

UTILIZZO DELLE BIOMASSE NEL RISCALDAMENTO CIVILE ED INDUSTRIALE: ASPETTI ENERGETICI, TECNOLOGICI ED AMBIENTALI

R. M. Lazzarin, F. Minchio, M. Noro

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali – Università di Padova, sede di Vicenza

SOMMARIO

L'utilizzo delle biomasse a fini energetici è una delle possibili strategie per ridurre le emissioni di CO₂ (in ottemperanza a quanto stabilito con il Protocollo di Kyoto) ed un'alternativa alle tradizionali tecnologie per il riscaldamento degli ambienti che occorre valutare attentamente. Vengono qui analizzate le diverse tipologie di biomasse disponibili in commercio, le loro caratteristiche e le diverse tecnologie per ottenere prodotti combustibili a partire da esse.

L'utilizzo ai fini del riscaldamento ambientale ha assunto negli ultimi anni un'importanza crescente. Contemporaneamente, le tecnologie utilizzate a tal scopo hanno subito notevoli miglioramenti sia sul piano tecnologico ed energetico, sia su quello della sicurezza e delle emissioni inquinanti. Vengono quindi prese in considerazione le moderne soluzioni tecnologiche, in particolare l'utilizzo delle caldaie a legna, a pellet, a biodiesel, analizzandone gli aspetti energetici, ambientali e di schemi tipici di installazione per applicazioni di piccola-media taglia. Viene proposta infine una valutazione economica della convenienza di questo tipo di tecnologie in alternativa ai tradizionali combustibili.

1. TIPOLOGIE E CARATTERISTICHE DELLE BIOMASSE

Per biomassa si intende ogni sostanza organica di origine vegetale o animale. In questa trattazione ci si riferirà alle sostanze prodotte dalla fotosintesi, per esempio foreste, colture, residui dell'industria agroalimentare, valutandole sotto l'aspetto energetico. In tal senso, dalle biomasse si possono ottenere direttamente combustibili solidi (legna da ardere, residui agricoli e forestali), oppure combustibili liquidi e gassosi ottenuti tramite processi opportuni di trasformazione strutturale della parte organica (combustibile da rifiuti solidi urbani, biodiesel da piante oleaginose, bioetanolo da piante zuccherine, ecc.). Ogni categoria di biomassa può essere sfruttata energeticamente con opportune tecnologie, quasi tutte oggi ben sviluppate, a seconda del loro contenuto di umidità o del loro rapporto carbonio/azoto (C/N) (Fig. 1).

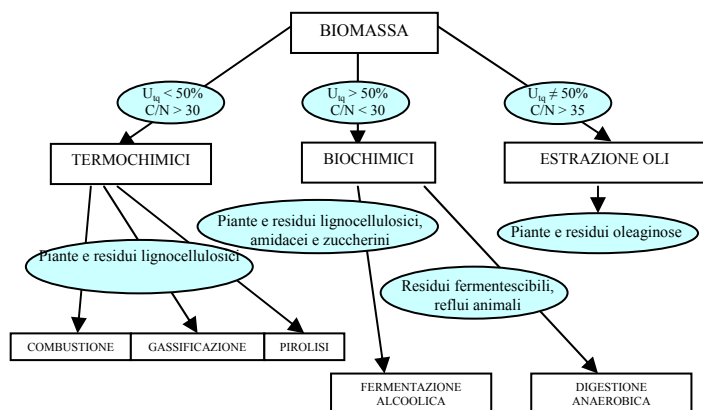


Fig. 1 Tipologie di biomasse e tecnologie per il loro impiego energetico (adattato da [1])

I vantaggi nell'utilizzo delle biomasse ai fini energetici sono intuitivamente comprensibili in quanto esse presentano le seguenti caratteristiche:

- si possono considerare risorse rinnovabili (purché vengano impiegate ad un ritmo non superiore alla capacità di rinnovamento biologico);
- sono, fra tutte le energie rinnovabili, quelle che si possono sviluppare più rapidamente, essendo le tecnologie già mature;
- sono esenti da zolfo e quindi non provocano formazione di ossidi di zolfo nella combustione, agenti tossici e responsabili delle piogge acide;
- non provocano aumento della CO₂ nell'atmosfera, perché si può considerare che la quantità di gas che emettono durante la loro combustione è pari a quella assorbita durante la fase di crescita mediante la fotosintesi [2].

Per contro:

- hanno una bassa densità fisica ed energetica e sono stagionali; questo comporta problemi di trasporto e di stoccaggio;
- hanno un alto contenuto di umidità ed una particolare resistenza meccanica e chimica, cosa che rende l'essiccamento e la comminazione difficile e costosi.

Nel contesto italiano, le principali risorse di biomassa utili ai fini energetici sono:

- la biomassa residuale, come i residui agricoli (paglie di cereali, residui verdi), i residui forestali e della lavorazione del legno (frascami, ramaglie, scarti) ed i residui agroindustriali e dell'industria alimentare (vinacce, sanse, lolla). Tale possibilità risulta fondamentale in quanto, non soffrendo dei costi di produzione o coltivazione, risulterebbe una conveniente materia prima;
- rifiuti organici;
- reflui zootecnici;

– colture energetiche erbacee ed arboree dedicate (oleaginose come la colza ed il girasole, zuccherino-amidacee come il sorgo ed il grano, e ligno-cellulosiche come il discanto, la ginestra, il salice, il pioppo, ecc.). Si tenga conto che il costo di approvvigionamento della materia prima, in questo caso variabile tra 30 e 60 €/t, incide per il 45% sul costo totale di produzione dell'energia [1]. Miglioramenti nelle pratiche agronomiche, incrementi nella produttività annuale di colture lignocellulosiche ma soprattutto la diffusione delle colture a breve rotazione (SRF, *Short Rotation Forestry*)¹ sono i *drivers* per la diffusione delle biomasse utilizzate a fini energetici in Italia.

Ci occuperemo in questa sede dei principali biocombustibili (combustibili ottenuti dalle biomasse) che già attualmente hanno un utilizzo negli impianti di riscaldamento anche di piccola-media taglia: legna, nelle diverse forme a disposizione (ciocchi, cippato, pellet), biodiesel e colture specifiche (mais ad esempio), tralasciando combustibili come il bioetanolo ed il biometanolo che trovano applicazioni più specifiche nei motori endotermici per l'autotrazione.

