



# Una valutazione ambientale e economica dell'utilizzo di biomasse a scopo energetico: il caso della provincia di Cremona

Giulia Fiorese\*, Marino Gatto, Giorgio Guariso

Dipartimento di Elettronica e Informazione, Politecnico di Milano, Via Ponzio 34/5, Milano 20133, Italia

## Abstract

Le biomasse, utilizzate dal 50% della popolazione mondiale, sono una importante fonte di energia anche nei paesi industrializzati. Con una opportuna gestione, possono essere una valida fonte alternativa di energia in quanto (a) sono una risorsa locale e largamente disponibile; (b) la loro valorizzazione può innescare processi di miglioramento ambientale e socio-economico; (c) il bilancio di produzione di gas serra, tipicamente di CO<sub>2</sub>, è quasi neutro. Per ottenere trasformazioni energetiche con elevate efficienze e per un utilizzo sostenibile, è necessario però considerare impianti con tecnologie moderne e pianificare razionalmente l'approvvigionamento (raccolta e trasporto) della biomassa necessaria al loro funzionamento. Viene qui proposta, per un territorio a scala provinciale, una metodologia per compiere un accurato bilancio energetico, emissivo ed economico al fine di valutare la convenienza di questa fonte rinnovabile di energia. Vengono considerati i costi di raccolta, trasporto ed eventuale coltura delle biomasse mediante *short rotation forestry* nonché i costi di costruzione e gestione degli impianti (cogenerazione e/o caldaie domestiche). La metodologia viene applicata a Cremona, una delle più importanti province agricole d'Italia. L'analisi è basata sui dati dell'ultimo censimento dell'agricoltura e dell'industria e sulla necessaria cartografia tematica. Vengono ottimizzati la localizzazione degli impianti e i relativi bacini di conferimento. © 2004 SIe. All rights reserved

Keywords: biomasse; cogenerazione; riduzione CO<sub>2</sub>; ottimizzazione; pianificazione energetica provinciale

## 1. Introduzione

La biomassa è una fonte rinnovabile che deriva da sostanze organiche come i residui agro-forestali, i sottoprodotti della lavorazione del legno, le deiezioni animali e le colture energetiche. Caratteristica delle biomasse è il loro stretto legame con le realtà locali: dato il loro non elevato contenuto energetico e la distribuzione della loro disponibilità sul territorio, possono essere utilizzate convenientemente a scopo energetico solo vicino alla zona di produzione.

La valorizzazione dell'utilizzo delle biomasse può innescare processi di miglioramento ambientale e socio-economico come la diversificazione delle colture, il ripristino di suoli abbandonati, la manutenzione dei boschi e la creazione di posti di lavoro (McKendry 2002a). Inoltre, il loro utilizzo energetico contribuisce a contrastare il riscaldamento climatico globale poiché il bilancio di produzione di gas serra, tipicamente di CO<sub>2</sub>, si può considerare quasi neutro (Roman e Turnbull 1997).

La scelta della tecnologia e la pianificazione dell'approvvigionamento delle biomasse sono fondamentali affinché la produzione di energia sia

\* Corresponding author. Tel.: +39-02-2399-9638; fax: +39-02-2399-9611; e-mail: fiorese@elet.polimi.it.

sostenibile sul lungo periodo e garantisca buone efficienze di conversione (Rosch e Kaltschmitt 1999, Combs 2002 e McKendry 2002b). Anche la produzione di energia da biomassa può avere impatti negativi, in particolare si deve prestare attenzione all'inquinamento atmosferico, soprattutto dovuto alle emissioni di particolato. L'efficienza di abbattimento di questo inquinante aumenta per gli impianti di conversione di taglia maggiore: è, quindi, possibile un buon controllo delle emissioni.

In questo lavoro, sarà considerata solo la combustione di biomasse ligno-cellulosiche ponendo attenzione agli aspetti legati alla produzione di energia. Il problema di ottimizzazione che verrà formulato è sostanzialmente un problema di localizzazione di impianti e di definizione dei bacini d'utenza, per cui esiste un'ampia letteratura scientifica. Per una panoramica dei metodi di localizzazione degli impianti si veda ad esempio Cappanera (2000). Sul tema specifico degli impianti a biomassa, Freppaz *et al.* (2004) hanno affrontato il problema nel caso della Liguria e Voivontas *et al.* (2001) nel caso dell'isola di Creta. Uno studio, per certi aspetti simile a quello qui esposto, è stato affrontato per la localizzazione di impianti di termodistruzione dei rifiuti in Lombardia anche da Caruso *et al.* (1993).

