

# Biomasse

## per un'energia rinnovabile

### 6.5.1 Introduzione

Tra le risorse naturali disponibili per soddisfare le necessità energetiche dell'umanità è di fondamentale importanza la biomassa, cioè la materia prima vegetale che costituisce in natura la forma più sofisticata di accumulo dell'energia solare. Tramite il processo di fotosintesi clorofilliana, gli organismi vegetali utilizzano l'apporto energetico dell'irraggiamento solare per convertire il biossido di carbonio atmosferico e l'acqua nelle complesse molecole di cui sono costituiti o che compaiono nei loro processi vitali: carboidrati, lignina, proteine, lipidi, oltre a un numero praticamente illimitato di prodotti secondari organici e inorganici.

Con il termine biomassa si intendono, in senso più generale, tutte le sostanze di origine biologica in forma non fossile utilizzabili a fini energetici. Quindi, oltre alle biomasse di origine forestale e ai residui della lavorazione del legno, vengono incluse in questa categoria le cosiddette 'colture energetiche' (specie vegetali che vengono espressamente coltivate per essere destinate alla produzione di energia e/o di combustibili), i residui agricoli, gli scarti di lavorazione e gli effluenti delle industrie agroalimentari, le deiezioni animali, la frazione organica dei rifiuti solidi urbani.

Le biomasse si possono considerare risorse rinnovabili e quindi inesauribili nel tempo, purché vengano impiegate a un ritmo non superiore alle capacità di rinnovamento biologico. In realtà, quindi, le biomasse non sono illimitate quantitativamente ma, per ogni specie vegetale utilizzata, la disponibilità trova un tetto massimo nella superficie a essa destinata, nonché in vincoli climatici e ambientali che tendono a limitare in ogni regione le specie che vi possono crescere convenientemente ed economicamente. L'utilizzazione a fini energetici delle biomasse può essere vantaggiosa quando queste si presentano concentrate nello spazio e disponibili con sufficiente continuità nell'arco dell'anno, mentre una eccessiva

dispersione sul territorio e una troppo accentuata stagionalità dei raccolti rendono più difficili e onerosi la raccolta, il trasporto e lo stoccaggio.

L'impiego energetico delle biomasse presenta anche un'indiscutibile rilevanza ambientale: oltre agli effetti positivi sul contenimento del CO<sub>2</sub> atmosferico, la loro utilizzazione rappresenta spesso una buona soluzione a problemi di eliminazione di rifiuti, specialmente solidi. Il ricorso alle biomasse può quindi risultare in molti casi ai limiti della praticabilità, se considerato esclusivamente sotto l'aspetto economico e/o della resa energetica, oppure interessante o conveniente, se si considera anche il valore ambientale dell'intervento.

Le biomasse costituiscono una materia prima potenzialmente utilizzabile per la produzione di vettori energetici solidi, liquidi e gassosi destinabili a entrambi i tipici mercati finali dell'energia termica e/o elettrica e della mobilità. In **fig. 1** è riportato uno schema riassuntivo delle principali filiere produttive basate sull'impiego delle biomasse. Dal punto di vista tecnologico e industriale, le alternative per la valorizzazione energetica delle biomasse, già oggetto di realizzazioni industriali commercialmente competitive, sono sostanzialmente quattro:

- la combustione diretta, con conseguente produzione di energia termica da utilizzare per il riscaldamento domestico, civile e industriale o per la generazione di vapore come forza motrice e per la produzione di energia elettrica (Broek *et al.*, 1996);
- la co-combustione, generalmente realizzata in impianti destinati alla produzione di energia elettrica, di vapore e di cemento, con la quale le biomasse vengono impiegate generalmente in parziale sostituzione (5-15%) del polverino di carbone (Van Loo e Koppjan, 2002);
- la trasformazione in combustibili liquidi di particolari categorie di biomasse coltivate, come le specie oleaginose (produzione di biodiesel, via estrazione degli oli e successiva conversione chimica degli stessi

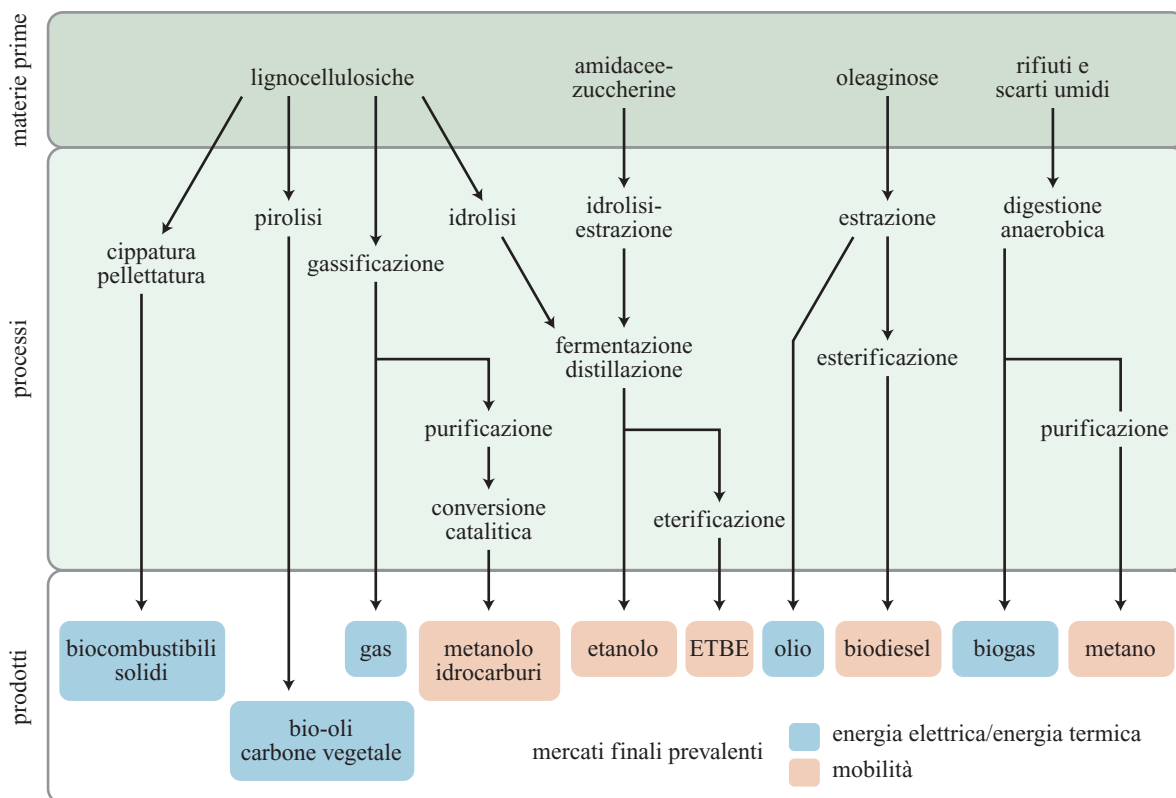
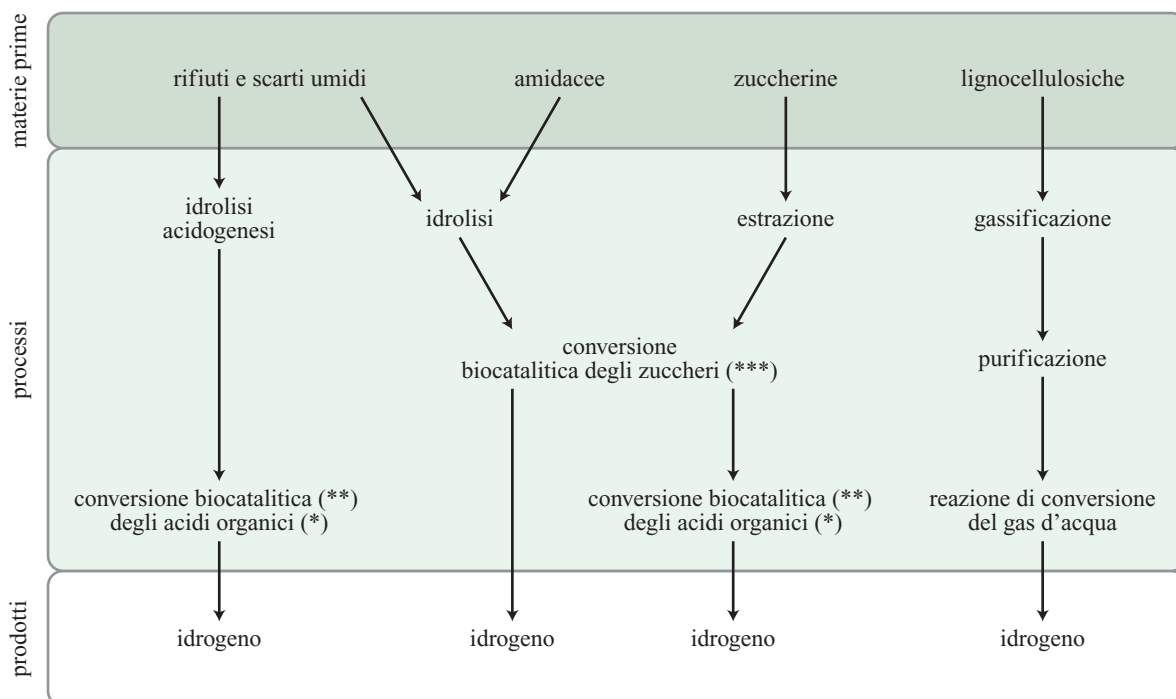


fig. 1. Filiere di produzione per i vettori energetici da biomasse.



(\*) acetico, propionico, butirrico, lattico  
 (\*\*) mediante l'impiego di batteri fototrofici anaerobi (Benemann, 1997)  
 (\*\*\*) mediante l'impiego di batteri anaerobi che operano al buio (Lin e Lay, 2004)

fig. 2. Filiere di produzione dell'idrogeno da biomasse.

in miscele di esteri metilici e/o etilici) e le specie zuccherine per la produzione di etanolo via fermentazione alcolica. Tali combustibili possono poi essere utilizzati, puri o in miscela con gasolio o benzina, come carburanti per autotrazione (IEA, 2004). Gli oli vegetali, inoltre, possono essere direttamente utilizzati in motori endotermici abbinati a un generatore per la produzione di elettricità, o impiegati in raffinaria come materie prime complementari o alternative al petrolio grezzo (Holmgren, 2005);

- la produzione di biogas mediante fermentazione anaerobica di rifiuti ed effluenti zootecnici, civili o agroindustriali e/o biomasse vegetali di varia natura a elevato tenore di umidità (Braber, 1995) e la successiva utilizzazione del biogas ottenuto per la generazione di energia termica e/o di energia elettrica. Il biogas può essere prodotto in impianti specificamente realizzati presso aziende agrozootecniche o stabilimenti agroindustriali (ITABIA, 2004), o recuperato dalle discariche di rifiuti solidi urbani tramite appositi dispositivi di captazione. In quest'ultimo caso, l'aspetto energetico riveste un ruolo complementare rispetto a quello più propriamente ambientale, in quanto si evita la dispersione in atmosfera del metano (una molecola di metano ha un effetto 21 volte superiore a quello di una molecola di CO<sub>2</sub> nel provocare l'effetto serra).

Le tecnologie invece più vicine alla fase di industrializzazione sono la gassificazione e la pirolisi (Faaij, 2004).

