

bioenergie I

# Introduzione

Corso: Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili

Anno accademico: 2018/2019

Docente: Mirko Morini

## Agenda

- La cogenerazione
- La cogenerazione da biomasse

## Politica energetica

L'Unione Europea ha emanato il 23 aprile 2009 una nuova direttiva (2009/28/CE) che costituisce la cornice entro la quale gli Stati membri hanno dovuto legiferare in termini di politica energetica.

La nuova politica energetica europea si basa su tre obiettivi che devono essere raggiunti entro il 2020



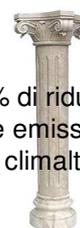
Incremento del  
20 % dell'efficienza  
energetica



Almeno il 20 %  
del consumo finale lordo  
coperto da fonti rinnovabili



20 % di riduzione  
delle emissioni di  
gas climalteranti



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie I – Introduzione

## Politica energetica

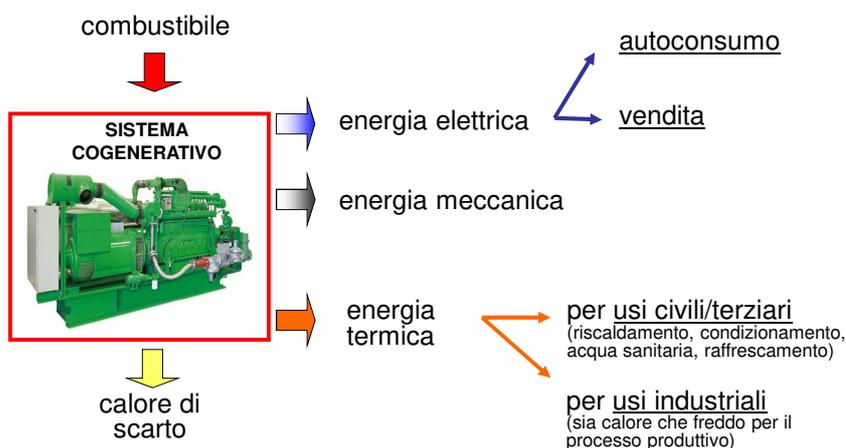
La **cogenerazione da biomasse** si inserisce in questo quadro e contribuisce all'ottenimento degli obiettivi preposti in quanto:

- la **cogenerazione** permette un risparmio di energia primaria rispetto alla generazione separata e di conseguenza un aumento dell'efficienza energetica;
- le **biomasse** sono una fonte di energia rinnovabile. A differenza di altre fonti quali eolico e fotovoltaico è una fonte programmabile e quindi non rappresentando una criticità per la stabilità della rete di trasmissione può contribuire consistentemente al fabbisogno energetico del paese.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie I – Introduzione

## Cogenerazione

Produzione combinata, in un unico processo, di energia elettrica/meccanica e termica



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie I – Introduzione

## Cogenerazione

I combustibili sono una fonte energetica “trasportabile” (anche se in taluni casi, quale per esempio la generazione da biomasse, questo può risultare economicamente e/o energeticamente non conveniente)

L'elettricità è un vettore energetico “trasportabile”

Il calore non è trasportabile (se non a brevi distanze)



**IL COGENERATORE DEVE ESSERE INSTALLATO  
PRESSO UTENZA TERMICA**

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie I – Introduzione

## Cogenerazione

Rendimento di primo principio

$$\eta_I = \frac{\text{produzione utile}}{\text{consumo combustibile}}$$

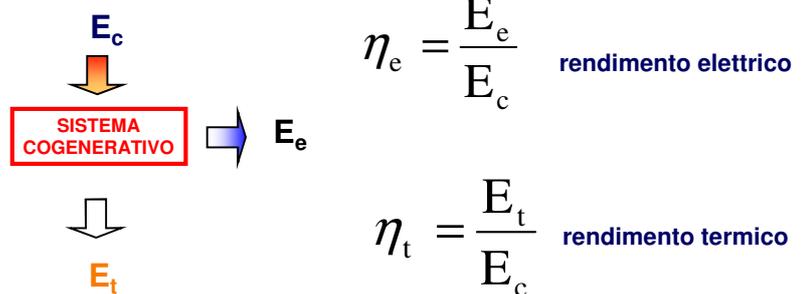
$$\eta_I = \frac{\text{potenza utile}}{\text{potenza combustibile}} \neq \frac{\text{energia utile}}{\text{energia combustibile}}$$

La potenza di un impianto è una grandezza “istantanea”  
(i dati di targa fanno riferimento alla potenza)

L'energia è una grandezza “a consuntivo” che dipende  
dall'effettivo esercizio di un sistema di produzione

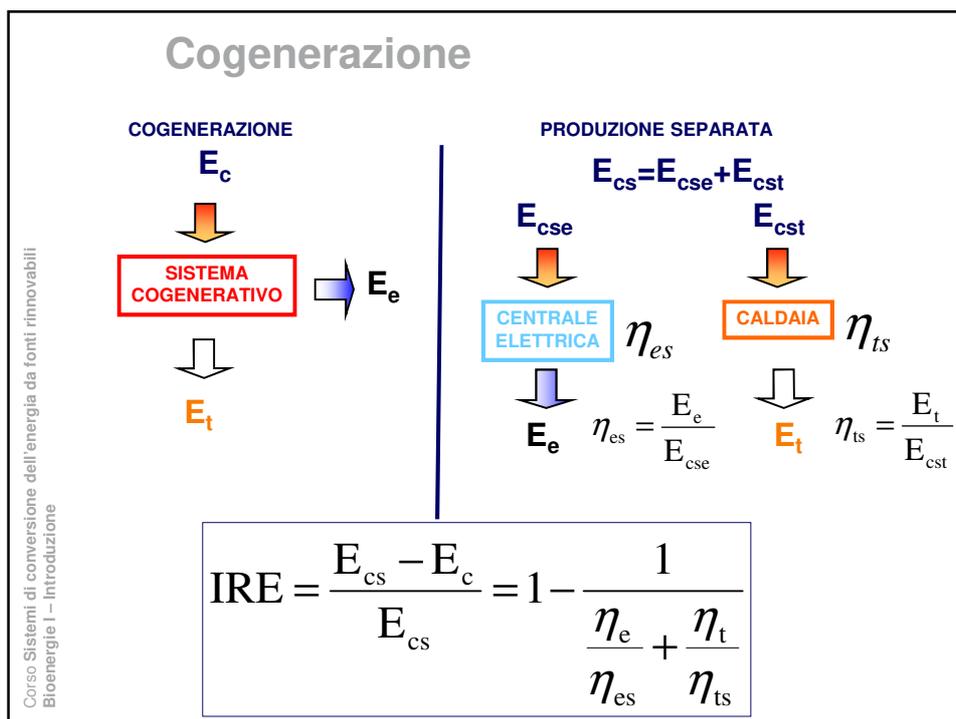
Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie I – Introduzione

## Cogenerazione



$$\eta_u = \frac{E_e + E_t}{E_c} = \eta_e + \eta_t \quad \text{coefficiente utilizzo del combustibile}$$

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie I – Introduzione



## Biomasse

- La **biomassa** è una fonte rinnovabile (fonte energetica non fossile) da cui si possono ricavare combustibili (**biocombustibili**) da utilizzare in sistemi energetici
- In campo energetico, tutte le sostanze organiche, di origine vegetale o animale da cui sia possibile ricavare energia
- La parte biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali) e dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie I – Introduzione

## Perché le Biomasse?

- Produzione di energia da fonte energetica rinnovabile;
- A differenza delle fonti rinnovabili sole e vento è una tecnologia programmabile e non rappresenta quindi un fattore di criticità per la rete di trasmissione e distribuzione
- Riduzione delle emissioni influenti sull'effetto serra;
- Maggiore attrattività del territorio per l'insediamento di attività produttive e sostegno delle stesse;
- Possibilità di utilizzare una quota parte dell'energia termica prodotta in ambito locale, con sensibile riduzione dei costi energetici ed aumento dei vantaggi ambientali;
- Riduzione della dipendenza dalla rete elettrica esterna e maggiore sicurezza della fornitura;
- Ricadute occupazionali dirette ed indirette (sorveglianza, pulizia, manutenzione ordinaria, raccolta e trasporto della biomassa, ecc)

## Perché le Biomasse in Italia?

- Presenza di sottoprodotti e residui agricoli, agro-industriali e forestali, stimati in circa 24 milioni di tonnellate in sostanza secca che ogni anno devono essere smaltite in maniera corretta;
- Eccedenza di superficie agricola destinata a coltivazioni alimentare, da utilizzare per coltivazioni energetiche ed industriali;
- Terreni agricoli abbandonati, pari a circa 3 milioni di ettari, con alto rischio di desertificazione e di dissesto idrogeologico;
- Necessità di intervento di manutenzione e riconversione del patrimonio forestale, oltre 8 milioni di ettari tra altofusto e ceduo;
- Spopolamento e alto tasso di disoccupazione nelle aree montane.

## Perché ancora no?

- Disponibilità non elevata delle materie prime, se non in zone particolari
- Convenienza allo sfruttamento della biomassa a fini energetici solo in regioni circostanti quelle in cui questa viene prodotta (in genere in un raggio di circa 70 km)
- Costi di produzione dell'energia ancora elevati
- Taglia del sistema energetico medio-piccola (< 20 MW)
- Efficienza del sistema energetico bassa (20 ÷ 25 % contro il circa 50 % del parco termoelettrico italiano)
- Normativa, iter autorizzativi

## Quanta biomassa per l'energia?

Il potenziale delle diverse fonti di biomasse, espresso in energia primaria disponibile in Italia, è stimabile in 24-28 Mtep/anno, così ripartito:

1. Coprodotti, sottoprodotti, residui e scarti		
• <i>Agricoltura e agroindustria</i>	5	Mtep
• <i>Foreste e industria del legno</i>	4.3	Mtep
• <i>Verde pubblico urbano</i>	0.3	Mtep
• <i>Zootecnia</i>	10-12	Mtep
2. Legna da ardere	2	Mtep
3. Colture dedicate (potenziali)	3-5	Mtep
<b>Totale risorse potenziali</b>	<b>24-28</b>	<b>Mtep</b>

Fonte: W. Merzagora, "Lo stato dell'arte e le prospettive di sviluppo delle biomasse agroforestali per utilizzo energetico", Atti corso di formazione "Lo sviluppo delle bioenergie", Milano 12-14 maggio 2009

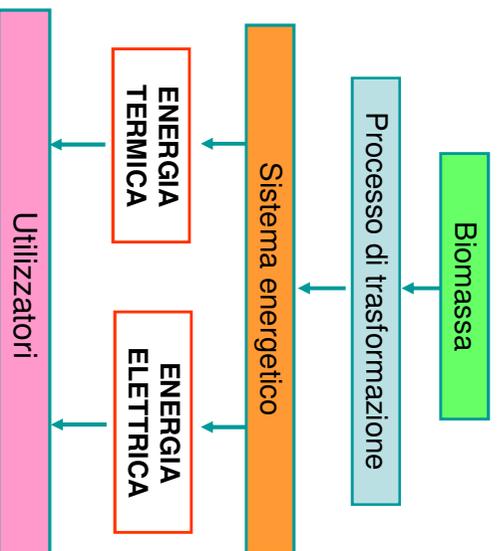
## Il piano di azione nazionale

	2005		2009		2020	
	Potenza installata FER-EE	Produzione Lorda FER-EE	Potenza installata FER-EE	Produzione Lorda FER-EE	Potenza installata FER-EE	Produzione Lorda FER-EE
	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh
Iidroelettrica*	15.466	43.768	16.458	42.155	17.800	42.000
Geotermica	711	5.325	737	5.342	920	6.750
Solare	34	31	1.142	676	8.600	11.350
Maree e moto ondoso	-	-	-	-	3	5
Eolica*	1.639	2.558	4.898	6.830	12.680	20.000
Biomassa	937	4.675	1.658	7.631	3.820	18.780
<b>Totale</b>	<b>18.787</b>	<b>56.356</b>	<b>24.893</b>	<b>62.634</b>	<b>43.823</b>	<b>98.885</b>

\* La produzione degli impianti idroelettrici e di quelli eolici è normalizzata secondo le regole previste dalla direttiva 28/2009/CE

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie I – Introduzione

## La filiera biomassa-energia



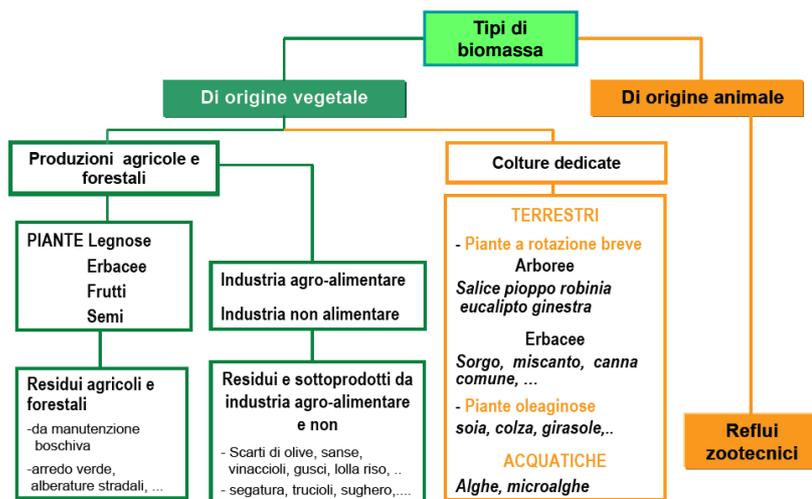
Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie I – Introduzione

## Filiera biomassa-energia

- Elevato numero di parametri del sistema
  - Tipi di biomassa
  - Processi di trasformazione della biomassa
  - Sistemi energetici



## Tipi di biomassa

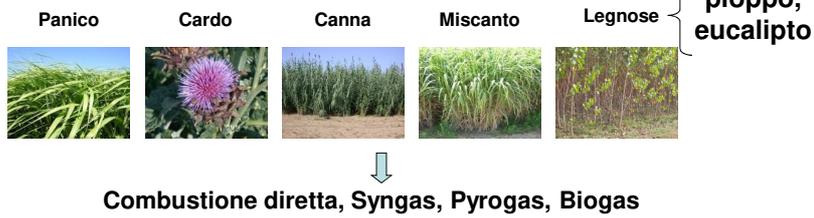


## Colture dedicate

### Annuali



### Poliennali



## Residui

I **residui colturali** possono essere paglia, stocchi, residui di patate, semi, erba, etc.



I **residui dell'allevamento** sono costituiti da liquami bovini e suini, letame bovino, etc.



I **residui agroindustriali** possono essere invece la sansa di oliva, la lolla del riso, il pannello proteico dei semi oleosi, etc.



Sansa d'olive

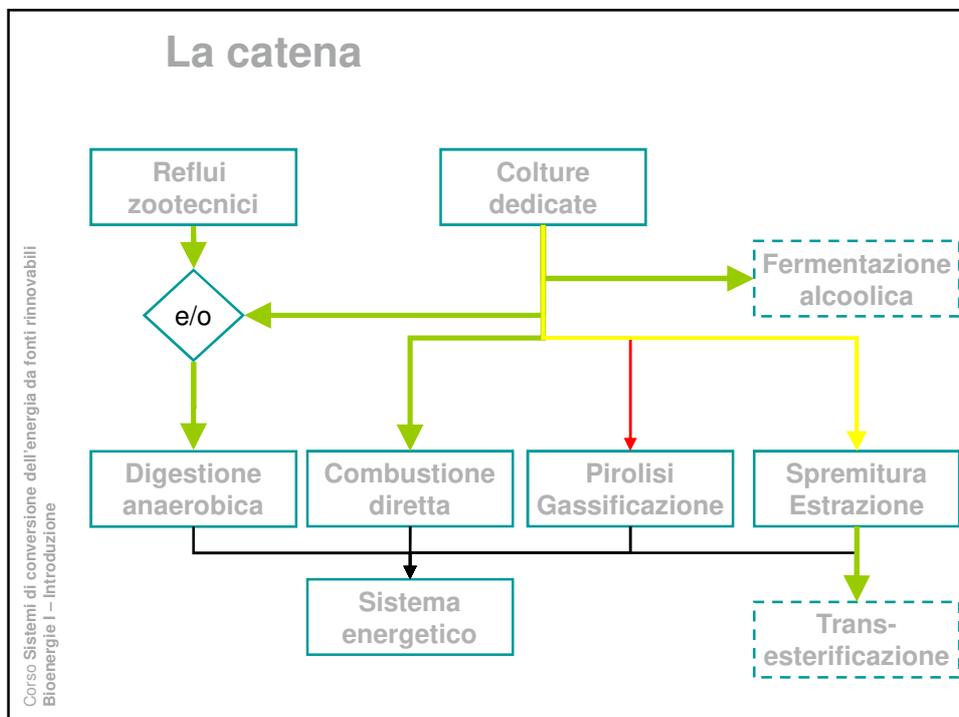


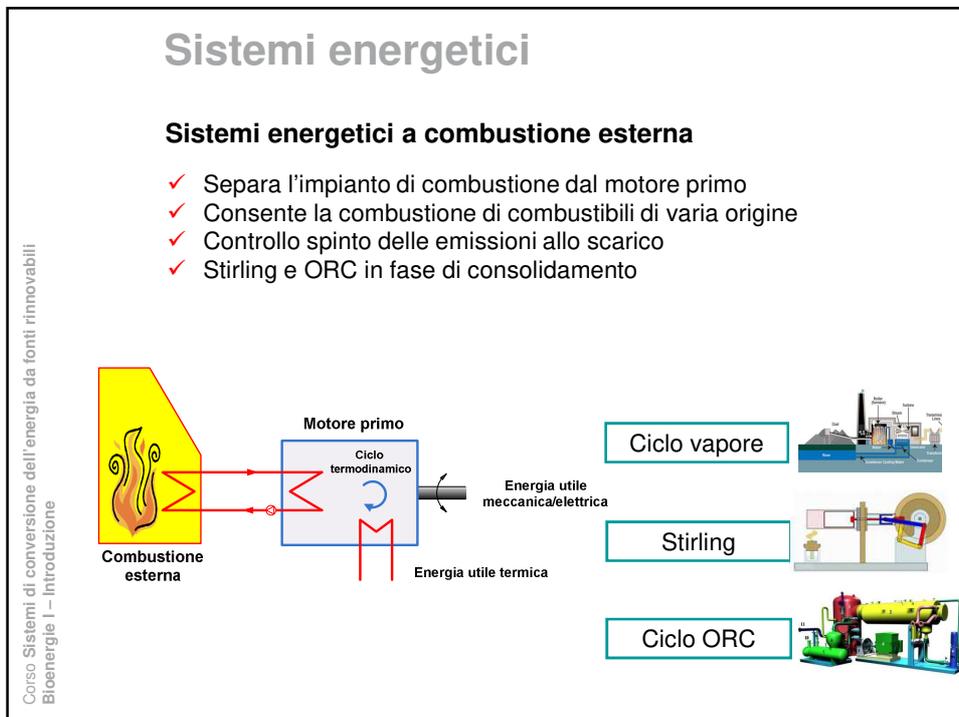
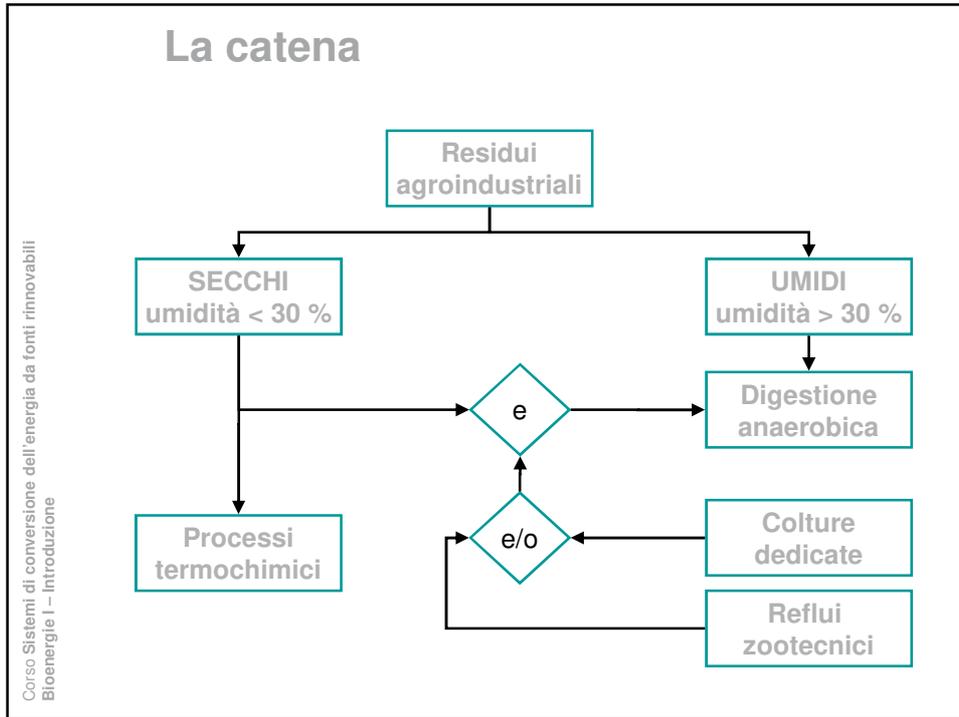
Pannello di girasole

