

Energia da biomassa

Autor(en): **Romer, Arturo**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Archi : rivista svizzera di architettura, ingegneria e urbanistica =
Swiss review of architecture, engineering and urban planning**

Band (Jahr): - **(2002)**

Heft 4

PDF erstellt am: **30.06.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-132451>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

1. Introduzione

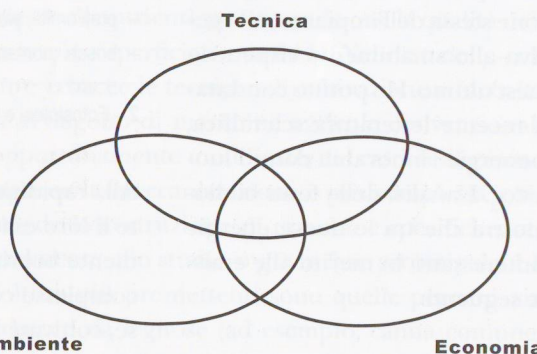
A lungo termine le energie rinnovabili avranno senza dubbio un'importanza non indifferente nell'ambito dell'approvvigionamento energetico mondiale. A breve e medio termine la loro importanza e il loro contributo effettivo saranno però nettamente inferiori a quanto l'opinione pubblica in generale si attenda. Non si dimentichi che un impianto energetico degno del termine di «Sviluppo sostenibile» deve rispettare tre criteri fondamentali (fig. 1):

1. l'impianto deve essere rispettoso dell'ambiente (aspetto ambientale);
2. l'impianto deve essere sicuro e affidabile (aspetto tecnico);
3. l'impianto deve essere interessante anche dal punto di vista della redditività (aspetto economico).

È pure importante notare che non tutte le energie rinnovabili sono equivalenti tra di loro. Anzi, ci sono grandi differenze tra una fonte e l'altra. Perciò è necessario innanzitutto suddividere le fonti rinnovabili in due categorie ben definite:

a) le energie rinnovabili tradizionali:

il rappresentante per eccellenza di questa categoria è la forza idroelettrica. Questa fonte è chiaramente la più interessante in assoluto. Inoltre offre ancora un immenso potenziale di sfruttamento in molte parti del mondo, in particolare nei paesi in via di sviluppo. Dal punto di vista delle emissioni di CO₂ l'energia idroelettrica è la più interessante. Si tratta viceversa di una tecnica di produzione di elettricità che richiede alti investimenti, con tempi di ammortamento che vanno da 40 fino a 80 anni a seconda delle componenti considerate. Attualmente si producono a livello mondiale ca. 2'100 mia di kWh di elettricità con la forza dell'acqua. Ciò corrisponde a un consumo equivalente di 700 mio tonnellate di carbone. In termine di CO₂ si può quindi affermare quanto segue: la



1 - Gli aspetti fondamentali di una moderna politica energetica

medesima energia elettrica prodotta con il carbone implicherebbe un'emissione di 2,562 mia di tonnellate di CO₂.

b) le nuove energie rinnovabili:

di questo gruppo fanno parte l'energia solare termica, l'energia solare fotovoltaica, la geotermica, l'energia eolica, la biomassa con varie future applicazioni di rilievo, l'energia delle maree e microimpianti idroelettrici.

Secondo le previsioni del Consiglio mondiale dell'energia il contributo delle nuove energie rinnovabili coprirà a seconda dello scenario («minimo», «massimo») tra il 3% e il 12% della domanda di energia primaria mondiale nel 2020. La tabella 1 rappresenta i dettagli di questa previsione.