Occorre precisare subito che la "convenienza energetica" dei biocombustibili non è affatto scontata. Studi di tipo LCA (*Life Cycle Assessment*), che considerano i fabbisogni di energia diretti (nei processi produttivi del biocombustibile in questione) ed indiretti (ad esempio nelle fasi di raccolta o trasporto della biomassa) sono stati effettuati sia per il biodiesel [3] che per i biocombustibili legnosi [4].

Nel primo caso l'analisi energetica è stata svolta sia calcolando un'efficienza di tipo LCA, definita come il rapporto fra il PCI (Potere Calorifico Inferiore) del biodiesel ottenuto e la totale energia primaria impiegata nella sua produzione, sia calcolando un "indice di consumo di energia fossile", definito come rapporto tra il PCI del biodiesel prodotto e la totale energia di origine fossile impiegata nel processo. Il primo indice conteggia i vari costi energetici che hanno luogo durante il processo produttivo del biodiesel. Fra questi si annoverano costi energetici di qualsiasi natura che intervengono nel processo produttivo, siano questi di origine fossile o non. Il secondo indice, invece, suggestivamente suggerisce il "grado di rinnovabilità" del combustibile: un rapporto inferiore o pari a 1 indica che si consuma più energia (in termini di fonti fossili e quindi non rinnovabili) di quella che si ottiene col combustibile prodotto. I risultati riportati in [3], con le relative ipotesi assunte circa l'efficienza di coltivazione dei campi, di raccolta della soia e le distanze per il trasporto dei vari materiali, indicano che, dal punto di vista della rinnovabilità, il biodiesel è decisamente migliore rispetto al tradizionale gasolio (indice di consumo di energia fossile pari a 3.2 per il biodiesel contro 0.83 per il gasolio, che corrisponde ad un consumo di fonti fossili rispettivamente pari a 0.31 e 1.2 MJ per la produzione di 1 MJ di combustibile).

Il dato per il gasolio, apparentemente incongruo, sta ad indicare che in 1 MJ di combustibile si deve conteggiare il suo stesso contenuto fossile addizionato dei costi energetici di estrazione, trasporto e raffinazione del greggio oltre agli ulteriori costi per la distribuzione che nell'insieme pesano

circa il 17%. Tuttavia, dal punto di vista dell'efficienza LCA, vi è sostanziale equivalenza, anzi il gasolio si comporta leggermente meglio: servono rispettivamente 1.24 e 1.20 MJ di energia primaria per produrre 1 MJ di biodiesel o di gasolio.

Anche gli studi effettuati sulla filiera dei biocombustibili legnosi [4] evidenziano il leggero vantaggio o l'equivalenza energetica dell'utilizzo della legna (a pezzi, cippato, pellet con rendimenti medi stagionali oggi raggiungibili con le moderne caldaie pari rispettivamente a 70%, 72.5% e 82.5%) nei confronti del riscaldamento con caldaie tradizionali rispettivamente a gasolio e a metano. In tale lavoro vengono considerati tutti i consumi energetici sostenuti nella filiera del legno (coltivazione, raccolta, produzione, trasporto, stoccaggio, combustione); in particolare, la distanza per il trasporto del combustibile (qui assunta pari a 50 km con viaggio di ritorno del camion vuoto) e l'efficienza media stagionale delle caldaie assumono un ruolo fondamentale nel valutare la convenienza energetica di tutto il sistema.

A conclusione di questa prima parte introduttiva, possiamo dire che occorre prestare particolare attenzione alle valutazioni di convenienza energetica che dovrebbero sempre guidare le scelte anche di natura politica (come l'incentivazione di queste fonti). Un conto è l'utilizzo energetico di "scarti" (da lavorazioni del legno, potature del verde pubblico, di coltivazioni come i frutteti o derivanti dalla manutenzione dei boschi), magari direttamente dove vengono raccolti o entro brevi distanze; ben altra cosa è la prospettiva di una produzione massiccia di biocombustibili a partire da biomasse, che, per garantire una vera convenienza energetica, dovrebbe vedere un notevole incremento nelle efficienze di coltivazione, raccolta, produzione, trasporto ed utilizzo nella combustione, scegliendo le specie vegetali più vantaggiose da questo punto di vista.

I due paragrafi seguenti descrivono lo stato dell'arte relativo proprio a quest'ultimo aspetto, oltre che i miglioramenti tecnologici in termini di sicurezza ed emissioni inquinanti intervenuti negli ultimi anni.

2. CALDAIE A BIODIESEL: TECNOLOGIA, EFFICIENZA, IMPATTO AMBIENTALE

Il biodiesel è un combustibile ottenuto dal processo di transesterificazione degli oli vegetali (questi ultimi sono solitamente prodotti da colture oleaginose come semi di girasole, colza, mais e soia). La composizione media dei biodiesel prodotti vede un contenuto di ossigeno maggiore (ciò che comporta, nei bruciatori a più stadi, una diminuzione sensibile di aria comburente) ed uno di carbonio minore rispetto al gasolio commerciale, mentre il contenuto di idrogeno è simile. Ne consegue un PCI un po' inferiore (≈ 37 MJ/kg). Inoltre, il contenuto di zolfo e relativi composti è pressoché nullo nel biodiesel, il che comporta fra l'altro la possibilità di evacuare i fumi dalla caldaia a temperature più basse perché non vi è acido solforico nella condensa (Tab. 1).

L'utilizzo del biodiesel nelle caldaie per il riscaldamento degli ambienti è noto ormai da parecchi anni; quasi tutti i costruttori di bruciatori hanno a catalogo una versione a biodiesel dei loro prodotti. Nella maggior parte dei casi si tratta di sostituire gli ugelli di nebulizzazione per modificare la portata di combustibile (a parità di potenza termica del bruciatore) per tener conto del diverso potere calorifico rispetto al gasolio.

¹ L'interesse per questo tipo di coltivazioni risiede nella buona resa in biomassa, nei tagli ravvicinati e nella rapida ricrescita delle piante dopo il taglio. Inoltre specie come il pioppo, il salice, l'eucalipto o la ginestra consentono vantaggi per il riuso di terreni abbandonati e la protezione del suolo. Un freno alla diffusione di questo tipo di forestazione è dato dalla mancanza di tecniche di coltivazione appropriate, come la raccolta meccanica e sistemi di lavorazione efficienti a livello locale.