Nel primo caso, è possibile convertire materie prime quali legno, biomasse lignocellulosiche coltivate, residui agricoli o rifiuti solidi urbani, in un gas combustibile molto più versatile da utilizzare. Tale gas può infatti essere impiegato in Motori a Combustione Interna (MCI), per l'alimentazione di turbine a gas o di cicli combinati o anche, in prospettiva, per applicazioni più avveniristiche come l'alimentazione di celle a combustibile. La pirolisi è invece un processo termochimico che mira tradizionalmente a ottenere, sempre a partire da biomasse lignocellulosiche, combustibili liquidi più facilmente trasportabili (bio-oli), carboni vegetali (tipicamente utilizzati per la cottura dei cibi) e, in prospettiva, biocarburanti per l'alimentazione di motori

a combustione interna, in processi integrati con i cicli di raffinazione petrolifera (Hart *et al.*, 2003). Più lontani da una larga applicazione commerciale sono invece altri processi propriamente biotecnologici, come la produzione di etanolo via idrolisi enzimatica di materiali cellulose e fermentazione (successiva o contemporanea) degli idrolizzati zuccherini. Solo recentemente, infatti, è iniziata una produzione su scala dimostrativa basata su un processo di questo tipo nell'ambito di un'iniziativa canadese, alla quale partecipano anche Petro-Canada e Shell Oil (Chipello, 2004).

Si evidenzia come, nell'ultimo decennio, sia oggetto di intense attività di ricerca e sviluppo la possibilità di sfruttare le biomasse come materia prima per la bio-produzione di idrogeno (Thanisho, 1996; Levin *et al.*, 2003; Khanal *et al.*, 2004). La fattibilità tecnica delle filiere produttive riportate in **fig. 2** è già stata ampiamente dimostrata.

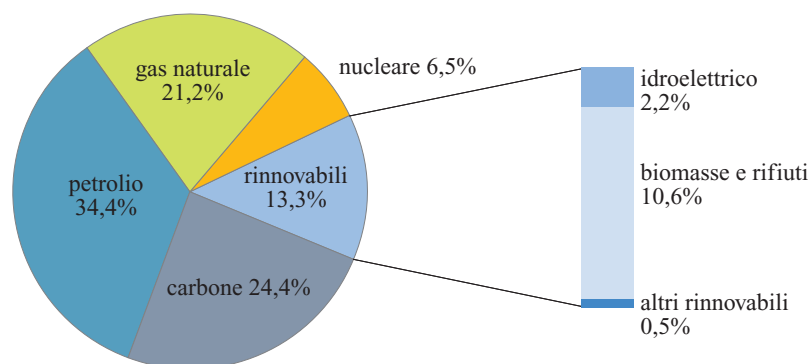
### 6.5.2 Ruolo delle biomasse nel panorama energetico

A livello mondiale, a fronte di una produzione totale primaria di energia pari nel 2003 a 10.579 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio (Mtep), le fonti energetiche rinnovabili con 1.404 Mtep coprivano il 13,3% del totale, contro l'80,2% derivante da fonti energetiche fossili (petrolio, carbone e gas naturale) e il 6,5% di origine nucleare (IEA, 2005a; **fig. 3**).

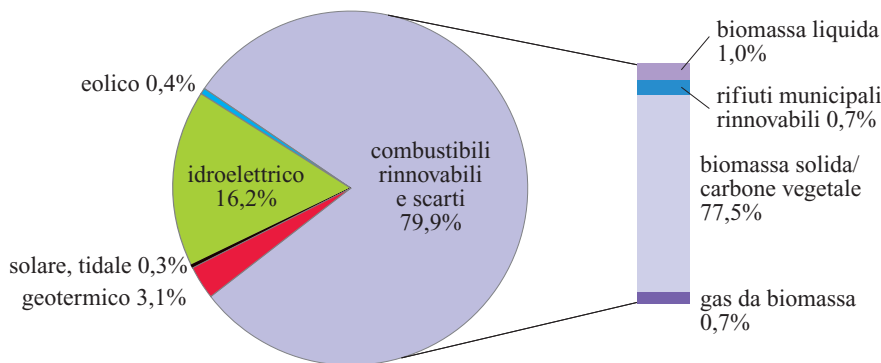
Tra le fonti rinnovabili, le biomasse rivestono un ruolo primario, corrispondente, sempre nel 2003, al 79,9% della produzione totale di energia da fonti rinnovabili (IEA, 2005a; **fig. 4**). Esiste peraltro, come accennato nell'introduzione, un'ampia gamma di opzioni per la conversione di biomasse in una forma utile di energia, attraverso processi sia termochimici sia di biotrasformazione (v. anche cap. 8.3).

Il peso relativo delle biomasse nella produzione di energia è, ovviamente, molto differente nei vari paesi. I maggiori quantitativi (87,5% del totale nel 2003) vengono prodotti e utilizzati nei paesi non-OECD (Organisation

**fig. 3.** Fonti energetiche per la produzione mondiale di energia nel 2003 (il totale del grafico non arriva a 100 a causa dell'arrotondamento).



**fig. 4.** Ripartizione percentuale tra le fonti rinnovabili di energia nel 2003 (il totale del grafico non arriva a 100 a causa dell'arrotondamento).



for Economic Co-operation and Development); in particolare se ne fa grande uso nei paesi in via di sviluppo dell'Asia sud-orientale e dell'Africa sub-sahariana per il riscaldamento e la cottura dei cibi (IEA, 2005a). Nei paesi industrializzati (OECD) la produzione di energia da biomasse (compresi anche i rifiuti solidi urbani, i biocarburanti e il biogas) corrispondeva nel 2003 a circa  $6,8 \cdot 10^{18}$  J (162,4 Mtep) e il contributo alla produzione totale di energia era pari al 3% (IEA, 2005a). Di particolare interesse, e in costante crescita, risulta l'impiego delle biomasse per la produzione di energia elettrica che, se non può ancora considerarsi competitivo rispetto alle fonti energetiche convenzionali (combustibili fossili, idroelettrico di grande taglia e nucleare), è dello stesso ordine di grandezza, se non più conveniente, delle altre fonti rinnovabili, per quel che riguarda il costo di generazione dell'energia (IEA, 2003).

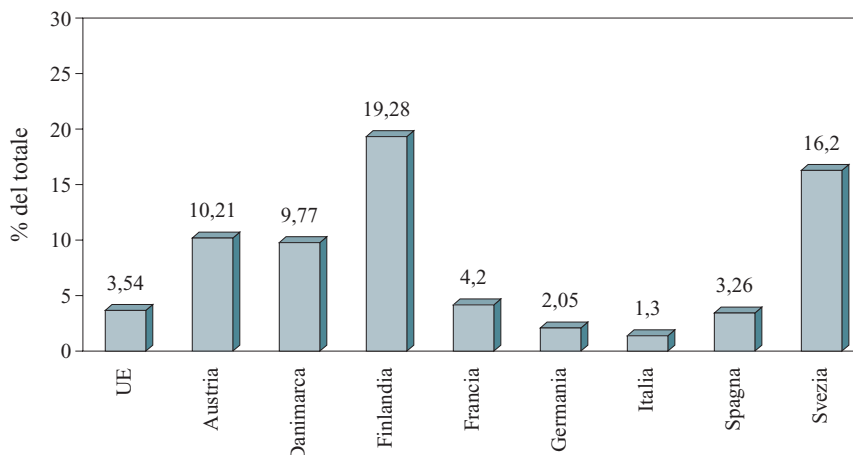
In Europa, l'impiego delle biomasse copre una quota marginale dei consumi energetici, in media solo il 3,5%, sebbene il potenziale di tale fonte energetica sia molto più elevato. La produzione complessiva di energia da legna e prodotti assimilabili (residui agricoli e agroindustriali secchi) è stata pari a poco meno di 43 Mtep nel 2003. Anche nel contesto europeo il grado di utilizzazione di questa fonte energetica si presenta variamente dimensionato e vede come paesi leader, per quel che

riguarda gli usi termici, la Francia e la Germania. Relativamente alla produzione di energia elettrica (31,37 TWh nel 2003), i paesi dell'Europa centrale e settentrionale sono quelli più all'avanguardia, essendo dotati di grossi impianti soprattutto di teleriscaldamento e cogenerazione, e in alcuni di essi il contributo delle biomasse ai bilanci energetici nazionali è decisamente rilevante. È questo il caso, per esempio, della Finlandia, dove è presente un gran numero di industrie per la lavorazione del legno e per la fabbricazione di pasta per carta i cui residui, disponibili in grandi quantità e concentrati spesso nello stesso sito di utilizzazione, possono essere impiegati per produrre energia in modo economicamente conveniente. In questo paese, nel 2002, le biomasse contribuivano per il 19,3% alla produzione totale di energia e per il 10,7% alla produzione di elettricità. Il grafico riportato in **fig. 5** mostra il contributo delle biomasse alla produzione di energia di alcuni paesi europei nel 2002 (Power [...], 2002).

Per quel che riguarda le tecnologie maggiormente utilizzate per gli impianti di riscaldamento domestico (10-50 kW), negli ultimi anni si è assistito a un processo di forte innovazione del settore. Le tipologie di impianto maggiormente diffuse sono le seguenti:

- caldaie ad alimentazione manuale, con camera di grande volume per il caricamento di legna a tronchetti

**fig. 5.** Contributo delle biomasse alla produzione di energia in alcuni paesi europei.



e funzionamento a fiamma rovescia verso il basso, con ventilatore. Tali dispositivi, avvalendosi di specifici sensori per l'ossigeno (sonda lambda), consentono di ottimizzare l'apporto di aria per la combustione e hanno rendimenti di conversione pari a circa l'80%, specie se le caldaie sono accoppiate con un serbatoio di accumulo dell'acqua calda che riduce la necessità di spegnimenti e accensioni. Queste caldaie richiedono generalmente non più di 2-3 interventi al giorno per il caricamento e un intervento periodico per togliere la cenere;

- termocamini con vetro di chiusura della camera di combustione per legna in pezzi, che possono scaldare l'aria con circolazione forzata o l'acqua di un circuito di riscaldamento; aprendo il vetro frontale, è possibile anche la cottura di cibi alla brace, con il vetro chiuso, il rendimento è dell'ordine del 50%;
- caldaie e stufe ad alimentazione meccanica (**fig. 6**), che utilizzano materiale sfuso di pezzatura regolare (residui già sminuzzati quali sansa esausta, noccioli di frutta, gusci di nocciole e/o mandorle) o legno sminuzzato (cippato) o compresso in pastiglie (pellet). In particolare il pellet, ottenuto a partire da segatura o sfridi di lavorazione del legno sottoposti a macinazione, essiccazione ed estrusione ad alta pressione, senza l'aggiunta di alcun legante, è un materiale a basso contenuto di ceneri (per quelli di buona qualità è minore dello 0,7%) e, soprattutto, trattabile dal punto di vista della movimentazione come un combustibile liquido. Ciò comporta la possibilità di automatizzare sia il sistema di alimentazione della biomassa (utilizzando in genere una coclea che preleva il combustibile da un serbatoio di carico e rifornisce regolarmente la camera di combustione) sia il sistema di estrazione delle ceneri; è possibile altresì incrementare i rendimenti di combustione fino a valori

confrontabili con le caldaie convenzionali a combustibili fossili. Sul mercato sono disponibili modelli tecnologicamente molto avanzati con accensione elettrica, regolazione dell'aria con sonda lambda e rendimento intorno all'80%.