	Contributo minimo nel 2020		Contributo massimo nel 2020	
	mio tec	%	mio tec	%
Biomassa	349	45	805	42
Energia solare	156	20	509	26
Vento	122	15	308	16
Geotermia	57	7	131	7
Maree	20	3	77	4
Totale	773(*)	99(*)	1929(*)	100

Nel 1990 il contributo globale delle «nuove» energie rinnovabili è stato di 470 mio tec (1,9%) - (*) Errori di arrotondamento

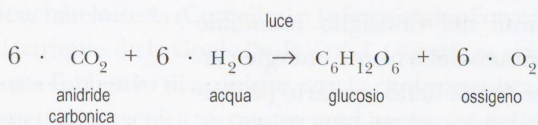
Tab. 1 - Contributo minimo e massimo delle «nuove» energie rinnovabili nel 2020 (Fonte: WEC, 1993)

Mi sta molto a cuore evidenziare e correggere alcuni punti ed errori frequenti che riguardano le nuove energie rinnovabili. L'opinione pubblica è ormai convinta che queste energie siano le più rispettose dell'ambiente. Pochi lavori e rapporti scientifici hanno finora affrontato seriamente la problematica delle emissioni di CO₂ di queste fonti energetiche. Desidero precisare che, se parlo di emissioni di CO₂, intendo le emissioni dell'intera catena energetica che si estende dalla preparazione delle materie prime per la costruzione degli impianti alla costruzione stessa dell'impianto, alla gestione e in definitiva allo smaltimento rispettoso dell'ambiente di quest'ultimo. Ho potuto constatare, consultando la recente letteratura scientifica, che tutte le nuove energie rinnovabili danno luogo ad emissioni di CO₂. L'analisi delle fonti bibliografiche citate dimostra che tra le nuove energie rinnovabili le più interessanti in merito alle emissioni di CO₂ sono le seguenti:

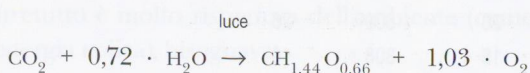
- la biomassa (che è neutra);
- le microcentrali idroelettriche;
- le centrali eoliche (che richiedono comunque venti di una data intensità, almeno 5 m/s, e un sufficiente numero di ore di lavoro, almeno 2000 h all'anno).

2. Considerazioni generali

In senso lato l'espressione biomassa definisce tutto il mondo vegetale che ci circonda. Durante la loro crescita le piante assorbono anidride carbonica dall'aria e la trasformano grazie all'energia solare attraverso la fotosintesi in glucosio:



Ogni mole di glucosio possiede un contenuto energetico di 2872 kJ. Questa energia viene «immagazzinata» nelle radici, nei tronchi, nei rami e nelle foglie. La reazione stechiometrica per la produzione della legnocollosa attraverso la fotosintesi ha la forma seguente:

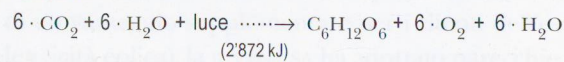


In passato si intendeva sotto il termine «biomassa» la legna da ardere, i residui agricoli e forestali come pure gli scarti di legno industriali.

Oggi nel termine «biomassa» si includono pure le piantagioni vegetali appositamente coltivate a scopi energetici.

Con queste culture energetiche, l'interesse si estende a un ambito che va dal bosco e i suoi residui a tutte le specie vegetali che producono sostanze cellulose: zuccherine, amidacee, olii vegetali, terpeni e idrocarburi.

Reazione:



Rendimento:

- agricoltura intensiva	1	-	2,5%
- prati umidi, piante	0,3	-	1%
- boschi montani, prati	0,05	-	0,3%

2 - Fotosintesi e biomassa

Alla rapidità con cui le risorse fossili sono utilizzate il loro esaurimento è previsto in tempi relativamente brevi, diversi per tipo risorsa, ma nel loro complesso contenuti in circa 150 anni. Le biomasse, coltivate in maniera ciclica, costituiscono invece una risorsa rinnovabile. Esse sono inoltre rispettose dell'ambiente perché non contribuiscono ad accrescere l'effetto serra e l'acidificazione delle piogge. Un maggiore uso energetico delle biomasse potrebbe produrre consistenti benefici ambientali, occupazionali e di politica energetica:

- benefici ambientali:

Le biomasse sono neutre per quanto attiene l'effetto serra poiché il biossido di carbonio (CO₂) rilasciato durante la combustione viene riassorbito dalle piante stesse mediante il processo di fotosintesi.