Tab. 1 Principali caratteristiche tecniche del biodiesel e del gasolio

Caratteristica	Unità	Biodiesel puro UNI 10946:01	Gasolio EN 590:00
PCI	MJ/kg	37.3	42.8
Numero di Cetano	-	min 51	min 51
Densità a 15°C	kg/dm ³	0.86÷0.90	0.820÷0.845
Viscosità a 40°C	Mm ² /s	4.30÷4.70	2.40
Conten. di zolfo	mg/kg	max 10	max 350
Conten. di ossig.	% massa	11	-
Aromatici	% peso	-	32.6

Alcuni costruttori riescono a sfruttare il vantaggio dell'utilizzo degli stessi componenti utilizzati col gasolio solo aumentando la pressione di mandata del combustibile (tramite la pompa ad ingranaggi, che mantiene costante la portata volumetrica al variare della pressione quando si regola la potenza del bruciatore) dai 12 bar tipici del gasolio a 13-13.5 bar (a causa delle piccole differenze di densità e viscosità, per raggiungere la potenzialità richiesta è necessario tale aumento nel caso del biodiesel). L'eventuale manifestarsi di un insufficiente funzionamento della pompa, dopo un certo numero di ore di lavoro, potrebbe essere causato da una incompatibilità del biodiesel verso alcuni tipi di gomme (a basso contenuto di nitrile) utilizzate, di norma, per gli organi di tenuta e per vari tipi di O-ring delle pompe e delle tubazioni. Se ciò si verificasse, la sostituzione deve essere fatta con gomme a base di elastomero fluorurato (Viton, Teflon) che hanno un'ottima resistenza verso il biodiesel.

Un ulteriore fatto da tenere in considerazione riguarda il maggiore effetto solvente, che può provocare il distacco di depositi accumulati nei serbatoi o nei tubi che erano dedicati al gasolio. L'effetto può essere una parziale occlusione dei filtri; è quindi consigliabile verificare che i serbatoi di stoccaggio siano puliti prima di adibirli al biodiesel.

L'offerta dei produttori è varia e va dal solo bruciatore da installare su corpi caldaia già esistenti a caldaie policombustibili, che possono bruciare sia biomasse solide sia biodiesel. In questo caso vi sono produttori che propongono caldaie con due camere di combustione separate oppure con un'unica camera di combustione; nel primo caso si tratta di fatto di due caldaie separate riunite in un'unica apparecchiatura, con due uscite fumi distinte; la centralina di controllo effettua automaticamente la commutazione a combustibile liquido una volta esaurita la carica di legna e può anche commutare una valvola motorizzata a tre vie (tale dispositivo evita di riscaldare inutilmente l'acqua contenuta nel corpo della caldaia a legna).

I dati sperimentali ad oggi raccolti ([2], [3]) indicano che nel funzionamento reale le caldaie a biodiesel consentono aumenti di efficienza sensibili (legati sostanzialmente alla possibilità di far uscire i fumi a temperature più basse e ad un minor sporcamento del giro fumi rispetto all'utilizzo di gasolio). Le emissioni di CO e CO₂ risultano simili, mentre quelle di NO_x vengono ridotte sensibilmente (ordine del 30%) grazie alla maggiore percentuale di ossigeno contenuta nel combustibile. Oltre ai già citati vantaggi circa gli ossidi di zolfo, occorre dire che la CO₂ emessa col biodiesel è praticamente rinnovabile al 100% (tanta ne è prodotta con la combustione, tanta ne viene assorbita durante la fase di crescita delle piante). Se si considera il ciclo completo di produzione del combustibile le emissioni non sono comunque trascurabili: l'analisi condotta [3] su dati relativi alle condizioni delle Regioni del nord-est italiane per ciò che concerne l'entità del raccolto della soia (2445 kg/ha), consumi

di combustibile (116.5 kg/ha), fertilizzanti (80, 43 e 51 kg/ha per composti rispettivamente dell'azoto, fosfati e potassio) ed efficienze degli impianti di conversione degli oli vegetali (300.000 kcal/t_{biodiesel} di vapore e 28 kWh/t_{biodiesel} di energia elettrica) indicano un livello di emissione di CO₂ pari a 0.21 kg_{CO2}/kg_{biodiesel}. Questo nel caso di ripartizione delle emissioni in proporzione diretta alla quantità di sottoprodotti ottenuti (glicerina, farina di soia oltre al biodiesel). Tuttavia, nel caso di imputazione al solo biodiesel di tutta la CO₂ prodotta, l'emissione specifica salirebbe a 0.72 kg_{CO2}/kg_{biodiesel} (per confronto, l'emissione di CO₂ del ciclo completo di produzione del gasolio è circa 0.82 kg_{CO2}/kg_{gasolio} [3]). Non si deve però qui dimenticare che la successiva combustione del gasolio comporta un'ulteriore emissione di CO₂ pari a circa 3.16 kg_{CO2}/kg_{gasolio}. Infine, il biodiesel emette meno particolato rispetto al concorrente fossile (circa il 40% in meno per unità di energia del combustibile), anche se produce un volume maggiore di gas di combustione (+20%); le quantità in gioco sono comunque talmente basse per entrambi che non si ritiene questo un parametro valido per differenziarli. L'unico limite alla diffusione di questa tecnologia riguarda il costo del biodiesel: esso dipende dal luogo e dalle modalità con cui si realizzano le colture e dalle tecnologie del processo di estrazione del combustibile. Mediamente il costo in Italia è due-tre volte quello del gasolio (escluse accise ed IVA), motivo per cui dal 1998 (la produzione è iniziata nel 1992) la produzione fino a 125 000 (300 000 dal 2001) t/anno è esente da accise. Ciò comporta, considerato il minor PCI, la maggiore densità e l'aumento di efficienza della caldaia, che il costo dell'unità di energia termica fornita dalla caldaia a biodiesel è leggermente inferiore a quello della caldaia a gasolio.

3. CALDAIE A LEGNA: TECNOLOGIE, EFFICIENZA ED IMPATTO AMBIENTALE

I principali combustibili utilizzati in questo caso sono:

- legna in ciocchi o tronchetti*, delle dimensioni variabili fra 100 e 1000 mm, essenze tipiche sono faggio, quercia, pioppo o le conifere, con almeno un anno di stagionatura all'aria, preferibilmente sotto una tettoia, in modo da garantire un contenuto di umidità inferiore al 25-30%;
- cippato*, un combustibile derivato dalla sminuzzatura di legno derivante da scarti di lavorazione, potature, manutenzioni dei boschi, ecc., con dimensioni e contenuti di umidità variabili a seconda delle macchine cippatrici utilizzate e delle tipologie di legni e stagionatura adottate;
- pellet*, cilindretti della dimensione di alcuni millimetri di legno essiccato e pressato, con il duplice vantaggio di avere PCI e densità energetiche nettamente superiori e una notevole facilità di trasporto.

