi nel range 15–40 giorni, mentre in termofilia il tempo di residenza è in genere inferiore ai 20 giorni (con i liquami zootecnici e i reflui agroindustriali). Con impiantistica di tipo semplificato è possibile operare anche in psicrofilia (10–25 °C): i sistemi che lavorano in queste condizioni vengono detti generalmente "a freddo" e i tempi di residenza che richiedono sono sempre superiori ai 30 giorni, con massimi anche di 90. Le tipologie impiantistiche 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 maggiormente alla conversione di tutte le altre tipologie di biomasse.

Impianti semplificati

Questa tipologia di impianto, che prevede solamente una vasca di stoccaggio per la raccolta dei liquami ricoperta da una copertura gasometrica, trova come detto grandi possibilità applicative nel settore zootecnico, grazie proprio alla sua semplicità costruttiva e gestionale. I sistemi più semplici, ovvero quelli "a freddo" (psicro-

fili), sono caratterizzati da rendimenti variabili in funzione sia della stagione dell'anno che dei tempi di permanenza dei liquami in vasca, che sono mediamente pari a 60 giorni. Gli impianti dotati invece di sistema di riscaldamento, con calore fornito dall'impiego del biogas, consentono di mantenere un regime di mesofilia (35–37 °C) e di ottenere rendimenti più elevati e più costanti durante l'intero arco dell'anno. Facendo riferimento ad esempio ad un liquame suino, le produzioni annuali di biogas sono di circa 25 m³/100 kg di liquame, nei sistemi psicrofili, mentre si aggirano intorno a i 35 m³/100 kg negli impianti che operano in condizioni mesofile.

Le coperture gasometriche hanno il compito di trattenere e di accumulare il biogas prodotto e possono essere principalmente a cupola o galleggianti. Le coperture a cupola (brevetto ENEA–Agrisilos) sono costituite da due o tre strati sovrapposti di membrane in tessuto poliestere che vengono fissati al bordo della vasca allo scopo di recuperare e immagazzinare direttamente i grandi quantitativi di biogas sviluppati da digestori aventi ridotte dimensioni planimetriche. Le due membrane più esterne costituiscano una vera e propria camera d'aria che funge da elemento di spinta pneumatica sulla terza membrana, la più interna, che racchiude il biogas prodotto. Nonostante esistano poi delle versioni con due sole membrane, una esterna e una di separazione, i sistemi a tre strati di poliestere sono tuttavia preferiti in quanto i teloni più interni, a contatto tra loro, evitano la formazione di miscele aria-gas. Quando si impiegano coperture di questo tipo poi, lo scarico del biogas è generalmente realizzato con valvole di sovrappressione, regolate da appositi sensori che rilevano lo stato di riempimento del digestore.

Le coperture galleggianti, sempre costituite da membrane in tessuto di fibre poliestere, sono invece caratterizzate da un sistema di galleggiamento su liquame realizzato con tubi flessibili e sfilabili in opera, che vengono riempiti di acqua. Questa tipologia di zavorra, tipicamente utilizzata nella copertura di vasche di grandi dimensioni, consente di mantenere ad una pressione di qualche centimetro di colonna d'acqua il biogas prodotto dalla fermentazione anaerobica di liquami di qualsiasi origine.

Nei casi in cui vi è la necessità di una maggiore capacità di accumulo di biogas, è poi possibile ricorrere all'utilizzo di gasometri esterni, di forma sferica e volume

variabile, anch'essi costituiti da due o tre membrane in poliestere.

Gli impianti semplificati dunque, sebbene offrano, rispetto a quelli più avanzati, una notevole facilità realizzativa, presentano tuttavia una serie di svantaggi che è bene prendere in considerazione quando si sceglie il tipo di digestore da adottare. Un primo aspetto molto importante è ad esempio la mancanza di un sistema di agitazione del liquame; per tale motivo le porzioni solide del refluo, che possono essere anche in notevole quantità, tendono nel tempo a solidificarsi in una crosta rigida superficiale che può generare una serie di problemi, primo fra tutti l'accumulo di biogas sotto di essa. Inoltre, l'assenza di una miscelazione forzata determina una disomogeneità nella concentrazione della sostanza organica da trattare e nei batteri anaerobici, ma anche nella temperatura e nel livello di pH all'interno della vasca. Questo fa sì che alcune zone del digestore rimangano meno attive di altre nella degradazione della biomassa, con il conseguente permanere di sostanze non trattate anche in uscita dall'impianto che quindi garantirà, rispetto ai sistemi dotati di miscelazione, una minor resa in biogas. L'assenza poi di un trattamento preliminare di equalizzazione della biomassa, crea una forte dipendenza della resa del digestore dalla qualità, dalla composizione, dalla freschezza e dalle altre caratteristiche chimico fisiche del liquame entrante; il che significa forte variabilità nei parametri di ingresso e, di conseguenza, di quelli del biogas in uscita.

Impianti ad umido (wet)

La biomassa, prima di essere caricata nel reattore anaerobico, subisce un trattamento finalizzato al raggiungimento del giusto tenore di solidi totali (< 10%) e di

Fig. 2.2 Impianto semplificato con copertura a cupola



Fonte: CRPA – Centro Ricerche Produzioni Animali

Fig. 2.3 Copertura gasometrica galleggiante



Fonte: CRPA – Centro Ricerche Produzioni Animali

un buon grado di omogeneizzazione; tale trattamento consiste principalmente in una diluizione effettuata mediante aggiunta di acqua (ricircolata dal digestore stesso) e in una rimozione sia di eventuali schiume che di eventuali plastiche, inerti e altri materiali grossolani potenzialmente dannosi per la meccanica dell'impianto. L'alimentazione così ottenuta è introdotta all'interno di un classico reattore completamente miscelato (CSTR – Completely Stirred Reactor) dove si realizza in un solo stadio e a ciclo continuo la conversione della biomassa in biogas. Questo reattore, realizzato a forma di silos in acciaio e cemento armato, lavora in condizioni di mesofilia o di termofilia; esso pertanto è munito di un sistema di riscaldamento a scambiatore di calore e di coibentazione perimetrale per limitare le dispersioni termiche. Al suo interno il materiale da digerire viene miscelato mediante agitatori meccanici a basso regime di rotazione (15–50 rpm), oppure, nei casi in cui il rischio di formazione di schiume è limitato, attraverso sistemi di tipo idraulico (gaslifter) che consistono nel ricircolo dello stesso biogas compresso all'interno del reattore.

Nei processi ad umido si opera generalmente con carichi organici compresi tra 2 e 5 kg SV/m³ giorno, questa concentra-

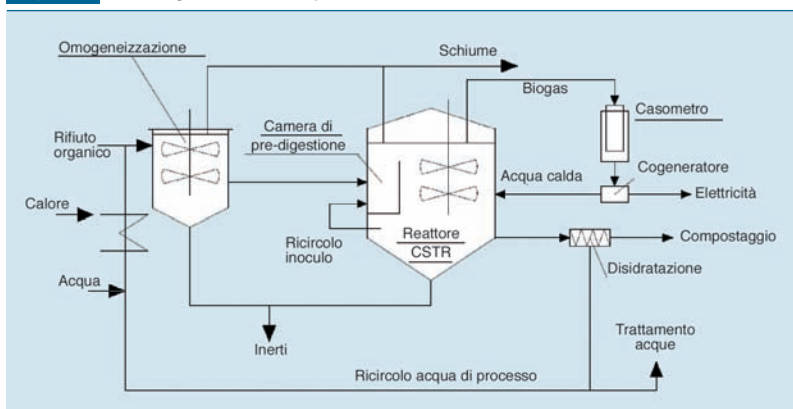
ne infatti è quella che, come dimostra l'esperienza, garantisce per questi impianti il maggior livello di conversione. La produzione di biogas dipende sensibilmente anche dalla tipologia di biomassa trattata; a causa delle caratteristiche fisiche disomogenee di quest'ultima infatti, risulta spesso estremamente difficile ottenere una buona omogeneizzazione dell'alimentazione e la stratificazione di materiali più e meno leggeri all'interno del digestore è un'evenienza tutt'altro che infrequente. Per limitare questi inconvenienti si realizza allora una rimozione periodica degli strati più leggeri, dalla parte superiore del reattore, e di quelli più pesanti dal fondo; tuttavia però con questa operazione non si riesce ad eliminare completamente né il rischio di danni ai sistemi meccanici di miscelazione né la cosiddetta "corto-circuitazione" idraulica che consiste nella fuoriuscita dal digestore di materiale non completamente degradato a cui corrisponde di fatto una minor produzione di biogas. Nella figura 2.5 si riassume lo schema di un processo in continuo monostadio ad umido, che rappresenta oggi la tecnologia più diffusa.

Impianti a secco (dry)

La digestione di tipo a secco è stata sviluppata per consentire il trattamento della biomassa senza necessità di diluizioni, operando con tenori di sostanza secca superiori al 20%. È evidente che il materiale organico digerito in questo tipo di sistema (perlopiù destinato alla frazione organica dei rifiuti urbani) è molto più concentrato e viscoso di quello utilizzato negli impianti ad umido, proprio per questo, pertanto, la tecnologia dei reattori e dei sistemi di trasporto, pompaggio e miscelazione deve essere completamente adattata alle caratteristiche di un'alimentazio-

Figura 2.4
Impianto centralizzato a doppio stadio, Spilamberto (MO)



Fig. 2.5 Layout di un impianto in continuo, monostadio, ad umido

Fonte: CRPA – Centro Ricerche Produzioni Animali

ne meno diluita. L'unico pretrattamento che in questo caso viene normalmente realizzato sulla biomassa, prima dell'ingresso nel digestore, è una vagliatura grossolana che consenta di rimuovere le frazioni con dimensioni > 40 mm. Il fatto di limitare i pretrattamenti sul materiale fresco rappresenta un indubbio vantaggio in quanto consente di contenere la perdita di sostanza organica biodegradabile utile alla produzione di biogas. Il tipo di reattore che comunemente viene utilizzato in questi casi è il reattore cosiddetto *plug-flow* (a pistone) in cui il liquame viene fatto scorrere orizzontalmente da un'estremità all'altra. Questo sistema, dotato sempre di riscaldamento, agitatori e gasometro, viene però, per motivi di natura tecnica ed economica, utilizzato esclusivamente in scala ridotta con volumi massimi di 300–400 m³. La tecnica di digestione anaerobica a secco trova oggi applicazione in diversi processi, tra questi si ricordano:

- **Processo Dranco.** Questo sistema, sviluppato in Belgio, opera con substrati ad alto tenore di solidi e in regime di temperatura termofilo; la materia orga-

nica viene introdotto giornalmente dall'estremità superiore del reattore mentre il materiale digerito viene contemporaneamente rimosso dalla parte inferiore. Quest'ultimo poi viene in parte riciclato, reintroducendolo all'interno del digestore, e in parte sottoposto ad ulteriori trattamenti (ad es. disidratazione) al fine di ottenere un prodotto utile sotto il profilo agronomico. Una particolarità del sistema Dranco è che all'interno del reattore la biomassa non è agitata da nessun sistema meccanico e la sola miscelazione che avviene è quella naturale che si origina dal movimento a pistone verso il basso del materiale in digestione. Il contenuto di solidi totali dei substrati comunemente utilizzati varia nell'intervallo 20–40%, i tempi di ritenzione tra 15 e 30 giorni, la temperatura d'esercizio tra 50 e 58 °C e le rese in biogas dichiarate tra 100 e 200 m³/t di substrato alimentato.

- **Processo Kompogas.** Questo sistema, sviluppato in Svizzera, utilizza ancora substrati ad alto tenore di solidi che vengono trattati, in regime termofilo, all'interno di un reattore cilindrico orizzontale dove, grazie ad un movimento a pistone, la sostanza organica, introdotta giornalmente da una estremità, viene rimossa dopo circa venti giorni dall'estremità opposta sotto forma di materiale digerito. All'interno del reattore è presente un sistema di agitazione che mescola la massa in modo intermittente, favorendo così la liberazione del biogas formatosi e la risospensione del materiale inerte grossolano depositatosi sul fondo. L'esperienza accumulata con questa tecnologia ha dimostrato che la massima efficienza di conversione si realizza con l'impiego di substrati aventi un tenore di solidi intorno

al 25%; concentrazioni inferiori favoriscono infatti la precipitazione delle frazioni più pesanti, mentre con concentrazioni maggiori viene generalmente ostacolato il flusso orizzontale del materiale all'interno del reattore. Anche in questo caso poi il materiale digerito viene in parte ricircolato e in parte disidratato e ulteriormente trattato per fini agronomici

- **Processo Valorga.** Si tratta di un sistema sviluppato in Francia nel quale, substrati ad alto contenuto di sostanza secca (25–35%) rimangono per circa 18–25 giorni, all'interno di reattori di forma cilindrica in cui il flusso di materiale è di tipo circolare e il mescolamento avviene grazie all'introduzione in pressione e ad intervalli di tempo prestabiliti di parte del biogas prodotto. Generalmente la miscelazione viene effettuata in modo soddisfacente mediante ricircolo di solo biogas e non dell'effluente anche se, dato il posizionamento degli iniettori sul fondo del reattore, esiste la possibilità che si verifichino problemi di intasamento degli stessi.

Oggi la tecnologia di digestione a secco si trova ancora in fase pre-commerciale, è comunque possibile prevedere una sua ampia diffusione nel prossimo futuro grazie soprattutto alla maggior velocità nella produzione del biogas (rispetto ai sistemi wet) e ai più alti rendimenti di conversione rispetto ai sistemi wet.

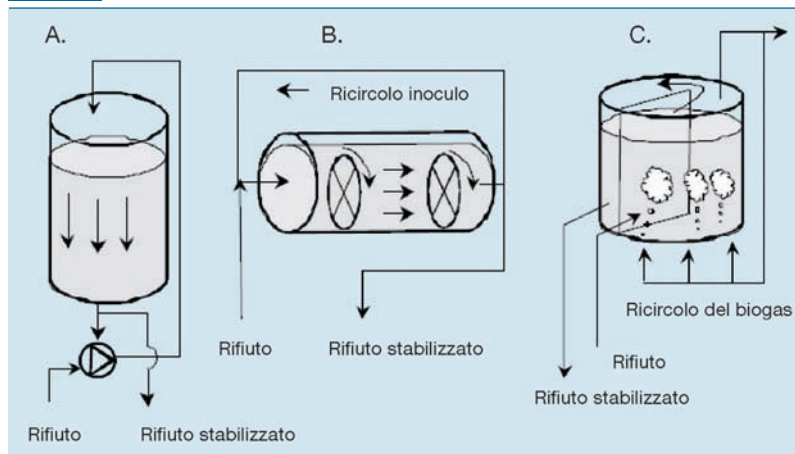
Impianti a semi-secco (semi-dry)

A metà strada tra i processi wet e dry si collocano i sistemi semi-dry, in cui si lavora con un contenuto di sostanza secca in digestione intorno al 12–18%. Questi sistemi dal punto di vista tecnologico presentano indiscutibili vantaggi tra i quali spicca ad esempio la semplicità delle apparecchiature di pompaggio e miscelazione e la possibilità di trattare la frazione organica dei rifiuti urbani senza pretrattamenti particolarmente impegnativi. Il reattore maggiormente utilizzato rimane quello completamente miscelato (CSTR), operante in regime sia mesofilo che termofilo, all'interno del quale la miscelazione del materiale viene effettuata principalmente attraverso sistemi meccanici coadiuvati talvolta anche da iniezioni di biogas. Il volume di questi reattori è normalmente inferiore rispetto a quello dei digestori wet; tuttavia però, la necessità di diluire rifiuti aventi una concentrazione di sostanza secca maggiore del 20–25%, può comportare un significativo aumento delle dimensioni, oltre che naturalmente ad un incremento della produzione di acque di processo e quindi dei costi di esercizio per il mantenimento della temperatura ottimale.

Fattibilità e convenienza economica

La valutazione sulla fattibilità e la convenienza economica di un impianto di digestione anaerobica richiede la piena cono-

Fig. 2.6 Riassunto delle più comuni tecnologie di digestione a secco



Fonte: CRPA – Centro Ricerche Produzioni Animali

scienza di tutta una serie di aspetti di fondamentale importanza. È sicuramente indispensabile conoscere le caratteristiche del prodotto da trattare nonché i quantitativi disponibili al fine di dimensionare in maniera opportuna i sistemi di stoccaggio, garantendo contemporaneamente regolarità nell'alimentazione e tempi di giacenza non eccessivi della biomassa i quali potrebbero causare un elevato impatto odorigeno dell'installazione. Gli elevati costi fissi e di manutenzione trovano giustificazione solo se l'impianto garantisce sufficienti ricavi o risparmi dall'utilizzo del biogas prodotto e dalla vendita della sostanza digerita ad esempio come fertilizzante. I costi di investimento per un impianto che produce biogas variano in funzione sia della tipologia di installazione (wet, dry, semi-dry) che dei materiali avviati a digestione (liquami zootecnici, liquami zootecnici + colture energetiche e/o scarti agroindustriali, ecc.); è quindi difficile definire in maniera univoca dei costi di investimento di riferimento. Indicativamente, comunque, per la maggior parte degli impianti, ad esclusione di quelli di tipo semplificato, che prevedono solamente delle coperture in materiale plastico o delle vasche di stoccaggio non riscaldate e prive di miscelatori, si può definire un intervallo di costo di 250–700 € per metro cubo di digestore anaerobico oppure di 2.500–7.500 € per kW elettrico installato in cogenerazione.

Oggi questa tecnologia è molto diffusa in Europa per la stabilizzazione dei fanghi di depurazione o per il trattamento delle acque reflue, si hanno anche numerose installazioni che operano su liquami zootecnici, soprattutto in Austria, Germania, Danimarca, Svezia e Italia; mentre si registra una progressiva diffusione anche per il trattamento della frazione organica dei

rifiuti solidi urbani soprattutto in codigestione con deiezioni animali o altri scarti organici industriali. Secondo fonti CRPA nel 2007, in Italia e particolarmente nelle regioni settentrionali, sono stati individuati 149 impianti di trattamento anaerobico di liquami zootecnici, di cui 40 di tipo semplificato e 30 ancora in fase di costruzione.

In conclusione è possibile affermare che la digestione anaerobica è una tecnologia in continua evoluzione che presenta buone potenzialità sia dal punto di vista energetico-ambientale, che dal punto di vista economico in quanto rappresenta una possibile fonte di reddito integrativo per settori zootecnico e agroalimentare. I digestori anaerobici vengono realizzati infatti, non solo allo scopo di recuperare energia rinnovabile, il biogas, ma anche per controllare le emissioni maleodoranti e per stabilizzare i reflui prima del loro utilizzo agronomico. Non va inoltre dimenticato che la digestione anaerobica, decomponendo in maniera controllata liquami e altri composti organici, contribuisce in modo significativo anche alla riduzione delle emissioni di metano in atmosfera che come noto, presentando un elevato potenziale di riscaldamento globale, è uno dei maggiori responsabili dell'effetto serra. Oggi il settore zootecnico rappresenta indubbiamente la principale forza motrice per lo sviluppo su larga scala di questa tecnologia che vede anche in Italia una forte incentivazione; si vedano ad esempio il meccanismo dei certificati verdi per la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili o anche il reg. CE 1774/2002. Necessaria è comunque una maggiore razionalizzazione e la semplificazione delle procedure autorizzative, sia per la costruzione e la gestione degli impianti sia per l'allacciamento alla

rete elettrica nazionale, qualora si lavori in cogenerazione.

Da non confondere con la digestione anaerobica è invece il processo di *stabilizzazione biologica* aerobica che consiste nella metabolizzazione delle sostanze organiche per opera di microrganismi, il cui sviluppo è condizionato dalla presenza di ossigeno. Questi batteri convertono sostanze complesse in altre più semplici, liberando CO_2 e H_2O e producendo un elevato riscaldamento del substrato che è in genere proporzionale all'attività metabolica creata. Il calore prodotto può essere così trasferito all'esterno, mediante scambiatori a fluido, e utilizzato come una vera e propria fonte di energia termica. In Europa è diffuso il processo di digestione aerobica termofila autoriscaldata (Autoheated Thermophilic Aerobic Digestion) che nasce con l'obiettivo di realizzare il trattamento delle acque di scarico e la stabilizzazione biologica dei fanghi di depurazione. Quest'ultimi infatti subiscono una riduzione di volume, che rende più semplice e meno oneroso il trasporto e lo smaltimento finale, nonché una riduzione del grado di putrescibilità grazie ad un effetto stabilizzante sulle componenti organiche. Costruttivamente, un digestore aerobico è costituito da una vasca, all'interno della quale viene insufflata dell'aria, e in cui i fanghi, alimentati in modo continuo o discontinuo a seconda delle dimensioni dell'impianto, permangono il tempo necessario per la loro stabilizzazione. Nonostante i minori costi di impianto, i processi aerobici non sono comunque così diffusi come quelli anaerobici (negli Stati Uniti e in Canada questa tecnologia si è sviluppata solo recentemente), è questo è dovuto soprattutto ai maggio-

ri costi di gestione riconducibili principalmente all'energia spesa per realizzare l'aerazione dei fanghi.

[2.2]

Biocarburanti

Il Bioetanolo

Il Bioetanolo, conosciuto anche come alcool etilico, è un liquido limpido e incolore che può essere ottenuto, attraverso un processo di fermentazione alcolica, da qualsiasi materia prima contenente zuccheri o carboidrati con struttura più complessa come amido, cellulosa e emicellulosa.

Il bioetanolo, per le sue caratteristiche chimico-fisiche, si presenta come un carburante particolarmente affine alla benzina alla quale può essere miscelato o, in alcuni casi e mediante opportuni accorgimenti, sostituito interamente nell'alimentazione degli autoveicoli. L'utilizzo del bioetanolo anidro (ovvero con residuo di acqua pari al 5% del volume) in sostituzione alla benzina è già una realtà nei paesi del sud America e in particolar modo in Brasile, dove i motori sono stati predisposti a questo uso già a partire dagli anni settanta in concomitanza con la crisi energetica che fece emergere, in tutta la sua gravità, il problema della sicurezza degli approvvigionamenti petroliferi. Come detto, per poter alimentare un veicolo con bioetanolo puro, è necessario predisporre alcune modifiche sui motori a benzina. Gli interventi che si rendono necessari in tale ipotesi di impiego riguardano principalmente la modifica del sistema di iniezione del motore, che dovrà essere adattato ad un composto che presenta nella sua molecola un maggiore contenuto di ossigeno rispetto alla normale benzina. Inoltre, poi-

ché i combustibili a base di alcool possono erodere alcuni elastomeri e accelerare la corrosione di alcuni metalli, spesso si rende necessaria anche la sostituzione preventiva di determinati componenti, particolarmente suscettibili al deterioramento. Una delle caratteristiche del bioetanolo poi è che questo presenta, rispetto alla benzina, una minore densità energetica (in volume), ciò pertanto si riflette inevitabilmente in un maggior consumo di combustibile per chilometro che può superare anche del 50% quello normalmente realizzato. Per ovviare al problema della bassa densità energetica, un altro accorgimento che usualmente si prende quando si converte un veicolo a benzina al funzionamento con bioetanolo è quello di aumentare il volume del serbatoio, al fine di compensare così la ridotta autonomia. Tra i maggiori inconvenienti che si hanno nell'impiego del bioetanolo puro non va dimenticata poi la difficoltà di avviamento che i veicoli incontrano durante la stagione fredda, quando a causa delle basse temperature questo biocombustibile tende ad evaporare con maggiore difficoltà. Per ovviare a questo problema e migliorare quindi l'accensione dei motori, il bioetanolo in forma anidra, ossia privo di acqua, può essere unito a percentuali più o meno elevate di benzina creando così miscele di diverso tipo il cui impiego

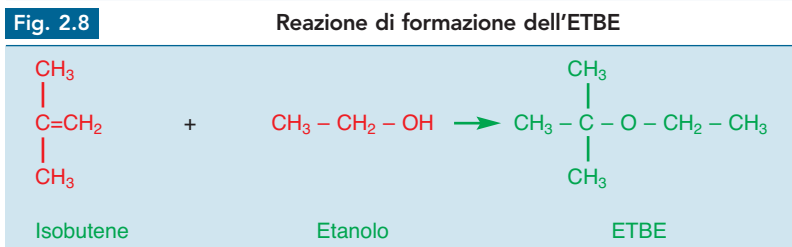
è diffuso soprattutto negli Stati Uniti e in Canada. La miscela ad alta percentuale di etanolo più comune è la E85 in cui la concentrazione di alcol etilico raggiunge l'85%. Questa, per poter essere utilizzata, richiede comunque delle modifiche sui motori che non sono invece necessarie quando si adottano miscele a bassa percentuale, come ad esempio la E10 (10% di bioetanolo), il cui impiego comporta addirittura un lieve incremento nelle prestazioni generali del veicolo.

Attualmente dunque i propulsori debbono essere modificati quando il bioetanolo in miscela supera il 10%; tuttavia recenti studi, condotti perlopiù in Europa e negli Usa, hanno in realtà evidenziato la possibilità di evitare interventi sulla componentistica del motore fino a miscele con addirittura il 23,5% di alcol etilico. I composti a basso contenuto di bioetanolo consentono in più un ulteriore vantaggio: essi infatti non richiedono strutture dedicate o reti di distribuzione specifiche (come accade invece per l'E85) che potrebbero in qualche modo limitarne l'utilizzo, ma vanno semplicemente sostituirsi alla benzina entrando nella stessa linea di distribuzione. Uno dei progressi più significativi raggiunti di recente è lo sviluppo di veicoli "flex-fuel" (FFVs) che sono in grado di operare sia con miscele di benzina e bioetanolo, fino anche alla E85, che con la sola benzina. Ciò è reso possibile da un avanzato sistema di controllo che individua automaticamente le caratteristiche del combustibile utilizzato e regola di conseguenza, in modo automatico, i tempi di iniezione e rapporti di miscelazione tra aria e carburante.

Il bioetanolo viene impiegato anche nella produzione di ETBE (Etil Ter Butil Etere) ossia di un composto antidetonante ad alto numero di ottani ottenuto appunto

Figura 2.7
Veicolo
Flex-Fuel
rifornito con E85





Fonte: ITABIA – Italian Biomass Association

dalla combinazione di etanolo (47%) e isobutene (53%).

L'ETBE può essere utilizzato nella benzina come additivo ossigenato 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; inoltre ha il vantaggio di presentare migliori capacità antidetonanti: se infatti viene usato in miscela con la benzina al 15%, a questa viene conferito un numero di ottani pari a 110, valore più elevato rispetto al 95/98 che invece è tipico degli antidetonanti tradizionali.

Meno comune poi, ma tecnicamente possibile, è l'utilizzo del bioetanolo in miscela con il gasolio (o biodiesel) nei veicoli diesel heavy-duty. Tale composto, conosciuto come E-diesel, viene creato all'interno del motore stesso atomizzando e immettendo nel condotto di aspirazione dell'aria una piccola percentuale di etanolo che poi verrà, all'interno del cilindro, miscelato e combusto con il diesel tradizionale. Prove condotte in Europa hanno avuto un discreto successo utilizzando miscele composte da gasolio tradizionale (80%), bioetanolo (15%) e additivi solu-

bili con elevato potere emulsionante (5%). In queste percentuali l'aggiunta di alcol etilico non richiede alcun tipo di modifiche ai motori i quali, tra l'altro, hanno dimostrato una riduzione nelle emissioni di particolato.

Interessanti prospettive di impiego del bioetanolo si hanno anche con i processi di steam reforming catalitico in cui gli alcoli vengono convertiti, per trattamento con vapore acqueo, in un gas costituito da H₂, CO, CO₂, CH₄ e H₂O che può essere utilizzato in diverse applicazioni e, se particolarmente ricco in idrogeno, anche per l'alimentazione delle celle a combustibile. Si tratta però di una tecnologia relativamente recente; infatti, nonostante la ricerca in questo settore si sta rapidamente sviluppando, non esistono ancora impianti a livello commerciale. I principali studi riguardano la selezione del catalizzatore più idoneo, e la ricerca delle condizioni operative ottimali (temperatura, velocità spaziale dell'etanolo, contenuto d'acqua, pressione), allo scopo di ottenere la migliore selettività verso l'idrogeno e il contenimento dell'energia richiesta per la reazione.

La produzione del bioetanolo

Il bioetanolo può essere attualmente prodotto sia dai carboidrati semplici come glucosio, saccarosio e mannosio, che dai polisaccaridi a catena lunga ovvero amido, cellulosa ed emicellulosa. Le materie prime da impiegare nel processo di fermentazione possono derivare, pertanto, dalle colture dedicate alcoligene, siano esse saccarifere (barbabietola da zucchero, canna da zucchero, sorgo zuccherino) o amidacee (frumento tenero e granturco), nonché dai residui lignocellulosici. 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, ha messo in evidenza che per poter rimpiazzare interamente i combustibili fossili, attualmente utilizzati in Italia, con bioetanolo, sarebbe necessario 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 nazionale. Appare dunque evidente che un impiego intensivo di queste biomasse, a soddisfacimento dell'intero fabbisogno di combustibili nel settore dei trasporti, è assolutamente improponibile anche in ragione della concorrenza esercitata dal settore alimentare. Assume pertanto un'importanza crescente la possibilità di valorizzare in termini energetici i residui produttivi come ad esempio gli scarti della produzione ortofrutticola, che possono essere convertiti in bioetanolo mediante le stesse tecnologie impiegate per le colture dedicate saccharifere e amilacee. Un ruolo di notevole rilievo può essere poi svolto anche dai

residui lignocellulosici; quest'ultimi, naturalmente, rappresentano l'alternativa economicamente più interessante dato che non richiedono, a differenza delle colture dedicate, lavorazioni specifiche che incidono in modo sostanziale sul costo di acquisto finale della materia prima.

La filiera produttiva è articolata in tre sezioni ciascuna delle quali è caratterizzata da un livello di maturità differente e da soluzioni tecnologiche peculiari. La prima sezione che si prende in considerazione è quella saccharifera; questa ovviamente è finalizzata alla conversione energetica degli zuccheri ottenuti principalmente da colture come la barbabietola da zucchero, la canna da zucchero o il sorgo zuccherino. Allo stato attuale questo comparto è tecnologicamente maturo tuttavia però, a causa della concorrenza esercitata della filiera alimentare, esso non si è ancora pienamente sviluppato a livello commerciale. Da un punto di vista tecnologico poi, la filiera energetica ricalca in linea generale quella alimentare; essa infatti prevede un processo produttivo distinto in tre fasi: estrazione degli zuccheri dai tessuti vegetali, mediante delle operazioni di frantumazione e setacciatura più volte ripetute, fermentazione alcolica dei glucidi e infine distillazione dell'etanolo. La fermentazione alcolica è un processo micro-aerofilo condotto generalmente mediante l'utilizzo del lievito di birra (*Saccharomyces cerevisiae*); questo, unito all'impasto precedentemente preparato attraverso l'operazione di sminuzzamento della sostanza vegetale, favorisce la fermentazione degli zuccheri che vengono quindi trasformati in alcol e anidride carbonica. Questa operazione viene attuata utilizzando particolari bioreattori all'interno dei quali vengono ricreate le condizioni ideali per favorire il metabolismo anaerobico del lievito;

Figura 2.9
Sorgo zuccherino



quindi basse concentrazioni di ossigeno, temperature comprese tra i 5 e i 25 °C e un intervallo di pH variabile tra 4,8 e 5,0. La separazione dell'etanolo dalla frazione liquida prodotta con il processo di fermentazione 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%. Se il bioetanolo deve essere miscelato alla comune benzina, è necessaria come noto una profonda disidratazione che può realizzarsi utilizzando sia setacci molecolari, sia membrane di separazione in materiale selettivo idrofilo la cui efficacia però presenta ancora ampi margini di miglioramento. Questa tecnica di separazione prevede che la miscela, a valle della fermentazione, sia portata in fase vapore prima di essere filtrata dalle membrane; quello che si ottiene è etanolo con un residuo di acqua pari al 3%. Più efficace, sebbene ciò comporti un significativo incremento nei costi di produzione, è invece il processo di distillazione frazionata. Questo è di fatto un vero e proprio processo di distillazione in cui però alla miscela di partenza, derivante dalla fase di fermentazione alcolica, si aggiunge del benzene che permette di estrarre etanolo con un residuo di acqua non superiore all'1% in peso. La sezione saccarifera, che si è fin qui descritta e a cui è possibile attribuire la quasi totalità del bioetanolo prodotto, assume particolare rilievo soprattutto in Brasile dove molte automobili funzionano con etanolo ottenuto da canna da zucchero utilizzato sia sotto forma di alcol puro che miscelato alla benzina. Si ha poi la sezione amidacea in cui il bioetanolo è ottenuto a partire da mate-

rie prime ricche di amido, tipicamente grano o mais. 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 vengono triturate e disidratate producendo così una pasta d'amido che viene successivamente gelificata mediante l'utilizzo di vapore diretto alla temperatura di 175 °C e alla pressione di 2 atm ($\approx 2 \times 10^5$ Pa). L'idrolisi è generalmente condotta utilizzando un enzima, denominato amilasi, che ha la proprietà di liberare le molecole di glucosio contenute inizialmente nelle catene di amido. Questo trattamento è condotto a una temperatura inferiore a 60 °C, e la resa in zuccheri fermentescibili è circa dell'80%. Conclusa la fase di idrolisi il processo di produzione del bioetanolo si completa, così come accade per la sezione saccarifera, con le fasi di fermentazione e distillazione. La sezione amidacea, che riveste un ruolo di primo piano soprattutto nel mercato statunitense, da luogo inoltre ad un sottoprodotto costituito dai residui ricchi in olio, proteine e fibre, noti come DDGS (Distillers Dried Grains with Soluble), che sono destinati perlopiù alla preparazione dei mangimi zootecnici.

Il bioetanolo può essere infine prodotto utilizzando anche materie prime ricche di cellulosa ed emicellulosa come ad esempio paglia, stocchi di mais o residui legnosi provenienti dal comparto agricolo, forestale o industriale. L'impiego di questi materiali, più diffusi ed economici, prefigura una valida possibilità di sviluppo della filiera del bioetanolo soprattutto nei climi temperati dove le sole colture zuccherine o amidacee non riescono a garantire da sole alti livelli di produttività, come avviene invece nelle zone della fascia tro-

picale. La produttività media europea infatti, che dipende ovviamente dalla coltura utilizzata, è attualmente stimata intorno ai 2.790 litri per ettaro in virtù di una resa media in semi di circa 7 tonnellate per ettaro e di una capacità estrattiva di 400 litri per tonnellata. Tale valore è nettamente inferiore rispetto a quello realizzabile nei paesi a clima tropicale come il Brasile ad esempio in cui la canna da zucchero ha una resa media di 69 tonnellate per ettaro; che significa, considerando un rapporto di conversione in etanolo di 90 litri per tonnellata, 6.200 litri di biocombustibile prodotti per ogni ettaro di terreno impiegato. Alti tassi di produttività si hanno anche in India dove si raggiungono circa 5.300 litri per ettaro. Cifre di tale portata riferite ai paesi sopraccitati portano a serie riflessioni in materia di convenienza energetica dell'importazione di bioetanolo per il mercato europeo: se infatti il bioetanolo da canna da zucchero dovesse diventare una commodity mondiale, appare scontato che regioni come il Sud America, l'India, il Sud-est Asiatico e l'Africa diventeranno i maggiori esportatori. Risulta quindi fondamentale ottimizzare la conversione di biomasse altamente produttive alle nostre latitudini: 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 suscitando molto interesse soprattutto in considerazione dei modesti costi che è necessario sostenere per il reperimento della materia prima. La volontà dunque di puntare alla sezione cellulosica per la produzione di bioetanolo appare evidente; nonostante infatti siano necessari ancora notevoli investimenti soprattutto nel settore della ricerca, molteplici impianti pilota, seppu-

re soltanto in scala di laboratorio, sono stati già realizzati con l'obiettivo di perfezionare, da un punto di vista tecnologico, i diversi punti della filiera. Dei principali componenti della biomassa lignocellulosica (cellulosa, emicellulosa e lignina), soltanto la cellulosa e l'emicellulosa sono costituite da zuccheri fermentescibili, pertanto solo queste 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. Questo obiettivo può essere perseguito mediante trattamenti chimico-fisici (il più studiato utilizza il vapore saturo ad alta pressione ed è denominato *steam explosion*), chimici (con acidi) o meccanici (con sistemi di presse). Una volta liberate dalla lignina, la cellulosa e l'emicellulosa vengono quindi sottoposte ad un processo di idrolisi che potrà realizzarsi o per via chimica, attraverso l'impiego di acidi, o per via enzimatica.

L'idrolisi acida può essere condotta secondo due diverse modalità, o in un'unica fase utilizzando un acido concentrato, oppure in due stadi separati attraverso l'impiego di un acido diluito. Nel primo caso al materiale cellulosico viene aggiunto, in rapporto 1,25:1 e alla temperatura di 50 °C, acido solforico concentrato (al 70-77%); questo dopo aver decristallizzato la struttura vegetale, viene diluito mediante l'aggiunta di acqua che attiva la vera e propria fase di idrolisi. Quella che si forma è una sostanza colloidale che viene poi sottoposta a pressatura per dividere la componente "acido/zuccheri" dal residuo solido. Infine, mediante un processo di distillazione, si andranno a separare, dalla porzione acida, gli zuccheri (xilosio e glucosio) che potranno così

essere convertiti in bioetanolo mediante il consueto processo di fermentazione alcolica. Come detto poi, l'idrolisi acida può compiersi anche impiegando un acido diluito. In questo caso però la conversione della biomassa vegetale in zuccheri si realizza in due stadi distinti. Il primo è diretto all'attacco dell'emicellulosa che risulta più facilmente idrolizzabile; in esso si opera con acido solforico in concentrazione dello 0,7% e a una temperatura di 190 °C per circa 3 minuti. Con il secondo stadio si realizza invece l'idrolisi della cellulosa (più resistente), la quale viene ridotta in glucosio impiegando, sempre per tre minuti, H_2SO_4 alla concentrazione dello 0,4% e a una temperatura di 215 °C.

