

## La caratterizzazione energetica e merceologica delle biomasse vegetali (°)

### The energetic and commercial characterization of vegetable biomass

**Giacomo Pinelli, Tiziana Zerlia\***

Stazione sperimentale per i Combustibili, Viale A. De Gasperi 3, 20097 San Donato Milanese (MI); \*tel. +39 02516041; fax +39 02514286; e-mail: zerlia@ssc.it

#### RIASSUNTO

*Viene presentata un'indagine conoscitiva svolta con lo scopo di tracciare un panorama esaustivo sulle caratteristiche delle biomasse vegetali.*

*L'indagine entra nel dettaglio delle caratteristiche energetiche e merceologiche, dei metodi di prova e del loro significato fisico - evidenziando differenze quali/quantitative rispetto ai combustibili fossili - con l'obiettivo di fornire una chiave interpretativa esplicita dei parametri analitici correntemente impiegati per descrivere le caratteristiche prestazionali ai fini energetici di un combustibile.*

PAROLE CHIAVE: *biomasse, vegetali, caratterizzazione, energetica, merceologica*

#### SUMMARY

*A complete general view on the characteristics of vegetable biomass is presented. This review goes deep into energetic characteristics, into test methods and their practical significance. The main quali/quantitative differences in comparison with fossil fuels are emphasized.*

*The aim is to supply details of the meaning of analytical parameters and how they may describe the technological behaviour of vegetable biomass as fuel.*

KEYWORDS: *biomass, vegetable, characterization, energetic, commercial*

(°) L'articolo riassume parte dei risultati di una ricerca svolta dalla Stazione sperimentale per i Combustibili con finanziamento del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio

### 1. Lo scenario nazionale

La Direttiva 2001/77/CE ha riaffermato che la promozione dell'elettricità prodotta da fonti energetiche rinnovabili (FER) "è un obiettivo altamente prioritario per motivi di sicurezza e diversificazione dell'approvvigionamento energetico, protezione dell'ambiente e coesione economica e sociale". Secondo le indicazioni della stessa Direttiva, al 2010, il 22% dell'energia elettrica della Unione Europea dovrebbe essere prodotta da FER.

In tale contesto si collocano anche le strategie nazionali di intervento, che prevedono, nell'ambito degli impegni presi per la riduzione delle emissioni di gas serra, oltre ad un aumento dell'efficienza energetica, un sostanziale incremento della quota di energia derivante da fonti rinnovabili. Secondo stime autorevoli, l'incremento per le biomasse al 2010-2015 è particolarmente significativo per il settore elettrico (Fig. 1).

Per fare delle "rinnovabili" una fonte energetica realmente competitiva nei confronti dei combustibili

tradizionali, è tuttavia necessario che le FER, oltre a proporsi come fonti energetiche efficienti e sicure in termini ambientali e di approvvigionamento, siano in grado di sopravvivere, in prospettiva, anche in assenza di una politica di incentivi. La politica europea (e nazionale) dovrebbe dunque essere indirizzata verso il loro miglior utilizzo - energetico e ambientale - a costi sostenibili.

Il perseguimento di tale obiettivo comporta un'indagine a 360 gradi finalizzata ad ottimizzare le filiere della bioenergia anche attraverso un confronto critico con l'energia da combustibili fossili, con la quale, necessariamente, le rinnovabili si devono confrontare.

L'esigenza di approfondire la conoscenza sulle caratteristiche delle varie tipologie di biomassa - in termini merceologici, energetici e ambientali - scaturisce dalla necessità di colmare, almeno parzialmente, la lacuna informativa del panorama energetico nazionale, lacuna che può costituire uno degli ostacoli al decollo delle filiere.

Anche la risposta del mercato alla politica nazionale di incentivi verso l'impiego delle biomasse sembra rispecchiare tale esigenza di informazioni: un monitoraggio effettuato dal nostro Istituto - punto di osservazione significativo in materia di qualità dei combustibili - sull'andamento delle richieste di analisi sui combustibili alternativi (Fig. 2) rivela infatti un marcato incremento, specie per le biomasse vegetali, che rispecchia la maggiore attenzione da parte del mercato (produttori e utilizzatori) sul "prodotto biomassa" e la richiesta di maggiori garanzie sulla sua qualità.

L'indagine conoscitiva, illustrata nel seguito, ha l'obiettivo di tracciare un panorama dettagliato delle caratteristiche delle biomasse vegetali ed è propedeutica alla pianificazione di azioni successive di approfondimento/integrazione delle conoscenze.

L'indagine entra nel dettaglio delle caratteristiche energetiche e merceologiche, dei metodi di prova e

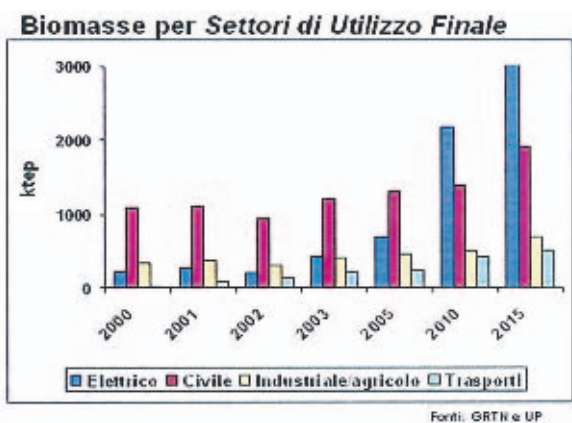


FIG. 1 - Previsioni al 2005-2015 di produzioni di elettricità e calore da biomassa.

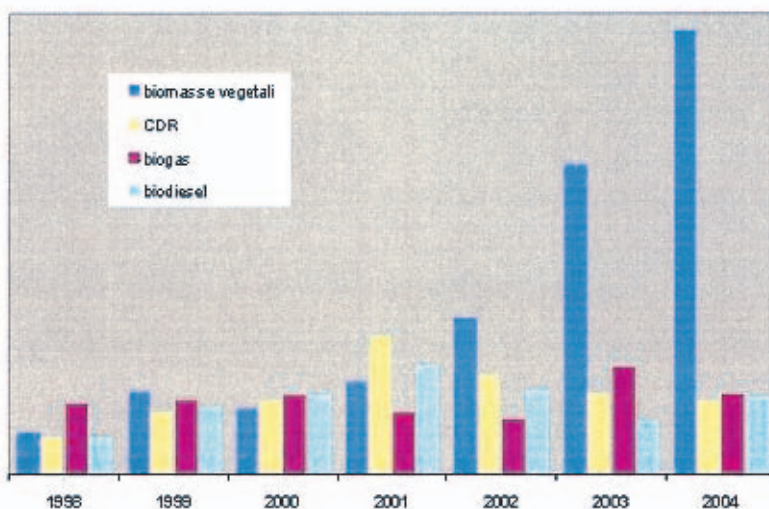


FIG. 2 - Andamento delle richieste di analisi su campioni di combustibili alternativi (SSC 1998-2004).

del loro significato fisico - evidenziando differenze quali/quantitative rispetto ai combustibili fossili, con l'obiettivo di fornire una chiave interpretativa esplicita dei parametri analitici correntemente impiegati per descrivere le caratteristiche prestazionali ai fini energetici di un combustibile.

**2. Le risorse primarie di biomasse per la produzione di energia: classificazione schematica**

In campo energetico, col termine biomassa, si intende genericamente ogni sostanza organica, di origine vegetale o animale, da cui sia possibile ricavare energia.

Ai sensi del decreto di recepimento della Direttiva Europea 2001/77/CE sulla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili (D.L.vo 29 dicembre 2003, n. 387), per **"biomassa"** si intende la parte biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali), e dalla sil-

vicultura e dalle industrie connesse, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani".

Le Figure 3 e 4 riportano due possibili classificazioni schematiche delle fonti primarie di biomasse sfruttabili per uso energetico.

Le risorse comprendono dunque una gamma molto vasta di prodotti, che va dai residui di origine vegetale (colture spontanee e residui del settore agro-forestale, residui dell'industria agro-alimentare e non (industria del legno, della carta, ecc.), oltre alle *colture energetiche dedicate*, alle biomasse di origine animale (reflui zootecnici), alla frazione biodegradabile dei rifiuti.

L'energia delle biomasse può essere sfruttata per via diretta (combustione) per ottenere calore e/o energia o per via indiretta, trasformando la biomassa in prodotti derivati - solidi liquidi gas (Fig. 5).

La via ottimale per lo sfruttamento è legata in maniera significativa (anche) alle caratteristiche delle varie tipologie di biomassa.