Il problema di localizzazione degli impianti e di definizione dei bacini di conferimento è risolto rispetto a tre obiettivi, tanti quanti sono i principali aspetti legati all'utilizzo delle fonti rinnovabili. Si ottimizzano: la resa energetica (obiettivo energetico), la riduzione delle emissioni di gas serra (obiettivo emissivo) e il ritorno monetario netto (obiettivo economico). In questo studio di massima sono però trascurate le emissioni di altri inquinanti.

Infine, caratteristica del presente lavoro è l'attenta analisi del territorio in esame: si propone di risolvere il problema di ottimizzazione a scala provinciale e di considerare come unità minima di analisi il comune. A titolo di esempio, si farà riferimento alla provincia di Cremona, una delle più importanti aree agricole della Pianura Padana.

## 2. Scenari di raccolta, produzione e utilizzo

In questo paragrafo sono brevemente descritti i metodi per la stima della disponibilità di biomasse e della loro produzione in apposite colture; sono inoltre descritte le alternative impiantistiche e gestionali che saranno considerate.

### 2.1. Disponibilità di biomasse

Le biomasse ligno-cellulosiche sono costituite dai sottoprodotti già disponibili di attività agricole, forestali e della lavorazione del legno e dalle biomasse ottenute da piantagioni energetiche (SRF – *Short Rotation Forestry*) (McKendry 2002a).

La biomassa attualmente disponibile a fini energetici si ricava, tramite opportuni parametri di conversione, da:

1. la superficie destinata alle colture più diffuse per i residui agricoli (ANPA e ONR 2001);
2. le dimensioni, misurate in termini di addetti, del settore della lavorazione del legno per i sottoprodotti legnosi (Cerullo & Pellegrini 2002);
3. la parte di bosco sottoposta annualmente a pulizia per i residui forestali (ENEA 2000).

La biomassa da SRF dipende dalla superficie che si decide di destinarle e dalle caratteristiche della coltura stessa. Le SRF producono biomassa dall'approvvigionamento sicuro e dalle caratteristiche chimico-fisiche omogenee, particolarmente efficiente per l'utilizzo energetico delle biomasse. Si suppone si destinare a colture energetiche la superficie agricola non utilizzata e i *set aside*<sup>1</sup>. Tra le varie essenze utilizzabili, qui si considerano solo piantagioni di pioppi ad alte densità, brevi turni di taglio ed elevata meccanizzazione con una resa finale per ettaro di 13 ton tal quale (Klass 1998 e Berndes *et al.* 2001).

<sup>1</sup> I *set aside* sono una parte, pari al 10%, dei terreni investiti a seminativi che la Politica Agraria Comunitaria impone di non utilizzare per colture agricole.

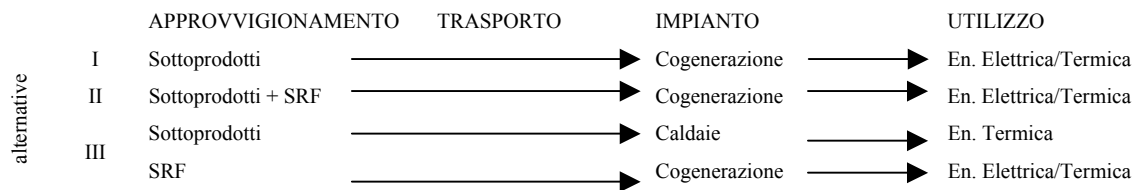


Fig. 1. Le tre alternative di utilizzo della biomassa si distinguono per la tipologia e la quantità di biomassa in ingresso, per il tipo di impianto considerato e per l'energia prodotta (termica e/o elettrica); il trasporto della biomassa dal luogo di raccolta a quello di utilizzo è considerato in tutte le alternative.