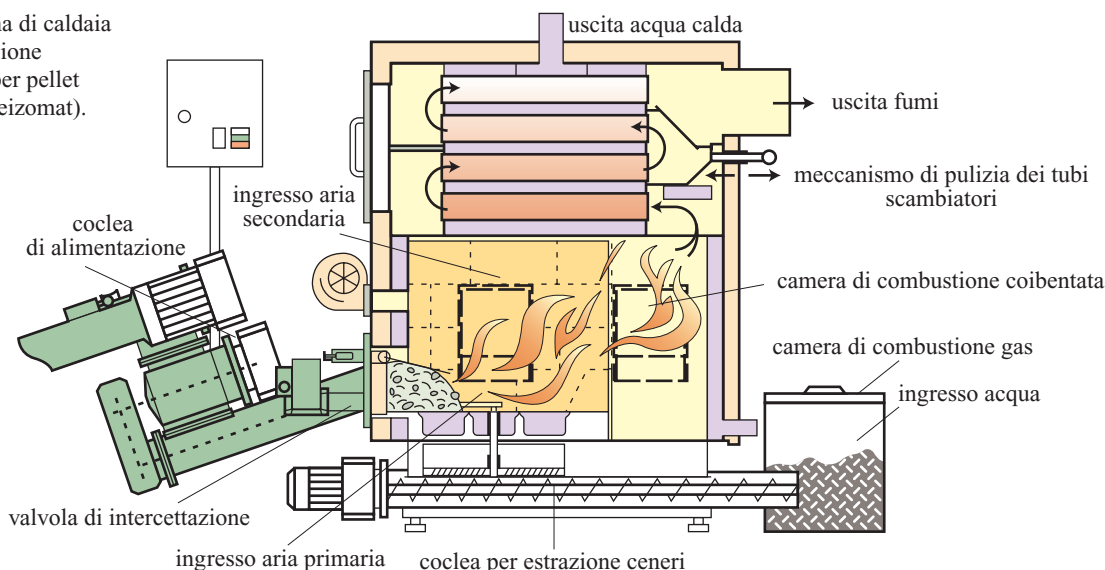
Un altro settore particolarmente promettente per l'utilizzazione energetica dei residui legnosi è quello degli impianti di teleriscaldamento, progettati per servire villaggi o piccole città. Tali impianti trovano interesse economico in zone caratterizzate sia da climi rigidi, con periodi prolungati di basse temperature, sia da grandi disponibilità di biomasse residuali a prezzi competitivi (in genere scarti delle segherie locali, legno triturato derivante da operazioni di cura dei boschi, potature e sottoprodotti agricoli). La potenza termica complessiva installata è dell'ordine di 200 MW e la tecnologia utilizzata è quella delle caldaie a griglia (fissa o mobile), di taglia intorno a 10 MW. In alcuni casi, viene prodotta anche elettricità in cogenerazione.

Il rendimento elettrico nel processo di conversione delle biomasse non supera normalmente il 25%, con consumi specifici medi di 1 kg di biomassa per kWh elettrico; sarebbe quindi oltremodo auspicabile, da un punto di vista economico e ambientale, massimizzare il recupero dell'energia termica residua (pari al 75% dell'energia immessa con il combustibile). Ciò però non sempre è realizzabile, anche considerando il fatto che le possibili utenze termiche sono normalmente stagionali e, per motivi ambientali, generalmente localizzate a una certa distanza dagli impianti.

### 6.5.3 Combustibili da biomasse

L'utilizzazione energetica delle biomasse in impianti centralizzati (di teleriscaldamento o per la generazione di

**fig. 6.** Schema di caldaia ad alimentazione automatica per pellet e cippato (Heizomat).



energia elettrica), come pure la trasformazione industriale delle biomasse in biocombustibili solidi (per esempio il pellet) da immettere sul mercato, costituiscono il terminale di filiere che si basano sulla raccolta e/o sulla coltivazione di biomassa idonea alla conversione energetica. Tali filiere comprendono una serie di stadi successivi:

- approvvigionamento della biomassa (taglio e raccolta nel caso delle biomasse coltivate, raccolta delle paglie e dei residui colturali, prelievo dei residui di lavorazioni del legno o agroindustriali a fine processo) ed eventuale condizionamento per facilitarne la movimentazione (imballatura delle paglie e delle colture erbacee, riduzione in scaglie delle biomasse legnose);
- trasporto al luogo di stoccaggio, che può coincidere o meno con l'impianto di conversione energetica o di trasformazione in pellet;
- stoccaggio, comprensivo dell'eventuale essiccazione;
- trasformazione in pellet o conversione energetica mediante combustione in una caldaia a griglia o a letto fluido per la produzione di vapore o acqua calda (per il teleriscaldamento) e successiva utilizzazione del vapore in una turbina – o in qualche caso, in un motore alternativo, tipo motore Spilling – a servizio di un elettrogeneratore per la produzione di elettricità;
- smaltimento dei residui, essenzialmente le ceneri di combustione, provenienti dagli impianti di conversione energetica;
- commercializzazione del pellet e gestione dell'energia prodotta (immissione in rete dell'elettricità e/o distribuzione dell'energia termica alle utenze locali, civili e industriali).

### Disponibilità e reperibilità delle biomasse

Se si escludono, per la diversità delle problematiche connesse alla gestione della filiera rifiuti, la frazione organica dei Rifiuti Solidi Urbani (RSU) e i rifiuti industriali assimilabili a questi ultimi (legno trattato, ecc.), le possibili fonti di biomassa per usi energetici sono sostanzialmente tre: forestale, agricola e agroindustriale.

Nei primi due casi, le biomasse prodotte possono essere di tipo residuale (scarti e residui delle attività di cura e manutenzione dei boschi o di estrazione e prima lavorazione del legno, o residui agricoli come paglie, potature, ecc.) o provenire da specifiche attività di coltivazione (forestazione produttiva, colture agricole dedicate). Si stima che, a livello mondiale, i boschi e le foreste coprano una superficie complessiva pari a quasi  $5 \cdot 10^9$  ha, corrispondente al 33% dell'intera superficie del suolo terrestre (Runesson, 2006). In accordo con dati elaborati dalla Banca Mondiale alla fine del 20° secolo, le principali foreste mondiali si concentrano in relativamente pochi paesi (**tab. 1**).

Il rapporto fra area boschiva e abitanti varia in modo estremamente ampio fra le diverse regioni del globo: per

**tab. 1.** Paesi con le principali risorse forestali

PAESE	SUPERFICIE TOTALE COPERTA DA FORESTE (10 <sup>6</sup> ha)	PERCENTUALE RISPETTO AL TOTALE MONDIALE DELLE AREE FORESTALI
Russia	764	22
Brasile	566	16
Canada	247	7
Stati Uniti	210	6
Cina	134	4
Indonesia	116	3
Zaire	113	3
Paesi scandinavi	53	2

le aree temperate dai 7,5 ha/abitante dell'Oceania ai 3,4 dei paesi nordici, fino ai 2,7 dell'America Settentrionale e a un valore minimo di soli 0,35 ha/abitante per l'Europa (esclusa la Scandinavia). Di conseguenza, il potenziale contributo delle biomasse forestali ai fabbisogni energetici dei diversi paesi è anch'esso estremamente variabile, tanto più considerando il fatto che, anche a parità di superficie boschiva e di rapporto fra questa superficie e numero di abitanti, possono esistere grandi differenze fra le diverse regioni in termini di reale accessibilità a tali aree. È quindi importante distinguere tra foreste sfruttabili e non sfruttabili, considerando sfruttabili quelle che vengono utilizzate regolarmente, e in modo sostenibile, per la produzione di legno, o che potrebbero essere comunque utilizzate allo scopo con relativa facilità, e considerando non sfruttabili quelle che, per motivi geografici, ambientali o economico-sociali, non si prestano a una simile utilizzazione nel prevedibile futuro. Una simile distinzione è abbastanza netta nel contesto europeo, ma diventa più difficile in paesi con coperture forestali molto più estese, come il Canada o la Russia. A causa della densità energetica relativamente bassa, il costo di trasporto della biomassa legnosa è in ogni caso così elevato da renderne fattibile la produzione solo da foreste sfruttabili. Una stima delle superfici forestali (sfruttabili e non) nelle aree temperate a livello mondiale e dei quantitativi di biomassa ivi presenti è riportata in **tab. 2** (Streheler, 1988).

### Produzione di biomasse da colture dedicate

La previsione di una crescente richiesta di biomasse da destinare, direttamente o indirettamente, alla produzione di energia, ha portato molte organizzazioni e istituti di ricerca di numerosi paesi europei ed extraeuropei a interessarsi allo sviluppo delle cosiddette 'colture

**tab. 2.** Stima delle superfici forestali nelle zone temperate a livello mondiale e dei quantitativi di biomassa ivi presenti

REGIONE	SUPERFICIE FORESTALE (10 <sup>6</sup> ha)			BIOMASSA (10 <sup>6</sup> t)
	TOTALE	NON SFRUTTABILE	SFRUTTABILE	
Europa	149	16	133	12
Ex URSS	755	341	414	52
America Settentrionale	457	149	308	48
Altre	71	28	43	5
Totale	1.432	534	898	117

energetiche', pur nella consapevolezza delle notevoli difficoltà, primi fra tutti i costi di produzione, che devono essere superate per rendere effettivamente remunerative queste iniziative.

Nel contesto europeo, vengono considerate potenzialmente interessanti sia colture tradizionali da destinare alla produzione di biocarburanti (cereali, barbabietole e alcune colture oleaginose come colza e, in misura minore, girasole), sia colture cellulose, utilizzabili come combustibili solidi per la produzione di energia termica e/o elettrica.

Le colture per la produzione di biomassa sono state oggetto di numerose attività sperimentali di ricerca, sviluppo e dimostrazione svolte negli ultimi due decenni in tutti i maggiori paesi industrializzati (Pignatelli, 1997). Di conseguenza, è oggi disponibile una grande mole di informazioni tecnico-scientifiche su produzione, trasformazione e utilizzazione di queste colture; in molti casi però queste informazioni sono presenti in modo estremamente frammentato nell'ambito di organizzazioni, enti e istituti diversi, rendendo difficile qualsiasi serio confronto tecnico-economico fra le diverse possibili filiere già all'interno di una singola nazione e ancor più, ovviamente, a livello transnazionale.

Fra le numerose specie prese in esame, si ricordano: specie annuali, quali sorgo da fibra (*Sorghum bicolor*), canapa (*Cannabis sativa*), kenaf (*Hybiscus cannabinus*); specie erbacee perenni, quali canna comune (*Arundo donax*), miscanto (*Miscanthus giganteus*), panico (*Panicum virgatum*), cardo (*Cynara cardunculus*), fragmite (*Phragmites communis*); specie legnose perenni, quali pioppo (*Populus* sp.), eucalipto (*Eucalyptus* sp.), robinia (*Robinia pseudoacacia*), salice (*Salix alba*). Ai diversi tipi di colture per la produzione di biomassa corrispondono particolari caratteristiche, che le rendono idonee all'impiego in diverse situazioni.

Le specie annuali, per esempio, presentano il grande vantaggio di non occupare in modo permanente il terreno agricolo e di poter essere quindi coltivate su terreni

messi temporaneamente a riposo (*set-aside*), o di trovare comunque un buon inserimento nei cicli tradizionali di rotazione colturale. Fra queste specie, la più interessante sembra essere il sorgo da fibra, che può essere coltivato con tecniche colturali e macchine agricole convenzionali, raggiungendo rese sino a 38 t/ha di biomassa secca (Raccuia *et al.*, 2003). Altre specie interessanti sono la canapa e il kenaf, che sono stati però presi in considerazione soprattutto come possibili materie prime alternative per l'industria tessile (canapa) e per quella della carta. In tal caso alla produzione di energia sarebbe destinata solo una parte della biomassa, corrispondente alla frazione fibrosa di scarso valore che viene separata nello stadio di frazionamento dalle fibre lunghe, da utilizzare negli impieghi industriali a più alto valore aggiunto.