La conoscenza delle proprietà costituisce dun-

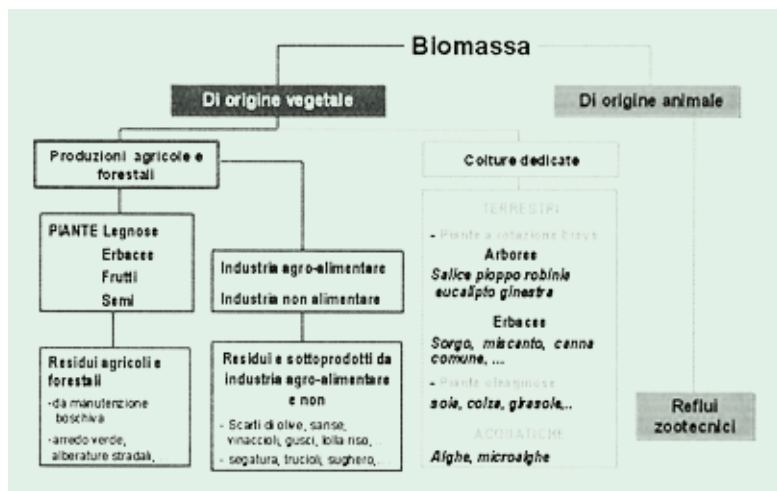


Fig. 3 - Schema semplificato delle fonti primarie di biomasse.

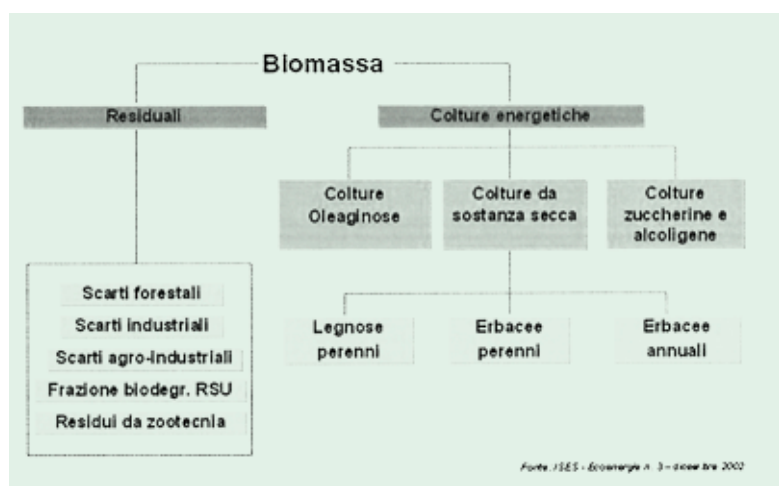


FIG. 4 - Provenienza delle fonti primarie di biomasse.

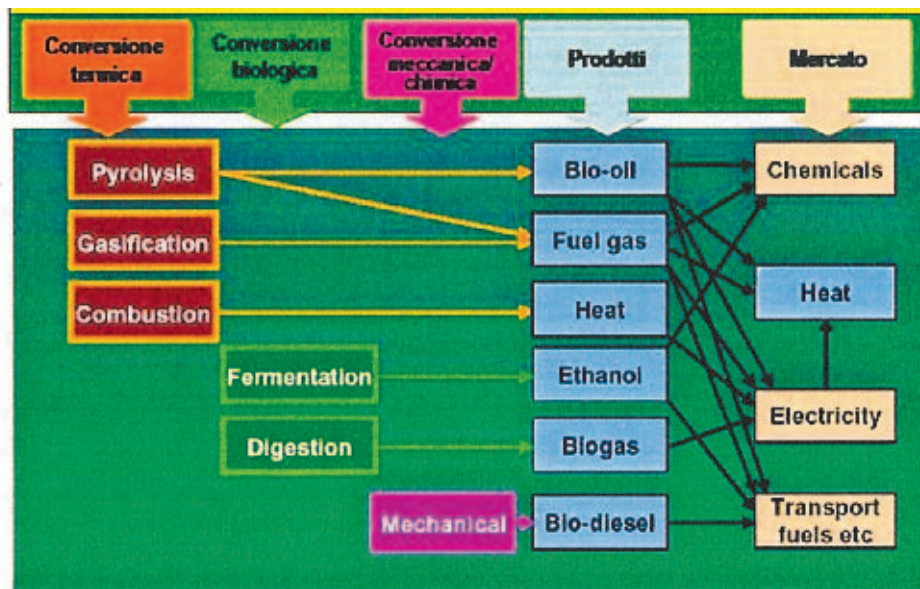


Fig. 5 - Processi, prodotti e mercati connessi alla trasformazione delle biomasse.

que uno stadio vincolante nello sviluppo della filiera.

### 3. Caratterizzazione energetica e merceologica delle biomasse vegetali

Lo sviluppo e la competitività della “filiera biomasse”, obiettivo che accomuna produttore e utilizzatore, ha nella caratterizzazione analitica della biomassa un passaggio obbligato. Infatti, solo la conoscenza delle caratteristiche energetiche e merceologiche può permettere di definire la qualità del prodotto, di verificarne la rispondenza rispetto a specifiche tecniche, di stabilire come utilizzarlo al meglio in funzione dei diversi impieghi.

La caratterizzazione di laboratorio dei combustibili, biomasse comprese, si basa su un numero relativamente limitato di prove, che mirano a definire le proprietà macroscopiche del materiale in condizioni sperimentali ben definite. Le caratteristiche merceologiche, i relativi metodi di prova e il loro significato fisico vengono discussi nei seguenti paragrafi:

- *I metodi di analisi normalizzati: significato e stato di avanzamento a livello europeo*

- *Le prove di laboratorio*

Descrizione convenzionale del “combustibile biomassa”

Potere calorifico

Umidità

Ceneri (composizione, comportamento alla fusione)

Analisi immediata

Analisi elementare

Densità

### 3.1. I metodi di analisi normalizzati: significato e stato di avanzamento a livello europeo

La valutazione delle proprietà energetiche di un materiale consente di indirizzare la scelta verso il suo miglior utilizzo energetico.

Tuttavia, il comportamento di un combustibile (e il risultato che ne deriva) è fortemente influenzato dalle condizioni sperimentali. È evidente quindi che, per confrontare prove eseguite da laboratori differenti o combustibili diversi su base omogenea, devono essere adottate le stesse condizioni di prova. Ciò comporta il ricorso a prove di laboratorio normalizzate, eseguite cioè nel rispetto di procedure operative e condizioni sperimentali note e ben definite.

La possibilità di disporre di metodi di analisi normalizzati è quindi fondamentale per definire accuratamente la qualità merceologica ed energetica del “combustibile biomassa”.

L’attività di normazione internazionale e nazionale nel campo dei combustibili fossili, che in circa 50 anni ha consentito di affinare progressivamente i metodi di prova sulla base di specifiche tecniche e/o ambientali sempre più severe, sarà fondamentale anche per lo sviluppo competitivo dei nuovi combustibili.

Al momento, in attesa di norme sviluppate a livello europeo per i biocombustibili, si ricorre frequentemente a metodi normalizzati sviluppati per altri combustibili solidi (carbone e RDF), metodi che all’atto pratico hanno dimostrato una buona applicabilità anche per le biomasse.

Il crescente interesse e la diffusione delle biomasse per uso energetico, con relative implicazioni commerciali e ambientali, sta comunque accelerando il percorso europeo verso una normazione tecnica mirata ai biocombustibili solidi.

Su mandato della CE, all’interno del Comitato Europeo di Normazione (CEN) è stato costituito un

comitato tecnico (CEN-TC 335 *Biocombustibili solidi*) avente come obiettivo la normazione dei biocombustibili solidi, con riferimento alle specifiche dei combustibili, alla loro qualità, alle metodiche di campionamento e analisi.

Per quanto riguarda la caratterizzazione analitica, nella Tabella I vengono riportati sia i metodi di prova pubblicati sia quelli in fase di sviluppo, di cui si sta occupando il CEN-TC 335 [1], e quelli attualmente più utilizzati.