Il basso contenuto di zolfo e di altri inquinanti fa sì che, quando utilizzate in sostituzione di carbone e di olio combustibile, le biomasse contribuiscano ad alleviare il fenomeno delle piogge acide.

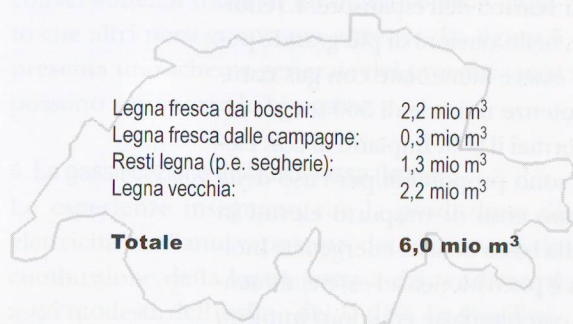
- benefici occupazionali:

Derivano dal fatto che le diverse fasi del ciclo produttivo del combustibile da biomassa, sia esso di origine agricola o forestale, creano posti di lavoro e favoriscono la rivitalizzazione di questo settore. Anche l'industria collegata alle tecnologie di conversione energetica potrebbe trarre un considerevole beneficio occupazionale.

- benefici per la politica energetica:

L'energia delle biomasse vegetali contribuisce a ridurre la dipendenza dalle importazioni di combustibili fossili e a diversificare le fonti d'approvvigionamento energetico. Aderendo alla convenzione internazionale sul clima, la Svizzera si è impegnata a stabilizzare le emissioni in atmosfera di

gas serra. La sostituzione di combustibili fossili con biomasse vegetali può fornire un contributo al conseguimento di questo obiettivo (fig. 3).



3 - Potenziale energetico annuo di legna in Svizzera (Fonte: Wald- und Holzwirtschaft der Schweiz, Jahrbuch 1993, disegno: A. Romer)

Combustibile	pci [MJ/kg]	parti ceneri		elementi in %				
		volatili %	%	C	H	O	N	S
Paglia di frumento	17,3	74	6	45	6,0	43	0,6	0,12
Pianta intera di frumento	17,5	76	3,5	45	6,0	43	1,8	0,20
Legna senza corteccia	18,5	85	0,5	47	6,3	46	0,16	0,02
Corteccia	16,2	76	3	47	5,4	40	0,4	0,06
Legno + corteccia	18,1	82	0,8	47	6,0	44	0,3	0,05
Miscanthus	17,4	(80)	3,0	46	6,0	44	0,7	0,1
Olio di colza	35,8	100	0	77	12	11	0,1	0
Etanolo	26,9	100	0	52	13	25	0	0
Metanolo	19,5	100	0	38	12	50	0	0

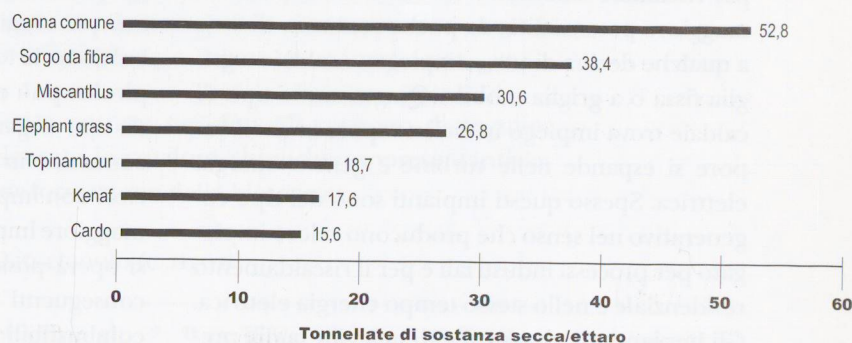
Tab. 2 - Potere calorifico inferiore e composizione di alcuni combustibili vegetali (Fonte: A. Strehler)

Per sua natura la biomassa è una risorsa distribuita sul territorio. Per limitarne i costi del trasporto a grande distanza è opportuno prevederne l'utilizzazione in piccoli-medi impianti decentrati, sebbene anche le grandi centrali possano utilizzarle grazie alla tecnologia della co-combustione.