Le specie erbacee perenni, paragonate a quelle annuali, hanno un impatto maggiore sull'organizzazione dell'azienda agricola, dovuto all'occupazione del suolo per diversi anni e agli alti costi di impianto, perché possono essere propagate solo tramite piantine, talee o rizomi. D'altro canto, una volta che la coltura è stata impiantata, si può avere una produzione di biomassa per parecchi anni, a un costo unitario molto più basso rispetto a quello di una coltura annuale. Anche l'impatto ambientale può essere considerato globalmente minore, perché le colture perenni richiedono quantitativi ridotti di fertilizzanti e pesticidi e una minore lavorazione del suolo. La durata e la costanza produttiva nel tempo costituiscono l'elemento determinante nella valutazione e nella scelta di queste colture (Venturi e Bonari, 2004). Fra le colture erbacee perenni, quella che ha dato i risultati più interessanti è la canna comune, che cresce praticamente dappertutto e può arrivare a produrre in un anno, in parcelle sperimentali abbondantemente irrigate, fino a circa 50 t/ha di biomassa secca (Raccuia *et al.*, 2003). Altre specie importanti sono il miscanto, che ha mostrato una buona adattabilità a diverse condizioni pedoclimatiche con possibili rese superiori a 30 t/ha (Raccuia *et al.*, 2003), e il panico, che può essere coltivato nelle

condizioni (terreni poveri e scarsa piovosità) tipiche, per esempio, di gran parte dell'area mediterranea. Con questa essenza, dopo il secondo anno di coltivazione, sono state raggiunte rese superiori a 20-25 t/ha, anche se solo in parcelle sperimentali (ENEA, 2005). Un notevole vantaggio di queste specie è la possibilità di una naturale essiccazione della biomassa in campo, senza apprezzabili perdite di materia, durante la stagione invernale, cosa che favorisce notevolmente le operazioni di raccolta e il successivo stoccaggio. Qualche interesse presenta anche il cardo, per i ridotti costi di impianto, in quanto può essere propagato per seme, e per le ridotte esigenze idriche, ma le sue rese in biomassa (pari a circa 15 t/ha) sono inferiori rispetto a quelle di canna, miscanto e panico (Raccuia *et al.*, 2003).

La coltivazione di specie legnose perenni a destinazione energetica (SRF, Short Rotation Forestry) è tanto più redditizia quanto più i cicli di crescita sono brevi e quanto maggiore è la densità di impianto (Bullard *et al.*, 2002). Le varie fasi della SRF delle specie ritenute di maggiore interesse necessitano comunque ancora di sperimentazioni su scala significativa, tenendo anche conto del fatto che tutte le specie considerate hanno tecniche di propagazione ed esigenze climatiche, idriche e pedologiche diverse. I migliori risultati, in termini di produttività, sono stati ottenuti con cicli colturali variabili fra 3 anni (salice) e 10-15 anni, con ceduzione effettuata ogni 2-3 anni (pioppo) e sesti di impianto decisamente fitti (superiori alle 10.000 piante/ha). La produttività in pieno campo varia fra 10 e 15 tonnellate di biomassa secca/ha per anno in Europa e in America Settentrionale.

Informazioni (Tomassetti, 2005) sulla produttività e sulle principali caratteristiche di alcune colture per la produzione di biomassa all'epoca della raccolta sono riportate in **tab. 3**. In ogni caso, l'effettiva praticabilità dell'impiego di colture dedicate per la produzione di energia è direttamente legata al loro bilancio energetico, cioè alla differenza fra la quantità di energia immessa sotto forma di input colturali e quella contenuta nella biomassa prodotta (output).

I risultati delle sperimentazioni danno sempre risultati positivi, anche se affetti da una notevole variabilità legata ai diversi valori di produttività riscontrati e al fatto che si tratta nella maggior parte dei casi di prove colturali limitate nel tempo e condotte su parcelle sperimentali e non in pieno campo. Un esempio di bilanci energetici calcolati per alcune colture erbacee è riportato in **tab. 4** (Venturi e Bonari, 2004).

Per dare un'idea quantitativa della possibile utilizzazione di biomasse coltivate *ad hoc* per la produzione di energia elettrica, si stima che una superficie compresa fra 17.000 e 25.000 ha di piantagione di una coltura per la produzione di biomassa (SRF o erbacea poliennale) sarebbe in grado di alimentare per un anno un impianto da 30 MW elettrici, sufficiente per fornire elettricità a 30.000 abitazioni.

### Caratteristiche e proprietà dei principali biocombustibili solidi

Il contenuto energetico di un combustibile (potere calorifico) dipende in primo luogo dalla sua composizione chimica. Un elevato contenuto di carbonio e idrogeno

**tab. 3.** Produttività e caratteristiche di alcune colture per la produzione di biomassa all'epoca della raccolta

COLTURA	PRODUTTIVITÀ (t/ha DI SOSTANZA SECCA)	UMIDITÀ ALLA RACCOLTA (%)	PERIODO DI RACCOLTA	CARATTERISTICHE DEL MATERIALE RACCOLTO
Sorgo da fibra	20-30	70	agosto/settembre	stocchi imballati
Cardo	10-20 <sup>(*)</sup>	20-25	agosto/settembre	trinciato o stocchi imballati (umidità 20-25%)
Miscanto	15-25	20-25	da novembre a marzo	trinciato o stocchi imballati (umidità 25-20%) <sup>(**)</sup>
Panico	10-25	20-25	da novembre a marzo	trinciato o stocchi imballati (umidità 25-20%) <sup>(**)</sup>
Canna comune	20-35	40	da novembre a marzo	trinciato (umidità 40-30%) <sup>(**)</sup>
SRF (pioppo, eucalipto, robinia, salice)	10-15	50	da novembre a marzo	cippato (umidità 50-20%) <sup>(***)</sup>

<sup>(\*)</sup> Più 2-2,8 t/ha di semi oleosi, eventualmente utilizzabili per la produzione di biodiesel

<sup>(\*\*)</sup> Il valore minimo corrisponde al materiale raccolto in marzo

<sup>(\*\*\*)</sup> Il contenuto di umidità del cippato può scendere al 20-25% in caso di stoccaggio prolungato

**tab. 4.** Bilanci energetici di alcune colture erbacee per la produzione di biomassa

COLTURA	INTERVALLO DI RESA (t/ha DI SOSTANZA SECCA)	CONTENUTO ENERGETICO (GJ/t)	OUTPUT (GJ/ha)	DIFFERENZA OUTPUT/INPUT (GJ/ha) (*)	RAPPORTO OUTPUT/INPUT
Sorgo da fibra	20-30	16,7-16,9	334-507	309-494	13-39
Kenaf	10-20	15,5-16,3	155-326	130-313	6-25
Canapa	8-15	16,0-18,0	128-270	103-257	5-20
Miscanto	15-30	17,6-17,7	260-530	238-522	12-66
Canna comune	15-35	16,5-17,4	240-600	118-592	11-74
Cardo	10-15	15,5-16,8	155-252	133-244	7-31
Panico	10-25	17,4	174-435	152-427	8-54

(\*) Gli input considerati variano da 13 a 25 GJ/ha per le colture annuali e da 8 a 22 GJ/ha per le perenni

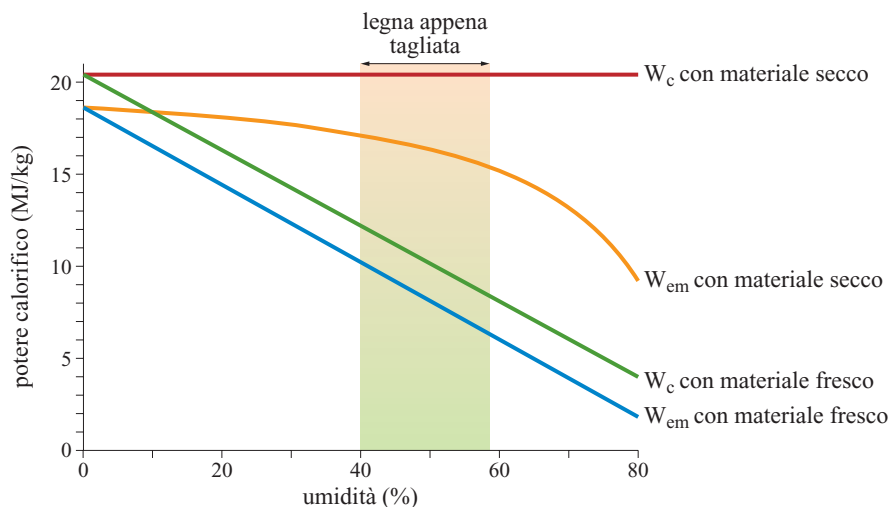
ha come diretta conseguenza un potere calorifico elevato, mentre l'ossigeno, l'azoto e gli altri elementi presenti nella biomassa non danno alcun contributo al riguardo. Il contenuto medio di carbonio nel legno di conifere (abete, pino) è pari al 50,7%, mentre per le latifoglie (betulla, faggio) scende al 49%; il contenuto di idrogeno è rispettivamente pari al 6,2% e al 6% (Kollmann, 1951). La minore quantità di sostanza combustibile nelle latifoglie dipende dal minor contenuto in lignina ed estrattivi.

Nel caso specifico delle biomasse, una parte dell'energia liberata dalla combustione viene consumata per la vaporizzazione sia dell'acqua contenuta inizialmente nel combustibile, sia di quella che si forma per reazione dell'idrogeno con l'ossigeno atmosferico. Di conseguenza, il contenuto energetico di un biocombustibile viene espresso dal Potere Calorifico Inferiore (PCI) che dipende direttamente, oltre che dalla composizione della biomassa, dal suo tenore di umidità. Si veda in proposito

la **fig. 7** (Richardson *et al.*, 2002), dove  $W_c$  rappresenta il potere calorifico superiore, determinato sperimentalmente, mentre  $W_{em}$  indica il valore del potere calorifico inferiore.

Un terzo elemento che influisce in modo significativo sul contenuto energetico dei biocombustibili solidi è la densità, cioè la massa di materiale per unità di volume occupato, che dipende sia dalla massa specifica 'interna' (cioè calcolata senza tenere conto dei 'vuoti' fra le particelle di materiale), sia dalla pezzatura (nel caso del legno) o, nel caso di residui agricoli o piante erbacee, dalla tipologia di imballaggio (balle prismatiche, rotoballe, ecc.). I valori di densità e potere calorifico inferiore di alcuni biocombustibili sono riportati in **tab. 5** (Streheler, 1988; Jones e Walsh, 2001; Richardson *et al.*, 2002).

Oltre al carbonio, all'ossigeno e all'idrogeno, le piante necessitano di azoto, fosforo, potassio e di un certo numero di piccole quantità di altri minerali per costituire

**fig. 7.** PCI della biomassa in funzione dell'umidità.

**tab. 5.** Densità e potere calorifico inferiore di alcuni biocombustibili solidi

BIOMASSA	FORMA	UMIDITÀ (%)	PCI (MJ/kg)	DENSITÀ (kg/m <sup>3</sup> )
Abete norvegese	pianta intera	40	17,55	400
Abete norvegese	corteccia	40	19,69	360
Abete	tronchetti	20	14,28	350
		40	10,10	390
Abete	cippato	20	14,28	180
		40	10,10	215
Pino scozzese	pianta intera	40	17,97	395
Pino scozzese	corteccia	40	19,50	280
Betulla	pianta intera	40	17,41	475
Betulla	corteccia	40	22,71	550
Faggio	tronchetti	20	14,28	450
		40	10,10	510
Paglia di grano	balle	10	15,50	120
Stocchi di mais	balle	10	14,40	100
Miscanto	balle	12	15,37	120

i propri tessuti e svolgere i processi vitali e per assorbire altri elementi, inclusi metalli pesanti presenti nel suolo. Tutti questi elementi non liberano energia durante la combustione, ma vengono rilasciati in atmosfera sotto forma di composti volatili o si ritrovano comunque nelle ceneri di combustione, e possono costituire un problema per gli impianti (depositi, corrosione) e, più in generale, per l'ambiente. In genere, la combustione delle latifoglie produce un quantitativo di ceneri maggiore rispetto alle conifere, e le biomasse erbacee (paglia, miscanto, ecc.) ne producono più di quelle legnose. Il contenuto in ceneri di alcune biomasse è riportato in **tab. 6** (Streheler, 1988; Jones e Walsh, 2001; Richardson *et al.*, 2002).