Occorre dire subito che i leader nel mercato delle caldaie a biomasse solide sono i costruttori svedesi, tedeschi ed austriaci. Ciò è dovuto al fatto che questi Paesi sono stati i primi a sviluppare le tecnologie dello sfruttamento energetico delle biomasse solide, sia per una certa "abbondanza" di materia prima che per una maggiore sensibilità verso le questioni ambientali e di sfruttamento efficiente delle risorse energetiche.

Nel caso a), la tecnologia maggiormente sviluppata è senz'altro quella della *caldaia a fiamma inversa*. Un tipico esempio è rappresentato in Fig. 2. Il nome deriva dalla posizione della camera di combustione, situata al di sotto della zona di carico della legna (si possono caricare pezzi lunghi da 40-50 cm per caldaie fino a 50 kW fino a 100 cm per caldaie

di media-grossa taglia, dell'ordine delle centinaia di kilowatt), per cui la fiamma si sviluppa in modo da non investire direttamente il combustibile, garantendo combustioni più efficaci e durature (in tal senso è importante che durante la fase di carica i ciocchi di legna vengano posizionati in maniera razionale, evitando di lasciare troppi "vuoti"). Le moderne caldaie a fiamma inversa sono dotate poi di diverse tecnologie che le rendono affidabili, efficienti e sicure: tipicamente hanno un ventilatore per spingere l'aria di combustione all'interno della camera di combustione posto nella parte anteriore oppure nella parte posteriore per l'aspirazione dei fumi (con conseguente depressione in camera di combustione che richiama l'aria comburente).

L'aria è sempre divisa fra aria primaria (viene introdotta immediatamente sopra la griglia sulla quale è appoggiata la legna e consente l'avvio della combustione e la formazione di uno strato di braci che permettono la gassificazione del legno e la conseguente pirolisi con formazioni di gas combustibili, soprattutto CO e H₂) e secondaria (immessa direttamente in camera di combustione dove avviene appunto la combustione con i gas).

Fondamentale risulta il disegno dei canali dell'aria e della camera di combustione, che debbono garantire eccessi d'aria, temperature e turbolenze nello sviluppo della fiamma elevati, in modo da garantire la permanenza dei gas caldi nel focolare per un tempo sufficiente al completamento delle reazioni di combustione e quindi, in ultima analisi, emissioni inquinanti ridotte al minimo.

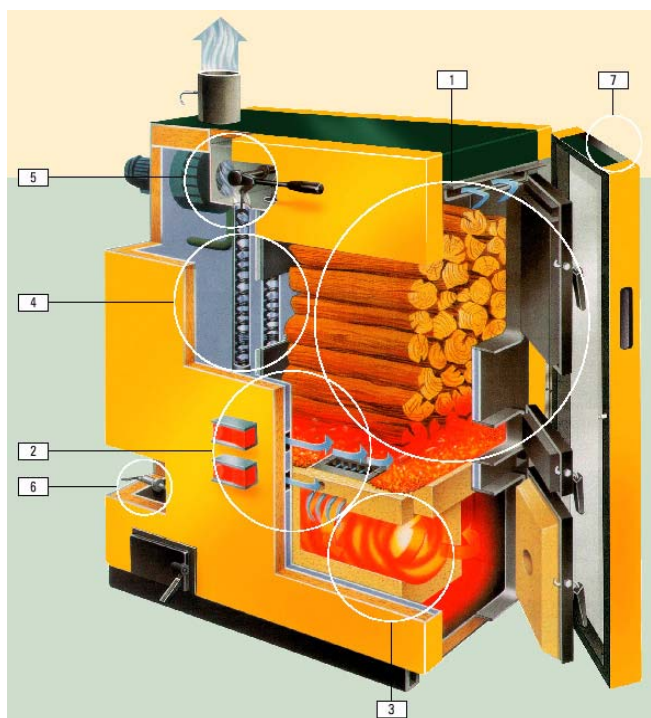


Fig. 2 Esempio di caldaia a legna. Si notino la presenza delle serrande dell'aria primaria divise da quelle dell'aria secondaria (2) (terminata la fase di combustione, esse si chiudono automaticamente ed il ventilatore di aspirazione fumi si spegne; la piccolissima quantità d'aria che riesce a trafilare serve a mantenere un residuo di braci utile a rimettere in funzione la caldaia anche dopo otto ore senza dover ripetere le operazioni di accensione), dei turbolatori ad alta temperatura in camera di combustione che ottimizzano il percorso ed il tempo di residenza della fiamma e dei fumi (3), dei turbolatori nei canali dei fumi (4) (con relativa maniglia per il loro azionamento per la pulizia dei tubi (5)) (fonte: sito internet della KWB, www.kwb.at).

Nei modelli più evoluti il ventilatore di espulsione dei fumi è a giri variabili e vi è la presenza di una sonda lambda per il controllo del tenore di ossigeno nei fumi tramite l'azione sulle serrande dell'aria; ciò consente di ottimizzare la combustione anche durante i transitori di accensione/spegnimento ed i funzionamenti ai carichi parziali (pochi modelli hanno la modulazione continua, la maggior parte è monostadio o bistadio).

Le moderne caldaie a legna possiedono tutte uno scambiatore di emergenza: si tratta sostanzialmente di una serpentina di rame immersa nell'acqua di caldaia, con un lato allacciato ad una presa di acqua fredda e l'altro ad uno scarico. Lo scopo è quello di garantire la sicurezza in caso di situazioni di emergenza (interruzione dell'alimentazione elettrica o guasto della pompa di circolazione), in quanto questo tipo di caldaie, una volta accese, sono caratterizzate da una notevole inerzia termica (causata dalla presenza di una elevata quantità di combustibile al proprio interno). Fra presa dell'acqua fredda e serpentina viene posta una *valvola di sicurezza termica* il cui elemento sensibile (bulbo di mercurio immerso in apposito pozzetto in caldaia) comanda un dispositivo meccanico che fa aprire la valvola quando la temperatura di caldaia si avvicina ai 100°C. Per quel che riguarda il dimensionamento e l'installazione dell'impianto, occorre sottolineare l'importanza di non sovradimensionare la caldaia (suggerimento valido per tutti i tipi di caldaie per il vero), soprattutto con riferimento alla tecnologia a pezzi di legna: in questo caso infatti, oltre ad un ingiustificato aggravio sul costo iniziale, si avrebbe un funzionamento non ottimale della caldaia (frequenti interruzioni della combustione con conseguente maggiore produzione di inquinanti, fumosità e ceneri, cause di frequenti sporcamenti del camino e della caldaia, minore efficienza stagionale e maggior aggravio per la pulizia della camera di combustione e rimozione delle ceneri).