### Processi di trasformazione

Processi di trasformazione	C / N	Umidità	Processo di conversione	Prodotto principale
<b>Biochimico</b>	< 30	> 30 %	Fermentazione	Bioetanolo
			<b>Digestione anaerobica</b>	<b>Biogas</b>
<b>Termochimico</b>	> 30	< 30 %	<b>Combustione</b>	<b>Energia termica</b>
			<b>Gassificazione</b>	<b>Gas di sintesi</b>
			<b>Pirolisi</b>	<b>Gas di pirolisi, olio</b>
<b>Meccanico</b>	-	-	<b>Estrazione di oli</b>	<b>Olio vegetale</b>

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie I – Introduzione

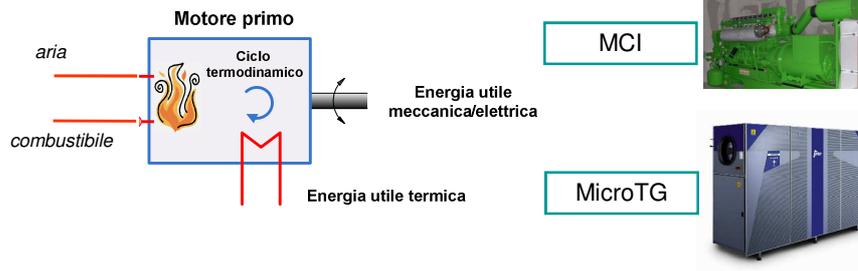




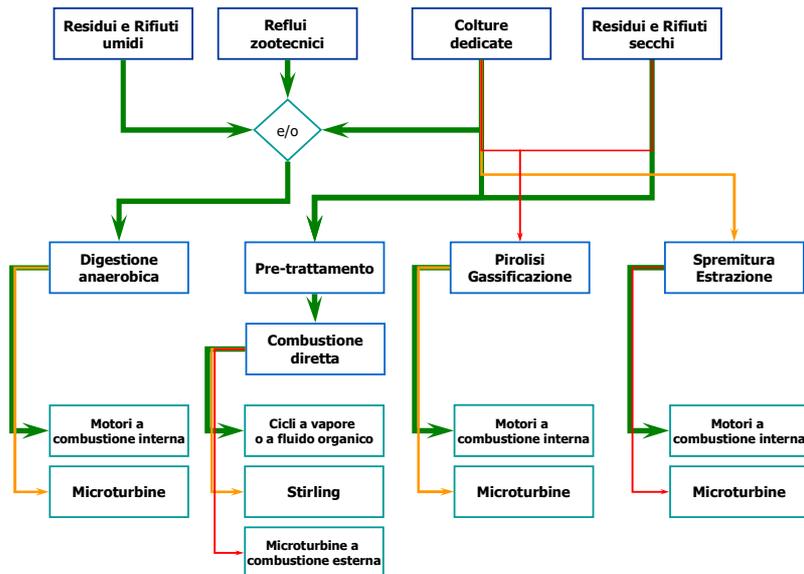
## Sistemi energetici

### Sistemi energetici a combustione interna

- ✓ Il combustibile è iniettato direttamente all'interno del motore primo
- ✓ Necessità di avere combustibili "puliti"
- ✓ **Tecnologie consolidate**
- ✓ Maggiore rendimento

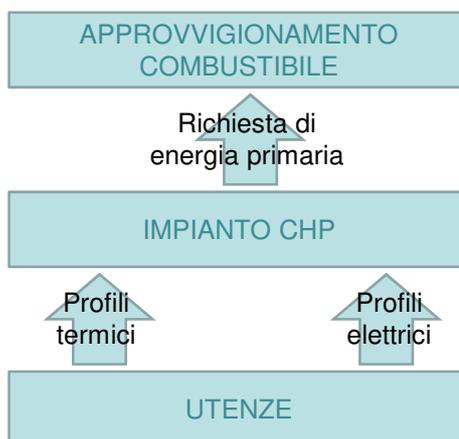


## Le filiere



## Cogenerazione

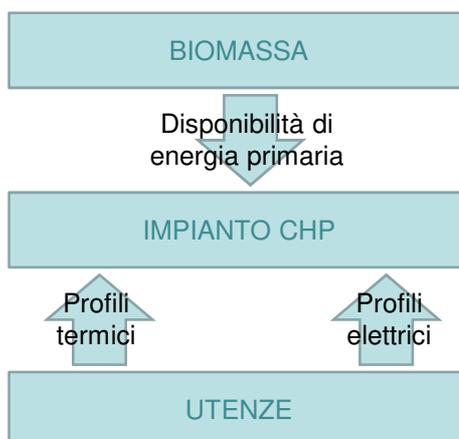
La progettazione di un impianto di cogenerazione a combustibile fossile parte dalle utenze per risalire al combustibile



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie I – Introduzione

## Cogenerazione

La progettazione di un impianto di cogenerazione a biomasse è invece, in genere, l'incontro tra le esigenze delle utenze e la disponibilità di biomassa



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie I – Introduzione

bioenergie II

# Le biomasse per le bioenergie

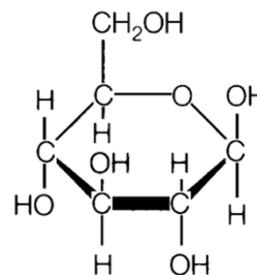
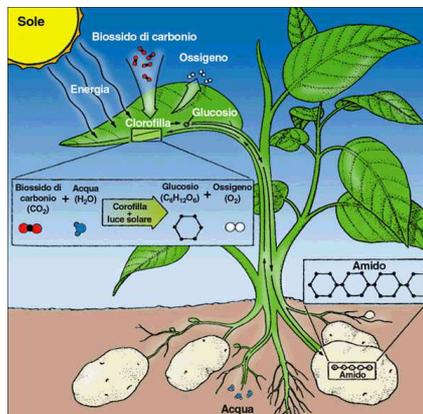
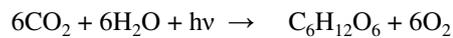
Corso: Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili

Anno accademico: 2018/2019

Docente: Mirko Morini

## La fotosintesi

La fotosintesi clorofilliana è il processo mediante il quale l'anidride carbonica e l'acqua vengono combinate per mezzo di un trasferimento di energia dalla luce solare



Glucosio

## La fotosintesi

Le piante **legnose** contengono

~ 75% di **polisaccaridi** suddivisi  
in 7 grandi gruppi

~ 20% di **lignina**

~ 1% è il contenuto di proteine

Le piante **erbacee** hanno un  
contenuto maggiore di  
polisaccaridi e minore di lignina



Altri composti sono trasportati nella linfa, attraverso il sistema di vasi, dalle foglie a tutte le parti della pianta: zuccheri semplici, aminoacidi, acidi alifatici, grassi, oli, resine, pigmenti, etc.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## La cellulosa

La **cellulosa** è un polisaccaride altamente ordinato, insolubile, con una struttura **semicristallina**, contenente fino a 10 000 molecole di **glucosio** unite in catene lineari a maglie.

Le catene si uniscono tra loro tramite **legami idrogeno** e formano strutture a fasci dette **micelle**.

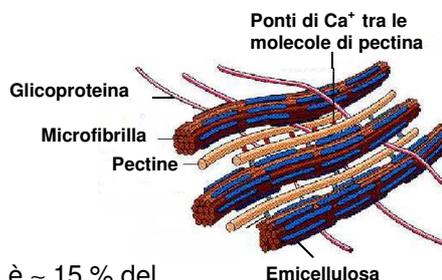
A loro volta gruppi di 10-20 micelle si uniscono per formare strutture dette **microfibrille**.

Le microfibrille si attorcigliano come i fili di una corda e formano **macrofibrille** che costituiscono un sistema di fibre intrecciate tra loro su diversi piani.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## La cellulosa

Le fibre di cellulosa sono poi immerse in una matrice di lignina, emicellulose o pectine, che riempiono gli spazi tra le molecole di cellulosa



La cellulosa nelle piante giovani è ~ 15 % del peso secco, e diventa più del 50% nelle piante legnose adulte

Dal punto di vista della degradabilità biologica

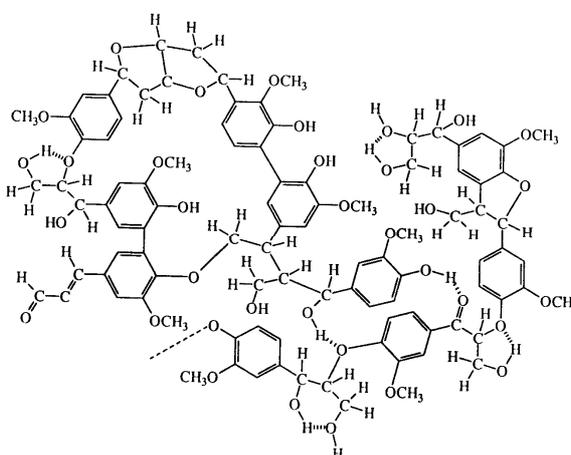
- |   |   |
|---|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> Struttura ordinata              | <input checked="" type="checkbox"/> Grandi dimensioni |
| <input checked="" type="checkbox"/> Legami uguali o simili          | <input checked="" type="checkbox"/> Insolubilità      |
| <input checked="" type="checkbox"/> Monomeri facilmente assorbibili | <input checked="" type="checkbox"/> Assenza di azoto  |

## Polisaccaridi

- insolubile, formato da due polimeri diversi del glucosio
- Amido**
- **amilosio**, a struttura lineare, avvolta ad elica
  - **amilopectina**, a struttura ramificata
- Dopo la cellulosa, è il polimero più diffuso e rappresenta la principale riserva di carboidrati, viene accumulato in granuli variabili da 1 a 150  $\mu\text{m}$  di diametro
- Emicellulose** insolubili e diverse formate da **esosio**, **pentosi** e altre molecole, associate alla cellulosa nelle pareti cellulari
- Pectine** insolubili o solubili, formate da catene di acido galatturonico, si trovano come componenti della lamella mediana tra le pareti cellulari e tra le molecole di cellulosa
- Altri polisaccaridi costituenti le biomasse vegetali sono l'inulina, le gomme e la chitina.

## La lignina

Non è un vero e proprio carboidrato, ma un polimero fenolico insolubile, molto complesso, con legami carbonio-carbonio molto stabili. Rappresenta circa il 3-6% nelle piante giovani e aumenta nel tempo fino a raggiungere 15-35% del peso secco nelle piante mature.



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Processi di trasformazione

Processi di trasformazione	C / N	Umidità	Processo di conversione	Prodotto principale
Biochimico	< 30	> 30 %	Fermentazione	Bioetanolo
			Digestione anaerobica	Biogas
Termochimico	> 30	< 30 %	Combustione	Energia termica
			Gassificazione Pirolisi	Gas di sintesi Gas di pirolisi, olio
Meccanico	-	-	Estrazione di oli	Olio vegetale

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Tipologie di biomasse

- Le biomasse per i processi termochimici
- Le biomasse per la filiera olio
- Le biomasse per la filiera biogas

## Biomasse per proc. termochimici

**PIOPPO** (*Populus nigra* L., *P. alba* L., *P. deltoides* Bartr., *P. x canadensis* Monch.)

Appartengono alla famiglia delle *Salicaceae* che comprende i due generi *Salix* e *Populus*. *Populus alba* e *P. nigra* sono specie indigene e il loro areale comprende l'Europa centro-meridionale, l'Asia occidentale e l'Africa settentrionale; *P. deltoides* è originario dell'America del Nord tra le pianure occidentali e l'oceano Atlantico; *P. x euramericana* è un ibrido tra il *P. nigra* e il *P. deltoides*.

I pioppi sono entità eliofile e igrofile, necessitano di una temperatura media annua compresa tra gli 8,5 °C e i 17 °C e precipitazioni annue di almeno 700 mm; temono le siccità estive prolungate e vegetano bene su terreni non troppo tenaci e con un pH compreso tra 5,5 e 7,5, mentre rifuggono da quelli troppo pesanti o sciolti.

## Biomasse per proc. termochimici

**PIOPPO** (*Populus nigra L.*, *P. alba L.*, *P. deltoides Bartr.*, *P. x canadensis Monch.*)

Produzioni	Pioppo taglio biennale	Pioppo taglio annuale
	(t/ha di t.q.)	30
(t/ha di s.s.)	15	11

Abbandonato perché troppo ricco di corteccia

La coltivazione del pioppo risulta interessante per :

- livelli produttivi, qualità della biomassa (contenuto in ceneri e silice molto ridotto rispetto alle colture da energia erbacee)
- rappresenta buona protezione per il terreno dai fenomeni erosivi ed un ottimo rifugio per un gran numero di animali.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

## Biomasse per proc. termochimici

**PIOPPO** (*Populus nigra L.*, *P. alba L.*, *P. deltoides Bartr.*, *P. x canadensis Monch.*)

Tra i punti critici:

- meccanizzazione della raccolta, lo stoccaggio e la conseguente logistica, che devono essere ancora perfezionati
- molti macchinari specifici per la raccolta ancora troppo costosi o non idonei;
- non è chiaro quale sia la lunghezza ottimale del ciclo colturale in ambienti mediterranei; rispetto ad alcune colture erbacee (ad esempio canna e cardo) richiede un maggior numero di interventi fitosanitari.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

## Biomasse per proc. termochimici

### *CANNA COMUNE* (*Arundo donax L.*)

Graminacea perenne rizomatosa, autoctona, considerata **specie invasiva** in aree dove non è nativa.

Proposta ai fini delle produzioni energetiche in quanto specie molto rustica, a rapido accrescimento (arriva a 6-7 m di altezza).

Il primo anno la produzione può risultare significativamente scarsa rispetto ai successivi anni di impianto.

La propagazione avviene attraverso i rizomi. In nord Italia il loro trapianto è consigliato nel mese di marzo. È in fase di studio la tecnica della micropropagazione.

È consigliata una raccolta annuale a fine inverno, appena prima del ricaccio. La durata della coltura è di almeno 10 anni.

## Biomasse per proc. termochimici

### *CANNA COMUNE* (*Arundo donax L.*)

Raccolta con falciatrinziacaricatrice e rimorchio o falciatriciatrice e rotoimballatura

<b>Produzioni</b>	<b>Trinciato</b>	<b>Sostanza secca</b>
(t/ha)	35-70, media 52	18-34, media 26

Produttività (SS raccolta) > di tutte le altre specie, sia annuali che poliennali, con costi di rinnovo dell'impianto che possono essere ammortizzati su un periodo temporale di almeno 10 anni, stante il carattere perennante della specie.

## Biomasse per proc. termochimici

### **CANNA COMUNE** (*Arundo donax L.*)

#### ASPETTI CRITICI

Si sottolineano però diversi aspetti problematici legati a questa coltura:

- i) non possibilità di propagazione per seme, la messa a dimora dei rizomi risulta più difficile e costosa,
- ii) alla raccolta l'umidità del materiale trinciato è troppo elevata per consentirne adeguata conservazione,
- iii) possibili difficoltà, a fine coltura, di eliminare la specie dal campo in quanto i rizomi sono dotati di notevole vitalità,
- iiii) ai fini della conversione termochimica è da ricordare che la biomassa è caratterizzata da un contenuto di ceneri superiore a quello delle piante arboree come pioppo e robinia, con tenori significativi di cloro e silice.

Le condizioni di mercato non hanno ancora permesso di ampliare la diversità genetica della specie. In pratica non esistono varietà commerciali.

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Biomasse per proc. termochimici

### **SALICE** - *Salix alba L.*, *Salix viminalis L.*, *Salix matsudana Koidz.* (ibridi)

Appartiene alla famiglia delle *Salicaceae*, originario dell'Europa. Si tratta di una pianta tipica dei luoghi umidi delle regioni temperate; può raggiungere dimensioni diverse secondo la specie (da 6 a 25 metri di altezza).

*Salix alba* è la specie più comune di un genere che comprende circa 300 entità, spesso ibridate fra loro; di queste, in Italia è la specie più diffusa assieme al salice viminale, il salice di monte ed il salice rosso.