L'estrema varietà di tipologie e caratteristiche dei combustibili ricavabili dalle biomasse (biocombustibili solidi) costituisce in prospettiva uno dei maggiori ostacoli per l'ulteriore sviluppo di questa fonte energetica. Infatti, l'incremento degli scambi commerciali internazionali e l'industria di produzione di dispositivi e componenti di impianti per l'utilizzazione di tali combustibili richiedono la definizione, per ogni particolare tipologia di biocombustibile, di specifiche tecniche che consentano di determinarne il valore economico e di progettare e dimensionare adeguatamente gli impianti, in modo da ottimizzare le rese di conversione, incrementare il livello di automazione e minimizzare le emissioni di sostanze inquinanti.

Una proposta di standardizzazione (European Commission, 2005), elaborata da un apposito gruppo di lavoro del Comitato Europeo di Normazione (CEN), definisce come biocombustibili solidi solo quelli ricavati da: *a)* prodotti dell'agricoltura e forestazione; *b)* residui vegetali delle attività agricole e di forestazione; *c)* residui vegetali delle industrie alimentari; *d)* residui legnosi, con esclusione di quelli trattati con agenti impregnanti e/o vernici che contengano tracce di composti organici alogenati e/o metalli pesanti, come il legname da costruzione e quello proveniente dalla demolizione di edifici; *e)* residui di fibre vegetali dalla produzione di paste cellulose vergini o di paste chimiche per l'industria della carta, a condizione che vengano bruciati *in situ* con recupero dell'energia prodotta.

La proposta di standardizzazione prevede che i biocombustibili debbano essere classificati in base a natura e origine, tipologia e proprietà del prodotto commerciale.

La classificazione basata sulla natura e sull'origine dei biocombustibili solidi si articola su quattro livelli successivi, a partire dalle seguenti categorie principali: *a)* biomasse legnose; *b)* biomasse erbacee; *c)* frutti; *d)* miscele e commistioni, intendendo come miscela la mescolanza intenzionale di prodotti di diversa natura e come commistione quella non intenzionale o accidentale. La proposta di classificazione, basata sulle tipologie del prodotto commercializzato e le relative proprietà,

**tab. 6.** Contenuto in ceneri di diverse biomasse

BIOMASSA	CONTENUTO IN CENERI (% SULLA SOSTANZA SECCA)
Abete norvegese: – fusto – corteccia – pianta intera incluso fogliame – pianta intera defoliata	0,6 3,2 1,6 1,3
Pino scozzese: – fusto – corteccia – pianta intera incluso fogliame – pianta intera defoliata	0,4 2,6 0,9 0,8
Betulla: – fusto – corteccia – pianta intera incluso fogliame – pianta intera defoliata	0,4 2,2 1,0 0,8
Paglia di cereali	4,3
Miscanto	2,6

prende in esame le forme più comuni di tali materiali, in accordo con l'elenco riportato in **tab. 7** (Tomassetti, 2005).

La standardizzazione di tutti questi prodotti richiede, per ciascuno di essi, la determinazione di una serie di proprietà che, se ricadono entro i valori limite prefissati, consentiranno di assegnare al prodotto in esame una particolare categoria o classe di qualità. A titolo di esempio, le proprietà prese in considerazione per la definizione di standard e/o specifiche tecniche per il cippato di legno sono le dimensioni delle scaglie, il contenuto di umidità (% in peso sul prodotto alla ricezione), il contenuto in ceneri (% sul secco) e il contenuto di azoto (% sul secco). A queste vanno aggiunte ulteriori specificazioni a carattere informativo, che contribuiscono a una puntuale identificazione del prodotto, relative a potere calorifico inferiore (MJ/kg o kWh/m<sup>3</sup>), densità (kg/m<sup>3</sup>) alla ricezione, contenuto in cloro (% sul secco).

### 6.5.4 Tecnologie per l'utilizzazione energetica delle biomasse

I processi di conversione termochimica delle biomasse si basano sull'azione termica per attivare una serie di

**tab. 7.** Principali tipologie commerciali di biocombustibili solidi

TIPOLOGIA DI BIOCOMBUSTIBILE	DIMENSIONI TIPICHE (DIAMETRO O VOLUME)	METODO DI PREPARAZIONE
Briquettes	>25 mm	compressione meccanica
Pellets	<25 mm	compressione meccanica
Polvere combustibile	<1 mm	macinazione fine
Segatura	1-5 mm	taglio
Legno sminuzzato (chips)	5-100 mm	taglio
Legno spezzettato	varie	frantumazione
Legno in tronchetti	100-1.000 mm	taglio
Legno intero	>500 mm	taglio
Paglia in balle prismatiche Paglia in balle prismatiche grandi Paglia in rotoballe	0,1 m <sup>3</sup> 3,7 m <sup>3</sup> 2,1 m <sup>3</sup>	compressione e imballatura compressione e imballatura compressione e imballatura
Fascine	varie	raccolta e legatura dei fusti
Corteccia	varie	scortecciamento della legna
Paglia trinciata	10-200 mm	trinciatura durante la raccolta
Granaglie o semi	varie	nessuna preparazione
Gusci e noccioli di frutti	5-15 mm	nessuna preparazione
Panelli di fibra	varie	disidratazione di residui fibrosi

reazioni chimiche che hanno come risultato finale la liberazione dell'energia conseguente alla rottura dei legami chimici che uniscono gli atomi di carbonio a quelli di idrogeno, portando alla formazione di biossido di carbonio, acqua e, a seconda delle condizioni di reazione, di numerose altre specie chimiche gassose, liquide o solide.

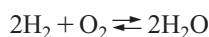
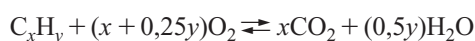
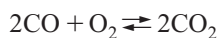
Generalmente, i combustibili da biomassa devono essere caratterizzati da un contenuto di umidità inferiore al 30% e da un rapporto carbonio/azoto maggiore di 30. Le biomasse cellulosiche tipicamente impiegate per la produzione di biocombustibili solidi (v. ancora fig. 1) sono: *a*) legna e derivati; *b*) paglie di cereali; *c*) fusti e foglie di colture dedicate (canna comune, sorgo, miscanto, ecc.); *d*) scarti e residui di lavorazioni agroindustriali (lolla, pula, gusci, noccioli, sanse, ecc.).

### Combustione

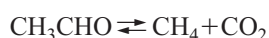
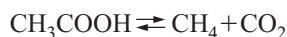
Tra i vari processi per la conversione termochimica della biomassa, la combustione diretta è quello più utilizzato e tecnologicamente maturo, sebbene siano in corso ricerche volte allo sviluppo di sistemi sempre più efficienti e con minore impatto ambientale.

Il processo di combustione permette la trasformazione dell'energia chimica intrinseca alla biomassa in energia termica, mediante una serie di reazioni chimico-fisiche. Quando la biomassa viene immessa in una camera di combustione subisce inizialmente una essiccazione; successivamente, man mano che la temperatura aumenta, si hanno processi di pirolisi, di gassificazione e, infine, di combustione. Con appropriati rapporti combustibile/aria, la biomassa si decompone e volatilizza, lasciando un residuo carbonioso (ceneri) costituito principalmente dai composti minerali inerti.

Il composto volatile, che costituisce circa l'85% della biomassa iniziale, consiste in una frazione gassosa, una frazione condensabile, una frazione carboniosa e, infine, fumo. La frazione gassosa contiene, oltre a biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>), il monossido di carbonio (CO), alcuni idrocarburi (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) e idrogeno (H<sub>2</sub>), che vengono ulteriormente ossidati mediante le seguenti principali reazioni esotermiche:



La frazione condensabile contiene acqua e composti organici con basso peso molecolare, come le aldeidi, gli acidi, i chetoni e gli alcoli che, con l'aumentare della temperatura, tendono a frammentarsi in composti più leggeri; per esempio, nel caso dell'acido acetico e dell'aldeide acetica si hanno le reazioni:



I prodotti di queste reazioni subiscono un ulteriore processo di ossidazione con le stesse modalità indicate nel punto precedente.

La frazione carboniosa può reagire con l'ossigeno per dare CO e CO<sub>2</sub>. Infine, il fumo è composto da particelle di carbone di dimensioni molto piccole, da catrame e da ceneri (*fly ashes*).

Il risultato complessivo di tali reazioni è la produzione di energia termica, che viene recuperata mediante scambiatori di calore in cui si trasferisce l'energia termica ad altri fluidi vettori, quali aria o acqua. I principali problemi di impatto ambientale connessi con la combustione della biomassa sono legati alla natura del combustibile solido, per esempio, la sua composizione chimica, il contenuto delle sostanze volatili, il tasso di umidità, la disomogeneità fisica, il contenuto e il comportamento delle ceneri. Le principali tecnologie di combustione sono descritte di seguito.

*Combustione a griglia (fissa o mobile).* Le griglie fisse sono generalmente usate per i combustori di piccola taglia. Per gli impianti industriali si adoperano le griglie mobili che facilitano la movimentazione, il rimescolamento del combustibile e la rimozione delle ceneri; tali griglie possono essere di vario tipo, vibranti orizzontalmente e/o verticalmente, a nastro, rotanti, a gradini, a rulli, ecc., e in alcuni casi vengono raffreddate con aria o con acqua per consentirne un carico termico specifico maggiore.

*Combustione in sospensione.* È indicata per le biomasse polverulente e leggere tipo la lolla di riso, la segatura, la polvere di legno e la paglia triturrata, in cui la biomassa viene alimentata nella parte superiore del combustore e brucia mentre cade sulla griglia sottostante, che ha principalmente la funzione di scarico delle ceneri.

*Combustione a tamburo rotante.* È utilizzata per applicazioni in cui il combustibile ha caratteristiche termofisiche particolarmente povere e contiene elevati carichi di inquinante. La biomassa in combustione è continuamente rimescolata dalla lenta rotazione del tamburo e il percorso dei prodotti di combustione può essere in equicorrente o in controcorrente con la direzione di avanzamento della biomassa.

*Combustione a doppio stadio.* In questo tipo di combustione si verificano preliminarmente la gassificazione e la pirolisi del materiale in una prima camera e poi una completa combustione dei prodotti gassificati in una seconda, che costituisce il corpo principale del trasferimento dell'energia al fluido vettore.

*Combustione in letto fluido.* Può trattare diversi tipi di biomassa, inclusi i materiali carboniosi 'difficili' quali ligniti, torbe, rifiuti solidi urbani selezionati, fanghi di varia natura, anche a elevata percentuale di umidità (superiore al 40%). La camera di combustione è parzialmente riempita con materiale inerte, quale sabbia o allumina, che viene fluidificato dall'aria di combustione

primaria, in modo da costituire il letto bollente o, nel caso di maggiore velocità dell'aria e di trascinamento del materiale, il cosiddetto letto ricircolato, il quale viene recuperato e reimesso nella camera di combustione. Oltre al materiale inerte può essere immesso anche del materiale che permette di variare le condizioni dell'ambiente nel quale si verifica la combustione: infatti, nel caso di combustibili inquinati con composti acidi o contenenti ceneri bassofondenti, si può usare del calcare o della dolomite per abbattere gli inquinanti acidi ed evitare la fusione delle ceneri nelle condizioni operative del combustore.

Indipendentemente dalla tecnologia utilizzata, i principali problemi connessi con la combustione delle biomasse sono costituiti dal grado di umidità del materiale (25-55% per i residui agroforestali e della lavorazione del legno, inferiore al 10% per il pellet), che se varia in modo significativo rappresenta un ostacolo rilevante per la gestione ottimale del processo e per la massimizzazione delle rese energetiche, e dalla quantità e natura degli inerti presenti nella biomassa, che sono causa di incrostazioni per la fusione delle ceneri (800-1.200 °C).

Le apparecchiature adoperate per la combustione puntano a recuperare la massima parte dell'energia sviluppata durante il processo. Tale recupero può avvenire in modo diretto tramite le pareti del dispositivo (stufe), oppure in modo indiretto per mezzo di fluido vettore (caldaie). La presenza della sezione di recupero del calore non solo è conveniente dal punto di vista energetico ed economico, ma si rende necessaria per ridurre la temperatura dei fumi in uscita dalla camera di combustione (può raggiungere 1.200 °C) fino a valori tali (inferiori o uguali a 300 °C) da rendere possibile il loro trattamento.