### 3.2. Le prove di laboratorio

#### 3.2.1. Descrizione convenzionale del “combustibile biomassa”

Per comodità descrittiva, finalizzata all'interpretazione delle prove di laboratorio, il “combustibile biomassa”, analogamente ai combustibili solidi fossili, può essere suddiviso in due frazioni (Fig. 6): una *combustibile*, costituita da una frazione idrocarburica (C, H), nella quale sono presenti anche ossi-

TABELLA I  
Metodi di prova per l'analisi delle biomasse

Parametri	Metodi CEN/TC 335 “Solid Biofuels”	Stato del metodo	Metodi attualmente utilizzabili
Campionamento	CEN/TS 14778-1 Part 1 - <i>methods for sampling</i>	non ancora pubblicato	UNI 9903/3
	CEN/TS 14778-2 Part 2 - <i>methods for sampling particulate material transported in lorries</i>	non ancora pubblicato	
	CEN/TS 14779 Part 3 - <i>methods for preparing sampling plans and sampling certificates</i>	non ancora pubblicato	
	CEN/TS 14780 - <i>methods for sample reduction</i>	non ancora pubblicato	
Umidità	CEN/TS 14774-1 - <i>methods for the determination of moisture content- oven dry method - Part 1 : Total moisture - Reference method</i>	pubblicato	UNI 9017 UNI 9903/7 ASTM E 781 ASTM D 5142 ISO 589
	CEN/TS 14774-2 - <i>methods for the determination of moisture content- oven dry method - Part 2 : Total moisture - Simplified procedure</i>	pubblicato	
	CEN/TS 14774-3 - <i>methods for the determination of moisture content- oven dry method - Part 1 : Total moisture - Moisture for general analysis sample</i>	pubblicato	
Potere calorifico	CEN/TS 14918 - <i>methods for the determination of calorific value</i>	approvato ma non ancora pubblicato	UNI 9017; UNI 9903/5; ASTM D5865 ; ISO 1928
Ceneri	CEN/TS 14775 - <i>methods for the determination of ash content</i>	pubblicato	UNI 9017; UNI 9903/9; ASTM E871; ASTM D1102; ASTM D5142; ISO 1171
Sostanze volatili	<i>Methods for the determination of the content of volatile matter</i>	in preparazione	UNI 9903/8; ASTM E872; ASTM E897; ASTM D5142 ISO 562
Analisi immediata	<i>Methods for the proximate analysis of analysis by instrumental</i>	in preparazione	ASTM D5142
Massa volumica	<i>Methods for the determination of the particle density</i>	in preparazione	ASTM E873; ISO 567
Temperatura di fusione delle ceneri	<i>Methods for the determination of ash melting behaviour</i>	in preparazione	DIN 51730; ASTM E953; ISO 540
Carbonio, idrogeno, azoto	<i>Methods for the determination of carbon (C), hydrogen (H), and nitrogen (N), content</i>	in preparazione	UNI 9903/6; ASTM E777; ASTM E778; ASTM D5373; ISO/TS 12902
Cloro e zolfo	<i>Methods for the determination of sulphur (S) and chlorine (Cl) content</i>	in preparazione	UNI 9903/10; ASTM E775; ASTM E776; U53.00.025.0
Elementi macro (Al, Si, K, Na, Ca, Mg, Fe, P e Ti)	<i>Methods for the determination of the content of major elements</i>	in preparazione	ASTM D6349
Elementi micro (As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Mn, Ni, Pb, Se, Te, V e Zn)	<i>Methods for the determination of the content of minor elements</i>	in preparazione	ASTM D6357

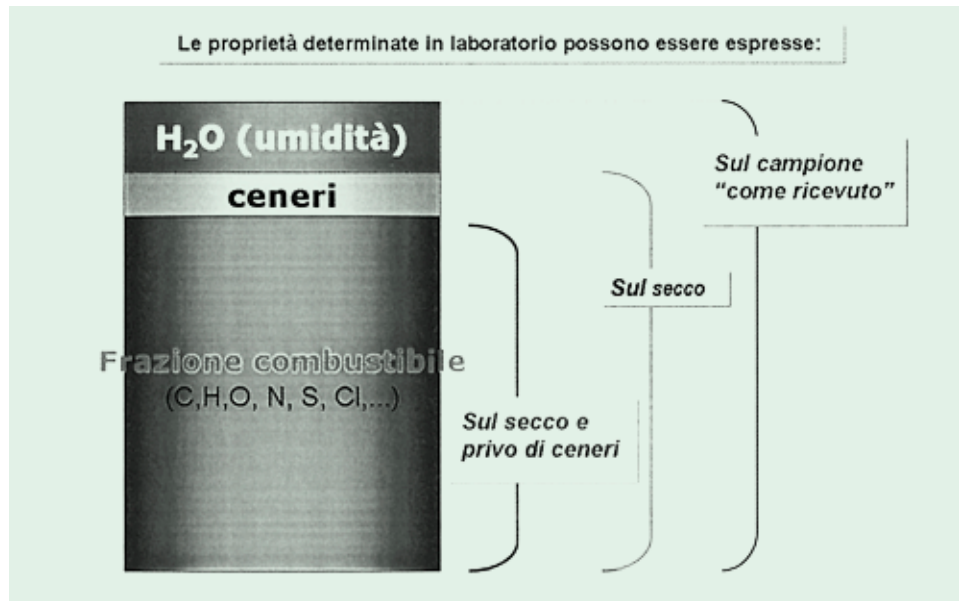


Fig. 6 - Rappresentazione schematica del “combustibile biomassa”.

geno (O) e altri eteroatomi (N, S, Cl, ecc.) quantitativamente meno rilevanti, una seconda, *non combustibile*, costituita da umidità e ceneri.

Questa chiave di lettura, semplificata ed empirica, consente di esprimere i risultati delle prove di laboratorio su basi diverse - identificate dalle definizioni sotto riportate - che vengono comunemente riportate sui certificati di analisi:

- *sul campione come ricevuto* (talvolta indicato come *a.r.*);
- *sul campione secco* (*s.s.*);
- *sul campione secco e privo di ceneri* (*d.a.f.*).

Si tratta nella pratica di modi diversi, tipici dell'a-

nalisi del carbone, di esprimere i risultati analitici. Il dato di un'analisi (ad esempio, il potere calorifico), riferito al campione *come ricevuto*, fornisce il valore della proprietà considerata nelle condizioni in cui il campione è pervenuto in laboratorio.

Un'analisi riferita al *campione secco* è calcolata al netto dell'umidità; infine, l'analisi riferita *campione secco e privo di ceneri* è calcolata al netto di umidità e ceneri, si riferisce cioè alla “frazione combustibile”.

Un confronto tra combustibili diversi è dunque significativo solo se i dati vengono espressi su base omogenea, che dovrebbe essere sempre precisata.

Nella Tabella II viene riportata una tabella di conversione per il calcolo su basi diverse [2].

TABELLA II  
Calcolo su differenti basi

Dato di partenza	Dato da calcolare			
	Come determinato ( <i>ad</i> )	Come ricevuto ( <i>ar</i> )	Sul secco ( <i>ss</i> )	Secco e privo di ceneri ( <i>daf</i> )
Come determinato ( <i>ad</i> )		$\frac{100 - U_{ar}}{100 - U_{ad}}$	$\frac{100}{100 - U_{ad}}$	$\frac{100}{100 - U_{ad} - C_{ad}}$
Come ricevuto ( <i>a.r.</i> )	$\frac{100 - U_{ad}}{100 - U_{ar}}$		$\frac{100}{100 - U_{ar}}$	$\frac{100}{100 - U_{ar} - C_{ar}}$
Secco ( <i>s.s.</i> )	$\frac{100 - U_{ad}}{100}$	$\frac{100 - U_{ar}}{100}$		$\frac{100}{100 - C_{ss}}$
Secco e privo di ceneri ( <i>d.a.f.</i> )	$\frac{100 - U_{ad} - C_{ad}}{100}$	$\frac{100 - U_{ar} - C_{ar}}{100}$	$\frac{100 - C_{ss}}{100}$	

U = Umidità (%)  
C = Ceneri (%)

### 3.2.2. Potere calorifico

Il potere calorifico indica la quantità di calore che si sviluppa dall'unità di massa (peso) di un materiale nella sua combustione completa con ossigeno in un *calorimetro normalizzato* [3]. Viene generalmente espresso in kcal/kg o in MJ/kg. Il tipico campo di variabilità del potere calorifico delle biomasse è confrontato con quello del carbone nel grafico della Figura 7 (dati medi di letteratura) [4].

Sotto il profilo energetico, il potere calorifico è uno dei parametri più significativi di un combustibile.

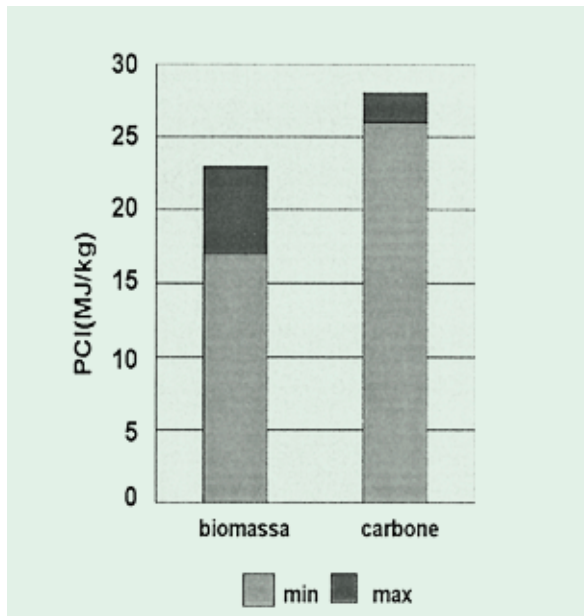


Fig. 7 - Campo di variabilità del PCI: confronto biomasse-carbone

Il potere calorifico viene distinto in:

- *potere calorifico superiore (PCS)*, che comprende il calore di condensazione dell'acqua contenuta nel combustibile o formatasi durante la combustione (si considera l'acqua ottenuta allo stato liquido);
- *potere calorifico inferiore (PCI)*, che non comprende il calore di condensazione dell'acqua (considera l'acqua ottenuta allo stato vapore).