In alternativa all'idrolisi acida è possibile attuare l'idrolisi enzimatica: in essa, la scissione delle catene di cellulosa ed emicellulosa avviene utilizzando particolari enzimi detti cellulasi, scoperti inizialmente nel microrganismo *Trichoderma reesei*, ma poi individuati anche in altri gruppi microbici tra cui alcuni batteri anaerobici, alcuni attinomiceti e alcuni funghi. L'idrolisi enzimatica rappresenta la soluzione tecnologica più recente ed è oggi preferibile rispetto a quella di tipo chimico. In generale dunque dal processo di idrolisi attuato su biomasse cellulosiche si ottengono sia zuccheri tipo C6 (a sei atomi di carbonio), come il glucosio, che risultano facilmente fermentescibili, sia zuccheri tipo C5 (a cinque atomi di carbonio) che invece sono fermentati ad etanolo con maggiore difficoltà. I primi si sviluppano sia dall'idrolisi della cellulosa che dell'emicellulosa, i secondi solo dalla scissione di quest'ultima. La sezione cellulosica per la produzione del bioetanolo, sebbene sia quella più promettente, soffre ancora oggi di una certa complessità tecnologica che,

gravando significativamente sulla sua economicità, ne limita a pieno lo sviluppo. Per tale motivo sono in corso di ottimizzazione alcune soluzioni impiantistiche che tendono a semplificare questo processo produttivo; tra le principali, in riferimento alla scissione di tipo enzimatica, si ricordano:

- **Impianti SHF** (Separated Hydrolysis and Fermentation). Sono previsti quattro reattori per i quattro stadi del processo produttivo: produzione dell'enzima cellulasi, idrolisi enzimatica della cellulosa e dell'emicellulosa, fermentazione degli zuccheri a sei atomi di carbonio, fermentazione degli zuccheri a cinque atomi di carbonio.
- **Impianti SSF** (Simultaneous Saccharification and Fermentation). Sono previsti tre reattori ed è introdotta una certa simultaneità tra gli stadi del processo: un reattore è utilizzato per la produzione delle cellulasi, uno per l'idrolisi enzimatica della cellulosa e dell'emicellulosa e per la contemporanea fermentazione degli zuccheri a sei atomi di carbonio, e infine uno per la fermentazione degli zuccheri a cinque atomi di carbonio.
- **Impianti 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.
- **Impianti 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.

In merito alla produzione del bioetanolo una delle questioni più controverse è valu-

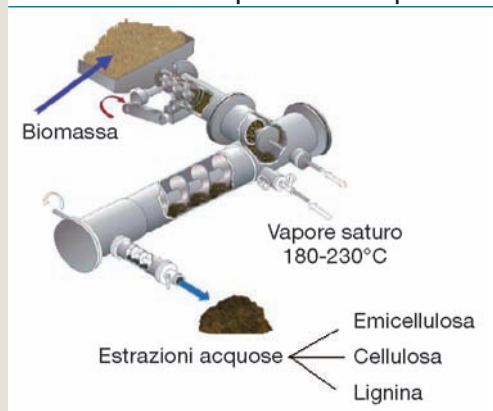
tare l'effettiva convenienza energetica di questo processo di conversione ovvero stabilire se l'energia contenuta nel combustibile finale sia realmente maggiore rispetto a quella richiesta per la trasformazione della materia prima. Un recente studio condotto negli USA ha evidenziato come, considerando una coltivazione di grano e un impianto di produzione di etanolo di efficienza media, l'energia totale utilizzata per far crescere il grano e trasformarlo in un litro di etanolo e altri prodotti ammonta a circa 22,6 MJ. Considerando poi che l'etanolo contiene 23,5 MJ per litro e che l'energia immagazzinata negli altri co-prodotti è pari a circa 7,7 MJ, è possibile ritenere che nel complesso i prodotti del processo di conversione contengono 31,2 MJ di energia, con un guadagno per litro di etanolo ottenuto pari dunque 8,6 MJ. Tale valore può raggiungere anche i 16,2 MJ per litro, considerando processi di produzione e trasformazione ad alta efficienza, o addirittura assumere valori negativi nel caso in cui il grano sia coltivato con bassa efficienza, con spreco

di acqua per l'irrigazione o cattivo sfruttamento del terreno e trattato poi in impianti non cogenerativi o privi di processi efficienti in termini energetici. È dunque difficile fare una stima univocamente valida sul bilancio energetico del processo di produzione del bioetanolo, questa infatti dipende da fattori estremamente variabili come: tipo di coltura adottata, condizioni pedoclimatiche del luogo e caratteristiche dell'impianto di conversione. Appare comunque chiaro che se il mercato dell'etanolo subirà un'espansione, le colture cellulosiche, più che quelle amidacee e zuccherine, diventeranno probabilmente la fonte primaria per la produzione di questo biocombustibile. Le colture cellulosiche, quali gli alberi a crescita rapida, rappresentano infatti la filiera più interessante, in quanto usano relativamente poco fertilizzante, e necessitano di meno energia per la raccolta rispetto alle colture annuali, consentendo quindi, di raggiungere rapporti di conversione molto più alti di quelli ottenibili sfruttando biomasse zuccherine e cerealicole.

La steam explosion

La *steam explosion* (SE) è un trattamento idrotermico innovativo, a basso impatto ambientale, mediante il quale è possibile ottenere una vasta gamma di prodotti, utilizzando come materia prima le biomasse vegetali (colture energetiche, RSU, residui agricoli e forestali). Queste, attraverso l'impiego di vapore saturo ad alta pressione (15–30 kg/cm²), vengono riscaldate rapidamente all'interno di appositi reattori, nei quali si realizza la separazione delle tre frazioni che comunemente compongono i substrati vegetali, ovvero emicellulosa, cellulosa e lignina. In questo modo si garantisce un'utilizzazione totale delle biomasse ottenendo sia prodotti direttamente commerciabili (pasta da carta, pannelli in fibra, mangimi, ecc.), che composti utilizzabili in molteplici settori (autotrazione, industrie tessili, dolciarie e della chimica di base). L'emicellulosa ad esempio, essendo un polimero costituito da zuccheri con 5 o 6 atomi di carbonio, può essere usata per produrre dolcificanti (xylitolo) o solventi; la cellulosa, polimero del glucosio, è invece impiegata come materia prima nella preparazione della carta, delle fibre tessili o come substrato fermentabile per la produzione di alcool (anche etanolo) e infine dalla lignina, composto aromatico, si può ottenere sia energia termica che svariati bio-polimeri come gli asfalti o le fibre di carbonio. Nel processo di steam explosion il materiale organico viene tenuto alla temperatura

Fig. 2.10 Rappresentazione schematica di un reattore per la steam explosion



desiderata (180–230 °C) per un breve periodo (1–10 minuti) nel corso del quale l’emicellulosa viene idrolizzata e resa solubile. Alla fine di questo intervallo di tempo, la pressione viene rapidamente riportata al valore atmosferico ottenendo così una decompressione esplosiva che sfibra ulteriormente la biomassa liberando gli elementi costituenti. I settori che beneficiano di questo pretrattamento sono:

- *Produzione di bioetanolo da scarti lignocellulosici.*
 - *Industria cartaria.* Lo sfibramento delle matrici lignocellulosiche e la rottura dei legami chimici tra cellulosa, emicellulosa e lignina che avvengono durante il processo di steam explosion, costituiscono un requisito indispensabile nei processi cartari. Negli Usa questa tecnica viene già applicata su scala semi-industriale in alcuni impianti produttivi di pasta da carta dove l’effetto positivo del trattamento è stato riscontrato per matrici di tipo erbaceo (paglia, *miscanthus*, Kenaf) o legnoso (pioppo, pino, eucalipto).
 - *Industria dei pannelli.* Con materiali provenienti dal processo di steam explosion sono stati costruiti pannelli di tipo “truciolato” con buone caratteristiche meccaniche; tra le matrici utilizzate anche la lolla di riso, che risulta difficilmente utilizzabile in altre circostanze.
 - *Industria dei materiali compositi.* Le fibre di alcuni vegetali (lino, paglia), sottoposte a trattamento di steam explosion e quindi opportunamente trattate, sono state utilizzate nella preparazione di materiali compositi dalla caratteristiche molto interessanti.
 - *Industria dei mangimi.* La rottura dei legami intermolecolari per mezzo della SE aumenta la digeribilità, da parte del bestiame, dei vegetali ad alto contenuto di lignina; in questo ambito pertanto mangimi a base di legno e paglia sono già stati sviluppati e brevettati.
 - *Produzione di substrati per processi biotecnologici.* I materiali derivanti dalla steam explosion possono essere anche utilizzati in processi biotecnologici come fonte di carbonio per la crescita dei microrganismi o come substrati di processi fermentativi; particolarmente studiata, in quest’ultimo caso, è la produzione di bioetanolo da biomasse lignocellulosiche trattate.
 - *Produzione di zuccheri.* Alcuni tipi di zuccheri presenti nelle piante sono particolarmente interessanti per l’industria dolciaria. Lo xilosio, per esempio, può dare il sapore dolce agli alimenti senza procurare carie dentaria perchè non è metabolizzabile dai batteri. Questo zucchero si trova in gran quantità nella emicellulosa e può essere estratto semplicemente con acqua calda dopo il trattamento di steam explosion.
 - *Produzione di composti aromatici.* La lignina presente nei vegetali è un polimero complesso del propilbenzene, è cioè costituita da molecole aromatiche fortemente legate tra loro a formare un solido reticolo tridimensionale che da rigidità alle piante. Il trattamento di steam explosion riesce a rompere tale reticolo e i costituenti della lignina possono essere recuperati con una semplice estrazione con soda calda. La lignina così recuperata costituisce una fonte di sostanze aromatiche utilizzabile nell’industria chimica per la produzione di polimeri, asfalti e altre sostanze complesse.
- Nel centro ricerche ENEA di Trisaia è stato realizzato un impianto pilota di steam explosion (STELE – STeam Explosion LEgno) che è uno dei più importanti al mondo e vi si possono trattare fino a 300 kg/h di sostanza vegetale a ciclo continuo.

Il Biodiesel

Un'ulteriore possibilità di sfruttamento energetico della biomassa per la produzione di biocombustibili è rappresentata dall'estrazione di oli vegetali da piante oleaginose quali palma, soia, girasole o colza. Tali oli, ottenuti da un processo di spremitura a freddo dei semi con successiva filtrazione, sono, a tutti gli effetti e senza ulteriori fasi di raffinazione, dei combustibili e, come tali, possono trovare un impiego nel settore energetico (principalmente per il riscaldamento) analogamente a quanto avviene per i combustibili liquidi di origine fossile. Seppur caratterizzato da un elevato potere calorifico, in media paria a 37,5 MJ/kg, l'olio vegetale puro (PVO) presenta rispetto al comune gasolio una viscosità fino a 20 volte maggiore, un punto di infiammabilità nettamente più elevato e una maggiore instabilità termica.

Questo pregiudica di fatto l'utilizzo del PVO come combustibile per l'autotrazione, a meno naturalmente di non attuare importanti modifiche nella progettazione dei motori, che però allo stato attuale non sono giustificate da reali vantaggi tecnologici, economici o ambientali. Le

caratteristiche su citate, ma soprattutto la tendenza del bio-olio alla polimerizzazione, determinano non pochi inconvenienti al funzionamento dei motori, tra questi si ricordano: la possibilità di avere dei depositi sugli iniettori, l'usura delle pareti metalliche, la produzione di elevata fumosità e l'aumento del consumo di carburante rispetto all'alimentazione con normale gasolio. Per ovviare a questi problemi sono in fase di studio, in particolare per i motori diesel di grosse dimensioni come quelli navali, sistemi di alimentazione in grado di compensare gli effetti indotti dall'alta viscosità e dal basso numero di cetano, che per gli oli vegetali varia in genere tra 33 e 43. Più diffusi, specialmente nel contesto delle macchine agricole, sono invece i motori adattati con "sistema a due serbatoi" ovvero a doppia alimentazione, PVO/gasolio. Queste macchine, grazie alla presenza di un'apposita centralina elettronica, sono alimentate a gasolio nelle fasi di avviamento e arresto mentre, durante il funzionamento a regime e in condizioni ottimali, sono fatte lavorare esclusivamente con olio combustibile. Per superare tutte queste difficoltà e utilizzare un prodotto derivato da biomasse anche nei comuni motori diesel per autotrazione, è possibile fare riferimento ad un derivato dell'olio vegetale puro, ovvero al biodiesel. Questo biocombustibile in realtà può essere ottenuto, oltre che da PVO, anche da grassi di animali o grassi di cucina riciclati attuando, in condizioni di bassa temperatura e pressione, un processo di transesterificazione. Ricordando che gli oli vegetali sono costituiti prevalentemente da trigliceridi (acidi grassi + glicerina) e acidi grassi liberi, è possibile affermare che con la reazione di esterificazione la componen-

Figura 2.11
Olio Vegetale Puro – PVO



Figura 2.12
 Trattore John Deere modifica-
 to con sistema a due serbatoi
 e centralina elettronica che
 controlla in continuo l'alimen-
 tazione olio vegetale/gasolio
 (Sistema Landtechnik GRAML)



te alcolica di origine (glicerolo) viene convertita in un estere e ciò permette di ridurre la viscosità del PVO, che è come detto più alta di quella dei carburanti di origine fossile. Per poter essere impiegato, senza particolari problemi, in sostituzione al comune gasolio, è dunque necessario che il biodiesel possieda specifiche caratteristiche variabili a seconda che venga usato come carburante per la trazione o come combustibile nel riscaldamento. Nel primo caso si fa riferimento alla norma UNI 10946 (EN 14214), mentre nel secondo vale la UNI 10947 (EN 14213). Il confronto tra le principali caratteristiche di biodiesel, PVO e diesel di origine fossile è riportato in **tabella 2.2**.

Per effetto del processo di raffinazione chimica, la produzione di biodiesel richiede ovviamente un maggior investimento di capitali rispetto a quelli necessari per avviare la filiera di utilizzo diretto degli oli vegetali, investimento che comunque

trova una giustificazione in ragione dell'ampliamento dei possibili scenari di impiego per questo biocombustibile. Il biodiesel infatti può essere utilizzato sia nell'alimentazione di caldaie e gruppi elettrogeni, sia, come detto, in sostituzione del gasolio, per l'autotrazione dei mezzi dotati di motori diesel. Quest'ultima possibilità appare oggi particolarmente interessante, non solo perché è già teoricamente possibile alimentare i veicoli attualmente in commercio con una miscela di gasolio e biodiesel, ma anche perché è in vigore, in ambito sia comunitario che nazionale, una politica di forte incentivazione, promozione e defiscalizzazione di questo biocarburante.

In ambito motoristico è dunque possibile impiegare questo prodotto sia puro, sia in miscela con il normale diesel. Nel primo caso è necessario apportare delle semplici modifiche sulla componentistica del motore, in particolar modo sul circuito d'iniezione e sui condotti e le guarnizioni in gomma che devono essere sostituite con altri materiali più compatibili come rame, acciaio al carbonio, ottone, gomme fluorurate o polietilene. Queste correzioni, che vanno sicuramente eseguite sui veicoli più vecchi, normalmente non sono invece necessarie sui motori di recente concezione. Se utilizzato poi in miscela con il gasolio, fino ad una concentrazione del 20% (B20), il biodiesel è impiegabile in tutti i mezzi trasporto dotati di motore diesel, di qualunque età e senza la necessità di nessun accorgimento tecnico. Recentemente alcuni studi, condotti in Austria e in Germania, hanno tra l'altro evidenziato che la concentrazione limite per evitare interventi sul motore può addirittura raggiungere il 30%. L'aggiunta di biodiesel

Tabella 2.2 – Confronto tra le principali caratteristiche di biodiesel, PVO e diesel di origine fossile

	Unità	Diesel	Biodiesel EN 14214	Olio di girasole	Olio di colza
Potere calorifico	MJ/kg	42,7	37,2	37,7	37,6
Densità a 15 °C	kg/l	0,83	0,86-0,9	0,92	0,91
Contenuto energetico (volumetrico)	MJ/l	35,2	32,7	34,8	34,2
Viscosità a 40 °C	mm ² /s	2-4,5	3,5-5	31,4	36
Punto di infiammabilità	°C	> 55	≥ 120	253	> 220

Fonte: AIEL – Associazione Italiana Energie Agroforestali

al comune gasolio dunque, può teoricamente avvenire in qualunque proporzione grazie alla perfetta miscibilità tra questi due prodotti; nonostante questo però spesso si raccomanda di non usare quantitativi troppo elevati di questo biocombustibile nei motori in quanto i livelli di emissioni di NO_x, certificati dalle case costruttrici, potrebbero essere superati. Oltre ad un incremento nelle emissioni di ossidi di azoto, la maggior presenza di ossigeno è causa anche del ridotto potere calorifico inferiore che il biodiesel ha rispetto al gasolio di origine petrolifera. Questa riduzione del contenuto energetico, in parte compensata dalla maggior densità, si manifesta principalmente con un lieve aumento dei consumi e con una riduzione delle prestazioni del motore dell'8-15%. Il biodiesel si può poi adoperare, puro o in miscela, negli impianti di riscaldamento per l'alimentazione dei bruciatori a gasolio. Anche in questo caso sono necessari alcuni interventi correttivi sul generatore di calore: questi riguardano soprattutto la regolazione degli ugelli di polverizzazione, il controllo del rapporto tra aria e carburante (è necessaria una minore quantità di aria immessa sulla fiamma primaria, nel caso di bruciatori multistadio) e la taratura della pompa volumetrica (pressione di mandata leggermente superiore, 1-1,5

atm, dove 1 atm ≈ 10⁵ Pa). Un altro aspetto molto importante ai fini dell'utilizzo poi è che questo biocombustibile può considerarsi un prodotto estremamente sicuro sia da maneggiare che da trasportare; esso non è infatti soggetto al fenomeno dell'autocombustione ed è pertanto stoccabile negli stessi serbatoi del diesel e distribuibile impiegando le infrastrutture e le reti di distribuzione già esistenti. Tra gli inconvenienti si ricorda invece che questo prodotto tende a solidificare nelle giornate fredde proprio per effetto della sua elevata viscosità; per tale motivo si possono presentare difficoltà nella fase di pescaggio dal serbatoio o durante gli avviamenti a freddo dei motori, difficoltà che comunque possono essere facilmente risolte utilizzando riscaldatori, agitatori o additivi fluidificanti.

In funzione delle possibili applicazioni e in generale per quanto detto fin ora, il biodiesel si propone dunque come un'alternativa molto interessante ai tradizionali prodotti petroliferi. A frenare in maniera sensibile la sua diffusione però contribuisce in modo significativo il prezzo finale su cui gravano ancora elevati costi di produzione (perlopiù dovuti all'estrazione dell'olio), di stoccaggio delle sostanze vegetali e di distribuzione. Tutto questo rende quindi il biodiesel allo stato

attuale non conveniente rispetto al gasolio convenzionale perlomeno fino a quando non si considera l'esenzione dal pagamento delle accise.

La produzione del biodiesel

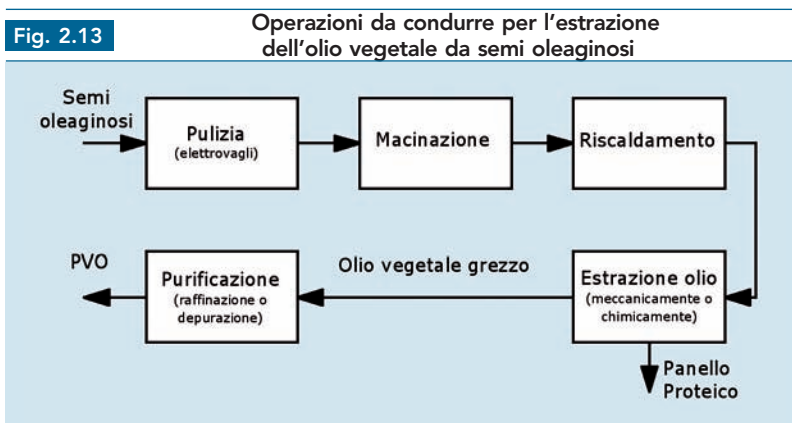
Come già anticipato le materie prime utilizzate per la produzione del biodiesel possono essere sia oli ottenuti da colture come colza, girasole o soia, sia oli recuperati da usi alimentari mediante opportuni sistemi di raccolta differenziata e successiva rigenerazione. Tali materie prime possono essere utilizzate direttamente come combustibili oppure possono essere sottoposte 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 però le colture dedicate ad incidere più significativamente sulla produzione di biodiesel. È, quindi, in direzione della conversione alle colture energetiche dei terreni a riposo oppure dei terreni destinati attualmente ad altri seminativi che sono rivolte le principali decisioni di politica agricola comunitaria. Le coltivazioni tipiche in Europa sono quelle del girasole (Francia, Spagna, Italia) e della colza (Germania, Francia, Gran Bretagna e Danimarca) mentre negli Stati Uniti e nei paesi del sud America (Brasile, Argentina) è diffusa principalmente la soia.

La prima operazione da effettuare per produrre biodiesel è dunque quella di estrarre dalla pianta oleaginosa l'olio

vegetale. Ciò avviene in step successivi che prevedono (figura 2.13): la pulizia dei semi, la macinazione degli stessi con successivo riscaldamento e condizionamento, l'estrazione dell'olio per via meccanica o chimica e infine la sua purificazione per depurazione o per raffinazione. La pulizia dei semi, ricavati dalle colture oleaginose, viene attuata generalmente tramite elettrovagli e magneti, che eliminano gli eventuali materiali grossolani derivanti dalle fasi di raccolta; a questa operazione segue poi il processo di macinazione con cui si realizza la fuoriuscita degli oli dalle cellule. Per favorire tutto ciò, quindi la lisi delle cellule, la diffusione della materia grassa dai semi e la separazione dalle componenti di natura proteica, il prodotto della macinazione subisce una fase di riscaldamento, che viene condotta ad una temperatura di 80–90 °C e ad un'umidità compresa tra il 7 e il 10%.

Si ha quindi l'estrazione degli oli dai semi macinati, questa 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 di tipo chimica. L'estrazione meccanica si avvale di presse a vite o di presse idrauliche che possono avere diverse dimensioni e diverse capacità operative a seconda che siano impiegate in piccole realtà aziendali, in centri di macinazione specifici, magari a vocazione cooperativa, o in veri e propri impianti industriali.

Come co-prodotto della spremitura meccanica a freddo dei semi si ha un



panello proteico utilizzabile nel settore zootecnico per l'alimentazione del bestiame. Nella tabella 2.3 viene riportata la composizione media del pannello di girasole il cui prezzo sul mercato è di circa 100–120 €/t. Esso costituisce perciò una risorsa che gioca un ruolo molto importante soprattutto nell'ambito dell'analisi costi-benefici, la quale permette di valutare la reale convenienza economica della filiera produttiva del biodiesel.

L'estrazione chimica prevede invece l'impiego di solventi organici; quelli maggiormente utilizzati 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. Generalmente la resa in olio vegetale dipende dalle condizioni in cui

è condotto il processo di estrazione chimica; fissando un rapporto seme-solvente pari a 1:18, una temperatura dell'ambiente di reazione di 50 °C e tempi di contatto pari a due ore per la colza e un'ora per il girasole, è possibile ottenere un'ottima efficienza con un residuo di materia grassa non estratta pari solamente all'1%. La modalità di contatto tra seme e solvente 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 invece la percolazione in controcorrente per gravità. Va ricordato infine che l'operazione di estrazione chimica può essere condotta sia in continuo, come avviene negli impianti che trattano almeno 250–500 t/giorno di semi, che in discontinuo (batch). Le due soluzioni estrattive descritte fin ora possono in realtà essere integrate anche in un unico processo nel quale, sostenendo un più elevato costo di investimento, è possibile ottenere delle rese molto più elevate, addirittura prossime al 100% (si riesce cioè ad estrarre dai semi tutta la materia grassa in essi contenuta). Adottando quest'ultimo sistema, la materia prima macinata viene inizialmente sottoposta a una spremitura meccanica parziale, che lascia un residuo di materia grassa del 20–24%, e poi ad una estrazione chimica che riduce praticamente a zero tale rimanenza. Al

Figura 2.14 - Presse per l'estrazione di olio vegetale da 50 e da 300 kg/h



Tabella 2.3 – Composizione del pannello di girasole

Umidità	6-8%
Grasso	15-23%
Proteine	19-23%
Ceneri	5-6%
Fibra grezza	25-28%
Estratti inazotati	16-18%



Fonte: AIEL – Associazione Italiana Energie Agroforestali

termine della fase estrattiva la quantità di olio vegetale grezzo ottenuta è mediamente pari al 37% in peso del quantitativo di semi oleaginosi avviati al processo di estrazione. Le caratteristiche qualitative del prodotto così ottenuto non sono però ancora compatibili con l'eventuale conversione chimica in biodiesel, che necessita invece di una preventiva operazione di purificazione dell'olio grezzo estratto. Tale operazione può essere condotta secondo due diverse modalità che si differenziano per il livello qualitativo conseguito, più elevato se si attua una raffinazione, meno se invece si opta per una depurazione. Quest'ultima 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 permette di rimuovere le impurità operando invece con soluzioni saline, con acido fosforico oppure con acido citrico; essa inoltre riduce l'acidità degli oli mediante neutralizzazione fisica (a una temperatura di 240–260 °C e in condizioni di sottovuoto, 1 mbar) o chimica (operando con sodio idrossido a una temperatura di 60–80 °C e a pressione atmosferica). La principale differenza, dunque, tra olio depurato e olio raffina-

to, risiede soprattutto nella minore acidità di quest'ultimo; si tratta di una caratteristica molto apprezzata ed è proprio per questo che il processo di raffinazione è quello che viene maggiormente adottato nella pratica. Comprendendo infine nell'operazione di estrazione anche la fase di purificazione si può ritenere che la resa complessiva in olio vegetale è pari a circa il 34,4% in peso.

Come già precedentemente accennato, per valorizzare energeticamente il PVO, la strada maggiormente seguita è quella di convertirlo chimicamente in biodiesel attraverso un processo noto con il nome di transesterificazione, in cui i grassi contenuti nell'olio vegetale reagiscono, in presenza di un catalizzatore, con un alcol, generalmente metanolo (ma si può in alternativa usare anche l'etanolo), per formare estere metilico (biodiesel appunto) e, come prodotto secondario, glicerina grezza. 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. Industrialmente esistono fondamentalmente due modalità per realizzare la transesterificazione: utilizzare come catalizzatore una base (NaOH o KOH), oppure realizzare una catalisi acida. In generale il metodo più utilizzato è il primo, questo infatti, oltre a garantire una maggiore efficienza di conversione, pari mediamente al 98%, risulta anche economicamente più vantaggioso, dato che sono richieste temperature e pressioni operative più basse. Si procede allora ad una breve descrizione del processo di esterificazione in ambiente basico che, come è possibile vedere dalla figura 2.15, si sviluppa in step successivi.

Inizialmente si crea una miscela tra il catalizzatore e il metanolo, con una eccedenza di quest'ultimo per assicurare la totale conversione dei trigliceridi in estere; tale miscela è quindi introdotta all'interno di un reattore chiuso dove si trova l'olio vegetale e qui viene lasciata per un tempo variabile da una a otto ore nelle quali avviene prima la conversione degli acidi grassi liberi e successivamente la rottura delle molecole di trigliceridi. Quando la reazione di transesterificazione ha avuto luogo i prodotti sono neutralizzati mediante l'aggiunta di acidi. All'interno del reattore si hanno adesso due fasi distinte e facilmente separabili: nella parte alta si accumula l'estere metilico, indicato anche con la sigla FAME (Fatty Acid Methyl Esters), mentre nella parte basse si deposita, essendo più pesante, la glicerina. Quest'ultima, che costituisce il principale sottoprodotto ricavabile dalla sintesi del biodiesel, ha un notevole valore aggiunto per l'impianto di esterificazione soprattutto per effet-

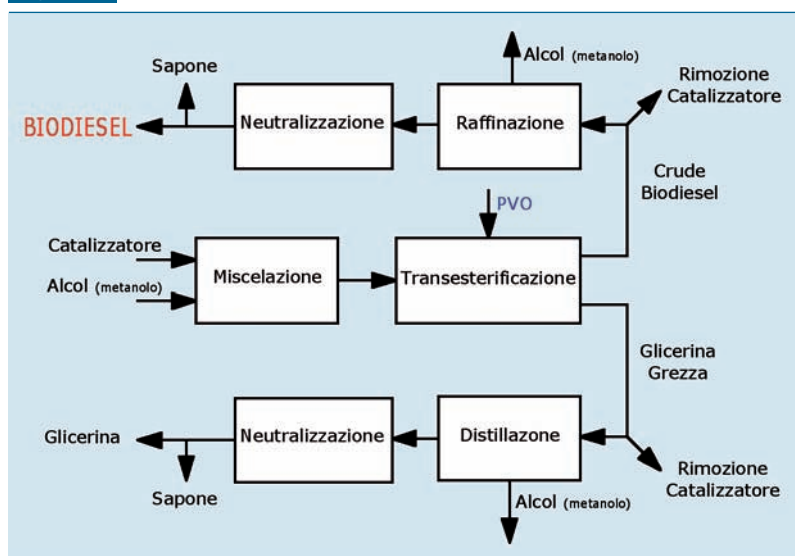
to dei suoi svariati utilizzi e quindi del suo elevato valore economico. La glicerina ottenibile, che è circa il 10% in peso dell'estere prodotto, ha infatti oltre 800 diversi impieghi specialmente nell'industria farmaceutica e cosmetica. Una volta completata l'operazione di transesterificazione i due prodotti subiscono: un processo di purificazione, per l'eliminazione dei residui catalitici, una distillazione sottovuoto (stripping) per la rimozione del metanolo, che viene poi accumulato per il riutilizzo, e infine una neutralizzazione dai saponi formati nel reattore dai quali è possibile ottenere dei sali eventualmente impiegabili come fertilizzanti. Se il processo base per la produzione di biodiesel è quello appena descritto, le soluzioni impiantistiche per la sua realizzazione possono essere differenti, 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 e tramite la catalisi da parte dell'idrossido di potassio o dell'idrossido di sodio. 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 e ancora tramite catalisi con KOH o NaOH. Questo sistema è indicato per il trattamento in continuo e in batch, con produzioni

Fig. 2.15

Conversione del PVO in Biodiesel



fino a 25.000 t/anno. Il tempo di reazione è di circa 1 ora.

- *Impianto ad alta temperatura e pressione.* La transesterificazione è in questo caso eseguita a 200 °C e alla pressione di 50 MPa. Questa soluzione impiantistica presenta dei costi di installazione e di gestione ben più elevati rispetto alle tipologie prece-

denti ed è pertanto giustificata solo per produzioni di biodiesel superiori alle 25.000 t/anno, sia in continuo, sia in batch. A differenza di quanto visto fin ora la conversione viene condotta in catalisi acida attraverso l'impiego di acido solforico che consente il trattamento di oli vegetali ad elevata acidità.





Capitolo **Tre**

La conversione termochimica

[3.1]

L'essiccazione della biomassa

Prima di essere impiegata in un qualunque processo termochimico di conversione energetica, la biomassa subisce generalmente un'operazione di essiccazione con la quale si cerca di abbassarne il livello di umidità. Per realizzare ciò esistono fondamentalmente tre diversi modi di operare che possono anche essere adottati 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 compresi tra 18–25% dopo due stagioni. Anche sostanze come ad esempio il grano vengono tipicamente lasciate nei campi ed esposte agli agenti climatici così da ridurre in maniera significativa il contenuto alcalino e il cloro che possono portare problemi di corrosione durante la fase di conversione. Per quanto concerne invece le colture erbacee perennanti,

queste subiscono un fisiologico parziale decadimento del contenuto d'acqua nei mesi tardo invernali e al termine della stagione vegetativa, quindi, se si effettua la raccolta sfruttando questa condizione stagionale favorevole si ha la possibilità di ottenere della biomassa già sostanzialmente secca che non richiede ulteriori particolari trattamenti. Per quanto riguarda infine le colture erbacee annuali, l'impiego di macchine falcia-condizionatrici consente, attraverso la rottura e lo schiacciamento degli steli, di creare già nelle operazioni di raccolta un'efficace disidratazione naturale che garantisce un'umidità finale della balla compresa tra il 35% e il 40%.

- *Essiccazione naturale della materia lavorata.* Questo processo si applica soprattutto al cippato, in particolar modo a quello proveniente dalle Short Rotation Forestry, caratterizzato da un contenuto di umidità elevato. Nonostante i chips possano essere stoccati al coperto, durante i mesi invernali, lo stoccaggio estivo realizzato all'aperto è comunque da preferire, soprattutto perché più economico considerando la bassa densità del materiale e le ampie superfici necessarie per l'essiccamento. 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.

- *Essiccazione forzata della materia lavorata.* L'utilizzo di questa tipologia di essiccamento consiste nell'esposizione della biomassa a sorgenti di calore (tipicamente aria calda) e comporta generalmente un notevole consumo d'energia, che di fatto riduce l'efficienza energetica complessiva dell'impianto di conversione e aumenta i costi di utilizzazione. Questo sistema dovrebbe essere pertanto adottato solo in particolari casi: quando ad esempio l'essiccazione naturale non è sufficiente ad ottenere il livello di umidità voluto, oppure quando l'energia termica è ottenuta impiegando calore residuo derivante da altri processi di lavorazione.

[3.2] Pirolisi e tecnologie applicabili

La pirolisi è un processo di decomposizione termochimica della biomassa ottenuto mediante l'applicazione di calore a temperature comprese tra 400 e 800 °C, in completa assenza di elementi ossidanti, o al più impiegando una ridottissima quantità di ossigeno (parziale gassificazione).

Sebbene il calore necessario a tale processo sia quasi sempre prodotto esternamente e fornito in maniera indiretta alla biomassa da trattare, la presenza di una ridotta quantità di agenti ossidanti può

essere sfruttata per generare internamente al reattore l'energia termica richiesta, proprio mediante la parziale combustione della sostanza organica. Questa, come noto, è costituita generalmente da una miscela di emicellulosa, cellulosa, lignina e altre sostanze organiche presenti in quantità minori che tendono a subire il processo di pirolisi in diversa misura e tramite differenti meccanismi. In questo ambito nonostante alcune ricerche siano state condotte relativamente ai singoli componenti, la maggior parte degli studi e delle sperimentazioni finora effettuate ha riguardato solamente la biomassa nella sua interezza, e ciò a causa soprattutto degli alti costi necessari per la separazione dei costituenti elementari. È comunque possibile affermare che il grado di decomposizione raggiunto da ciascuno di questi componenti dipende essenzialmente da alcuni parametri caratteristici come: temperatura di reazione, velocità di riscaldamento della biomassa, tempo di residenza all'interno del reattore, dimensione e forma fisica del materiale da trattare nonché eventuale presenza di catalizzatori. Questi fattori unitamente alla composizione specifica della sostanza organica influenzano in definitiva la resa dei diversi prodotti di pirolisi che si distinguono in:

- una frazione *gassosa* a basso-medio potere calorifico contenente CO, CO₂, idrocarburi (CH₄, C₂H₄, C₃H₆), H₂O, H₂;
- una frazione *liquida oleosa* contenente catrame, acqua e composti organici a basso peso molecolare come aldeidi, acidi, chetoni, alcoli;
- un prodotto *solido* costituito da residui a più alto peso molecolare come porzioni carboniose, ceneri, inerti e specie metalliche.

La temperatura gioca sicuramente un

ruolo determinante nel definire le proporzioni tra le varie frazioni; all'aumentare di questa infatti si ha in generale un incremento della fase gassosa per effetto soprattutto delle reazioni di devolatilizzazione che tendono a prendere il sopravvento rispetto a quelle di *charring* (carbonizzazione), maggiormente presenti ai bassi regimi termici. Ciò fa sì che si realizzi una rapida diminuzione del residuo solido nel quale tra l'altro, per effetto delle alte temperature, si riducono le porzioni catramose a vantaggio soprattutto di carbonio fisso e ceneri. La parte liquida invece, che è quella energeticamente più interessante, presenta un massimo di produzione a circa 500 °C e comunque quando i tempi di raffreddamento sono compresi tra 0,5 e 2 secondi. In queste condizioni i vapori di *tar*, che cominciano a liberarsi dalle particelle di biomassa per temperature superiori ai 200 °C, vengono fatti condensare prima che subiscano dei fenomeni di *cracking* (favoriti proprio da temperature e tempi di residenza elevati) che porterebbero alla formazione di un maggior quantitativo di prodotti gassosi: maggiore è la permanenza della sostanza organica all'interno reattore minore sarà la resa in frazione liquida mentre superiore risulterà, a seconda del regime termico adottato, la resa in specie gassose o *char* (solidi carbonizzati). In conseguenza a quanto detto finora, una elevata velocità di riscaldamento della biomassa, indicativamente compresa tra 10 e 200 °C/s, non può che aumentare la produzione della fase liquida a scapito naturalmente degli altri composti.

Le tecnologie di pirolisi applicabili

La possibilità che si ha di modificare, come visto, i principali parametri operativi al fine di regolare le proporzioni tra i

diversi prodotti ottenibili, metta in evidenza come in realtà il processo di pirolisi possa avvenire secondo diverse modalità; le più comuni sono: pirolisi lenta, pirolisi convenzionale, pirolisi veloce e pirolisi ultraveloce.

Pirolisi lenta

Si tratta di un processo caratterizzato da temperature di reazione particolarmente basse che tipicamente sono comprese tra i 300 e i 500 °C. Le velocità di riscaldamento del combustibile sono anch'esse particolarmente limitate, mentre i tempi di permanenza in assenza di ossigeno sono molto lunghi e possono variare dai 5 ai 30 minuti. Questo particolare tipo di pirolisi viene generalmente impiegato per produrre elevate quantità di solidi carbonizzati (*char*) che possono raggiungere anche il 35% in peso della biomassa inizialmente introdotta nel reattore. La parti liquide e gassose, che in genere costituiscono rispettivamente il 30 e il 35% della materia organica iniziale, sono in questo caso considerati come dei co-prodotti da utilizzare ad esempio nell'industria chimica, o come combustibili per la generazione dell'energia termica necessaria allo svolgimento dello stesso processo di pirolisi. Una tipica applicazione di questa metodologia di conversione è ad esempio la carbonizzazione della biomassa legnosa, conosciuta sin dai tempi più antichi, e mediante la quale si procede al recupero della sola frazione solida, che prende il nome di carbone vegetale, minimizzando contestualmente le altre componenti.

Pirolisi convenzionale

La pirolisi convenzionale viene realizzata adoperando velocità di riscaldamento della biomassa moderate, pari a circa 20 °C/s, temperature di reazione inferiori ai

600 °C e tempi di residenza variabili da 10 secondi a 10 minuti. Adottando queste condizioni operative quello che si ottiene sono quantità pressoché comparabili delle tre frazioni, ovvero di char, gas e liquido. Si tratta tuttavia di una tecnologia non particolarmente diffusa a causa soprattutto dell'elevato numero di prodotti difficilmente trattabili e commercializzabili, della più bassa efficienza nella produzione di gas e liquido e dei problemi connessi alla trasmissione di calore al reattore.

Pirolisi veloce (fast pirolisi)

Come già accennato operando con temperature di circa 500 °C e tempi di contatto relativamente brevi, tipicamente inferiori a 2 secondi, si riesce a massimizzare la resa della frazione liquida che può in questo caso raggiungere anche l'80% in peso della sostanza organica introdotta nel reattore. Ciò è quello che viene fatto in un processo di pirolisi veloce in cui l'obiettivo è portare rapidamente le particelle di biomassa alla temperatura ottimale, minimizzando contemporaneamente la loro esposizione ai regimi termici intermedi per i quali si andrebbe a favo-

rire lo sviluppo di frazioni carbonizzate. Per realizzare questa condizione, come si vedrà, o si utilizzano particelle di biomassa di dimensioni ridotte, come si fa ad esempio nei reattori a letto fluido, oppure si cerca di riscaldare rapidamente la superficie esterna della sostanza organica a contatto con la sorgente di calore, come invece accade nella pirolisi ablativa. La tecnica della fast pirolisi è quella prevalentemente adottata in virtù proprio dell'elevato quantitativo di sostanza liquida ottenibile che viene comunemente definita "bio-oil" o "bio-crude-oil".

