

Utilizzo delle biomasse a scopo energetico: un'applicazione alla Provincia di Cremona

GIULIA FIORESE, MARINO GATTO, GIORGIO GUARISO

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

Tel.: 02 2399 9630 - E-mail: fiorese@elet.polimi.it

In questo articolo si propone una metodologia per svolgere un accurato bilancio energetico, emissivo ed economico al fine di valutare la convenienza dell'utilizzo delle biomasse come fonte rinnovabile di energia per un territorio a scala provinciale. Sono considerati i costi di raccolta, trasporto e acquisto di sottoprodotti agricoli, forestali e dell'industria del legno, i costi della *short rotation forestry*, nonché i costi di costruzione e gestione degli impianti (cogenerazione e/o caldaie domestiche). Dalla risoluzione del problema di ottimizzazione si ottengono la localizzazione degli impianti e la definizione dei relativi bacini di conferimento. La metodologia è applicata alla provincia di Cremona, una delle più importanti province agricole d'Italia. Tutte le analisi sono svolte a livello comunale. Date le caratteristiche della provincia, la biomassa risulta un'importante fonte di energia: l'utilizzo di biomassa è positivo in termini di energia prodotta, di emissioni di CO₂ evitate e di ritorno economico.

1. Introduzione

Le biomasse sono una importante fonte di energia alternativa ai combustibili fossili come indica anche l'obiettivo della Commissione Europea (2000): portare la percentuale di energia prodotta da biomasse dal 3% (pari a circa 45 milioni di tep) all'8,5% nel 2010 (circa 135 milioni di tep). Questa fonte rinnovabile è una risorsa locale e largamente disponibile che permette la produzione diffusa di energia a costi contenuti e con semplici impianti. La valorizzazione dell'utilizzo delle biomasse può inoltre innescare processi di miglioramento ambientale e socio-economico come la diversificazione delle colture, il ripristino di suoli abbandonati, la manutenzione dei boschi, la creazione di posti di lavoro (McKendry, 2002a). Infine, le biomasse contribuiscono a contrastare il riscaldamento climatico globale poiché il bilancio di produzione di gas serra, tipicamente di CO₂, si può considerare quasi neutro (Roman e Turnbull, 1997). Per ottenere trasformazioni energetiche con elevate efficienze e per un utilizzo sostenibile delle biomasse, è necessario però considerare impianti con tecnologie moderne e pianificare razionalmente l'approvvigionamento, ovvero la raccolta e il trasporto, della biomassa necessaria al loro funzionamento (Rosch e Kaltschmitt, 1999 e Combs, 2002). In questo studio, quindi, l'utilizzo energetico delle biomasse è affrontato considerando questi aspetti fondamentali.

Come descritto in McKendry (2002b), esistono diverse tecnologie di trasformazione delle biomasse, ad esempio la combustione e la digestione anaerobica per la produzione di biogas. In questo lavoro si considera solo l'estrazione di calore mediante combustione di biomasse ligno-cellulosiche. Il problema è comunque molto complesso: nella progettazione dell'utilizzo energetico delle biomasse, infatti, si deve tener conto non solo dell'energia netta ottenuta, ma anche dei costi economici, nonché delle emissioni prodotte e degli altri impatti (OECD, 1988). Per quanto riguarda l'inquinamento atmosferico non ci sono solo i vantaggi a livello globale legati alla riduzione delle emissioni di gas serra, ma anche alcuni svantaggi a livello locale dovuti, ad esempio, all'emissione di particolato.

Il problema di ottimizzazione che verrà qui 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 vogliono, infatti, ottimizzare 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 trascurate le emissioni di altri inquinanti sia aeriformi sia solidi.

Infine, caratteristica del presente lavoro è lo stretto legame con il 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 ad un'area agricola della Pianura Padana e, in particolare, alla provincia di Cremona.

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).

I sottoprodotti agricoli sono stimati dalle superfici destinate alle colture più diffuse nel territorio in esame (tipicamente granturco, soia, frumento e orzo per la provincia di Cremona), dalla loro resa e dalla frazione di sottoprodotto rispetto al prodotto (ANPA e ONR, 2001). Noto il numero di addetti del settore della lavorazione del legno e la produzione di residui per addetto (Cerullo e Pellegrini, 2002), si stimano i sottoprodotti di questo settore. I sottoprodotti forestali, infine, sono calcolati conoscendo la parte di superficie forestale pulita ogni anno e la biomassa raccolta (Enea, 2000). Da queste stime si sottrae la percentuale di biomassa già utilizzata per scopi diversi dalla produzione di energia e si ottiene la biomassa disponibile.

La biomassa da SRF dipende dalla superficie che si decide di destinare ad essa e dalle caratteristiche della coltura stessa. Le SRF contribuiscono allo sviluppo dell'utilizzo energetico perché producono biomassa dall'approvvigionamento sicuro e dalle caratteristiche chimico-fisiche omogenee. Si suppone si destinare a colture energetiche la superficie agricola non utilizzata e i *set aside*¹; 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 l'anno (Klass, 1998 e Berndes *et al.*, 2001).