## 2.2. Produzione di energia

Dal punto di vista impiantistico, si considerano come possibili alternative centrali di cogenerazione situate in comuni di piccole/medie dimensioni, per i quali sono già disponibili valutazioni sulla convenienza economica di sistemi di teleriscaldamento, e caldaie domestiche che producono l'energia termica necessaria ad un'abitazione di medie dimensioni (Riva 2003 e Enea 2002).

Il tipo di impianto di cogenerazione considerato è costituito da un ciclo ORC (*Organic Rankine Cycle*) con un rendimento medio dell'80% e un rendimento elettrico del 17,2% (Gaia *et al.* 2000). L'impianto ha una potenza nominale di 1,1 MWe e produce calore sufficiente ad alimentare una rete di teleriscaldamento di 15 km circa. Funzionano in questo modo gli impianti di Tirano e di Lienz<sup>2</sup>. Supponendo un potere calorifico inferiore delle biomasse pari a 17.178 MJ/ton ss (sostanza secca), sono necessarie circa 19.300 ton ss per il funzionamento a piena potenza di 335 giorni/anno.

Le moderne caldaie domestiche alimentate a biomassa raggiungono rendimenti elevati, superiori anche all'80%, richiedono una semplice manutenzione e sono dotate di efficaci sistemi di pulizia dei fumi (Enea 2002). Sono qui considerate caldaie da 100 kW. Per il funzionamento di una caldaia, invece, servono circa 39 ton ss/anno, supponendo che lavori 1.500 h/anno a piena potenza.

## 2.3. Alternative di utilizzo delle biomasse

È possibile delineare diverse alternative di utilizzo delle biomasse, in funzione della loro disponibilità e dei diversi impianti di produzione di energia, supponendo che:

1. I sottoprodotti possano alimentare sia gli impianti di cogenerazione sia le caldaie, mentre la biomassa proveniente da SRF, poiché più pregiata e costosa da ottenere, possa alimentare solo gli impianti di cogenerazione;
2. Le caldaie domestiche possano essere presenti in ogni comune e possano essere alimentate solo dai sottoprodotti raccolti nel comune stesso.

Si osserva inoltre che, se la biomassa disponibile sul territorio permette la costruzione di più impianti di cogenerazione, risultato dell'analisi sarà anche la definizione dei bacini di conferimento, cioè l'insieme dei comuni che conferiscono biomassa allo stesso impianto. Infine, si vogliono distinguere le prestazioni dei sottoprodotti da quelle della SRF per comprendere se e quanto siano convenienti le colture energetiche di questo tipo.

Si assumeranno, quindi, i seguenti scenari (si veda figura 1):

- Alternativa I: i sottoprodotti alimentano gli impianti di cogenerazione, non si coltiva SRF;
- Alternativa II: i sottoprodotti e la SRF alimentano gli impianti di cogenerazione;
- Alternativa III: i sottoprodotti alimentano le caldaie domestiche e la SRF alimenta gli impianti di cogenerazione.

<sup>2</sup> [www.teleriscaldamento.valtline.it](http://www.teleriscaldamento.valtline.it) e [www.stadtwaerme-lienz.at](http://www.stadtwaerme-lienz.at).

### 3. Il problema decisionale

Per un territorio a scala provinciale, si valuta l'opportunità di utilizzare le biomasse sulla base di tre indicatori: energetico, emissivo ed economico. Le seguenti ipotesi, oltre a semplificare la formulazione matematica, corrispondono ad alcune tipiche situazioni che si verificano nella pratica:

- Ogni alternativa prevede l'utilizzo di tutta la biomassa disponibile;
- La biomassa prodotta in un comune si considera concentrata nel centro del comune stesso e non distribuita sul suo territorio, di conseguenza i costi di trasporto della biomassa all'interno del comune in cui è raccolta non sono conteggiati;
- Le caldaie domestiche utilizzano solo i sottoprodotti raccolti nello stesso comune;
- I parametri utilizzati nella valutazione delle alternative (rendimento, costi di gestione e di manutenzione, costo della biomassa, prezzo di vendita dell'energia prodotta) sono considerati costanti lungo tutto l'orizzonte temporale di vita degli impianti di produzione;
- L'orizzonte temporale è di 21 anni: il primo per la costruzione dell'impianto, i successivi 20 per il funzionamento dell'impianto stesso, con la SRF a regime.