Un altro accorgimento utile a risolvere tali problemi è quello di accoppiare alla caldaia un serbatoio inerziale di accumulo: ciò è sicuramente necessario per le caldaie a pezzi di legna, non indispensabile per quelle a cippato e pellet in virtù della piccola quantità di combustibile presente nel focolare di queste rispetto alla potenza termica erogata. Alcuni modelli più evoluti di caldaie a legna prevedono la regolazione, tramite microprocessore, della potenza erogata in funzione delle temperature rilevate a diverse altezze del serbatoio, in modo da evitare una troppo rapida saturazione dell'accumulo stesso. In relazione all'installazione, è da ricordare che le caldaie a legna sono ancora soggette all'obbligo di installazione del vaso di espansione aperto (per potenze > 35 kW si devono installare solo vasi aperti, per potenze inferiori non vi sono indicazioni specifiche) secondo il D.M. 1/12/1975. Tale obbligo, se era motivato da ragioni di sicurezza a causa della relativa facilità con cui le caldaie a legna di "vecchia generazione" potevano raggiungere la temperatura di ebollizione, risulta oggi quanto meno anacronistico, generando un aggravio di costi e complicazioni impiantistiche che generano inefficienze (il vaso aperto deve essere posto nel punto più alto dell'impianto di riscaldamento, tipicamente nel solaio, e collegato direttamente alla caldaia da un tubo senza tratti in discesa; tale vincolo, nel caso di caldaia installata in un locale separato dall'edificio da riscaldare, può portare alla necessità di installare due circuiti, uno primario a vaso aperto nel locale caldaia e uno secondario a vaso chiuso nell'edificio principale, accoppiati da uno scambiatore).

La tecnologia delle moderne caldaie a cippato presenta molti punti in comune con quella delle caldaie a pezzi di legna, ma anche delle peculiarità: il combustibile, che deve

essere immagazzinato in un locale (o in un silo per le taglie più piccole) confinante con la centrale termica, viene estratto tramite un sistema agitatore-coclea che può essere altamente personalizzabile in funzione delle svariate situazioni. Le ceneri che si formano e cadono al di sotto della camera di combustione vengono spostate, tramite delle coclee, verso un cassetto di accumulo la cui capienza consente di poterlo svuotare una volta ogni qualche settimana. Gli impianti a cippato sono totalmente automatizzati e non presentano limiti dimensionali (da poche decine di kilowatt ai megawatt); la loro economicità di esercizio perciò si giustifica maggiormente al crescere della taglia dell'impianto, per cui sono particolarmente indicati per il riscaldamento di edifici di dimensioni medio-grandi (alberghi, scuole, ospedali, condomini, centri commerciali, ecc.).

In relazione al problema della sicurezza nell'installazione di queste caldaie, come di quelle a pellet, oltre al già citato obbligo del vaso di espansione aperto, occorre tutelarsi contro il ritorno di fiamma dalla caldaia verso il silo di deposito del combustibile, situazione che potrebbe verificarsi, ad esempio, in caso di pressione positiva nel focolare (ecco perché molti modelli presentano dispositivi atti al controllo di tale grandezza). Occorre quindi poter interrompere fisicamente il flusso di combustibile dal deposito alla caldaia, ad esempio prevedendo due coclee separate da una tramoggia di caduta del combustibile (una proveniente dal silo, l'altra che porta il combustibile in caldaia). Nella parte terminale della coclea proveniente dal silo può essere installata una valvola di sicurezza termica collegata all'acquedotto o ad un deposito d'acqua che apra, immettendo acqua nel canale della coclea, quando vi sia pericolo di ritorno di fiamma. I modelli più evoluti di caldaia hanno già al loro interno dei dispositivi adatti allo scopo.

Le caldaie a pellet non sono concettualmente molto diverse da quelle a cippato. Il combustibile in questo caso gode del vantaggio di essere ad elevata densità energetica (PCI attorno ai 16-18 MJ/kg, densità 600-700 kg/m³) e, a causa della sua forma in piccoli cilindretti di legno vergine essiccato e pressato, tende a comportarsi come un fluido, facilitandone il trasporto (che può avvenire in autobotti) ed il caricamento automatico nelle caldaie tramite sistemi a coclea. Si possono identificare caldaie cosiddette "a due unità" o "integrate": le prime sono l'unione di una caldaia, che può essere anche un modello a gasolio o metano, con un bruciatore a pellet; le seconde sono dei veri e propri gruppi termici che nascono in fabbrica per funzionare a pellet. Quasi tutti i modelli più evoluti consentono la regolazione della combustione con sonda lambda. Importante è poi, per quanto concerne le tutte le tipologie di caldaie a biomasse legnose, la corretta progettazione e realizzazione del camino di evacuazione dei fumi. Esso va realizzato in materiale refrattario o, preferibilmente, in acciaio inox coibentato, in modo da garantire, oltre un buon tiraggio, che i fumi non scendano sotto la temperatura di rugiada, soprattutto con le moderne caldaie in cui la temperatura dei fumi è piuttosto bassa (attorno ai 100°C). Va in ogni caso prevista una manutenzione e pulizia annuale, soprattutto se si utilizzano i pezzi di legna.

Le emissioni inquinanti delle caldaie a legna sono dipendenti sostanzialmente da tre fattori: la tecnologia adottata, la qualità del combustibile e la presenza dell'accumulo. Diciamo subito che il terzo fattore ha un peso rilevante solo nel caso di caldaie a ciocchi di legna, meno in quelle a cippato e poco o nulla in quelle a pellet, per i motivi

primi descritti. La qualità del combustibile influisce in termini di aumento degli incombusti e del particolato (oltre che di diminuzione dell'efficienza) all'aumentare del contenuto di umidità; inoltre, bruciando pellet ricavato dalla corteccia piuttosto che dal legno si hanno fumi con contenuti di particolato e di NO_x elevati, a causa dell'elevato contenuto di ceneri e di azoto nel combustibile. Una delle questioni più urgenti da risolvere a livello normativo riguarda proprio la mancanza di standard adeguati per la definizione delle caratteristiche tecniche dei biocombustibili, in particolare quelli legnosi. A questo proposito il CEN sta realizzando delle norme per la classificazione dei combustibili da biomasse; per ora in Italia sono disponibili le raccomandazioni del CTI (Comitato Termotecnico Italiano, www.cti2000.it). Per i biocombustibili legnosi, ad esempio, le raccomandazioni prevedono le caratteristiche minime in termini di contenuti di ceneri, umidità, azoto, zolfo, ma specificano anche la necessità che il legno sia privo di composti organici alogenati o metalli pesanti (che possono derivare da precedenti trattamenti o rivestimenti protettivi che il legno può aver subito, dall'esposizione ad inquinamento stradale o industriale, dalla salsedine presente nell'aria delle zone litoranee, dai macchinari ed utensili utilizzati nella produzione del combustibile legnoso). Ciò per poter garantire efficienze di combustione elevate e livelli di emissione, sporcamenti delle camere di combustione e dei camini minori possibili.