I dispositivi di combustione delle biomasse presentano caratteristiche costruttive differenti, a seconda che il loro impiego sia destinato al settore civile, agricolo o industriale. I principali dispositivi per il settore civile (riscaldamento degli ambienti) che vedono numerosi modelli in commercio possono essere così raggruppati:

- termocucine a legna, di uso prettamente monofamiliare, adibite sia al riscaldamento di ambienti sia alla cottura dei cibi, aventi un rendimento globale di circa il 70-75%;
- termocamini a legna, anch'essi per uso monofamiliare, con scambiatori ad acqua o ad aria, aventi una efficienza media pari a circa il 50%;
- caldaie a legna di piccola/media potenza (20-300 kW<sub>t</sub>), aventi una efficienza media variabile tra il 60 e l'80%, in grado di garantire il riscaldamento di singole unità abitative o di piccoli complessi residenziali. Tali dispositivi nel caso delle taglie più piccole sono dotati di griglia fissa e di caricamento manuale del combustibile, mentre per le potenzialità maggiori sono presenti tramogge di carico, sistemi di alimentazione,

griglie fisse o mobili, sistemi di evacuazione delle ceneri e abbattitori di polveri prima dello scarico dei fumi al camino. Le caldaie per il riscaldamento dell'acqua sono del tipo a tubi di fumo, in cui i gas caldi di combustione attraversano i fasci tubieri immersi nell'acqua a cui trasferiscono il calore.

Per il settore agricolo sono particolarmente interessanti i combustori a camera larga e a griglia mobile, dotati di opportuni sistemi per l'alimentazione di paglia in balle, dei residui di potatura degli alberi, dei residui della lavorazione agroindustriale, ecc. I combustori devono essere progettati opportunamente per garantire il buon funzionamento con biomasse caratterizzate da un elevato contenuto in ceneri, anche bassofondenti, e con un grado di umidità variabile in un ampio intervallo. Le applicazioni più frequenti, e in molti casi più convenienti economicamente, che vengono registrate in questo settore, sono l'essiccazione dei prodotti agricoli e il riscaldamento di serre e di stabulari per l'allevamento dei suini e del pollame, oltre agli usi domestici normali. La potenza dei dispositivi termici è generalmente compresa tra 200 e 2.000 kW<sub>t</sub>. Anche in questo caso lo scambiatore di calore è del tipo a tubi di fumo.

Nel settore industriale sono presenti numerosi impianti di combustione diretta delle biomasse di tipo agroforestale o agroindustriale, dei RSU o dei rifiuti industriali. Tali applicazioni consentono la produzione di energia termica utilizzata per il ciclo produttivo, la produzione di energia elettrica o la cogenerazione (produzione simultanea di energia elettrica e termica).

L'impianto è costituito dalle sezioni seguenti:

- stoccaggio delle biomasse, che può avere dimensioni tali da garantire la fornitura del combustibile per alcuni giorni o per periodi molto più lunghi (anche alcuni mesi) nel caso si trattino biomasse a carattere stagionale;
- eventuale pretrattamento consistente nella riduzione della pezzatura e dell'umidità della biomassa alle specifiche richieste dal sistema di combustione;
- linea di alimentazione dotata degli opportuni controlli di flusso;
- combustore con le caratteristiche descritte in precedenza;
- recupero energetico, mediante scambiatori a tubi di fumo se il fluido vettore è acqua calda a bassa pressione o aria, a tubi di acqua nel caso sia necessario avere acqua in pressione surriscaldata o vapore, a olio diatermico ed eventuale scambiatore a vapore, soprattutto per impianti di potenza non elevata;
- nel caso ci sia produzione di energia elettrica, è necessario introdurre ulteriori componenti quali, per esempio, la turbina a vapore e l'elettrogeneratore a essa collegato, il condensatore del vapore, il degassatore e vari recuperatori termici per l'ottimizzazione del ciclo energetico.

L'azionamento delle turbine a vapore richiede la generazione di vapore surriscaldato a media/alta pressione.

Le potenze degli impianti che producono solo energia termica possono variare da alcune centinaia di kW<sub>e</sub> ad alcune decine di MW<sub>e</sub>; il limite della taglia superiore degli impianti industriali a biomasse è legato alle caratteristiche tecniche e organizzative-gestionali della filiera del legno o di altri tipi di biomasse. Il numero delle ore di funzionamento annue rappresenta spesso un limite al ritorno economico degli investimenti, se confrontato con impianti alimentati a combustibile convenzionale, in quanto questi ultimi presentano generalmente bassi costi di investimento a fronte di elevati costi energetici.

L'utilizzazione delle biomasse per la produzione di energia elettrica si realizza generalmente mediante tre tipi di dispositivi: sistemi a pistoni, alimentati dal vapore, per impianti di piccola taglia (da 50 kW<sub>e</sub> a 1 MW<sub>e</sub>; efficienza del 6-10% per sistemi a singolo stadio e del 12-20% per quelli multistadio); turbine a vapore, per impianti da 0,5 MW<sub>e</sub> fino a 500 MW<sub>e</sub> e oltre, con il maggior numero di casi intorno a 50 MW<sub>e</sub> (efficienza del 25% circa per taglie di 5-10 MW<sub>e</sub> e superiore al 30% per impianti da 50 MW<sub>e</sub> in cogenerazione); sistemi a ciclo Rankine con fluido organico (ORC, Organic Rankine Cycle) per impianti da 0,5 a 2 MW<sub>e</sub>.

La realizzazione di impianti per la produzione di energia elettrica o di cogenerazione dalla combustione della biomassa è tanto più economicamente vantaggiosa, quanto maggiore è la sua disponibilità in grosse quantità localizzate geograficamente e distribuite nel tempo, poiché la biomassa ha una bassa densità energetica, circa dieci volte inferiore a quella del petrolio. Ciò avviene in seguito alla riduzione considerevole dell'incidenza del costo di trasporto e di stoccaggio delle notevoli quantità necessarie al funzionamento di una centrale, la cui potenzialità tipica è generalmente nel range di 3-10 MW<sub>e</sub>. Per dare un'idea del fabbisogno della biomassa per realizzazioni di questo tipo, si deve considerare che occorre circa 1 kg di biomassa per produrre 1 kWh di energia elettrica.

Il principale parametro energetico impiegato per valutare gli impianti è il rendimento netto globale, che è dato dal rapporto percentuale tra l'energia disponibile per le utenze esterne e quella introdotta dal combustibile nell'impianto di produzione dell'energia, al netto dei consumi necessari al funzionamento dell'impianto stesso.

### Pirolisi e gassificazione

La pirolisi è un processo di decomposizione termica della biomassa a temperatura elevata (300-700 °C) in assenza di ossigeno. Dalla pirolisi della biomassa (v. ancora fig. 1) si ottengono tradizionalmente prodotti solidi (carbone vegetale), liquidi (oli di pirolisi o bio-oli) e/o una miscela di gas combustibili, in genere riutilizzati direttamente all'interno del processo per mantenere

elevata la temperatura (Bridgwater *et al.*, 2002). La pirolisi della biomassa è stata utilizzata con tecnologie tradizionali per la produzione di carbone di legna, ma uno degli interessi attuali è verso processi avanzati che comportino un'elevata resa di conversione in prodotti liquidi ad alto contenuto energetico, più facilmente trasportabili rispetto alla biomassa solida e usati direttamente come combustibili, o sottoposti a frazionamento per ottenere una vasta gamma di prodotti chimici di interesse industriale. Rese in bio-olio superiori all'80% in peso rispetto alla biomassa originaria possono essere ottenute con processi di pirolisi rapida, o *flash pyrolysis*, a temperature di reazione moderate (Bridgwater, 2005). Una delle chiavi di lettura più moderne dei processi di pirolisi delle biomasse è quella che porta alla produzione di gas di sintesi (v. oltre).

La gassificazione consiste nella trasformazione di un combustibile solido, nel caso specifico la biomassa, in combustibile gassoso, tramite la reazione con l'ossigeno. La gassificazione è un processo da cui si ottiene tradizionalmente un gas a basso potere calorifico (variabile tra 900 e 1.200 kcal/Nm<sup>3</sup>) per reazione della biomassa stessa con una quantità di aria tale da non consentire una completa ossidazione. Il potere calorifico del gas può aumentare sensibilmente se, in luogo dell'aria, viene utilizzato ossigeno.

I tipici componenti combustibili presenti nel gas prodotto sono il monossido di carbonio (CO) e l'idrogeno (H<sub>2</sub>), accompagnati anche da piccole quantità di idrocarburi. I componenti non combustibili del gas prodotto sono l'azoto (N<sub>2</sub>), se viene utilizzata aria come comburente, gli ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>), derivanti dalla ossidazione dell'azoto legato alla biomassa, il biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>) e il vapor d'acqua. La proporzione tra i vari componenti del gas varia notevolmente in funzione del diverso tipo di gassificatore, di combustibile e del contenuto di umidità. Oltre alle sostanze organiche, le biomasse contengono anche sali minerali che non vengono gassificati, ma trasformati in ceneri e polveri.

In pratica, per mezzo della gassificazione la biomassa viene trasformata in un gas combustibile che è utilizzabile in motori a combustione interna o in caldaie per la produzione di energia meccanica o elettrica, più pregiate della semplice energia termica, o che può trovare impiego in forni per la produzione, per esempio, di cemento o di laterizi.

I dispositivi di gassificazione, tranne che per alcuni particolari costruttivi e di processo, hanno le stesse caratteristiche di quelli impiegati per la combustione della biomassa, ma l'ossidazione del combustibile avviene in difetto di ossigeno. Nella **tab. 8** sono riportati i principali tipi di gassificatori e le loro caratteristiche peculiari (Pignatelli e Scoditti, 2004).

Tralasciando i gassificatori a letto fisso, che si prestano bene per basse/medie potenze, attualmente l'interesse

tab. 8. Principali tipologie di gassificatori

SISTEMA DI CONTATTO E PRINCIPALI CARATTERISTICHE	VANTAGGI	LIMITAZIONI
<i>Letto fisso downdraft (equicorrente)</i>		
Solido e gas verso il basso Livelli molto bassi di catrame Moderato livello di particolati	Semplice, costruzione robusta Alta conversione del carbonio Basso trascinamento di ceneri Alto tempo di residenza solidi	Limitata possibilità di scale-up Bassa capacità specifica Alta umidità della biomassa Deposito di ceneri sinterizzate
<i>Letto fisso updraft (controcorrente)</i>		
Solido verso il basso, gas verso l'alto Livelli molto alti di catrame Moderato livello di particolati	Semplice, costruzione robusta Buone possibilità di scale-up Alta efficienza termica Alto tempo di residenza solidi	Bassa capacità specifica Alta umidità della biomassa Deposito di ceneri sinterizzate
<i>Letto fluido bollente</i>		
Il gas passa attraverso un letto bollente  Solido inerte nel reattore Basso livello di catrame Alto livello di particolati	Buon controllo della temperatura  Buone possibilità di scale-up Alta capacità specifica Possibile uso di catalizzatore nel letto	Scarsa versatilità nella scelta della biomassa Perdita di carbonio nelle ceneri
<i>Letto fluido circolante</i>		
Particolati separati e riciclati  Basso livello di catrame Alto livello di particolati	Buon controllo della temperatura  Buone possibilità di scale-up Aumentato range di particolato Alte portate di reazione Alta conversione del carbonio Costruzione semplice	Non è possibile l'uso di catalizzatore nel letto
<i>Letto fluido trascinato</i>		
Alimentazione fine trasportata da gas ad alta velocità Assenza di inerti solidi Basso livello di catrame Livello di particolati molto alto	Molto buona la possibilità di scale-up  Alta conversione del carbonio	Pretrattamento costoso  Pratico solo oltre 10 t/h Scorie nelle ceneri Materiali di costruzione costosi Scarsa versatilità nella scelta della biomassa
<i>Doppio letto fluido</i>		
Pirolisi nel primo reattore  Combustione del catrame nel 2° reattore che riscalda il letto del 1° Alto livello di catrame Alto livello di particolati	Medio potere calorifico del gas usando solo aria Possibile uso di catalizzatore nel letto	Progetto complesso e costoso  Pratico solo oltre 5 t/h  Scale-up possibile, ma complesso

industriale è rivolto soprattutto ai letti fluidi. Esaminando più dettagliatamente la gassificazione di biomasse in un letto fluido, si possono distinguere i tre stadi fondamentali di essiccamento, pirolisi e processi ossidoriduttivi, con la differenza sostanziale che tali operazioni si svolgono rapidamente in un reattore quasi isotermico e con tempi di permanenza estremamente brevi. Le condizioni di isotermicità sono garantite da un letto fluidizzato

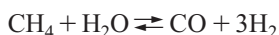
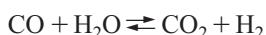
di sabbia, dove l'agente gassificante usato normalmente è aria, ma è possibile utilizzare anche ossigeno o vapore. Le biomasse in genere hanno un tenore elevato di umidità (sino al 30-40%), per cui l'H<sub>2</sub>O viene liberata rapidamente assieme ad altre sostanze volatili all'ingresso nel letto fluido, a temperature tra 500 e 800 °C.