È una specie tipicamente ripariale, che tollera i terreni periodicamente sommersi, di qualsiasi origine, purché non compatti. In fatto di umidità è quindi piuttosto esigente, richiedendo precipitazioni medie annue non inferiori a 900-1000 mm, o terreni comunque sempre freschi. Le temperature medie del mese più freddo non devono scendere al di sotto di -1/-2 °C.

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Biomasse per proc. termochimici

**SALICE** - *Salix alba L.*, *Salix viminalis L.*, *Salix matsudana Koidz.* (ibridi)

### Produzioni

(t/ha)

### Sostanza secca

10-15, media 12,5

La coltura del salice ha esigenze idriche superiori a quelle del pioppo e della robinia e non tollera lunghi periodi di carenza d'acqua mentre è in grado di sopportare i ristagni idrici. Questa caratteristica la fa ben adattare ad ambienti umidi come quelli presenti in prossimità dei corsi d'acqua.

## Biomasse per filiera olio

### GIRASOLE (*Helianthus annuus L.*)



Pianta erbacea annuale della famiglia delle Asteracee (Composite), a ciclo primaverile-estivo, viene generalmente condotta in asciutto.

È tipicamente considerata coltura da rinnovo, non depauperatrice, cioè capace di lasciare il terreno in buone condizioni a vantaggio della coltura che seguirà.

Dalla spremitura dei semi (achen), raccolti a maturazione completa (umidità del 9-10%), viene ottenuto l'olio (45-50% semi), ad elevato potere calorifico.

Al fini delle produzioni energetiche risultano particolarmente interessanti le varietà "alto oleico" che sono state selezionate per l'elevato contenuto di acido oleico (generalmente superiore al 90% sull'olio estratto).

## Biomasse per filiera olio

### GIRASOLE -Tecnica colturale:

**PREPARAZIONE DEL TERRENO:** aratura (~30 cm) e/o ripuntatura, erpicatura, affinamento pre-semina.

**SEMINA:** a partire da metà marzo (Italia meridionale) fino a fine marzo (Italia centrale); la semina si fa a file (70 cm) con seminatrice di precisione con densità compresa tra **5 -7 piante/m<sup>2</sup>** impiegando circa **5-6 kg di semi/ha.**

**CONCIMAZIONE:** fosfo-potassica (50-70 kg/ha di P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - K<sub>2</sub>O) in pre-semina; azotata (80-120 kg/ha di urea) alla semina.

#### DISERBO CHIMICO IN PRE E/O POST-EMERGENZA

**RACCOLTA:** a partire dalla metà di agosto (regioni più calde ed annate più secche) fino a metà settembre (regioni più fredde ed annate più umide); la raccolta si fa con le mietitrebbie da frumento opportunamente modificate; le rese di granella oscillano tra le **2 e le 4 t/ha.**

## Biomasse per filiera olio

*Sperimentazione LIFE 2007*

*Girasole concimato con fanghi di depurazione -Ferrara.*

FATTORE CONCIMAZIONE	concimazione organica con fanghi concimazione minerale test non concimato	60 U di N 60 U di N
FATTORE VARIETA'	alto oleico tradizionale	OLEKO SAMBRO



Varietà	concimazione	resa t/ha	umidità %	resa 9% U	piante /mq	altezza pianta cm	SS acheni t/ha
SAMBRO	organica	1,26	9,2	1,26	3,23	124	1,14
SAMBRO	chimica	1,34	9,2	1,34	3,56	120	1,22
SAMBRO	test	1,09	9,2	1,09	3,35	118	0,99
OLEKO	organica	1,00	9,2	1,00	2,65	120	0,91
OLEKO	chimica	1,11	9,2	1,11	2,36	120	1,01
OLEKO	test	0,98	9,2	0,98	2,88	120	0,89

## Biomasse per filiera olio

### COLZA (*Brassica napus* L. var. *oleifera*)



Erbacea annuale della famiglia delle Brassicacee, coltivata soprattutto nei paesi del nord Europa ed America.

È tipicamente considerata coltura da rinnovo, non depauperatrice, cioè capace di lasciare il terreno in buone condizioni a vantaggio della coltura che seguirà.

Dalla spremitura dei semi, raccolti ad umidità del 12-13% (da stoccare però ad umidità inferiore al 10%), viene ottenuto l'olio (40-45% semi), ad elevato potere calorifico.

A seconda della varietà, l'olio può avere un elevato tenore di acido erucico, adatto all'uso industriale, oppure contenuto nullo dello stesso acido ed essere adatto **all'alimentazione**.

## Biomasse per filiera olio

### Tecnica colturale:

**-Preparazione del terreno:** le dimensioni del seme impongono particolare attenzione alla preparazione del letto di semina che prevede un'aratura a media profondità (25-30 cm) o lavorazioni minime seguite da un'epicatura.

**-Semina:** a partire dalla metà di settembre fino alla metà di ottobre; la semina si fa a file (30 cm) con una seminatrice da frumento ad una profondità di 20-30 mm con densità compresa di **70-80 piante/m<sup>2</sup>** impiegando circa **6-8 kg di semi/ha**.

**-Concimazione:** fosfo-potassica (68-80 kg/ha di P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 100-150 kg/ha di K<sub>2</sub>O se il terreno è k-carente), azotata (180-200 kg/ha di urea o nitrato ammonico da somministrare durante l'inverno).

**-Diserbo post-emergenza e trattamenti antiparassitari** (meligete)

**-Raccolta:** giugno-luglio, quando i semi sono completamente imbruniti e le silique secche (umidità ottimale della granella intorno al 12%); la raccolta si fa con le mietitrebbie da frumento opportunamente regolata in 2 possibili modi, o su andane o con **taglio diretto**; le rese di granella oscillano tra le **2,5-3 t/ha** con punte fino a 4 t/ha.

## Biomasse per filiera olio

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergia II – Le biomasse per le bioenergie

**Avvicendamento:** Ideale dopo frumento, da evitare in precessione/successione a girasole e soia, con le quali condivide *Sclerotinia sclerotiorum*.

Non ripetere la coltura sullo stesso terreno prima di 3 anni per evitare la pressione dei parassiti

**Preparazione terreno** Il seme è molto piccolo, quindi il terreno deve essere ben affinato alla semina. Poiché la preparazione del terreno va effettuata in estate, l'ideale è utilizzare un estirpatore combinato (dischi+lance) operante a 25 cm di profondità. Su terreni non destrutturati possibile una minima lavorazione a 15 cm. L'affinamento del letto di semina va effettuato con erpice rotante.

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

## Biomasse per filiera olio

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergia II – Le biomasse per le bioenergie

### SOIA (*Glicine max L.*)



Pianta erbacea annuale della famiglia delle Leguminose originaria dell'estremo oriente, a ciclo primaverile-estivo, viene generalmente condotta in asciutto.

È tipicamente considerata coltura miglioratrice della fertilità, in quanto azotofissatrice.

Dalla spremitura dei semi, raccolti a maturazione completa (umidità del 13-14%), viene ottenuto l'olio, ad elevato potere calorifico.

Le cultivar vengono raggruppate in 13 gruppi di maturazione, da 000 a X, che si differenziano per la lunghezza del ciclo vegetativo. Per il nord Italia normalmente risultano più adatte le varietà appartenenti ai gruppi I e I+ (per secondi raccolti 0+ o I).

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

## Biomasse per filiera olio

### SOIA - Tecnica colturale:

- **Preparazione del terreno:** aratura piuttosto anticipata (profondità 30 cm) seguita dai lavori di affinamento eseguiti tempestivamente in modo da avere un letto di semina perfettamente livellato e amminutato. Nel caso di coltura intercalare, la lavorazione minima (15-25 cm) dà buoni risultati.
- **Semina:** da metà aprile a metà maggio con seminatrici di precisione, a file (40-45 cm) ad una profondità di 50-60 mm in terreni piuttosto asciutti e 30-40 mm in terreni con favorevoli condizioni di umidità, con densità compresa di 30-35 piante/m<sup>2</sup> impiegando circa 6-8 kg di semi/ha.

## Biomasse per filiera olio

### SOIA - Tecnica colturale:

- **Diserbo pre-semine o in pre-emergenza**
- **Raccolta:** da settembre (coltura principale) ad ottobre (coltura intercalare), quando la pianta è quasi completamente defogliata e presenta steli e semi di colore marrone. Si impiegano mietitrebbie da frumento. Le rese ottenibili da una buona coltura vanno da 3,5 a 4,5 t/ha.

## Biomasse per filiera olio

### .....altre colture da olio

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie



**Brassica carinata:** sperimentazione attiva nella provincia di Enna (Progetto FISICA – Filiera siciliana per l'agroenergia)



**Tabacco energetico:** sperimentazione promossa dalla Plantechno ([www.plantechno.it](http://www.plantechno.it)) che ha selezionato e brevettato varietà di tabacco per applicazioni energetiche



L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

## Biomasse per filiera olio

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie



**Jatropha Curcas:** pianta tropicale; cresce solo in terreni semiaridi, in presenza di scarse precipitazioni; i frutti non sono commestibili; i semi contengono 39% di olio.



**Palma da olio:** originaria dell'Africa ma diffusa e coltivata soprattutto nelle zone tropicali (Indonesia, Malesia); condizioni ideali per la crescita: T=24-27°C e ambienti molto umidi.



L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

## Biomasse per filiera biogas

### Sorgo classificazione botanica

Famiglia Graminaceae (o Poaceae)  
Sorghum vulgare Pers. (o Sorghum bicolor(L.)Moench)

#### Sorgi da granella

- var.durra(Stapf)Hubb. e Rehd.Durra, MiloMediterraneo
- var.caffrorum(Beauv.)Hubb. e Rehd.KafriAfrica meridionale
- var.drummondii(Nees) Hitchc.Drummondiafrica occidentale
- var.roxburghii(Stapf) HainesShalluAfrica tropicale, India
- var.caudatum(Stapf)BaileyFeterita, HegariAfrica orientale

#### Sorgi zuccherini

- Sweet sorghum
- var.saccharatum
- (Pers.) Boerl

#### Sorgi da fibra

- Sorgi da foraggio Sudangrass
- var. sudanense (Piper) Hitchc.Sorgo gentile
  - Sorgo x Sudan (Ibridi)
  - es. sudanense x zuccherino, sudanense x milo



nel tipo da fibra prevale la produzione di carboidrati strutturali, in particolare di cellulosa;

nel tipo da zucchero, almeno il 30% di tutta la sostanza secca accumulata è costituito da zuccheri semplici (saccarosio, glucosio e fruttosio).

## Biomasse per filiera biogas

### Sorgo avvicendamento, lavorazione terreno, semina

#### Avvicendamento

Coltura sfruttante (avida di N) ma "rustica" e a crescita rapida

- resistente del mais a stress idrici
- in rotazione con: grano duro, girasole, bietola
- NO monosuccessione

#### Lavorazione terreno

- Aratura estiva+ 2-3 erpicature
- Minimum tillage e semina su sodo possibili

#### Semina

- Semina primo raccolto da aprile
- Semina in secondo raccolto
- Densità 15-20 piante/m<sup>2</sup>
- (interfila 45 cm- 19cm con seminatrice da grano)
- Profondità ~ 2 cm
- Accesisce, i culmi secondari permettono di sopperire a bassi investimenti

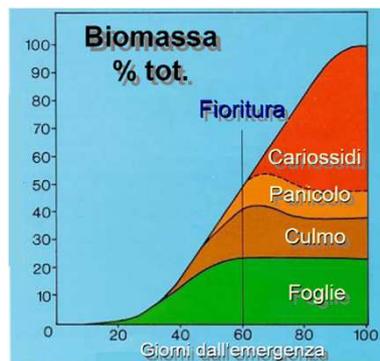


## Biomasse per filiera biogas

### Sorgo diserbo, concimazione

**diserbo**  
possibile solo pre emergenza

**concimazione**  
Azoto: 100-150 kg/ha di N  
Fosforo 70 kg/ha kg/hadi P2O5  
Potassio 0-100 kg/ha



L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Biomasse per filiera biogas

### Sorgo raccolta trinciato



Produzione di biomassa per biogas. Prove cantieri di raccolta sorgo in 1° e 2° raccolto. Sfalcio secondo raccolto di sorgo da foraggio (dopo triticale) in regime non irriguo.  
Prove effettuate nell'ambito del progetto europeo LIFE – Sec-Qure anno 2008 Zona Ravenna

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Biomasse per filiera biogas

### Sorgo raccolto trinciato



Prove varietali sorgo (da sx: Grazer N, Sugar Grade, H133).  
Prove effettuate nell'ambito del progetto europeo LIFE – Seq-Cure anno 2008 Zona Ravenna.



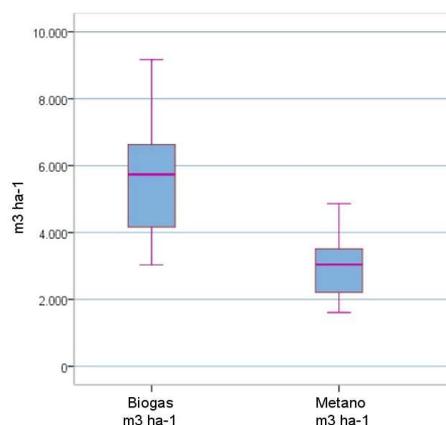
Falciatrinciamento di sorgo con trasporto su camion. Prove effettuate nell'ambito del progetto europeo LIFE – Seq-Cure anno 2008 Zona Ravenna.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

## Biomasse per filiera biogas

### Sorgo produzione di biogas per ettaro



Valori medi, rilevati in differenti aziende, dei dati produttivi di varietà di sorgo da biomassa e zuccherini.  
Prove effettuate nell'ambito del progetto europeo LIFE – Seq-Cure anno 2008  
Zone di sperimentazione Ravenna, Reggio Emilia, Bologna, Forlì.

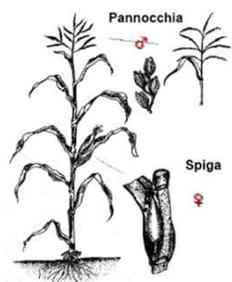
Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

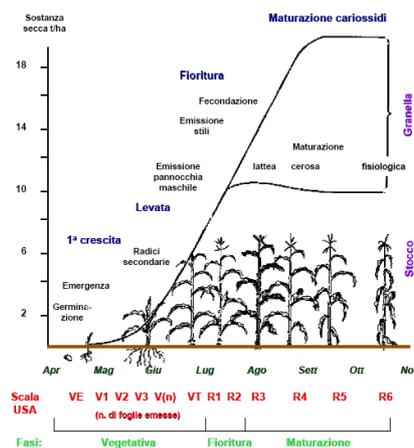
## Biomasse per filiera biogas

### Mais classificazione botanica

Famiglia Graminaceae (o Poaceae)  
Zea mais L.



- Pianta monoica diclina (fiori m e f sulla stessa pianta ma in posizione diversa)
- Facilità di incrocio previa demascolazione



L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Biomasse per filiera biogas

### Mais avvicendamento, lavorazione terreno, semina

#### Avvicendamento

Durata ciclo variabile, molte possibilità di inserimento nella rotazione colturale

#### Lavorazione terreno

Aratura estiva+ 2-3 erpicature  
Minimum tillage e semina su sodo possibili

#### Semina

Semina primo raccolto  
Semina in secondo raccolto  
Densità: 5-9 piante/m<sup>2</sup> (interfila 45 cm- 75 cm con seminatrice di precisione)  
Profondità ~ 2 cm  
Non accestisce (max 12 p/m<sup>2</sup>)



L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

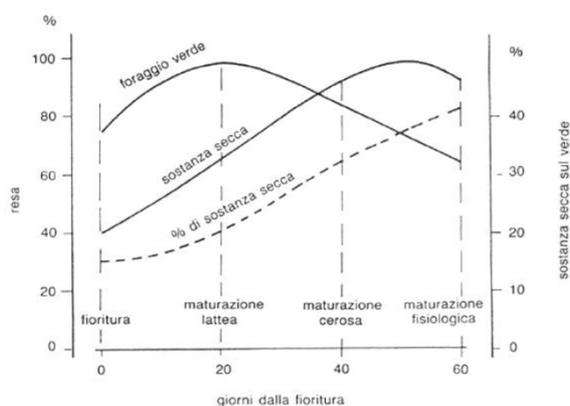
Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Biomasse per filiera biogas

### Mais scelta dell'ibrido

**Raccolta in più giorni**  
 inizio con 35 % SS  
 fine con 40 % SS

**Importanza ibridi a diverso ciclo**



L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
 Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Biomasse per filiera biogas

### Mais diserbo, concimazione, irrigazione

#### Diserbo

Pre emergenza p. a. antigerminello (es terbutilazina, simazina,...)

Post-emergenza in base alle infestanti (graminacee p.a. solfoniluree, non graminacee p.a. dicamba,..)

#### Concimazione

Dosi correnti nella Pianura Padana  
 azoto da 200 a 300 kg/ha  
 fosforo da 80 a 120 kg/ha  
 potassio da 0 a 100 kg/ha

#### irrigazione

Necessaria nei nostri ambienti

Coefficiente idrico basso ~ 300 kg H<sub>2</sub>O/ kg sostanza secca

In base al bilancio idrico ( da 60 a 200 l/m<sup>2</sup>)

Ciclo primaverile – estivo=Periodo poco piovoso + elevata evapotraspirazione

(es. in luglio in un campo di mais della Pianura Padana

ET ~ 7-8 mm/d)



L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
 Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Biomasse per filiera biogas

### Triticale Triticale x Triticosecale Wittmack

è una fusione delle parole *Triticum* ("frumento") e *Secale* ("segale").  
Nella fecondazione, il frumento è usato per i cromosomi materni, e la segale per quelli paterni.

Gli ibridi così ottenuti sono hanno corredo triploide o pentaploide, e sono sterili: trattati con colchicina, che impedisce la divisione meiotica nei gameti, si ottengono cellule esaploidi o ottaploidi, fertili.