I residui vegetali sono la fonte di biomassa attualmente più utilizzata per scopi energetici. Sono generalmente disponibili a basso prezzo, talvolta in grandi quantità. Si prestano particolarmente all'utilizzazione presso le stesse aziende produttrici, quali riserie, distillerie, segherie. I sottoprodotti agricoli quali paglie, stocchi, sarmanti di vite, ramaglie di potatura ecc., potrebbero garantire l'autosufficienza energetica di un gran numero di aziende agricole a costi di gran lunga inferiori rispetto a quelli derivanti dall'uso dei combustibili fossili.

La valorizzazione energetica dei residui delle utilizzazioni forestali e degli interventi di manutenzione del bosco può contribuire a migliorare il bilancio economico delle operazioni selvicolturali, creando nel contempo nuove opportunità per le comunità montane.

Le colture energetiche sono costituite da piante coltivate espressamente per l'uso energetico. Sono ancora poco diffuse e il costo della biomassa così prodotta è più alto rispetto a quello dei residui. Tuttavia le colture energetiche hanno a loro favore un potenziale produttivo di biomassa superiore rispetto ai residui, e la capacità di adattare meglio l'offerta di mercato alla domanda. Le colture energetiche, sia erbacee che legnose, possono determinare consistenti benefici ambientali, contribuendo a ridurre l'erosione del suolo agricolo e il dilavamento di nutrienti, preservando così la qualità delle acque superficiali e di falda. Nel caso delle colture erbacee le tecniche di coltivazione e raccolta si avvalgono di macchine agricole convenzionali opportunamente modificate; nel caso delle piante legnose la meccanizzazione è più complessa e richiede la costruzione di macchine specifiche, attualmente allo studio o già in fase prototipale. Le colture più promettenti sono quelle perenni, sia erbacee sia legnose (ad esempio, canna comune, miscanthus, pioppo). Il costo di produzione della biomassa da queste piante è infatti inferiore a quello delle colture a ciclo annuale. Anche il bilancio energetico è più favorevole in quanto queste colture sono meno esigenti in termini di lavorazioni del terreno e interventi di coltivazione. Le colture perenni costituiscono un investimento a medio-lungo termine per le aziende agricole.



4 - La produzione annua di alcune colture energetiche

Le produttività delle colture energetiche possono risultare molto alte come mostra indicativamente la figura 4. La tabella 3 riporta alcuni dati comparativi di costo. Con le produttività indicate per la canna da zucchero comune di oltre 50 t di sostanza secca per ettaro equivalenti a 20 tep/ha e supponendo di dedicare a colture energetiche un milione di ettari si otterrebbe un contributo di 20 Mtep all'anno. 1tep = tonnellata equivalente petrolio.

Combustibile	Potere calorico inferiore (MJ/kg)	Costo (*) (cts/kg)	Costo (*) (cts/MJ)
Gasolio	41,90	110,5	2,64
Gas naturale	34,50	70,5	2,04
Olio combustibile	40,60	51,0	1,26
Legna da ardere	17,79	21,3	1,20
Sorgo da fibra	16,95	21,3	1,25
Miscanthus	17,16	14,5	0,84
Canna comune	17,37	12,6	0,73
Paglia	17,26	6,8	0,39

(*) = anno 1996

Tab. 3 – Confronto di costo tra alcuni combustibili (Tabella A. Romer)

3. La conversione energetica delle biomasse vegetali

Le biomasse vegetali si caratterizzano anche per la loro flessibilità essendo esse idonee ad alimentare diversi comparti utilizzatori. È possibile:

- produrre calore, attraverso il processo della combustione;
- convertire le biomasse in combustibili liquidi (etanolo, metanolo) impiegati in autotrazione;
- convertire le biomasse in combustibili gassosi;
- generare energia elettrica.