2.2. Impianti di produzione di energia

Si considerano due tipi di impianto: impianti di cogenerazione situati in comuni di piccole/medie dimensioni, oppure caldaie domestiche che producono solamente l'energia termica necessaria ad un'abitazione di medie dimensioni (Riva, 2003).

L'impianto di cogenerazione è costituito da una caldaia ad acqua dalla potenzialità energetica di 22 GWh/a (data la potenza pari a 6 MWt e supponendo un funzionamento a pieno carico di 155 g/a), con rendimento medio dell'80%, e dal gruppo di cogenerazione. Quest'ultimo è composto da una caldaia ad olio diatermico da circa 51 GWh/a (data la potenza termica 7,2 MWt e supponendo un funzionamento a pieno carico di 300 g/a), con rendimento medio stagionale dell'80%, e da un ciclo ORC (*Organic Rankine Cycle*) con rendimento elettrico pari a 17,2% e rapporto elettrico/termico pari a 0,215 (1 kWt corrisponde a 0,215 kWe) (Gaia *et al.*, 2000 e Cozzini, 2000). Sotto questa ipotesi², si producono sia 8,77 GWh/a di energia elettrica sia calore sufficiente ad alimentare una rete di teleriscaldamento di 15 km circa. In questo modo funzionano con successo gli impianti di Tirano (Brè, 2002) e di Lienz, in Austria (Stadtwaerme Lienz, 2002).

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.

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 di un impianto di cogenerazione per un anno. Per il funzionamento di una caldaia servono, invece, circa 39 ton ss/anno, supponendo che essa lavori 1.500 h/anno a piena potenza.

2.3. Alternative di utilizzo delle biomasse

Le seguenti alternative, schematizzate in figura 1, saranno quindi studiate e confrontate:

- Alternativa I: i sottoprodotti alimentano gli impianti di cogenerazione e non si coltiva biomassa da 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.

Si osserva inoltre che, se la biomassa disponibile nel territorio studiato permette la costruzione di più impianti di cogenerazione, un 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 dell'utilizzo dei sottoprodotti da quelle della biomassa da SRF per comprendere se e quanto sia conveniente impiantare apposite colture energetiche.

3. Formalizzazione del problema decisionale

Nello studio si vuole mettere in luce l'opportunità di utilizzare biomassa a scopo energetico in un territorio a scala provinciale, valutando tre aspetti (energetico, emissivo ed economico) parimenti importanti per questa fonte rinnovabile di energia. Le seguenti ipotesi adottate consentono una semplificazione della formulazione matematica, ma traducono anche alcune situazioni che si verificano in pratica:

- Ogni alternativa prevede l'utilizzo di tutta la biomassa disponibile;
- I sottoprodotti agricoli, forestali e del legno possono alimentare sia le centrali di cogenerazione sia le caldaie, mentre la biomassa proveniente da SRF, poiché più pregiata e costosa da ottenere, alimenta solo le centrali di cogenerazione;
- Le caldaie domestiche utilizzano solo i sottoprodotti raccolti nell'ambito dello stesso comune;
- La biomassa appartenente ad un comune si considera concentrata nel comune stesso e non distribuita sul suo territorio, di conseguenza i costi di trasporto della biomassa all'interno del comune in cui è raccolta sono trascurati;
- 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

¹ I *set aside* sono una parte, pari al 10%, dei terreni investiti a seminativi che la Politica Agraria Comunitaria impone di non coltivare.

² La potenzialità energetica dipende dalle ore effettive di funzionamento e dalle condizioni ambientali; ad esempio, la produzione di energia elettrica di Tirano del 2003 è stata pari a 7,5 GWh.

tutto l'orizzonte temporale di vita degli impianti di produzione;

- L'orizzonte temporale è di 21 anni: uno per la costruzione dell'impianto e 20 per l'utilizzo delle biomasse e la coltivazione della SRF.

3.1. Variabili di decisione

Per definire l'impiego ottimale delle biomasse, detta a_{is} la quantità di biomassa di tipo s ($s=1$ per i sottoprodotti e $s=2$ per la SRF) presente nel comune i , si assumeranno le seguenti variabili di decisione:

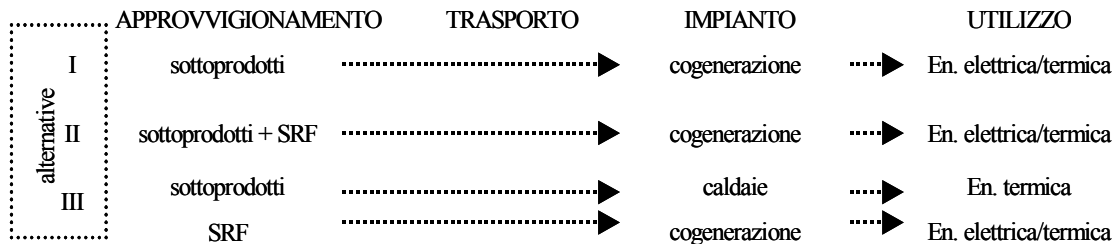


Figura 1: Le tre alternative di utilizzo della biomassa si distinguono per la tipologia e la quantità di biomassa in ingresso, per l'impianto considerato e per la produzione di energia termica e/o elettrica; il trasporto della biomassa dal luogo di raccolta a quello di utilizzo è considerato in tutte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