#### Pianta vigorosa, alta, poco allettabile (culmo flessuoso)

- Spiga lunga, grossa, con molte cariossidi
- Cariossidi nuda, grinzosa, grossa ma basso peso specifico (68-70 kg/hl)

#### Maggiore resistenza del frumento a clima freddo e terreno acido



L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Biomasse per filiera biogas

### Triticale avvicendamento, tecnica colturale

#### Avvicendamento

Coltura "rustica"  
in rotazione con: girasole, bietola  
NO monosuccessione

#### Lavorazione terreno

Minima lavorazione  
semina su terreno sodo possibile

#### Semina

Semina da metà ottobre  
densità 300 piante/m<sup>2</sup>  
(interfila 19cm con seminatrice da grano)  
Profondità ~ 2 cm

#### Ridotti interventi di protezione dai parassiti



L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Biomasse per filiera biogas

### Triticale produzioni

Azienda	terreno	Fertilizzante	Dose (kg N/ha)	Data Raccolta	Produzione (t/ha)	% s.s.	Produzione (t ss/ha)
CAT	limoso-argilloso	TEST	0	19/06/08	21,58	50,86	11,00
CAT	sost. Org 2%	CHIMICO	121	19/06/08	24,33	54,43	13,21
CAT	N: 1,8 ‰	LIQUAME PS	121	19/06/08	29,41	49,78	14,64
CAT		LIQUAME C	121	19/06/08	25,65	51,12	13,08
Mengoli	Franco argilloso	TEST	0	14/05/08	44,15	21,91	9,67
Mengoli	S.O: 2%	CHIMICO	90	14/05/08	47,28	22,81	10,78
Mengoli	N: 1,4 ‰	DIGESTATO PS	90	14/05/08	56,33	22,55	12,70
Mengoli		DIGESTATO C	90	14/05/08	50,77	21,88	11,11
Tadini	Franco	TEST	0	11/06/08	28,91	37,34	10,79
Tadini	S.O: 2,4%	CHIMICO	80	11/06/08	26,50	44,36	11,75
Tadini	N: 1,8 ‰	LIQUAME PS	80	11/06/08	32,81	46,15	15,14
Tadini		LIQUAME C	80	11/06/08	25,33	56,94	14,42
Bagioni	Franco limoso argilli	TEST	0	05/06/08	30,14	33,75	10,17
Bagioni	S.O: 2,4%	CHIMICO	100	05/06/08	32,07	35,49	11,38
Bagioni	N: 1,4 ‰	DIGESTATO PS	100	05/06/08	24,52	34,90	8,56

Dati produttivi della varietà di triticale Oceano  
 Prove effettuate nell'ambito del progetto europeo LIFE – Seq-Cure anno 2008  
 Zone di sperimentazione Parma, Bologna, Reggio Emilia, Forlì.

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
 Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Biomasse per filiera biogas

### Colture energetiche: il mais

- PIANTA ENERGETICA PER ECCELLENZA (C4)
- ELEVATA PRODUZIONE PER ETTARO
- STABILITA' PRODUTTIVA
- ESENTE DA PROBLEMI DI RISTOPPIO
- TECNICA DI COLTIVAZIONE CONSOLIDATA
- PIANTA A RAPIDO MIGLIORAMENTO GENETICO
- ELEVATA MECCANIZZAZIONE
- NECESSITA' IRRIGUE ELEVATE

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
 Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Biomasse per filiera biogas

### Colture energetiche: il sorgo rispetto al mais

- **PIANTA ENERGETICA (C4)**, con radici più sottili, più numerose e fibrose. Rapporto radici/superficie fogliare quasi doppio, maggiore volume di terreno esplorato
- **MINORE PRODUZIONE PER ETTARO DI SV**, coltura più depauperante
- **ELEVATA RESISTENZA A CARENZE IRRIGUE** ma produzione minore a parità di condizioni
- **MIGLIORAMENTO GENETICO PIU' LENTO DEL MAIS**
- **CONTENUTO IDRICO PIU' ELEVATO**

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

## Biomasse per filiera biogas

### Colture dedicate: caratteristiche chimiche

Denominazione:	Mais insilato		Sorgo insilato		Frumento insilato		
Breve descrizione	Mais raccolto a maturazione cerosa		Sorgo zuccherino raccolto a maturazione cerosa e insilato		Frumento raccolto a maturazione latte/cerosa insilato		
	Unità di misura	Valore medio	Intervallo	Valore medio	Intervallo	Valore medio	Intervallo
pH		3,7	3,5 – 4,5	4,9	4,0 – 6,5	3,9	3,7 – 4,0
ST	(%)	33	28 – 40	29	18 – 37	31,5	25 – 37
SV	(% ST)	94	91 – 95	91	89 – 93	91,7	91 – 93
	(g/kg)	310	265 – 390	265	170 – 340	290	225 – 340

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

## Biomasse per filiera biogas

### Colture energetiche: rese in biogas

Denominazione:	Mais insilato	Sorgo insilato	Frumento insilato
Breve descrizione	Mais raccolto a maturazione cerosa	Sorgo zuccherino raccolto a maturazione cerosa e insilato	Frumento raccolto a maturazione latte/cerosa insilato
Produzione biogas (Nm <sup>3</sup> /kg SV)	0,55 - 0,65	0,55 - 0,65	0,55 - 0,65
Metano – CH <sub>4</sub> (% biogas)	53 - 55	53 - 55	53 - 55
Periodo di disponibilità e diffusione sul territorio	Il mais ceroso si raccoglie da agosto a ottobre e si conserva per tutto l'anno mediante insilamento	Il sorgo ceroso si raccoglie da agosto a ottobre e si conserva per tutto l'anno mediante insilamento	Il frumento da insilare si raccoglie in maggio-giugno e si conserva per tutto l'anno mediante insilamento

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Biomasse per filiera biogas

### Stoccaggio e conservazione: insilamento

- Acidificare la massa di substrato mediante l'opera di **SPECIFICI MICRORGANISMI** in grado di trasformare gli zuccheri solubili in **acidi organici**
- in conservazione si **PERDE dal 5 al 50% di sostanza organica**
- la **lunghezza di trinciatura (1-1,5 cm)** e la **compressione** sono i due elementi cruciali

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Biomasse per filiera biogas

### Insilamento

- Necessario perché le colture sono disponibili solo per un breve periodo
- Economico (rispetto all'essiccazione)
- L'umidità delle biomasse di norma è > 50%



L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

## Biomasse per filiera biogas

### Stoccaggio e conservazione

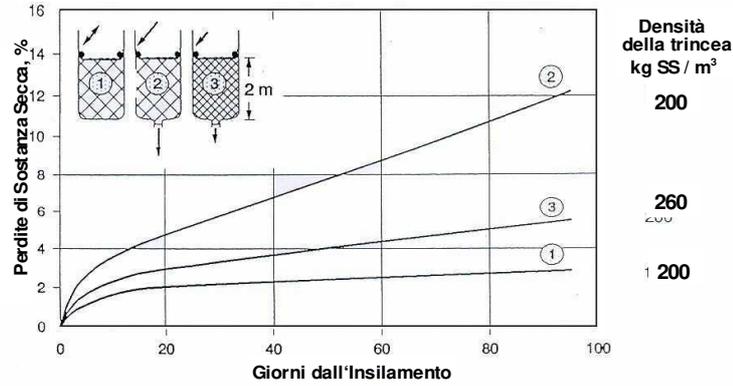
Cause	Stima	Perdite (%)
Respirazione	Inevitabile	1 - 2
Fermentazione	Inevitabile	4 - 10
Percolamenti	Car. Substrato	0 - 7
Fermentazione anomala	Evitabile	0 - 10
Condizioni Aerobie in silo	Evitabile	0 - 10
Condizioni aerobie al desilamento	Evitabile	0 - 40
<b>Perdite Totali</b>		<b>5 - 40</b>

Fonte: Honig

## Biomasse per filiera biogas

### Colture energetiche: perdite di insilamento

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie



- 1 - ottimale sigillatura del bordo e bassa densità
- 2 - scarsa sigillatura del bordo e bassa densità
- 3 - ottimale sigillatura del bordo e alta densità

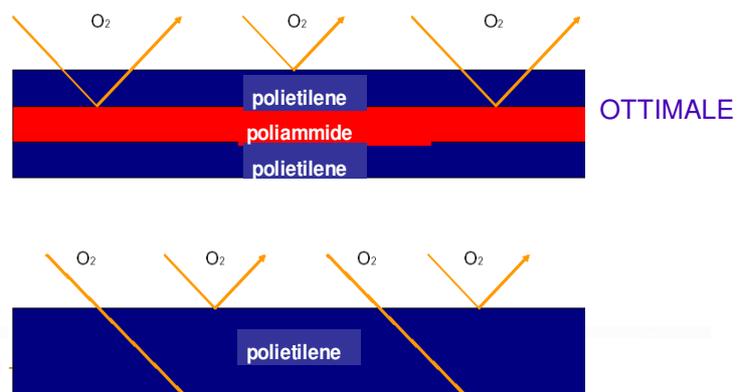
source: Honig, FAL Braunschweig

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

## Biomasse per filiera biogas

### Colture energetiche: le coperture dei sili

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie



Fonte Pioneer

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

## Biomasse per filiera biogas

### Colture energetiche: le coperture dei sili con telo impermeabile



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergia II – Le biomasse per le bioenergie

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

## Biomasse per filiera biogas

### Biomasse di scarto

#### 1. AGRICOLTURA e AGROINDUSTRIA

- **PRODUZIONI ZOOTECNICHE (EFFLUENTI)**
- **TRASFORMAZIONE DELLE PRODUZIONI ANIMALI**
  - **industria del latte**
  - **macellazione (bovini, suini, avicoli)**
- **PREPARAZIONE ORTOFRUTTA PER CONSUMO FRESCO**
- **TRASFORMAZIONE DELLE PRODUZIONI VEGETALI**  
(pomodoro, ortaggi e frutta)

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergia II – Le biomasse per le bioenergie

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

## Biomasse per filiera biogas

### EFFLUENTI ZOOTECNICI

#### LIQUAME

Effluente d'allevamento **NON PALABILE** costituito da feci, urine, residui alimentari e di lettiera, acqua di bevanda, acqua di veicolazione delle deiezioni e acqua di lavaggio.

#### LETAME

Effluente d'allevamento **PALABILE** costituito da feci, urine, residui alimentari, materiali da lettiera e acqua di bevanda.

## Biomasse per filiera biogas

### EFFLUENTI ZOOTECNICI: LIQUAME

Materiale di consistenza liquida, fluida o densa, con contenuto di ST inferiore al 20% sul tal quale, pompabile fino al 16% di ST.

Sono assimilati al liquame:

- le **frazioni** non palabili derivate da trattamento liquami
- i liquidi di **sgrondo** del letame o assimilati
- le acque reflue dai **paddock** pavimentati
- i liquidi di **sgrondo** dei foraggi insilati

## Biomasse per filiera biogas

### EFFLUENTI ZOOTECNICI: LIQUAME

**Materiale di consistenza molto densa, semisolida o solida, con contenuto di ST pari o superiore al 20% sul tal quale, non pompabile**

**Sono assimilati al letame:**

- le **frazioni** palabili derivanti da trattamento liquami
- letami e liquami sottoposti a **compostaggio**

## Biomasse per filiera biogas

### Effluenti bovini: stabulazioni

**Libera**



**Fissa**



## Biomasse per filiera biogas

### Effluenti suini: stabulazioni

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

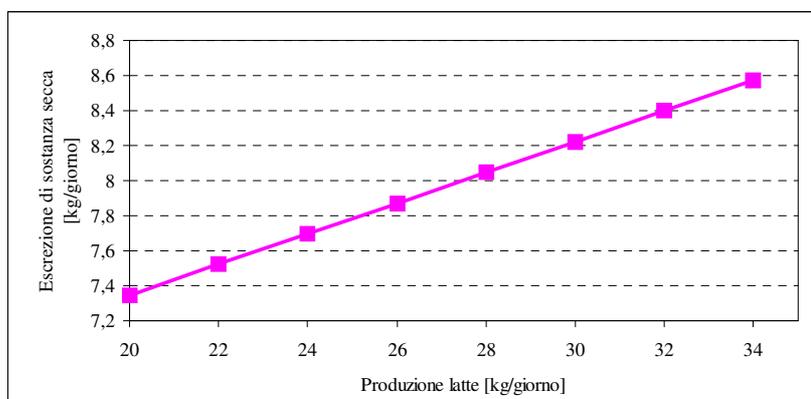


L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

## Biomasse per filiera biogas

### *Bovini da latte:* quantità di sostanza secca escreta

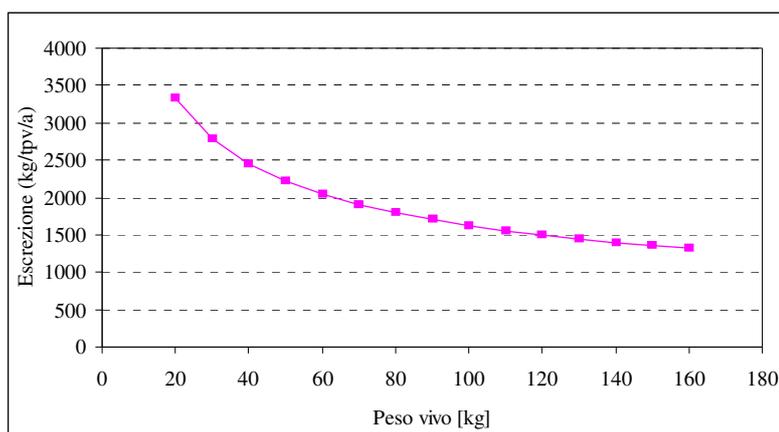
Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie



L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

## Biomasse per filiera biogas

### Suini all'ingrasso: quantità di sostanza secca escreta



L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Biomasse per filiera biogas

### EFFLUENTI SUINI

CARATTERISTICHE INDICATIVE <sup>(1)</sup>	LIQUAMI SUINI	
	Valore medio	Intervallo
<b>Sostanza secca - ST (%)</b>	<b>4,4</b>	<b>2,8 - 6,0</b>
<b>Sostanza organica - SV (%)</b>	<b>70</b>	<b>63 - 77</b>
<b>Azoto totale - NTK (% ST)</b>	<b>8,0</b>	<b>6,3 - 9,7</b>
CARATTERISTICHE DI PRODUZIONE <sup>(2)</sup>	Quantità	Soluzione stabulativa
<b>A. (m<sup>3</sup>/anno * t p.v.)</b>	<b>37 - 44</b>	<b>Pavimento totalmente o parzialmente fessurato</b>
<b>B. (m<sup>3</sup>/anno * t p.v.)</b>	<b>55 - 73</b>	<b>Rimozione con acqua (pavimento pieno, gabbie, ecc.)</b>
<b>PRODUZIONE DI BIOGAS (m<sup>3</sup>/kg SV in ingresso)</b>	<b>0,45 - 0,55 (di cui il 60-65% metano)</b>	

<sup>(1)</sup> Valori indicativi riferiti a effluenti zootecnici "freschi" (fonte: banca dati CRPA).

<sup>(2)</sup> Per maggiori dettagli si rimanda alla Tabella 1 dell'Allegato 1 del Dlgs 07/04/06 del Ministero delle Politiche Agricole e Forestali

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Biomasse per filiera biogas

### EFFLUENTI BOVINI

CARATTERISTICHE INDICATIVE <sup>(1)</sup>	LIQUAMI BOVINI	
	Valore medio	Intervallo
Sostanza secca - ST (%)	8,2	5,7 - 10,7
Sostanza organica - SV (%)	73	64 - 82
Azoto totale - NTK (% ST)	4,7	2,8 - 6,6
CARATTERISTICHE DI PRODUZIONE <sup>(2)</sup>	Quantità	Soluzione stabulativa
A. (m <sup>3</sup> /anno * t p.v.)	20 - 30	Stabulazione libera su fessurato, cuccette senza uso di paglia
B. (m <sup>3</sup> /anno * t p.v.)	9 - 16	Stabulazione libera a cuccette con uso di paglia, stabulazione su lettiera
PRODUZIONE DI BIOGAS (m <sup>3</sup> /kg SV in ingresso)	0,30 - 0,45 (di cui il 55-60% metano)	

<sup>(1)</sup> Valori indicativi riferiti a effluenti zootecnici "freschi" (fonte: banca dati CRPA).

<sup>(2)</sup> Per maggiori dettagli si rimanda alla Tabella 1 dell'Allegato 1 dei Dlgs 07/04/06 del Ministero delle Politiche Agricole e Forestali

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Biomasse per filiera biogas

### Effluenti zootecnici: lettiera di polli da carne (dati CRPA)

Parametro	Unità di misura	Corsia di abbeverata	Corsia di alimentazione	Corsia di smistamento	Media
pH	[-]	7,7 ± 1,0	7,8 ± 0,6	8,0 ± 0,7	7,9 ± 0,5
Sostanza secca (ST)	[g/kg tq]	574 ± 160	772 ± 76	649 ± 114	659 ± 89
Sostanza organica (SV)	[g/kg tq]	459 ± 125	632 ± 73	509 ± 93	546 ± 78

$$SV = 80-83\% ST$$

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Biomasse per filiera biogas

### Effluenti avicoli: ovaiole (dati CRPA)

Parametro	Unità misura	Nastro non ventilato	Tunnel essiccazione
pH	[-]	7,1±0,2	7,7±0,7
ST	[g/kg tq]	347±74	730±151
	[%tq]	35±7,4	73±15,1
SV	[g/kg tq]	243±48	503±103
	[%ST]	70±2,1	69±2

$$SV = 67 - 72\% ST$$

## Biomasse per filiera biogas

### IL comparto agro-industriale QUANTITA' IN GIOCO: (Fonte: stime CRPA)

1. **PRODOTTI VEGETALI (uva, olive, agrumi, pomodoro, legumi, patate) avviati a trasformazione industriale in Italia:**

**circa 15 milioni di tonnellate (anno 2006-07)**



**Oltre 3 milioni di tonnellate di scarti (36% vinacce, 41% sansse umide, 14% pastazzo, 7% buccette pomodoro)**

## Biomasse per filiera biogas

### POTENZIALITA' del COMPARTO VEGETALE

(Fonte: CRPA, Regione Emilia-Romagna – 2006-07)

	Materia prima	Scarti vegetali (% materia prima )
	<b>Vegetali al consumo fresco</b>	
1	<b>Ortaggi</b>	<b>20 - 36</b>
2	<b>Ortaggi a surgelati</b>	<b>10,0</b>
3	<b>Ortaggi a consumo fresco</b>	<b>2,0</b>
4	<b>Frutta</b>	<b>2,3</b>
	<b>Vegetali trasformati</b>	
5	<b>Pomodoro</b>	<b>2,5 - 3,7</b>
6	<b>Piselli</b>	<b>8,7 - 9,8</b>
7	<b>Mais dolce</b>	<b>65-68</b>
8	<b>Patate</b>	<b>22-23</b>
9	<b>Frutta (pesche, pere,...)</b>	<b>2,5-6,1</b>
10	<b>Agrumi</b>	<b>35-40</b>
11	<b>Uva</b>	<b>20</b>
12	<b>Olive (sansse vergini)</b>	<b>45</b>

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Biomasse per filiera biogas

### IL comparto agro-industriale QUANTITA' IN GIOCO: (Fonte: stime CRPA)

#### 2. PRODOTTI DI ORIGINE ANIMALE avviati a trasformazione industriale in Italia:

- Oltre 5 milioni di tonnellate di peso vivo animale avviato a macellazione (bovini, suini e avicoli) (2006)



Circa **1 milione di tonnellate di Sottoprodotti di Origine Animale di categoria 3** (oltre al contenuto ruminale, di cat. 2)

- Circa 10-11 milioni di tonnellate di latte trasformato (2006)



Circa **9 milione di tonnellate di SIERO**

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Biomasse per filiera biogas

### POTENZIALITA' del COMPARTO ANIMALE

(Fonte: CRPA-Regione Emilia-Romagna – ProBio 2006)

	<b>BOVINI</b> (% peso vivo)	<b>SUINI</b> (% peso vivo)	<b>AVICOLI</b> (% peso vivo)
<b>Sangue</b>	1,6 – 2,1	2,85	3,5
<b>Contenuto ruminale</b>	4 – 6	---	---
<b>Ossa</b>	--	5,0	--
<b>Materiale misto cat. 3</b>	1,2 – 1,6	3,1	--
<b>Budella/intestini</b>	--	6,25	7,5
<b>Setole e unghia</b>	--	0,71	--
<b>Penne e piume</b>	--	--	6,7
<b>Teste, zampe, colli</b>	--	--	7,5
<b>TOTALE</b>	<b>6,8 - 9,7</b>	<b>17,8</b>	<b>25,2</b>
<b>Resa al macello (%)</b>	<b>56,4</b>	<b>79,8</b>	<b>69,2</b>

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

## Biomasse per filiera biogas



**QUALCHE  
ESEMPIO**

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

## Biomasse per filiera biogas



**Scarti misto di macellazione**



**Scarti di frutta**



**Piselli**

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Biomasse per filiera biogas

### DEIEZIONI ZOOTECNICHE

- **PRODUZIONE REGOLARE e ABBONDANTE!!!**  
(Oltre 100 milioni di t in Italia)
- **IDONEITA' ALLA DIGESTIONE ANAEROBICA LEGATA ALLA SPECIE CONSIDERATA** (e alla soluzione stabul., età, ecc.)
- **BUONA DOTAZIONE di SOSTANZA ORGANICA, BUON POTERE TAMPONE**
- **SCARSA PROPENSIONE AL PAGAMENTO di eventuale TARIFFA DI CONFERIMENTO** in ingresso all'impianto di digestione anaerobica!!!