#### 3.1. Variabili di decisione

Per definire l'impiego ottimale delle biomasse, si assumono le seguenti variabili di decisione: la frazione di biomassa di un comune che alimenta un determinato impianto (un numero reale tra 0 e 1) e la presenza o l'assenza dell'impianto in ogni comune (una variabile binaria).

Il numero di impianti è determinato dalla quantità di biomassa presente a seconda dell'alternativa, considerando che tutta la biomassa sia utilizzata. Nell'alternativa III, ad esempio, la biomassa prodotta da SRF determina il numero di impianti di cogenerazione a livello provinciale; le biomasse disponibili in ogni comune, ovvero i sottoprodotti e i residui, determinano invece il numero di caldaie domestiche presenti nel comune.

#### 3.2. Funzioni obiettivo

Ad ogni passo della filiera energetica (figura 1) è associato un *costo* energetico (MJ), emissivo (ton CO<sub>2</sub>) ed economico (€).

L'obiettivo energetico da massimizzare è rappresentato dalla quantità di energia che si può estrarre dal sistema. All'energia prodotta si sottrae l'energia utilizzata per il trasporto e per l'eventuale crescita delle piantagioni arboree di SRF.

L'obiettivo ambientale è la riduzione dei gas ad effetto serra: si massimizza la quantità di emissioni di CO<sub>2</sub> evitate rispetto all'utilizzo di gas naturale, il meno inquinante tra i combustibili fossili. Alle emissioni di CO<sub>2</sub> che sarebbero state prodotte utilizzando gas naturale per ottenere la stessa quantità e tipologia (elettrica o termica) di energia, si sottraggono le emissioni dovute al trasporto della biomassa e alla eventuale produzione di SRF. Conformemente alle ipotesi fatte, per le caldaie domestiche si valuta invece solo l'emissione che avrebbe una caldaia di uguale potenza alimentata a gas. Poiché si assume che il bilancio complessivo di CO<sub>2</sub> delle biomasse (differenza tra la CO<sub>2</sub> assorbita durante la crescita della pianta e quella rilasciata durante la combustione) sia circa nullo, le emissioni degli impianti di cogenerazione e delle caldaie non sono conteggiate nell'obiettivo emissivo.

L'obiettivo economico è calcolato con il metodo dell'analisi degli investimenti attraverso il valore attuale netto, dato dall'investimento iniziale e dai flussi di cassa. Il flusso di cassa, per ogni anno di funzionamento dell'impianto, è dato dalla differenza tra i ricavi derivanti dalla vendita dell'energia prodotta (per gli impianti di cogenerazione, alla vendita di energia elettrica si somma, per i primi otto anni, la vendita dei certificati verdi) e i costi sostenuti (gestione e manutenzione dell'impianto, acquisto e trasporto delle biomasse, smaltimento delle ceneri).

Per una descrizione più approfondita dei termini che compongono le tre funzioni obiettivo, si rimanda a Fiorese (2003).

La risoluzione del problema di ottimizzazione, ovvero la massimizzazione di ognuna delle tre funzioni obiettivo è stata effettuata con l'ausilio di AMPL, linguaggio per la risoluzione di problemi di programmazione matematica. In particolare è stato

usato il risolutore di programmazione matematica CPLEX (Fourer *et al.* 2002).

#### 4. La provincia di Cremona

Il modello sopra illustrato è stato applicato alla provincia di Cremona, nell'ambito della stesura del Piano Energetico Ambientale Provinciale (2003) che ha dato ampio spazio alle risorse rinnovabili.

Il settore agro-alimentare riveste grande importanza nella Provincia. La superficie agraria totale<sup>3</sup> occupa l'82% del territorio provinciale; di questa superficie più del 90% è effettivamente utilizzato per colture. Le superfici forestali sono invece molto ridotte, pari al 4% circa della superficie territoriale (Istat 2000). Nella parte meridionale della provincia è presente un distretto della lavorazione del legno. La stima della disponibilità di biomasse è stata fatta sulla base dei censimenti Istat dell'Industria (1996) e dell'Agricoltura (2000) ed è riportata in dettaglio in tabella 1.