I fattori che maggiormente influenzano le emissioni sono tuttavia quelli tecnologici, cioè di progettazione e realizzazione della caldaia. Quelle di "vecchia" tecnologia, a pezzi di legna senza possibilità di controllo sull'aria primaria e secondaria, a fiamma verticale verso l'alto, senza sonda lambda e con camera di combustione non disegnata ad hoc per ottimizzare le tre T (temperatura, tempo di residenza e turbolenza) presentano emissioni sostanzialmente superiori non solo delle caldaie a metano, ma anche di quelle a gasolio. Tuttavia, le moderne caldaie a legna, in particolare quelle a pellet, presentano livelli di emissione confrontabili ed in alcuni casi migliori di quelli delle moderne caldaie a gasolio.

In Tab. 2 vengono riportate le emissioni di alcune tipologie di caldaie: quelle di tecnologia vecchia presentano maggiori emissioni su tutti i fronti, in particolare anche per quel che concerne i gas serra (in termini di emissioni di metano ed altri idrocarburi incombusti). La sostituzione di una caldaia di vecchia generazione con una moderna a legna con accumulo termico o con una a pellet può ridurre le emissioni di metano di 8-9000 volte, aumentando nello stesso tempo l'efficienza. La semplice installazione di un accumulo termico con una caldaia vecchia può ridurre le emissioni di metano di sette volte e quelle di particolato di ventuno volte. Un miglioramento simile si ha semplicemente con cariche di legna piccole e frequenti piuttosto che di grossa entità (in quest'ultimo caso, per garantire un tempo di combustione abbastanza lungo sono solitamente accompagnate da un non adeguato eccesso d'aria che causa elevati incombusti). L'emissione di particolato è 180 volte maggiore nello scenario peggiore rispetto a quello migliore. Le efficienze di combustione possono arrivare, nelle moderne caldaie, fino al 92-94% sul PCI.

Tab. 2 Emissioni in mg di inquinante per MJ di combustibile nei diversi casi analizzati nello studio riportato [6]. Si tratta di sei casi con caldaie di vecchia generazione, in cui due con accumulo (a con caldaia multicomustibile, d a legna) e, fra i restanti quattro, due casi si riferiscono ad una strategia di funzionamento della caldaia che vede un riempimento completo del vano di carica e poi uno strozzamento dell'aria per rallentare la combustione (b con caldaia multicomustibile, e a legna) e due si riferiscono ad una strategia di caricamento parziale (c ed f). Con bruciatore a pellet (m-s e w) si intende un dispositivo separato installabile su diversi corpi caldaia, mentre con caldaia a pellet (t-v) si intende un gruppo termico a pellet. La caldaia policombustibile può bruciare pezzi di legna e monta un bruciatore a gasolio ed uno a pellet.

	Caso	CO ₂ (%)	CO	Comp. Organ. Volat.	CH ₄	Particolato	NO _x	
Caldaie di vecchia generazione	Policomb. con acc.. 10 kW	a	8.4	4100	660	-	87	65
	Policomb. cariche legna grandi	b	4.7	5200	1300	-	350	72
	Policomb. cariche legna piccole	c	6.8	4800	1100	610	89	71
	A legna. con acc.. 24 kW	d	8.3	5900	1500	670	103	67
	A legna. cariche legna grandi	e	6.9	16400	4800	4800	2200	28
	A legna. cariche legna piccole	f	5.6	8200	3000	-	-	64
Caldaie a legna moderne	Aria soff.. fiamma inv.. con acc.	g	12.2	707	14	1	27	125
	Idem con legna umida 26%	h	11.5	507	33	0.8	25	111
	Idem con legna umida 38%	i	5.1	3781	690	73	89	101
	Atmosferica. con acc.	j	10.3	1300	89	14	32	72
	Atm.. con acc.. legna umida 26%	k	9.1	770	63	9.2	23	81
	Aria soff.. fiamma inv.. con acc.. comb. bricchette	l	10.2	880	28	4.3	18	60
Bruciatori e caldaie a pellet	Bruc. pellet. fiamma pil.. pot. nom.	m	9.5	36	4	0.76	22	68
	Bruc. pellet. fiamma pil.. funz. int.	n	6	350	78	2.7	-	71
	Bruc. pellet. fiamma pil.. funz. int.	o	4.8	290	31	-	28	68
	Bruc. pellet. fiamma pil.. funz. int.	p	3.7	960	250	14	65	66
	Bruc. pellet. igniz. el.. pot. nom.	q	13	120	3	0.55	16	70
	Bruc. pellet. igniz. el.. funz. int.	r	9.1	990	60	5.3	64	64
	Bruc. pellet. igniz. el.. funz. int.	s	8.6	120	10	0.84	15	67
	Caldaia pellet. pot. nom.	t	11.7	30	1	-	13	-
	Caldaia pellet. funz. int.	u	6.8	380	2	-	12	62
	Caldaia pellet. funz. int.	v	3.8	1100	92	-	51	62
	Bruc. pellet. igniz. el.. funz. int.. pellet di corteccia	w	10.6	730	42	1.8	-	180
Caldaia a gasolio	x	12.2	2	1	0.46	12	37	
Caldaia multi-combustibile	y	10.6	9	32	0.52	6	41	

4. VALUTAZIONE ECONOMICA

Le variabili che influenzano la convenienza economica di un impianto a biomasse sono principalmente:

1. il costo di investimento iniziale della caldaia e delle opere termotecniche: come avviene per la maggioranza degli impianti alimentati da fonti rinnovabili, anche le caldaie a biomassa presentano elevati costi di investimento iniziali rispetto alle tradizionali caldaie a metano o a gasolio. Le motivazioni essenzialmente sono:
 - caldaia più costosa poiché dotata di una serie di accorgimenti tecnici per garantire la massima sicurezza e una combustione efficiente e "pulita";
 - maggiori costi in opere edili vista la necessità nella maggior parte dei casi di un deposito per il combustibile;
2. il costo del combustibile: si tratta di una variabile critica per determinare il risparmio operativo annuo derivante dall'impiego delle biomasse. A differenza di quanto accade per i combustibili di origine fossile solitamente impiegati (gasolio, metano, gpl), per i quali esiste un prezzo uniforme sul territorio nazionale (con eventuali variazioni dovute a defiscalizzazione per particolari utenze), per le biomasse il prezzo è molto variabile. Ciò dipende:
 - dalla tipologia del combustibile e dalle sue caratteristiche fisico-chimiche: come si è visto non esiste un solo tipo di legna, cippato o pellet ma innumerevoli