La prova di laboratorio, comunemente effettuata con un calorimetro adiabatico (bomba di Mahler), serve a determinare il PCS. Le condizioni nella bomba infatti sono tali per cui, al termine della prova, l'acqua presente nel combustibile o formatasi durante la combustione si trova allo stato liquido.

La determinazione sperimentale del potere calorifico superiore (a volume costante) è la sola prova di laboratorio in grado di fornire la misura del valore energetico intrinseco di un materiale.

Assieme alla determinazione del contenuto di idrogeno, il PCS serve per calcolare il potere calorifico inferiore.

Il PCI viene calcolato al netto del contributo dell'umidità del combustibile e dell'acqua che si forma nella reazione di combustione; si considera cioè che tutta l'acqua, presente nel combustibile e quella formata nella combustione, rimanga allo stato vapore. Per questo calcolo si sottrae dal PCS il calore di condensazione dell'acqua prodotta nella combustione mediante la seguente formula :

$$PCI \text{ (kcal/kg)} = PCS - 51,14 \times H_{tot}$$

dove: PCS = potere calorifico superiore (kcal/kg);  $H_{tot}$  = idrogeno totale (%), che comprende anche l'idrogeno dell'umidità presente nel campione

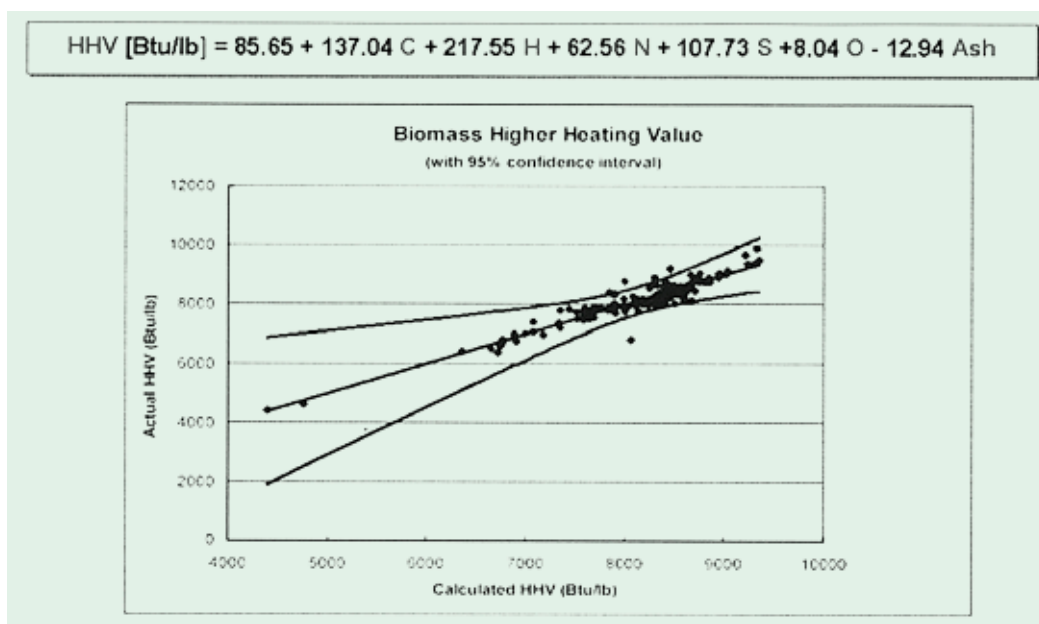


Fig. 8 - Esempio di calcolo di potere calorifico superiore [5].

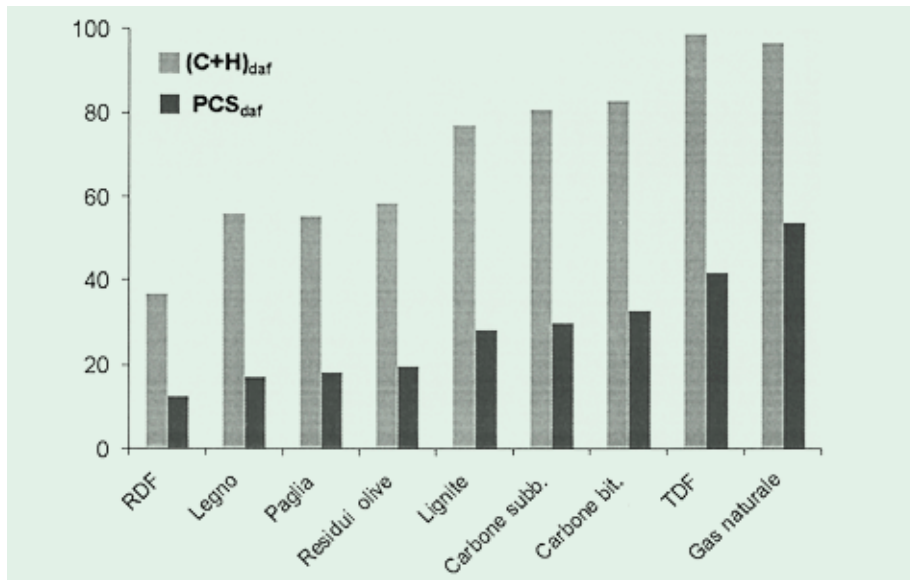


Fig. 9 - Variazione del potere calorifico superiore in funzione del contenuto di carbonio e idrogeno - elaborazione SSC da dati di letteratura [6].

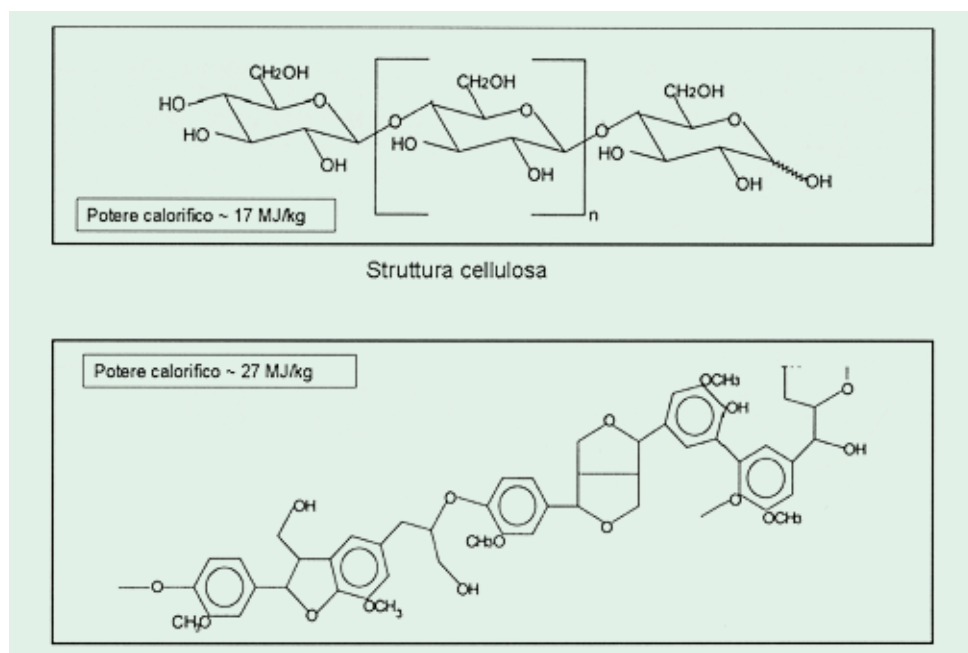


Fig. 10 - Struttura di cellulosa e lignina.

In alternativa alla determinazione sperimentale, il potere calorifico può essere calcolato mediante equazioni empiriche, gran parte delle quali si basano sulla composizione elementare del combustibile. Un esempio in tal senso è riportato nella Figura 8.

Il potere calorifico è strettamente legato al contenuto di carbonio e di idrogeno (Fig. 9) e rispecchia le proporzioni dei diversi macrocostituenti presenti nella biomassa: cellulosa, emicellulosa e lignina - assieme a terpeni, sesquiterpeni e resine - aventi caratteristiche chimiche e poteri calorifici diversi (Fig. 10). Nel caso delle biomasse forestali, ad esempio, il PCI delle conifere (19,5-20,0 MJ/kg *daf*) è maggiore di quello delle latifoglie (18,4-19,1

MJ/kg *daf*) [7] grazie ad un maggior contenuto di composti resinosi (terpeni e sesquiterpeni) a maggior potere calorifico. Nella pratica, per valutare il rendimento di combustione in impianto, ci si riferisce al potere calorifico inferiore: in impianto, infatti, i gas di combustione non vengono mai scaricati a temperatura tanto bassa da far condensare l'acqua presente e quindi non viene recuperato il calore di condensazione. Bisogna tuttavia tener presente che il calore reale prodotto in impianto, per quanto sia legato al PCI, dipende da numerosi altri fattori, quali: mezzo di combustione (aria, altro), sistema di combustione e disegno costruttivo, condizioni di esercizio dell'impianto, altre caratteristiche chimi-

che e fisiche del combustibile. Tra i fattori che influenzano maggiormente il potere calorifico delle biomasse particolare importanza rivestono l'umidità e le ceneri.