L'olio di pirolisi, che viene ottenuto sottoponendo i vapori formati all'interno del reattore ad un rapido raffreddamento (quenching) per contatto con liquidi ad una più bassa temperatura, si presenta generalmente di colore marrone scuro e con una composizione che è fondamentalmente la stessa della biomassa da cui deriva. Esso può essere considerato come una micro emulsione dove la fase continua, costituita da una soluzione acquosa di prodotti derivanti dalla decomposizione della cellulosa, stabilizza la fase discontinua che è invece formata da macromolecole di lignina.

Il bio-olio è dunque una miscela complessa di idrocarburi ossigenati con una percentuale considerevole di acqua derivante sia dall'umidità originaria, che dal cracking delle sostanze chimiche costituenti la biomassa. La percentuale tipica è generalmente compresa tra il 15 e il 30% in peso e dipende dal materiale di alimentazione nonché dalle modalità di produzione e di raccolta. Per avere valori medi ($\approx 22\%$) si consiglia di adoperare della sostanza organica già essiccata e con una umidità residua non superiore al 10% poiché, sia questa che l'acqua di reazione (circa il 12% se si utilizza materiale

Figura 3.1
Bio-Olio



secco), finiscono nel prodotto liquido e se presenti in percentuali superiori al 35–40% possono generare in esso instabilità e separazioni di fase. Confrontando la composizione del bio-olio con quella di un normale olio combustibile (tabella 3.1) si evidenzia, oltre ad una maggiore percentuale di ossigeno, anche l'assai più elevato quantitativo di acqua che determina un ridotto potere calorifico superiore (pari a circa la metà di quello dei normali oli minerali) e un basso livello di pH favorito dal notevole contenuto di acidi volatili come acido acetico e formico.

L'acqua, la cui presenza comporta come aspetto positivo la riduzione della viscosità, risulta però difficile da eliminare soprattutto a causa dei cambiamenti chimico-fisici che si manifestano nel bio-olio quando questo viene fatto evaporare o distillare a temperature superiori ai 100 °C. Per tale motivo, spesso, si preferisce utilizzare questo combustibile tal quale, come prodotto di bassa qualità destinato ad esempio all'alimentazione delle caldaie. Prima di essere condensati in forma liquida i vapori di pirolisi che si sviluppa-

no all'interno del reattore vengono ripuliti, mediante l'impiego di sistemi a ciclone e con non poche difficoltà, da ceneri e frazioni carbonizzate. Il char recuperato, se caratterizzato da un basso contenuto di ceneri, possiede un potere calorifico inferiore relativamente alto e pari a circa 30 GJ/t; per tale motivo esso può essere utilizzato come combustibile sia nello stesso processo di pirolisi, che eventualmente per realizzare il solo essiccamento della biomassa in ingresso. L'operazione di pulizia è dunque assolutamente necessaria soprattutto considerando il fatto che un elevato contenuto di solidi sospesi e/o particolato di grosse dimensioni pregiudica la possibilità di utilizzare il bio-olio in maniera efficace. Il char infatti, oltre a catalizzare le reazioni di cracking secondario, se contenuto nel liquido condensato contribuisce ad accelerare in esso processi di polimerizzazione con conseguenti problemi di instabilità e incremento del livello di viscosità. L'olio pirolitico non può poi essere miscelato con nessun combustibile convenzionale derivato dal petrolio e questo pone non pochi problemi di stoccaggio tra l'altro accentuati dalla necessità, per evitare fenomeni di degrado, di evitare contatti con luce, ossigeno ed esposizioni a temperature superiori ai 50 °C. Buoni risultati in questo senso si sono ottenuti conservando questo prodotto all'interno di cilindri di acciaio e plastica che hanno permesso, anche dopo diversi anni, un utilizzo sicuro e senza fenomeni di deterioramento. Rimane tuttavia fisiologica la tendenza ad un graduale aumento della viscosità nel tempo che, in casi di estreme variazioni della temperatura, potrebbe condurre anche ad una separazione di fase con formazione di residuo solido. Per aumentare la qualità degli oli pirolitici su di essi vengono eseguiti dei

Tabella 3.1 – Confronto tra la composizione chimica del bio-crude e quella dell'olio combustibile di origine fossile

	Bio-olio da pirolisi ⁽¹⁾	Olio combustibile ⁽²⁾
Acqua (%)	15-30	<0,05 - 1,5
Densità (kg/m ³)	1,20	0,950 - 0,980
Carbonio (%)	56,4	86 - 87
Idrogeno (%)	6,2	10,5 - 11,5
Ossigeno (%)	37,3	1 - 2
Azoto (%)	0,1	0,2 - 0,4
Zolfo (%)	-	0,3 - 4
Ceneri (%)	0,1	<0,05 - 0,20
Potere calorifico superiore (MJ/kg)	16-19	42,5 - 43,5

⁽¹⁾ Dati di letteratura

⁽²⁾ Database SSC – (Stazione Sperimentale per i Combustibili)

processi di upgrading con i quali si cerca essenzialmente di ridurre il contenuto di ossigeno, il peso molecolare, la viscosità e contemporaneamente aumentare la stabilità in funzione della temperatura, la miscibilità con i combustibili fossili e l'immiscibilità con l'acqua. A tal uopo le tecniche principali sono:

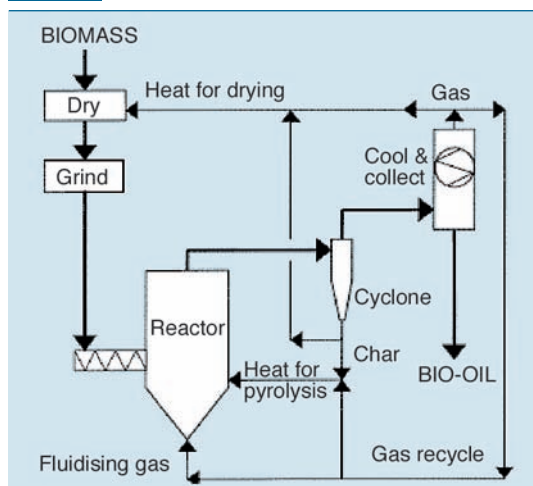
- *zeolite cracking*, con la quale, attraverso l'utilizzo di catalizzatori selettivi (zeoliti), si convertono i composti ossigenati provenienti dalla biomassa in un prodotto ricco di composti organici alchilati con punto di ebollizione nel campo tipico della benzina;
- *hydrotreating*, in cui l'olio di pirolisi condensato viene fatto reagire con idrogeno per rimuovere l'ossigeno e renderlo meno volatile. Si tratta di fatto di una tecnica basata sul tipico processo utilizzato nelle raffinerie e include: idrogenazione deossigenazione e raffinazione; i prodotti ottenuti con questa tecnica sono idrocarburi nel campo delle benzine.

Questi processi, seppur tecnicamente possibili, sono allo stato attuale estremamente costosi e tra l'altro ancora in fase

di sviluppo; pertanto l'applicazione diretta del bio-olio o di suoi derivati in ambito motoristico, in sostituzione dei prodotti di origine petrolifera, appare oggi non particolarmente immediata. La stessa cosa vale anche per la gassificazione, mediante ossigeno, dell'olio pirolitico in gas sintetico da cui si potrebbe addirittura ricavare attraverso un processo di reforming catalitico, idrogeno da utilizzare nell'alimentazione di celle a combustibile. Attualmente però la strada più facilmente percorribile è quella che vede il bio-crude-oil impiegato ad esempio nelle caldaie per la produzione di calore o in campo industriale per il riscaldamento dei forni di cottura di cemento e calce in sostituzione del tradizionale olio combustibile di origine fossile. Per quanto riguarda invece la produzione di energia elettrica c'è da dire che al momento uno dei maggiori problemi è quello legato alla qualità dei prodotti di pirolisi, che non ha ancora raggiunto un livello sufficientemente adeguato con riferimento alle applicazioni, sia con turbine a gas che con motori diesel. Comunque, in prospettiva futura e con riferimento alle taglie degli impianti, i cicli combinati ad olio pirolitico appaiono i più promettenti, soprattutto in applicazioni di grande taglia, mentre motori a ciclo diesel, utilizzando prodotti di pirolisi, sembrano più adatti ad impianti di piccola potenzialità.

Per quanto riguarda poi la frazione solida e gassosa c'è da dire che queste, nella fase di pirolisi, rappresentano di fatto dei sottoprodotti il cui quantitativo alla fine del processo di conversione non supera quasi mai il 12-13% in peso della biomassa originaria. Dato che carbone e gas generalmente contengono rispettivamente il 25% e il 5% dell'energia contenuta nei materiali di alimentazione e che per realizzare

Fig. 3.2 Layout di un processo di pirolisi veloce



la decomposizione pirolitica è necessario circa il 15% dell'energia contenuta nella sostanza organica, appare evidente che solo il carbone può essere impiegato per produrre il calore necessario al funzionamento del reattore. In alternativa il char recuperato dal fondo del ciclone, può essere, in configurazioni impiantistiche più avanzate, gassificato e trasformato in un gas con un più basso potere calorifico. Questo potrà comunque essere bruciato con maggiore efficacia e in maniera più pulita evitando tra l'altro la potenziale formazione di scorie che invece tende a verificarsi con la combustione diretta del carbone. Per quanto riguarda infine la parte non condensabile, ovvero la frazione gassosa, essa, che è costituita principalmente da una miscela di CO, CO₂, CH₄ e H₂, viene generalmente utilizzata per essiccare la biomassa, per fluidizzare il letto del reattore o ancora come combustibile all'interno di motori a gas.

In conclusione si può ritenere che, tra le diverse tecnologie, la pirolisi veloce è sicuramente quella prevalentemente adottata soprattutto in virtù del fatto che come prodotto si ottiene un combustibile liquido che risulta più facilmente stoccabile e trasportabile (con risparmi anche in termini economici) rispetto alla materia prima da cui deriva. Questa in teoria può essere di qualunque tipo purché risponda a requisiti specifici soprattutto in termini di umidità. Per questo motivo oltre a diverse tipologie di legnami, è stata testata l'idoneità all'impiego in un processo di pirolisi veloce di circa 100 specie differenti di biomassa tra cui: colture energetiche come il miscanto e il sorgo, scarti forestali come le cortecce degli alberi e residui dell'attività agricola come paglia, noccioli d'oliva e gusci di noce. Nonostante comunque la tipologia fast sia, tra tutti i

processi di pirolisi, quella più promettente, numerosi aspetti hanno ancora carattere prettamente empirico e richiedono pertanto studi e sperimentazioni mirate principalmente al miglioramento della qualità del prodotto finale. Dal punto di vista tecnologico infatti, si sono fin ora realizzati solamente impianti pilota o dimostrativi e lo stato di avanzamento della tecnologia può ritenersi ancora ad un livello pre-commerciale. Problemi di natura tecnica si riscontrano ad esempio nella fase di trasferimento del calore alla biomassa e nella modalità con cui eseguire il quenching (spegnimento) rapido per bloccare la reazione allo stadio voluto. Oggi poi ricerca e sviluppo mirano anche al miglioramento dell'affidabilità e delle prestazioni degli impianti, alla riduzione di costi (al fine di rendere il bio-olio economicamente competitivo con l'olio combustibile tradizionale) e alla possibilità di integrare la tecnologia della pirolisi con sistemi di cogenerazione. Studi devono essere condotti inoltre sul bio-olio al fine di limitarne l'acidità, che tende ad aumentare alle alte temperature per le quali si attiva un vero e proprio processo di invecchiamento con reazioni di polimerizzazione e formazione di acidi organici che abbassano il pH a valori compresi tra 2 e 4. Negli USA infine si stanno conducendo delle ricerche nel tentativo di utilizzare gli oli pirolitici in applicazioni alternative e non energetiche. Se opportunamente separati infatti, i preziosi componenti contenuti nel bio-olio (vedasi i fenoli) possono essere impiegati anche per la preparazione di *chemicals* come ad esempio nylon, disinfettanti, nonché adesivi e resine destinati alla produzione di legno compensato.

Pirolisi ultra veloce (flash pirolisi)

Viene condotta a temperature superiori ai

Reattori

Per quanto detto fin ora il reattore rappresenta l'elemento chiave in un processo di pirolisi nonostante di fatto esso costituisca solamente il 10 o al più il 15% del costo dell'intero impianto di conversione. Su questo dispositivo si sono nel corso degli anni focalizzate numerose ricerche e progetti di sviluppo mirati principalmente al miglioramento sia dei sistemi di controllo che della qualità del combustibile liquido ottenuto. Di reattori ne esistono per la verità numerose tipologie e attualmente più di 150 compagnie nel mondo stanno introducendo sul mercato diverse tecniche innovative di pirolisi, tra cui le più importanti e utilizzate sfruttano:

- Letti fluidi bollenti (BFB),
- Letti fluidi circolanti (CFB),
- Letti fluidi trascinati (EFB),
- Forni ablativi,
- Forni a cono rotante,
- Forni a letto mobile sottovuoto.

Questi sistemi si differenziano principalmente per: la quantità di calore richiesta per sostenere il processo di pirolisi, la necessità o meno di utilizzare del gas come agente veicolante, la pressione operativa (vuoto o atmosferica) e la dimensione elementare della sostanza organica in ingresso. Per quanto riguarda i reattori a letto fluido (BFB, CFB, EFB), questi sono fondamentalmente analoghi a quelli impiegati nei processi di gassificazione, pertanto una loro descrizione verrà data successivamente. Adesso ci si sofferma invece sulle altre tipologie che sono state studiate appositamente per realizzare la conversione pirolitica. Tra queste ad esempio vi sono i sistemi ablativi in cui la biomassa viene pressata con forza sulla parete calda del reattore per mezzo o della forza centrifuga, come accade nel brevetto NREL, o di una azione meccanica come invece si verifica nella soluzione messa appunto dall'Aston University. Per realizzare la conversione e favorire la formazione di bio-olio si deve inoltre avere un'elevata velocità relativa tra le particelle e la parete del reattore la cui temperatura superficiale deve comunque mantenersi al di sotto dei 600 °C. Così facendo il fronte di pirolisi si propaga attraverso la sostanza organica a partire dalla zona di contatto dove, in seguito a queste condizioni, si forma uno strato di olio che evaporando viene quindi raccolto per con-

Fig. 3.3 Rappresentazione schematica del processo di pirolisi ablativa secondo la metodologia studiata dall'Aston University

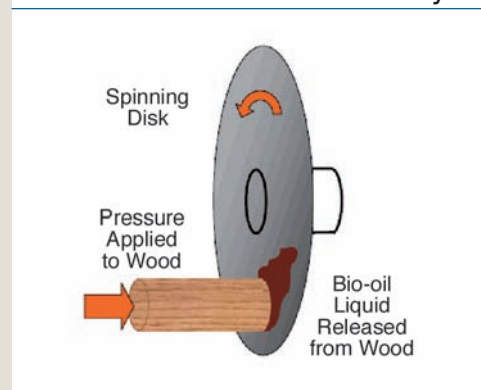
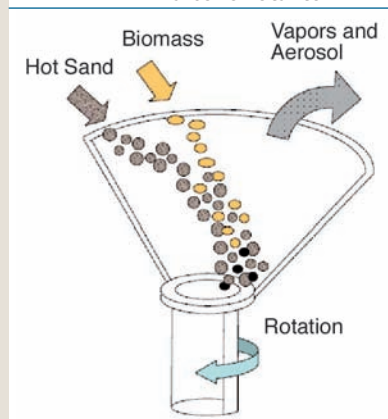


Fig. 3.4 Rappresentazione schematica di un reattore a cono rotante



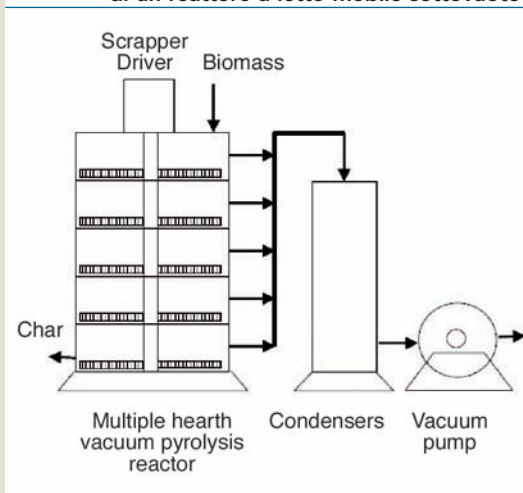
densazione similmente a quanto accade con tutti gli altri sistemi di pirolisi. A differenza dunque dei reattori a letto fluido, per riscaldare rapidamente le particelle, non è necessario ridurre al minimo le loro dimensioni, ma è sufficiente agire sul grado di pressione, sulla velocità relativa con la parete e sulla temperatura di quest'ultima. Questa tecnologia non pone pertanto, almeno in teoria, nessun limite sulle dimensioni della biomassa utilizzabile, essa inoltre non richiede la presenza di gas fluidizzanti e di conseguenza le installazioni sono piccole e potenzialmente più economiche.

Un'altra possibilità è rappresentata dai forni a cono rotante. In essi si introducono, nella parte bassa, delle particelle di biomassa miste a materiale inerte, tipicamente sabbia, che per effetto della rotazione sono spinte verso l'alto con un percorso a spirale mentre rimangono contemporaneamente in contatto con le pareti calde del reattore (600 °C) che ruota a circa 900 giri al minuto. Sulla superficie si formano così vapori e aerosol che vengono poi raccolti e processati come negli altri sistemi. Dalla sommità del cono si estraggono inoltre sia la sabbia che le frazioni carbonizzate, quest'ultime sono quindi inviate in un reattore secondario a letto fluido bollente dove, per mezzo di un gas fluidizzante, sono bruciate in modo da riscaldare il materiale inerte che viene poi ricircolato all'interno del forno. Nonostante sia necessaria una certa quantità di gas veicolante (comunque inferiore a quella richiesta nei reattori a letto fluido) per alimentare il combustore del char e trasportare le particelle di sabbia, questi sistemi risultano abbastanza compatti e in grado di produrre una frazione liquida pari a circa il 60% in peso della biomassa iniziale.

Per concludere si dà un breve descrizione anche dei reattori a letto mobile sottovuoto. In questi sistemi la biomassa, caricata dall'alto, per effetto della gravità e della rotazione di elementi raschianti, si muove attraverso diversi piani di pirolisi in cui la temperatura aumenta progressivamente passando da 200 a circa 400 °C. I vapori ottenuti dalla decomposizione della sostanza organica sono quindi rimossi rapidamente tramite l'ausilio di una pompa a vuoto che mantiene all'interno del reattore una pressione di circa 15 kPa. La frazione liquida, creata ancora una volta all'interno di un condensatore, varia generalmente dal 35 al 50% in peso della biomassa introdotta, pertanto il quantitativo di char prodotto con questa soluzione tecnologica è sicuramente maggiore rispetto a quello ricavato con altri sistemi.

Per tale motivo e per gli elevati tempi di residenza, le applicazioni con letto mobile sottovuoto non possono considerarsi come dei veri e propri processi di fast pirolisi ma piuttosto sono da ritenere intermedie tra questi e i sistemi di pirolisi convenzionale. I principali vantaggi sono l'assenza di gas fluidizzante e la possibilità di trattare particelle di biomassa anche di grosse dimensioni, tra gli inconvenienti, invece, c'è da segnalare la particolare complessità tecnologica di questi reattori, che risulta ulteriormente accentuata dalla necessità di lavorare praticamente in condizioni di vuoto.

Fig. 3.5 Rappresentazione schematica di un reattore a letto mobile sottovuoto



650 °C e con tempi di contatto inferiori al secondo, quindi ancora più brevi rispetto alla metodologia precedente. A queste condizioni dalla sostanza organica si ottiene perlopiù materiale gassoso costituito principalmente da una miscela di monossido di carbonio e idrogeno con piccole percentuali di anidride carbonica. In seguito ad un rapido raffreddamento è poi possibile anche in questo caso ricavare una frazione liquida che presenta però, rispetto al bio-olio prodotto con la pirolisi veloce, un variazione di composizione più ristretta.

[3.3]

Il processo HTU (Hydro Thermal Upgrading)

È un processo nel quale la biomassa viene decomposta in acqua per produrre un liquido simile all'olio greggio detto *bio-greggio*. Uno dei principali vantaggi di questa tecnologia è che possono essere utilizzate diverse tipologie di prodotti, inclusi i residui agricoli o la parte organica dei rifiuti solidi urbani. Il primo step consiste nel trattare la biomassa con acqua ad una temperatura di 200–250 °C e ad una pressione di circa 30 bar; si passa quindi alla fase di riscaldamento subito seguita dalla sezione in cui avviene, in un tempo compreso tra i 5 e i 10 minuti, la conversione vera e propria ad una pressione di 120–180 bar e ad una temperatura di 300–350 °C. Oltre al bio-greggio, che rappresenta comunque il principale prodotto di reazione (50%), dall'HTU si ottiene anche una frazione gassosa (30%) costituita essenzialmente da CO₂ (70–90%) e in minor misura anche da H₂ (20–30%) e da piccoli quantitativi di metano e monossido di carbonio. Come sot-

toprodotti poi, si hanno anche composti organici in soluzione acquosa sui quali è possibile attivare un processo di digestione anaerobica per la produzione di biogas. Il bio-greggio è un liquido organico viscoso di colore nero costituito da una miscela di diversi idrocarburi, ha un potere calorifico inferiore di circa 30–36 MJ/kg e quantitativo di ossigeno relativamente basso che lo rende più stabile rispetto all'olio pirolitico. Dal bio-greggio si possono separare diverse frazioni: quelle più pesanti sono utilizzabili in co-combustione con il carbone negli impianti di potenza o per la preparazione di chemicals, quelle più leggere possono invece essere raffinate per produrre un combustibile con qualità simili a quelle del diesel sfruttando ad esempio un processo di idrodeossigenazione con il quale si rimuove l'ossigeno e lo si sostituisce con l'idrogeno. Questa tecnologia però, pur essendo sufficientemente nota nella raffinazione di combustibili fossili, richiede ancora, per il trattamento del bio-greggio, una attenta fase di ricerca e sviluppo mirata soprattutto alla determinazione delle migliori condizioni operative. La stessa cosa vale del resto per il processo HTU nel suo complesso, in questo caso infatti sono da risolvere numerose problematiche riguardanti perlopiù il trattamento dei reflui organici, le procedure di alimentazione riscaldamento e conversione della biomassa, nonché le modalità di pulizia del prodotto finale.

[3.4]

La gassificazione

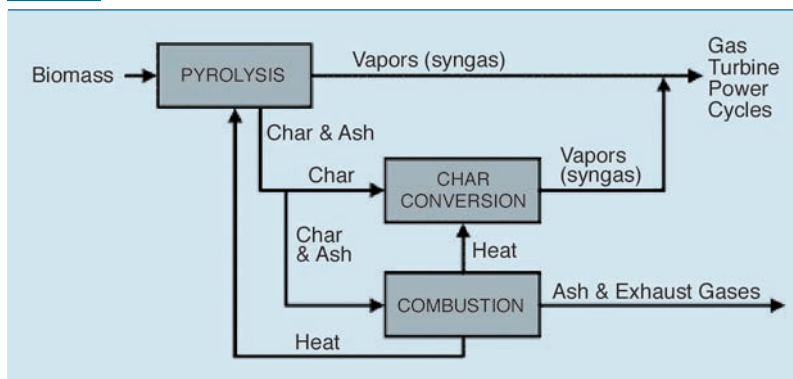
La gassificazione è una tecnologia di conversione termochimica per mezzo della quale legno, biomasse lignocellulosiche

coltivate, residui agricoli o rifiuti solidi urbani sono trasformati in un gas combustibile, noto come syngas o gas di gasogeno, a basso contenuto energetico, ma molto più versatile da utilizzare rispetto alle materie prime da cui deriva. Il processo di gassificazione consiste di fatto in una ossidazione incompleta che si realizza ad una temperatura variabile tra 800–1.000 °C e ad una pressione che dipende dal tipo di tecnologia impiegata. Indipendentemente comunque dalle modalità con cui avviene questa conversione termochimica, una volta introdotta all'interno del reattore, la biomassa subisce le seguenti quattro fasi: essiccazione, pirolisi, ossidazione (parziale) e riduzione. Inizialmente si ha la fase di essiccazione che determina, per temperature superiori ai 100 °C, l'eliminazione per evaporazione del contenuto d'acqua residuo presente nella biomassa (5–35%); questa subisce quindi una decomposizione pirolitica in assenza di ossigeno che produce, finché la temperatura all'interno del gassificatore è intorno ai 600 °C, la vaporizzazione dei componenti più volatili della sostanza organica con formazione di gas di pirolisi (syngas a basso potere calorifico variabile tra 3,5 e 9 MJ/Nm³) e char. La parte car-

bonizzata (char) e le ceneri (non vaporizzabili) entrano quindi in contatto con il mezzo di gassificazione che può essere aria, ossigeno, vapore o una miscela di questi tre elementi. Da questa parziale ossidazione si sviluppa dunque il calore necessario a mantenere attivo l'intero processo di conversione; calore che viene poi assorbito dalle reazioni endotermiche di riduzione dalle quali si formano i costituenti del gas di sintesi. Quando avviene in questa modalità, ovvero con il calore necessario prodotto all'interno del gassificatore, la gassificazione si dice diretta, se invece l'energia termica è generata esternamente al reattore, la gassificazione si dice indiretta o pirolitica.

In quest'ultimo caso si utilizza come mezzo di gassificazione il vapore e quello che si ottiene è un gas di sintesi a medio potere calorifico inferiore (circa 10 MJ/Nm³). Il contenuto energetico del syngas è però estremamente variabile; esso può arrivare infatti anche a 14 MJ/Nm³, se si adopera ossigeno puro, o addirittura ridursi fino a circa 4 MJ/Nm³ quando si adoperano i comuni gassificatori ad aria. In funzione del mezzo adottato comunque, non solo cambiano le caratteristiche energetiche del syngas prodotto, ma si modificano anche le concentrazioni degli elementi costituenti che sono principalmente monossido di carbonio, idrogeno, anidride carbonica e metano. A questi si sommano poi anche: azoto, specialmente nella gassificazione ad aria, vapore e piccole tracce di idrocarburi come etilene ed etano. In tabella sono riassunte le percentuali volumetriche dei principali componenti del gas di gasogeno distinte in funzione del tipo di gassificazione effettuata; i valori riportati sono comunque indicativi dato che essi dipendono anche dalle caratteristiche specifiche del reatto-

Fig. 3.6 Rappresentazione schematica di un processo di gassificazione



re utilizzato e dal tipo di biomassa convertita.

Non va dimenticato poi che il prodotto della gassificazione contiene anche molte impurità come ad esempio ceneri, catrami, ma anche acidi solforati, HCN, HCl, ammoniaca e metalli pesanti, che rendono pertanto indispensabile la presenza di una fase di depurazione a valle del processo di conversione prima che il gas di sintesi sia impiegato a fini energetici. La pulizia del syngas, specialmente dai residui bituminosi (tar) e dalle polveri, viene perlopiù condotta utilizzando sia metodi a bassa temperatura, come ad esempio il *water scrubbing*, che metodi ad alta temperatura (*hot-gas cleanup*) basati principalmente sull'uso di filtri ceramici. Tali tecnologie, pur rappresentando un aggravio economico non indifferente sull'intero processo di conversione, consentono comunque di ridurre sensibilmente il carico inquinante posseduto dal syngas che quindi, qualora dovesse essere bruciato, darebbe luogo ad un livello di emissioni di diversi ordini di grandezza inferiore rispetto a quello prodotto dalla biomassa di partenza utilizzata tal quale.

A conclusione delle fasi di gascleaning

quello che si ottiene è dunque un combustibile estremamente versatile; esso può essere infatti impiegato per la produzione di calore, in normali caldaie, per l'alimentazione di motori a combustione interna (ciclo otto e ciclo diesel) o per la generazione di energia elettrica in impianti turbogas. Quest'ultima applicazione, in particolare, giustifica a pieno l'operazione di pulizia condotta precedentemente: per evitare danni alle turbine è infatti di fondamentale importanza avere nei gas combustibili un limitato quantitativo residuo di particelle solide, metalli alcalini nonché di tar, i quali, addirittura, devono essere assenti o presenti solo sotto forma di vapori. Se impiegato come combustibile nelle turbine a gas, inoltre, è bene che il syngas abbia anche un adeguato potere calorifico inferiore, pari ad almeno 8–10 MJ/Nm³, valore che di fatto esclude da questo tipo di applicazione il gas sviluppato tramite processi ad aria, che come detto presenta un contenuto energetico sensibilmente più basso. Un'ulteriore applicazione poi è quella che vede il gas di gasogeno impiegato come combustibile nei forni per la produzione di cemento o di laterizi o in generale per l'alimentazione di impianti energetici esistenti sui quali viene eseguito tipicamente un intervento di retrofitting. Interessante è anche la possibilità di eseguire sui prodotti della gassificazione un'operazione di steam reforming con la quale, utilizzando vapore acqueo ad alta temperatura (820–870 °C) e un catalizzatore normalmente a base di nichel, si riesce a convertire il metano e gli altri idrocarburi presenti nel syngas in una miscela di idrogeno e monossido di carbonio impiegabile ad esempio per l'alimentazione di celle a combustibile a carbonati fusi (MCFC). Molto promettenti, nonostante le difficoltà di gestione, sono

Tabella 3.2 – Percentuali volumetriche di principali componenti del syngas suddivise in relazione al tipo di gassificazione effettuata

	Aria	Ossigeno	Vapore
CO	12 - 15	30 - 37	32 - 41
H ₂	9 - 10	30 - 34	24 - 26
CH ₄	2 - 4	4 - 6	12,4
C ₂ H ₄	0,2 - 1	0,7	2,5
CO ₂	14 - 17	25 - 29	17 - 19
N ₂	56 - 59	2 - 5	2,5
PCI (MJ/Nm ³)	4 - 5	10	12 - 13
Resa gas (Nm ³ /kg legno secco)	2 - 3	1,3 - 1,5	-

poi le celle ad ossidi di zolfo (SOFC) le quali, essendo prive di catalizzatori date le alte temperature operative, possono essere alimentate direttamente con il gas di sintesi prodotto dalla gassificazione della biomassa senza la necessità di alcun processo di reforming.

Sebbene siano possibili, come visto finora, numerose applicazioni, l'utilizzazione del gas di gasogeno, quale vettore energetico, crea non poche difficoltà nelle fasi di immagazzinamento e trasporto soprattutto a causa del suo basso contenuto energetico per unità di volume. Tali inconvenienti tuttavia possono essere superati, trasformando il syngas in una serie di biocombustibili liquidi come ad esempio metanolo, DME e Fisher-Tropsch diesel. Per poter procedere a questa conversione però il gas di sintesi deve subire, dopo la fase di steam reforming, anche una reazione di shift che serve ad incrementare la concentrazione di idrogeno nella miscela precedentemente formata e a fissare il giusto rapporto tra H_2 e CO, che sarà differente in funzione del tipo di biocombustibile desiderato. La sintesi di questi prodotti, favorita dall'impiego di specifici catalizzatori, viene condotta all'interno di appositi reattori; i composti liquidi che qui si sviluppano subiscono poi processi di purificazione e distillazione che ne migliorano le qualità e ne rendono possibile l'utilizzo in sostituzione dei tradizionali derivati petroliferi. Come detto uno dei biocombustibile è l'alcool metilico o metanolo (CH_3OH), che può essere agevolmente utilizzato per l'azionamento dei motori a combustione interna in sostituzione alla tradizionale benzina. Questo prodotto, caratterizzato da un potere calorifico inferiore dell'ordine di 21 MJ/kg, ha caratteristiche molto simili all'etanolo tanto che presenta gli stessi pregi (alto

potere antidetonante, ridotto livello di emissioni) e gli stessi difetti (difficoltà di accensione a freddo e necessità di intervenire con modifiche sui motori se impiegato puro o comunque miscelato alla benzina in percentuali maggiori al 15%). In prospettiva futura un'altra interessante applicazione del syngas ricavato da biomassa potrebbe essere la produzione di dimetiletere, un composto che attualmente è utilizzato esclusivamente nell'industria cosmetica o come propellente spray, ma che per le sue proprietà, estremamente simili a quelle del diesel, si candida ad esserne un valido sostituto. Il bio-DME infatti, a parte una più bassa densità energetica rispetto al gasolio e la necessità di stoccarlo in pressione (perché alla temperatura ambiente si trova in fase gassosa), garantisce, se impiegato nell'alimentazione degli autoveicoli, notevoli vantaggi tra cui: una minor produzione di NO_x , assenza di fuliggine allo scarico, minor rumore, mancanza di problemi nelle fasi di avviamento a freddo e ridotti effetti corrosivi sulle componenti del motore. Simile al gasolio di origine fossile, soprattutto in relazione al suo contenuto energetico, alla sua densità e alla sua viscosità, è anche il Fisher-Tropsch diesel. Questo prodotto, ottenuto impiegando nel reattore di sintesi catalizzatori di ferro o di cobalto, presenta addirittura delle caratteristiche migliori rispetto al diesel tradizionale. È infatti possibile realizzare una combustione più pulita con ridotte emissioni di particolato, NO_x e assenza di ossidi di zolfo; esso è poi dotato di un più alto numero di cetano e ciò si traduce di conseguenza in una migliore accendibilità che significa per il motore maggiori prestazioni e maggiore rendimento. A differenza poi del DME il Fisher-Tropsch diesel si presenta liquido nelle condizioni ambien-

te e questo rappresenta un indubbio vantaggio soprattutto per quanto riguarda lo stoccaggio; esso è inoltre completamente miscelabile con il gasolio tradizionale, pertanto può essere impiegato, senza la necessità di modifiche, sia negli attuali motori diesel che nelle infrastrutture e nelle reti di distribuzione già esistenti. Nonostante tutto ciò però, questo prodotto così come gli altri biocombustibili derivati dal gas di sintesi, presenta costi di produzione troppo alti rispetto ai tradizionali derivati petroliferi e pertanto la sua diffusione su scala commerciale appare oggi ancora lontana.

Il syngas, di cui si è parlato finora, rappresenta dunque l'obiettivo principale di un processo di gassificazione; bruciare infatti un combustibile gassoso anziché biomassa allo stato solido, è assolutamente conveniente anche se con questa conversione termochimica si perde parte dell'energia posseduta dalla materia organica originaria. La combustione di un gas, rispetto a quella di una sostanza solida, è infatti più facile da regolare e controllare, non porta alla formazione di ceneri e permette il raggiungimento di temperature più elevate dato il ridotto eccesso d'aria utilizzato e la presenza di preriscaldamenti più completi ed efficienti. Oltre al gas di sintesi, come sottoprodotti del processo di gassificazione si hanno degli scarti solidi costituiti principalmente da cenere, che può essere dispersa nel terreno senza conseguenze ambientali, e carbonella che, avendo un p.c.i. di circa 23 MJ/kg, può essere riutilizzata nello stesso impianto o rivenduta come combustibile.

Per quanto detto fin ora la gassificazione è dunque una tecnologia termochimica particolarmente interessante soprattutto alla luce dei possibili impieghi a cui può essere destinato il gas di sintesi.

L'elevato livello di impurità e sostanze nocive (polveri, catrami e metalli pesanti) presenti in questo prodotto rendono però non trascurabile il problema della messa in sicurezza degli impianti di conversione i quali possono subire, se non opportunamente protetti, significativi fenomeni di corrosione. I processi di gassificazione richiedono poi una caratterizzazione della biomassa estremamente precisa in termini di qualità, pezzatura e contenuto di umidità: ciò comporta costi di preparazione del combustibile non indifferenti che contribuiscono a rallentare il lancio di questa tecnologia su scala industriale che rimane invece allo stato attuale solo in fase dimostrativa. Interessanti sono anche le prospettive di impiego del pellet come alimentazione, mentre si stanno conducendo ricerche su metodi per gassificare altri combustibili a base di biomassa come ad esempio la frazione organica dei rifiuti solidi urbani. Per accelerare il processo di diffusione dei sistemi di gassificazione, ricerca e sviluppo operano oggi nel tentativo di migliorare la flessibilità di questi impianti rispetto alle caratteristiche del materiale di alimentazione, allo scopo di ridurre così i costi di gestione. Si cerca inoltre di perfezionare i trattamenti per la riduzione delle impurità, di studiare accorgimenti tecnici per attuare la cogenerazione e aumentare in generale l'affidabilità dell'intero processo di conversione. Si passano ora in rassegna le diverse tecnologie di gassificazione che si differenziano principalmente per il modo con cui la biomassa viene messa a contatto con l'agente gassificante; è pertanto possibile distinguere due principali classi di reattori: a letto fisso (updraft e downdraft) e a letto fluido. Il 75% dei gassificatori esistenti in commer-

cio 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

Questi rappresentano la tecnologia più antica e collaudata per eseguire il processo di gassificazione, essi sono costituiti tipicamente da una griglia posta nella parte bassa che sostiene la biomassa e consente contemporaneamente il passaggio dell'aria e lo scarico delle ceneri. Tali reattori sono caratterizzati da temperature di esercizio indicativamente comprese tra gli 800 e i 1.400 °C, basse velocità di reazione e taglie generalmente inferiori ai 10 MW. La biomassa può avere una pezzatura anche abbastanza grossolana (sono ad esempio impiegabili potature di alberi, pellet o stocchi di mais); purché in fase di alimentazione si abbia comunque una granulometria

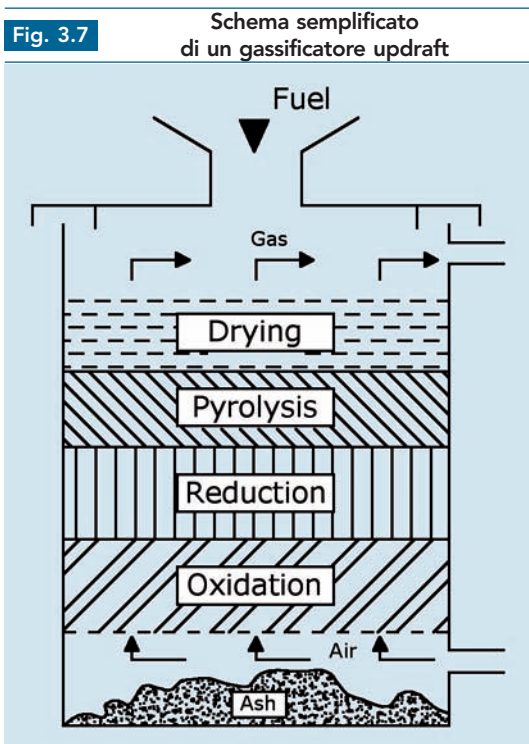
uniforme e con un basso contenuto di particelle fini, così da evitare intasamenti del letto e garantire un sufficiente "spazio vuoto" per il passaggio dei gas attraverso la griglia. A seconda della direzione assunta dal flusso d'aria all'interno del reattore, i gassificatori a letto fisso si possono ulteriormente dividere in gassificatori downdraft, updraft e crossflow.