Il combustibile viene inizialmente trasformato in biossido di carbonio, sostanze catramose, idrocarburi,

residui carboniosi e vapor d'acqua. Parte delle sostanze volatili sviluppate subiscono un successivo processo di trasformazione, con formazione di un gas grezzo finale ( $\text{CO} + \text{H}_2$ : 20-35%;  $\text{CH}_4$ : 2-4%;  $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ : percentuale restante) che veicola una quantità non trascurabile di materiale particellare carbonioso e di inerti (ceneri).

Il letto fluido si presta bene per la gassificazione di combustibili a basso potere calorifico, in quanto è caratterizzato da una rapida e uniforme distribuzione del calore, con un controllo della temperatura relativamente facile. Nel letto di inerte i residui carboniosi si accumulano fino a raggiungere una certa frazione che varia da biomassa a biomassa in funzione della granulometria della stessa e della sua reattività. A questo punto tanta biomassa entra nel gassificatore quanta ne esce come prodotto gassificato, catrame trasportato dal gas (tar) e residuo carbonioso presente nelle ceneri (char).

Alcune delle reazioni che hanno luogo nel letto sono:



Il metano e gli idrocarburi superiori provengono dalle reazioni di pirolisi della biomassa. Le reazioni sopra

riportate possono influenzare il potere calorifico del gas che dipende essenzialmente dalla concentrazione finale in  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$ .

Nel bilancio generale del processo assumono importanza rilevante la portata oraria della biomassa, la portata oraria dell'aria, la temperatura del letto, il contenuto di umidità della biomassa e il tempo di residenza della biomassa e dei gas nel letto inerte. A loro volta queste variabili sono influenzate dai seguenti parametri: *a*) granulometria ottimale del materiale inerte costituente il letto fluido; *b*) velocità minima del vettore utilizzato per la fluidificazione (tanto più alta quanto più basse sono la densità e la viscosità del fluidificante); *c*) altezza ottimale del letto (tale da dar luogo a perdite di carico non eccessive, per ridurre il consumo di energia della soffiante); *d*) dimensioni del reattore e delle apparecchiature accessorie (cicloni, ugelli, tubazioni, ecc.).

Poiché nel gasogeno a letto fluido si devono contenere aspetti fluidodinamici con altri di natura cinetica, la scelta dei parametri di progetto influenza la qualità del gas e il grado di gassificazione della biomassa.

Un parametro che diversifica i gassificatori è la pressione di esercizio. I gassificatori possono operare sotto pressione o a pressione atmosferica. La composizione del gas e il potere calorifico non sono significativamente diversi per questi due sistemi. Nei gassificatori pressurizzati il

**fig. 8.** Impianto pilota di gassificazione delle biomasse a letto fluido ricircolante del centro ENEA della Trisaia (Rotondella, Matera).



sistema di alimentazione è più complesso e costoso; a parità di dimensioni gli investimenti sono più alti; il gas prodotto non deve essere compresso e ciò facilita la depurazione del gas anche in presenza di elevati contenuti di catrame; l'efficienza è più alta. Nei gassificatori atmosferici per le applicazioni alle turbine a gas sono richiesti bassi livelli di catrame nel gas prodotto e una temperatura relativamente bassa prima della compressione del gas; la qualità del gas richiesta per l'impiego nei motori a combustione interna non necessita di impegni onerosi e, inoltre, il gas non deve essere in pressione. Per questo tipo di gassificatori i costi di investimento sono potenzialmente inferiori a più basse potenze (meno di 30 MW<sub>e</sub>).

Un altro parametro fondamentale che diversifica i gassificatori a letto fluido è l'agente gassificante. I più semplici utilizzano aria, ma a causa dell'effetto di diluizione dell'azoto il potere calorifico del gas prodotto è normalmente basso (circa 5.400-7.100 kJ/Nm<sup>3</sup>).

Come accennato in precedenza, per incrementare il potere calorifico del gas, invece dell'aria è possibile utilizzare come agente gassificante ossigeno o vapor d'acqua. In quest'ultimo caso aumenta anche il tenore di idrogeno nel gas, e ciò rende particolarmente interessante, in prospettiva, questa tecnologia per l'accoppiamento con *fuel cells* o per la produzione di idrogeno da biomasse. La **fig. 8** mostra un gassificatore pilota a letto fluido circolante (Pignatelli e Scoditti, 2004), dove le zone di combustione e di gassificazione sono separate tra loro; il trasporto di energia termica dall'una all'altra zona avviene per effetto della circolazione di materia (sabbia). Questo accorgimento permette di compartimentare la zona di gassificazione, con immissione di energia termica dal combustore al gassificatore, senza immissione di aria e utilizzando come agente gassificante vapore. Ciò rende possibile ottenere un gas ad alto tenore di idrogeno, utilizzabile per l'alimentazione di fuel cell a carbonati fusi per la produzione distribuita di energia elettrica e calore. Il gas prodotto dall'impianto in questione ha un tenore di idrogeno di circa il 45-50% e un potere calorifico di circa 11.500 kJ/Nm<sup>3</sup>.

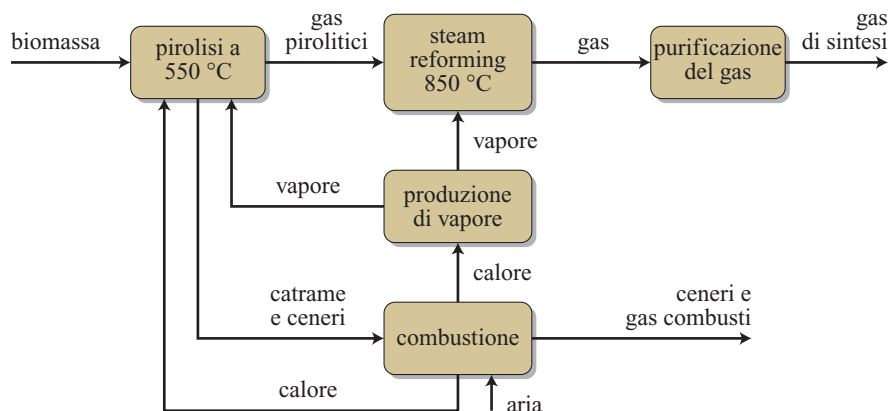
Per tracciare un quadro complessivo relativo allo status delle tecnologie di gassificazione può essere evidenziato come l'interesse commerciale nel settore specifico sia nato nel corso degli anni Settanta del 20° secolo, con la prima crisi petrolifera. In quel periodo si è registrata la diffusione di impianti di piccola scala, specie negli Stati Uniti e in Europa, impiegati particolarmente nell'ambito di industrie collegate alla lavorazione del legno. Nel corso degli anni Novanta un grosso sforzo nel settore ricerca e sviluppo, supportato prevalentemente dagli enti governativi statunitensi, si è concentrato sullo sviluppo di impianti dimostrativi basati su tecniche di IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) e di *cofiring* in impianti di gassificazione di carbone. I risultati di questo impegno hanno portato alla realizzazione di alcuni impianti commerciali di media scala alimentati con scarti lignocellulosici.

Attualmente l'innovazione tecnologica del settore è orientata a rendere disponibili impianti di grande scala per la produzione di gas di sintesi (CO+H<sub>2</sub>) a costi competitivi rispetto alle fonti fossili. Le soluzioni impiantistiche proposte sono frequentemente basate sullo *steam reforming* di gas da pirolisi. Un esempio tipico di questi processi è riportato in **fig. 9** (DOE, 2005).

La vera barriera al successo nella produzione economicamente competitiva di gas di sintesi da biomasse sembra essere costituita dalla larga disponibilità, a basso costo e uniforme nel tempo, di materie prime con caratteristiche fisiche (dimensioni, densità, ecc.) e chimiche (composizione, potere calorifico, ecc.) costanti.

Alla possibilità di ottenere gas di sintesi a costi competitivi è legato il successo di una delle ipotesi attualmente più interessanti di sfruttamento integrale delle biomasse per produrre energia, nota come Biomass to Liquid (BtL). Le tecnologie BtL (Griesemann, 2004) si basano infatti su due stadi produttivi in successione: gassificazione della biomassa per l'ottenimento di gas di sintesi e conversione catalitica di quest'ultimo (sintesi Fisher-Tropsch) in idrocarburi liquidi (v. ancora **fig. 1**).

**fig. 9.** Schema di un processo avanzato per la produzione di gas di sintesi da biomasse.



I principali elementi resi disponibili dalla letteratura recente relativa alle tecnologie BtL sono i seguenti:

- i carburanti ottenuti consentirebbero di ottenere uno dei risultati più favorevoli in termini di riduzione delle emissioni di gas serra (EUCAR/JRC/CONCAWE, 2003);
- quattro dei principali costruttori di autoveicoli europei hanno formato un consorzio per la promozione di tale tecnologia; Daimler Chrysler e Volkswagen hanno depositato il marchio Sun Diesel per il gasolio ottenuto via BtL; produzioni su scala pilota sono in corso in Germania e in Svezia;
- un impianto per la produzione di 100.000 t/a di carburanti consumerebbe circa 1.500 t/d di biomassa, richiederebbe un investimento compreso tra 250 e 300 milioni di euro e avrebbe un'efficienza energetica (GJ/GJ) compresa tra il 50 e il 55% (Griesemann, 2004);
- il potenziale di sostituzione dei carburanti convenzionali di origine petrolifera nell'Unione Europea a 15 stati, stimata al 2010, sarebbe compreso tra un minimo del 4,5% e un massimo del 10%, corrispondenti rispettivamente a 13 e 32 milioni di tonnellate di petrolio equivalente all'anno (Hart *et al.*, 2003; Wurster *et al.*, 2002).

## 6.5.5 Conclusioni

L'attuale domanda del mercato energetico mondiale è soddisfatta per circa l'80% dai combustibili di origine fossile. Il contributo fornito dalle biomasse a questo mercato può essere attualmente valutato pari al 10-15%. L'incertezza di quest'ultima stima è legata a un uso non commerciale delle biomasse che, in molti paesi in via di sviluppo, costituiscono la principale fonte energetica.