Tabella 1

Stima della quantità di biomasse disponibili e da SRF nella provincia di Cremona

Biomasse	Disponibilità (ton ss/anno)
Sottoprodotti agricoli	124.046
Residui industriali	9.453
Sottoprodotti forestali	736
SRF	92.158
Totale	226.393

##### 4.1. Risultati del modello decisionale

La biomassa disponibile nell'alternativa I, permette la costruzione di 7 impianti di cogenerazione; l'aggiunta della SRF nell'alternativa II, invece, consente la costruzione di 12 impianti di cogenerazione. L'alternativa III, infine, prevede la costruzione di 5 impianti di cogenerazione e di più di

<sup>3</sup> La superficie agraria totale è la somma della superficie agraria utilizzata, cioè quella effettivamente utilizzata in coltivazioni propriamente agricole, e della superficie coperta da arboricoltura da legno, da boschi, dalla superficie agraria non utilizzata.

3.500 caldaie domestiche distribuite tra tutti i comuni della Provincia. Si osserva che, per ogni alternativa, le localizzazioni degli impianti per gli obiettivi energetico, emissivo ed economico coincidono. D'altra parte, i tre obiettivi non sono conflittuali e la loro formulazione si basa, sotto l'ipotesi che tutta la biomassa sia utilizzata, sulla minimizzazione dei costi (energetici, ambientali o economici) di trasporto. Inoltre, i costi di trasporto considerati sono quelli dal comune di raccolta al comune di utilizzo, mentre si è trascurato il costo di trasporto all'interno dei comuni che potrebbe essere un termine significativo.

L'utilizzo a scopo energetico delle biomasse risulta molto positivo per le tre funzioni obiettivo. Nella provincia di Cremona, il consumo di combustibili fossili è stato pari a 789 ktep nel 1996 (Regione Lombardia 2002) mentre le emissioni di gas serra sono state pari a 2.538 kton nel 2001 (ARPA Lombardia e Regione Lombardia 2003). Il risparmio di combustibili fossili raggiungibile grazie all'utilizzo energetico delle biomasse, in tabella 2, è elevato: dal 4,7% al 8,7%. Anche il risparmio di emissioni di CO<sub>2</sub> è significativo, dal 5% all'8,4%. Il contributo alle politiche di riduzione di emissioni di gas serra può essere consistente: il Protocollo di Kyoto prevede per l'Italia una riduzione, entro il 2008-2012, delle emissioni di gas serra del 6,5% rispetto ai valori del 1990.

Tabella 2

Sostituzione dei combustibili fossili, emissioni di CO<sub>2</sub> evitate e tempo di ritorno dell'investimento a confronto per le tre alternative di utilizzo energetico delle biomasse

	Combustibili fossili sostituiti	Emissioni evitate CO <sub>2</sub>	Tempo di ritorno investimento
ALT I	4,7%	5%	2,4
ALT II	7,8%	8,4%	3,3
ALT III	8,7%	8,4%	2,4 <sup>a</sup> - 3,8 <sup>b</sup>

<sup>a</sup>Per gli impianti di cogenerazione.

<sup>b</sup>Per le caldaie domestiche.

La SRF contribuisce significativamente alla produzione di energia: l'alternativa II ha un valore ottimo dell'obiettivo energetico superiore all'alternativa I, nonostante la SRF comporti un aumento dell'energia richiesta, delle emissioni di

CO<sub>2</sub> e dei costi dovuti alla coltivazione, al trasporto e all'utilizzo di macchinari.

I valori più elevati degli obiettivi sono raggiunti dall'alternativa III: le caldaie domestiche hanno un rendimento elevato e l'utilizzo dei sottoprodotti nel comune stesso in cui sono raccolti comporta, nella formulazione adottata, costi di trasporto nulli. Le biomasse prodotte tramite SRF, invece, sono destinate ad impianti di cogenerazione che producono energia termica, anche in questo caso con rendimenti elevati, ed elettrica, più preziosa per quanto riguarda la vendita (soprattutto grazie ai certificati verdi) e che consente di evitare l'emissione di maggiori quantità di CO<sub>2</sub> (poiché la produzione di energia elettrica con gas naturale emette più CO<sub>2</sub> rispetto alla produzione di energia termica poiché il rendimento elettrico è inferiore a quello termico).