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

## Biomasse per filiera biogas

### PECULIARITA' SCARTI E SOTTOPRODOTTI INDUSTRIA DELLE "CONSERVE VEGETALI"

- **OTTIMA QUALITA'** (elevata dotazione di sostanza organica, purezza merceologica)
- **UMIDITA' VARIABILE**, tendenzial. **ELEVATA**
- **TENDENZA AD ACIDIFICARE VELOCEMENTE**
- **STAGIONALITA' MOLTO MARCATA** (Conservazione)



**Sezioni di STOCCAGGIO e  
PRETRATTAMENTO** adeguate  
negli impianti che intendono  
ritirarli

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

## Biomasse per filiera biogas

### AGRO-INDUSTRIA e STAGIONALITA' (fonte CRPA)

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
<b>CONSERVE VEGETALI</b>												
Lavorazioni singole												
Pomodoro												
Piselli, fagioli, fagiolini, mais												
Mele e pere												
Pesche e albicocche												
Fanghi di depurazione	Stessa periodicità degli scarti di cui sopra											
<b>CONSERVE ANIMALI</b>												
Sottoprodotti di origine animale (SOA)												
FANGHI DI DEPURAZIONE												
EFFLUENTI ZOO TECNICI												

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

## Biomasse per filiera biogas

### PECULIARITA' SOTTOPRODOTTI INDUSTRIA DELLE "CONSERVE ANIMALI"

- **OTTIMA QUALITA'** (elevata dotazione sostanza organica, NO inquinanti)
- **PRODUZIONE ANNUALE REGOLARE**
- **ELEVATE RESE ENERGETICHE**
- **REQUISITI IGIENICO-SANITARI DA GARANTIRE** ai sensi del Reg. CE 1774/02
- **GESTIONE ALQUANTO DELICATA** (eccesso di azoto, grassi, odori..)

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

## Biomasse per filiera biogas

### Propensione al recupero in DA

	DIGESTIONE ANAEROBICA	Criticità	COMPOSTAGGIO	Criticità
<b>DEIEZIONI ZOOTECNICHE</b>				
- liquami suini e bovini	***	-	NO	-
- letame bovino	**	lettieria	**	umidità
- lettiera avicola	NO	--	**	azoto
- pollina (senza lettiera)	**	azoto, inerti	**	azoto
<b>SOTTOPRODOTTI ANIMALI</b>				
- sangue e altri SOA liquidi	***	pastorizzazione, azoto, grassi	NO	--
- SOA solidi (U< 80-85%)	**	pastorizzazione, azoto, grassi	**	azoto
- siero di latte	***	acidità	NO	--
<b>SCARTI VEGETALI</b>				
- buccette di pomodoro	*	scarsa biodegradabilità	*	scarsa biodegradabilità
- scarti vegetali vari (mais dolce, polpe bietola, ecc.)	***	acidità	***	umidità
<b>FANGHI DEPURAZIONE</b>				
- dal comparto vegetale	**	inerti	**	umidità
- dal comparto animale	**	grassi	**	umidità

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie II – Le biomasse per le bioenergie

\*\*\* ottima  
\*\* buona  
\* scarsa

L.Rossi, Cogenerazione distribuita da biomasse, Ferrara 13 aprile 2010

bioenergie III

# Processi biochimici

Corso: Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili

Anno accademico: 2018/2019

Docente: Mirko Morini

## Agenda

- La digestione anaerobica
  - il processo
  - l'impianto
  - i prodotti
  - le applicazioni
  - il biometano
- La fermentazione alcolica
- Il bioidrogeno

## I processi biochimici

I processi biochimici permettono di ricavare biocombustibili come risultato del metabolismo di funghi, lieviti o batteri che si formano spontaneamente nelle biomasse sotto particolari condizioni o che vengono appositamente inoculati.

I processi biochimici vengono impiegati per le biomasse in cui il rapporto C/N (rapporto tra carbonio ed azoto) è inferiore a 30 e l'umidità alla raccolta è superiore al 30%.

Vengono utilizzati per questi processi

- **colture dedicate** (mais, sorgo, barbabietole, etc.)
- **sottoprodotti culturali** (foglie e steli di barbabietole, ortive, etc.);
- **reflui zootecnici**;
- **scarti di lavorazione** (borlande, acque di vegetazione, fanghi, melassi, etc.).

## Digestione anaerobica

E' un processo che avviene in **assenza di ossigeno** e che consiste nella demolizione, ad opera di micro-organismi, di sostanze organiche complesse contenute nei vegetali e nei sottoprodotti di origine animale, e nella produzione di **biogas costituito abitualmente per il 50-70% circa da metano** e per la restante parte da CO<sub>2</sub>.



Come sottoprodotti si ottengono anche:

- Residui solidi: utilizzati come fertilizzanti (fosforo, potassio, azoto)
- Liquido chiarificato: fertirrigazione

## Il processo

La conversione può variare dal 40 % al 90 % della biomassa immessa. Il tasso di conversione dipende dalla tipologia di substrato (e dalla sua biodegradabilità) e dalle condizioni del processo.

Il processo è svolto da un **consorzio batterico** e comprende una serie di reazioni, la più lenta delle quali determina la velocità di conversione.

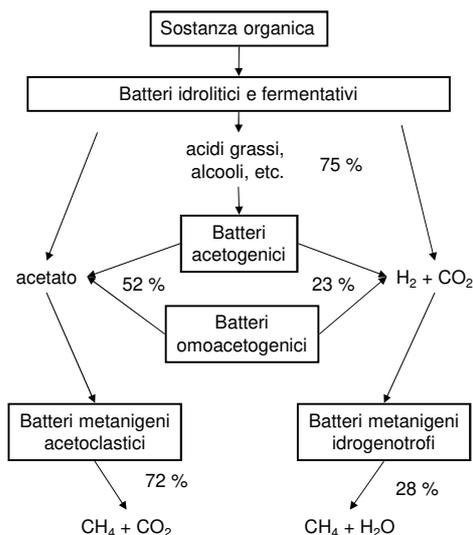
Nessun ceppo batterico è in grado di portare a termine la completa degradazione anaerobica della sostanza organica.

Ciascuna popolazione ha un ruolo ben definito nella demolizione della sostanza organica, producendo come cataboliti (prodotti del metabolismo) degli intermedi della reazione complessiva che fungono da substrato per la popolazione successiva nella catena trofica.

Al termine della reazione si trovano inalterati azoto e fosforo che partecipano in piccola quantità al metabolismo dei microorganismi.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## Il processo



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## I microorganismi

Batteri	Principali ceppi	Azione
Idrolitici	Batteroidi, Clostridium, Ruminococcus, Anaerovibrio, Butyrivibrio, Bacillus	Trasformano le macromolecole organiche in monomeri solubili
Fermentativi	Selomonas, Clostridium, Ruminococcus, Desulfovibrio, Syntrophomonas, Syntrophobacter	Trasformano i monomeri solubili in acidi organici, alcoli, acido acetico, idrogeno e anidride carbonica
Acetogeni	Eubacterium, Acetogenium, Clostridium	Trasformano gli acidi organici e gli alcoli in acido acetico, idrogeno e anidride carbonica
Acetoclasti	Metanosarcina, Metanothrix, Metanoseta	Trasformano l'acido acetico in metano e anidride carbonica
Idrogenofili	Metanobacterium, Metanococcus	Trasformano l'idrogeno e l'anidride carbonica in metano

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## L'idrolisi

L'idrolisi è il processo con il quale si producono piccole molecole solubili dalle grandi molecole organiche .

In particolare:

- i lipidi si trasformano in glicerolo e acidi grassi
- le proteine in aminoacidi
- i carboidrati in monosaccaridi

L'idrolisi è operata da enzimi extracellulari (cellulasi, proteasi, lipasi, etc.) prodotti dai batteri idrolitici.

E' necessario un intimo contatto tra microorganismi e biomassa perché l'idrolisi avvenga efficacemente.

Ciò si ottiene con

- riduzione della pezzatura della biomassa (fino a 2-4 mm)
- elevate concentrazioni di solidi

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

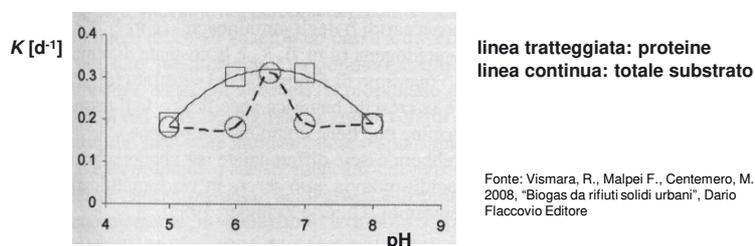
## L'idrolisi

La cinetica di questa fase è del primo ordine

$$r = K \cdot X_S$$

dove  $r$  è il tasso di idrolisi del substrato [ $\text{g m}^{-3} \text{d}^{-1}$ ]  
 $K$  è il tasso massimo di idrolisi [ $\text{d}^{-1}$ ]  
 $X_S$  è la concentrazione di substrato [ $\text{g m}^{-3}$ ]

Il tasso di idrolisi  $K$  è funzione del substrato, della temperatura secondo la legge di Arrhenius e del pH.



## L'acidogenesi

L'acidogenesi è la fermentazione delle molecole organiche semplici con la formazione di acidi grassi volatili (acido propionico, acido butirrico e acido valerico fondamentalmente), di acido acetico, di idrogeno e di anidride carbonica.

Le reazioni sono complesse ed essendo coinvolte molecole organiche di diverse dimensioni i percorsi possibili di degradazione per ogni composto possono essere diversi.

Per esempio il glucosio può avere quattro meccanismi di degradazione

Condizioni	Prodotti
Bassa concentrazione di $\text{H}_2$	Acido acetico
Qualunque conc. di $\text{H}_2$	Acido acetico, acido propionico
Bassa concentrazione di $\text{H}_2$	Acido butirrico
Qualunque conc. $\text{H}_2$	Acido lattico

## L'acetogenesi

L'acetogenesi è il processo attraverso il quale gli acidi volatili vengono trasformati in acido acetico.

Gli acidi grassi a catena lunga e gli acidi grassi volatili vengono degradati da batteri acetogeni idrogenoproduttori obbligati che producono acido acetico, anidride carbonica e idrogeno.

Anche la fase di acetogenesi, come quella della metanogenesi, è da considerarsi un passaggio fondamentale e critico del processo di digestione anaerobica.

Per questo motivo va monitorata la presenza di acidi grassi, in quanto una loro elevata concentrazione è sintomo di squilibrio del processo.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## La metanogenesi

La metanogenesi è il processo di produzione del metano e può avvenire in forma idrogenotrofa o acetoclastica.

Metanogenesi idrogenotrofa	Metanogenesi acetoclastica
$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$

La metanogenesi è la fase più critica del processo di digestione anaerobica in quanto

- è caratterizzata da una bassa velocità di crescita dei batteri
- è fortemente inibita da pH acidi.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## I parametri limitanti del processo

I parametri limitanti o inibenti del processo sono:

- il pH: è il parametro di maggior rilievo per il controllo e l'ottimizzazione della digestione anaerobica. L'effetto più marcato è sui batteri metanigeni. L'acidogenesi e l'acetogenesi sono favorite a pH di 5-5.5, mentre i batteri metanigeni sono attivi tra 6.8 e 8.2 (a pH inferiori a 6 l'attività è compromessa e sono necessarie settimane per recuperare)
- ammoniaca: la metanogenesi risulta inibita da elevate concentrazioni di ammoniaca indissociata favorite da pH basici.
- metalli, sostanze alogenate, chetoni, pesticidi, antibiotici (presenti nei reflui zootecnici in particolare),

## Gli oligoelementi

Elemento	Funzione nella cellula
Cr	Metabolismo del glucosio
Co	Contenuto nella vitamina B12 come cofattore
Cu	Pigmenti
Mn	Cofattore per molti enzimi
Ni	Cofattore nella deidrogenasi del monossido di carbonio e nell'ureasi
Se	Cofattore per l'idrogenasi
W	Cofattore per alcune formiato deidogenasi
V	Cofattore per le nitrogenasi
Zn	Cofattore per RNA e DNA polimerasi
Fe	Cofattore per citocromi, catalasi, perossidasi e altri
B	Cofattore per enzimi
Si	Elemento strutturale per i gusci delle diatomee

## I tipi di processo

A seconda del regime termico nel quale i batteri operano, il processo di digestione anaerobica può essere classificato in

	Psicrofilia	Mesofilia	Termofilia
Temperatura ottimale e range (°C)	22 (7 - 25)	35 (25 - 42)	60 (49 - 72)
Carico organico volumetrico (kg <sub>TVS</sub> /m <sup>3</sup> /d)	> 0.1	2.5 – 3.5	< 17.7
Tempo di ritenzione idraulica (d)	> 50	20-40	5-20
Produzione di biogas (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	Cresce con la temperatura		
Efficienza di conversione (% TVS)	25	35-45	45-55

Industrialmente trovano principalmente impiego i processi mesofili e termofili.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## I tipi di processo

Altre classificazioni possono essere fatte tenendo conto

- del contenuto di solidi nel reattore:
  - processo umido (5-8 % solidi totali)
  - processo semi-secco (8-20 %)
  - processo secco (> 20 %)
- delle fasi biologiche:
  - fase unica (il processo avviene in un solo reattore)
  - fasi separate (le fasi idrolitica e fermentativa sono separate da quella metanogenica)
- della modalità operativa:
  - reattore continuo (questo tipo di reattori dovrebbe essere alimentato in continuo per ottimizzare la resa, ma per motivi pratici è alimentato una volta al giorno generalmente)
  - reattore batch

La scelta del tipo di processo e della configurazione impiantistica dipende sostanzialmente dalle biomasse che si intendono utilizzare come substrato.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## La codigestione

La digestione anaerobica agli inizi è stata applicata principalmente per il trattamento di reflui zootecnici o fanghi. Vista l'incentivazione della produzione di energia da biomasse si è pensato ad un aumento del rendimento del processo con l'utilizzo di altri substrati.

Le matrici più utilizzate in codigestione con effluenti zootecnici sono gli scarti organici agroindustriali e le colture energetiche.

Tra gli scarti alcuni (percolati, acque reflue, fanghi, olii, grassi e siero) sono facilmente degradabili e non richiedono particolari pretrattamenti, mentre altri (quali scarti di macellazione e sostanze ad alto contenuto proteico) necessitano di essere fortemente diluite con gli effluenti zootecnici in quanto possono formare ammoniaca, che è un inibitore del processo di digestione.

La codigestione riduce il rischio di carenze di oligoelementi.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## Alcune definizioni

**Solidi totali (TS):** il contenuto in sostanza secca di un campione, determinato per essiccamento in stufa a 105 °C per 24 ore. Rappresentano, in prima approssimazione, la somma della frazione organica e di quella inerte del substrato.

**Solidi volatili totali (TVS):** solo la frazione di sostanza secca che risulta volatilizzata per riscaldamento a 550 °C fino a peso costante. Questi rappresentano, in prima approssimazione la frazione organica della sostanza secca, calcolata come differenza dei valori di TS e TFS (solidi totali fissi) che rappresentano la frazione inerte, costituita per lo più, da composti inorganici, misurata per pesata dopo il trattamento a 550 °C.