- La presenza di un impianto nel territorio del comune j è definita dalla variabile binaria y_j . Se l'impianto di cogenerazione è attivo in j allora $y_j = 1$, altrimenti $y_j = 0$. Se per ragioni vincolistiche o di qualsiasi altro tipo non tutti i comuni possono essere sede di un impianto, le rispettive variabili saranno poste a 0.

- La presenza di caldaie domestiche nel comune k , come per l'impianto di cogenerazione, è definita dalla variabile binaria z_k . Quindi $z_k = 1$ significa che tutte le possibili caldaie sono attive nel comune k e $z_k = 0$ che esse non sono utilizzate. Per quanto si è detto quindi, le alternative I e II avranno $z_k = 0$ per ogni k , mentre l'alternativa III avrà $z_k = 1$ per ogni k . Poiché abbiamo supposto che le caldaie utilizzino solo i sottoprodotti raccolti nell'ambito del comune, il loro numero sarà calcolabile a priori sulla base della disponibilità di biomassa in quel comune a_{is} , con $s = 1$. Più precisamente il numero n_k di caldaie è valutabile a priori come rapporto tra la disponibilità locale di sottoprodotti nel comune k e il consumo en_{cald} di una caldaia, aumentato di uno e arrotondato all'intero.

3.2. Funzioni obiettivo

Ad ogni passo della filiera energetica (figura 1), è associato un costo energetico (MJ), emissivo (ton CO₂) ed economico (€). I costi di tutti gli impianti di cogenerazione e di tutte le caldaie sono sommati per comporre ciascuno dei tre obiettivi.

- L'obiettivo energetico da massimizzare è rappresentato dalla quantità di energia che si può estrarre dal sistema: all'energia prodotta nell'impianto di cogenerazione (EN_{out}) si sottrae l'energia utilizzata per il trasporto (EN_{tr}) e per l'eventuale crescita delle piantagioni arboree di SRF (EN_{SRF}). A questi termini va poi aggiunta l'energia prodotta dalle caldaie per l'alternativa III.

- La frazione x_{ijs} della biomassa di tipo s prodotta in ciascun comune i che è conferita all'impianto di cogenerazione posto nel comune j . Naturalmente è $0 \leq x_{ijs} \leq 1$ e, in particolare, $x_{ijs} = 0$ per tutti i comuni che non fanno parte del bacino di raccolta dell'impianto del j -esimo comune. Non si considera la possibilità di costruire più di un impianto in un certo comune. Inoltre, nell'alternativa III, si ha $x_{ij1} = 0$, in quanto tutta la biomassa dei sottoprodotti viene conferita alle caldaie domestiche.

$$J_{EN} = \sum_{j=1}^N (EN_{out,j} - EN_{tr,j} - EN_{SRF,j}) \cdot y_j + \sum_{k=1}^N n_k \cdot en_{cald} \cdot z_k$$

dove N è il numero di comuni del territorio in esame.

- L'obiettivo ambientale qui considerato è la riduzione dei gas ad effetto serra: si massimizza, quindi, la quantità di emissioni di CO₂ evitate rispetto all'utilizzo di gas naturale, il meno inquinante tra i combustibili fossili. Per valutare le emissioni evitate, alle emissioni di CO₂ che sarebbero state prodotte utilizzando gas naturale per ottenere la stessa quantità e tipologia (elettrica o termica) di energia (EM_{gas}), si sottraggono le emissioni dovute al trasporto della biomassa (EM_{tr}) e alla eventuale produzione di SRF (EM_{SRF}). Conformemente alle ipotesi fatte, per le caldaie domestiche si valuta invece solo l'emissione (em_{cald}) che avrebbe una caldaia di uguale potenza alimentata a gas. Poiché si assume che il bilancio complessivo di CO₂ delle biomasse (differenza tra la CO₂ 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 compaiono nell'espressione dell'obiettivo emissivo.

$$J_{EM} = \sum_{j=1}^N (EM_{gas,j} - EM_{tr,j} - EM_{SRF,j}) \cdot y_j + \sum_{k=1}^N n_k \cdot em_{cald} \cdot z_k$$

L'obiettivo economico è calcolato con il metodo dell'analisi degli investimenti:

$$J_{EC} = \sum_{j=1}^N NPV_j \cdot y_j + \sum_{k=1}^N n_k \cdot NPV_{cald} \cdot z_k$$

Il valore attuale netto NPV di un investimento è dato dall'investimento iniziale I_0 e dai flussi di cassa F_t in ciascun anno t , riportati all'anno zero, cioè l'anno di

inizio funzionamento degli impianti, con il tasso di interesse r secondo la nota formula:

$$NPV = \sum_{t=0}^{19} \frac{F_t}{(1+r)^t} - \frac{I_0}{(1+r)^0}$$

dove si suppone che la messa in opera delle caldaie e degli impianti di cogenerazione abbia la durata di un anno.