- varietà a seconda del contenuto di umidità, della eventuale essiccazione e della sua durata (per la legna), dell'origine del materiale (tipo di pianta o albero ecc.);
- dalla disponibilità locale del biocombustibile: la scelta di un impianto a biomasse è naturalmente favorita dalla facilità di approvvigionamento. I costi di trasporto (in particolare per legna da ardere e cippato) sono elevati e quindi possono determinare la non convenienza della soluzione a biomasse. In particolare per gli impianti ad uso domestico è quindi importante verificare la reperibilità del combustibile anche sul lungo periodo ed a prezzi non molto diversi da quelli con cui si è valutata la convenienza dell'impianto. Per chi dispone invece di scarti di lavorazione del legno (falegnamerie, segherie ecc.) il combustibile è a costo zero e quindi la scelta dell'impianto a biomasse è quasi immediata;
- 3. il fabbisogno termico annuo: un investimento iniziale consistente è giustificato da un adeguato risparmio operativo, che è più facilmente conseguibile laddove il fabbisogno termico annuo è più elevato (zone a clima più freddo o applicazioni di una certa taglia).

4.1 Costi di investimento

I costi d'investimento iniziale non comprendono unicamente l'acquisto della caldaia ma anche opere edili e

nella maggior parte dei casi l'installazione di un deposito di combustibile e di un meccanismo di estrazione automatica. Nell'analisi che seguirà i costi sono riferiti a prodotti tecnologicamente avanzati che in particolare sono dotati di sicurezza termica e garantiscono una combustione efficiente. Esistono infatti in commercio, in particolare per uso domestico, stufe o caldaie a biomassa di fascia più economica basate però su tecnologie datate e di elevata semplicità costruttiva a cui spesso non corrisponde però un rendimento stagionale sufficiente e un livello di emissioni inquinanti controllato.

Da un'analisi effettuata nella regione austriaca della Styria [7] emerge che il costo di investimento iniziale complessivo per kW di potenza termica passa da valori di poco superiori ai 1 200 €/kW per le piccole utenze domestiche (20-30 kW, indicativamente il carico termico di un'abitazione di 200 – 350 m² a Milano), a 200-300 €/kW per grossi complessi residenziali (dai 100 kW ai 1000 kW). Le statistiche relative ai costi degli impianti di un installatore nel Nord-Est [8] confermano tale indicazione (Tab. 3), che trova riscontro anche nei valori riportati nella relazione ITABIA (*ITALian Biomass Association*) [9].

Le caldaie di taglia inferiore hanno potenza di circa 20 kW; non c'è invece un limite di potenza superiore. E' opportuno sottolineare che al crescere della potenza aumentano anche le dimensioni del deposito combustibile, per cui gli impianti di taglia più grande (>100 kW) in genere privilegiano il cippato o il pellet come combustibile per il minor volume di stoccaggio a parità di potenza.

Tab. 3 Costo specifico di impianti a biomasse realizzati in Italia (Nord Est). I costi delle opere edili sono riferiti alla volumetria del locale caldaia e del deposito del combustibile – Fonte: Ecoenergie S.r.l.

	Opere Edili [€/m ³]	Caldaia e opere termotecniche [€/kW]	Spese Ammin. %	Totale [€/kW]
Val. minimo	169	202	17	317
Val. massimo	186	265	25	497
Val. medio	176	234	22	395

4.2 Costi del combustibile

Il confronto fra il costo del combustibile tradizionale e quello delle biomasse deve necessariamente essere svolto a parità di energia resa. Attraverso il potere calorifico di ciascun combustibile si può calcolare la massa equivalente, in termini di energia prodotta, ad esempio, ad un litro di gasolio (Fig. 3); nota quest'ultima, a partire dal costo per kg si ottiene facilmente il costo equivalente (Fig. 4). Dal confronto emerge che il costo dell'energia da biomassa è in tutti i casi nettamente inferiore rispetto a gasolio, gpl e metano. Da ciò deriva un risparmio di esercizio grazie al quale è possibile recuperare il maggiore esborso di capitale iniziale necessario come si è visto per acquistare ed installare caldaie a biomasse.

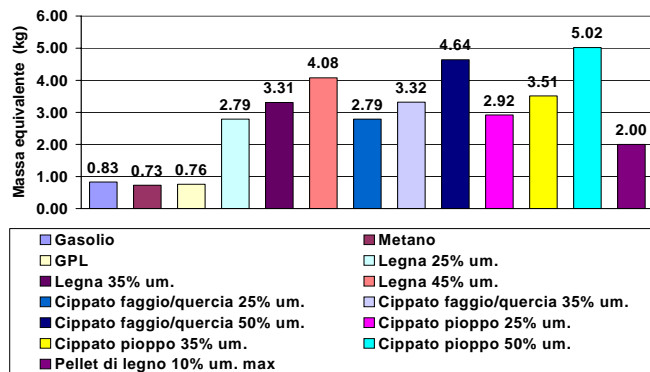


Fig. 3 Massa di combustibile equivalente, in termini di energia prodotta, ad un litro di gasolio.

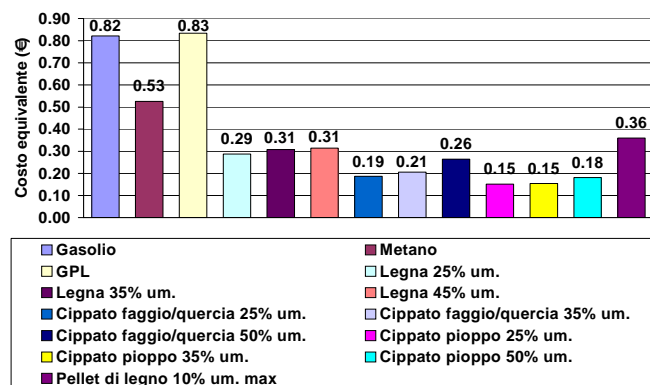


Fig. 4 Costo in Euro di un litro equivalente di gasolio per ciascun combustibile

Tab. 4 Prezzi dei biocombustibili in Italia [10]

Combustibile	€/t	
	min	max
Legna da ardere		
1 m	45	49
30-40 cm	100	110
Cippato	25	60
Pellet		
dettaglio	180	300
ingrosso	160	210

In realtà non è così semplice definire il prezzo per tonnellata di legna, cippato e pellet poiché questo dipende da numerosi fattori.