Gassificatori updraft o controcorrente

In questo tipo di gassificatore, costituito da un cilindro in acciaio rivestito internamente con materiale refrattario, la biomassa viene introdotta dall'alto mentre l'aria, ovvero l'agente gassificante, è immessa alla base del reattore al di sotto della griglia di sostegno. Immediatamente al di sopra di quest'ultima, la biomassa carbonizzata, cioè la porzione solida rimanente dopo il rilascio delle sostanze volatili, subisce un processo di ossidazione parziale in cui si raggiungono, come detto, temperature anche superiori ai 1.000 °C. Questa fase dà luogo sia alla formazione di ceneri, che precipitano attraverso la griglia e si depositano sul fondo, sia alla produzione di gas caldi che tendono a spostarsi verso l'alto trasferendo così il calore nella zona dove si realizza il processo di riduzione con la formazione dei principali costituenti del syngas. Salendo ancora all'interno del gassificatore è possibile individuare poi la sezione pirolitica, dove vengono rilasciati i componenti volatili, e quella in cui la biomassa viene disidratata per effetto dell'energia termica fornita dal gas di sintesi che viene raffreddato fino a 200–300 °C prima di uscire dalla parte alta del reattore.

I vantaggi principali di questo tipo di gassificatore sono:

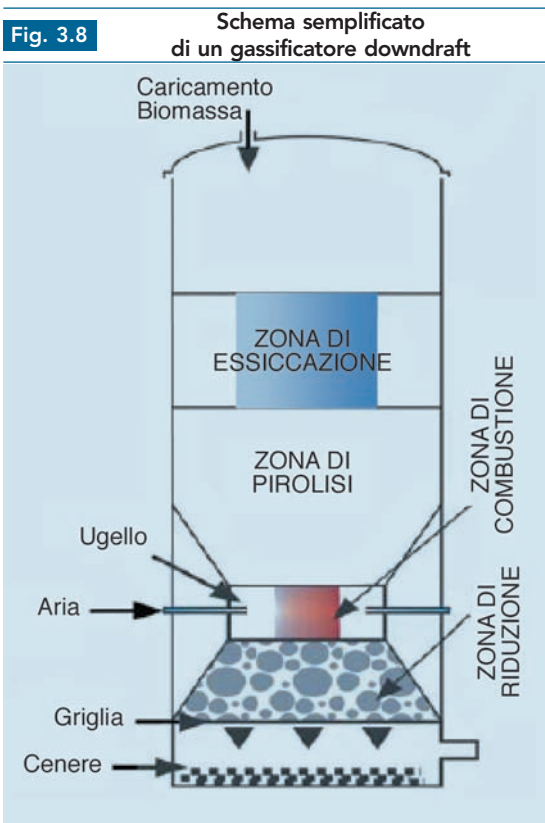
- la semplicità costruttiva e di funzionamento,



- l'elevata capacità di combustione della porzione carbonizzata, il cui residuo finale nelle ceneri è minimo,
- l'ottimo scambio termico interno tra le correnti opposte di biomassa e di syngas che comporta basse temperature di uscita dello stesso e quindi un'alta efficienza termica.

Il difetto maggiore è invece quello connesso all'elevato contenuto di ceneri sinterizzate e soprattutto di catrame all'interno del gas prodotto. I tar in particolare, che si formano principalmente durante la fase di pirolisi, sono la causa di molti problemi negli impianti alimentati con gas di gasogeno, in quanto essi tendono a condensare facilmente provocando così frequenti intasamenti. Questo inconveniente in

realtà è meno rilevante quando il syngas è impiegato nell'alimentazione di normali caldaie; in questo caso infatti l'elevata concentrazione di catrami e idrocarburi può addirittura rappresentare un vantaggio dato l'incremento che subisce, per la loro presenza, il potere calorifico inferiore del combustibile. In tutti gli altri casi di utilizzo, specialmente quando si ha a che fare con turbine, è sempre necessario eseguire un processo di pulizia particolarmente spinto che come detto viene attuato mediante cicloni, scrubbers o filtri a maniche in acciaio sinterizzato. Nei gassificatori updraft, a causa del minor rischio di intasamento della griglia, i requisiti per la granulometria della biomassa di alimentazione sono meno severi che nelle altre tipologie a letto fisso; i reattori in controcorrente sono poi già presenti in commercio con taglie che vanno generalmente da 1 a 10 MW e portate massime di circa 4 t/h di materia organica gassificata.



Fonte: CAEMA s.r.l.

Gassificatori downdraft o equicorrente

A differenza di quanto visto precedentemente, nei gassificatori downdraft la corrente del gas di sintesi è discendente e quindi concorde con quella del combustibile solido che viene caricato ancora una volta dall'alto. Questi reattori sono generalmente caratterizzati da una strizione che prende il nome di gola in corrispondenza della quale si realizza la fase di ossidazione: lo scopo è quello di creare una zona compatta a elevata temperatura dove far passare i gas di pirolisi e realizzare così il cracking dei tar.

L'aria necessaria a realizzare il processo di gassificazione, che si ricorda essere in difetto rispetto a quella stechiometrica, viene introdotta ad alta temperatura in corrispondenza proprio della sezione di

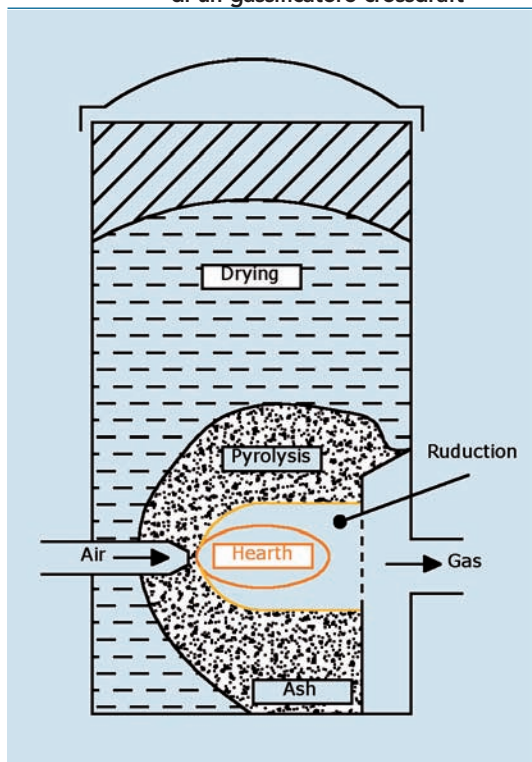
gola attraverso un tubo centrale di alimentazione o mediante ugelli posizionati sulle pareti. Nella zona di riduzione, che si colloca adesso tra la strizione e la griglia di sostegno della biomassa, avviene come sempre la formazione del syngas. Questo, grazie proprio alla particolare forma ad imbuto del reattore, presenta dunque un ridotto contenuto di catrami che è possibile stimare addirittura in 1/3 di quelli presenti nei gas derivanti da gassificatori updraft. La stessa cosa non si può dire invece per quel che riguarda la percentuale di particolato che risulta in questo caso molto più alta. Ciò è dovuto al fatto che il gas di gasogeno, essendo estratto alla base del reattore, passa attraverso la griglia di sostegno così come le ceneri e le polveri che quindi tendono a

rimanere in sospensione. Altri difetti sono: la maggiore probabilità di intasamenti legati proprio alla presenza della gola, ciò pertanto impone requisiti più severi circa la granulometria della biomassa che deve essere compresa tra 1 e 30 cm; la minore efficienza dell'essiccazione interna che comporta la necessità di adoperare biomassa con un ridotto tenore di umidità (inferiore al 20%); la temperatura relativamente alta del gas in uscita (900–1.000 °C) che si traduce in una minore efficienza termica.

Grazie al basso contenuto di tar nel gas di sintesi, questi gassificatori si prestano bene ad essere combinati con turbine a gas o motori a combustione interna soprattutto per la produzione in piccola scala di energia elettrica. Le taglie sono variabili da 10 kW a 1 MW, mentre allo stato attuale la portata massima per questo tipo di sistemi è dell'ordine di 500 kg/h di biomassa secca.

Fig. 3.9

Schema semplificato di un gassificatore crossdraft



Gassificatori crossdraft

In questa tipologia di gassificatori l'aria viene introdotta trasversalmente rispetto alla direzione assunta dalla biomassa che come al solito si muove all'interno del reattore dall'alto verso il basso. In prossimità del punto in cui viene immesso l'agente ossidante si forma una zona ad elevata temperatura dove si concentrano le reazioni di ossidazione e riduzione della sostanza organica. Il calore che qui si sviluppa favorisce poi nella parte sovrastante l'attivazione dei processi di pirolisi e di essiccazione, mentre come al solito le ceneri si accumulano nella parte bassa della colonna di gassificazione. Una volta prodotto, il syngas viene estratto dal lato opposto rispetto punto di ingresso del flusso d'aria, ma allo stesso livello; la sua temperatura in uscita è di circa 800–900 °C

pertanto, come già visto nel caso del gassificatore di tipo downdraft, i rendimenti energetici globali di conversione risultano piuttosto bassi. Per tale motivo e per la difficoltà di convertire gli idrocarburi complessi, che tendono a rimanere nel gas sotto forma di tar, questa tecnologia di conversione è di fatto poco considerata.

Gassificatori a letto fluido

I gassificatori a letto fluido, ampiamente utilizzati in passato per la gassificazione del carbone, sono diventati recentemente oggetto di studio, sviluppo e commercializzazione anche per quanto concerne la conversione della biomassa. Per letto fluido si intende in generale una sospensione di particelle solide in una corrente ascendente di gas, questa, raggiunta una determinata velocità, fa sì che il letto, composto da fase solida e da fase gassosa, si comporti come un vero e proprio liquido. Applicata alla gassificazione, la tecnologia del letto fluido garantisce un'ottima miscelazione tra l'agente gassificante e la biomassa che viene immessa dall'altro con una pezzatura generalmente inferiore ai 20 mm. Questo modo di operare fa sì che, rispetto ai sistemi a letto fisso, si abbia una più uniforme distribuzione di temperatura nella zona di gassificazione, un aumento della velocità di reazione e una maggiore resa complessiva in syngas. All'interno del reattore può essere poi presente anche del materiale inerte fluidizzante (sabbia silicea, allumina, ossidi refrattari), che ha il compito di migliorare la diffusione del calore tra le varie particelle di sostanza organica. Tra i maggiori problemi di questa tecnologia però bisogna ricordare la tendenza, per effetto delle alte temperature, alla sinte-

ritizzazione della sabbia silicea che tende poi a reagire con i metalli alcalini (Na e K) contenuti nella cenere. Quando pertanto si è in presenza di biomasse ad alto contenuto di cenere è bene sostituire questo agente fluidificante con allumina o composti metallici come ad esempio sabbia cromitica. Nelle applicazioni in cui è necessario invece l'uso di catalizzatori, quando cioè si deve favorire il processo di gassificazione o si intende modificare la composizione finale del gas di sintesi, i materiali inerti precedentemente menzionati possono essere sostituiti proprio dall'agente catalitico. Le temperature di esercizio, uniformi su tutto il reattore, sono mediamente pari a 800–900 °C, mentre le taglie sono sempre superiori a 1 MW. Il syngas ottenuto da questa categoria di gassificatori contiene comunque un significativo quantitativo di tar (superiore rispetto a quello presente nel gasogeno sviluppato dai gassificatori downdraft) nonché di particelle solide (char, cenere, sabbia) e pertanto le operazioni di pulizia sono ancora una volta necessarie. Con questi sistemi poi è possibile operare anche in maniera pressurizzata, il vantaggio è quello di aumentare la capacità produttiva, e ridurre, o eliminare del tutto, la compressione a monte della turbina; questo nel caso in cui ovviamente il syngas venga utilizzato per alimentare un impianto turbogas. Operando ad alta pressione poi diminuisce anche la tendenza a sinte-

- la difficoltà nell'alimentazione della biomassa nel reattore;
- i costi di investimento maggiori rispetto a quelli sostenuti per i gassificatori atmosferici, bilanciati comunque da

rendimenti più elevati (la convenienza economica si ha a partire da potenze di 30–50 MW_e);

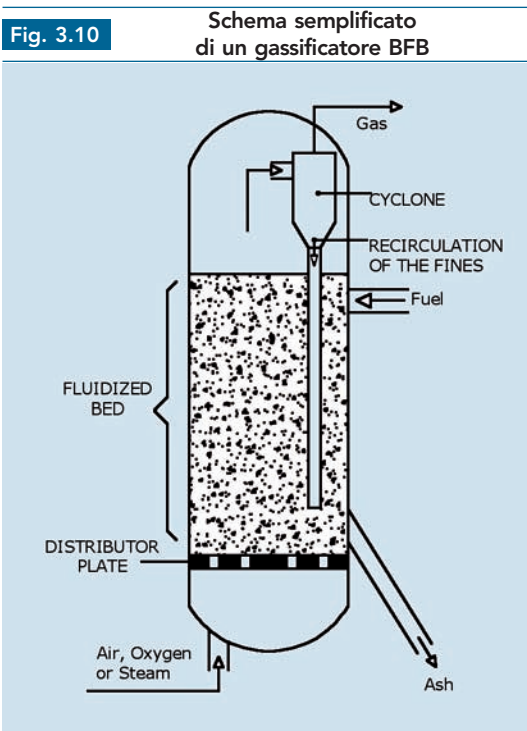
- i dispositivi di pulizia a caldo del gas, che sono costosi e ancora in fase di sviluppo.

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

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

In questi sistemi (figura 3.10), l'altezza del letto, ovvero la regione nella quale il flusso ascendente di gas mantiene in sospensione la fase solida, è tipicamente compresa tra 1 e 2 metri; queste ridotte dimensioni si giustificano con il fatto che l'agente gassificante (aria, ossigeno o vapore) viene immesso, alla base del reattore, ad una velocità non particolarmente elevata e comunque mai superiore ai 2 m/s. All'interno di questa zona fluidizzata, che si colloca nella parte bassa del gassificatore subito sopra la griglia, la biomassa, introdotta lateralmente, viene pirolizzata a formare componenti gassose e parti carbonizzate che sono al loro volta convertite in syngas mediante processi di cracking. Nel letto fluido si formano quindi delle vere e proprie bolle di gas che, una volta raggiunta la superficie, si liberano andandosi ad accumulare nella parte alta del reattore dove è presente una zona costituita unicamente da fase gassosa. La formazione di queste bolle, poi, crea nel letto una sorta di ebollizione che ha l'effetto di migliorare ulteriormente l'agitazione interna e la miscelazione tra le varie

fasi. Le temperature operative, che vengono regolate tramite il semplice controllo del rapporto aria/biomassa, sono comprese tipicamente tra i 700 e i 900 °C e ciò permette di ottenere un syngas con un basso contenuto di catrami, che generalmente non supera i 3 g/Nm³. Differente è invece il discorso relativo alle ceneri. Queste, oltre ad essere presenti nel gas di sintesi in quantità abbastanza rilevanti (superiori rispetto ai gassificatori a letto fisso), tendono, se la temperatura interna è troppo alta, a raggiungere la condizione di fusione, creando così un pericoloso intasamento del reattore. Per tale motivo si preferisce utilizzare come combustibili biomasse che presentano un elevato punto di fusione delle ceneri (> 1.000 °C); risultano quindi idonee quelle di natura legnosa, mentre sono sconsigliabili i prodotti erbacei che porterebbero, per evitare questo problema, a limitare la temperatura di esercizio del reattore. Il regime termico, che si cerca comunque di mantenere limitato per scongiurare il fenomeno della sinterizzazione, può considerarsi, grazie anche alla presenza di materiale inerte in sospensione nella colonna ascendente di gas, praticamente costante su tutto il letto fluido. Questa caratteristica, unitamente al buon grado di agitazione presente all'interno del reattore, fa sì che la velocità di reazione sia particolarmente elevata con conseguenti tempi di residenza della biomassa nel gassificatore estremamente brevi. I reattori BFB, nei quali è possibile introdurre anche opportuni agenti catalitici per favorire il cracking dei tar o modificare la composizione finale del syngas prodotto, sono generalmente alimentabili con diverse tipologie di biomassa anche di diverse dimensioni granulometriche. A questa estrema flessibilità in termini di pezzatura e composizione della



carica, si aggiungono la facilità di accensione e spegnimento del reattore e la sua elevata capacità volumetrica (10–15 t/h di biomassa secca); di contro va invece segnalata la presenza di carboni nelle ceneri e l'alta temperatura del gas prodotto, sintomi entrambi di una efficienza di conversione non particolarmente elevata.

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

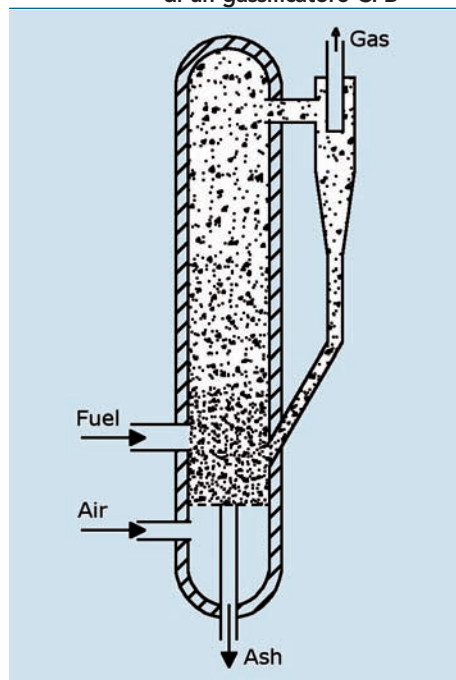
In questi impianti il reattore si sviluppa soprattutto in altezza arrivando sino a 8 metri; il diametro invece, a differenza dei sistemi a letto fluido, risulta abbastanza limitato mentre molto più elevata è la velocità di fluidizzazione che supera i 4 m/s. Tutto ciò fa sì che le particelle solide (char ed eventualmente materiale inerte) vengano trascinate in sospensione fino addirittura ad uscire dalla colonna principale del

reattore che pertanto è affiancato, nella parte sommitale, da un ciclone che separa dal gas tali componenti le quali, al loro volta, vengono reintrodotti, tramite un apposito condotto, alla base del gassificatore: da qui appunto il nome di letto circolante. Il combustibile viene inserito nella parte inferiore del corpo del gassificatore, ad una certa distanza al di sopra della griglia di distribuzione dell'aria. Una volta all'interno le particelle di biomassa cominciano a disidratarsi per poi subire in modo abbastanza rapido il processo di pirolisi. Da questo come noto si sviluppa sia una componente gassosa, che si muove verso la parte superiore del reattore, che una frazione carbonizzata che in parte rimane all'interno del letto e in parte viene trascinata dai gas e dagli altri elementi circolanti verso il filtro a ciclone. Dopo la separazione i char trattenuti vengono come visto rimandati nel gassificatore dove, per mezzo dell'aria (o dell'ossigeno) insufflata, avviene la loro parziale ossidazione e la successiva riduzione con formazione dei principali componenti del syngas. Nella colonna principale del reattore si possono allora distinguere, a partire dal basso, tre zone differenti:

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

In questa tipologia di gassificatori non esiste dunque, come accade nei sistemi BFB, il pelo libero del letto fluido o una zona costituita dalla sola fase gassosa; questa

Fig. 3.11 Schema semplificato di un gassificatore CFB



infatti, per tutta l'altezza del reattore, risulta miscelata alla componente solida che tende ad addensarsi maggiormente negli strati bassi solamente per effetto della gravità. I gassificatori a letto fluido circolante, specialmente quelli atmosferici, sono adatti ad una grande varietà di biomasse; le portate di alimentazione sono maggiori alle 15 t/h, mentre le taglie vanno dai pochi MW_t fino a circa 100 MW_t e in futuro si prevede la possibilità di realizzare sistemi CFB con potenze anche maggiori.

Gassificatori a letto trascinato (Entrained bed)

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

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

Gassificatori dual bed per gassificazione pirolitica

Come già accennato precedentemente, quando si parla di gassificazione pirolitica si ha a che fare con una tecnologia in cui la biomassa, anziché subire un processo di ossidazione parziale, viene convertita in syngas attuando su di essa operazione di riscaldamento indiretto. L'impianto, in questo caso, 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 viene ceduto dal materiale inerte (sabbia silicea), che è opportunamente riscaldato nel combustore e continuamente ricircolato all'interno dell'impianto, mentre la fluidizzazione viene realizzata mediante l'impiego di vapore. Il gas di sintesi prodotto poi, quando esce dal gassificatore, trascina con sé le particelle di sabbia e char; queste vengono allora separate da un ciclone e quindi portate al combustore, dove il char viene bruciato e la sabbia riscaldata. Quest'ultima una volta assorbita l'energia termica è trasportata dai gas combusti all'interno di un secondo ciclone che la

separa dagli esausti e la prepara per essere nuovamente introdotta nel gassificatore. Come è possibile intuire la complessità di questo processo rende pertanto difficile sia la realizzazione di impianti di grandi dimensioni che il mantenimento di bassi costi di investimento. Il vantaggio principale risiede allora nell'utilizzo di vapore come mezzo di fluidizzazione che permette di produrre un gas a medio potere calorifico (grazie all'elevato contenuto di metano) senza ricorrere all'impiego di costoso ossigeno. Gli inconvenienti invece sono: bassa conversione del carbonio in tar, in quanto parte del char viene utilizzato nella combustione, e elevato contenuto di catrami nel syngas, che comunque possono essere limitati aggiungendo opportuni catalizzatori a base di dolomite o nichel.

Dopo aver passato in rassegna le principali tecnologie di gassificazione oggi disponibili, si può ritenere che il sistema più interessante nelle applicazioni di larga scala è quello a letto fluido circolante, mentre per le piccole installazioni, la tipologia downdraft è quella che riscuote il maggior successo. I gassificatori dunque, che nel passato hanno ricoperto un ruolo importantissimo soprattutto nella conversione del carbone, stanno oggi vivendo una seconda giovinezza legata proprio alla possibilità di sfruttare energeticamente le biomasse che tra l'altro stanno fornendo un forte contributo allo sviluppo in chiave moderna di questa tecnologia.

[3.5]

La combustione

Tra i vari processi di conversione termochimica delle biomasse fin ora analizzati, quello più maturo da un punto di vista tec-

nologico, nonostante i continui perfezionamenti approntati, è senza ombra di dubbio il processo di combustione diretta. Chimicamente esso di fatto consiste in una reazione esotermica di ossidazione nel corso della quale l'energia chimica contenuta nel combustibile viene liberata sotto forma di calore. Una volta introdotta all'interno della camera di combustione, la trasformazione della sostanza organica di partenza avviene, secondo gli schemi classici, in quattro fasi distinte, ovvero riscaldamento ed essiccazione, pirolisi, gassificazione e infine combustione. A caratterizzare questi diversi momenti, come già ricordato, contribuiscono essenzialmente la temperatura raggiunta dalla biomassa e il quantitativo di aria comburente immesso nel combustore che viene generalmente distinto in due frazioni: aria primaria e aria secondaria. Facendo riferimento a delle condizioni di regime, nelle quali il processo di combustione si sostiene autonomamente, la prima fase che si verifica, ogni qual volta si introduce in caldaia della nuova sostanza organica, è la perdita da parte di quest'ultima dell'acqua in essa contenuta per effetto di una disidratazione che tende a manifestarsi fino a circa 200 °C. Con l'aumentare della temperatura, dalla biomassa cominciano a liberarsi alcune sostanze volatili (gas di pirolisi) le quali, grazie alla presenza dell'aria primaria, vengono in parte bruciate ricavando così il calore necessario sia per la fase di pirolisi appena descritta, che per la successiva gassificazione del char e dei composti catramosi precedentemente formati. I gas in tal modo sviluppati, costituiti essenzialmente da idrocarburi, CO, CH₄ e H₂, vengono poi miscelati alla frazione secondaria di aria comburente e quindi successivamente bruciati, realizzando così la fase di com-

bustione vera e propria che conclude il processo di conversione termochimica della biomassa.

Quanto detto fin ora viene sempre realizzato adottando un quantitativo di aria che, rispetto a quella teoricamente necessaria (quantità stechiometrica), può essere da una volta e mezza a due volte superiore. Tale eccesso di comburente ha come obiettivo quello di rendere l'ossidazione, che generalmente si verifica a temperature comprese tra 1.000 e 1.500 °C, il più possibile completa, evitando la presenza di residui incombusti e lasciando tra i prodotti finali solamente ceneri finissime la cui presenza si giustifica a causa delle piccole quantità minerali (potassio, calcio o silicio) generalmente contenute nel materiale di partenza. Bisogna fare attenzione comunque a non eccedere nel quantitativo di aria in quanto, valori troppo elevati porterebbero ad eccessive dispersioni di calore nei fumi con conseguente calo dell'efficienza globale del processo. Gli altri parametri caratteristici, che influenzano la completezza della combustione, sono poi: la temperatura di reazione, la pezzatura e l'omogeneizzazione del combustibile. Per quanto riguarda la temperatura, se da un lato valori sufficientemente alti garantiscono un buon grado di ossidazione della sostanza organica con ridotta produzione di incombusti, dall'altro un eccessivo regime termico tende a favorire lo sviluppo di composti inquinanti come ad esempio gli ossidi di azoto.

Appare chiaro dunque che per andare incontro a queste opposte esigenze, raggiungendo così le migliori prestazioni, è necessario affidarsi a sistemi appositamente controllati ed efficienti come sono oggi le moderne caldaie. Un altro parametro determinante è poi la pezzatura della biomassa: dimensioni piccole garan-

tiscono in generale una buona penetrazione del comburente tra le porzioni di combustibile le quali, al fine di aumentare la superficie di contatto, vengono generalmente mescolate mediante fluidizzazione o movimentazione del letto. Si può ritenere in generale che il processo di combustione venga attuato con buoni rendimenti se si utilizzano sostanze ricche di glucidi strutturati (cioè cellulosa e lignina) e con bassi contenuti di acqua (inferiori al 35%). Forti tenori di umidità comportano infatti alcuni inconvenienti come la diminuzione del potere calorifico e della temperatura nel combustore, nonché l'abbassamento del rendimento d'impianto e l'aumento del rischio di fenomeni di condensazione al camino. I prodotti tipicamente utilizzabili sono allora: legname in tutte le sue forme (compresi i residui legnosi di potatura di piante da frutto e di piante forestali), paglie di cereali, scarti delle industrie agrarie e residui derivanti dalla raccolta di legumi secchi, di piante oleaginose (ricino, catramo, ecc.) o di piante da fibra tessile (cotone, canapa, ecc.).

Come noto, durante il processo di combustione, questi prodotti vengono completamente bruciati generando CO₂, H₂O, piccole quantità di SO₂ e naturalmente ceneri il cui quantitativo dipende dal tipo di biomassa utilizzata. La percentuale tipica è nelle paglie compresa tra lo 0,3 e lo 0,6%, mentre nelle sostanze legnose questa varia generalmente tra il 4 e il 7%. Ognuna di queste diverse tipologie di biomassa influenza poi sia la scelta del tipo di caldaia, specialmente per quanto riguarda i dispositivi di alimentazione e regolazione, che il costo di produzione dell'energia (in termini sia economici che energetici) generalmente variabile in relazione alle spese sostenute per la costru-

zione dell'impianto, per la raccolta e il trasporto della materia prima nonché per i tipi di pretrattamenti da essa subiti. Quest'ultimi, effettuati per migliorare la maneggevolezza, l'immagazzinamento e per limitare i costi di trasporto e la necessità di ricorrere a impianti di combustione eccessivamente costosi, comprendono tipicamente la riduzione delle dimensioni, il compattamento, l'essiccazione e il lavaggio. Nonostante poi queste operazioni, soprattutto quando avvengono con consumo di energia, determinano spesso un incremento nel costo del kWh prodotto da biomassa, la loro presenza è comunque indispensabile al fine di migliorare l'efficienza degli impianti, ridurre le emissioni e sfruttare prodotti che altrimenti verrebbero considerati inadeguati.

Una volta attuato il processo di combustione, il calore sviluppato viene trasferito, mediante appositi scambiatori, a dei fluidi di processo (acqua, aria, olio diatermico, ecc.) successivamente utilizzati nelle varie applicazioni. Generalmente tale scambio termico viene realizzato sempre all'interno delle caldaie tranne che nei casi in cui si bruciano sostanze con elevato carico di ceneri, per le quali si preferisce invece condurre queste fasi (combustione e scambio termico) in due ambienti separati così da realizzarne un miglior controllo. La quantità di energia termica ricavabile è in linea generale una funzione del tipo di biomassa utilizzata, della quantità di ceneri e del contenuto di umidità pertanto, se si fa riferimento al potere calorifico inferiore, essa normalmente oscilla tra 10,5 e 19 MJ/kg. Le applicazioni possibili di questo processo di conversione termochimica, come si vedrà successivamente, riguardano sia la produzione di energia termica, realizzata in ambito civile e industriale con impianti di potenza variabile da

alcune decine di kW fino a qualche MW, che la produzione di energia elettrica (tipicamente in cogenerazione) per la quale vengono invece allestite installazioni con potenze più elevate.

Impianti per la produzione di elettricità

Si tratta di impianti che, ad eccezione del sistema di combustione, si presentano identici alle comuni centrali termoelettriche; il calore sviluppato viene infatti impiegato per produrre vapore surriscaldato che va poi ad espandersi all'interno di una tradizionale turbina generando così energia elettrica con un rendimento variabile dal 20 al 25%. Le taglie sono generalmente funzione sia della tipologia di combustore adottato che ovviamente della disponibilità di sostanza organica in loco e vanno da qualche MW_e a valori anche di 50 MW_e. Nonostante siano teoricamente possibili installazioni di potenza anche maggiore, allo stato attuale si preferisce però non superare questi limiti soprattutto per ragioni di carattere organizzativo e gestionale della filiera di approvvigionamento del legname o di altri tipi di biomasse. I sistemi di combustione più comuni sono fondamentalmente suddivisibili in 3 differenti categorie: a letto fisso a letto fluido e a polvere di biomassa.

Combustori a letto fisso

Questi rappresentano indubbiamente la tipologia impiantistica più diffusa nei processi di combustione in quanto godono di notevoli vantaggi in termini di semplicità, economicità e affidabilità di funzionamento. Essi generalmente possono essere alimentati con biomasse di diversa natura e con diverso tenore di umidità, presentando rendimenti accettabili (70–80%) nonostante gli elevati eccessi d'aria richiesti. Il

comburente è suddiviso in due frazioni: l'aria primaria, che insufflata attraverso il combustibile favorisce le fasi di pirolisi e gassificazione, e l'aria secondaria, che iniettata nella zona sovrastante il letto determina la completa ossidazione dei gas precedentemente formati. Si può realizzare anche la cosiddetta combustione a stadi in cui le fasi precedenti sono condotte in due camere separate; nella prima avvengono i processi pirolitici e di gassificazione, mentre nella seconda si completa la conversione termochimica e realizza il trasferimento dell'energia al fluido. Quando si sceglie questa soluzione è necessario limitare, anche a scapito di un mixing aria/gas combusti non ottimale, la turbolenza nella camera primaria al fine di avere un letto di braci che si mantenga il più possibile stabile. La turbolenza viene invece ricercata nella camera secondaria dove spesso si creano appositamente dei vortici per migliorare il contatto tra biomassa e agente ossidante. I combustori a letto fisso comprendono essenzialmente: i *forni a griglia* e gli *underfeed stokers*.

Forni a griglia

L'elemento determinante di un forno di questo tipo è ovviamente la griglia, alla quale è affidato il compito di sostenere e far avanzare all'interno della camera di combustione la sostanza organica favorendone così l'essiccamento e la sua completa combustione. Questi sistemi vengono alimentati generalmente con biomasse solide, eterogenee sia nella forma che nella composizione ed eventualmente caratterizzate anche da un elevato contenuto di umidità e di ceneri. Si possono pertanto utilizzare combustibili costituiti dalla miscela di specie legnose diverse talvolta miste anche a residui agroindustriali come vinacce, graspi o potature. È

invece sconsigliabile l'impiego congiunto di legno e biomasse erbacee (ad esempio paglia di cereali) in quanto queste potrebbero causare problemi per effetto del loro differente comportamento in fase di combustione, del loro basso contenuto in umidità, e della bassa temperatura di fusione delle loro ceneri. Per massimizzare l'efficienza di conversione di questi sistemi è necessario ottimizzare la geometria e i dispositivi di controllo della griglia al fine di garantire una distribuzione omogenea sia del combustibile, la cui pezzatura non deve essere troppo piccola, che dell'aria primaria tipicamente introdotta dal basso. Avere infatti una distribuzione dell'agente ossidante non regolare o comunque non conforme alle necessità può determinare deformazioni della griglia, un più alto contenuto di ceneri disperse o in generale lo svolgimento di un processo di combustione non completo. Per tale motivo i sistemi a griglia hanno subito nel corso degli anni continui perfezionamenti come l'introduzione di sempre più sofisticati dispositivi di movimentazione, l'adozione di sensori ad infrarossi per il controllo dell'altezza delle braci o l'utilizzo di portate d'aria differenti a seconda dello stato di avanzamento del processo di conversione. Oltre al comburente introdotto da sotto la griglia, che assume normalmente quantità stechiometriche, per favorire il completamento della combustione si fa uso della così detta aria secondaria che viene invece insufflata al di sopra del letto di materiale organico. A seconda poi della direzione assunta dalla fiamma rispetto al percorso fatto dalla biomassa si possono avere (figura 3.12):

- *Sistemi con flusso in equicorrente* (fiamma nella stessa direzione del combustibile) che vengono invece impiegati quando si è in presenza di combu-

stibili secchi (residui di legno e paglia) oppure in impianti che usano aria comburente preriscaldata. Con questa metodologia si aumenta il tempo di residenza dei gas combusti sul letto e pertanto si favorisce la riduzione delle emissioni di NO_x grazie proprio al prolungato contatto dei gas con il combustibile carbonizzato. Questo può però favorire il trasporto delle ceneri volatili fuori dalla camera di combustione e dunque una attenta progettazione dei flussi d'aria nel forno si rende sempre necessaria per evitare questo tipo di inconveniente.

- **Sistemi con flusso incrociato** (il gas fuoriesce al centro della fornace) che di fatto rappresentano una via di mezzo tra le precedenti metodologie e sono tipicamente utilizzati in impianti con camera di combustione secondaria verticale. Il controllo della temperatura è generalmente effettuato o tramite il ricircolo dei gas combusti, dopo che questi sono stati ripuliti dalle *fly ash*, oppure mediante il raffreddamento con acqua delle pareti della camera di combustione. Mentre la prima soluzione assicura in linea di massima un miglior grado di regolazione, con la seconda, invece, si riesce ad evitare più efficacemente il

fenomeno della sinterizzazione delle ceneri sulle pareti, garantendo così un aumento della vita media del refrattario.

- **Sistemi con flusso in controcorrente** (fiamma in direzione opposta rispetto al combustibile) tipicamente adoperati quando si hanno combustibili a basso potere calorifico come corteccia umida, chips di legno o segatura. In questo caso i gas caldi passano sulla biomassa fresca e umida con la quale si realizza uno scambio termico convettivo che, aggiungendosi a quello di natura radiante (comunque dominante), favorisce sia il processo di essiccamento che l'allontanamento del vapore dal letto. Per evitare poi incombusti all'interno del boiler, che porterebbero tra l'altro ad un incremento del livello di emissioni, è necessario assicurare un buon mixing tra i gas combusti e l'aria secondaria introdotta.

La griglia è costituita da un insieme di elementi detti "barrotti" realizzati in una speciale lega di acciaio al nichel-cromo in grado di sopportare, grazie anche al sistema di raffreddamento ad acqua, temperature di esercizio fino anche a $1.100\text{ }^\circ\text{C}$. La forma di questi barrotti, nonché i meccanismi adottati per il loro movimento e i sistemi di avanzamento della biomassa caratterizzano le diverse tipologie di combustori che possono essere: "travelling grate", "a griglia fissa", "a griglia mobile" (inclinata o orizzontale), "a griglia vibrante", "cigar burners" e "a griglia rotante" (alimentata dal basso o a cono). In linea generale i forni a griglia, che arrivano a potenze di circa 20 MW_e , sono considerati tipicamente come sistemi tutto sommato semplici, economici, affidabili e dotati di una buona versatilità di funzionamento data la loro capacità di operare, tramite il controllo dell'aria primaria, anche al 25%

Fig. 3.12 Direzioni tipicamente assunte dai flussi d'aria all'interno di un combustore a griglia

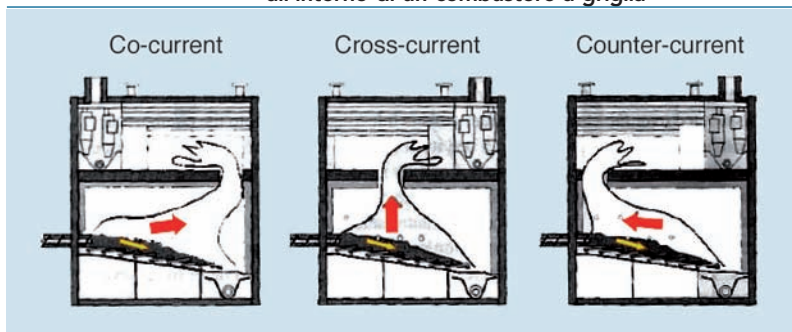


Figura 3.13
Sistema travelling grate



del carico. Si tratta dunque di una tecnologia che può considerarsi oggi sufficientemente matura nonostante i continui miglioramenti apportati, tra cui l'impiego di nuovi materiali, l'ottimizzazione della griglia o i perfezionamenti fluidodinamici. Se in passato infatti si lavorava con un elevato eccesso d'aria in modo da mantenere la temperatura dei fumi sotto i 700 °C, oggi, grazie ai progressi compiuti, si tendono a raggiungere anche i 1.200–1.300 °C. Questo può essere realizzato se si effettua un opportuno pretrattamento della biomassa, al fine di aumentarne il p.c.i., se si riduce l'inclinazione e la lunghezza della griglia, se si adotta un efficace sistema di raffreddamento e se si limita l'eccesso d'aria utilizzato.

Nei *combustori travelling grate* (figure 3.13–3.15) la sostanza organica da sottoporre al processo di combustione viene disposta su una griglia trascinata da un meccanismo a rulli, simile a quello usato nell'azionamento delle scale mobili, il cui movimento è realizzato tramite dispositivi meccanici o idraulici.