Il flusso di cassa all'anno t è dato da:

$$F_t = EC_{ricavi,t} - (EC_{acq} + EC_{ceneri} + EC_{gest} + EC_{man} + EC_{tr})$$

dove EC_{acq} indica il costo di acquisto delle biomasse,

EC_{gest} il costo di gestione e EC_{man} il costo di manutenzione dell'impianto, EC_{ceneri} il costo dello smaltimento delle ceneri della combustione, EC_{tr} il costo di trasporto e, infine, $EC_{ricavi,t}$ i ricavi ottenuti dalla vendita dell'energia prodotta. Si osservi che l'unico termine che varia nel tempo è $EC_{ricavi,t}$ mentre gli altri, per le ipotesi fatte, restano costanti negli anni.

Nel successivo paragrafo sono descritte le modalità di calcolo dei termini che compongono i tre obiettivi, mentre le tabelle 1 e 2 riportano una breve descrizione dei parametri utilizzati; per una descrizione più approfondita di tutti i termini si rimanda a Fiorese (2003).

Tabella 1: Parametri che descrivono il territorio considerato e la biomassa presente.

	DIMENSIONE	DESCRIZIONE
d_{ij}	km	Distanza del comune i dal comune j
a_{is}	ton tal quale	Quantità di biomassa presente nel comune i per tipo s ($s=1$ sottoprodotti, $s=2$ SRF)
u_s	$0 < \text{numero} < 1$	Frazione di umidità della biomassa di tipo s
pci_s	MJ/ton ss	Potere calorifico inferiore della biomassa di tipo s
cen_s	$0 < \text{numero} < 1$	Frazione di ceneri per tipo s di biomassa

Tabella 2: Parametri che compongono gli obiettivi energetico, emissivo ed economico.

	DIMENSIONE	DESCRIZIONE
$c_{en, tr}$	MJ/km/ton tq	Costo energetico di trasporto
$c_{em, tr}$	Kg CO ₂ /km/ton tq	Costo emissivo di trasporto
$c_{ec, tr}$	€/km/ton tq	Costo economico di trasporto
$c_{en, srf}$	MJ/ton ss	Costo energetico della SRF
$c_{em, srf}$	kg CO ₂ /ton ss	Costo emissivo della SRF
c_s	€/ton ss	Costo di acquisto per tipo s di biomassa
$c_{ec, srf}$	€/ton ss	Costo economico della SRF
c_{cen}	€/ton cenere	Costo smaltimento ceneri in discarica
en_{cald}	MJ	Energia prodotta da una caldaia domestica
em_{cald}	kg CO ₂	Emissioni di CO ₂ di una caldaia domestica alimentata a gas
ec_{cald}	€	Costo di una caldaia domestica
η, η_{el}	$0 < \text{numero} < 1$	Rendimento e rendimento elettrico
$\eta_{gas-el}, \eta_{gas-term}$	$0 < \text{numero} < 1$	Rendimento impianto, elettrico e termico, alimentato a gas naturale
fe_{gas}	kg CO ₂ /MJ	Fattore emissivo di un impianto alimentato a gas naturale
p_{term}, p_{el}, p_{cv}	€/kWh	Prezzi di vendita dell'energia termica, elettrica e dei certificati verdi

3.3. Calcolo dei costi e benefici legati all'utilizzo energetico delle biomasse

Esaminiamo ora più in dettaglio i termini che entrano nella formulazione degli obiettivi.

Energia prodotta

L'energia prodotta dall'impianto j attivo costituisce il ricavo energetico:

$$EN_{out,j} = \eta \cdot \sum_i \sum_s a_{is} \cdot (1 - u_s) \cdot pci_s \cdot x_{ijs}$$

In particolare, per gli impianti di cogenerazione, si distingue la produzione elettrica da quella termica:

$$EN_{out-el,j} = \eta_{el} \cdot \sum_i \sum_s a_{is} \cdot (1 - u_s) \cdot pci_s \cdot x_{ijs}$$

$$EN_{out-term,j} = \frac{EN_{out-el,j}}{\alpha}$$

dove α è il rapporto tra la produzione elettrica e la produzione termica, mentre gli altri termini sono definiti

nelle tabelle 1 e 2.