### 3.2.3. Umidità

Per umidità si intende la quantità di acqua (libera e legata) presente nel materiale (ad una data temperatura). In laboratorio il contenuto di umidità viene determinato calcolando la perdita in massa di un campione sottoposto ad essiccazione, in condizioni normalizzate, alla temperatura di 105 °C.

L'umidità delle biomasse, materiale fortemente igroscopico, può raggiungere valori superiori al 50%.

L'intervallo tipico per le biomasse, confrontato con quello del carbone è rappresentato nel grafico della Figura 11 (dati medi di letteratura) [4]. L'umidità è un fattore molto importante sotto il profilo economico: viene infatti considerato un parametro del valore energetico/commerciale della biomassa e come tale può influire sul prezzo.

Può essere suddivisa in *umidità inerente*, propria della struttura della biomassa, e *umidità superficiale*, fortemente influenzata dalla pezzatura e dalla condizioni ambientali. L'umidità della biomassa è una proprietà dinamica: tende a portarsi in equilibrio con l'ambiente e varia in maniera consistente in funzione del tipo di biomassa, del terreno di coltivazione, delle condizioni ambientali, delle modalità e dei tempi di trasporto e stoccaggio. Il contenuto di umidità, generalmente espresso come percentuale in massa, è un parametro importante sia sotto il profilo tecnico-operativo sia in relazione ad alcune caratteristiche qualitative del materiale. Un'elevata umidità superficiale, ad esempio, è particolarmente negativa sul funzionamento dei polverizzatori (diminuisce la capacità effettiva), sui tra-

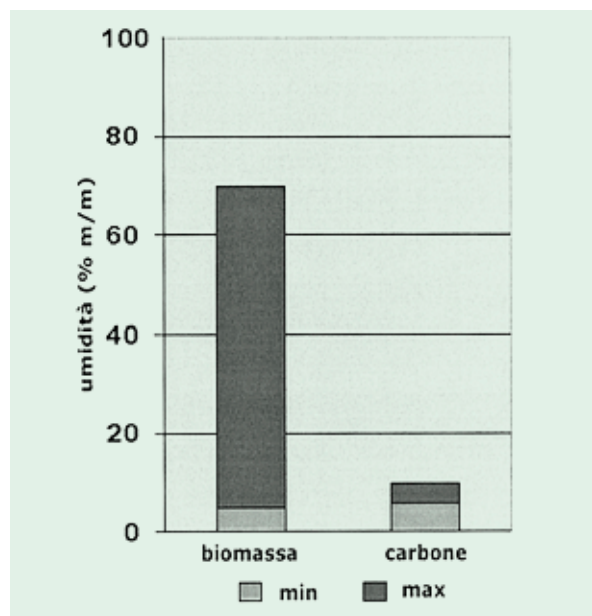


FIG. 11 - Campo di variabilità del contenuto di umidità: confronto biomasse-carbone.

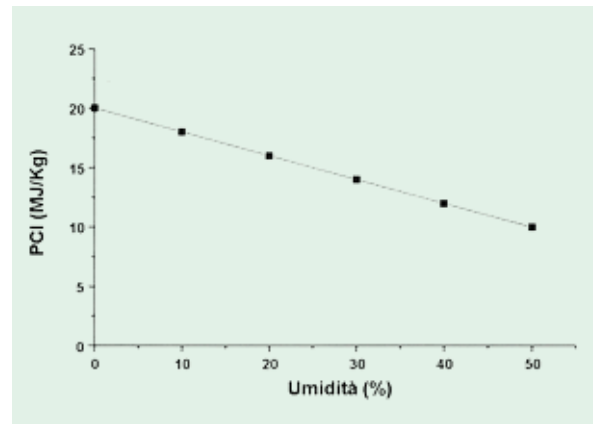


FIG. 12 - Variazione del potere calorifico inferiore in funzione del contenuto di umidità per un campione che "sul secco" ha un potere calorifico inferiore di 20 MJ/kg.

sportatori meccanici e, più in generale, può creare inconvenienti nella movimentazione della biomassa, in particolare nelle fasi di carico e scarico in caso di gelate. Per quanto riguarda altri effetti indesiderati, il contenuto di umidità influenza fortemente la densità e il potere calorifico.

L'umidità infatti incide sfavorevolmente sul peso del prodotto e sui costi di trasporto e di essiccazione, e soprattutto abbassa il contenuto energetico della biomassa. Questo effetto è evidenziato nel diagramma della Figura 12 dove viene rappresentata la variazione del potere calorifico in funzione dell'umidità. Per quanto riguarda le prestazioni in impianto, in generale si osserva un calo dell'efficienza di combustione all'aumentare dell'umidità.

L'umidità infatti incide sfavorevolmente sul peso del prodotto e sui costi di trasporto.

Dati sperimentali indicano un'efficienza massima di combustione per un contenuto di umidità attorno a circa il 5%: l'acqua eserciterebbe un'azione moderatrice nella combustione, creando condizioni più favorevoli al trasferimento di calore rispetto al brusco passaggio in presenza di legno molto secco. Del resto l'umidità influisce su numerose proprietà termiche e fisiche (anisotrope) delle biomasse (conducibilità, permeabilità, diffusione termica, densità).

### 3.2.4. Ceneri

Nella prova di laboratorio, per *ceneri* si intende il materiale inorganico che rimane dopo la combustione (a circa 600 °C in condizioni normalizzate) di un campione di biomassa.

Il campo di variabilità del contenuto in ceneri delle biomasse viene confrontato con quello del carbone nel grafico della Figura 13 (dati medi di letteratura) [4].

Le ceneri derivano direttamente dai costituenti inorganici presenti nella biomassa di partenza. L'origine del materiale inorganico può essere duplice: inerente - cioè costituzionale - o di natura accidentale; vale a dire che il materiale inorganico può ve-

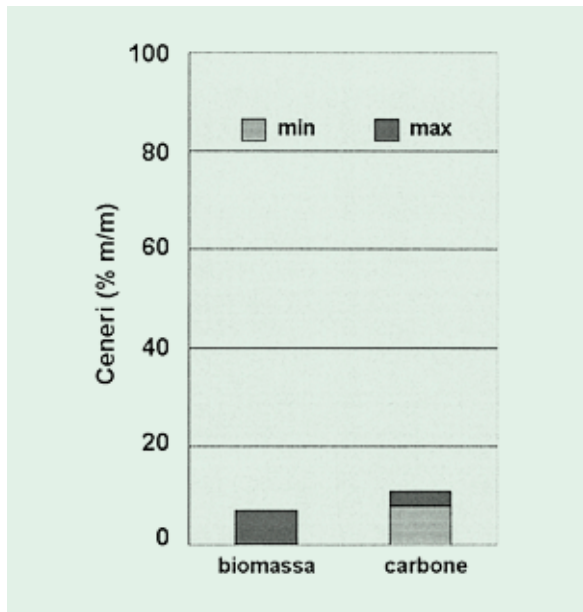


Fig. 13 - Campo di variabilità del contenuto di ceneri: confronto biomasse-carbone.

nire incorporato dalla biomassa attraverso i vari stadi della lavorazione, in particolar modo durante la raccolta. Tra gli elementi quantitativamente più abbondanti vanno segnalati alcuni macronutrienti, come calcio, potassio, magnesio e fosforo, i quali, come vedremo in seguito, esercitano un ruolo importante sulle prestazioni in impianto e, in particolare, sul comportamento delle ceneri.

Sebbene il valore di ceneri che si determina in laboratorio non corrisponda né in qualità né in quantità al materiale solido scaricato, con lo stesso nome, da una combustione in impianto reale (materiale che contiene ancora incombusti), il dato analitico, come sintetizzato nella Figura 14, è comunque in relazione con alcuni parametri principali: potere calorifico, quantità di materiale solido da scaricare, materiale particolato nei gas di combustione, fenomeni di erosione, corrosione e incrostazioni.