**Domanda chimica di ossigeno (COD):** è la quantità di ossigeno consumato per l'ossidazione della sostanza organica, determinata attraverso l'utilizzo di un forte agente chimico ossidante ( $K_2Cr_2O_7$ ) in ambiente acido.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## Le biomasse

Tipo di materiale	Contenuto di s.s. (%)	Sostanza organica (% s.s.)	N <sub>tot</sub> (% s.s.)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (% s.s.)	K <sub>2</sub> O (% s.s.)	Mg (% s.s.)	C/N	Resa di CH <sub>4</sub> Ndm <sup>3</sup> /kg sostanza organica
<b>Allevamenti</b>								
liquame bovino	6-11	68-85	2,6-6,7	0,5-3,3	5,5-10	0,3-0,7	10-17	260
letame bovino	11-25	65-85	1,1-3,4	1,0-1,5	2-5	1,3	14-25	300
liquame suino	2,5-9,7	60-85	6-18	2-10	3,0-7,5	0,6-1,5	5-10	450
letame suino	20-25	75-90	2,6-5,2	2,3-2,8	2,5-3		9-16	450
liquame avicolo	10-29	75-77	2,3-6,0	2,3-6,2	1,2-3,5	0,4		400
letame avicolo	32,0-32,5	70-80	5,4	3	2,7		18	500
letame ovino	25-30	80	2,1	1,2-1,7	1			400
letame equino	28	75						
<b>Agricoltura</b>								
insiliato d' erba	26-82	67-98	3,5-6,9	0,38-0,76				500
fieno	86-93	83-93	2,0-2,1	0,19-0,33				500
trifoglio	20	80	2,8	0,7	3		12	500
paglia	85-90	85-89	0,5	0,2-0,4	1,0-2,3		70-165	600
stocchi di mais	96	72	1,2	0,5	1,7		30	700
fogli di rapa	15-18	78-80	2,0-2,5	0,5-1,1	4,0-4,7	0,72	15-16	500
piante di patata	25	79	1,5	0,5	2,9		16-25	600
fogliame miscanthus	85	82	1	0,1	0,2		50	400
								495

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

<http://ecolecno.webnode.com>

## Le biomasse

Tipo di materiale	Contenuto di s.s. (%)	Sostanza organica (% s.s.)	N <sub>tot</sub> (% s.s.)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (% s.s.)	K <sub>2</sub> O (% s.s.)	Mg (% s.s.)	C/N	Resa di CH <sub>4</sub> Ndm <sup>3</sup> /kg sostanza organica
<b>Agro - industria</b>								
scarti mele	2,0-3,7	94-95	5-13	0,73	6,4	0,4-0,7	6	330
scarti patate	12-15	90	6,0-9,9	3,6-6,0			3-9	250
scarti frumento	3-5	96-98	1,1	0,3		0,9	30	450
vinacce di melia	25	86	1,0-1,2	0,5-0,6	1,2-1,5	0,1	30-50	400
vinacce di frutta	40-50	30-93	1,5-3,0	0,8-1,7	3,4-5,4	0,15	20-30	380
vinacce di uva	40-50	80-95	4,0-5,0	1,5	1,2		9-10	300
trabbia di birra	21-15	66-95	1,5	0,3			14-27	300
melasse	80	95	1,5	0,8-1,8			27	330
siero	4,3-6,5	80-92	0,7-1,5	0,8	1,1		15	400
scarti di verdura	5-20	76-90	3-5	0,3	1,2		41	
scarti di semi di olio	92	97	1,4					
<b>Scarti verdi e di macellazione</b>								
raccolta differenziata verde	40-75	30-70	0,5-2,7	0,2-0,8	0,3-0,8	0,2	25-80	600
fanghi macellazione	11,7	87-93	3,3-4,3	0,3-2	2-9	0,6	12-27	800
grassso	5-24	83-98	3,2-8,9	0,9-3,0	0,06-0,2	0,1-0,5		800
intestini (non trattati)	2-70	69-99	0,1-3,6	0,1-0,6	0,1-0,5	0,1	17-21	1100
intestini (pressati)	11-19	80-90	1,3-2,2	1,1-1,6	0,5-0,6		11-20	400
farina di carne	20-45	90	1,5	1	0,3-0,5		2,5-5	1000
farina di sangue	90	80	8-12	2-5	0,6		4	900
urnido da RSU	9-37	74-98	0,6-5,0	0,3-1,5	0,3-1,2	0,04-0,18	15-21	700
fanghi di depurazione sanque liquido	18	95,6						525
								685

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

<http://ecolecno.webnode.com>

## Le biomasse

Substrato	ST [%]	SV [% ST]	N % ST	Resa in biogas		Tenore di CH <sub>4</sub> [Vol.-%]	N kg/t tal quale
				m <sup>3</sup> /t tal quale	m <sup>3</sup> /t SV		
<b>Reflui zootecnici</b>							
liquame bovino	8-11	75-82	2,6-6,7	20-30	200-500	60	4,42
liquame suino	ca. 7	75-86	6-18	20-35	300-700	60-70	8,40
letame bovino	ca. 25	68-76	1,1-3,4	40-50	210-300	60	5,63
letame suino	20-25	75-80	2,6-5,2	55-65	270-450	60	8,78
deiezioni avicole solide	ca. 32	63-80	5,4	70-90	250-450	60	17,28
<b>MAPROV (materia prima di origine vegetale)</b>							
silomais	20-35	85-95	1,1-2	170-200	450-700	50-55	4,26
segale integrale	30-35	92-98	4	170-220	550-680	ca. 55	13,00
barbabietole da zucchero	23	90-95	2,6	170-180	800-860	53-54	5,98
colletto e foglie di barbabietola	16	75-80	0,2-0,4	ca. 70	550-600	54-55	0,48
erbasilo	25-50	70-95	3,5-6,9	170-200	550-620	54-55	19,50

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## La misura della biodegradabilità

A partire dalla composizione del substrato si possono avere indicazioni sommarie a riguardo della produzione di biogas, ma l'effettiva capacità di degradazione del substrato da parte del consorzio microbico è difficile da prevedere, soprattutto in caso di miscele di diversi substrati.

In condizioni reali non tutto il contenuto di sostanza organica presente nella matrice viene effettivamente convertito in biogas principalmente perché

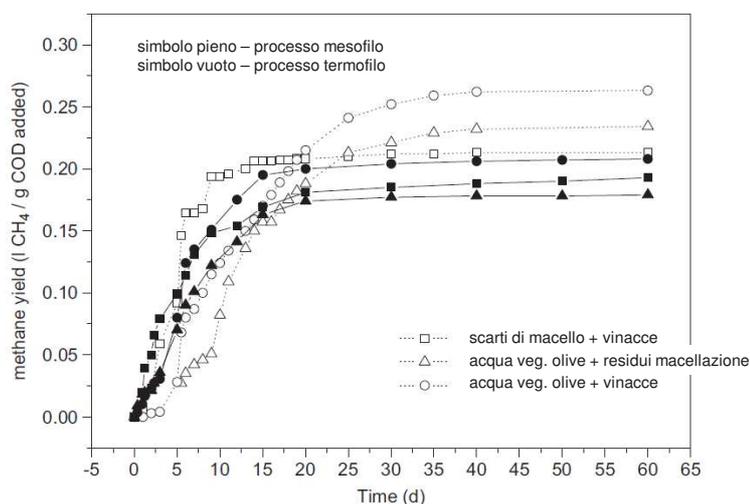
- la sintesi di nuovi microorganismi sottrae il 5-10 % del substrato
- alcune sostanze (come la lignina) non possono essere idrolizzate e quindi digerite
- il tempo di digestione è finito, quindi la digestione è incompleta
- le condizioni effettive possono essere diverse da quelle ottimali

Per questo motivo si devono fare delle prove di metanizzazione ad hoc sul substrato che si intende digerire.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## Le curve di produzione BMP

Il BMP è il potenziale biochimico di metanizzazione.



M.S. Fountoulakis, S. Drakopoulou, S. Terzakis, E. Georgaki, T. Manios, 2008, Potential for methane production from typical Mediterranean agro-industrial by-products, Biomass & Bioenergy

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## Parametri di gestione

**Tempo medio di residenza idraulico (HRT):** è definito come il rapporto tra il volume del reattore considerato e la portata di alimentazione al reattore. Esso rappresenta il tempo di permanenza di ogni elemento di fluido all'interno di un reattore. Ciò è vero in senso stretto per i soli reattori ideali, mentre nel caso dei reattori reali assumerà il senso di tempo di permanenza medio per i vari elementi di fluido, che permarranno tempi diversi all'interno del reattore in relazione alla sua geometria e ad altri parametri caratteristici del reattore.

**Tempo medio di residenza dei fanghi (SRT):** è dato dal rapporto tra la massa totale di solidi volatili presenti nel reattore e la portata di solidi estratta dal reattore. Se la quantità di microorganismi prodotta per crescita cellulare è pari alla quantità estratta dal reattore la concentrazione di microorganismi attiva all'interno rimane costante nel tempo e si parlerà di condizioni di stato stazionario. Anche in questo caso valgono le considerazioni riportate per l'HRT in relazione al reattore ideale o reale.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## Il carico organico volumetrico

Il carico organico volumetrico (COV o anche ORL) di substrato applicato al reattore è definito come la quantità di substrato entrante nel reattore riferita all'unità di volume del reattore stesso ed al tempo. Questo parametro viene di norma calcolato sulla base del volume utile del reattore e può essere riferito a diverse unità di misura utilizzate per esprimere la concentrazione di biomassa (TS, TVS, COD).

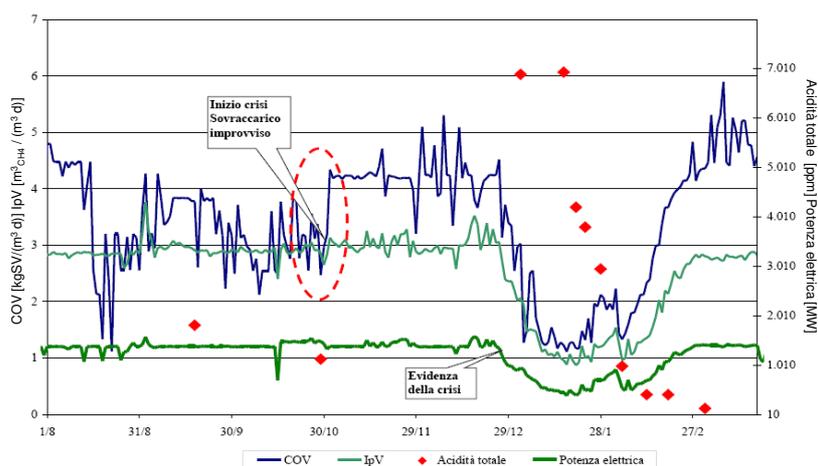
$$COV = \frac{Q \cdot S}{V}$$

Q è la portata di substrato

S è l'indice di concentrazione di sostanza organica (TS, TVS, COD)

V è il volume del digestore

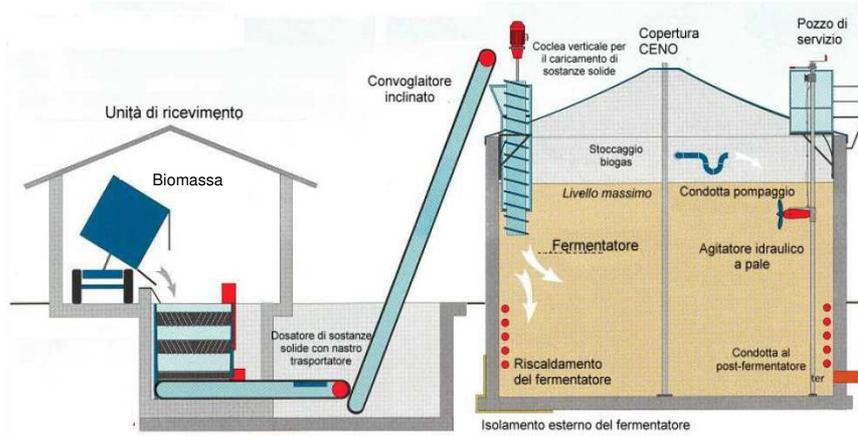
## Il controllo del processo



Fonte: C. Fabbri, "Biogas: i parametri tecnico economici per lo studio di fattibilità", Atti corso di formazione "Lo sviluppo delle bioenergie", Modulo II, Milano 12-14 maggio 2009

# Il digestore

## Il reattore completamente miscelato (CSTR)



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

Fonte: L.Rossi, S.Piccinini, "Lo stato dell'arte e le prospettive di sviluppo", Atti corso di formazione "Lo sviluppo delle bioenergie", Modulo II, Milano 12-14 maggio 2009

# Il digestore



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

Presentazione Biogas-Nord, Vegetalia 2009

## I sistemi di miscelamento

La movimentazione dovuta all'immissione del nuovo substrato, alla convezione termica e alla risalita delle bolle di biogas non è sufficiente a garantire un corretto miscelamento della biomassa.

Inoltre si può avere una stratificazione con sostanze che galleggiano o sedimentano.

Esistono diversi tipo di sistemi di miscelamento (meccanici, pneumatici o idraulici), i più utilizzati sono quelli meccanici:

- agitatori a movimento lento con braccia e pale che operano in continuo con basso consumo energetico;
- agitatori a media velocità che operano in modo intermittente o continuo con modesto consumo energetico;
- agitatori intensi ad alta velocità ed elevato consumo energetico, che vengono accesi di frequente per brevi periodi di tempo (es. ogni 3 ore per 15 minuti).

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## I sistemi di miscelamento



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## I sistemi per il carico dei reflui



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergia III – Processi biochimici

Presentazione Biogas-Nord, Vegetalia 2009

Usati per substrati con SS fino al 12 %.

## I sistemi di carico della biomassa

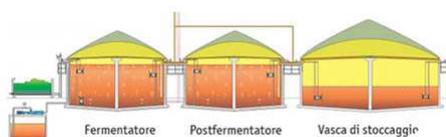


Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergia III – Processi biochimici

Usati per substrati con SS tra il 25 % e il 40 %.  
E' bene siano in grado di sminuzzare e dosare.

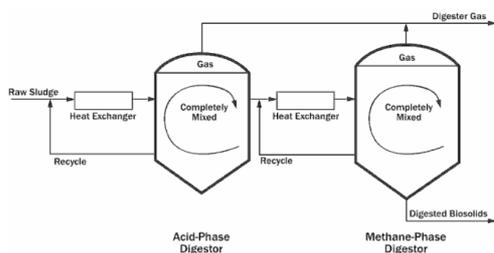
## Il digestore

### Il reattore a due stadi



In entrambi i reattori avviene lo stesso processo, ma i due reattori possono avere tempi di ritenzione diversi.

### Il reattore a fasi separate



Nei due reattori avvengono processi diversi. La fase acidogena avviene nel primo reattore, mentre la metanigena nel secondo. Questo permette di ottimizzare i parametri di processo per ogni fase.

I. S. Turovskii, P.K. Mathai, 2003, Wastewater sludge processing, Wiley

## Il digestore

### Il reattore plug-flow



Ha il vantaggio di poter elaborare substrati con elevata presenza di solidi e garantisce il tempo di ritenzione (maggiore resa). Lo svantaggio è che non può essere usato con substrati con solidi inferiori all'11 % (sedimentazione dei solidi e stratificazione termica) e generalmente richiede un secondo stadio di digestione.

## Il digestore plug-flow

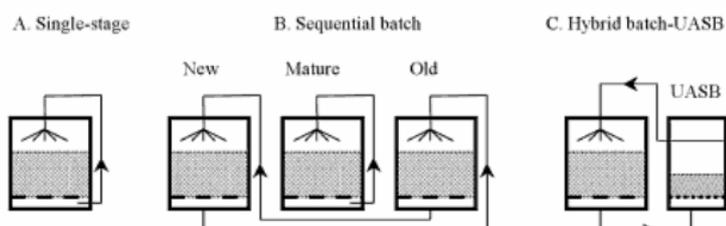


Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

Presentazione Biogas-Nord, Vegetalia 2009

## Il digestore

### Il reattore batch



J. Mata-Alvarez, 2003, Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes, IWA

Il reattore viene riempito con il materiale organico ad elevato contenuto di sostanza solida (circa 30-40 %) e viene inserito un inoculo. Il processo prosegue fino all'esaurimento del substrato. Il percolato viene continuamente ricircolato. Ha il vantaggio di applicare una tecnologia semplice e robusta, con un processo affidabile, economico e con scarsa necessita di acqua. Gli svantaggi sono le rese in biogas ridotte, i bassi COV applicabili e la necessita di elevate superfici per l'impianto.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## Il digestore batch



Presentazione Biogas-Nord, Vegetalia 2009

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## Il dimensionamento del digestore

Il dimensionamento del digestore deve garantire allo stesso tempo che:

- il tempo di permanenza dei batteri sia superiore, con adeguato coefficiente di sicurezza, al tempo di generazione della popolazione a più lenta crescita nelle condizioni operative di processo (nei reattori CSTR il tempo di residenza dei batteri coincide con il tempo di residenza idraulico). Questa condizione garantisce che all'interno del digestore ci siano sempre tutti i batteri necessari al processo;
- la quantità di substrato che il reattore è in grado di degradare nell'unità di tempo deve essere superiore, sempre con un adeguato fattore di sicurezza, al carico di substrato alimentato nel reattore.

Con queste premesse i criteri di dimensionamento sono due:

1. parametrico, in base al COV e al tempo di residenza HRT;
2. cinetico, in base ai parametri cinetici e stechiometrici specifici e riferiti al/ai substrati alimentati.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## Il dimensionamento del digestore

Il dimensionamento parametrico è quello di più ampio e generale utilizzo.

Noto il COV e la massa di substrato da alimentare per unità di tempo  $M_s$  si calcola il volume come

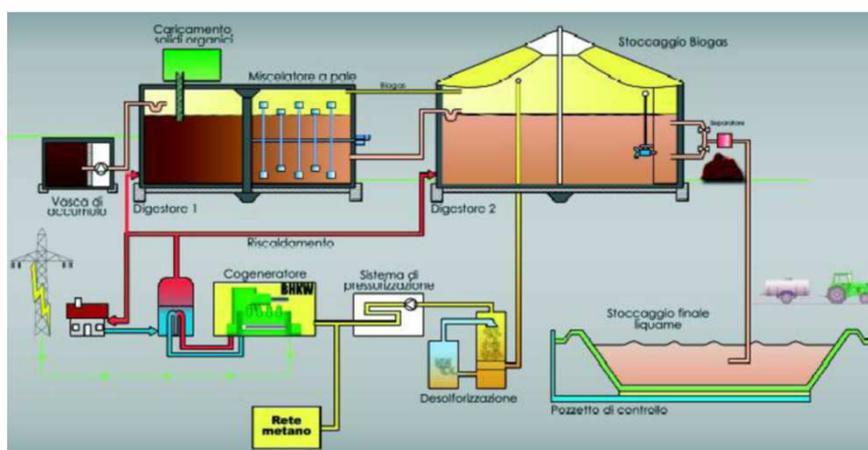
$$V' = M_s / \text{COV}$$

Allo stesso tempo, noto il volume di substrato da alimentare nell'unità di tempo  $Q_s$  e il tempo di residenza necessario alla degradazione HRT il volume è dato dalla relazione

$$V'' = Q_s \cdot \text{HRT}$$

Il maggiore dei due volumi calcolati è quello da utilizzare nel dimensionamento.

## L'impianto per la digestione



## Stoccaggio substrati



Lo stoccaggio avviene perlopiù in sili verticali per cereali in granella e prodotti liquidi sfusi e in sili orizzontali per cereali/foraggi insilati.

Le strutture di insilamento possono essere utilizzate anche per lo stoccaggio temporaneo di sottoprodotti agroindustriali.