Emissioni evitate di CO₂

Data l'energia prodotta $EN_{out,j}$ e ricordando l'ipotesi che la crescita e la successiva combustione di biomasse non producano CO₂, le emissioni evitate sono calcolate supponendo di produrre la stessa energia con gas naturale, che può essere considerato in linea di massima il combustibile fossile più pulito, anche comprendendo le emissioni legate all'estrazione e al trasporto (Lelieveld *et al.*, 2005):

$$EM_{gas,j} = \frac{fe_{gas}}{\eta_{gas}} \cdot EN_{out,j}$$

Nel caso di impianti di cogenerazione si distinguono le emissioni evitate nella produzione di energia elettrica e termica, poiché nei due casi i rendimenti sono differenti:

$$EM_{gas,j} = \frac{fe_{gas}}{\eta_{gas-el}} \cdot EN_{out-el,j} + \frac{fe_{gas}}{\eta_{gas-term}} \cdot EN_{out-term,j}$$

Costo di trasporto della biomassa

Il costo di trasporto della biomassa dal luogo di produzione all'impianto situato nel j -esimo comune dipende dal percorso seguito e dalla biomassa trasportata, secondo un coefficiente diverso per il costo unitario energetico, emissivo o economico.

L'energia necessaria, ad esempio, per il viaggio di andata e di ritorno di un camion completamente carico dal comune i all'impianto nel comune j è pari a:

$$EN_{tr,j} = 2 \cdot c_{en,tr} \cdot \sum_i \sum_s a_{is} \cdot d_{ij} \cdot x_{ijs}$$

Le emissioni di CO₂ prodotte dal trasporto, o il costo del trasporto, si calcolano nello stesso modo utilizzando però i relativi coefficienti $c_{em,tr}$ e $c_{ec,tr}$.

Approvvigionamento della biomassa

Il costo da sostenere per l'acquisto delle biomasse $EC_{acq,j}$ è una delle variabili che più influiscono sul bilancio economico ed è dato da:

$$EC_{acq,j} = \sum_i \sum_s c_s \cdot a_{is} \cdot x_{ijs}$$

Il costo dipende, infatti, dalla diffusione dell'utilizzo energetico delle biomasse, dalla concorrenza con altre forme di utilizzo e dalla semplicità o difficoltà della raccolta. Per quanto riguarda la SRF, oltre ai costi economici (compresi in $EC_{acq,j}$), ci sono i costi energetico $EN_{srf,j}$ ed emissivo $EM_{srf,j}$. Questi costi sono legati soprattutto ai macchinari necessari per la gestione delle piantagioni arboree.

Utilizzo e vendita dell'energia prodotta

L'energia prodotta in ogni impianto di cogenerazione si suppone venduta alla Rete di Trasmissione Nazionale, nel caso di energia elettrica, o alla rete di teleriscaldamento, nel caso di energia termica. Si considera, per semplicità, un valore costante del prezzo di vendita dell'energia elettrica e termica lungo tutto l'orizzonte; nella realtà le tariffe, soprattutto quelle elettriche, variano non solo di anno in anno, ma anche nell'arco di una giornata. I certificati verdi, che sono emessi solo per i primi 8 anni di funzionamento di una centrale, sono pure considerati costanti. Complessivamente, il ricavo dalla vendita dell'energia prodotta durante tutto l'arco di vita di un impianto è dato da (dove il fattore 1/3,6 converte in KWh in MJ):

$$EC_{ricavi,tj} = \frac{1}{3,6} \cdot [p_{term} \cdot EN_{out-term,j} + (p_{el} + p_{cv,t}) \cdot EN_{out-el,j}]$$

Valore attuale netto per gli impianti di cogenerazione

Per calcolare il valore attuale netto dell'investimento si devono considerare, oltre ai termini economici precedentemente descritti, anche tutti i termini legati alla gestione e alla manutenzione dell'impianto, nonché l'investimento iniziale.

L'investimento iniziale $I_{0,j}$ comprende, per gli

impianti di cogenerazione, la rete di teleriscaldamento. I costi da valutare, insieme al costo di approvvigionamento e di trasporto, sono (Duvia e Gaia, 2002):

- il costo del personale:

$$EC_{gest,j} = add \cdot stip \cdot y_j$$

dove $stip$ è lo stipendio di ogni addetto add ;

- il costo dello smaltimento delle ceneri in discarica:

$$EC_{ceneri,j} = \sum_i \sum_s c_{cen} \cdot (cen_s \cdot a_{is}) \cdot x_{ijs}$$

- la manutenzione, proporzionale, secondo il fattore m , all'investimento iniziale:

$$EC_{man,j} = m \cdot I_{0,j}$$

Poiché si considerano tecnologie all'avanguardia e poco diffuse, la stima dei costi è piuttosto complessa. Ove possibile, si è quindi fatto riferimento a progetti reali, in particolare la centrale di Tirano.

Valore attuale netto per le caldaie domestiche

Nel caso delle caldaie domestiche, per calcolare il valore attuale netto si considerano l'investimento iniziale, i costi di manutenzione, i costi di acquisto dei sottoprodotti e dello smaltimento delle ceneri, mentre non ci sono costi per gli addetti alla gestione della caldaia. Il costo di trasporto è, per le ipotesi fatte, nullo. Infine, si considerano ricavi i costi evitati per l'acquisto dell'energia termica.