Come emerge dalla Tab. 4, l'intervallo di prezzo è ampio, in particolare per cippato e pellet [10]. Spesso è difficile confrontare offerte diverse della stessa tipologia di combustibile poiché le caratteristiche del prodotto non sono facilmente classificabili e mancano di uno standard di riferimento (si veda anche quanto detto al par. 3). Inoltre il trasporto (eccezion fatta per il pellet) rappresenta un fattore limitante.

4.3 Un esempio di valutazione

Consideriamo un'installazione media (100 kW di potenza termica) con un fabbisogno annuo di 140 000 kWh corrispondenti a 1400 ore anno equivalenti. I costi dell'impianto sono riferiti ad un edificio austriaco [7],[8] ma

ben rispecchiano i valori reali se si considera l'acquisto di caldaie a biomassa di elevata efficienza, con sicurezza termica, sonda lambda e sistema automatico di apporto del combustibile in caldaia. I metodi scelti per la valutazione dell'investimento sono il costo equivalente annuo ed il payback scontato (tasso di sconto pari al 6%). Nelle ipotesi si è considerata una vita utile per la caldaia di 15 anni e per le opere edili di 30 anni. Il prezzo del cippato 65 €/t, per il pellet 160 €/t, per il gasolio 1 €/l e per il metano 0.520 €/m³.

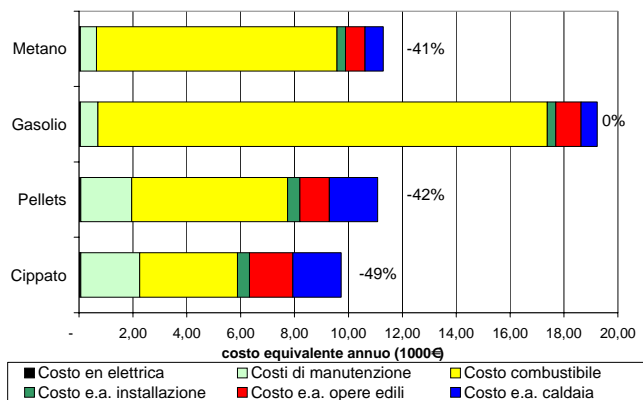


Fig. 5 Costo equivalente annuo per gli impianti con diversi combustibili (dati in migliaia di euro). Efficienza media stagionale caldaie pari all'80%.

Dall'analisi emerge come gli impianti a cippato siano i più convenienti (Fig. 5). Il payback dell'investimento differenziale fra la soluzione a cippato e quella a gasolio è di 3 anni mentre è di 9 rispetto a quella a metano. L'impianto a pellet richiede un costo d'investimento inizialmente inferiore rispetto a quello a cippato per via della dimensione più compatta e della maggior facilità di stoccaggio del pellet stesso. E' anch'esso più conveniente delle soluzioni tradizionali, anche se il maggior costo del pellet comporta un payback scontato di ben 14 anni rispetto al metano.

5. CONCLUSIONI

La situazione in Italia è complessa e variegata, difficilmente schematizzabile anche a causa dei pochi dati a disposizione. Per quel che concerne l'utilizzo delle biomasse per il riscaldamento ambientale il problema più serio da affrontare riguarda gli elevati costi per l'approvvigionamento delle materie prime, causato da efficienze di produzione delle biomasse vegetali (cioè l'efficienza di conversione dell'energia solare in contenuto energetico della biomassa) estremamente basse, dell'ordine dell'1% [1]; ciò comporta, di fatto, la raccolta delle biomasse su aree molto estese e quindi la necessità di creare realtà consortili. Occorre dire però che questa mancanza di competitività è legata anche all'attuale sistema dei prezzi, che non tiene conto delle esternalità e dei costi connessi allo sfruttamento delle risorse fossili. Inoltre, l'utilizzo delle biomasse residuali (in breve gli scarti delle lavorazioni del legno, potature del verde pubblico, di coltivazioni come i frutteti o derivante dalla manutenzione dei boschi) può garantire un significativo risparmio economico nell'approvvigionamento del combustibile.

Dal punto di vista tecnico, come abbiamo visto, non vi sono particolari ostacoli: le moderne caldaie sono costruite con

tecnologie in grado di garantire rendimenti e livelli di emissioni confrontabili ed in molti casi migliori di quelli delle corrispondenti caldaie a gasolio; esistono anche modelli in grado di garantire una elevata flessibilità nell'utilizzo delle diverse biomasse, anche se per ora solo su taglie medio-piccole. Il vero problema è semmai la scarsa conoscenza che i progettisti e gli installatori hanno delle applicazioni disponibili, anche a causa dell'assenza di un vero e proprio mercato di queste tecnologie.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. ENEA, Rapporto energia ambiente 2004, Le fonti rinnovabili
2. G. Riva, Biodiesel: aspetti generali e considerazioni ambientali, CTI, Milano, 2003
3. J. Sheehan, V. Camobreco, J. Duffield, M. Graboski, H. Shapouri, An Overview of Biodiesel and Petroleum Diesel Life Cycles, NREL/TP-580-24772, Maggio 1998
4. T. Nussbaumer and M. Oser, Evaluation of Biomass Combustion based Energy Systems by Cumulative Energy Demand and Energy Yield Coefficient, Final report prepared for International Energy Agency (IEA) and Swiss Federal Office of Energy (SFOE), Verenum (Switzerland), 2004
5. C. Carraretto, A. Macor, A. Mirandola, A. Stoppato, S. Tonon, Biodiesel as alternative fuel: experimental analysis and energetic evaluations, *Energy*, vol. 29, pp. 2195-2211, 2004
6. L.S. Johansson, B. Leckner, L. Gustavsson, D. Cooper, C. Tullin, A. Potter, Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets, *Atmospheric environment*, vol. 38, pp. 4183-4195, 2004
7. Bioheat Final Report, relazione finale del programma BIOHEAT, Vienna Gennaio 2003, www.bioheat.info
8. D'Ascanio A., Le possibilità di finanziamento per impianti a legno energia, *Alberi e Territorio* n. 12-2004, pagg. 41-45
9. ITABIA - Adiconsum, Dossier caldaie a biomasse per riscaldamento domestico
10. Antonimi E. Pettenella D., Il mercato attuale dei combustibili legnosi e le sue tendenze, convegno FORLENER, Biella 25 settembre 2004