Una particolarità di questi sistemi è la possibilità di regolare la velocità di avanzamento della griglia (e quindi i tempi di residenza) secondo le esigenze richieste dal tipo di biomassa utilizzata al fine di realizzarne naturalmente la completa combustione. Sfruttando poi questo movimento a cingolo si riesce a realizzare sia un facile smaltimento della cenere, che viene riversata in modo automatico all'in-

Fig. 3.14 Particolare della griglia e del meccanismo a rulli

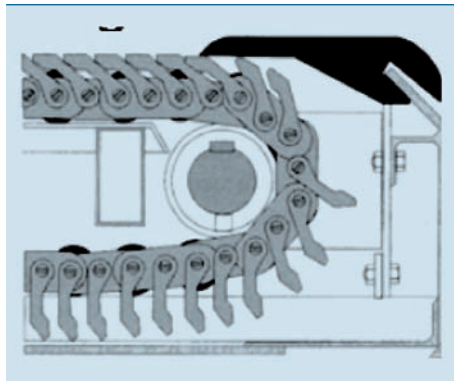
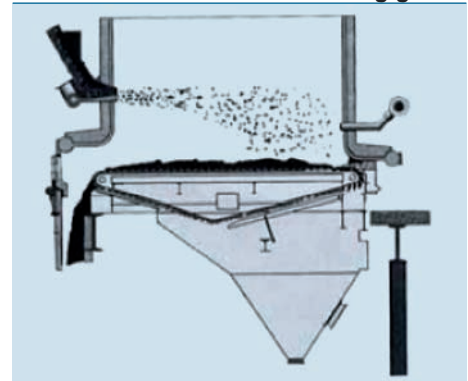


Fig. 3.15 Rappresentazione schematica di un combustore travelling grate

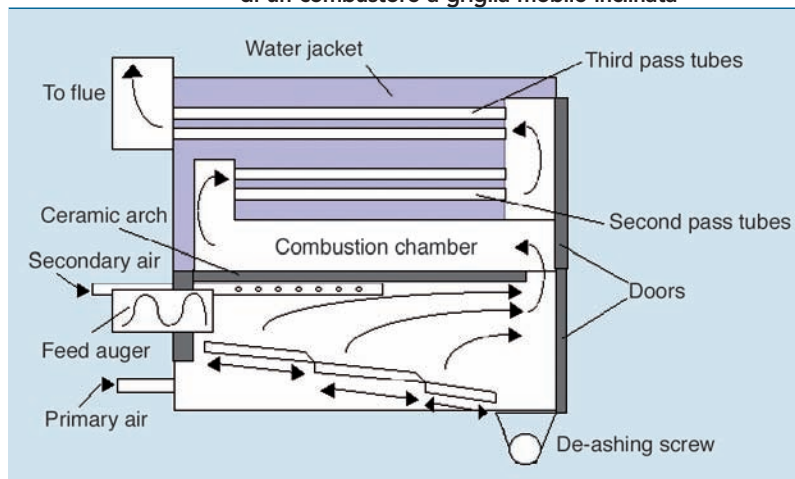


terno di una apposita cavità, sia un'efficace raffreddamento della griglia che avviene, quando questa non è rivolta verso la camera di combustione, utilizzando il flusso di aria primaria proveniente dal basso. Per quanto riguarda poi il sistema di l'alimentazione del combustibile, questo può essere o a vite (*screw conveyor*) od a spruzzo (*spreader-stoker*). Quest'ultimo in particolare è molto apprezzato soprattutto quando si utilizzano biomasse non omogenee le quali, essendo introdotte da un'altezza variabile da 1 a 4 metri sopra il piano della griglia, permettono di evitare disuniformità nello spessore e nella composizione del letto di sostanza organica. Tra i principali vantaggi si hanno: la possibilità di condurre in modo uniforme il processo di combustione, ridotte emissioni di particolato e facilità nelle operazioni di manutenzione. Rispetto a sistemi a griglia mobile, che verranno descritti successivamente, la tecnologia *travelling grate* presenta però alcuni inconvenienti tra cui: tempi di combustione più lunghi e un maggior fabbisogno di aria primaria. I sistemi a *griglia fissa* rappresentano la

più semplice tipologia di combustori utilizzabili per le applicazioni di valorizzazione energetica delle biomasse, essi tra l'altro sono i primi ad essere stati adottati presso gli impianti di incenerimento dei rifiuti solidi urbani. La caratteristica peculiare è la presenza di un unico piano grigliato fortemente inclinato dove la sostanza organica, che viene introdotta dall'alto, mano a mano che perde consistenza per effetto della combustione avanza fino a cadere in un apposito bacino di raccolta delle scorie collocato nella parte bassa. La griglia, oltre alla funzione di sostegno della biomassa permette poi sia il passaggio dell'aria primaria attraverso il letto che la fuoriuscita delle ceneri più fini. Oggi per la verità questa soluzione trova un ridottissimo impiego (limitato tra l'altro agli impianti di piccola potenza), a causa soprattutto delle difficoltà che si incontrano durante le fasi di trasporto e distribuzione del combustibile all'interno della camera di combustione.

I combustori a *griglia mobile* (*moving grate furnaces*, figura 3.16), nonostante il costo elevato, risultano essere oggi quelli maggiormente utilizzati tra tutti i sistemi a letto fisso grazie soprattutto alla loro estrema versatilità di funzionamento. Tra questi la tipologia più diffusa è sicuramente quella con griglia inclinata nella quale la pendenza è generalmente compresa tra il 15 e il 35%. Su di essa, una volta riversato il combustibile mediante dispositivi a vite o semplici tramogge, è possibile distinguere più zone in ciascuna delle quali si localizza una fase specifica del processo di conversione termochimica che come noto prevede: essiccazione, pirolisi/gassificazione e infine combustione. Queste griglie sono costituite da file di barrotti mobili alternate con file di barrotti fissi; i primi, azionati da attuatori elettrici

Fig. 3.16 Rappresentazione schematica di un combustore a griglia mobile inclinata



ci o idraulici, si sovrappongono ai secondi con un movimento avanti-indietro alternato la cui corsa ha frequenza e lunghezza regolabili. Quest'ultimo aspetto rappresenta di fatto un grande punto di forza di questa tecnologia: regolando infatti la velocità della griglia, la quantità di combustibile introdotto e l'aria fornita è possibile bruciare una grande varietà di biomasse con caratteristiche anche estremamente diverse.

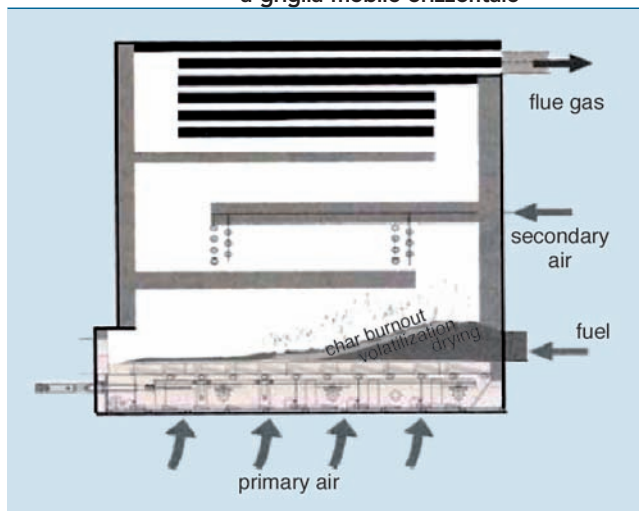
Generalmente poi le griglie a movimento alternato sono suddivise in tre o quattro sezioni che si alternano lasciando tra loro un piccolo salto con lo scopo di incrementare ulteriormente il mescolamento della sostanza organica. Ogni singola sezione viene inoltre interessata dalla insufflazione dell'aria comburente e ha una propria tramoggia per la raccolta delle ceneri. In alternativa a quelle appena descritte si hanno poi le griglie a movimento alternato con spinta inversa, così definite in quanto presentano un movimento dal basso verso l'alto opposto rispetto a quello della biomassa impiegata che invece tende a scendere per effetto della gravità. Indipendentemente comunque dalle modalità di movimentazione della griglia, questa tipologia di combustori sono spesso dotati di una volta di materiale ceramico che consente di riflettere in modo particolarmente efficace il calore sviluppato nel letto, favorendo così l'essiccamento e la conseguente accensione della sostanza organica anche quando questa presenta un elevato tenore di umidità. Le griglie mobili inclinate infatti sono popolari nel nord Europa e principalmente in Scandinavia proprio per la loro capacità di convertire biomassa anche non essiccata; quando invece si ha a che fare con un combustibile a ridotto contenuto di umidità ad esse si preferisco-

no maggiormente gli underfeed stokers che, come si vedrà successivamente, rappresentano la soluzione più economica. A seconda delle modalità con cui si realizza il raffreddamento i combustori a griglia mobile si distinguono in:

- *air-cooled moving grate furnaces*, nei quali si utilizza l'aria primaria per raffreddare la griglia (adatta per corteccia umida, segatura, chips di legno);
- *water-cooled moving grate furnaces*, in cui invece si fa uso di acqua (adatta per combustibili secchi, con bassa temperatura di fusione delle ceneri).

Per quanto detto fin ora dunque i forni a griglia mobile inclinata presentano parecchi aspetti positivi tra cui: la possibilità di utilizzare combustibili molto diversi in termini di umidità e pezzatura, la possibilità rimescolarli in modo assolutamente efficace, la facilità di rimozione delle ceneri, che grazie al movimento non si accumulano sulla griglia e quindi non portano a fenomeni di sinterizzazione e bloccaggio, e infine l'opportunità di avere alte efficienze di conversione visto l'effetto irraggiante prodotto dalla volta. Non mancano tuttavia gli inconvenienti connessi all'impiego di questi sistemi che risultano, data la struttura estremamente complessa e la presenza di elementi ingombranti, ancora particolarmente costosi. A differenza poi dei forni travelling grate la regolazione della velocità di movimento della griglia risulta più complicata inoltre, se questa è troppo alta, si rischia di avere: o un'elevata concentrazione di materiale incombusto nelle ceneri o una disuniformità nel letto di materiale organico con conseguente riduzione dell'efficienza di combustione. Un ulteriore svantaggio è poi rappresentato dall'elevata inerzia termica di questi sistemi che, per effetto del grande quantitativo di biomassa trattata e

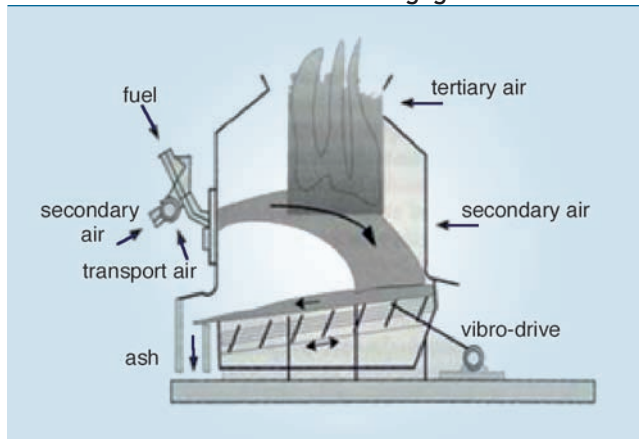
Fig. 3.17 Rappresentazione schematica di un combustore a griglia mobile orizzontale



dell'eventuale presenza di superfici in materiale ceramico, hanno di fatto una limitata capacità di rispondere rapidamente ai cambiamenti di carico richiesti.

Meno utilizzata è invece la soluzione con griglia a barre completamente orizzontali (figura 3.17) nonostante questa presenti alcuni vantaggi rispetto alla tecnologia precedente. Tra questi si ricordano: l'assenza di movimenti involontari del com-

Fig. 3.18 Rappresentazione schematica di un combustore a griglia vibrante



bustibile sulla griglia per effetto della gravità a cui fa seguito una più omogenea distribuzione della biomassa nel letto, la mancanza di punti caldi e quindi di fenomeni di sinterizzazione delle ceneri e infine la possibilità di avere combustori di dimensioni più contenute che è necessario però precaricare all'avvio evitando così che le particelle di combustibile cadano tra le barre della griglia prima di essere state completamente bruciate.

Il sistema a *griglia vibrante* (figura 3.18), utilizzato particolarmente negli Stati Uniti per bruciare soprattutto residui legnosi, è caratterizzato da una griglia composta da una parete inclinata di tubi che viene posizionata sopra delle molle. La biomassa, introdotta tramite spruzzatori, sistemi a vite o idraulici, durante la fase di combustione è soggetta a delle vibrazioni intermittenti generate da due o più motori eccentrici (*vibro-drive*) che facilitano il processo di mescolamento. Queste oscillazioni ad intervalli brevi evitano la formazione, in camera di combustione, di scorie di grosse dimensioni ed è per tale motivo che questa tipologia di forni viene principalmente utilizzata là dove si ha una sostanza organica che presenta problemi di sinterizzazione e formazione di grandi quantitativi di residui e agglomerati (si veda ad esempio la paglia o taluni scarti legnosi). I maggiori inconvenienti riguardano: l'elevata emissione di ceneri volatili per effetto delle vibrazioni della griglia e l'alta concentrazione di monossido di carbonio nei gas combusti, indice quest'ultimo di una combustione non completa che si spiega soprattutto a causa disturbi periodici indotti dalle oscillazioni sul letto di materiale combustibile.

I *cigar burners* (figura 3.19) sono stati sviluppati in Danimarca specificatamente per rispondere alle esigenze del settore agri-

colo; essi infatti consentono la combustione diretta di grosse balle di paglia e cereali le quali vengono introdotte in maniera continua per mezzo di un sistema a pistone idraulico. Già all'interno del tunnel di alimentazione comincia a realizzarsi il processo di gassificazione della biomassa che, una volta raggiunta la camera di combustione, si presenta di fatto quasi totalmente carbonizzata. A questo punto, in seguito all'introduzione dell'aria comburente, si ha la vera e propria fase di ossidazione del carbone prodotto da cui si liberano ceneri e incombusti che, depositandosi sulla griglia, vengono successivamente scaricati nella parte bassa del combustore. Estremamente importante in questi impianti è poi il controllo della temperatura che, in condizioni di funzionamento normale, non dovrebbe mai superare i 900 °C considerando proprio il basso punto di fusione che hanno le ceneri prodotte da biomasse come paglia e cereali. I sistemi di raffreddamento comunemente utilizzati prevedono allora l'utilizzo di acqua o il ricircolo degli stessi gas combustibili. Tra i principali inconvenienti si segnala soprattutto l'altra concentrazione, nei gas combustibili, di ceneri volatili e

vapori alcalini che possono portare, se non opportunamente contenuti, alla formazione di depositi o alla corrosione delle strutture di scambio termico. Infine si ricorda che è bene evitare sistemi di alimentazione semi-continui con introduzione in camera di combustione di balle intere ad intervalli regolari di tempo, in quanto in questo caso si tendono ad avere picchi nelle emissioni di monossido di carbonio durante il funzionamento del forno.

I forni a griglie rotanti alimentate dal basso (*underfeed rotating grates*, figura 3.20) sono una nuova tipologia di forni di origine finlandese caratterizzati dalla presenza di una griglia a forma di cono, nella quale l'alternanza di sezioni che ruotano in senso orario e antiorario determina il mescolamento della biomassa e il suo avanzamento verso la zona di raccolta delle ceneri. L'aria primaria viene insufflata dal basso nella camera di combustione primaria (subito sopra la griglia) favorendo così lo sviluppo di gas combustibili che vengono quindi bruciati in una seconda camera che può essere verticale o orizzontale. La prima tipologia, adatta alla produzione sia di acqua calda che di vapore, è utilizzata in impianti con potenze tra 1 e 10 MW_t, la seconda invece si ritrova tipicamente in installazioni più piccole, tra 1 e 4 MW_t, utilizzate solamente la produzione di acqua calda. Il combustibile viene introdotto dal basso tramite dispositivi a vite (similmente a quanto si vedrà per i forni *underfeed stokers*) pertanto la sua pezzatura deve mantenersi inferiore ai 50 mm. Anche questi sistemi hanno la peculiarità di accettare biomasse ad alto contenuto di umidità come cortecce, segatura o chips di legno appena tagliati, ma addirittura possono bruciare persino prodotti legnosi misti a fanghi di origine biologica.

Fig. 3.19 Rappresentazione schematica di un cigar burner

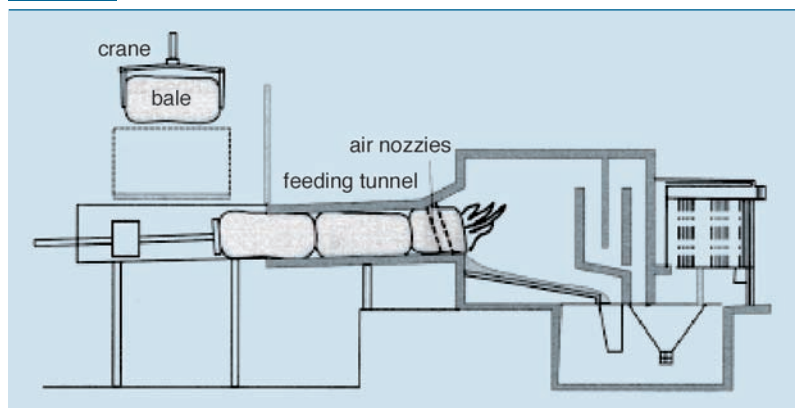
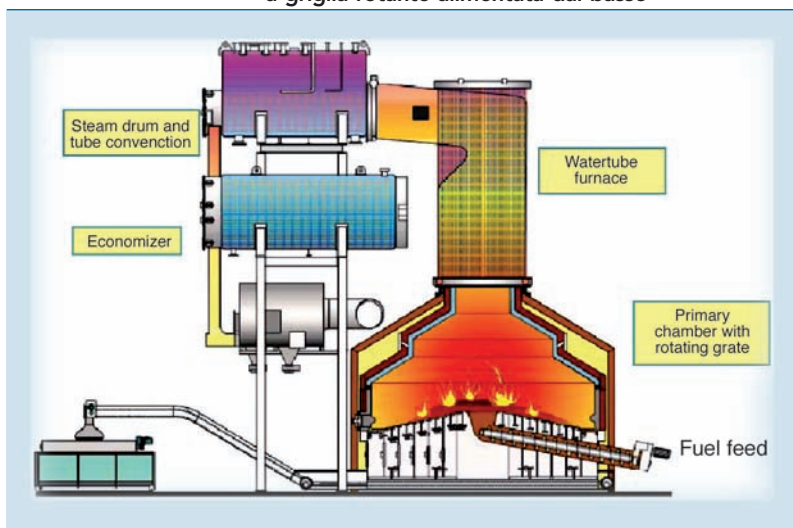


Fig. 3.20

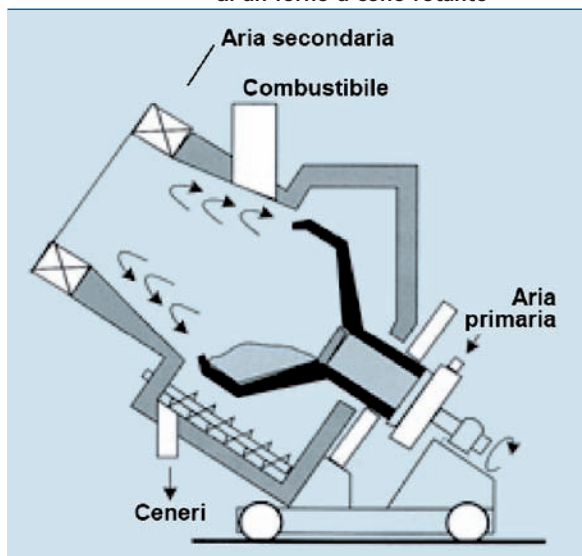
Rappresentazione schematica di un forno a griglia rotante alimentata dal basso



I forni a cono rotante (figura 3.21) sono una particolare tipologia di combustori, messi a punto in Germania, nei quali una griglia a forma di cono capovolto accoglie la sostanza organica da bruciare e, attra-

Fig. 3.21

Rappresentazione schematica di un forno a cono rotante



verso una lenta rotazione attorno ad un asse inclinato rispetto all'orizzontale, ne facilita il mescolamento. La biomassa, che viene caricata con continuità dall'alto, si accumula dunque all'interno della griglia conica che in questa configurazione si comporta come una sorta contenitore. Come visto anche per gli altri sistemi l'aria necessaria per realizzare il processo di combustione viene suddivisa in due frazioni: quella primaria viene insufflata attraverso la griglia, solamente nella parte coperta dal combustibile, mentre quella secondaria è iniettata tangenzialmente e ad elevata velocità nella sezione cilindrica del forno. Tra gli aspetti più interessanti di questa tipologia di combustori vi è sicuramente la possibilità di operare con un eccesso d'aria intorno a circa il 20-30% che rappresenta, per la tecnologia a letto fisso, un valore particolarmente basso e che di fatto dimostra la capacità di raggiungere elevati rendimenti di combustione. Altre caratteristiche positive sono poi il basso quantitativo di prodotti volatili presenti nei gas combusti (per effetto del flusso rotazionale indotto dall'aria secondaria) e la possibilità di trattare biomassa con caratteristiche estremamente variabili in termini di dimensioni, contenuto di umidità e temperatura di fusione delle ceneri. Come inconveniente spicca invece la necessità di disporre di un bruciatore ausiliario per realizzare l'avvio del forno il quale tra l'altro deve periodicamente fermarsi affinché possa essere effettuata la rimozione dei grossi agglomerati di cenere che man mano vanno accumulandosi al centro della griglia.

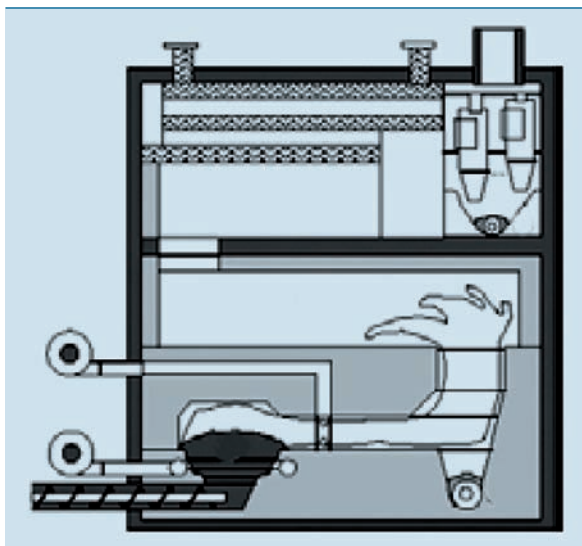
Underfeed stokers

Oltre ai forni a griglia, di cui si è data un'ampia descrizione delle principali soluzioni tecnologiche attualmente presenti

sul mercato, nella famiglia dei combustori a letto fisso si possono inserire anche i così detti *underfeed stokers*. Questi rappresentano indubbiamente la tecnologia più economica e affidabile per le applicazioni di taglia medio-piccola (< 6 MW) soprattutto quando si ha a che fare con sostanza organiche caratterizzate da un basso tenore di umidità. La peculiarità che li distingue è la modalità con cui la biomassa viene introdotta all'interno del sistema. Il dispositivo di alimentazione prevede infatti la presenza di una coclea che conduce il combustibile alla base di una cavità a forma piramidale dalla quale, per effetto della spinta indotta dalla vite, questo risale fino a fuoriuscire nella prima camera di combustione propagandosi nelle varie direzioni. In questa zona viene introdotta, come di consueto, solamente l'aria primaria la quale, passando attraverso il combustibile, ha il compito di attivare il processo di ossidazione che verrà poi completato nella parte alta della camera di combustione in seguito all'immissione

della seconda frazione di comburente. Considerato il meccanismo di alimentazione, le biomasse utilizzabili (chips, pellet, segatura) è bene che abbiano un basso contenuto di cenere e una pezzatura generalmente inferiore ai 50 mm così da scongiurare pericoli di intasamenti e blocchi. Gli *underfeed stokers*, che sono generalmente integrati alla caldaia, possono, per alcune applicazioni, essere costruiti anche separatamente e adattati a diverse tipologie di impianti. Il vantaggio principale che si può riscontrare nell'utilizzo di questi sistemi risiede indubbiamente nella possibilità di lavorare in maniera ottimale ai carichi parziali vista la facilità di gestione e controllo del dispositivo di alimentazione del combustibile. Un inconveniente non ancora risolto è invece quello che si manifesta per effetto della presenza di cenere sinterizzata: questa tende infatti a ricoprire la parte superiore del letto di sostanza organica e qualora tale strato venga lacerato dalla biomassa o dal passaggio dell'aria primaria, il processo di combustione tende a diventare rapidamente instabile.

Fig. 3.22 Rappresentazione schematica di un *underfeed stoker*



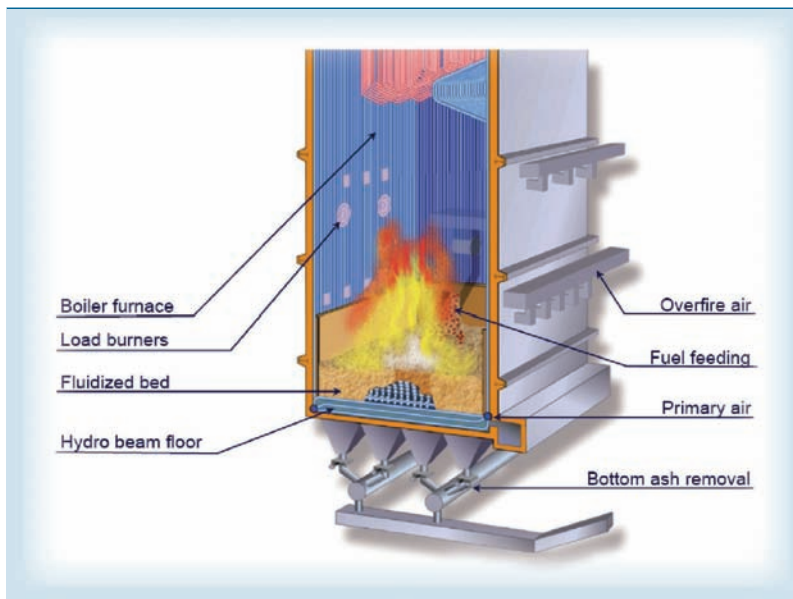
Combustori a letto fluido

Si tratta di sistemi basati sulla stessa tecnologia già vista nell'abito dei processi di pirolisi e gassificazione. Questi combustori sono infatti costituiti essenzialmente da una camera cilindrica verticale (*riser*), all'interno della quale il combustibile da biomasse brucia in un letto di materiale inerte (normalmente costituito da sabbia) mantenuto in sospensione per mezzo di un flusso d'aria comburente introdotto dal basso. In alternativa la sabbia può essere anche sostituita con sostanze come calcare o dolomite che hanno la capacità di abbattere gli inquinanti acidi, eventualmente presenti nella materia organica

trattata, ed evitare la fusione delle ceneri nelle condizioni operative del combustore. La predisposizione di un letto fluido permette in generale di avere un maggiore controllo del processo di combustione grazie soprattutto alla più equilibrata e uniforme distribuzione del calore che quindi consente, a parità di efficienza, di avere una minore temperatura di esercizio rispetto ai tradizionali impianti al letto fisso. Questa, che normalmente oscilla tra gli 800 e i 900 °C in relazione anche al tipo di biomassa bruciata, deve comunque mantenersi relativamente bassa (solitamente 100–200 °C al di sotto di quella delle caldaie a letto fisso) per evitare fenomeni di sinterizzazione delle ceneri. Per realizzare il raffreddamento controllato di questi sistemi si utilizzano allora: scambiatori di calore interni, dispositivi per il ricircolo dei gas combusti o iniezioni di acqua. L'elevato grado di miscelamento raggiunto tra i tre principali attori del processo, ovvero combustibile, comburente e inerte, consente poi di ottenere un'efficace trasmissione del calore che viene realizzata sostanzialmente per convezione e solo in modo trascurabile per irraggiamento. Queste sono dunque condizioni ottimali per raggiungere una completa combustione con una bassa richiesta di aria in eccesso; che tra l'altro, non superando generalmente il 40%, permette inoltre di minimizzare sia le emissioni di NO_x che il volume di gas effluente attraverso la canna fumaria. Il riscaldamento del combustibile avviene quasi sempre rapidamente con un'ossidazione piena in tutti i punti del reattore; e questo soprattutto grazie alla turbolenza e alla miscelazione trasversale con le quali si riduce al minimo la formazione, all'interno della caldaia, delle cosiddette zone fredde che possono costituire un ostacolo al regolare

avanzamento del fronte di fiamma. Grazie all'ottimo miscelamento poi, la flessibilità di questi sistemi nell'utilizzo di miscele di diversi combustibili o di combustibili con diverso potere calorifico è sicuramente elevata. Più attenzione bisogna invece prestare alle dimensioni della biomassa utilizzata e alle impurità in essa contenute: nella maggior parte dei casi sono infatti necessari dei pretrattamenti per attuare la pulizia della sostanza organica e per ridurre la sua pezzatura a misure omogenee e idonee per la fluidizzazione del letto.

Nonostante però i progressi compiuti da un punto di vista tecnologico, i combustori a letto fluido manifestano ancora alcune problematiche di utilizzo. Tra queste ad esempio si segnala l'elevato contenuto di polveri nei gas, che rende quasi sempre necessaria la presenza di precipitatori e di sistemi di pulizia del boiler, in grado di limitare i fenomeni di agglomerazione di ceneri basso fondenti e quindi scongiurare il pericolo di defluidificazione. Al fine di facilitare lo scarico delle parti incombuste sono allora stati messi a punto reattori a letto fluido rotante nei quali, grazie ad una differenziazione nella velocità di alimentazione dell'aria lungo la piastra inferiore di distribuzione, si creano moti rotatori che favoriscono l'allontanamento delle scorie. Un altro inconveniente è poi la perdita frequente, con le ceneri e i fumi, di una parte del materiale inerte costituente il letto fluido che deve pertanto essere periodicamente reintegrato. Atri svantaggi sono: il mal funzionamento ai carichi parziale e gli elevati tempi di avvio che possono raggiungere anche le 15 ore, utilizzando bruciatori ad olio o a gas. Come noto in questo ambito si distinguono due diverse tipologie di combustori: quelli a letto fluido bollente (BFB –

Fig. 3.23 Combustore a letto fluido bollente – BFB

Fonte: AKER KVAERNER

Fig. 3.24 Combustore a letto fluido ricircolante – CFB

Fonte: AKER KVAERNER

Bubbling Fluidised Bed) e quelli al letto ricircolante (CFC – Circulating Fluidised Bed). Trattandosi di due tecnologie già descritte nel contesto dei processi di gassificazione, qui si dà solo un breve cenno delle principali peculiarità. I combustori BFB sono caratterizzati da un letto fluidizzato costituito da granelli di sabbia silicea di circa 1 mm, che tende a mantenersi nella parte inferiore dell'impianto per effetto delle basse velocità di fluidizzazione (1–2,5 m/s). A differenza dei BFB a carbone, il combustibile, che deve presentare dimensioni inferiori agli 80 mm, non è introdotto "sopra" il letto, ma "dentro" il letto stesso e questo a causa della maggiore reattività posseduta dalla biomassa rispetto al carbone. I combustori CFC sono invece caratterizzati da una maggiore velocità di fluidizzazione (5–10 m/s) che consente, rispetto alla tipologia precedente, di aumentare il mescolamento trasversale della sostanza organica nel reattore, producendo così una migliore turbolenza, un più efficace scambio termico e una più uniforme distribuzione di temperatura nel letto. La conclusione è dunque una combustione più stabile ed efficiente che viene condotta su una biomassa con minori dimensioni medie rispetto ai sistemi BFB (0,1–40 mm), e con un minore volume di gas combusti. La pezzatura più piccola del combustibile pone però alcuni inconvenienti tra cui: costi di pretrattamento maggiori e difficoltà nella fase di alimentazione, visti l'elevata velocità di fluidificazione e la bassa densità di tali prodotti. Maggiori sono in generale anche i costi di installazione, per effetto soprattutto delle dimensioni e della presenza di cicloni che hanno il compito di separare il materiale inerte (sabbia con granulometria variabile da 0,2–0,4 mm) dal flusso di gas in uscita. Nonostante ciò però i combustori

ri a letto fluido ricircolante, la cui taglia va generalmente dai 30 agli 80 MW, soffrono comunque un più elevato carico di sabbia nei fumi che sfugge in parte al separatore e che quindi deve essere reintegrato con una maggior frequenza rispetto ai BFB.

In conclusione si può ritenere che le caldaie a letto fluido, nonostante rappresentino una tecnologia indubbiamente sofisticata e dispendiosa, stanno oggi ricevendo sempre maggiori consensi per effetto soprattutto dei numerosi vantaggi che sono in grado di garantire. Si tratta tuttavia di sistemi che trovano spazio perlomeno in applicazioni di grande taglia (> 30 MW_e) mentre negli impianti più piccoli rimangono ancora economicamente più vantaggiosi i tradizionali combustori a letto fisso.

Combustori a polvere di biomassa

Questi sistemi vengono utilizzati per la combustione di biomasse polverulenti e leggere come ad esempio lolla di riso, segatura, polvere di legno o paglia tritata nelle quali le dimensioni delle singole particelle non supera i 20 mm e il tenore di umidità si mantiene al di sotto del 20%. Tali combustibili, le cui qualità devono essere estremamente omogenee, vengono iniettati pneumaticamente all'interno del forno in miscela con la corrente di aria primaria che li trasporta e li mantiene in sospensione. Il flusso, che viene immesso tangenzialmente, produce all'interno della camera di combustione cilindrica un moto vorticoso rotazionale che può, in alcune applicazioni, esser favorito anche dal ricircolo dei gas combusti provenienti dal camino. Per effetto di queste condizioni, ma soprattutto per le ridotte dimensioni delle particelle di combustibile, i processi di gassificazione e successiva com-

bustione del materiale carbonizzato si verificano rapidamente e in maniera quasi contemporanea. Appare dunque chiara la necessità di utilizzare efficaci sistemi di controllo del caricamento che possano garantire, vista la situazione, una rapida sostituzione della sostanza organica impiegata.

Considerando poi l'elevato grado di miscelamento raggiungibile, questi combustori richiedono spesso limitati eccessi di aria (tipicamente forniti con la frazione secondaria) e questo contribuisce ad avere alte efficienze di conversione nonché basse emissioni di ossidi di azoto. La fornace, che è generalmente soggetta ad elevati livelli di temperatura dovuti all'alta densità energetica della biomassa, viene tipicamente raffreddata con sistemi ad acqua. Questo però spesso non basta ad evitare il rapido deterioramento del materiale isolante che comunque tende a danneggiarsi sia causa dell'elevato stress termico, che per effetto dell'azione corrosiva esercitata dalle particelle di biomassa in moto vorticoso. Un'altra particolarità è poi la presenza di un bruciatore ausiliario che realizza la fase di start-up dell'impianto: tramite questo dispositivo cioè si provvede ad accendere la carica all'interno della camera di combustione finché la temperatura di quest'ultima non raggiunge valori tali da consentire il funzionamento autonomo del forno.

Criticità

Dopo aver analizzato i principali sistemi di combustione si può in definitiva ritenere che tali tecnologie sono oggi sufficientemente mature per garantire buone efficienze di conversione e nello stesso tempo una gestione ottimale delle ceneri e delle emissioni inquinanti prodotte. Nonostante comunque l'elevato grado di

avanzamento industriale, alcune condizioni rimangono determinanti per favorirne la piena diffusione di questi impianti; è necessario ad esempio garantire l'approvvigionamento della biomassa a lungo termine e a prezzi contenuti insieme naturalmente a limitati costi capitali e buoni ricavi dalla vendita dell'elettricità. La realizzazione di impianti per la produzione di energia elettrica dalla combustione di biomasse, infatti, è tanto più economicamente conveniente quanto maggiore è la disponibilità di questa risorsa in grandi quantità, localizzate geograficamente e uniformemente distribuite nel tempo. Queste condizioni si rendono necessarie a causa della bassa densità energetica della sostanza vegetale rispetto ai comuni combustibili di origine fossile; basti pensare infatti che per produrre 1 kWh di energia elettrica sono mediamente necessari 1 kg materiale legnoso contro solamente gli 0,3 kg di gasolio. Ricerca e sviluppo in questo campo sono principalmente impegnate sia nel tentativo di migliorare la flessibilità verso l'impiego di biomassa diversificata, che nell'individuazione delle migliori modalità per favorire con più efficacia le applicazioni cogenerative.

Impianti per la produzione di energia termica

La produzione di calore per mezzo di una risorsa come la biomassa può considerarsi assolutamente efficace sia nel settore prettamente domestico e civile, per il riscaldamento degli ambienti o per la produzione di acqua calda sanitaria, che in qualunque altro contesto in cui si presenti un'utenza termica a bassa temperatura (serre, piscine, ecc.). In questi casi, infatti, essendo i combustibili sostituiti generalmente metano o gasolio, che risultano

pesantemente svantaggiati dall'aggravio delle tasse, il valore della biomassa diventa più che mai rilevante, e non solo da un punto di vista sociale e ambientale. La produzione di energia termica può realizzarsi mediante l'impiego di tre diverse tipologie di generatori di calore che si differenziano in funzione della forma commerciale assunta dalla biomassa lignocellulosica che, come detto, è quella più idonea a subire un processo di combustione diretta. Si hanno allora:

- caldaie per la combustione di legna in ciocchi,
- caldaie a cippato,
- caldaie a pellet.

In tutti e tre i casi il recupero del calore avviene in maniera indiretta per mezzo di un fluido vettore (ad esempio acqua). Questa operazione, oltre a rendere disponibile l'energia termica sviluppata in fase di combustione, risulta assolutamente necessaria per raffreddare i fumi in uscita dal combustore (si può arrivare anche a 1.200 °C) su i quali andranno a realizzarsi i processi di pulizia e abbattimento delle emissioni. Questi dispositivi inoltre vengono generalmente dimensionati per la copertura del "base load" in quanto un loro funzionamento intermittente ne riduce sensibilmente l'efficienza. Per raggiungere questa condizione si utilizzano generalmente degli accumulatori termici (serbatoi d'acqua che fungono da volano) che, venendo collegati direttamente alla mandata della caldaia, permettono a quest'ultima di funzionare in maniera continua e regolare indipendentemente dalle esigenze dell'utenza. Un'altra possibilità poi è quella di ripartire la potenza su più dispositivi, utilizzando un tradizionale combustore a gas o a gasolio per seguire gli eventuali picchi nella richiesta.