Il dimensionamento delle strutture di stoccaggio dipende

- dalla quantità di biomassa necessaria;
- dalla disponibilità nel tempo delle biomasse;
- perdite per stoccaggio.

## Stoccaggio substrati

Il dimensionamento delle strutture di stoccaggio dipende

- dalla quantità di biomassa necessaria;

$$Q_{biomassa} = \frac{V_{CHP} \cdot 24 \cdot 365}{SV \cdot R \cdot (1 - \eta)}$$

portata volumetrica oraria metano (pointing to  $V_{CHP}$ )  
 solidi volatili nella biomassa (pointing to  $SV$ )  
 resa in metano (pointing to  $R$ )  
 sostanza volatile persa per conservazione (pointing to  $(1 - \eta)$ )

## Stoccaggio substrati

Il dimensionamento delle strutture di stoccaggio dipende

- dalla disponibilità nel tempo delle biomasse;

$$V_{stoccaggio} = \frac{Q_{biomassa} \cdot t}{365 \cdot \rho}$$

intervallo di tempo maggiormente limitante (13 mesi per impianti che funzionano con solo insilato di mais)

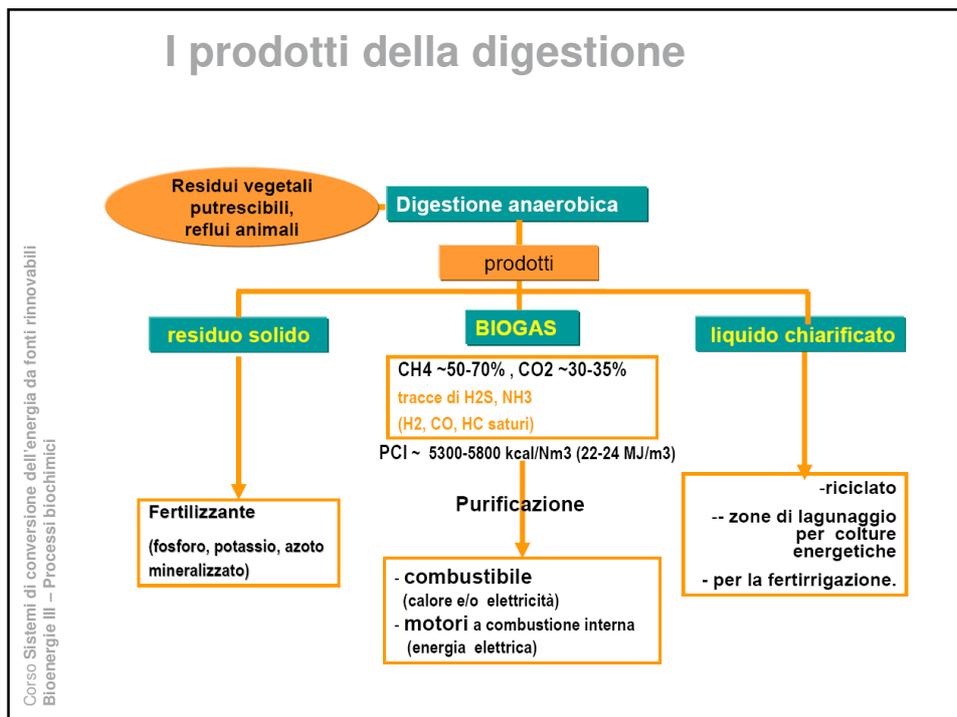
densità del prodotto stoccato

## Stoccaggio substrati

Il dimensionamento delle strutture di stoccaggio dipende

- perdite per stoccaggio: dipendono da molteplici effetti e possono variare dal 5-7 % al 30-40 % qualora durante la conservazione e la preparazione del silo non venissero osservate le buone pratiche

Causa	Stima	Perdita [%]
Respirazione	Inevitabile	1-2
Fermentazione	Inevitabile	4-10
Percolamenti	In funzione del tipo di substrato	0-7
Fermentazione anomala	Evitabile	0-10
Condizioni aerobie in silo	Evitabile	0-10
Condizioni aerobie al desilamento	Evitabile	0-40
Perdite totali		5-40



## I contaminanti del biogas

Il biogas è una miscela gassosa composta principalmente da metano ed anidride carbonica, ma anche da altri composti che possono dare problemi nella reazione di combustione del biogas

- composti solforati (principalmente  $H_2S$ ) – possono provocare corrosione per le fasce elastiche dei pistoni e le camicie dei cilindri nei motori a combustione interna
- composti alogenati - formano acidi molto corrosivi per le condutture e i componenti del motore e possono portare alla formazione di diossine
- ammoniaca – può formare acido nitroso
- composti del silicio e silossani – provocano depositi solidi di silicio che sono abrasivi e determinano usura
- particolato solido
- composti organici volatili, idrocarburi leggeri e policiclici aromatici
- metalli (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Sn, Zn)

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## La deumidificazione del biogas

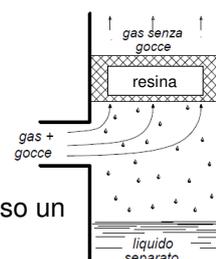
Il biogas naturalmente è umido.

Prima di entrare nel sistema energetico e comunque per evitare problemi alle condutture e ai serbatoi di stoccaggio l'umidità deve essere asportata.

In genere l'essiccazione del biogas avviene tramite il raffreddamento a temperature prossime ai 2-3 °C del biogas stesso in scambiatori di calore gas/acqua. Con questo processo anche i silossani e i composti alogenati vengono parzialmente rimossi.

Per questa applicazione l'acqua deve essere è refrigerata mediante un frigorifero ad azionamento elettrico a temperature prossime a 0 °C.

Il biogas raffreddato viene poi fatto passare attraverso un filtro a coalescenza in modo che le gocce d'acqua vengano asportate e il biogas essiccato possa raggiungere il sistema energetico.



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## La desolfurazione del biogas

Un metodo per ridurre la produzione di acido solfidrico è la desolfurazione biologica interna al digestore con immissione diretta di aria nella parte alta del digestore stesso.

Per quanto il dosaggio di aria sia di circa 5÷10% del gas, (quindi al di fuori del limite superiore di esplosività del metano) e sia regolato da un sensore di ossigeno che controlla la portata di aria della soffiante è problematica per motivi di sicurezza (ad es. per la possibile presenza di idrogeno).

Un altro metodo di prevenzione si basa sull'aggiunta di composti chimici, quali sali di ferro, direttamente all'interno del digestore.

L'acido solfidrico comunque prodotto deve essere eliminato poi dalla corrente gassosa.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## La desolfurazione del biogas

In genere si utilizza uno scrubber. Il processo si basa sull'assorbimento.

La sostanza da rimuovere viene trasferita dalla fase gassosa alla fase liquida nella quale si dissolverà in un opportuno sorbente o solvente (in questo caso soluzioni di glicole etilenico, carbonato di propilene, alchilammine, idrossido di sodio).

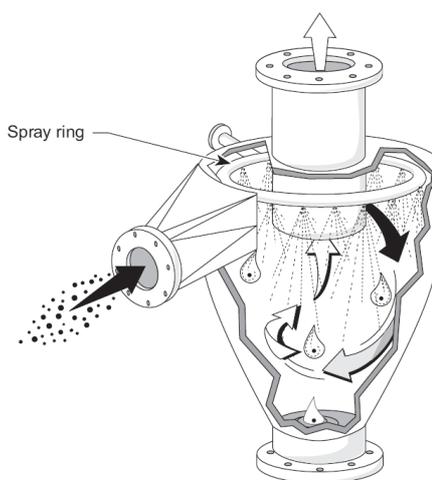
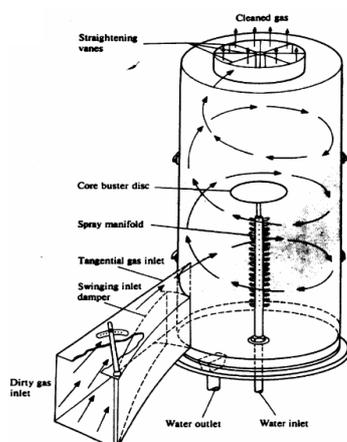
Nella torre di lavaggio per aumentare la superficie di interfaccia liquido/gas e l'efficienza di assorbimento vengono previsti dei riempimenti

biogas grezzo



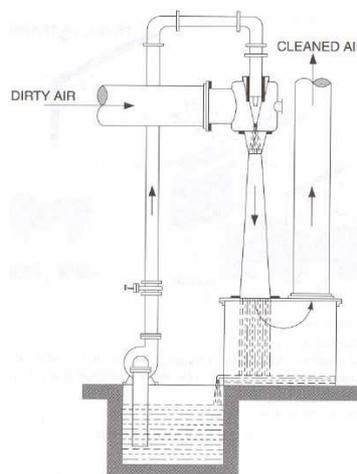
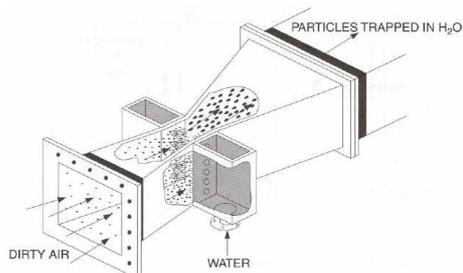
## Scrubber a ciclone

Aiuta nella rimozione del particolato. E' necessario però separare i solidi dal liquido per rigenerarlo e riutilizzarlo.



## Venturi scrubber

Sistema molto compatto, ma il gas deve essere “energizzato” e quindi è necessario un compressore o una soffiante.



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## La pulizia del biogas

### Rimozione H<sub>2</sub>S

Desolforazione biologica o chimica

Scrubber a umido

Scrubber a secco

Scrubber con solventi

Adsorbimento su carboni attivi

### Rimozione composti alogenati

Scrubber a umido

Scrubber con solventi

Separazione con membrane

Adsorbimento (PSA)

Setacci molecolari

Trattamento criogenico

Liquefazione CO<sub>2</sub>

### Rimozione silossani

Adsorbimento su carboni attivi con raffreddamento (scambiatore di calore, chiller o trattamento criogenico)

Lavaggi ad acqua

Additivi

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

Deed C. et al., 2004, Guidance on gas treatment technologies for landfill gas engines, UK Environment Agency

## Il trattamento del biogas



Sezione di trattamento del biogas per un impianto della potenza di circa 1 MW

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## L'uso agronomico del digestato

Del digestato, cioè di quello che rimane dal processo di digestione anaerobica di biomasse, può essere fatto un uso agronomico (anche in agricoltura biologica reg. CE 889/2008 del 5 settembre 2008 e successive modifiche).

Sottoponendo il digestato a separazione solido/liquido si possono ottenere due frazioni:

- chiarificata: fertilizzante a buona disponibilità di azoto. Contiene un'elevata percentuale di azoto ammoniacale sull'azoto totale, rapporto N/P non sbilanciato verso il fosforo.
- solida: buone proprietà ammendanti. Concentra in se la sostanza organica del digestato e contiene un'elevata percentuale di azoto organico sull'azoto totale.

Lo spargimento del digestato è vincolato dal dosaggio massimo di azoto per unità di superficie definito dalla Direttiva Nitrati in 170 kg/ha per i suoli classificati "vulnerabili ai nitrati" e 340 kg/ha per gli altri suoli.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## La separazione solido/liquido

A seconda della percentuale di sostanza solida presente nel digestato diversi sistemi possono essere utilizzati per la separazione solido/liquido.

Per una separazione della parte più grossolana si possono utilizzare vagli statici, vibranti o rotativi.



Per una separazione più fine si utilizzano dei bacini di sedimentazione, delle centrifughe, dei separatori meccanici o meccanico-chimici (con utilizzo di additivi).



Tra i separatori meccanici, i più utilizzati sono il separatore a coclea, il separatore cilindrico con controrulli e la nastropressa.

## L'uso agronomico del digestato



Fertirrigazione con frazione chiarificata del digestato

Spargimento della parte palabile del digestato



Riduzione dell'impiego di fertilizzanti chimici.

## Rimozione dell'azoto

La digestione anaerobica permette di rimuovere gran parte del carbonio organico dalla biomassa, mentre il contenuto minerale e l'azoto rimangono nel digestato.

L'azoto viene trasformato nella gran parte da azoto organico in azoto ammoniacale e lo si ritrova nella frazione liquida del digestato. Questo azoto può essere un problema in determinati contesti, e può impedire lo spargimento a suolo del digestato.

Può essere necessario quindi provvedere alla sua rimozione

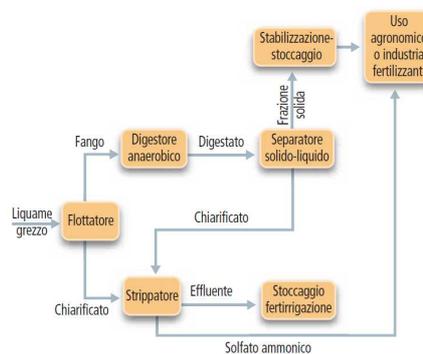
- processi di rimozione biologica dell'azoto: sono processi che si basano sull'azione di batteri che ossidano a nitrito l'azoto ammoniacale
- processo ANAMMOX: è un processo per l'ossidazione dell'azoto ammoniacale ad azoto gassoso.

## Lo stripping dell'azoto

I trattamenti illustrati nella diapositiva precedente consentono una riduzione più o meno spinta dell'azoto del liquame, ma presentano la contropartita di avere elevati consumi energetici.

La tecnica dello stripping per insufflazione d'aria prevede il passaggio dell'ammoniaca, presente nella frazione chiarificata del digestato in soluzione acquosa, all'aria in forma gassosa.

Il flusso gassoso così prodotto viene intercettato in un dispositivo (tipicamente uno scrubber) che cattura l'ammoniaca presente, per contatto con una soluzione acida, in modo da produrre un sale di ammonio stabile.



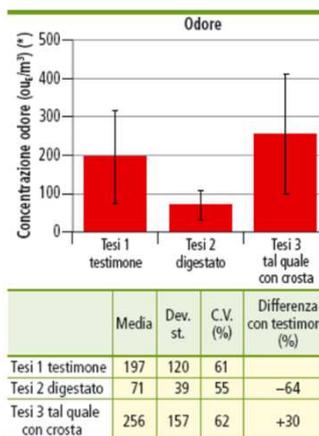
## Riduzione dell'odore

Tra i vantaggi dell'applicazione della digestione anaerobica ai reflui zootecnici c'è anche quello della riduzione delle emissioni odorose

Tesi 1 (testimone). Liquame proveniente da allevamento con stabulazione libera a cuccette con materassino, stoccaggio in vasca scoperta, senza digestione anaerobica.

Tesi 2. Liquame digerito anaerobicamente, proveniente da allevamento con stabulazione libera a cuccette con materassino, impianto di digestione anaerobica e successivo stoccaggio in vasca.

Tesi 3. Liquame proveniente da allevamento con stabulazione libera a cuccette con paglia, assenza di digestione anaerobica e stoccaggio in vasca.

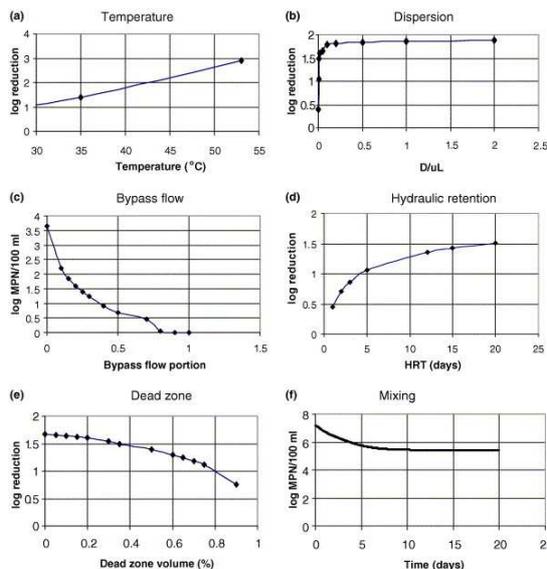


(\*) ou = odour unit europea (perché normata dalla norma europea) è l'unità di misura della concentrazione di odore. 1 ou (soglia olfattiva) corrisponde alla miscela di odoranti che diluita in 1 m<sup>3</sup> di aria neutra produce una sensazione olfattiva appena percettibile.

Fonte: L'Informatore Agrario • 43/2008

## Riduzione dei patogeni

La digestione anaerobica permette la stabilizzazione e l'abbattimento della carica microbica dei materiali di partenza riducendo i rischi sanitari relativi allo spargimento di reflui zootecnici.



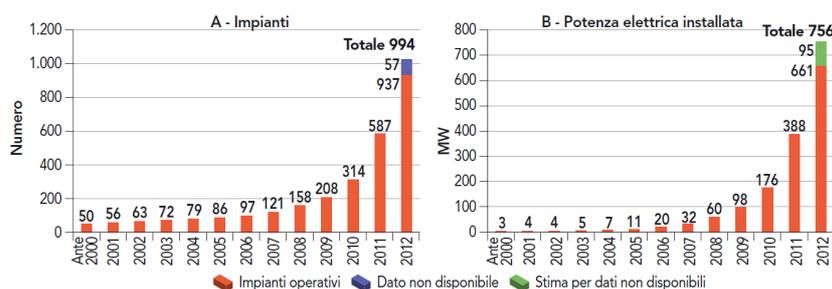
S.R. Smith, N.L. Lang, K.H.M. Cheung and K. Spanoudaki, 2005, Factors controlling pathogen destruction during anaerobic digestion of biowastes, Waste Management

## La diffusione in Italia

Nel 2012 il CRPA ha identificato 994 impianti.