3.4. Vincoli

Come già anticipato, non è detto che tutti i comuni considerati possano ospitare una centrale: è quindi possibile imporre un vincolo sui valori di y_j . Per gli impianti di cogenerazione, ad esempio, è ragionevole porre $y_j = 0$ per tutti i comuni con meno di 3.500 abitanti: solo un numero di abitanti superiore a questa soglia giustifica la costruzione di una rete di teleriscaldamento (Cozzini, 2000).

Per le caldaie domestiche, quindi solo per l'alternativa III, $z_k = 1$ per ogni k ; mentre $z_k \equiv 0$ nelle altre due alternative, dove i sottoprodotti alimentano solo impianti di cogenerazione.

Si impongono inoltre i seguenti vincoli:

- Gli impianti di cogenerazione hanno la stessa taglia e quindi la stessa capacità di combustione. Tuttavia si suppone che ci sia una certa elasticità nell'utilizzo dell'impianto. La biomassa conferita ad ogni impianto di cogenerazione non è quindi vincolata ad uguagliare esattamente la capacità, ma può essere compresa in un intorno della capacità nominale dell'impianto $k_{impianto}$ (vincolo capacitivo):

$$(1-\xi) \cdot k_{impianto} \leq \sum_k \sum_s a_{is} \cdot x_{ijs} \cdot (1-u_s) \leq (1+\xi) \cdot k_{impianto} \quad \forall j$$

dove ξ è la percentuale di sotto o sovrautilizzo.

- Poiché si intende sfruttare tutta la biomassa disponibile in un certo scenario, si pone un vincolo sul numero di impianti di cogenerazione dato da $\sum y_j = \text{int}(M+1)$, dove M è il rapporto tra tutta la biomassa disponibile per alimentare gli impianti e il consumo del singolo impianto. Il termine $\text{int}(M+1)$ indica la parte

intera di $M+1$; si noti che per sfruttare completamente la biomassa, può essere necessario che uno o più impianti non lavorino alla loro massima potenzialità.

- Un comune può conferire la propria biomassa solo in un comune dove la centrale di cogenerazione è attivata:

$$x_{ijs} \leq y_j \quad \forall s, j.$$

3.5. Risoluzione

La risoluzione del problema di ottimizzazione ($\max J_{EN}$, $\max J_{EM}$, $\max J_{EC}$), che è di tipo lineare e misto (variabili reali e variabili binarie) e ha alcune centinaia di variabili di decisione, 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. Risultati per 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 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, e in gran parte utilizzate per i pioppeti (Istat, 2000). La lavorazione del legno è diffusa nella parte meridionale della provincia, dove è presente un distretto della lavorazione del legno. In tabella 3 sono riportate le quantità di sottoprodotti e di SRF, stimate secondo il metodo esposto nel par. 2.1. I dati necessari relativi alla provincia di Cremona e ai suoi comuni, sono reperibili sui censimenti Istat dell'agricoltura (2000) e dell'industria (1996).

Tabella 3: Stima della quantità di biomasse utilizzabili nella provincia di Cremona.

Sottoprodotti	quantità utilizzabile ton ss/anno	%	SRF	quantità utilizzabile ton ss/anno
Agricolo	124.046	95,7	SRF	92.158
Industriale	9.453	3,9		
Forestale	736	0,4		
Totale	134.235	100		

I valori ottimi delle tre funzioni obiettivo per la provincia di Cremona sono riportati in tabella 4; si osserva che sono largamente positivi e si può quindi affermare che l'utilizzo a scopo energetico delle biomasse è conveniente sotto tutti e tre gli aspetti analizzati. L'utilizzo energetico delle biomasse nella Provincia 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.

Considerando come riferimento i consumi del 1996 di energia elettrica, pari a 2.047 GWh (Regione Lombardia, 2002), le biomasse possono soddisfare dal 3 al 5% del fabbisogno della Provincia. Nel 1996, inoltre, il consumo di combustibili fossili interno alla provincia, senza considerare l'energia elettrica importata, è stato pari a 789 ktep: le biomasse possono sostituire dal 4,7 all'8,7% dei combustibili fossili utilizzati. L'utilizzo delle biomasse a scopo energetico permette inoltre di ridurre le emissioni di CO₂ dal 5 all'8,4%, rispetto alle emissioni stimate, per il 2001, pari a 2.538 kton (ARPA Lombardia e Regione Lombardia, 2003). Si ricorda che 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. Per quanto riguarda la valutazione economica, il tempo di ritorno dell'investimento è compreso tra i due anni e mezzo e i quattro anni.

La SRF contribuisce positivamente: l'alternativa II ha un valore ottimo dell'obiettivo energetico superiore del 65% rispetto a quello dell'alternativa I. Il valore ottimo dell'obiettivo economico migliora però solo del 21% perché la SRF ha alte rese, ma è anche più costosa dei sottoprodotti. 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 da 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 CO₂ (la produzione di energia elettrica con gas naturale emette più CO₂ 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 praticamente 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.