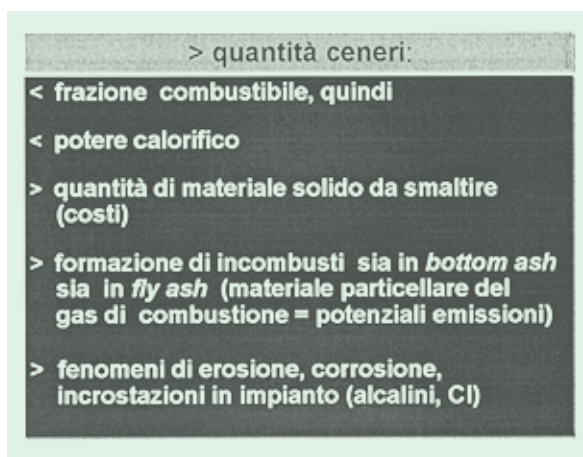


Fig. 14 - Relazione tra la quantità di ceneri di biomassa e alcuni parametri principali.

La quantità di cenere prodotta in impianto dipende dal tipo di biomassa, dalla tecnologia impiegata per la conversione energetica, dalle condizioni e dall'efficienza di combustione. Mediamente le biomasse presentano un contenuto di ceneri più basso rispetto al carbone; tenori elevati sono riscontrabili solo per alcune specie come, ad esempio, la lolla di riso.

L'influenza delle ceneri sul comportamento della biomassa nella combustione e sull'esercizio dell'impianto, è legata, oltre che alla quantità, alla qualità delle ceneri, cioè alla loro composizione che, a sua volta, influenza in maniera significativa il comportamento alla fusione delle ceneri.

Composizione e comportamento alla fusione possono fornire importanti indicazioni sulla propensione delle ceneri a formare scorie e depositi in impianto.

### 3.2.5. Composizione delle ceneri

La composizione quali-quantitativa delle ceneri è in relazione diretta con i costituenti inorganici nella biomassa originaria e ha, per la natura stessa del materiale da cui proviene, un campo di variabilità assai vasto.

Nel caso delle biomasse legnose, ad esempio, il contenuto e soprattutto la composizione delle ceneri cambiano in funzione della storia del materiale; ad esempio, tipologia di pianta, parti della pianta prese in considerazione, condizioni del terreno, fertilizzanti usati [9].

Al di là delle specifiche differenze che caratterizzano le singole tipologie di materiali, i principali costituenti delle ceneri di biomassa sono CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, e MnO.

La conoscenza della composizione quantitativa delle ceneri, e più in generale quella del materiale inorganico della biomassa originaria, è uno strumento previsionale di significativa importanza sia in relazione a fattori impiantistici sia in relazione alla composizione degli effluenti solidi e gassosi derivanti dalla combustione.

Rispetto alle ceneri del carbone, dove i metalli alcalini sono presenti prevalentemente in composti silico-alluminati, le ceneri di biomassa sono ricche di CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, le cui caratteristiche termiche - marcatamente diverse da quelle dei silicati - si riflettono sul diverso comportamento al riscaldamento dei due tipi di combustibili.

In laboratorio la determinazione degli elementi viene tipicamente effettuata mediante tecniche spettroscopiche (ICP-MS, ICP-AES, AA).

### 3.2.6. Comportamento alla fusione

Altro parametro utile per studiare le prestazioni in impianto è il comportamento delle ceneri alla fusione. Si tratta di una prova di laboratorio, il cui principio è mostrato nella Figura 15, mediante la quale si misurano, in condizioni normalizzate, tre temperature caratteristiche di deformazione di un campione di cenere sottoposto a riscaldamento in un fornello di prova.

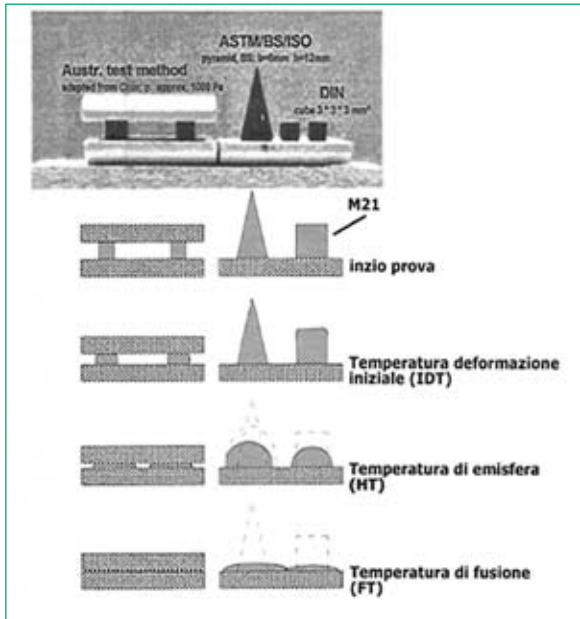


FIG. 15 - Rappresentazione schematica dei vari metodi utilizzati per la determinazione del comportamento termico delle ceneri [10].

Come sopra segnalato, il comportamento alla fusione è strettamente correlato alla composizione chimica delle ceneri: tendenzialmente quanto più abbondanti sono gli elementi alcalini (quindi quanto più “basiche” sono le ceneri), tanto più basso è il punto di fusione.

Nella Figura 16 viene riportato l’andamento della temperatura di fusione delle ceneri in funzione del contenuto di metalli basici.

La prova descritta, pur non rappresentando un cri-

terio univoco, fornisce comunque utili informazioni sulla propensione a formare scorie e depositi in impianto durante la combustione di biomasse.

### 3.2.7. Analisi immediata

L’analisi immediata (*proximate analysis*), termine mutuato dalla caratterizzazione dei carboni, comprende un gruppo di prove di laboratorio che classifica il combustibile in termini di umidità, ceneri, sostanze volatili e (per differenza) *carbonio fisso*.

L’umidità determinata con questa prova rappresenta tipicamente acqua fisicamente legata. Umidità e ceneri, costituiscono la parte non combustibile; sostanze volatili e carbonio fisso rappresentano, in modo empirico, la frazione combustibile presente nel materiale.

Secondo i metodi di prova comunemente utilizzati, il contenuto di sostanze volatili si determina riscaldando a 950 °C, in condizioni normalizzate, un campione di biomassa. Le *sostanze volatili* sono costituite dalla porzione di biomassa, esclusa l’umidità, che si sviluppa sotto forma gassosa. Il materiale rimanente, escluse le ceneri, è considerato *carbonio fisso*.

La prova di laboratorio consente di differenziare la frazione di combustibile che brucia sotto forma gassosa (sostanze volatili) da quella che brucia sotto forma solida (carbonio fisso).

In termini quantitativi, i contenuti di *sostanze volatili* e di *carbonio fisso* sono fortemente influenzati dalla temperatura e dalle condizioni di prova adottate dal metodo utilizzato che va dunque esplicitato.

Le Figure 17 e 18 confrontano l’intervallo di valori relativi all’*analisi immediata* di biomasse rispetto al carbone. Le biomasse sono contraddistinte da un maggior contenuto di umidità e di materie vo-

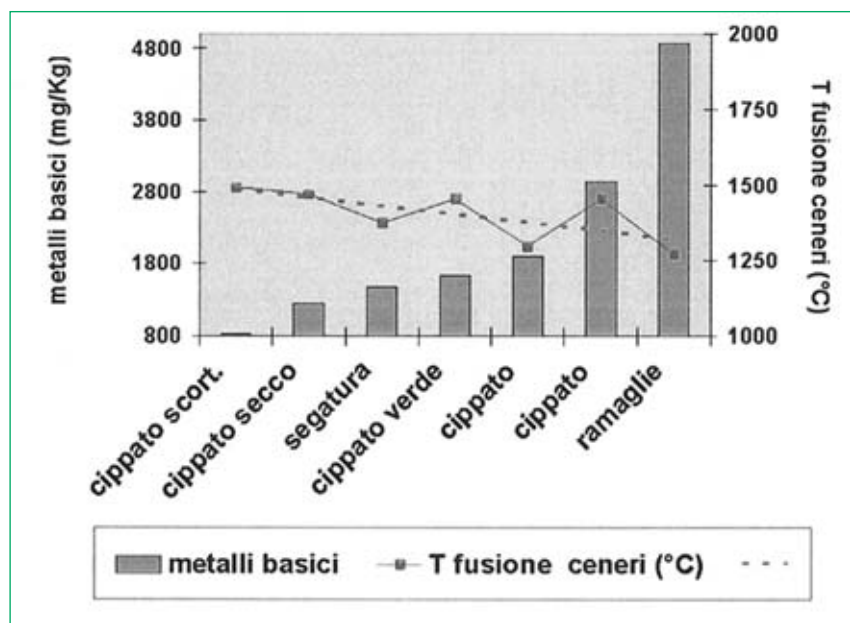


FIG. 16 - Temperatura di fusione ceneri in relazione al contenuto di metalli basici per una serie di biomasse vegetali prelevate in Lombardia [11].