L'impiego più tradizionale è quello avente l'obiettivo di produrre calore. La legna, ad esempio, è usata per alimentare caminetti, piccoli focolari per riscaldare ambienti e cucinare. Gli impianti di maggiore potenzialità, da poche centinaia di kW_{th} a qualche decina di MW_{th}, impiegano caldaie a griglia fissa o a griglia mobile. Questo stesso tipo di caldaie trova impiego in cicli a vapore in cui il vapore si espande nelle turbine e genera energia elettrica. Spesso questi impianti sono del tipo cogenerativo nel senso che producono calore impiegato per processi industriali e per il riscaldamento residenziale e nello stesso tempo energia elettrica. Gli impianti più moderni e di maggior taglia prevedono l'impiego di caldaie a letto fluido; il tipo cosiddetto bollente è riservato alle taglie minori, ma il campo di applicazione si è esteso fino a 100 MW_{th}. I letti fluidi di tipo circolante trovano impiego nel caso di potenze maggiori e ci sono esempi fino a 250 MW_{th}. Il limite di separazione tra caldaie a griglia e caldaie a letto fluido si situa in un intervallo ampio attorno ai 1030 MW_{th} a seconda del costruttore.

I cicli a vapore sono caratterizzati da rendimenti piuttosto limitati: a titolo orientativo impianti con ciclo a vapore e letto fluido circolante a 10 MW_{el} progettati con criteri moderni hanno rendimenti dell'ordine del 30%. Soluzioni più innovative sono in fase di dimostrazione in diversi paesi del mon-

do, in particolare in Europa e negli Stati Uniti. Esse adottano i cosiddetti cicli combinati, composti da una turbina a gas e da un ciclo a vapore alimentato dai gas di scarico dell'espansore. I rendimenti dell'insieme, nelle versioni di più grande potenza previste per essere alimentate con gas naturale (si giunge a potenze unitarie di 500 MW_{el} e oltre), raggiungono ormai il 60%. Impianti di così elevata capacità non sono proponibili per l'uso delle biomasse che hanno costi di trasporto elevati in considerazione della bassa densità energetica. Inoltre la turbina a gas è poco idonea ad essere alimentata direttamente con biomasse ed il loro impiego in cicli combinati richiede un processo di conversione piuttosto spinto. Il metodo che si è imposto più frequentemente prevede la gassificazione delle biomasse e la successiva pulizia dei gas così prodotti in modo da renderli idonei all'alimentazione di una turbina a gas. La necessità di adottare impianti di piccola capacità unitaria e l'introduzione del gassificatore compromette il rendimento complessivo che viene a collocarsi tra 30% e 40%.

Dal punto di vista termodinamico, notevoli miglioramenti si realizzano adottando un processo di conversione della biomassa, diverso dalla gassificazione, detto pirolisi. Il processo pirolisi consiste in una decomposizione fisico-chimica, ottenuta sottoponendo il materiale di rifiuto ad alte temperature in assenza d'aria. In pratica, alcune tecnologie prevedono l'immissione di quantità dosate di aria per raggiungere, attraverso una parziale combustione, le temperature richieste dal processo. La pirolisi può essere applicata a qualsiasi materiale di tipo organico, preferibilmente con un basso contenuto in acqua (inferiore al 15%). Valori superiori non impediscono la reazione, ma richiedono maggiore impiego di energia. Le temperature a cui si opera possono variare da 200°C a 1100°C, con conseguenti variazioni della composizione dei combustibili prodotti. Questi sono composti da una parte liquida, costituita da olii e altri prodotti chimici di base, e da una parte gassosa, composta di idrogeno, monossido di carbonio, anidride carbonica, idrocarburi e azoto. Principale vantaggio di questo processo è che il prodotto finale è un combustibile liquido, facilmente immagazzinabile e utilizzabile. Da dati sperimentali si può ricavare, per esempio, che dalla pirolisi del legno secco si ottiene una resa in combustibile pari a circa il 70%. La pirolisi consente quindi la conversione delle biomasse in un carburante utilizzabile anche per l'autotrazione. A questo tema vengono dedicate grandi risorse, in tutto il mondo, anche in Svizzera presso il Paul Scherrer Institut (PSI) a Villigen (progetto BIOMETH). Molte attenzioni sono infine