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.

I bacini di conferimento individuati servono soprattutto come punto di partenza per la definizione di una programmazione più dettagliata dell'utilizzo della biomassa. Là dove ci sono bacini costituiti da comuni

non confinanti, ad esempio aggregando i bacini 1 e 6 al bacino 4 (Cremona) si possono prevedere impianti di dimensioni maggiori, più utili per servire una città qual è il comune di Cremona. Analogamente, si possono progettare impianti di dimensioni inferiori per quei bacini che sono particolarmente frammentati.

Tabella 4: Valori ottimi degli obiettivi energetico, emissivo ed economico per le tre alternative; confronto con il consumo di energia elettrica e di combustibili fossili del 1996 e con le emissioni di CO₂ del 2001.

	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III
n° impianti di cogenerazione	7	12	5
n° caldaie domestiche	0	0	3.630
Obiettivo Energetico (10 ⁶ MJ)	1.557	2.581	2.869
% energia elettrica sostituita da biomasse (1996, consumo di 2.047 GWh)	3%	5%	3%
% tep sostituita da biomasse (1996, consumo di 789 ktep)	4,7 %	7,8 %	8,7 %
Obiettivo Emissivo (10 ³ ton CO ₂)	127	214	214
% emissioni evitate con biomasse (2001, emissione di 2.538 kton CO ₂)	5,0 %	8,4 %	8,4 %
Obiettivo Economico (10 ⁶ €)	297	361	462
Tempo di Ritorno dell'investimento	2,4 anni	3,3 anni	impianti cogen. 2,4 anni caldaie domest. 3,8 anni

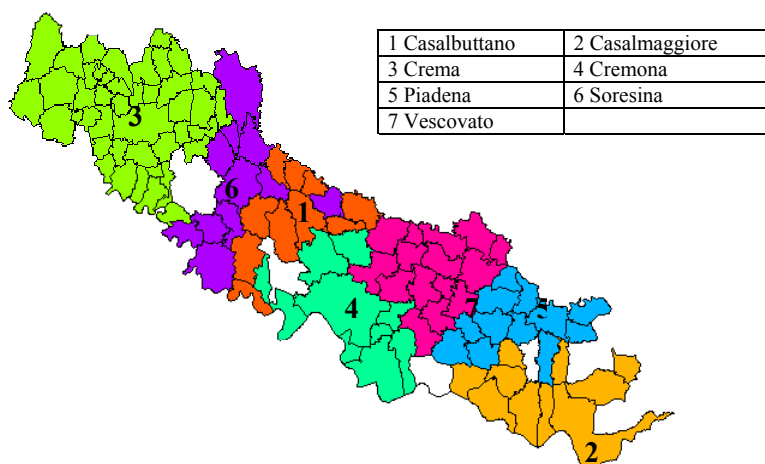


Figura 2: Localizzazione impianti e bacini di conferimento, caso I – obiettivo energetico.

5. Conclusioni

Il lavoro qui presentato propone una metodologia per la pianificazione dell'utilizzo delle biomasse considerando produzione, raccolta, trasporto e due differenti tipi di impianti di produzione dell'energia. La metodologia viene applicata alla provincia di Cremona ottenendo risultati significativi. Il modello proposto permette 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 (energetico, emissivo e economico).

L'approccio proposto permette anche di stimare la quantità di biomassa disponibile sul territorio in analisi.

Nel caso di Cremona, provincia a vocazione agricola, prevalgono i sottoprodotti dell'agricoltura, ma il metodo presentato ben si adatta a realtà diverse: territori montani, ad esempio, in cui l'agricoltura è in secondo piano rispetto alla presenza di aree boschive. È possibile, inoltre, valutare se destinare a SRF una parte della superficie agraria è conveniente secondo le tre funzioni obiettivo formulate.

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 CO₂ e di avere ritorni dall'investimento economico iniziale. Aver ottenuto risultati largamente positivi significa che,

anche includendo altri aspetti qui trascurati, si dovrebbero ottenere valori probabilmente inferiori delle funzioni obiettivo, ma comunque positivi e tali da permettere una valutazione complessivamente favorevole all'utilizzo energetico delle biomasse. Bisogna osservare che l'emissione, e quindi la vendita, di certificati verdi contribuisce in larga misura al risultato positivo dell'obiettivo economico. I certificati verdi, d'altra parte, 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 questo si è ritenuto opportuno tenerne conto. 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_x, e quelle solide, tenendo anche conto che esistono metodi per il recupero e il riutilizzo delle ceneri. Il confronto tra diverse tecnologie di trasformazione può essere allargato fino a comprendere impianti di taglia maggiore, come centrali da 10 MWe, oppure impianti che producono bio-combustibili liquidi o gassosi. 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.