A queste tre diverse tecnologie, che si

configurano come impianti di riscaldamento centralizzato, in realtà è possibile aggiungere anche una serie di sistemi di riscaldamento ausiliario, come stufe di vario tipo e caminetti, che garantiscono un apporto di calore complementare magari in quei locali più utilizzati della casa, creando nel contempo una piacevole atmosfera. La stufa a legna in particolare, ampiamente utilizzata in passato, ha negli ultimi anni riacquisito un sempre maggiore interesse quale dispositivo per la produzione di calore. Durante la stagione invernale infatti, essa può rappresentare un'ottima soluzione per l'integrazione del riscaldamento centralizzato, innalzando la temperatura nei locali più utilizzati e lasciando appunto all'impianto centralizzato solamente la fornitura del "carico base". Le stufe devono presentare una costruzione a camera stagna, per evitare che eventuali spifferi d'aria causino una combustione non controllata della biomassa in esse contenuta. La sostanza organica è generalmente costituita da un certo numero di ceppi i quali, sorretti da una griglia, tendono a bruciare contemporaneamente grazie all'aria fornita sia dal basso (tramite la griglia), che attraverso un'apposita apertura posta al di sopra del focolare. Questa soluzione ha come obiettivo quello di ricreare, anche in tali sistemi, il meccanismo della combustione a stadi. Uno dei maggiori inconvenienti delle stufe a legna è infatti l'elevata produzione di CO che si verifica per effetto del raffreddamento indotto nel letto di combustibile, ogni qual volta si introduce della nuova biomassa. Appare chiaro dunque che il modo migliore per controllare la produzione di questo pericoloso inquinante è quello di attuare la postcombustione dei fumi mediante l'introduzione di aria secondaria in camera di combustio-

ne. Questa tecnologia è oggi in fase di diffusione anche nei generatori di calore di piccole dimensioni e consente, non solo la riduzione dei gas tossici immessi nell'ambiente, ma anche un aumento del rendimento termico del sistema con conseguente risparmio economico ed energetico.

Proprio da un punto di vista economico si può affermare che allo stato attuale, essendo gli impianti di riscaldamento a biomassa caratterizzati da alti costi d'investimento e bassi costi di esercizio, le installazioni di maggiore potenza, seppur tecnologicamente più complesse, sono generalmente più convenienti rispetto a quelle di taglia minore. Risulta assolutamente efficace allora l'integrazione di questi sistemi in reti di teleriscaldamento in cui, piccoli combustori, più o meno efficienti e bisognosi di singoli rifornimenti, vengono sostituiti con grosse caldaie a biomassa ad elevate prestazioni e controllate da tecnici esperti 24 ore su 24. Molti di questi impianti sono attualmente dislocati nei comuni delle valli alpine, dove per motivi climatici la richiesta di energia termica si protrae per lunghi periodi all'anno e dove inoltre si può fare affidamento su notevoli quantità di materiale legnoso di origine prevalentemente locale.

Negli ultimi tempi l'offerta di tecnologie di combustione ambientalmente compatibili ha raggiunto livelli di efficienza, affidabilità e comfort del tutto simili a quelli degli impianti tradizionali a gas o gasolio. Basti pensare che una moderna stufa o caldaia alimentata a biomassa arriva ad avere rese prossime al 90% limitando enormemente, rispetto ai vecchi caminetti e stufe, gli sprechi di biocombustibile e ottimizzando il controllo sulle emissioni. A tale aspetto va poi associata la progressi-

va evoluzione nel settore dei biocombustibili solidi che, oltre alla legna da ardere in ciocchi, offre legno sminuzzato (cippato) o macinato e pressato (pellet e briquettes) più comodi da movimentare e stoccare. In definitiva questo mercato di nicchia per la produzione di energia termica da biomassa sta oggi mostrando un costante incremento, e le cause non si limitano alla sola convenienza economica, ma riguardano anche una sempre più diffusa sensibilità della gente verso l'uso di fonti energetiche rinnovabili.

Caldaie per la combustione di legna in ciocchi

Si tratta di sistemi che utilizzano legna da ardere in ciocchi o tronchetti aventi pezzature variabili dai 50 ai 500 mm e tenori di umidità preferibilmente inferiori al 25% al fine di ridurre la fumosità e la formazione di condensati corrosivi. Possono essere utilizzate praticamente tutte le essen-

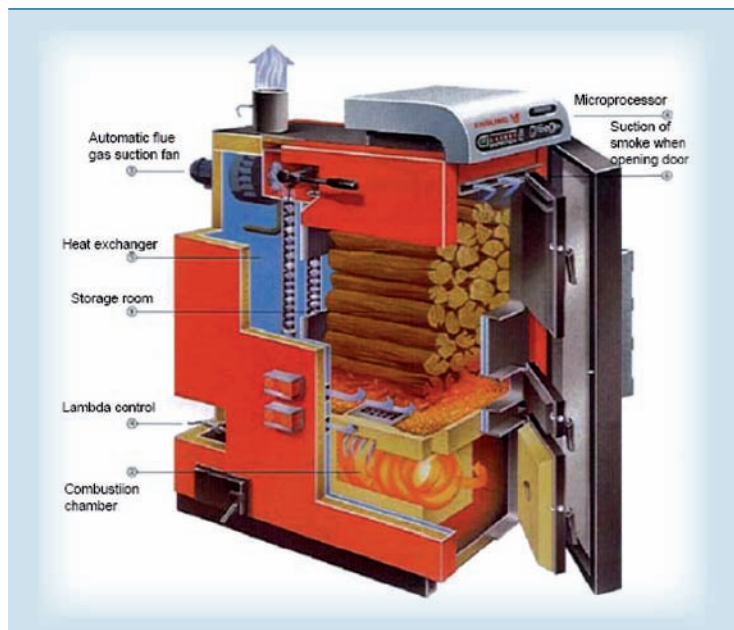
ze, comprese le conifere o legni leggeri come il pioppo; tuttavia i risultati migliori, in termini soprattutto di durata della combustione, si ottengono con essenze forti come robinia, faggio o quercia. Questa tipologia di caldaie hanno potenza limitata e trovano un impiego ottimale nel riscaldamento di case isolate comprendenti uno o pochi appartamenti.

Tra i principali vantaggi spiccano perlopiù quelli di natura economica: i costi di investimento sono contenuti così come i costi di gestione grazie soprattutto al basso prezzo della legna da ardere rispetto ad altre tipologie di biomassa. Trattandosi poi di una tecnologia ampiamente collaudata essa risulta anche particolarmente sicura e in grado di garantire buoni rendimenti energetici, i quali possono raggiungere anche il 60–70%. Rappresenta indubbiamente uno svantaggio invece la necessità di eseguire, mediamente ogni 1–3 giorni a seconda delle condizioni di funzionamento, la carica manuale della legna all'interno della camera di combustione; questo determina un minor confort di utilizzo da parte dell'utente che deve preoccuparsi di preparare periodicamente il combustibile il quale, tra l'altro, richiedendo molto spazio per lo stoccaggio, esclude di fatto l'impiego di questa tecnologia in molte realtà urbane.

Attualmente la tipologia di caldaie più diffusa per legna in ciocchi è quella a fiamma inversa in cui la camera di combustione è situata sotto il vano in cui viene caricata la legna. Queste caldaie sono generalmente provviste di sistemi per la circolazione forzata dell'aria: in alcuni modelli (ad aria soffiata), la ventola, posta sul lato anteriore della caldaia, spinge l'aria all'interno facendola fluire attraverso il combustibile; in altri invece (detti ad aria aspirata) la ventola, situata posteriormente sulla

Fig. 3.25

Caldaia a fiamma inversa



bocca di uscita dei fumi, aspira i gas combustibili creando di fatto una depressione nella camera di combustione che consente il richiamo dell'aria comburente dall'esterno. Il principio di funzionamento dei sistemi a fiamma inversa si basa sulla suddivisione dell'aria in due flussi distinti. Un primo flusso, detto di aria primaria, viene introdotto in caldaia immediatamente sopra la griglia sulla quale è disposta la legna, consentendo così l'avvio del processo di combustione. Questa porzione di comburente, inferiore a quella necessaria per il completamento del processo di ossidazione, in realtà non fa altro che innescare un processo di gassificazione della biomassa legnosa, con conseguente sviluppo di un gas combustibile che, trascinato in basso attraverso la griglia, viene bruciato nella camera sottostante, grazie alla presenza di un flusso di aria secondaria.

Con questo meccanismo a "fiamma inversa" dunque, la legna non prende totalmente fuoco nel vano di carico, ma brucia solo in prossimità della griglia; questo determina una migliore erogazione della potenza e una combustione più controllata, a tutto vantaggio quindi di una maggiore efficienza termica e di un minor quantitativo di emissioni inquinanti. I modelli più avanzati si avvalgono poi sistemi di regolazione a microprocessore che, sfruttando il segnale di una apposita sonda lambda, ottimizzano costantemente la quantità di aria comburente introdotta, garantendo così alla caldaia di raggiungere rendimenti, in condizioni di potenza nominale, anche superiori al 90%. Grazie a queste condizioni di alta efficienza si riduce sensibilmente anche il consumo di biomassa che tra l'altro, in caldaia a fuoco inferiore ben concepite, può essere impiegata anche con alti tassi di umidità essendo poi soggetta nel vano di carico

ad un processo di essiccazione che precede la combustione vera e propria.

Caldaie a cippato

Le caldaie a cippato utilizzano come combustibile del legno vergine (privo cioè di sostanze inquinanti come ad esempio vernici) che, attraverso una operazione meccanica di sminuzzamento (comunemente detta cippatura), viene ridotto in piccoli pezzi della dimensione di qualche centimetro che possono così essere facilmente, introdotti in maniera automatica, all'interno del generatore di calore. A differenza quindi dei sistemi per la combustione di legna in ciocchi, gli impianti a cippato sono totalmente automatizzati e inoltre non hanno limiti dimensionali, potendo raggiungere potenze anche di diversi MW termici. Ciò quindi li rende particolarmente indicati per il riscaldamento di edifici di dimensioni medie o grandi quali alberghi, scuole, condomini, ospedali, centri commerciali o più unità abitative collegate insieme da reti di teleriscaldamento. Come già anticipato, essendo il caricamento dei chips in caldaia realizzato in modo automatico, è necessario che nelle vicinanze del generatore termico sia predisposta una vasca (comunemente detta anche silo) per lo stoccaggio del combustibile. Tale vasca deve essere di fatto una vera e propria struttura adeguata al volume di combustibile da contenere; nel caso di impianti caratterizzati da piccole potenze, essa può essere realizzata anche con sistemi prefabbricati in ferro o calcestruzzo che vengono tipicamente disposti in posizione adiacente al locale caldaia e in modo da consentire ai mezzi di trasporto del cippato l'accessibilità e i necessari spazi di manovra. Il silo va dimensionato tenendo conto della potenza e del rendimento della caldaia, delle caratteristiche del combustibi-

Cippato

Come detto il combustibile adoperato è sotto forma di scaglie (chips) che vengono prodotte generalmente utilizzando legname di qualità medio bassa, come i residui delle potature boschive, agricole e urbane (ramaglie, cimali), o i sottoprodotti e gli scarti provenienti dalle industrie di lavorazione del legno. L'operazione di cippatura è effettuata con delle macchine dette appunto cippatrici, presenti sul mercato in diversi modelli, e distinguibili in funzione del sistema di taglio che può essere o a disco o a tamburo. Il taglio a disco è generalmente realizzato nelle macchine di piccola potenza, che hanno una capacità di lavoro di qualche tonnellata l'ora e che vengono portate da trattori agricoli; i sistemi a tamburo sono invece installati in versioni molto più pesanti e potenti, quasi sempre automotrici e in grado di lavorare legname con diametri fino a 30 cm. L'operazione di sminuzzatura, attuata quasi sempre nel sito di raccolta, presenta sia aspetti positivi che negativi.

Tra i principali vantaggi vi è senz'altro la possibilità di ottimizzare l'impiego della biomassa legnosa disponibile, in quanto si può cippare anche quel materiale che non potrebbe essere trasformato in alcun assortimento convenzionale perché piccolo o difettoso. In pratica quindi la sminuzzatura consente di recuperare un 15–20% di biomassa che altrimenti sarebbe abbandonata in bosco come residuo; cippare anche questo materiale non solo aumenta la resa a ettaro, ma risolve lo spinoso problema dei residui di utilizzazione, che le misure di prevenzione degli incendi boschivi impongono tra l'altro di asportare o eliminare. Un altro aspetto sicuramente positivo legato all'operazione di cippatura è che, grazie ad essa, è possibile ridurre sensibilmente il volume apparente degli scarti forestali, facilitandone così la movimentazione e il trasporto: una tonnellata di cippato fresco infatti occupa circa tre metri cubi, contro i dieci necessari per contenere la stessa quantità di ramaglia non lavorata. Ovviamente ciò vale solo per il materiale minuto in quanto il volume occupato dal cippato è comunque superiore, quasi doppio, all'ingombro di un peso equivalente di legname tondo; la logica conclusione quindi è che conviene sminuzzare ramaglia, scarti e piante di piccole dimensioni, mentre è meglio ridurre in ciocchi le piante medio-grosse, soprattutto se la distanza di trasporto è elevata.

A questi aspetti positivi si contrappongono però alcuni svantaggi; uno tra tutti ad esempio è quello legato alla notevole richiesta di potenza delle attuali cippatrici, inconveniente che si ripercuote inevitabilmente sia sul costo della macchina che sul consumo di combustibile da parte di quest'ultima. Nonostante questo però il mercato del cippato offre prezzi di acquisto non particolarmente elevati che tuttavia però non sono riusciti a sviluppare sufficientemente questa risorsa e a renderla una vera alternativa ai combustibili tradizionali. Tra i problemi relativi all'utilizzo del cippato spicca poi quello legato alla sua scarsa conservabilità particolarmente accentuata per tenori di umidità superiori al 35–40%. Il legno umido infatti è un substrato eccellente per la crescita di vari microrganismi xylofagi, funghi e batteri da cui la pianta normalmente si protegge grazie alla presenza della corteccia; in seguito alla sminuzzatura però viene prodotta un'enorme quantità di legno non protetto, e pertanto, moltiplicandosi la superficie ricettiva all'attacco dei microrganismi, si innesca un processo di rapido deterioramento che è bene tenere sotto controllo evitando ad esempio al cippato lunghi periodi di stoccaggio. Generalmente l'attacco microbiologico inizia già poche ore dopo che il legno è stato cippato e può andare avanti per diverse settimane, fino a che la temperatura generata dalla respirazione microbica non diventa talmente elevata da inibire l'ulteriore proliferazione dei microrganismi che ne sono la causa. Una delle conseguenze di questo processo di deterioramento è innanzitutto la perdita di una notevole quantità di sostanza

secca che, venendo divorata dai microrganismi, non è più disponibile per la produzione di energia. Con uno stoccaggio prolungato in condizioni sfavorevoli si può arrivare infatti a riduzioni di massa superiori anche al 20% con evidente danno economico per il proprietario dell'impianto. Per meglio rendersi conto dell'importanza del problema basti pensare che, essendo il valore del cippato funzione del calore prodotto, perdere un 20% del potere calorifico sul materiale consegnato in deposito significa innalzare di fatto il suo costo di un quinto. Altri inconvenienti conseguenti all'attacco microbico sono poi: l'enorme sviluppo di spore, che possono indurre reazioni allergiche nei soggetti sensibili rendendo così il deposito del cippato un ambiente di lavoro particolarmente insalubre, nonché il rischio di autocombustione a cui può andare incontro la catasta di chips per effetto delle alte temperature dovute all'azione dei microrganismi. Quest'ultimo problema, abbastanza raro in realtà negli impianti di riscaldamento per uso civile, tende a verificarsi quasi esclusivamente nei depositi di grosse dimensioni, contenenti diverse migliaia di tonnellate di materiale legnoso, e nei quali lo stoccaggio si prolunga oltre i 6-10 mesi. A parità di condizioni (umidità e pezzatura) tutte le specie sono attaccate in modo più o meno grave: pioppo e salice sono quelle più vulnerabili, mentre in generale le conifere hanno una maggiore resistenza grazie soprattutto alla resina che garantisce loro una limitata protezione.

A seconda delle caratteristiche possedute dalla massa legnosa che viene sottoposta al processo di cippatura, è possibile distinguere tre tipologie di cippato:

- cippato bianco, che deriva dalla sminuzzatura di solo legno, ovvero di fusti o tronchetti preventivamente scortecciati;
- cippato marrone, che contiene anche porzioni di corteccia le quali, frantumandosi in particelle di piccole dimensioni, riempiono parte degli interstizi tra i chips creando così un aggregato più compatto e a maggior massa volumica rispetto alla categoria precedente; questa tipologia di cippato è quella più frequente, sia nella produzione forestale sia in quella industriale;
- cippato verde, che, essendo ottenuto dalla riduzione in chips di piante intere o di porzioni di chioma, contiene anche fogliame e soprattutto aghi i quali conferiscono all'ammasso una maggiore umidità che può creare fenomeni indesiderati di compattamento all'interno delle strutture di stoccaggio.

La geometria e la dimensione dei chips, che dipendono dal tipo di cippatrice impiegata e da parametri operativi quali velocità di rotazione dell'organo di taglio o velocità di avanzamento del pezzo di legno, vengono definite in funzione del tipo di caldaia utilizzata ma soprattutto, in funzione del suo sistema di alimentazione che ha il compito di introdurre in camera di combustione il cippato proveniente dal sito di stoccaggio. Questi chips presentano tipicamente una lunghezza compresa tra i 15 e i 50 mm, una larghezza pari a circa la metà della lunghezza e uno spessore variabile da un quinto a un decimo della lunghezza; pertanto una dimensione tipica è ad esempio 40 x 20 x 3 mm. La granulometria del cippato e ancor più la sua omogeneità (ottenuta con la calibratura tramite vagli) sono parametri estremamente importanti ai fini dell'impiego negli impianti di riscaldamento ad alimentazione automatica, in quanto particelle disomogenee in dimensioni e forma possono causare inconvenienti nel funzionamento e blocchi del sistema di alimentazione della caldaia. Un altro parametro da tenere in considerazione è il tenore di umidità: attualmente infatti le tecnologie disponibili per la combustione del cippato accettano solamente biomassa con un'umidità massima del 50%; dei limiti si hanno anche per quanto riguarda il materiale legnoso di partenza, il cui livello di umidità deve essere compreso tra il 25% e il 50% dato che valori al di sotto o al di sopra di queste soglie possono causare problemi al funzionamento della cippatrice.

Figura 3.26
Silo per lo stoccaggio
del cippato



le, dell'autonomia richiesta e dell'organizzazione che presiede agli approvvigionamenti. Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto infatti va ricordato che, tanto più sicuri sono i rifornimenti, tanto minori possono essere i volumi di scorta per garantire la continuità di funzionamento dell'impianto a cippato; avere infatti un facile accesso a questo tipo di combustibile permette di utilizzare dei silos di ridotte dimensioni con conseguente riduzione

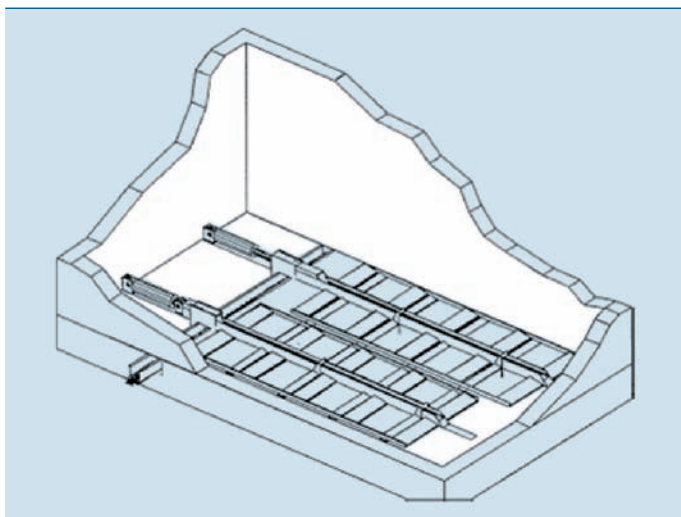
Figura 3.27
Coclea di trasporto del cippato



dei costi di investimento. Sul fondo del silo viene posizionato l'estrattore del cippato, che preleva il combustibile e lo convoglia nel canale della coclea di trasporto la quale, almeno nelle piccole e medie applicazioni, rappresenta il sistema più comune di alimentazione della caldaia. Nei piccoli impianti, per potenze fino a 300–500 kW, e capienze fino a circa 100 m³, come estrattore viene generalmente usato un sistema a braccio rotante, che richiede tipicamente una sezione del silo circolare o quadrata. Per impianti di maggiore potenza invece vengono usati estrattori a fondo mobile, costituiti da una o più rastrelliere parallele ad azionamento idraulico che, con un lento movimento avanti e indietro spingono il cippato nel canale della coclea. In linea generale tra il sistema a rastrelli a pavimento e i bracci rotanti è da preferire quest'ultimo, per la sua maggiore flessibilità di movimentazione del cippato, per il suo minor costo, la minore potenza elettrica impegnata e la minore rumorosità.

A seconda delle tipologie costruttive, le caldaie si possono dividere in varie categorie, tuttavia il primo e più significativo criterio per classificarle resta la definizione della tipologia di camera di combustione adottata: a griglia fissa, con alimentazione inferiore, o a griglia mobile. La prima tipologia è particolarmente indicata per la conversione termica del cippato di piccole dimensioni, con basso tenore di umidità e contenuto di ceneri inferiore al 2%, la seconda invece consente di bruciare pezzature più grosse, ad alto contenuto di ceneri (fino al 10%) e umidità anche del 50%. La possibilità di avere un impianto meno esigente in fatto di umidità e pezzatura del combustibile potrebbe indurre a pensare che il sistema con camera di combustione a griglia mobile sia

Fig. 3.28 Estrattore di cippato a fondo mobile



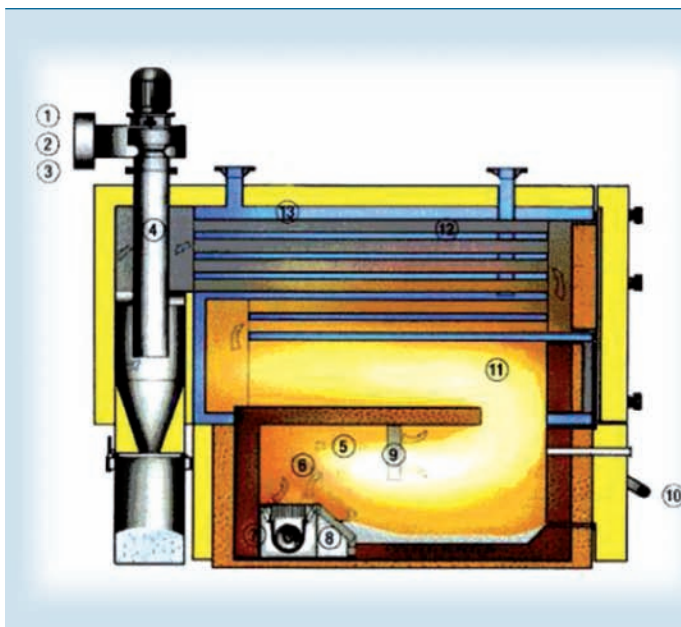
quello più flessibile e quindi universalmente adottabile; in realtà però il suo maggior costo e i maggiori problemi di regolazione ai bassi carichi, che si manifestano specie in assenza di altrettanto

dispendiosi apparati di monitoraggio, rendono di fatto questa tecnologia più adatta alle installazioni più grosse, con potenze anche superiori al MW.

Nelle caldaie a griglia mobile, il movimento della griglia può essere sia traslatorio alternato che rotatorio, con quest'ultimo tipo è possibile migliorare la combustione e quindi il rendimento nominale utile del generatore di calore che risulta in questo caso particolarmente indicato per ogni tipo di biomassa e per potenze oltre i 2.000 kW. Le caldaie che oggi si trovano in commercio, aventi una potenza tipicamente compresa tra i 30 e i 3.000 kW, permettono di raggiungere rendimenti nominali anche del 70–80%, a seconda del tipo di cippato utilizzato, del suo tenore di umidità e quindi del potere calorifico inferiore (mediamente pari a circa 10 MJ/kg). I sistemi più avanzati sono dotati di un microprocessore che, in base alla richiesta di energia dell'utenza e alla temperatura e con-

Fig. 3.29

Esempio di caldaia a cippato ad alimentazione inferiore

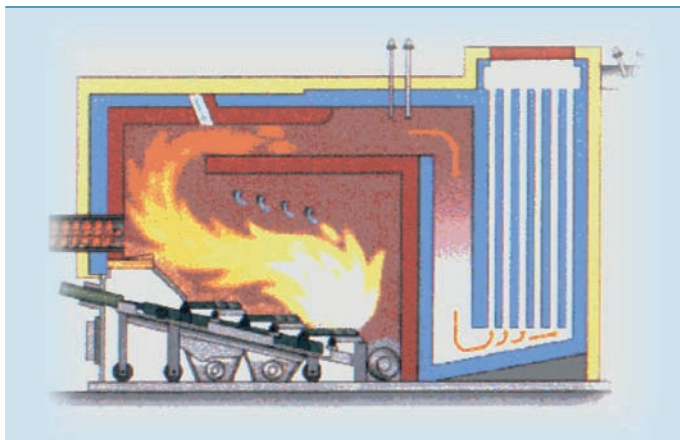


1. Sensore residuo dell'ossigeno nei gas combustibili (SONDA LAMBDA)
2. Sensore temperatura gas di scarico
3. Soffiante gas di scarico
4. Depolveratore fumi
5. Focolare
6. Sensore controllo braci
7. Introduzione aria primaria 1
8. Introduzione aria primaria 2
9. Introduzione aria secondaria
10. Portello focolare
11. Sensore temperatura focolare
12. Scambiatore di calore a tubi di fumo

Con materiale particolarmente umido sono tipicamente presenti soffiatori ausiliari di aria primaria.

Fig. 3.30

Esempio di caldaia a cippato con griglia a movimento traslatorio alternato



centrazione di ossigeno dei fumi, regola in continuo il flusso del cippato e la potenza erogata, mantenendo così 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 poi la funzione di mantenimento braci che consente alla caldaia di mantenere una piccola quantità di braci accesa durante

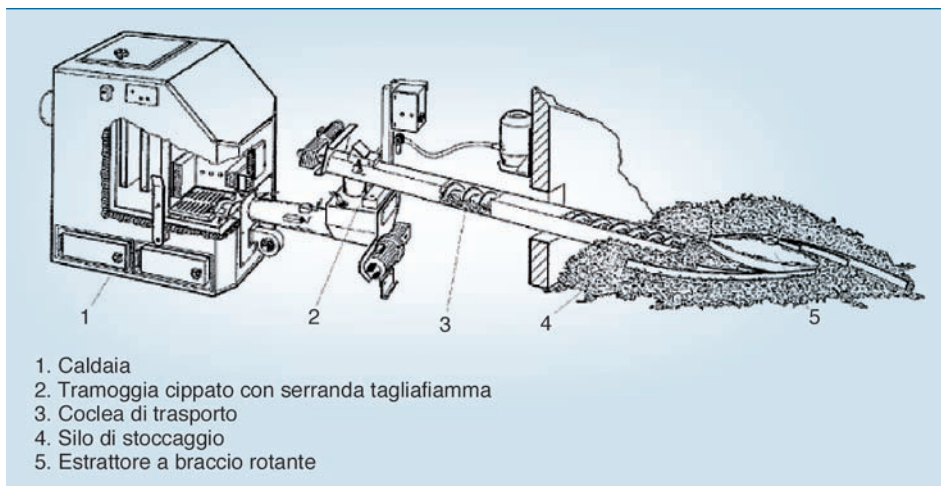
le pause di funzionamento, permettendo così la riaccensione immediata al riavvio dell'impianto. Dispositivi indispensabili invece negli impianti a cippato sono quelli di sicurezza destinati ad impedire eventuali ritorni di fiamma dalla caldaia al silo di stoccaggio. Tra i più comuni vi sono sicuramente le serrande tagliafiamma che garantiscono l'interruzione del flusso del combustibile; non mancano poi anche le valvole di sicurezza termica le quali, collegate alla rete idrica, immettono in caso di emergenza acqua nel canale della coclea impedendo così il propagarsi del ritorno di fiamma.

Caldaie a pellet

Si tratta di sistemi aventi caratteristiche molto simili alle caldaie a cippato; a differenza di queste ultime però, viene bruciato un prodotto densificato, normalmente di forma cilindrica detto pellet che, per la sua alta densità energetica e facilità di movimentazione, rappresenta il combustibile vegetale più indicato per impianti di riscaldamento automatici di tutte le dimensioni.

Fig. 3.31

Schema di una centrale termica a cippato



Pellet

Il pellet di legno nasce nel 1973 in Idaho negli Stati Uniti, quando, a seguito della crisi petrolifera, un ingegnere mise a punto questo nuovo tipo di combustibile legnoso. Ideato inizialmente per l'impiego industriale, ben presto venne immesso sul mercato delle caldaie domestiche, diventando oggi, anche in Europa, una validissima alternativa a prodotti come il gasolio il GPL e persino il gas naturale. Il pellet deriva da un processo industriale attraverso il quale la segatura, i trucioli o le scaglie di legno vergine (ovvero non trattato con colle o vernici) polverizzate appartenenti a diverse specie vengono trasformate, per mezzo di idonee macchine pellettizzatrici, in piccoli cilindri di diametro variabile tra 6 e 12 mm e lunghezza oscillante tra 12 e 18 mm.

In maniera schematizzata il processo di fabbricazione del pellet viene suddiviso nelle seguenti fasi: essiccazione, triturazione, pellettizzazione, raffreddamento, separazione e immagazzinamento–insaccamento. In alcuni casi poi, quando la tipologia di biomassa lo richiede, a monte dell'essiccazione si rendono necessarie altre due importanti fasi: la macinazione di sgrossatura e la deferrizzazione. In figura 3.33 è riportato lo schema a blocchi di un impianto industriale per la produzione di pellet.

La macinazione di sgrossatura è un'operazione che viene eseguita, sulla tutta quella biomassa che si presenta, prima della fase di essiccazione, in forma grossolana; in questo caso infatti i tronchetti di legno o le ramaglie, subiscono, mediante l'ausilio di un rotore a coltelli, una vera e propria riduzione volumetrica in scaglie. Prima dell'introduzione nel macinatoio poi, il materiale grezzo viene solitamente separato, tramite l'azione di appositi magneti, da eventuali elementi ferrosi (deferrizzazione) che, se introdotti nella trafilatura di produzione, potrebbero causare ingenti danni. Con le tecnologie oggi più diffuse, il materiale legnoso di partenza inoltre non può essere utilizzato per la produzione di pellet se presenta un contenuto di umidità superiore in media al 12%: è quindi necessario, dopo la macinazione primaria, eseguire un'essiccazione attraverso l'esposizione ad aria calda, vapore e acqua. In questo modo si raggiunge il grado di umidità desiderato e viene data possibilità alla lignina, contenuta nella materia prima, di svolgere nella successiva fase di pressatura il ruolo di legante tra le diverse particelle di legno.

Le tecnologie per l'essiccamento della biomassa maggiormente utilizzate prevedono per

Figura 3.32 – Pellet di legno

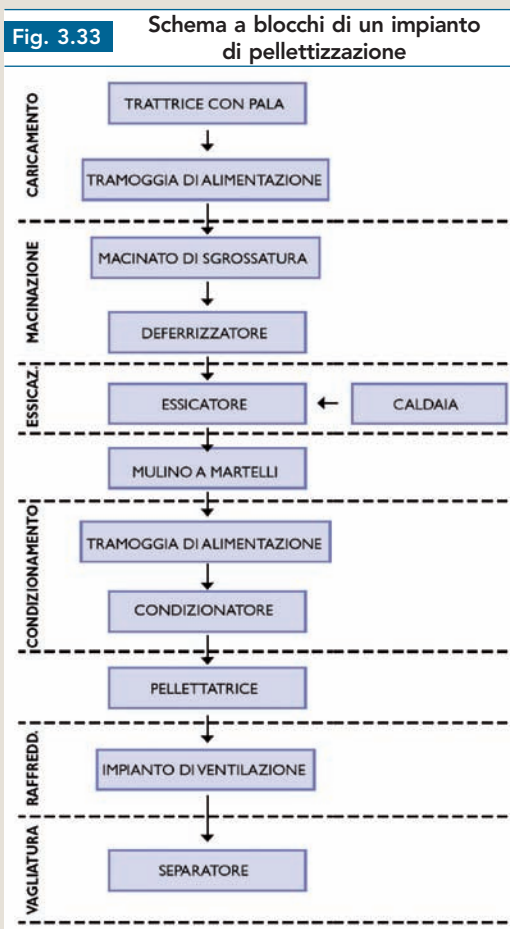


lo più l'utilizzo di essiccatoi rotativi, in equicorrente o in controcorrente e con riscaldamento che può essere diretto o indiretto. Negli essiccatoi a riscaldamento diretto il materiale umido entra direttamente in contatto con un gas caldo che può essere costituito o da prodotti di combustione (essiccazione a fumi diretti) o semplicemente da aria riscaldata (essiccazione ad aria calda). Nei sistemi a riscaldamento indiretto invece, il materiale grezzo non entra in contatto con nessuna sostanza, ma anzi rimane all'interno del tamburo rotativo che, montato su una cassa rivestita con mattoni refrattari, viene riscaldato esternamente.

Una volta essiccato il materiale grezzo (trucioli, segatura o i chips precedentemente lavorati) viene poi sottoposto ad un processo di triturazione con riduzione in piccoli granuli di dimensioni omogenee (circa 3 mm) che consentono sia l'alimentazione a flusso continuo della pellettizzatrice, che la possibilità, eventualmente, di miscelare differenti specie legnose e scarti di lavorazione. Questa fase viene spesso realizzata impiegando mulini a martello. Il materiale così triturato viene quindi avviato alla sezione di condizionamento, dove viene preparato per entrare nella trafila della pellettizzatrice. Una pratica comune in questo caso è quella di utilizzare del vapore acqueo secco per

ammorbidire le fibre legnose ed effettuare una parziale gelatinizzazione della biomassa, in modo da ottenere un pellet più compatto e, al contempo, una maggior lubrificazione alla trafila nella fase di pellettizzazione. Nonostante poi per la produzione di questo combustibile non sia richiesto l'utilizzo di leganti, che addirittura sono vietati da diverse normative, durante la fase di condizionamento è comunque possibile miscelare al materiale legnoso alcune sostanze naturali come ad esempio amido, melassa, oli vegetali o sulfonato di lignina, che permettono di migliorare la consistenza finale dei cilindretti densificati.

Il materiale così trattato passa quindi all'interno della pellettizzatrice; questa macchina, 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, $\approx 200 \cdot 10^5$ Pa) mediante idonei sistemi a rulli.



Fonte: AREA Science Park

Queste condizioni pressorie inducono nella massa legnosa temperature prossime ai 90 °C le quali, a loro volta, favoriscono la fluidificazione della lignina che esce dalle strutture cellulari e, polimerizzando, compatta i diversi granuli garantendo così la perfetta coesione del cilindretto densificato. L'estruso, che fuoriesce dai fori delle matrici, si presenta come un materiale compresso e bachelizzato in superficie; esso viene quindi tagliato, da apposite lame, alla lunghezza voluta e ridotto nei tradizionali cilindretti dai quali deriva appunto il nome di pellet.

Terminato così il processo di pellettizzazione vero e proprio, che presenta una produttività variabile da 800 a 4.000 kg/h, si ha la fase di raffreddamento del combustibile che viene generalmente condotta in appositi impianti di ventilazione. Questa operazione riveste un ruolo particolarmente importante in quanto, oltre a ridurre la temperatura del pellet e l'umidità sprigionatasi con la pressatura, si realizza anche un rapido indurimento del prodotto che contribuisce a preservarne nel tempo le caratteristiche qualitative. Nella sezione di separazione è infine eliminato il combustibile non integro che viene reimpresso nel sistema di estrusione, al fine di evitare successivi problemi di intasamento causati da un eccesso di polveri nei contenitori per lo stoccaggio. In alternativa ai tradizionali silos il pellet può essere anche conservato all'interno di appositi sacchi che vengono riempiti da una macchina pesatrice/insacatrice automatica collocata in coda alla linea di produzione.

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; diversi però sono anche gli studi rivolti a sviluppare la filiera del pellet da colture erbacee o da una miscela di queste con biomasse legnose. La diversa qualità della biomassa di partenza, soprattutto in termini di potere calorifico e contenuto in ceneri, porterà però inevitabilmente a un prodotto densificato con caratteristiche differenti da quelle del pellet di legno, caratteristiche che ne modificheranno di conseguenza anche la destinazione d'uso ma non la tecnologia e la filiera di produzione che invece rimarranno invariate a prescindere dal tipo di biomassa utilizzata.

In Europa è la Svezia il più grande produttore e utilizzatore di questa tipologia di prodotto, che è comunque diffuso in molti altri paesi europei. In Italia l'utilizzo del pellet non è particolarmente esteso anche se negli ultimi anni si sta registrando un trend di crescita decisamente positivo. Oggi la produzione italiana è stimata intorno alle 500 tonnellate annue, valore comunque non comparabile a quello di paesi come la Svezia, dove si superano le 500.000 tonnellate, la Danimarca (\approx 150.000 ton) o l'Austria (\approx 35.000 ton). Per non deludere nel nostro paese le aspettative di un mercato sempre più in espansione è necessario garantire standard opportuni sia sulla qualità del pellet (dimensione, umidità, densità, contenuto delle ceneri, potere calorifico, ecc), che sugli apparati utilizzatori; introducendo allo scopo specifiche norme tecniche.

Il Comitato Termotecnico Italiano (CTI), anticipando il legislatore nella definizione di una specifica normativa di regolamentazione, ha fornito una raccomandazione (R 04/5) proprio sulla caratterizzazione del pellet a fini energetici. Questo documento si pone come obiettivo sia il miglioramento delle condizioni di commercio di questo prodotto, da realizzarsi attraverso l'intensificazione del confronto tra tutti gli attori del sistema pellet (costruttori di impianti di pellettizzazione, produttori di pellet, costruttori di impianti di combustione, commercianti e utenti finali), sia la definizione di riferimenti tecnici utili al legislatore per facilitare l'implementazione della normativa in materia. 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. La raccomandazione, nelle categorie B e C, contempla anche l'uso di biomassa derivante da colture e residui erbacei, nonché agroindustriali; non è invece previsto l'utilizzo, come materia prima, degli scarti dell'industria agroalimentare che invece sono considerati in ambito europeo dalle direttive n. 2000/76 e n. 2001/80 CEN/TC 335.

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 e 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 cippato, e ciò ne ottimizza il trasporto e lo stoccaggio;
- *basso contenuto in umidità*; le normative austriaca e svedese prescrivono un limite massimo del 10% da calcolarsi sul secco; 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 con la formazione di muffe e batteri;
- *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 particolarmente elevato nel campo dei biocombustibili;
- *omogeneità del materiale sia dal punto di vista delle caratteristiche fisiche che qualitative*; granulometria ridotta e omogeneità di forma garantiscono una estrema facilità nella movimentazione del prodotto che avviene generalmente mediante coclee, nastri trasportatori o sistemi pneumatici di aspirazione; si ha quindi la possibilità di utilizzo in caldaie automatizzate con tutti i vantaggi che ne conseguono in termini di regolazione, dosatura e alimentazione continua del combustibile; il grande interesse nei confronti del pellet, forse, risiede proprio 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; questo combustibile gode poi di una elevata regolarità nella sua composizione e ciò permette di avere una migliore regolazione del processo combustione e un miglior controllo delle emissioni. Inoltre il vantaggio di avere 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 di fatto il rischio di incorrere in materiale di scarsa qualità dotato ad esempio di eccessiva umidità, di una pezzatura disomogenea o di un alto contenuto di impurità e di ceneri.