dedicate alla produzione e all'uso di biodiesel. Più convenientemente il processo di pirolisi converte la biomassa in olio, con buon rendimento di conversione. Si tratta di un obiettivo assai ambito che altri perseguono per altre vie. La figura 5 presenta uno schema generale dei processi cui si possono sottoporre le biomasse.

4. La gassificazione della biomassa (legno)

Le esperienze insegnano che la produzione di elettricità mediante vapore prodotto attraverso la combustione della legna porta a dei rendimenti assai modesti, dell'ordine del 17-18%. La gassificazione porta a dei rendimenti nettamente superiori e offre il vantaggio di poter impiegare motori e turbine a gas.

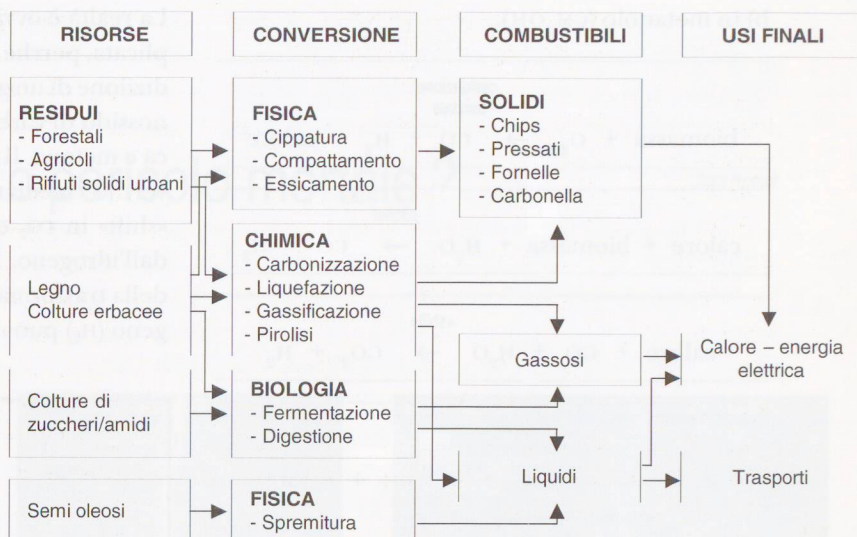
Nella gassificazione si introduce nel combustibile una quantità sottostechiometrica di ossidante (per esempio può trattarsi di aria, vapore o ossigeno). In questo caso brucia unicamente una parte della legna. Il calore prodotto serve a scomporre termicamente la rimanente massa di legno. Il risultato del processo è un gas di sintesi composto da idrogeno, monossido di carbonio, vapore acqueo, metano, carbonio e azoto. Poiché la gassificazione non è mai totale, nascono anche dei derivati indesiderati come catrame e fenoli. La tabella 4 dà un tipico gas di sintesi per la gassificazione della legna (ossidante: aria):

Componente gassosa	Percentuale volumetrica
CO	10-15%
H ₂	15-20%
CH ₂	3-5 %
CO ₂	10-15%
N ₂	50%
O ₂	0%

Tab. 4 – La gassificazione del legno, composizione del gas di sintesi
Potere calorifico inferiore: 4-6 MJ/m³ (Fonte: Th. Nussbaumer)