Manoscritto ricevuto il 30 settembre 2004

BIBLIOGRAFIA

- [1] ANPA e ONR (2001), I rifiuti del comparto agro-alimentare, Studio di settore, n. 11.
- [2] ARPA Lombardia e Regione Lombardia (2003), Emissioni in provincia di Cremona nel 2001 – database INEMAR, www.ambiente.regione.lombardia.it/inemar/inemarhome.
- [3] Berndes G., Azar C., Kåberger T., Abrahamson D. (2001), The feasibility of large-scale lignocellulose-based bioenergy production, *Biomass and Bioenergy* **20**:371-383.
- [4] Brè A. (2002), Relazione tecnica per l'ampliamento della centrale di Tirano con installazione di un impianto di cogenerazione elettrica da 1.100 kW, Comune di Tirano e Provincia di Sondrio.
- [5] Capanera P. (2000), Discrete facility location and routing of obnoxious activities, tesi di dottorato, XII ciclo, Università degli Studi di Milano.
- [6] Caruso C., Colomi A., Paruccini M. (1993), The regional urban solid waste management system: a modelling approach, *European Journal of Operational Research* **70**:16-30.
- [7] Cerullo S., Pellegrini A. (2002), Stima delle quantità di residui legnosi prodotti in Italia, Atti del Convegno “Pellet per l'energia”, Verona 23 marzo 2002.
- [8] Combs J. (2002), Biomass energy: an industry waiting for growth, *Renewable Energy World*, Review issue 2002-03.
- [9] Commissione Europea (2000), Energia per il futuro: le fonti energetiche rinnovabili, Libro Bianco per una strategia e un piano di azione della Comunità, www.europa.eu.int.
- [10] Cozzini M. (2000), L'utilizzo di biomasse legnose per sistemi di teleriscaldamento e cogenerazione., Foglio di collegamento – settembre 2000, AIRU-Associazione Italiana Riscaldamento Urbano.
- [11] Duvia A., Gaia M. (2002), ORC plants for power production from biomass from 0,4 to 1,5 MWe: Technology, efficiency, practical experiences and economy, 7th Holzenergie Synopsium, ETH Zurich, 18 October 2002.
- [12] Enea (2000), Piano Energetico della Regione Lombardia, Rapporto conclusivo relativo alla biomassa.
- [13] Enea (2002), Riscaldamento dei grandi edifici con combustibili legnosi – informazioni tecniche di base, www.bioheat.it.
- [14] Fiorese G. (2003), Scenari di utilizzo delle biomasse a scopo energetico con una applicazione alla provincia di Cremona, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano.
- [15] Fourer R., Gay D.M., Kernighan B.W. (2002), AMPL: a modeling language for mathematical programming, Duxbury Press and Brooks/Cole Publishing Company.
- [16] Freppaz D., Minciardi R., Robba M., Rovatti M., Sacile R., Taramasso A. (2004), Optimizing forest biomass exploitation for energy supply at a regional level, *Biomass and Bioenergy* **26**:15-25.
- [17] Gaia M., Scheidegger K., Bini R., Bertuzzi P. (2000), Small scale biomass powered CHP plants featuring thermal oil boiler and organic Rankine cycle turbogenerators, 1st World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry, Seville (Spain), 5-9 June 2000.
- [18] Istat (1996), Censimento Intermedio dell'Industria.
- [19] Istat (2000a), V Censimento Generale dell'Agricoltura.
- [20] Klass D. L. (1998), Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals, Academic Press.
- [21] Lelieveld J., Lechtenböhmer S., Assonov S.S., Brenninkmeijer C.A.M., Dienst C., Fishedick M., Hanke T. (2005), Low methane leakage from gas pipelines, *Nature* **434**:841-842.
- [22] McKendry P. (2002a), Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass, *Bioresource Technology* **83**:37-46.
- [23] McKendry P. (2002b), Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies, *Bioresource Technology* **83**:47-54.
- [24] Provincia di Cremona (2003), Piano Energetico Ambientale Provinciale.
- [25] Regione Lombardia (2002), Programma energetico regionale: indirizzi e obiettivi di politica energetica per la Lombardia.
- [26] Riva G. (2003), Impianti della giusta taglia, *qualEnergia*.
- [27] Roman U., Turnbull J. (1997), Integrated biomass energy systems and emissions of carbon dioxide, *Biomass and Bioenergy* **13**:333-343.
- [28] Rosch C., Kaltschmitt M. (1999), Energy from biomass – do non technical barriers prevent an increased use?, *Biomass and Bioenergy* **16**:347-356.
- [29] Sims R., Gigler J. (2002), The brilliance of bioenergy, small projects using biomass, *Renewable Energy World* **1**.
- [30] Stadtwaerme Lienz (2001), Heat and electricity for the city of Lienz. www.stadtwaerme-lienz.at.
- [31] Voivontas D., Assimacopoulos, D., Koukios, E.G. (2001), Assessment of biomass potential for power production: a GIS based method, *Biomass and Bioenergy* **20**:101-112.