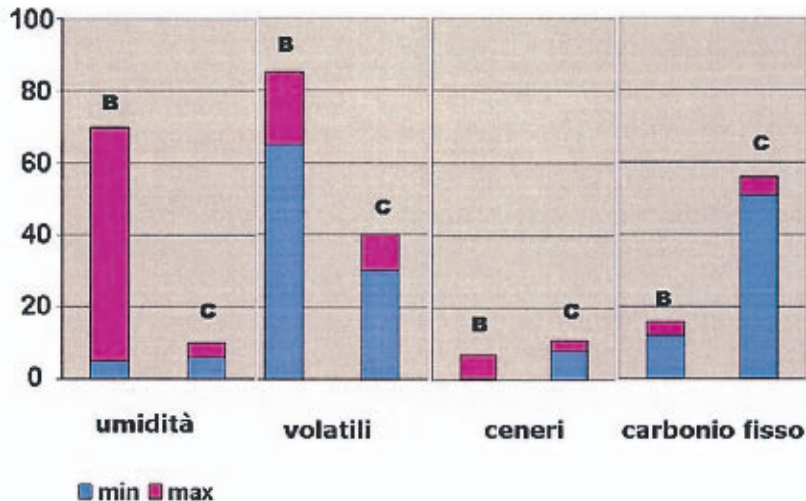


Fig. 17 - Campo di variabilità dell'analisi immediata: confronto biomasse (B) carbone (C) (dati medi di letteratura) [4].

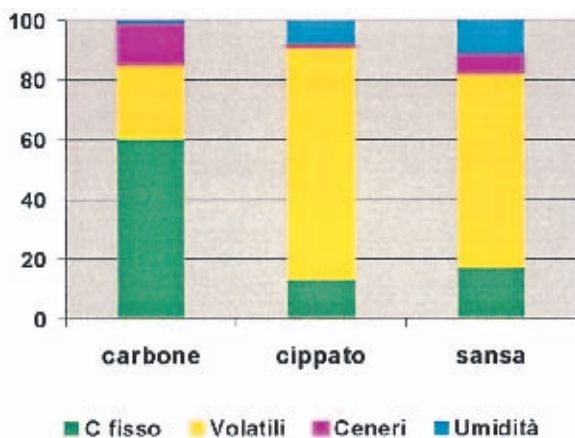


Fig. 18 - Campo di variabilità dell'analisi immediata: confronto biomasse carbone (riferimento: *database* analisi SSC) [12].

latili e, di riflesso, da valori più bassi di ceneri e carbonio fisso.

Nel caso dei carboni, il contenuto di sostanze volatili (ricche di carbonio e idrogeno) è in stretta relazione al rango (o grado di carbonificazione) e viene quindi impiegato anche per la loro classificazione; nel caso delle biomasse tale parametro, quantitativamente molto più abbondante, fornisce indicazioni sul loro comportamento termico e rispecchia la loro maggiore tendenza a devolatizzare e a pirolicizzare.

Le *sostanze volatili* (particolarmente ricche di composti ossigenati) rilasciate durante il riscaldamento (nella fase di devolatizzazione) influenzano i principali parametri sperimentali quali accensione, stabilità e temperatura della fiamma.

### 3.2.8. Analisi elementare

Il contenuto percentuale di carbonio, idrogeno, azoto e ossigeno rappresenta la cosiddetta *analisi elementare*. Tali elementi, ai quali per integrare l'informazione analitica viene spesso aggiunta la

determinazione di zolfo e cloro, costituiscono la parte organica della biomassa.

Il contenuto di ossigeno viene generalmente calcolato per differenza, sottraendo a 100 i contenuti di carbonio, idrogeno, azoto, zolfo, cloro e ceneri.

Rispetto al carbone (Figure 19 e 20) le biomasse sono caratterizzate da più elevati contenuti di ossigeno, elemento presente nei macrocostituenti della biomassa vegetale (cellulosa, emicellulosa, lignina), da una minor presenza di carbonio e da un esiguo contenuto di zolfo. Il contenuto di idrogeno è molto simile. Azoto e cloro, presenti in quantità variabili in funzione della tipologia della biomassa, solo occasionalmente superano l'1%. Le più importanti differenze composizionali, che contraddistinguono le biomasse rispetto ai carboni, sono evidenziate nel cosiddetto diagramma di carbonizzazione riportato nella Figura 21.

Le informazioni che è possibile trarre dall'analisi elementare sono molteplici: si basano sostanzialmente sul rapporto percentuale tra i principali elementi e, anche se non esaurienti, contribuiscono a definire il più corretto utilizzo della biomassa. Un elevato rapporto carbonio/azoto ( $C/N > 30$ ), ad esempio, è indice di un materiale con elevata attitudine alla combustione e come tale idoneo alle conversioni termochimiche.

L'analisi elementare viene inoltre utilizzata come supporto per valutare la qualità energetica della biomassa. Come andamento generale, ad alti contenuti di carbonio e idrogeno corrispondono elevati poteri calorifici; elevate concentrazioni di ossigeno e azoto hanno un effetto opposto.

Azoto, zolfo e cloro infine, sono importanti soprattutto ai fini della valutazione delle emissioni inquinanti, delle prestazioni in impianto (con particolare riferimento a fenomeni corrosivi) e delle problematiche connesse.

Il cloro in particolare, oltre ad essere un precursore per la formazione di diossina durante la combustione, svolge un ruolo primario anche nella formazione di ceneri particolarmente aggressive.

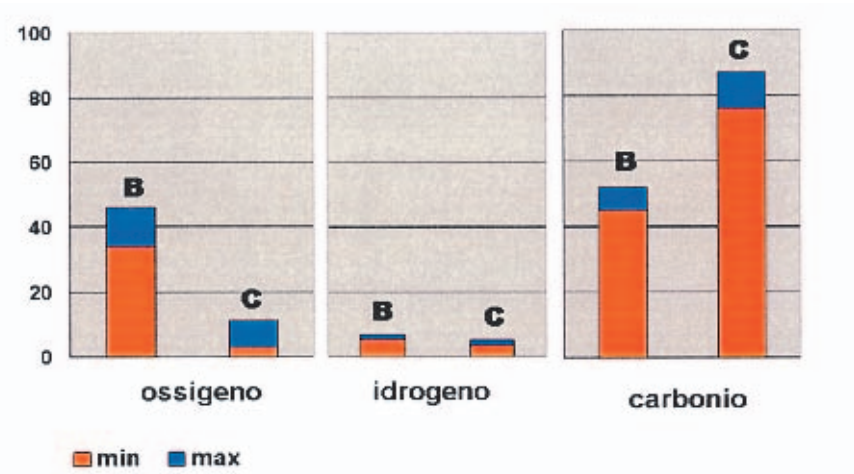


FIG. 19 - Campo di variabilità dell'analisi elementare: confronto biomasse (B) carbone (C) (dati medi di letteratura) [4].

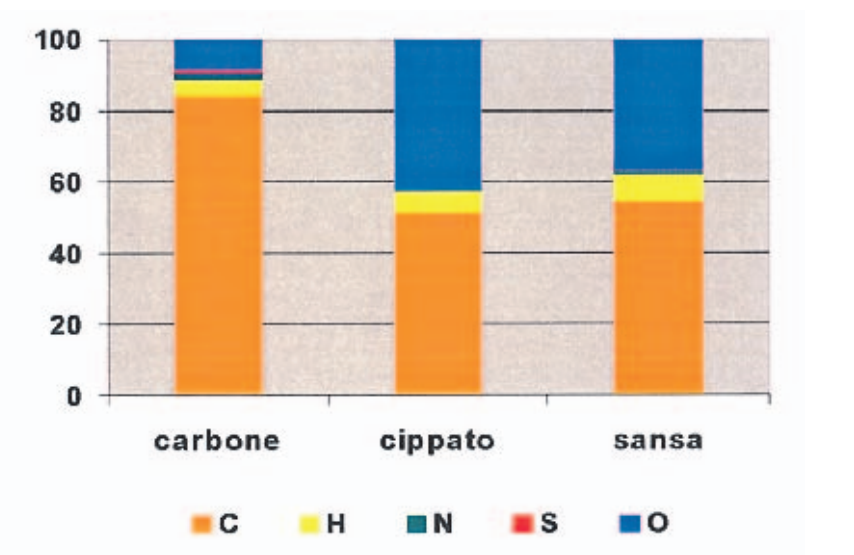


FIG. 20 - Campo di variabilità dell'analisi elementare: confronto biomasse carbone (riferimento: *database* analisi SSC) [12].