Si osserva che, se si considerano tutti e tre gli obiettivi contemporaneamente, l'alternativa III domina la II, la quale a sua volta domina la I. Ciò significa che un utilizzo intensivo delle biomasse in provincia di Cremona sembra essere molto positivo: più se ne utilizzano, più si ottengono benefici elevati sia dal punto di vista energetico, sia emissivo (come era scontato che accadesse), ma anche dal punto di vista economico.

L'utilizzo energetico delle biomasse nella provincia di Cremona risulta positivo principalmente grazie alla vocazione agricola del territorio: non solo c'è un'elevata densità di colture da cui si possono recuperare i sottoprodotti, ma è anche disponibile, grazie ai *set-aside*, una vasta superficie (circa 8.600 ha) da destinare alla SRF.

#### 4.2. Localizzazione e bacini di conferimento

Per ogni alternativa, la risoluzione distinta dei tre problemi di ottimizzazione energetico, emissivo ed economico definisce la localizzazione delle centrali e dei relativi bacini; è interessante osservare che, ad eccezione di pochi comuni, le soluzioni ottimali dei tre problemi comportano le stesse localizzazioni e gli stessi bacini. Questo significa che, in ogni alternativa, la localizzazione e il relativo bacino che massimizzano un obiettivo massimizzano anche gli altri due.

A titolo di esempio, la mappa di figura 2 è relativa all'obiettivo energetico dell'alternativa I: i comuni

rappresentati con lo stesso colore conferiscono la propria biomassa allo stesso impianto, quelli in bianco conferiscono la biomassa a più impianti.

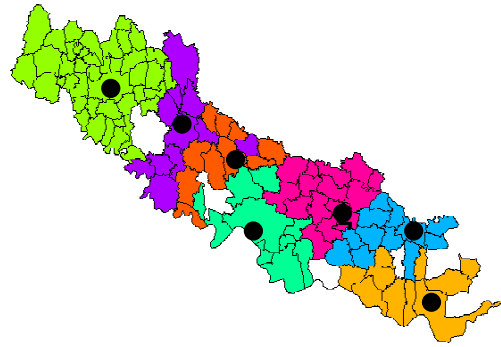


Fig. 2. Localizzazione degli impianti e bacini di conferimento per l'obiettivo energetico dell'alternativa I.

## 5. Conclusioni

Il lavoro presentato propone una metodologia per la pianificazione dell'utilizzo delle biomasse considerando produzione, raccolta, trasporto e due differenti impianti di produzione di energia. La metodologia è stata applicata alla provincia di Cremona ottenendo risultati significativi. Il modello proposto permette di stimare la disponibilità di biomassa e di determinare il numero di impianti, la localizzazione e i bacini di conferimento ottimi, valutando la prestazione delle alternative analizzate dal confronto di tre obiettivi distinti.

I risultati ottenuti mostrano che l'utilizzo energetico delle biomasse è positivo in una zona di pianura con agricoltura intensiva e che i vantaggi derivano non solo dal possibile risparmio di combustibili fossili, ma anche dalla possibilità di evitare emissioni di CO<sub>2</sub> e di avere ritorni dall'investimento economico iniziale. Aver ottenuto risultati largamente positivi lascia supporre che, includendo altri aspetti qui trascurati che riducano il valore delle funzioni obiettivo, si dovrebbero ottenere valori comunque positivi. Si osserva che l'emissione dei certificati verdi contribuisce in larga misura al risultato positivo dell'obiettivo economico. Si è ritenuto opportuno considerare i certificati verdi

perché costituiscono non solo un incentivo alla diffusione delle fonti rinnovabili di energia in Italia, ma servono anche per internalizzare quei costi esterni dell'inquinamento a scala globale che non sono normalmente considerati nelle analisi costi-benefici.

Per una valutazione completa dell'utilizzo di biomasse restano da indagare alcuni aspetti, che saranno oggetto di successivi lavori. Devono essere valutate le emissioni atmosferiche a scala locale, soprattutto particolato e NO<sub>x</sub>, e quelle solide, considerando anche il recupero e il riutilizzo delle ceneri. Il confronto tra diverse tecnologie di trasformazione può essere esteso fino a comprendere impianti di taglia maggiore, come centrali da 10 MWe, o impianti che producono bio-combustibili. Anche il confronto con utilizzi diversi delle biomasse (cellulosa, materiale per costruzione di mobili, fertilizzanti o ammendanti per suoli agricoli) dovrebbe essere considerato, poiché la concorrenza con altre filiere può influire notevolmente sull'utilizzo energetico.