5. La produzione di etanolo e metanolo da biomassa

Etanolo e metanolo sono combustibili liquidi che possono sostituire la benzina nel settore dei trasporti. Tale sostituzione presenta vantaggi indiscussi: miglioramento dell'approvvigionamento energetico, riduzioni a livello di bilancio dei pagamenti, riduzione dell'inquinamento urbano e riduzione delle emissioni di CO₂. È però importante e necessario che i costi di produzione dell'etanolo e del metanolo possano essere ridotti per diventare competitivi con i carburanti «tradizionali». La tabella 5 indica alcune proprietà fisiche dei due vettori energetici:



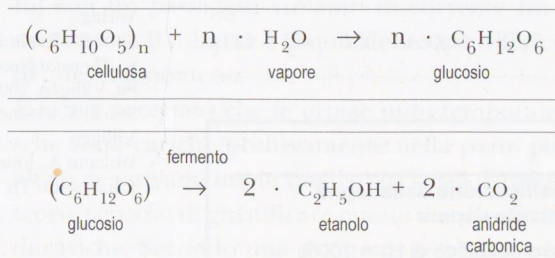
5 – Vari processi riguardanti l'impiego della biomassa e scopo energetico (disegno: A. Romer)

Proprietà	Metanolo	Etanolo
Formula	CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH
Densità (kg/m ³)	790	790
Potere calorifico (MJ/kg)		
- superiore	19,92	26,78
- inferiore	15,74	21,16
Temperatura di accensione [K]	737	697
Punto di evaporazione [K]	337,8	351,6

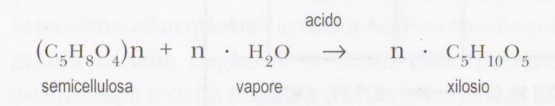
Tab. 5 – Alcune proprietà fisiche di metanolo e etanolo
(Fonte: Ch. Wyman)

Senza entrare nei dettagli vengono di seguito elencate le reazioni chimiche rappresentanti la trasformazione della biomassa:

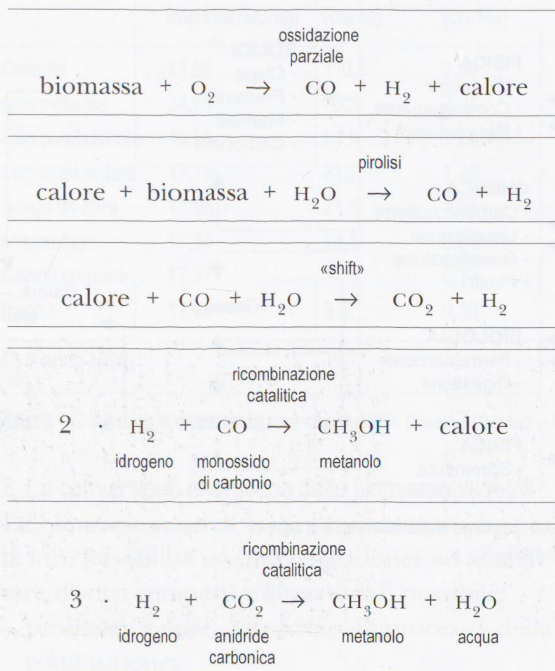
a) in etanolo (C₂H₅OH):



Poiché la biomassa non contiene unicamente cellulosa, bensì anche semicellulosa, è necessario un pretrattamento:



b) in metanolo (CH₃OH):



6. La produzione di idrogeno da biomassa

La gassificazione della biomassa (in particolare della legna) rappresenta una straordinaria opportunità di sfruttare una fonte rinnovabile ai fini di ridurre le emissioni di CO₂ e di contribuire a uno sviluppo sostenibile. La trasformazione di biomassa in idrogeno (H₂) e anidride carbonica (CO₂) richiede energia termica. Ma questa energia è nettamente inferiore in qualità e quantità all'energia (elettrica) che si deve investire nell'elettrolisi ai fini di dissociare l'acqua (H₂O) in idrogeno e ossigeno. L'energia termica di cui sopra viene di regola fornita attraverso la combustione di una parte (circa un quarto) della biomassa. L'equazione idealizzata ha la forma seguente:

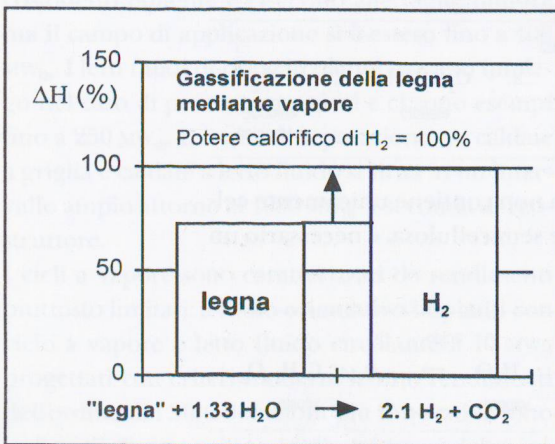
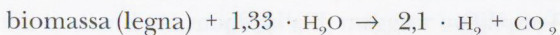


Fig. 6 – Gassificazione della legna

La realtà è ovviamente un po' diversa e più complicata, perché la gassificazione comporta la produzione di un gas di sintesi contenente azoto, monossido di carbonio, idrogeno, anidride carbonica e metano. Il monossido di carbonio viene convertito mediante la sopra descritta reazione «shift» in CO₂ e H₂. I gas inerti vengono separati dall'idrogeno. In tal caso il rendimento globale della trasformazione del legno (CH_{1,44}O_{0,66}) in idrogeno (H₂) può raggiungere il 50%.

Tecnologia	Tempo di ammortamento [a]	Ore annue di utilizzazione [h/a]	Esercizio e manutenzione [%]	Investimento [fr./kW _e]				Costo di produzione (tasso reale 5%) [cts/kW _h]			
				anno 1990	anno 2000	anno 2010	anno 2020	anno 1990	anno 2000	anno 2010	anno 2020
Fotovoltaico	20	900	1	14'000	11'000	7'500	4'500	150	110	75	45
Geotermia (Hot Dry Rock)	20	5000	3			14'000	7'000			30	17
Vento	20	1020	3	3'000	2'500	2'300	2'100	40	30	25	21
Biomassa											
- legna (cogenerazione)	20	4500	5		8'000	7'000	5'500		30	25	21
- legna (solo elettr.)	20	7500	5			4'000	3'000			17	13
- biogas, gas da depuratori, gas da deponia	15	6000			7'000	5'000			16	12	

Tab. 6 – Criteri economici rilevanti della produzione di elettricità con nuove fonti rinnovabili (Fonte: PSI, Energiespiegel, 1999/1 e 2000/2)

Bibliografia

- Buwal, *Wald- und Holzwirtschaft in der Schweiz*, Jahrbuch 1993
- Drake F. D., *Kumulierte Treibhausgasemissionen zukünftiger Energiesysteme*, 1996, Springer Verlag
- Flaig H., Mohr H., *Energie aus Biomasse 1993*, Springer Verlag
- Biollaz S., Stucki S., *Methane from biomass*, PSI, Villigen, 2001
- International Energy Agency, *World Energy Outlook*, 1994, OECD
- Energiespiegel 1, PSI, Villigen
- Lehmann H., Reetz T., *Zukunftsenergien*, 1995, Birkhäuser Verlag
- Sime R., Kuehni J., D'Souza L., Elizoudo E., Biollaz S., Stucki S., *The redox process from producing hydrogen from woody biomass*, PSI, Villigen, 2001
- Stucki S., *Production of methanol from waste biomass*, 1995, PSI, Villigen
- Wokaun A., *Erneuerbare Energien*, 1999, Teubner Studienbücher
- Johanssohn Th. B., *Renewable Energy*, 1993, Island Press