Pur nell'incertezza delle stime sopra riportate, è comunque certo che il materiale di origine vegetale costituisce la più importante fonte energetica rinnovabile del pianeta. Data l'attualità delle problematiche relative ai cambiamenti climatici potenzialmente connessi al crescente impiego dei combustibili fossili e all'impetuosa crescita del prezzo degli idrocarburi, è opportuna un'attenta analisi dei vincoli e delle prospettive di impiego delle biomasse per la produzione di energia. Limitando tale analisi ai processi termochimici, va innanzitutto evidenziato che l'introduzione nei paesi industrializzati di specifiche tecniche per i biocombustibili solidi ne diffonderà la commercializzazione e di conseguenza un più largo impiego. Già da qualche tempo si registra in quasi tutti i paesi europei una crescita sostenuta nell'impiego di pellet, corrispondente all'impiego di moderni combustori ad alta efficienza energetica in sostituzione dei tradizionali sistemi di riscaldamento domestico alimentati a carbone o a gasolio (IEA, 2005b).

La diffusione di impianti di combustione delle biomasse di più grande scala rispetto agli attuali per la produzione di elettricità (potenzialità attesa 50-80 MW<sub>e</sub>) o di elettricità e calore si registrerà principalmente in quei paesi ricchi di sottoprodotti e scarti lignocellulosici, o in nazioni in cui esistono larghi margini di sfruttamento energetico delle biomasse da rifiuti di origine urbana (Van Loo e Koppjan, 2002). La co-combustione in impianti per la generazione di energia elettrica di medie/grandi dimensioni è il settore in cui si registra la più imponente crescita dell'impiego di biomasse anche in alcuni paesi europei (per esempio, Spagna, Olanda e Germania). I vantaggi di tale impiego, specie in impianti alimentati a carbone, sono evidenti: investimenti minimi e riduzione dei costi e delle emissioni sia di inquinanti tradizionali sia di gas serra. La co-combustione delle biomasse con il carbone costituisce una delle strade che la Cina e l'India stanno percorrendo per far fronte alla crescente domanda di energia (Van Loo e Koppjan, 2002).

Per ciò che riguarda la produzione di gas di sintesi da biomasse, con tutti i possibili sviluppi a essa collegati, come per esempio la produzione di energia elettrica con cicli combinati (IGCC), di idrogeno e di biocarburanti (BtL), lo scenario futuro appare di complessa analisi (Möllersten *et al.*, 2003; Hamelick *et al.*, 2004). La realizzazione di grandi impianti di gassificazione/pirolisi, necessari per superare i vincoli di economia di scala, sembra trovare ostacoli principalmente nella disponibilità delle grandi quantità necessarie di materia prima a basso costo (Morris *et al.*, 2005).

In conclusione il futuro delle biomasse nello scenario energetico può delinearsi in due fasi successive. Nel breve e/o medio periodo (già in essere) si assisterà a una più razionale valorizzazione dei materiali lignocellulosici, con la standardizzazione di nuovi prodotti energetici come, per esempio, i *solid biofuels* (biocarburanti solidi) che si affiancheranno ai più tradizionali *liquid biofuels* (biocarburanti liquidi). Il mercato di tali prodotti assumerà una dimensione internazionale estendendo gli attuali confini circoscritti a singole realtà nazionali. Su queste basi, nel periodo di 1 o 2 decenni, il contributo delle biomasse alla produzione mondiale di energia incrementerà notevolmente a partire dagli attuali 40-55 EJ/a (1 EJ = 10<sup>18</sup> J). L'entità di tale incremento sarà tanto più elevata quanto più alto resterà il prezzo degli idrocarburi. Previsioni formulate in questo contesto dall'International Energy Agency (IEA, 2003) stimano una crescita minima annua pari al 4%.

Nel medio e/o lungo periodo (entro la prima metà del secolo corrente) la quantità di energia da biomasse potrebbe superare quella generata dal petrolio, raggiungendo un valore pari a 200-300 EJ/a (Faaij, 2004). Tale possibilità è concretamente legata a una produzione agricola di biomasse per l'energia economicamente competitiva, che superi gli attuali vincoli quantitativi dei materiali

lignocellulosici residuali (sottoprodotti e scarti di altre filiere produttive).

La reale sostenibilità ambientale di tale produzione è però tuttora non dimostrata. Ai dubbi relativi al mantenimento nel tempo delle risorse idriche, della fertilità dei suoli e della biodiversità, ecc., già da tempo formulati (IEA, 2005b), se ne sono recentemente aggiunti altri relativi al bilancio delle emissioni di gas serra dalla produzione agricola. Infatti, in accordo con i dati pubblicati dal Max-Planck Institut (Keppler *et al.*, 2006), alla crescita delle piante va attribuita un'emissione di metano nell'atmosfera (generato da processi fitocellulari aerobici tuttora sconosciuti) pari a circa un terzo del totale delle emissioni di questo importante gas serra.

## Bibliografia citata

- BENEMANN J.R. (1997) *Feasibility analysis of photobiological hydrogen production*, «International Journal of Hydrogen Energy», 22, 979-987.
- BRABER K. (1995) *Anaerobic digestion of municipal solid waste: a modern waste disposal option converge of breakthrough*, «Biomass and Bioenergy», 9, 365-376.
- BRIDGWATER A.V. (edited by) (2005) *Fast pyrolysis of biomass. A handbook*, Newbury, CPL Press, 1999-2005, 3v.; v.III.
- BRIDGWATER A.V. *et al.* (2002) *The status of biomass fast pyrolysis*, in: Bridgwater A.V. (edited by) *Fast pyrolysis of biomass. A handbook*, Newbury, CPL Press, 1999-2005, 3v.; v.II, 7-23.
- BROEK R. VAN DER *et al.* (1996) *Biomass combustion for power generation technologies*, «Biomass and Bioenergy», 11, 271-281.
- BULLARD M.J. *et al.* (2002) *Yield improvements through modification of planting density and harvest frequency in short rotation coppice Salix spp. 2: Resource capture and use in two morphologically diverse varieties*, «Biomass and Bioenergy», 22, 27-39.
- CHIPELLO C.J. (2004) *Iogen's Milestone. It's selling ethanol made of farm waste*, «The Wall Street Journal», 21 April.
- DOE (US Department of Energy) - Energy Efficiency and Renewable Energy - Biomass Program (2005) *Large scale gasification*.
- ENEA (Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente) (2005) *Le fonti rinnovabili 2005. Lo sviluppo delle rinnovabili in Italia tra necessità e opportunità*, Roma, ENEA.
- EUCAR/JRC/CONCAWE (2003) *Well to wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context*, December.
- EUROPEAN COMMISSION (2005) *Energy scientific and technological indicators and references*, EUR 21611.
- FAAJ A. (2004) *Modern biomass conversion technologies*.
- GRIESEMANN J.C. (2004) *Biomass to liquids diesel fuels, sourcing stakes and enablers*, in: *Which fuel for low CO<sub>2</sub> engines. Proceedings of the Institut Français du Pétrole international conference*, Rueil Malmaison (Paris), 22-23 September, 21-25.
- HAMELICK C.N. *et al.* (2004) *Production of FT transportation fuels from biomass: technical options, process analysis and optimization and development potential*, «Energy. The International Journal», 29, 1743-1771.
- HART D. *et al.* (2003) *Liquid biofuels and hydrogen from renewable resources in the UK to 2050. A technical analysis*, Report for the UK Department of transport, London, E4tech.
- HOLMGREN J. (2005) *Opportunities for biorenewables in oil refineries*, in: *Proceedings of 1st International biorefinery workshop*, Washington (D.C.), 20-21 July.
- IEA (International Energy Agency) (2003) *Renewables for power generation. Status & prospects*, Paris, Organization for Economic Cooperation and Development/IEA.
- IEA (International Energy Agency) (2004) *Biofuel for transport. An international perspective*, Paris, Organization for Economic Cooperation and Development/IEA.
- IEA (International Energy Agency) (2005a) *Renewables information 2005*, Paris, Organization for Economic Cooperation and Development/IEA.
- IEA (International Energy Agency) (2005b) *Sustainable biomass production for the world market. Proceedings of the workshop & business forum*, University of Campinas, São Paulo (Brasil), 30 November-3 December.
- ITABIA (ITALIAN Biomass Association) (2004) *Le biomasse per l'energia e l'ambiente. Rapporto 2003*.
- JONES M.B., WALSH M. (edited by) (2001) *Miscanthus: for energy and fibre*, London, James & James.
- KEPPLER F. *et al.* (2006) *Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions*, «Nature», 439, 187-191.
- KHANAL S.K. *et al.* (2004) *Biological hydrogen production: effects of pH and intermediate products*, «International Journal of Hydrogen Energy», 26, 547-550.
- KOLLMANN F. (1951) *Tecnologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*, München, Springer.
- LEVIN D. *et al.* (2003) *Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application*, «International Journal of Hydrogen Energy», 29, 173-185.
- LIN C.Y., LAY C.H. (2004) *Carbon/nitrogen ratio effect on fermentative hydrogen production by mixed microflora*, «International Journal of Hydrogen Energy», 29, 41-45.
- LOO S. VAN, KOPPIAN J. (2002) *Handbook of biomass combustion and co-firing*, Enschede (The Netherlands), Twente University Press.
- MÖLLERSTEN K. *et al.* (2003) *Potential market niches for biomass energy with CO<sub>2</sub> capture and storage. Opportunities for energy supply with negative CO<sub>2</sub> emissions*, «Biomass and Bioenergy», 25, 273-285.
- MORRIS M. *et al.* (2005) *Status of large scale biomass gasification and prospects*, in: Knoef A.M. (editor) *The handbook on biomass gasification*, Enschede (The Netherlands), BTG, 76-112.
- PIGNATELLI V. (1997) *Le colture energetiche nel panorama nazionale ed europeo*, in: *Valorizzazione energetica e industriale delle biomasse lignocellulosiche. Atti del convegno*, Centro di ricerche ENEA, Trisaia (Matera, Italia), 26 Giugno.
- PIGNATELLI V., SCODITTI E. (2004) *Biocombustibili da scarti e residui agroindustriali: situazione e prospettive in Italia*, in: *Tecnologie sostenibili per la tutela dell'ambiente. Atti della conferenza internazionale*, Roma, 25 Febbraio.
- Power production from waste and biomass IV. Advanced concepts and technologies. Proceedings of the VTT symposium 222* (2002), Espoo (Finland), 8-10 April.

- RACCUIA S.A. *et al.* (2003) *Cynara cardunculus L. as a biomass crop for mediterranean environment: yields and applications*, in: *Public goods and public policy for agricultural biotechnology. Proceedings of the International Consortium on Agricultural Biotechnology Research 7<sup>th</sup> international conference*, Ravello (Italy), 29 June-3 July.
- RICHARDSON J. *et al.* (2002) *Bioenergy from sustainable forestry. Guiding principle and practice*, Dordrecht-Boston, Kluwer Academic.
- RUNESSON T. (2006) *Boreal forest: an overview*, Report of Faculty of Forestry and the Forest Environment, Lakehead University, Ontario (Canada).
- STREHELER A. (editor) (1988) *Biomass combustion technologies*, FAO/ENEA.
- THANISHO S. (1996) *Feasibility study of biological hydrogen production from sugar cane by fermentation*, in: *Hydrogen energy progress XI. Proceedings of the 11<sup>th</sup> World hydrogen energy conference*, Stuttgart (Germany), 23-28 June, 3v.; v.III, 2601-2606.
- TOMASSETTI G. (2005) *La valutazione energetica delle biomasse*, Roma, FIRE.
- VENTURI G., BONARI E. (2004) *Produzione di biomasse da colture erbacee dedicate e non*, in: *Atti del convegno nazionale sulla bioenergia*, Roma, 12 Maggio.
- WURSTER R. *et al.* (2002) *Vergleich verschiedener Antriebskonzepte im Individualverkehr im Hinblick auf Energie- und Kraftstoffeinsparung*, Studie im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen, März.

VITO PIGNATELLI

Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente  
Centro Ricerche Casaccia  
Santa Maria in Galeria, Roma, Italia

ANDREA ROBERTIELLO

EniTecnologie  
Monterotondo, Roma, Italia