## Ringraziamenti

Il lavoro è stato svolto nell'ambito del contratto con la Provincia di Cremona per la redazione del Piano Energetico Ambientale e del Progetto di sviluppo del Politecnico di Milano "Efficient and Environmentally-Benign Energy Carriers and Technologies for Power Generation and Sustainable, Hydrogen-Based Mobility". Gli autori ringraziano Giulio De Leo dell'Università degli Studi di Parma e Pietro Belotti del Politecnico di Milano.

## Bibliografia

ANPA e ONR (2001) I rifiuti del comparto agro-alimentare. Studio di settore, **11**.  
 ARPA Lombardia e Regione Lombardia (2003) Emissioni in provincia di Cremona nel 2001. INEMAR, [www.ambiente.regione.lombardia.it/inemar/inemarhome](http://www.ambiente.regione.lombardia.it/inemar/inemarhome).

Berndes, G., Azar, C., Käberger, T. e Abrahamson, D. (2001) The feasibility of large-scale lignocellulose-based bioenergy production. *Biomass and Bioenergy*, **20**, 371-383.  
 Cappanera, P. (2000) *Discrete facility location and routing of obnoxious activities*. Tesi di dottorato, Università degli Studi di Milano, Milano.  
 Caruso, C., Colorni, A. e Paruccini, M. (1993) The regional urban solid waste management system: a modelling approach. *European Journal of Operational Research*, **70**, 16-30.  
 Cerullo, S. e Pellegrini, A. (2002) Stima delle quantità di residui legnosi prodotti in Italia. Pellet per l'energia, Verona (Italia) 23 marzo 2002.  
 Enea (2002) Riscaldamento dei grandi edifici con combustibili legnosi – informazioni tecniche di base. [www.bioheat.info](http://www.bioheat.info).  
 Fiorese, G. (2003) *Scenari di utilizzo delle biomasse a scopo energetico con una applicazione alla provincia di Cremona*. Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, Milano.  
 Fourer, R., Gay, D.M. e Kernighan, B.W. (2002) *AMPL: a modeling language for mathematical programming*. Duxbury Press and Brooks/Cole Publishing Company.  
 Freppaz, D., Minciardi, R., Robba, M., Rovatti, M., Sacile, R. e Taramasso, A. (2004) Optimizing forest biomass exploitation for energy supply at a regional level. *Biomass and Bioenergy*, **26**, 15-25.  
 Gaia, M., Scheidegger, K., Bini, R. e Bertuzzi, P. (2000) Small scale biomass powered CHP plants featuring thermal oil boiler and organic Rankine cycle turbogenerators. 1<sup>st</sup> World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry, Seville (Spain), 5-9 June 2000.  
 Istat (1996) Censimento Intermedio dell'Industria.  
 Istat (2000) V Censimento Generale dell'Agricoltura.  
 Klass, D. L. (1998) *Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals*. Academic Press, London.  
 McKendry, P. (2002a) Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology*, **83**, 37-46.  
 McKendry, P. (2002b) Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies. *Bioresource Technology*, **83**, 47-54.  
 Provincia di Cremona (2003) Piano Energetico Ambientale Provinciale.  
 Regione Lombardia (2002) Programma energetico regionale: indirizzi e obiettivi di politica energetica per la Lombardia.  
 Riva, G. (2003) Impianti della giusta taglia. *qualEnergia*.  
 Roman, U. e Turnbull, J. (1997) Integrated biomass energy systems and emissions of carbon dioxide. *Biomass and Bioenergy*, **13**, 333-343.  
 Rosch, C. e Kaltschmitt, M. (1999). Energy from biomass – do non technical barriers prevent an increased use?. *Biomass and Bioenergy*, **16**, 347-356.  
 Voivontas, D., Assimacopoulos, D. e Koukios, E.G. (2001) Assessment of biomass potential for power production: a GIS based method. *Biomass and Bioenergy*, **20**, 101-112.