Un ulteriore aspetto qualificante è rappresentato dal ridotto quantitativo di ceneri prodotto durante il processo di combustione; in relazione proprio al contenuto in ceneri, i combustibili a pellet sono differenziabili in tre classi: classe "premium" con produzione di ceneri inferiore al 1%, classe "standard" con livelli compresi tra l'1 e il 2% e classe "industriale", non utilizzata di fatto nelle comuni caldaie commerciali, e avente un contenuto in ceneri pari o addirittura superiori al 3%.

Un'altra forma densificata: i briquettes

I *briquettes* sono un'altra forma densificata di biocombustibile ottenuta dalla pressatura di residui legnosi più grossolani rispetto a quelli utilizzati nella produzione del pellet, essi si presentano generalmente o come dei tronchetti cilindrici, aventi una lunghezza di 30 cm e un diametro di 7–8 cm, o come elementi di forma parallelepipedica più facili da utilizzare e da stoccare.

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 del materiale di partenza (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 l'operazione di bricchettatura, al pari della pellettizzazione, necessita di un preventivo condizionamento del materiale legnoso di partenza che deve essere essiccato fino a raggiungere valori di umidità intorno all'8–10%, così da produrre bricchetti con umidità del 6–8%, i quali mostrano buona resistenza, non si fessurano e garantiscono un processo di produzione ad alta efficienza. Successivamente è necessaria anche una fase di triturazione della biomassa, sino ad ottenere una granulometria di 6–8 mm, che possa così garantire il migliore grado di compattazione del materiale e le migliori rese produttive.

In linea generale quindi i pretrattamenti necessari per eseguire una corretta bricchettatura sono molto simili a quelli attuati nell'ambito della pellettizzazione, sebbene comunque le tecnologie impiegate siano relativamente più semplici. Definita la granulometria e il contenuto d'acqua ottimale il materiale grezzo viene quindi convogliato alla bricchettatrice mediante un sistema di alimentazione costituito da un tubo mantenuto in depressione o da un nastro trasportatore. 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 in quanto le forze di coesione tra le particelle, quindi l'effetto legante, si sviluppano in seguito alle elevate pressioni esercitate. Tra i sistemi ad alta pressione, le tecnologie più utilizzate sono: la bricchettatura a vite e la bricchettatura a pistone (meccanica e oleodinamica). Nel primo caso, la biomassa viene estrusa in continuo per effetto della rotazione di una o più viti senza fine all'interno di una camera tronco conica, dove l'effetto combinato di pressione e temperatura

(la camera viene riscaldata durante il processo) garantisce l'adesione tra le particelle.

La parziale carbonizzazione della superficie esterna del bricchetto poi, dovuta alla elevata temperatura, e la presenza di un foro centrale, tipico delle estrusioni realizzate con sistemi a vite, garantiscono una facile accensione di questo combustibile all'interno delle caldaie nonché un'efficace processo di combustione. Con la bricchettatura a pistone meccanico, invece, la compattazione della biomassa viene condotta per mezzo di un pistone alternativo mosso da un moto-

Figura 3.34 – Briquettes



Tabella 3.3 – Confronto tra la pressa a vite e quella a pistone

Caratteristica		Pressa a pistone	Pressa a vite
Umidità ottimale della biomassa	(%)	10-15	8-9
Usura delle parti meccaniche	-	bassa	elevata
Prodotto bricchettato		in blocchetti	in continuo
Consumo medio di energia	(kWh/t)	50	60
Peso specifico bricchetto	(kg/m ³)	1.00-1.200	1.000-1.400
Comportamento a combustione del bricchetto		medio	molto buono
Carbonizzazione esterna		assente	presente
Omogeneità del bricchetto		scarsa	buona

Fonte: AREA Science Park

Tabella 3.4 – Principali tipologie di biomasse bricchettabili

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

Fonte: AREA Science Park

re elettrico attraverso un manovellismo. I bricchetti prodotti in questo caso hanno mediamente un diametro di 60 mm. Infine si ha anche la bricchettatura oleodinamica: essa prevede un sistema a due pistoni che comprimono il materiale in direzioni ortogonali e che vengono azionati dall'olio mantenuto in pressione all'interno di un circuito chiuso. Quest'ultimo sistema è quello in realtà maggiormente utilizzato in quanto consente sia di trattare biomasse con elevati livelli di umidità, che di realizzare un migliore controllo sulla pressione di bricchettatura. In commercio esistono diverse soluzioni tecnologiche a circuito oleodinamico che vanno da una produzione di 30-50 kg/h a circa 1.000-1.200 kg/h. I bricchetti realizzati presentano un diametro variabile da 50 a 90 mm e lunghezze da 50 a 300 mm.

Eseguita come detto la bricchettatura si hanno quindi: la fase di taglio, solo per i sistemi a vite dove il materiale esce in continuo (in quelli a pistone vengono invece prodotti blocchetti di lunghezza predefinita), la fase di raffreddamento, anche in questo caso solo dopo la bricchettatura a vite in cui si realizza un riscaldamento (nel caso di bricchettatrice a pistone il bricchetto subisce infatti solo un lieve aumento della temperatura), e infine il confezionamento e lo stoccaggio finale dei bricchetti. Nella tabella vengono presentate alcune caratteristiche di biomasse bricchettabili e il grado di idoneità alla bricchettatura.

I bricchetti possono essere utilizzati in sostituzione della legna da ardere e del carbone adeguando opportunamente alcuni parametri operativi del generatore termico, 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 primaria. I bricchetti sono poi considerati in generale un combustibile "migliore" rispetto alla comune legna non compattata, ciò è dovuto al fatto che essi presentano una maggiore capacità termica, ossia trattengono il calore per un maggior periodo di tempo, e questo gli consente di mantenere, all'interno della caldaia, una temperatura particolarmente elevata che facilita e velocizza l'intero processo di combustione. Le applicazioni più frequenti di questo tipo di combustibile sono sia di carattere domestico che industriale.

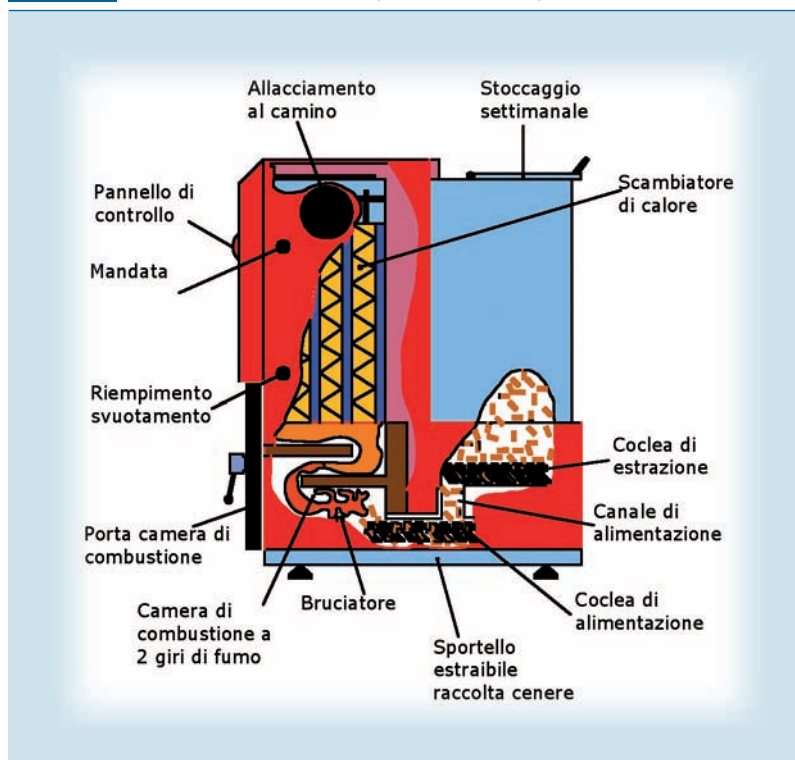
resse per questo tipo combustibile soprattutto da parte di un'utenza medio piccola come quella del settore civile. Questa infatti acquista l'energia (derivante dall'uso di combustibili fossili) ai massimi prezzi di mercato e quindi proprio in que-

sto comparto, alla luce anche dei continui rincari energetici, vi sono significativi margini per proporre un combustibile alternativo a prezzi più vantaggiosi.

Per contro, vi sono però alcuni inconvenienti derivanti dall'utilizzo di queste caldaie: esse sono abbastanza rumorose e, superando mediamente i 45 decibel, vanno collocate in vani isolati spesso appositamente predisposti. Inoltre, poiché la coesione dei cilindretti di legno è ottenuta esclusivamente per pressione meccanica, questi ultimi sono particolarmente sensibili alle variazioni di umidità, ne deriva pertanto che i serbatoi di accumulo, se separati dalla caldaia, devono essere perfettamente isolati, in modo da mantenere quanto più costante l'umidità relativa dell'ambiente e impedire infiltrazioni d'acqua. Come accade per le caldaie a cippato poi, è necessario porre molta attenzione al problema del ritorno di fiamma dal bruciatore verso il serbatoio: il sistema di sicurezza più diffuso consiste nell'interporre un tratto di caduta libera del pellet tra la coclea di trasporto e la caldaia, tratto costituito generalmente da un tubo flessibile in cui si inseriscono serrande tagliafiamma o valvole stellari. Infine è bene ricordare che è molto importante porre attenzione anche all'omogeneità e

Fig. 3.35

Esempio di caldaia a pellet



alla qualità del combustibile utilizzato per non compromettere il buon funzionamento e il rendimento della caldaia. In definitiva, le caldaie a pellet sono una tecnologia ormai matura che offre i vantaggi socio-economici propri dei combustibili legnosi alternativi. Il mercato italiano però

non è ancora ben affermato in relazione alla scarsa conoscenza da parte del pubblico e alla necessità di costruire un'adeguata filiera di tale combustibile, che garantisca il consumatore finale circa la continuità dell'approvvigionamento e lo standard qualitativo del materiale.



Capitolo **Quattro**



Aspetti ambientali

Come più volte ricordato nel corso di questa trattazione, l'impiego di biomasse a fini energetici produce indiscussi benefici di carattere ambientale, benefici che comunemente si manifestano ogni qual volta si attua la sostituzione di fonti di natura fossile con fonti rinnovabili. In generale infatti, oltre a determinare una riduzione nell'utilizzo di risorse che per loro natura sono esauribili, lo sfruttamento energetico delle biomasse, o di qualunque altra fonte rinnovabile, contribuisce anche a limitare in maniera sensibile le emissioni di gas serra, nonché in generale quelle di tutti i composti, come SO_x , NO_x , polveri, che normalmente si sviluppano nei processi di combustione dei prodotti petroliferi. Per tale motivo il ricorso alle biomasse è stata indicata 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.

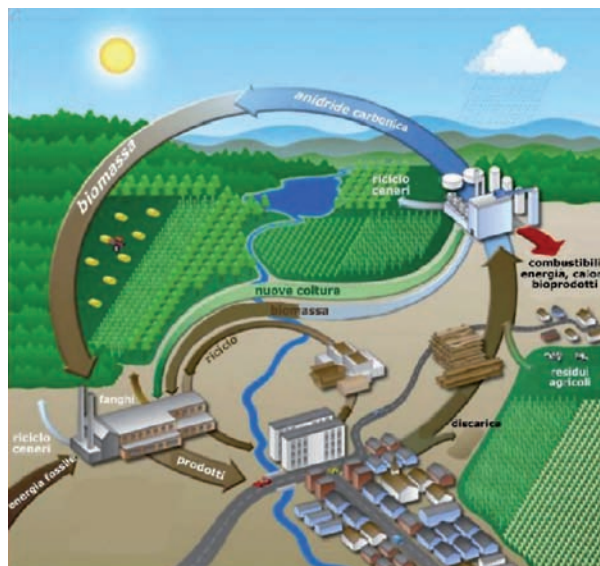
[4.1]

Il bilancio delle emissioni

Le biomasse sono fonti che vengono considerate neutrali rispetto al fenome-

no dell'effetto serra in quanto il loro sfruttamento energetico non comporta un incremento della concentrazione atmosferica di anidride carbonica. Questa infatti, dopo essere stata rilasciata in fase di combustione, viene, durante la crescita delle piante e per mezzo del processo di fotosintesi clorofilliana, nuovamente riassorbita e fissata nei tessuti vegetali sia degli apparati epigei (tronchi, steli, foglie, ecc.), che di quelli ipogei (apparati radicali annuali o perennanti, ecc.). Il ciclo della CO_2 per la biomassa può dunque ritenersi chiuso, ma alla condizione che il ritmo di impiego di questa risorsa non superi la capacità di ricrescita della stessa. Va comunque precisato che, se si considera l'intero ciclo di vita dei combustibili da biomassa, indipendentemente da quale sia il comparto di provenienza, il bilancio della CO_2 non potrà più considerarsi nullo dato che in generale le fasi di produzione, di lavorazione e di trasporto, richiedendo un consumo di materie prime ed energia, produrranno inevitabilmente degli impatti negativi sull'ambiente. Analizzando le diverse tipologie di biomassa, si può ritenere che, durante le fasi di produzione della materia prima vegetale, il maggior livello di inquinamento si raggiunge nell'am-

Figura 4.1
Rappresentazione schematica
del ciclo della biomassa



bito della filiera delle colture dedicate, subito seguita da quelle dei residui forestali, agricoli e industriali.

Nel primo caso, quello cioè relativo alla coltivazione di specie vegetali per usi energetici, le principali fonti di emissione sono determinate perlopiù dall'utilizzo di mezzi agricoli (macchine per la lavorazione del terreno, ecc.) e dall'eventuale impiego in modo sistematico di prodotti come fertilizzanti e diserbanti. Questi strumenti di fatto rendono la coltivazione di biomassa energetica particolarmente impattante dal punto di vista ambientale, soprattutto facendo riferimento alla emissioni atmosferiche, che comunque possono essere sensibilmente ridotte 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 opera-

zioni 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.

Se si prende in considerazione anziché la fase di produzione della materia prima quella relativa alla trasformazione di quest'ultima in prodotti direttamente utilizzabili per le diverse applicazioni energetiche, allora i maggiori consumi di energia, e quindi le maggiori emissioni in atmosfera, si registrano perlopiù durante le operazioni di essiccazione della biomassa realizzate ad esempio per la produzione di pellet e bricchetti. In questo caso il consumo energetico e la quantità di emissioni dipendono ovviamente dal grado di umidità della sostanza vegetale in ingresso, dalle tecnologie adottate e della fonte energetica impiegata per l'essiccazione. Relativamente a quest'ultimo aspetto è possibile infatti sostene-

re che l'impatto sarà massimo nell'ipotesi di utilizzare energia elettrica e minimo nel caso in cui ci si serva dei residui di lavorazione delle biomasse stesse o di cascami termici di qualunque natura. Un altro settore da non trascurare, in relazione alle problematiche ambientali, è poi quello dei biocarburanti in cui i processi produttivi sono anche in questo caso particolarmente complessi e energivori.

Non va dimenticato infine che 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 di quest'ultima infatti, nonché le modalità di trasporto, le capacità di carico e la distanza tra il luogo di produzione e il sito di trasformazione e/o combustione incidono sulla percorrenza media dei mezzi, 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 possibile circoscritti.

[4.2] **Confronto tra le emissioni inquinanti dei principali combustibili di origine vegetale e fossile**

Nel corso della trattazione si è visto che una delle possibili modalità per realizzare lo sfruttamento energetico delle biomasse è quella di mettere a punto dei processi di produzione di biocombustibili, o "biofuel", in grado di sostituirsi ai

combustibili di origine fossile e consentire sensibili riduzioni sul quantitativo di emissioni inquinanti. Di seguito si riportano i dati più significativi per quei biocombustibili (bioetanolo, biodiesel, biogas) che, presentando allo stato attuale delle tecnologie di produzione ormai mature, sono già disponibili a livello commerciale.

L'utilizzo del bioetanolo in autotrazione, puro o in miscela con la benzina, permette di ottenere sia la riduzione delle emissioni in atmosfera generate dal traffico veicolare, che in generale anche un aumento della loro qualità. Tutto ciò trova giustificazione nella struttura chimica del bioetanolo che, rispetto alla benzina, presenta un maggior quantitativo di ossigeno molecolare con una concentrazione in peso superiore di circa il 35% rispetto a quella del tradizionale derivato petrolifero. La maggior presenza di ossigeno, infatti, favorisce in linea generale il completamento del processo di combustione, con evidenti riflessi sia sulla quantità dei prodotti incombusti, che tendono sensibilmente a ridursi, che sulla durata media dei motori.

Se dunque i prodotti di parziale ossidazione (in particolare monossido di carbonio e idrocarburi incombusti), sono presenti allo scarico in misura tanto minore quanto maggiore è la percentuale di bioetanolo in miscela con la benzina, ciò non è valido in assoluto per tutti gli altri composti inquinanti come ad esempio gli ossidi di azoto (NO_x) e l'acetaldeide, che invece aumentano all'aumentare della presenza di ossigeno nel carburante. Per quanto riguarda l'acetaldeide, nonostante si possa raggiungere un incre-

Tabella 4.1 – 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%
Formaldide	+2%	+29%
Acetaldeide	+67%	+21%

nr = dato non riportato

Fonte: Energia Dalle Biomasse, AREA Science Park

mento della sua concentrazione fino al 400% in miscele di bioetanolo al 35% con la benzina, la sua presenza come inquinante è tuttavia tollerata poiché tale composto è caratterizzato da un potere cancerogeno da 10 a 60 volte inferiore rispetto a quello dei principali inquinanti, quali ad esempio il benzene, che si originano dalla combustione dei prodotti di natura fossile. Relativamente alle emissioni di ossidi di azoto invece si ritiene che queste possano essere sensibilmente ridotte, già entro i prossimi 15 anni, introducendo miglioramenti nei sistemi di abbattimento catalitico.

Infine va ricordato che benefici di carattere ambientale, dovuti all'utilizzo del bioetanolo si possono ottenere anche dall'impiego di questo prodotto come additivo antidetonante nella benzina (ETBE), in sostituzione al benzene o all'MTBE. A titolo di esempio, in **tabella 4.1** sono esposte 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%.

Analogamente a quanto riportato finora per il bioetanolo, anche il biodiesel può contribuire a ridurre il livello di emissioni prodotte dai veicoli a motore, soprattutto là dove la loro presenza richiede maggiore attenzione: ovvero in ambito urbano. Per effetto di un più elevato contenuto di ossigeno (11% in peso) rispetto a quello del normale gasolio, il biodiesel è infatti soggetto a una migliore e più completa combustione la quale determina, di conseguenza, una riduzione delle emissioni di monossido di carbonio, di idrocarburi incombusti e di particolato. Come un qualunque altro prodotto derivato da biomasse poi, anche questo biocombustibile non contribuisce di per sé ad incrementare il fenomeno dell'effetto serra e proprio in merito a questo si è stimato che per ogni kg di gasolio sostituito si evita una emissione di CO₂ in atmosfera pari a circa 2,5 kg. Il biodiesel inoltre ha il vantaggio di essere un prodotto non tossico e complessivamente biodegradabile dato che, se disperso nell'ambiente, si dissolve nell'arco di pochi giorni. Questo, che rappresenta sicuramente un beneficio dal punto di vista ecologico, può però diventare un inconveniente dal punto di vista dello stoccaggio, dato che elevata biodegradabilità significa anche minore stabilità chimica. Un altro indubbio vantaggio ottenuto sostituendo il comune gasolio con del biodiesel si ha per il fatto che quest'ultimo, non contenendo composti solforati, rende praticamente nulle le emissioni di ossidi di zolfo, che invece sono presenti, anche se in minima quantità, nei pro-

Tabella 4.2 – Variazione percentuale di alcune emissioni atmosferiche rispetto al gasolio

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%

Fonte: US Department of Energy – DOE

Tabella 4.3 – Confronto tra le principali emissioni del biogas rispetto ai principali combustibili fossili

	SO ₂	NO _x	Polveri
	[kg/TJ]	[kg/TJ]	[kg/TJ]
Oli minerali	140	90	20
Gas	3	90	2
Carbone minerale	300	150	20
Biogas	3	50	3

Fonte: US Department of Energy – DOE

dotti di origine fossile. Contrastanti sono poi i dati relativi agli idrocarburi: se da un lato infatti si riducono 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%), dall'altro aumentano quelle relative agli idrocarburi a catena corta, con un incremento percentuale compreso tra il 10 e il 20%. Essendo poi il biodiesel un composto ossigenato, così come accade per il bioetanolo, aumentano anche in questo caso le emissioni di ossidi di azoto in percentuali variabili tra il 5 e il 23% che comunque saranno verosimilmente ridotte nei prossimi anni attuando miglioramenti nelle prestazioni dei catalizzatori. Infine è bene non trascurare, quando si utilizza biodiesel come combustibile nei motori, il problema causato dalla presenza di un composto

aldeidico dall'odore fortemente irritante noto con il nome di acroleina. In **tabella 4.2** sono sintetizzati i valori relativi alle variazioni dei principali gas inquinanti nella combustione del biodiesel, puro o in miscela, rispetto al gasolio.

Un minore impatto ambientale rispetto ai tradizionali prodotti di origine fossile si ottiene anche utilizzando per fini energetici il biogas derivante dai processi di digestione anaerobica; il confronto, per quanto riguarda le emissioni, con i principali combustibili fossili è riportato in **tabella 4.3**.

[4.3]

Altri benefici ambientali

È importante sottolineare che l'impiego a fini energetici della biomasse generalmente si accompagna a ulteriori benefici ambientali connessi principalmente alla realizzazione di filiere produttive che estendono i loro effetti positivi sia sui comparti di provenienza della materia prima che sulle componenti ambientali ad essi correlate. Per rendersi conto di ciò basti pensare ad esempio a quanto già detto per le biomasse da colture dedicate; queste favoriscono da un lato lo sviluppo del comparto agricolo, rinforzando l'economia delle zone rurali, e dall'altro la presenza di benefici ambientali che si manifestano principalmente su i suoli o sulle falde acquifere. In relazione ad essi, un aspetto molto importante è quello legato alla possibilità di ridurre il loro livello di inquinamento grazie soprattutto al fatto che le biomasse energetiche, a differenza di quelle alimentari, richiedono per la loro

crescita un apporto minore di fertilizzanti e diserbanti ovvero di prodotti chimici che comunque producono un impatto e quindi un danno a livello ambientale. Lo sviluppo di colture dedicate in territori privi di vegetazione, oltre a favorire un generale miglioramento della qualità paesaggistica, contribuisce poi, per effetto delle azioni di copertura e di trattenimento del terreno da parte degli apparati radicali, anche alla conservazione del suolo e alla riduzione dei fenomeni di erosione superficiale prodotti tipicamente dagli agenti atmosferici.

Per quanto riguarda poi la biomassa forestale, si è già detto che per attuare un proficuo sfruttamento energetico di questa risorsa è necessario predisporre un apposito piano di gestione del bosco che sia in grado di garantire comunque le principali funzioni di questo ecosistema; tra cui ad esempio quella di regolazione del regime idrico del terreno sottostante per la prevenzione dei rischi idrogeologici. Le operazioni di esbosco, quali il diradamento delle fustaie o il taglio delle formazioni boschive a ceduo, attuate nell'ambito di un programma che prevede lo sfruttamento energetico del legname, possono inoltre contribuire alla riduzione del rischio di eventi dannosi per l'ecosistema forestale quali ad esempio gli incendi boschivi o le infestazioni di insetti. Gli interventi selvicolturali devono però essere regolati da piani di assestamento forestali, redatti da tecnici competenti, con lo scopo di ottenere una produzione legnosa regolare e continua del tempo, senza compromettere l'evoluzione e rinnovazione del bosco.

Ci sono poi i prodotti della digestione anaerobica; il loro sfruttamento 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 intensivi, 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 grazie alla mineralizzazione della sostanza organica, alla riduzione della carica patogena, alla riduzione delle sostanze fitotossiche nonché all'abbattimento degli odori. Inoltre, da un punto di vista più in generale, questa trasformazione biochimica, determina 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. La sostituzione dei liquami tal quali con fanghi umificati prodotti in digestione anaerobica per la concimazione dei terreni ne migliora la fertilità nonché la stabilità; inoltre il processo anaerobico riduce, rispetto ai sistemi di tipo aerobico convenzionali, la superficie di suolo sfruttata per il trattamento e l'eliminazione dei reflui. Oltre a tutto ciò la captazione del biogas e la sua utilizzazione a fini energetici consente di ridurre le emissioni in atmosfera di metano (CH₄) 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).





Capitolo **Cinque**

Aspetti economici

[5.1]

Gli incentivi alla produzione di biomasse energetiche da colture dedicate

Un primo importante provvedimento volto a sostenere la produzione di biomasse a fini energetici è stato il Dlgs 30 aprile 1998, n. 173 che, insieme al successivo decreto attuativo del MIPAF (n. 401 dell'11 novembre 1999), ha istituito un regime di aiuti in favore della produzione e della utilizzazione di fonti energetiche rinnovabili nel settore agricolo. Attraverso questo intervento legislativo, infatti, si è cercato di indurre le aziende di trasformazione e di commercializzazione dei prodotti agricoli ad investire nelle colture dedicate e più in generale in tutti quei sistemi idonei a ridurre i costi energetici di produzione, l'inquinamento e l'impatto ambientale.

Una svolta significativa nel sostegno delle biomasse energetiche si è avuta però con la riforma della Politica Agricola Comunitaria (PAC) che, attraverso il Regolamento 1782/2003/CE del 29 settembre 2003, ha introdotto varie forme di incentivazione in favore delle colture dedicate. Ai sensi dell'art. 55 del Regolamento, ad esempio, è stabilito che i terreni destinati a colture non alimentari, quindi anche colture energetiche dedicate, siano esen-

ti dall'obbligo di ritiro dalla produzione, obbligo che l'Unione Europea impone al fine di regolamentare il mercato e ridurre le eccedenze di prodotti destinati al consumo umano o animale. Con il Regolamento n. 1973/2004 (articoli dal 143 al 169) è stata poi data ai produttori agricoli la possibilità di utilizzare le superfici ritirate dalla produzione alimentare per scopi non alimentari, ovvero per la produzione ad esempio di materie prime da utilizzarsi nella comunità e quindi anche per la coltivazione di biomasse destinate ad usi energetici. In generale vige l'obbligo della stipula di un contratto tra agricoltore e primo trasformatore della materia prima, obbligo che naturalmente viene superato se l'agricoltore, all'interno della propria azienda agricola, utilizza le produzioni come combustibili oppure le trasforma in biocarburanti o in biogas. L'obbligo inoltre non sussiste quando i terreni ritirati sono destinati alla coltivazione di specie contenute in un elenco fornito in allegato al Regolamento in cui rientrano ad esempio le SRF e il miscanto. I regolamenti europei fissano poi un aiuto nella misura di 45 € per ettaro, per una superficie massima garantita a livello comunitario di 2.000.000 di ettari, in favore dei produttori 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. In ambito nazionale queste direttive sono state recepite con il decreto ministeriale 15 marzo 2005 che ha subito di recente delle modificazioni con il decreto 2 gennaio 2008.

Nel 2007 è stata superata la soglia di 2 milioni di ettari beneficiari dell'aiuto. La Commissione europea ha stabilito un limite massimo dello stanziamento disponibile per questa misura di aiuto pari a 90 milioni di € e ha previsto che al superamento della soglia la superficie per la quale ciascun agricoltore può richiedere l'aiuto è ridotta proporzionalmente, applicando un coefficiente tale da garantire che non sia superato lo stanziamento disponibile. Poiché la superficie nel 2007 ha raggiunto i 2,8 milioni di ettari è stato applicato un coefficiente di riduzione pari a 0,703. Tradotto operativamente, gli agricoltori riceveranno un aiuto di 45 € per ettaro per poco più del 70% della superficie per cui hanno richiesto l'aiuto.

[5.2] Gli incentivi ai biocarburanti

Un primo significativo stimolo al mercato dei biocombustibili si era avuto con la legge 2 dicembre 1998, n. 428 la quale ha autorizzato, a partire dal 1999 e per tre anni, la spesa di circa 2,58 milioni di € da parte del MIPAF per la realizzazione di un "Programma Nazionale Biocombustibili" (PROBIO). Esso rappresentava in realtà uno strumento di attuazio-

ne del PNERB ovvero del programma nazionale energia rinnovabile da biomassa promosso dal ministero delle politiche agricole e forestali il 24 giugno 1998 e avente come obiettivi la riduzione dell'uso di fonti fossili con la produzione di 8–10 Mtep di energia da biomasse agroforestali e zootecniche entro il 2012.

In questo contesto è stato inserito anche un programma nazionale di valorizzazione delle biomasse agricole e forestali (PNVBAF) che, precedendo di qualche mese il progetto PROBIO, ne anticipava in qualche modo i contenuti fissando gli obiettivi di sviluppo delle filiere agroenergetiche per l'ottenimento di biocombustibili solidi destinati ad usi elettrici e termici e di biocombustibili per l'autotrazione e il riscaldamento.

Il programma PROBIO, approvato con delibera CIPE il 15 febbraio 2000, poneva come obiettivo prioritario l'incentivazione di attività dimostrative, divulgative e progetti regionali a forte carattere territoriale che avessero come oggetto la promozione delle filiere bioenergetiche e in particolare lo stimolo del settore dei biocombustibili. Il programma che ha tentato di coinvolgere in particolare le amministrazioni locali, ma anche gli imprenditori agricoli e industriali, era articolato su due livelli. A livello centrale, le azioni venivano coordinate dal MIPAF con il contributo di un gruppo di supporto tecnico-scientifico e delle regioni, che operavano invece su base territoriale nella gestione dei progetti dimostrativi proposti. Numerose regioni hanno usufruito dei fondi PROBIO, tra queste si ricordano: la Basilicata, l'Emilia Romagna, la Lombardia, il Piemonte, la Toscana, l'Umbria, la Valle D'Aosta e il Veneto.

Sempre nell'ambito del progetto PRO-BIO, si sono poi attivate numerose linee di ricerca sulle bioenergie, tra queste si ricordano ad esempio il progetto "Prisco" e il progetto "Tisen". Con il primo si sono condotti studi volti all'identificazione di colture alternative da fibra e cellulosa, da energia, da oli industriali, da amido e biopolimeri nonché di quelle destinate ad usi diversi. Con il secondo invece si è cercato di ottimizzare la produzione e la sostenibilità di specie erbacee annuali, di valutare e costituire nuovo materiale genetico e di identificare itinerari colturali sostenibili per la produzione e la trasformazione industriale.

Uno degli aspetti di maggiore debolezza e criticità nell'utilizzo dei biocarburanti risiede, come visto nel corso della trattazione, negli ancora troppo alti costi di produzione, soprattutto per quanto concerne le voci relative al reperimento della materia prima. Per sopperire a questo inconveniente 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 quindi bioetanolo, ETBE e biodiesel.

In ambito comunitario una prima linea guida sulle politiche di sviluppo dei biocombustibili era stata già data nel 1997 con la stesura del libro bianco sulle fonti energetiche rinnovabili in cui la prima priorità individuata riguardava proprio la riduzione dei costi di produzione e del livello di tassazione. Nel 2003 l'Europa ha dato un ulteriore forte impulso allo sviluppo dei biocombustibili attraverso la direttiva 2003/30/CE sulla "promozione dell'uso dei biocarburanti o di altri carburanti rinnovabili nei trasporti". L'art.

3, in particolare, fissava degli obiettivi strategici, secondo i quali gli stati membri dovevano provvedere affinché si avesse, entro il 31 dicembre 2010, la sostituzione del 5,75% dei carburanti di origine fossile, consumati nel settore dei trasporti, con biocarburanti di origine agricola. Il Dlgs 30 maggio 2005 n. 128 ha recepito tale direttiva adeguando così la legislazione italiana sui biocarburanti alle indicazioni fornite da Bruxelles.

In materia di defiscalizzazione, la Direttiva 2003/96/CE del Consiglio del 27 ottobre 2003 ha ristrutturato, mediante l'abrogazione della Direttiva 92/81/CE, il quadro comunitario sulla tassazione dei prodotti energetici e dell'elettricità, modificando in particolare il panorama relativo alle accise sugli oli minerali e applicando aliquote ridotte sulle miscele contenenti biocombustibili.

Sul fronte della detassazione dei biocarburanti, e in particolar modo del biodiesel, l'Italia si dimostra particolarmente impegnata; tanto che già con la finanziaria 2001 (legge 388/200), viene imposto, nell'ambito di un programma triennale (dal 1 luglio 2001 al 30 giugno 2004), un contingente annuo esente da accisa pari a 300.000 tonnellate. Tale quantità viene ridotta con la finanziaria 2005 (legge 30 dicembre 2004 n. 311) a 200.000 tonnellate, con lo scopo di favorire anche lo sviluppo del bioetanolo per cui vengono stanziati 219 milioni di € in previsione di attuare, anche su questo biocarburante, una riduzione dell'accisa. Il contingente annuo di biodiesel esente viene ritoccato poi dalla finanziaria 2006 che lo porta a 220.000 tonnellate e infine anche dalla finanziaria 2007 (legge 27 dicembre 2006 n. 296) che fissa, per il triennio 2007-2010 e per 250.000 tonnellate, un'aliquota di accisa agevolata pari al 20% di quella

prevista per il normale gasolio. Accise ridotte sono applicate anche a bioetanolo, ETBE e ad altri additivi e riformulati da biomasse con un limite di spesa pubblica comunque non superiore a 73 M€/anno. Il biodiesel immesso sul mercato nazionale viene quasi completamente utilizzato nel settore dei trasporti per ottenere miscele al 5% con gasolio di origine fossile; allo stato attuale il contingente esente viene ripartito tra i diversi impianti di produzione in relazione alla rispettiva capacità produttiva e alla quantità venduta negli anni precedenti. La politica di defiscalizzazione attuata in questi anni dall'Italia costituisce sicuramente un ottimo strumento per incrementarne la competitività nei confronti dei prodotti di origine petrolifera su cui, come noto, le tasse incidono in percentuali rilevanti, anche superiori al 50%, sul prezzo alla pompa. Tra gli ultimi interventi legislativi attuati in favore dello sviluppo dei biocarburanti si ricordano infine la finanziaria 2008 (legge 24 dicembre 2007, n. 244) e il decreto-legge 1 ottobre 2007, n. 159 ad essa collegato. La prima ha elevato la quota minima di biocarburanti da immettere sul mercato nel 2009, quota posta pari al 3% del totale di benzina e gasolio posto al consumo nell'anno solare precedente. Con il secondo provvedimento si è invece stabilito che gli imprenditori agricoli che producono oli vegetali non modificati chimicamente e li impiegano per autoconsumo, quale carburante, nel parco macchine aziendale, fino ad un quantitativo annuo di 5 tonnellate, non sono soggetti al regime di deposito fiscale relativo alla produzione, trasformazione e cessione dei prodotti soggetti ad accisa. Infine si ricorda il "pacchetto 20-20-20" con il quale l'UE ha fissato per tutti gli stati membri una quota minima

sul consumo di biocarburanti che, entro il 2020, non dovrà essere inferiore al 10% rispetto ai consumi complessivi di benzina e gasolio per autotrazione.

Tale direttiva a seguito delle problematiche food e non food e della effettiva attuabilità a livello nazionale ed Europeo, si sta rinegoziando e si prevede un impegno alla copertura soprattutto con biocarburanti di seconda e terza generazione.

[5.3] Gli incentivi alla produzione di energia elettrica

La principale forma di incentivazione dell'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili, quindi anche da biomassa, è quella dei certificati verdi introdotti con il decreto Bersani (Dlgs 16 marzo 1999, n. 79), il quale, tra l'altro, ha ridisegnato il quadro istituzionale e normativo del settore elettrico italiano attuandone la liberalizzazione del mercato. Il Decreto Bersani, che ha subito nel corso degli anni numerose modificazioni, ha sancito l'obbligo per tutti i produttori e gli importatori di energia elettrica da fonti fossili (che introducono in rete più di 100 GWh_e/anno di energia), di immettere nel sistema elettrico nazionale una quota pari al 2% di energia prodotta a mezzo di fonti rinnovabili, biomassa compresa. Per rispondere agli obiettivi fissati dall'unione europea con la direttiva 2001/77/CE (raggiungere entro il 2010 una quota di energia elettrica da fonti rinnovabili pari al 22% del consumo interno lordo), tale obbligo è stato negli anni incrementato; prima dello 0,35% ogni anno dal 2004 al 2006 attraverso il Dlgs 29 dicembre 2003, n. 387 (che ha recepito la direttiva), poi dello 0,75% annuo per il periodo 2007-2012 così come

previsto dall'ultima legge finanziaria (legge 24 dicembre 2007, n. 244). I produttori/importatori di energia elettrica per poter dunque adempiere a tali obblighi hanno due possibilità: o immettere in rete elettricità effettivamente prodotta da fonti rinnovabili, oppure acquistare da altri produttori (titolari di impianti IAFR) titoli comprovanti l'avvenuta produzione di energia "pulita". Questi titoli, chiamati certificati verdi, vengono rilasciati dal GSE e costituiscono per il proprietario del impianto alimentato a fonte rinnovabile una forma di incentivazione dato che essi possono essere commercializzati in un apposito mercato o venduti attraverso semplici accordi bilaterali tra operatori del settore. Con il decreto-legge 1 ottobre 2007, n. 159 (poi convertito in legge) collegato alla finanziaria 2008, il meccanismo di incenti-

vazione dei certificati verdi, per tutti gli impianti IAFR autorizzati in data successiva al 31 dicembre 2007, ha subito importanti modifiche. In particolare, nell'ambito delle biomasse, si è stabilito che a tutti gli impianti alimentati con prodotti e sottoprodotti agricoli, forestali e di natura zootecnica, derivanti da filiere corte (cioè ottenuti entro un raggio di 70 chilometri dall'impianto che li utilizza per produrre energia elettrica) è riconosciuta per 15 anni l'incentivazione indicata in **tabella 5.1**. Tuttavia al momento manca ancora il relativo decreto attuativo a seguito di alcune osservazioni fatte a livello comunitario per garantire il regime di concorrenza.