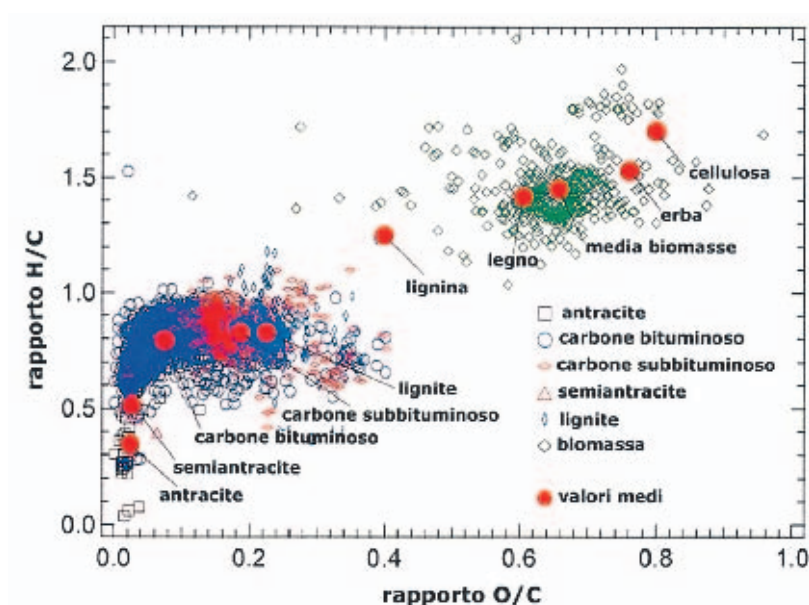


FIG. 21 - Diagramma di carbonizzazione [13].

### 3.2.9. Densità

Indicata spesso come *massa volumica apparente* (talvolta *bulk density*) viene definita come rapporto tra una determinata massa di un combustibile solido e il volume del recipiente che è stato riempito con tale massa secondo condizioni precise. Viene comunemente espressa in  $\text{kg/m}^3$ .

La massa volumica delle biomasse varia in modo considerevole in funzione dell'umidità, del tipo di biomassa, della forma e dimensioni del materiale e del sistema di raccolta utilizzato per il suo recupero. Si passa da valori minimi di  $20\text{-}50 \text{ kg/m}^3$ , tipici della paglia sfusa, a  $70\text{-}160 \text{ kg/m}^3$  della paglia imballata. Per scarti di lavorazione (segatura, lolla, noccioli, gusci, vinacce) che raramente vengono sottoposti a trattamenti e spesso si presentano sfusi, la massa volumica può variare da  $50\text{-}70$  a  $500\text{-}800 \text{ kg/m}^3$ . Per quanto riguarda le biomasse legnose di origine forestale la massa volumica apparente può variare da  $200\text{-}300 \text{ kg/m}^3$  (legna sminuzzata in cumulo) a massimi di  $400\text{-}600 \text{ kg/m}^3$  (legna in tronchetti in catasta) [14].

La massa volumica è particolarmente importante per il calcolo preventivo dei trasporti e dei volumi di stoccaggio, per l'organizzazione della logistica della biomassa (manipolazione e trattamenti eventualmente necessari) e per la scelta e il dimensionamento degli eventuali dispositivi che si inseriscono nella filiera di produzione energetica, infine per il costo di trasporto dal luogo di produzione a quello di utilizzo.

Assieme al potere calorifico inferiore la massa volumica apparente viene utilizzata per calcolare la densità energetica.

La *densità energetica* ( $\text{MJ/m}^3$  o  $\text{GJ/m}^3$ ), definita come il rapporto tra il contenuto energetico e il volume apparente (volume occupato allo stato sfuso), si calcola moltiplicando il potere calorifico inferiore ( $\text{MJ/kg}$ ) per la massa volumica apparente ( $\text{kg/m}^3$ ).

Indicatore prezioso della qualità del combustibile, in quanto esprime il potenziale energetico per unità di volume della biomassa, la densità energetica riveste particolare importanza anche in relazione alla movimentazione e allo stoccaggio. Per un dato quantitativo di biomassa, all'aumentare della densità energetica il trasporto e lo stoccaggio diventano più efficienti.

L'aumento di densità della materia prima, procedimento che consente di concentrare energia in un minor volume, è alla base del processo di evoluzione della qualità dei prodotti commerciali derivati dalle biomasse. Tra questi particolare attenzione meritano i pellet (piccoli cilindri) e le bricchette, biocombustibili ottenuti mediante un processo di densificazione (compattazione) di un'ampia varietà di materiali: ad esempio, biomasse legnose, scarti agro-forestali, segatura.

Si presentano sotto forma di pellet o mattoncini (bricchette) (Figura 22). Vengono prodotti mediante compressione della biomassa con o senza l'ausilio di additivi di pressatura e, in genere, si ottengono utilizzando un estrusore a trafilatura.

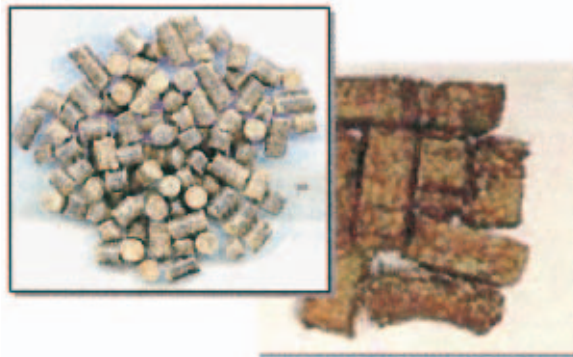


FIG. 22 - Biomassa in forma di pellet e bricchette.

Sebbene richiedano un pretrattamento della materia prima e costi di produzione aggiuntivi, pellet e bricchette offrono indubbi vantaggi: alta densità energetica, materiale omogeneo, comodità di impiego, riduzione dei volumi di stoccaggio, migliore trasportabilità (minori costi), impianti semplici e automatizzabili, migliore regolazione della combustione e migliore controllo delle emissioni [15].

A fronte di tali benefici, i biocombustibili densificati, e i pellet in particolare, hanno una forte crescita di mercato, facendo emergere, di riflesso, esigenze di garanzia sulla qualità del prodotto a favore di produttori e utilizzatori.

In quest'ottica è stata sviluppata, dal CTI Energia e Ambiente nell'ambito delle attività di ricerca del Programma Nazionale Biocombustibili (PROBIO) della Regione Lombardia, la *Raccomandazione CTI R-04/5* [16]; trattasi di una raccomandazione tecnica il cui obiettivo è quello di fornire principi univoci e chiari per consentire una facile caratterizzazione dei pellet per usi energetici, tenendo in considerazione aspetti tecnici, economici ed ambientali.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] CEN TC/335 WG 2, *Guideline for development and implementation of Quality Assurance for solid biofuels*, dicembre 2004.
- [2] ASTM D 3180-89 (2002), American Society For Testing and Materials, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.
- [3] A. GIRELLI, Riv. Combustibili (1978), 32, 357.
- [4] *Biomass co-firing - an efficient way to reduce greenhouse gas emissions*, European Bioenergy Networks (2003).
- [5] Updated (March 2003) - from M. S. GRABOSKI, R. L. BAIN (1979). "Chapter 3: Properties of Biomass Relevant to Gasification" in *A Survey of Biomass Gasification, Volume II - Principles of Gasification*, Solar Energy Research Inst., Golden, CO, SERI/TR-33-239.

- 
- [6] I. M. SMITH, K. ROUSAKY, *Prospects for co-utilisation of coal with other fuels - GHG emissions reduction*, IEA Coal Research, London, May 2002.
- [7] *Raccomandazione CTI R03/1*, CTI Energia e Ambiente, maggio 2004.
- [8] G. MIGLIAVACCA, Riv. Combustibili (2003), 57, 59.
- [9] Relazione tecnica conclusiva del progetto BIO-CEN - *Gestione e valorizzazione delle ceneri di combustione nella filiera legno-energia*, Regione Lombardia e CTI Energia e Ambiente, novembre 2004.
- [10] CH. LOPEZ, S. UNTERBERGER, J. MAIER, K.R.G. HEIN, *Overview of actual methods for characterization of ash deposition*, 2003, ECI Conference on *Heat Exchanger Fouling and Cleaning: Fundamentals and Applications*, Santa Fe, New Mexico, 2004.
- [11] Sperimentazione SSC in collaborazione con TC VVV Tirano, 2003.
- [12] Dati sperimentali non pubblicati, Stazione sperimentale per i Combustibili.
- [13] L. BAXTER, *Biomass Cofiring Overview*, 2<sup>a</sup> conferenza mondiale sulle *Biomasse per l'energia, l'industria e la salvaguardia del clima*, Roma, 10-14 maggio 2004.
- [14] G. RIVA, J. CALZONI, A. PANVINI, *Impianti a biomasse per la produzione di energia elettrica*, CTI Energia e Ambiente, dicembre 2000.
- [15] S. SORLINI, S. ZONI, *Stato dell'arte della bricchettatura ed eventuali applicazioni* <http://www.energoclub.it/relazione%20bricchettatura.doc>
- [16] *Raccomandazione CTI R04/5*, CTI Energia e Ambiente, Maggio 2004.
-