Per quanto riguarda invece le biomasse di origine vegetale provenienti da filiera lunga e per la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani il decreto collegato alla finanziaria prevede comunque un regime di sostegno, sempre della durata di 15 anni, in cui però il fattore moltiplicativo per l'assegnazione dei certificati verdi è ridotto a 1,1 e la tariffa omnicomprensiva posta pari a 0,22 €/kWh. Tali valori, nonché quelli previsti per biomasse da filiera corta, potranno essere aggiornati ogni 3 anni con decreto del Ministro dello sviluppo economico di concerto con il Ministro delle politiche agricole alimentari e forestali. Sono ammessi agli incentivi anche ai cosiddetti impianti ibridi, che utilizzano cioè sia biomassa sia altri tipi di combustibili, in questo caso però l'incentivo verrà erogato solamente per la quota parte di energia prodotta da fonte rinnovabile. Attualmente è inoltre prevista la possibilità di cumulare tali contributi con altri incentivi pubblici di natura nazionale, regionale, locale o comunitaria in conto capitale o in conto interessi con capitalizzazione anticipata, purché non eccedenti il 40% del costo totale dell'investimento e

Tabella 5.1 – Incentivazione per impianti alimentati con prodotti e sottoprodotti agricoli, forestali e di natura zootecnica, derivanti da filiere corte

Impianti con potenza installata > 1MW_e

A questi impianti vengono riconosciuti dei certificati verdi "agricoli" in numero pari ai MWh prodotti moltiplicati per un coefficiente pari a 1,8. Il prezzo di riferimento di tali certificati sarà fissato a partire dal 2008 dalla differenza tra il valore di 180 € per MWh e il valore medio annuo del prezzo di cessione dell'energia elettrica definito dall'Autorità per l'energia elettrica. L'incentivazione è riconosciuta per 15 anni.

Impianti con potenza installata ≤ 1MW_e

A questi impianti è riconosciuta, a scelta del produttore, o la stessa tipologia di incentivazione vista per le taglie superiori al Megawatt, oppure, in alternativa, una tariffa fissa omnicomprensiva pari a 0,30 €, che viene liquidata mensilmente, per ogni kWh prodotto e immesso in rete. Si dà inoltre la possibilità agli impianti di potenza fino ai 200 kW_e di accedere al servizio di scambio sul posto con modalità simili a quelle già previste dalla finanziaria 2007 per i sistemi fotovoltaici attraverso l'incentivazione in "conto energia". Un'ulteriore agevolazione per gli impianti di piccola taglia (< 200 kW_e) è rappresentata dal fatto che questi, per poter accedere agli incentivi, non sono soggetti ad autorizzazione, ma ad una semplice dichiarazione di inizio attività (DIA), che permette di abbreviare sensibilmente i tempi burocratici. L'incentivazione è riconosciuta per 15 anni.

Autorizzazioni per impianti energetici

La realizzazione sul territorio di un impianto energetico richiede una serie di autorizzazioni il cui rilascio, a causa del decentramento amministrativo, viene sempre più demandato alle amministrazioni locali. Per quanto riguarda gli impianti RES (alimentati con fonti rinnovabili) di potenza inferiore ai 50 MW_t si fa riferimento, relativamente a realizzazione, esercizio e emissioni in atmosfera, al Dlgs 387/03, sebbene sia comunque necessario effettuare verifiche direttamente con le amministrazioni locali di competenza. Per questi impianti viene rilasciata un'*autorizzazione unica* una volta presentata:

- la modulistica predisposta dall'autorità locale competente;
- il progetto definitivo con i relativi elaborati tecnici di supporto;
- la relazione tecnica impiantistica ed emissioni;
- la relazione antincendio ai vigili del fuoco.

Se il combustibile utilizzato rientra poi nella normativa sui rifiuti, la richiesta di autorizzazione unica deve essere fatta ai sensi dell'art. 208 del Dlgs 152/06 per quanto riguarda la realizzazione e l'esercizio dell'impianto, nonché ai sensi dell'art. 269 dello stesso decreto per quanto riguarda le emissioni in atmosfera.

Gli impianti energetici di potenza superiore ai 50 MW_t sono invece assoggettati all'*Autorizzazione Integrata Ambientale* (AIA, procedura IPPC) così come disposto dal Dlgs 59/2005. Questa comprende le autorizzazioni relative a realizzazione ed esercizio dell'impianto, emissioni in atmosfera e scarico delle acque, e tutti i pareri e nulla-osta in precedenza necessari. La documentazione per l'AIA dovrà comprendere i seguenti elaborati:

- progetto definitivo con relazione tecnica, tavole e planimetrie;
- studio di impatto ambientale,
- modulistica e relazioni tecniche IPPC.

Per quanto riguarda infine la procedura di VIA (Valutazione di Impatto Ambientale), questa, condotta ai sensi del DPCM 377/88 e successive integrazioni e/o modifiche, dovrà essere avviata:

- per impianti energetici di capacità > 50 MW_e;
- per impianti energetici di capacità > 50 MW_t che ricadono in aree protette;
- per impianti energetici di capacità > 50 MW_t che pur non ricadendo in aree protette presentino, a giudizio della regione, particolari caratteristiche di impatto secondo quanto riportato nell'all. IV, parte II del Dlgs 152/06.

La documentazione per la VIA dovrà comprendere i seguenti elaborati:

- progetto definitivo con relazione tecnica, tavole e planimetrie;
- relazioni tecniche specifiche, ove richieste (rumore, diffusione delle emissioni, ecc.);
- studio di impatto ambientale.

solo per gli impianti che entreranno in funzione entro il 31/12/2008.

Per quanto detto fin ora si è quindi di fronte ad un sistema incentivante che rappresenta un'opportunità molto interessante sotto il profilo economico e che permetterà di sviluppare un modello di filiera corta o filiera integrale, in cui saranno proprio gli agricoltori che, oltre a produrre le colture energetiche, le trasformeranno in energia elettrica attraverso impianti gestiti direttamente da loro e senza l'intermediazione dell'industria. Per una piena applicazione delle ultime disposizioni di legge dovranno comunque essere emanati i necessari decreti attuativi indispensabili a chiarire maggiormente alcuni aspetti procedurali di estrema importanza. Sarà infatti necessario ad esempio indicare le modalità con le quali gli operatori sono tenuti a garantire la tracciabilità e la rintracciabilità della filiera, stabilire i criteri per la destinazione delle biomasse combustibili a scopi alimentari, industriali ed energetici, o ancora definire le modalità per assicurare la transizione dal precedente sistema di incentivazione ai nuovi meccanismi, con particolare riferimento al nuovo conto energia per gli impianti inferiori al MW.

La legge 24 dicembre 2007, n. 244 (finanziaria 2008) dà inoltre la possibilità di accedere fino al 31 dicembre 2010, prorogando così di fatto il comma 344 della finanziaria 2007, alla detrazione fiscale IRPEF del 55% prevista per le spese sostenute e documentate relative ad interventi di riqualificazione energetica di edifici esistenti. In questo ambito è possibile far rientrare anche la sostituzione del generatore di calore con una caldaia alimentata a biomassa che di fatto rende pari a zero il fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione inver-

nale. Per poter accedere allo sgravio fiscale è comunque necessario rispettare dei requisiti minimi di efficienza energetica, così come previsto dall'art. 6 del DM 20/7/2004. In particolare, per le caldaie a biomassa di potenza inferiore ai 300 kW, l'efficienza deve essere compatibile con la classe 3 della norma EN 303-5; mentre per le caldaie di potenza superiore ai 300 kW si deve verificare un rendimento superiore all'82%. La rispondenza a tali requisiti deve essere riportata nell'asseverazione compilata dal tecni-

co abilitato; inoltre, ai sensi della normativa vigente, è obbligatorio il rispetto dei limiti di emissione fissati dal Dlgs 3 aprile 2006, n. 152. È inoltre previsto che per le forniture di componenti considerati "non significativi" per l'impianto, nonché per le prestazioni di servizi (come installazione o manutenzione), il proprietario paghi un'aliquota IVA ridotta al 10%. Se il bene fornito è "significativo", come ad esempio la caldaia, allora l'IVA da applicarsi va calcolata ai sensi dell'art. 7 della legge 488/99.





Capitolo Sei

La Sicilia e le biomasse

[6.1] Il Programma di Sviluppo Rurale

Un importante strumento di incentivazione del settore agro-energetico siciliano è rappresentato dal *Programma di Sviluppo Rurale (PSR) 2007–2013*. Con esso si sono pianificati, per un periodo di sette anni, gli interventi necessari a sostenere sia lo sviluppo del settore agricolo, alimentare e forestale, che la conservazione e valorizzazione sostenibile dei territori rurali della regione. Il Programma si articola su quattro "Assi" e circa 30 "Misure", ognuna delle quali definisce uno specifico ambito di intervento. Tra le varie priorità si ha, ad esempio, sia quella di aumentare la produzione di biomassa, attraverso un rafforzamento del comparto agricolo e forestale, che quella di ridurre le emissioni di gas serra (in particolare metano e protossido di azoto), favorendo la diffusione di pratiche agronomiche e di allevamento a basso impatto ambientale e realizzando l'ampliamento della superficie boschiva regionale. Le misure che interessano il settore agro-energetico sono:

Misura 121: ammodernamento delle aziende agricole

In essa si dà sostegno alla realizzazione di investimenti mirati:

- al risparmio energetico e alla produzione di energia da fonti rinnovabili in impianti di capacità inferiore a 1 MW,
- alla realizzazione di nuovi impianti di piantagioni arboree a ciclo breve (short rotation), per la produzione di biomasse a finalità energetica purché sostenibili dal punto di vista ambientale.

Gli aiuti finanziari vengono erogati in favore degli imprenditori agricoli singoli o associati (in forma di cooperative, di società di persone o di società di capitali) dando priorità ai giovani o a coloro che appartengono ad organizzazioni di produttori riconosciute (OO.PP). Le imprese devono però:

- possedere, al momento della presentazione della domanda, un livello minimo di reddito che dipende essenzialmente dalla loro collocazione sul territorio regionale (suddiviso in 4 aree rurali),
- presentare un piano aziendale degli investimenti,
- soddisfare dei requisiti minimi in materia di ambiente, igiene e benessere degli animali.

Il contributo economico, che può essere erogato in conto capitale, in conto interessi o in forma combinata, sarà:

- per le zone montane, per le zone caratterizzate da svantaggi naturali o per quelle ricadenti nei territori "Natura 2000" (zone ad alto valore naturale inse-

rite nel sistema regionale delle aree protette), pari al 60% o al 50% del costo dell'investimento ammissibile, a seconda che questo sia realizzato da giovani agricoltori o non;

- per le altre zone, pari al 50% del costo dell'investimento ammissibile, se richiesto da giovani, al 40% se richiesto da altri agricoltori.

La dimensione finanziaria massima dell'investimento complessivo per ciascuna azienda per il periodo 2007–2013 non potrà comunque eccedere 1.500.000 €, per gli investimenti riguardanti la fase produttiva, e 2.500.000 € nel caso di investimenti di filiera.

Misura 124: cooperazione per lo sviluppo di nuovi prodotti, processi e tecnologie nei settori agricolo e alimentare, e in quello forestale

La misura sostiene progetti di cooperazione tra i produttori primari nei settori agricolo e forestale e i soggetti, pubblici o privati, operanti nel settore della ricerca e della sperimentazione pre-competitiva. Attraverso il coordinamento da parte dell'Assessorato regionale dell'agricoltura, si favorisce così:

- il trasferimento applicativo e il collaudo dei risultati della ricerca (ottenuti anche in ambito extraregionale) all'interno delle imprese, in modo da incentivare lo sviluppo dell'economia agro-forestale regionale e nello specifico la produzione di biomasse per energia rinnovabile,
- l'introduzione, e la relativa diffusione, di azioni innovative riguardanti i processi, i prodotti e le tecnologie connesse con le varie fasi della filiera.

Il sostegno economico, erogato in conto capitale per un massimo di 1 milione di €, è finalizzato dunque a coprire i costi sostenuti per la realizzazione del progetto di

cooperazione. Il livello contributivo è pari al 100% dell'importo complessivamente ammesso a finanziamento, nel quale possono rientrare ad esempio le spese sostenute per:

- l'acquisto di beni e attrezzature strettamente necessarie allo sviluppo di nuovi prodotti, processi e tecnologie,
- l'acquisto di brevetti, software, licenze, studi,
- consulenze specialistiche finalizzate all'acquisizione di know how,
- attività professionali realizzate dal personale dipendente delle imprese beneficiarie, nel limite dei tempi specificatamente dedicati alla realizzazione del progetto,
- spese generali nei limiti del 10% delle spese ammissibili del progetto.

Misura 214/1C: adozione di avvicendamenti colturali per il miglioramento della struttura del suolo

L'obiettivo è quello di contribuire alla riduzione dei fenomeni di erosione/dilavamento e diminuzione della fertilità dei suoli che hanno interessato, in maniera rilevante, soprattutto il comparto dei cereali autunno-vernini coltivati in monocoltura. A tal fine la misura prevede un aiuto economico per tutti gli imprenditori agricoli, singoli o associati, proprietari di almeno 20 ha in aree a rischio di desertificazione o aree che presentano un rischio di erosione superiore a 2 t/ha/anno. Tale aiuto viene concesso a coloro che attuino una rotazione colturale almeno triennale che preveda l'alternanza di: una coltura da rinnovo, una coltura cerealicola e una miglioratrice (come leguminose da granella o da foraggio) che abbia effetti positivi sulla fertilità complessiva del suolo e che contrasti il decli-

no della sostanza organica. Con questa forma di incentivazione si favorisce dunque il minor impiego di fertilizzanti azotati (responsabili delle emissioni di protossido di azoto, pericoloso gas serra) e l'aumento nella produzione di biomassa per usi energetici vista la necessità di prevedere, in una possibile rotazione quinquennale, almeno due "colture proteaginose e/o colture no food". Il sostegno, concesso su base annua per l'avvicendamento del seminativo, è pari a 100,00 €/ha e non potrà essere cumulato con gli incentivi previsti dalla PAC (Regolamento CE 1782/2003) per i seminativi o per le colture energetiche.

Misura 311: diversificazione verso attività non agricole

Questa misura si prefigge l'obiettivo di consolidare l'occupazione nelle aree rurali sostenendo lo sviluppo di attività produttive che possano integrare il normale reddito dell'imprenditore agricolo. Tra le possibili forme di diversificazione vi è ad esempio la produzione di energia da fonti rinnovabili, con la quale è possibile ridurre i costi di approvvigionamento energetico, e talvolta realizzare anche un aumento dei ricavi grazie alla vendita della frazione energetica eccedente i fabbisogni aziendali. Gli investimenti, connessi al settore delle biomasse, per i quali è previsto un aiuto economico riguardano la realizzazione di:

- impianti di raccolta, cippatura, pellettizzazione e stoccaggio di biomasse agro-forestali,
- centrali termiche con caldaie alimentate prevalentemente a cippato o a pellet,
- impianti per la produzione di biogas dai quali ricavare energia termica e/o elettrica,

- piccoli impianti di produzione e stoccaggio di bio-combustibili (biodiesel),
- impianti di co-generazione per la produzione combinata di elettricità e calore,
- impianti ausiliari finalizzati alla realizzazione delle tipologie previste ai punti precedenti.

Tali investimenti, condotti all'interno dell'azienda agricola, devono comunque essere finalizzati alla realizzazione di impianti aventi potenza fino ad un massimo di 1 MW e, una volta costruiti, dovranno essere mantenuti operativi per un periodo di almeno 5 anni. Gli interventi devono poi essere corredati di un progetto definitivo di fattibilità, provvisto di tutte le autorizzazioni necessarie, e di un piano che dimostri che le operazioni di approvvigionamento e trasporto della biomassa presentino un bilancio ambientale vantaggioso. Se il beneficiario non è in grado di coprire autonomamente le fasi di produzione della sostanza organica, trasformazione e vendita del prodotto finale si richiede allora la presentazione di un progetto di filiera che deve essere sottoscritto da tutti i partecipanti. Gli aiuti saranno erogati sotto forma di contributi in conto capitale e/o in conto interessi, o in forma combinata, con un'intensità pari al 45% delle spese ammesse; inoltre gli imprenditori agricoli che accedono a questa forma di incentivazione non potranno, per gli stessi interventi, usufruire degli aiuti previsti nell'ambito della misura 121.

Misura 312: sostegno alla creazione e allo sviluppo di micro-imprese

Si tratta di una misura per molti versi simile alla precedente con la quale si dà sostegno a tutte quelle iniziative rivolte alla creazione e al rafforzamento di microimprese in settori extra-agricoli, che riman-

gano comunque fortemente collegate e/o integrate al settore primario e al territorio.

Tra le attività oggetto di finanziamento vi è ad esempio la produzione e vendita di energia da fonti rinnovabili che potrà, relativamente al comparto delle biomasse, realizzarsi attraverso gli stessi interventi visti nella misura 311. Il livello contributivo riconosciuto, concesso ancora in conto capitale, in conto interessi, o in forma combinata, è pari al 75% del costo dell'investimento, con un importo complessivo massimo erogabile ad una medesima impresa che non può superare i 200.000 € nell'arco di tre esercizi finanziari.

Misura 321: servizi essenziali per l'economia e la popolazione rurale

La misura è volta a favorire lo sviluppo di servizi essenziali, per la popolazione e per le imprese, funzionali al miglioramento della qualità della vita nelle aree rurali, così che si possa rallentare l'esodo della popolazione (in particolare di quella giovanile) e migliorare l'attrattività del territorio per la localizzazione di nuove aziende. Tra le iniziative finanziabili vi è anche quella legata alla realizzazione in edifici pubblici di piccole centrali termiche alimentate da biomasse agro-forestali di provenienza locale. In questo ambito i potenziali beneficiari del contributo economico possono essere: la regione Siciliana (nella figura dell'assessorato dell'agricoltura e delle foreste), enti locali territoriali (in forma singola o associata) o enti pubblici e loro consorzi. Per le piccole e medie imprese, in forma singola e associata, l'aiuto è erogato con un'intensità pari al 45% della spesa ammessa, mentre per i soggetti pubblici si può arrivare fino al 100%. In ogni caso comunque i progetti, finanziati dal FEASR (Fondo Europeo Agricolo Sviluppo Rurale) non

possono superare l'importo massimo di 300.000 €.

Per investimenti più costosi, o per la realizzazione di impianti di potenza superiore a 1 MW, si fa riferimento invece all'asse 2 del POR FESR 2007-2013 (Programma Operativo Regionale Fondo Europeo Sviluppo Regionale). Attraverso questo strumento la regione, tra i vari obiettivi, intende anche sostenere la realizzazione di impianti alimentati da fonti rinnovabili, privilegiando in particolar modo gli interventi in grado di attivare filiere produttive riguardanti le tecnologie energetiche, agroenergetiche e i biocarburanti. Il POR si può dunque ritenere in sinergia sia con le azioni di incentivazione alla produzione di colture energetiche no food, già previste nell'ambito della PAC, che con le misure contenute nel programma di sviluppo rurale.

[6.2]

Il progetto Fi.Sic.A

Un primo passo verso l'implementazione di una filiera agro energetica in Sicilia si è compiuto nel 2006 con l'istituzione, da parte del dipartimento interventi infrastrutturali dell'assessorato regionale agricoltura e foreste, del *progetto Fi.Sic.A.* (Filiera Siciliana per l'Agroenergia). Obiettivo del progetto è quello di identificare e valutare colture energetiche agronomicamente ed economicamente idonee ad entrare in rotazione con il grano duro evitando così l'abbandono dei terreni e garantendo un surplus di reddito agli agricoltori. Una prima sperimentazione è stata avviata nell'annata agraria 2006/2007 in 28 differenti aziende agricole dislocate in sette

delle nove province dell'isola. Su una superficie complessiva di 56 ha si sono ottenuti circa 650 quintali di *Brassica Carinata* (varietà Sincron), una coltura oleaginosa a destinazione energetica, particolarmente apprezzata per la possibilità di ricavare dai suoi semi olio da destinarsi alla produzione di biodiesel. I motivi che hanno condotto alla scelta di questa specie vegetale sono sostanzialmente:

- adattabilità alle condizioni pedoclimatiche siciliane e in particolare alle ampie escursioni termiche (fino anche a 20 gradi),
- elevato contenuto di olio,
- capacità di competere con le piante infestanti,
- buona resistenza alla deiscenza,
- possibilità di utilizzare lo stesso parco macchine impiegato nella coltivazione del grano duro.

Le analisi condotte sul bio-olio estratto (resa media del 43%) hanno poi manife-

stato l'assoluta idoneità alle applicazioni motoristiche da parte di questo prodotto che presenta addirittura caratteristiche mediamente migliori rispetto a quelle dei più comuni oli vegetali grezzi (olio di girasole). In particolare si ha:

- potere calorifico superiore alla media (≈ 40 MJ/kg),
- basso contenuto di fosforo, al di sotto dei limiti imposti dalle specifiche di alcuni costruttori,
- valori di viscosità e contenuto di acqua nella media degli oli grezzi.

Interessanti sono anche le applicazioni cui può essere destinato il pannello proteico derivante dalla spremitura dei semi che trova impiego non solo come fertilizzante organico ma anche come biomassa per fini energetici. Nonostante infatti un contenuto di ceneri medio alto (intorno al 7%), questo prodotto, grazie al basso tenore di umidità e alla porzione residua di sostanza oleosa non estratta, presenta un soddisfacente potere

Figura 6.1 – Varie fasi della coltivazione della *Brassica carinata*



calorifico superiore che può raggiungere anche i 20 MJ/kg. C'è però da considerare anche la bassa temperatura di fusione delle ceneri (prossima agli 800 °C) che può creare problemi in fase di combustione, favorendo la formazione di agglomerati. Tale pannello, opportunamente miscelato con biomasse caratterizzate da ceneri alto fondenti, è quindi impiegabile in caldaie di medio-grandi dimensioni nelle quali è più efficace il controllo della temperatura di combustione.

Altro sottoprodotto ottenuto dalla coltivazione della *Brassica carinata* è la paglia, che da un punto di vista energetico è paragonabile a del materiale lignocellulosico con basso tenore di umidità (il p.c.i., che risulta paria a circa 13 MJ/kg, è nella media) e alto contenuto in ceneri (temperatura di fusione molto bassa, ≈600 °C). L'applicazione più promettente appare, come per il pannello, la combustione in caldaie medio-grandi, mentre non si è dimostrato finora interessante l'impiego nella produzione di pellet commerciale, a meno di non considerare l'eventualità di miscelare la paglia con residui vegetali (ad esempio tralci di vite) caratterizzati da ceneri alto fondenti.

Nonostante i buoni risultati fin qui raggiunti, l'attività di ricerca è in pieno svolgimento grazie anche al sempre maggiore interesse mostrato in questo senso dal mondo agricolo e industriale che ha portato a stipulare, per l'annata agraria 2007/2008, contratti di coltivazione per circa 600 ha in cui è garantito il ritiro dell'intera produzione ad un prezzo di 26 €/q. Gli studi sono in particolare mirati a:

- affinare la tecnica colturale, quindi le operazioni di semina, diserbo, ecc.,
- attuare miglioramenti genetici sulla

Brassica carinata al fine di aumentarne la resistenza al freddo, alla deiscenza e quindi ottenere una maggiore resa,

- verificare gli effetti dell'avvicendamento Brassica carinata – grano duro,
- migliorare la valorizzazione dei sottoprodotti.

L'obiettivo finale in sostanza è quello di creare una filiera corta, così che ogni agricoltore, attraverso i fondi del PSR, possa essere messo in condizione di coltivare e nello stesso tempo convertire energeticamente il proprio raccolto.

[6.3]

Il potenziale da biomassa in Sicilia

Un elemento cruciale nel valutare la fattibilità di un impianto di produzione energetica da biomasse è quello di analizzare in dettaglio l'approvvigionamento di questa risorsa, sia nel caso in cui si intenda produrre biomassa tramite colture dedicate, sia quando il progetto da realizzare sia basato sull'uso di residui ottenibili dal settore agroforestale o da quello agroindustriale. L'approvvigionamento deve infatti assicurare la quantità di biomassa necessaria ad un costo compatibile con la remuneratività della costruzione ed esercizio dell'impianto. Il costo della biomassa dipende da molteplici fattori, tra i quali la quantità, la tipologia e la distanza tra luogo di produzione/raccolta e impiego finale. Questi elementi riguardano primariamente coloro che promuovono la costruzione di un impianto di generazione di energia, ma sono sicuramente di interesse anche per l'amministrazione pubblica che è chiamata ad approvare e autorizzare l'opera valutando, in relazione

Tabella 6.1 – Produttività annua teorica di biomassa su base provinciale

Province	Paglie	Potature alberi da frutto	Sarmenti	Frasche di olivo	Totale Potature	Legno da conifere	Legno da latifoglie	Totale legno forestale	Totale biomassa legnosa
	ton s.s./anno	ton s.s./anno	ton s.s./anno	ton s.s./anno	ton s.s./anno	ton s.s./anno	ton s.s./anno	ton s.s./anno	ton s.s./anno
Trapani	128.720	306	128.508	26.250	155.064	2.153	6.301	8.453	163.517
Palermo	304.640	8.537	33.020	28.588	70.145	57.921	18.868	76.789	146.934
Messina	6.828	25.681	3.298	43.903	72.881	149.522	4.819	154.341	227.222
Agrigento	154.882	32.976	54.862	32.144	119.982	9.610	20.470	30.081	150.063
Caltanissetta	183.052	17.129	20.904	10.863	48.895	31.530	1.100	32.630	81.525
Enna	213.040	26.118	1.050	20.325	47.493	44.404	3.428	47.832	95.325
Catania	125.900	12.712	16.312	16.888	45.911	44.550	10.454	55.003	100.914
Ragusa	84.680	14.058	8.522	8.063	30.643	1.066	9.944	11.011	41.654
Siracusa	70.238	16.967	3.912	13.875	34.754	13.160	2.364	15.524	50.278
Totale	1.271.981	154.483	270.388	200.897	625.768	353.916	77.748	431.664	1.057.432

alla reale disponibilità/potenzialità della biomassa in un dato territorio, gli eventuali impatti legati alla logistica (movimentazione) di questa risorsa e la sostenibilità di lungo periodo dell'iniziativa. È quindi utile disporre di informazioni circa il potenziale di biomassa producibile o disponibile in un dato ambito territoriale al fine di determinare se e come uno o più impianti possano trovare biomassa sufficiente, per quantità e tipologia, al proprio funzionamento in continuo.

La **tabella 6.1** riporta il quantitativo di biomassa (residuale agricola e forestale) teoricamente producibile annualmente nelle diverse province siciliane e utilizzabile per scopi energetici. La stima è stata effettuata applicando una metodologia statistica sviluppata dall'ENEA in collaborazione con l'AIIA (Associazione Italiana Ingegneria Agraria). Tale procedura di calcolo, ad esempio, per definire con ragionevole accuratezza le quantità di scarti agricoli su base provinciale fa riferimento al rapporto esistente tra produzioni prin-

cipali (ovvero frutta, cereali, legumi, ecc.), stimati annualmente dall'ISTAT, e i residui ad esse associati. L'analisi condotta per la regione Sicilia ha preso in considerazione le seguenti specie colturali:

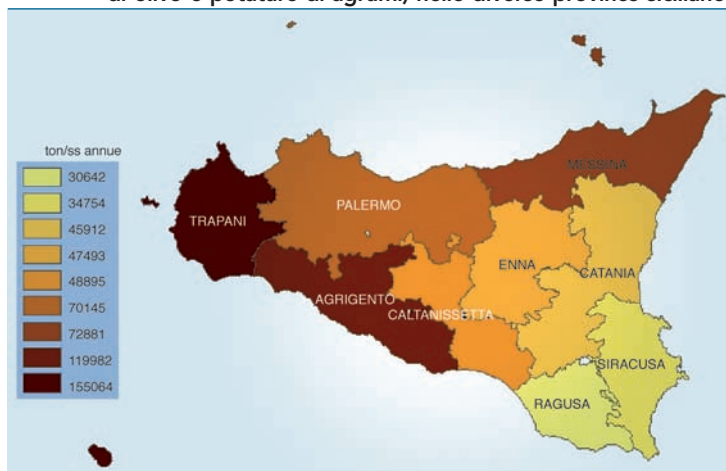
- *erbacee*: frumento tenero e duro, orzo e avena, che danno come prodotto residuale la paglia, (altre colture sono state escluse in quanto poco significative in termini di superfici investite e/o caratterizzate da scarti difficilmente recuperabili);
- *arboree*: vite da vino, olivo, agrumi, pesco, albicocco, melo, pero, mandorlo e nocciolo dalle cui operazioni di potatura è possibile ricavare biomassa legnosa (i criteri di inclusione e esclusione sono analoghi a quelli visti per le colture erbacee).

A questa tipologia di biomassa si aggiunge poi quella di natura lignocellulosica ricavabile dal comparto forestale in seguito a operazioni di manutenzione (taglio e raccolta) di boschi di conifere e di latifoglie. In **tabella 6.1** sono riportati i risulta-

Fig. 6.2 Disponibilità massima di paglie di cereali nelle diverse province siciliane



Fig. 6.3 Disponibilità massima di potature (sarmenti di vite, frasche di olivo e potature di agrumi) nelle diverse province siciliane



ti dell'analisi disaggregati per provincia; i valori, espressi in tonnellate di sostanza secca producibile annualmente, esprimono la disponibilità massima teorica di biomassa per usi energetici, disponibilità che nella realtà operativa subisce l'influenza di diversi fattori tra cui: tecnica colturale, condizioni pedoclimatiche, tecniche di raccolta, aspetti fitopatologici, ecc.. Come appare evidente, in Sicilia, il più

grosso potenziale disponibile è quello dei sottoprodotti delle colture agricole, cioè di paglie di cereali e di potature (sarmenti di vite, frasche di olivo e potature di agrumi); mentre più limitata è la disponibilità di biomassa legnosa derivante dal comparto forestale.

È importante rimarcare che la stima sopra riportata si riferisce alla producibilità massima teorica, e tiene conto delle superfici agricole coltivate e delle estensioni forestali nel 2006, con una *produttività* massima che appare di poco superiore alle 2.300 kton/anno (paglie + totale biomassa legnosa).

Per effettuare una stima della *disponibilità agli usi energetici* è necessario sottrarre alla producibilità teorica i quantitativi di paglia, legna e residui agroindustriali che sono stati conferiti al mercato e riutilizzati in azienda. Una stima di questo genere, condotta nel 1990, aveva rilevato un quantitativo disponibile di 1.300 kton annue.

L'analisi del mercato siciliano delle biomasse è attualmente in corso (il Ministero dello Sviluppo Economico ha finanziato l'indagine con un accordo di programma CERSE affidato a ENEA); i risultati di questo studio permetteranno di stimare il valore aggiornato di disponibilità agli usi energetici.

I dati a cui si perverrà restituiranno un dato di potenziale netto al territorio, cioè la quantità di biomassa che, al netto dei riusi aziendali/locali, è potenzialmente disponibile sul territorio, cioè presso le singole aziende agricole e forestali e/o presso le strutture di trasformazione agroindustriale.

Tale dato costituisce una prima informazione di natura quantitativa ed evidenza che entro determinati confini territoriali, in questo caso le province, esistono quanti-

Fig. 6.4

Disponibilità massima di legno forestale nelle diverse province siciliane

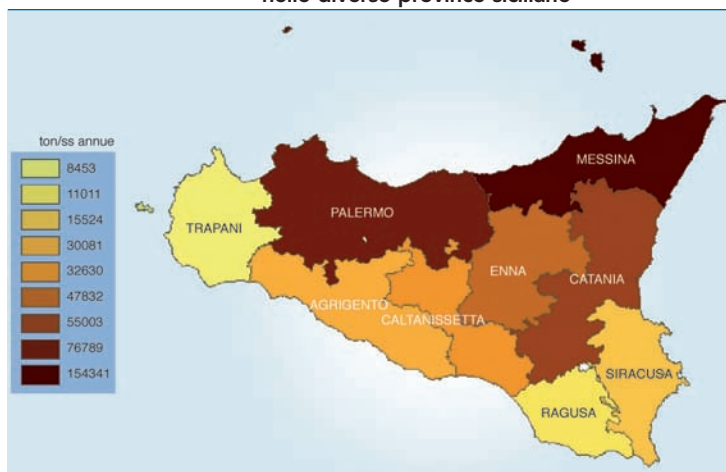
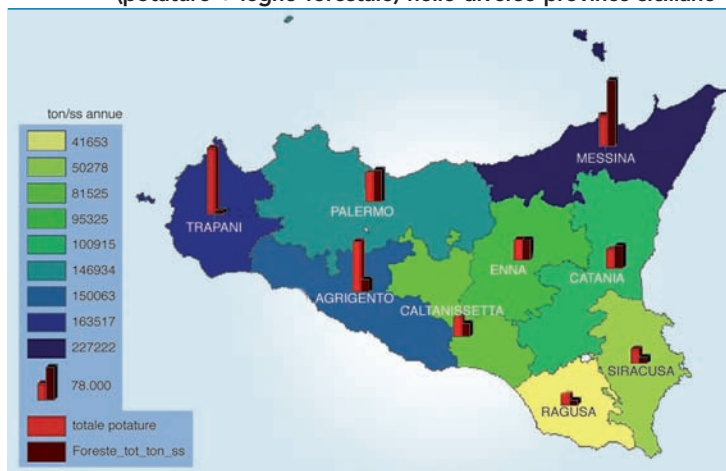


Fig. 6.5

Disponibilità massima complessiva di biomassa legnosa (potature + legno forestale) nelle diverse province siciliane



tà significative di biomasse suscettibili di impiego. Questo potenziale è comunque teorico e sono necessarie altre elaborazioni per arrivare a definire il potenziale reale, cioè quella quantità di biomassa che nelle condizioni economiche, organizzative e tecnologiche date può essere raggiunta, raccolta e concentrata per usi energetici. Per poter effettivamente ragionare in termini di politiche e/o di azioni e trasformare tale potenziale in una reale opportunità per il territorio, arrivando a ipotizzare quale tipologia di impianti, di quale taglia e dove realizzarli, è necessario conoscere per prima cosa la effettiva distribuzione di tali biomasse, nello spazio e nel tempo, cioè il loro livello di dispersione e la loro stagionalità e incrociare tali informazioni con il peso che assumono altri fattori immutabili come la morfologia del territorio, l'ampiezza e la posizione delle aziende agricole e la disponibilità della rete stradale. Gli strumenti di analisi spaziale dei moderni GIS consentono, quando siano disponibili dati adeguati, di arrivare a definire il potenziale reale. Di seguito vengono infine riportate, a titolo di esempio, alcune mappe tematiche raffiguranti la disponibilità massima delle suddette biomasse nel territorio siciliano.

Bibliografia

- AA.VV., *L'impatto ambientale di centrali elettriche alimentate a biomasse legnose. Esperienze e valutazioni*, a cura di Mario Conti, ENEA, Roma, 2003.
- AIGR, *Potenzialità energetica da biomasse nelle regioni italiane*, rapporto redatto su contratto ENEA (non pubblicato), 1994.
- ANPA-ITABIA, *Biomasse agricole e forestali, rifiuti e residui organici: fonti di energia rinnovabile. Stato dell'arte e prospettive di sviluppo a livello nazionale*, 2001
- APAT, *Le Biomasse Legnose*, Rapporto APAT 30/2003.
- Bartolelli V., *Disponibilità di biomasse sul territorio italiano e aspettative reali di sfruttamento*, ITABIA, 2003.
- Bioenergy in the United States: progress and possibilities*, in Biomass and Bioenergy, Vol 18, n.6 pp 441-445, 2000.
- Braccio G., Matera D.A., Motola V., *Biomass Availability from Agricultural Residues as Renewable Energy Source*, 2nd World Conference and Technological Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Rome, Italy, 10-14 May 2004.
- Cardinale M., D'Alessandro A., Matera D.A., Motola V., Braccio G.: *Valutazione GIS del potenziale energetico da biomasse lignocellulosiche nella regione Basilicata*, Rapporto tecnico ENEA, 2006.
- Castellazzi L., *Le tecnologie di utilizzo delle biomasse: aspetti tecnici economici*, corsi SICENEA, www.sicenea.it, 2008.
- Chiaromonte D., Martelli F., Galante R., Celli M., Colognesi D., Zoppi M., *Produzione di idrogeno da fonti fossili e rinnovabili*, Università degli Studi di Firenze – Dipartimento di Energetica "S. Stecco" e CNR – IFAC, 2004.
- Consorzio SEED, *Utilizzo energetico della Biomassa*, 2001.
- Cook J., Beyea J., *Biomass, energy, and environmental Forest Ecology and Management*, Vol. 95, Issue 1, pp 93-98, July 1, 1997.
- CRPA, *Energia dal biogas - Soluzioni possibili per l'azienda zootecnica*, Centro Divulgazione Agricola, 2005
- ENEA, *Compendio del Rapporto Energia e Ambiente 2004*.
- Gelletti R., Jodice R., Mauro G., Migliardi D., Picco D., Pin M., Tomasinsig E., Tommasoni, L. Chinese D., Monaco B., Nardin G., Simeoni P., *Energia dalle biomasse*, CETA e Università degli Studi di Udine – Dipartimento di Energetica e Macchine, AREA Science Park, 2006.
- INFC, *Risultati della prima fase di campionamento (2004)*, Ministero delle Politiche Agricole e Forestali, Corpo Forestale dello Stato.
- ITABIA, *Caldaie a biomasse per impianti di riscaldamento domestico*, 2003.
- Lai G., Riva G., Fiala M., *Applicazione a livello territoriale delle metodologie ENEA-A.I.I.A. alle regioni Emilia-Romagna e Abruzzo: sintesi dei risultati*, ENEA-RT-ERG, 1996.
- Lupia F., Pulicani P., Colonna N., *Analisi spaziale delle componenti di costo per lo sfruttamento energetico di biomasse legnose*. Atti Conferenza ASITA, Bolzano, Novembre 2006.

Pellizzi G., Riva G., Fiala M., *Potenzialità energetica da biomasse nelle Regioni Italiane*, ENEA-AIGR, 1994.

Progetto OPTIRES – *A Planning Tool for the Optimal Regional Integration of Renewable Energy Sources*.

Programma Nazionale Energia Rinnovabile da biomasse (P.N.E.R.B.), Ministero per le politiche agricole e forestali (MIPAF), 1998.

Progetto ENERWOOD – *Il potenziale energetico da biomasse nella regione Molise, Regione Molise, Isernia*, Giugno 2008.

Programma di sviluppo rurale Sicilia 2007/2013, Regione Siciliana – Assessorato Agricoltura e Foreste.

Scoditti E., *La Biomassa: Descrizione e utilizzo energetico*, ENEA, 2006.

Van Thuijl E., Roos C.J., Beurskens L.W.M., *An overview of biofuel technologies, market and policies in Europe*, ECN Policy Studies, 2003.

Vivoli F.P. (a cura di), *corso FAD ENEA–UNESCO – Biomass energy*, odl.casaccia.enea.it, 2006.

Edito dall'ENEA

Unità Comunicazione e Rapporti con il Pubblico

Lungotevere Thaon di Revel, 76 - Roma

www.enea.it

Edizione del volume a cura di Antonino Dattola

Finito di stampare nel mese di Ottobre 2008
da Fabiano Group Srl – Canelli (AT)