- Circa il 62 % opera in co-digestione di effluenti zootecnici con colture energetiche (mais, sorgo...) e residui dell'agroindustria;
- Il 75 % circa degli impianti è localizzato in Lombardia, Emilia-Romagna, Piemonte e Veneto.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici



11/2013 • supplemento a L'Informatore Agrario

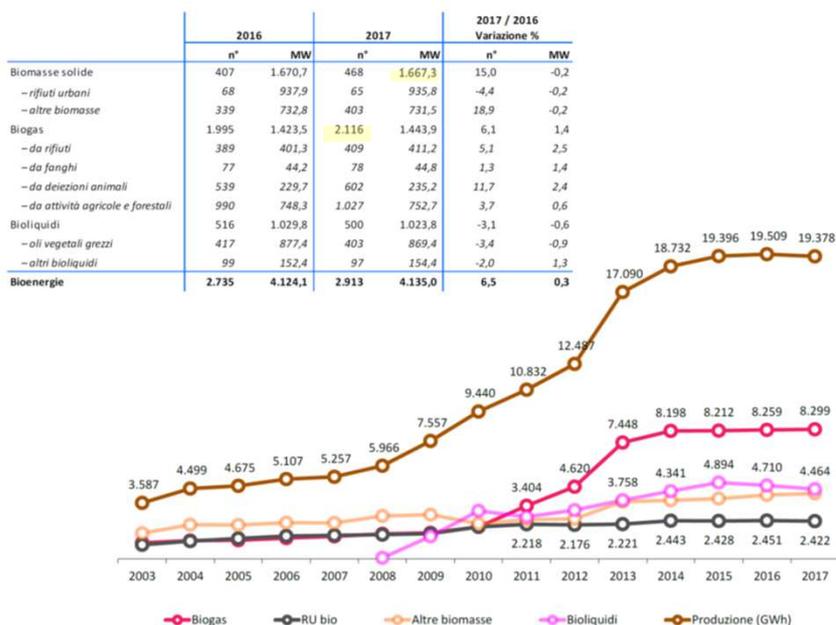
## La diffusione in Italia

Classe di potenza elettrica installata (kWe)	Potenza elettrica installata (sul totale)						Incremento 2012/2011 (%)
	marzo 2010		maggio 2011		dicembre 2012		
	MWe	%	MWe	%	MWe	%	
≤ 100	1,4	0,9	2,8	0,8	3,9	0,6	37,4
101-500	20,1	13,7	31,6	9,0	60,6	8,7	91,6
501-1.000	92,0	62,6	272,5	77,9	588,2	84,8	115,8
> 1.000	33,4	22,7	42,7	12,2	41,3	5,9	-3,1
<b>Totale</b>	<b>147</b>	<b>100</b>	<b>350</b>	<b>100</b>	<b>694</b>	<b>100</b>	<b>98,5</b>

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

11/2013 • supplemento a L'Informatore Agrario

## La diffusione in Italia



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## Applicazioni

Az. agr. Mengoli, Castenaso (BO) – Impianto di codigestione installato presso un allevamento bovino: 2 motori a combustione interna per una potenza complessiva di 355 kW.



Fonte: supplemento a L'Informatore Agrario • 38/2008

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## In commercio

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici



### MT-ENERGIE Italia

Il gruppo MT-ENERGIE ha realizzato in tutta Europa oltre 250 progetti di biogas, di potenze che vanno da 100 kW fino a 2.4 MW. La sede della consociata italiana è a Conselve (Pd).



### EnviTec Biogas

Società tedesca quotata a Francoforte tra le maggiori fornitrici di impianti per la digestione anaerobica a livello internazionale.

## In commercio

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici



### Schmack Biogas

E' l'azienda "pioniera" nel campo della digestione anaerobica. Fondata nel 1995 ha maturato un'esperienza consolidata con oltre 240 impianti realizzati.



### Biotec Sistemi

Progetta e fornisce impianti "chiavi in mano" per il trattamento di RSU, FORSU, rifiuti organici di ristoranti, mense, mercati ortofrutticoli o industrie alimentari e di liquami zootecnici.

## L'upgrading del biogas

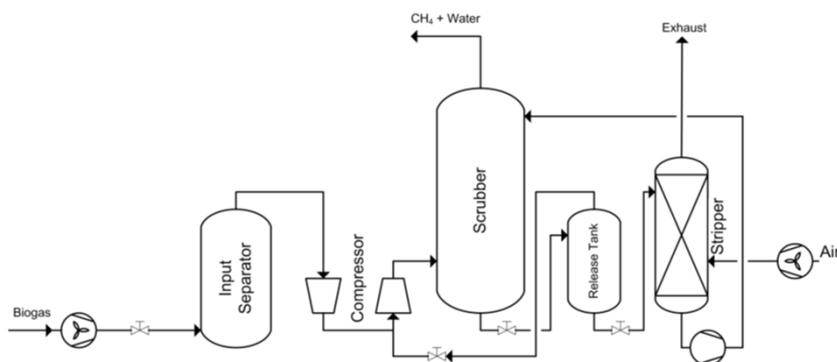
L'upgrading del biogas consiste nell'eliminazione dell'anidride carbonica e nella compressione del gas metano risultante al fine di consentirne l'utilizzo come biocarburante o l'iniezione nella rete di distribuzione del gas naturale.

Le tecnologie più utilizzate sono

- scrubber con acqua ad alta pressione;
- scrubber con solventi;
- adsorbimento (pressure swing adsorption);
- criogenia;
- membrane semipermeabili.

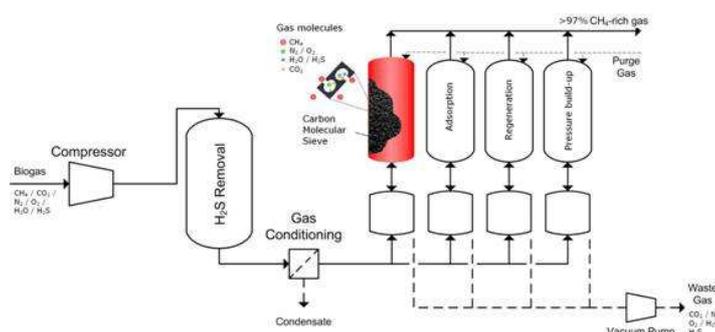
## High pressure water scrubbing

Il lavaggio ad alta pressione con acqua è una tecnica basata sul assorbimento per dissoluzione dei gas nei liquidi. Nel caso di purificazione del biogas, può essere utilizzato perché la solubilità di anidride carbonica e acido solfidrico è molto maggiore rispetto a quella del metano. Inoltre, la solubilità di tutti i componenti aumenta quando la pressione è più alta.



## Pressure swing adsorption

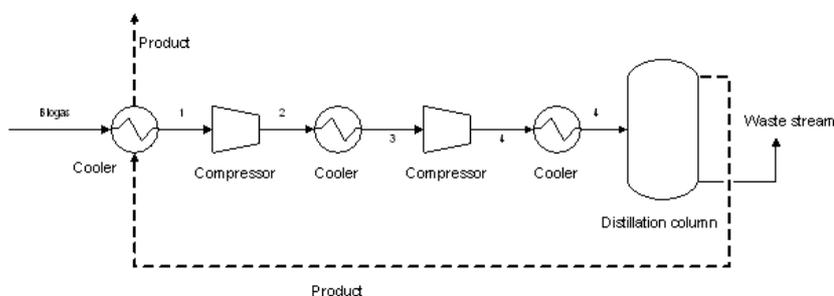
La PSA è una tecnica che consiste di quattro colonne di adsorbimento, un compressore e una fase preliminare di rimozione di  $H_2S$ . Le quattro colonne contengono materiale adsorbente (setaccio molecolare in carbonio), che blocca  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$  e  $H_2S$ . L' $H_2S$  è assorbito in maniera irreversibile e avvelena il materiale. Pertanto è necessario un pretrattamento per rimuoverlo.



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## Criogenia

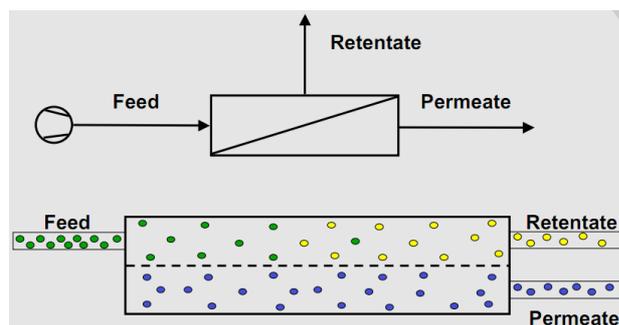
Il metodo criogenico di purificazione prevede la separazione delle miscele di gas mediante condensazioni e distillazione frazionata a bassa temperatura.



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

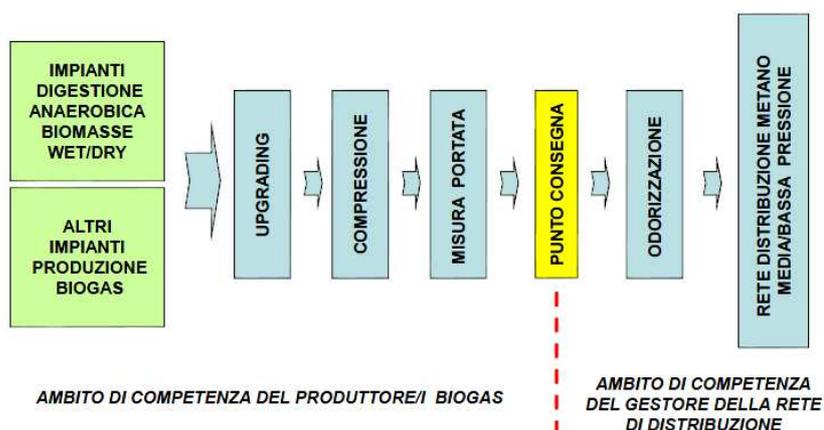
## Membrane

Il principio è che alcuni componenti del biogas possono essere trasportati attraverso una sottile membrana (< 1 mm), mentre altri sono ritenuti. Il trasporto di ogni componente è guidato dalla differenza di pressione parziale sulla membrana e è fortemente dipendente dalla permeabilità del componente nel materiale della membrana. Per ottenere metano ad alta purezza il rapporto tra le permeabilità deve essere alto.



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

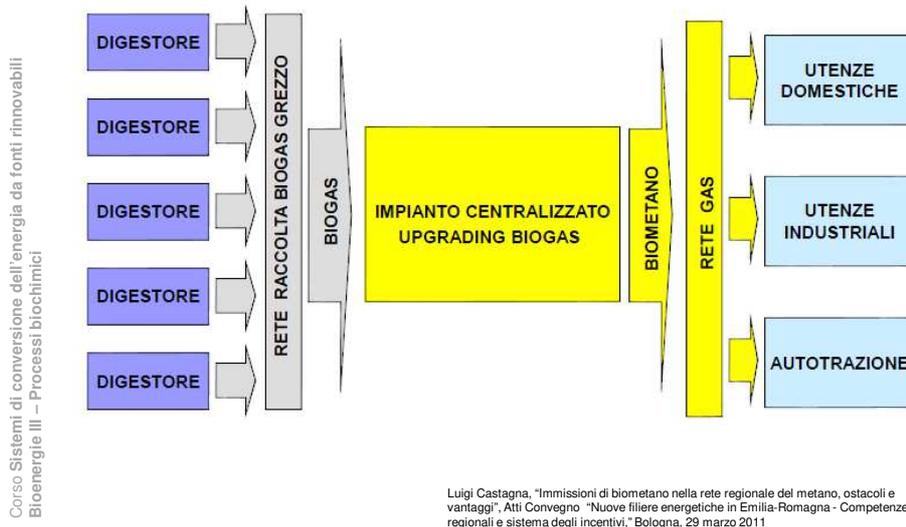
## L'iniezione in rete



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

Luigi Castagna, "Immissioni di biometano nella rete regionale del metano, ostacoli e vantaggi", Atti Convegno "Nuove filiere energetiche in Emilia-Romagna - Competenze regionali e sistema degli incentivi", Bologna, 29 marzo 2011

## Un'ipotesi di processo integrato



## Un primo caso

Dal 30 giugno 2017, nell'azienda Montello spa, è entrato in funzione il primo impianto in grado di immettere biometano nella rete di trasporto nazionale.

La produzione annua di biometano prevista a regime è di circa 32 MSm<sup>3</sup>.

Si tratta del primo esempio di impianto industriale presente in Italia in grado di produrre biometano esclusivamente dal trattamento dei rifiuti organici della raccolta differenziata urbana; la produzione oraria è pari a 3750 Sm<sup>3</sup> di biometano.

## La fermentazione alcolica

La **fermentazione alcolica** è un processo industriale che sfrutta l'omonimo processo metabolico attraverso il quale microorganismi (lieviti, batteri, etc.) trasformano sostanze organiche (zuccheri, amidi, etc.) in **alcol etilico** e anidride carbonica.

La fermentazione alcolica è alla base della panificazione e della produzione di bevande alcoliche, ma è importante dal punto di vista energetico per la produzione del cosiddetto bioetanolo che è principalmente impiegato come biocarburante per autotrazione, ma che tecnologicamente può avere impieghi anche nella cogenerazione di energia elettrica e termica.

Le biomasse impiegabili sono di tre tipi

- saccarifere
- amidacee
- lignocellulosiche

## La fermentazione alcolica

**Polisaccaridi**  
(cellulosa, emicellulose, amidi, pectine, etc.)

**IDROLISI**

**zuccheri semplici**

**FERMENTAZIONE**

**alcol etilico, anidride carbonica**

**SEPARAZIONE**

**alcol etilico**

## La biomasse saccarifere

Gli zuccheri, che possono essere contenuti nella barbabietola, nella canna da zucchero, nella frutta o nel melasso, possono essere convertiti direttamente in etanolo.

Il melasso (residuo della produzione del saccarosio) è il più utilizzato attualmente per la produzione di etanolo.

Poiché al suo interno contiene microorganismi che possono disturbare la fermentazione deve essere sterilizzato prima di essere inviato al fermentatore.

Il melasso inoltre deve essere diluito per ridurre la viscosità e per ridurre il contenuto in zuccheri al fine di ridurre il tempo di fermentazione ed evitare una incompleta conversione degli zuccheri (la frazione in massa del melasso è circa il 10-18 %).

La miscela viene acidificata fino ad un pH di circa 4-5 e poi avviene l'inoculamento con l'aggiunta dei lieviti o batteri che provvederanno alla fermentazione ad una temperatura di 20-32 °C per circa 1-3 giorni.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biotecnologici

## La biomasse amidacee

Gli amidi (che possono provenire dal mais, patate, manioca, tuberi, etc.) devono essere convertiti in zuccheri semplici (idrolisi) prima di essere fermentati. L'idrolisi avviene attraverso enzimi presenti nei malti o in funghi.

Su base secca il mais, il grano o il sorgo possono contenere fino al 60-75 % in peso di amidi. Gli amidi vengono addizionati di  $\alpha$ -amilasi e poi cotti ad alte temperature (140-180 °C). L'amido liquefatto è poi idrolizzato a glucosio mediante l'enzima glucoamilasi. Il glucosio è poi fermentato per produrre l'etanolo.

A causa degli alti costi di produzione dovuti agli elevati consumi energetici nel processo di cottura e all'aggiunta di una grande quantità di enzimi amilolitici si sono sviluppati dei sistemi di fermentazione cosiddetti *non-cooking* o *low-temperature cooking*.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biotecnologici

## La biomasse lignocellulosiche

La cellulosa è una delle più abbondanti forme di biomassa a livello globale, ma è largamente inutilizzata.

La cellulosa (proveniente per esempio dal legno, dai residui colturali, e dai residui del processo di produzione della carta) può essere convertita in zuccheri fermentabili, mediante l'utilizzo di acidi inorganici o mediante l'idrolisi enzimatica che ad oggi è considerata una delle più promettenti tra le tecnologie disponibili. Una volta formati gli zuccheri gli enzimi dei microorganismi possono provvedere alla fermentazione.

Le lignocellulosiche rappresentano un substrato molto più complesso rispetto alle amidacee in quanto composte da una matrice emicellulosica nelle quali sono immerse le fibre di cellulosa. Tutto questo accompagnato dalla lignina. Questo significa che per convertirle in etanolo è necessario separare la lignina, depolimerizzare la cellulosa e le emicellulose per produrre gli zuccheri e infine fermentare gli zuccheri pentosi ed esosi risultanti. Ciò è possibile solamente a livello industriale.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biotecnologici

## Il processo

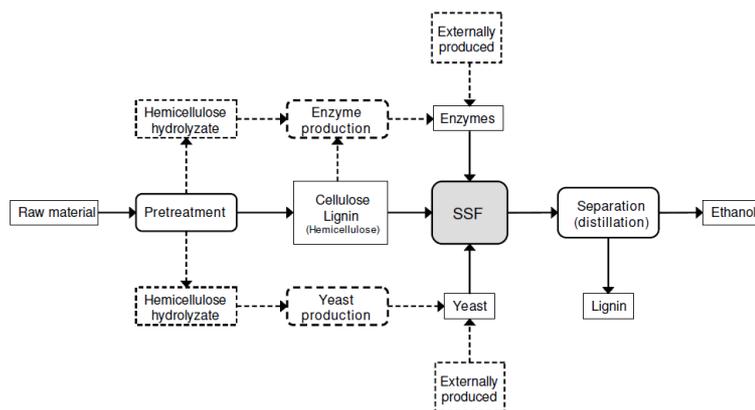
I passaggi chiave del processo industriale per la produzione di etanolo sono:

- il recupero dei materiali riciclabili e la rimozione dei contaminanti attraverso un preprocessamento meccanico finalizzato anche alla riduzione della pezzatura della biomassa;
- idrolisi (a seconda della tecnologia e della biomassa può comprendere un trattamento ad alta temperatura, un trattamento con acidi o con alte pressioni);
- fermentazione;
- purificazione dell'etanolo mediante distillazione e/o filtrazione;
- eventuale gasificazione dei residui solidi per fornire energia al processo;
- trattamento e smaltimento delle acque di processo.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biotecnologici

## Il processo SSF

Nel caso di fermentazione a partire da materiali lignocellulosici l'enzima utilizzato per l'idrolisi della cellulosa pretrattata è inibito dai prodotti dell'idrolisi stessa. E' necessario quindi fermentare immediatamente questi prodotti ad etanolo.



Kim Olofsson, Magnus Bertilsson, Gunnar Lidén, 2008, A short review on SSF – an interesting process option for ethanol production from lignocellulosic feedstocks, Biotechnol Biofuels

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## I microorganismi

I microorganismi entrano nel processo in due fasi:

- nel processo di trasformazione degli zuccheri in alcool

I più comuni tra questi sono i lieviti e tra di loro il lievito *Saccharomyces cerevisiae* è il più utilizzato poiché può fermentare fino a concentrazioni di alcool del 18 % rispetto al brodo iniziale. Altri microorganismi sono i batteri quali *Zymomonas mobilis* ad *Escherichia coli*. Quest'ultimo sembra avere molti vantaggi per un impiego industriale: digerisce un'ampia gamma di zuccheri, non richiede complessi fattori di crescita ed è già stato usato industrialmente per altri scopi.

- nel processo di idrolisi e di preparazione degli zuccheri semplici

I carboidrati (amidi, cellulosa, emicellulose) costituenti le biomasse per la fermentazione non sono direttamente fermentabili dai lieviti o dai batteri e devono quindi essere pretrattati in modo da trasformarli in molecole di zuccheri semplici fermentabili. Come già visto il processo può essere effettuato con alte temperature o con acidi, ma anche in questo campo stanno trovando applicazioni diversi microorganismi.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## I lieviti per la fermentazione

Strain-species	Temperature (°C)	pH value	Carbon source and concentration (g/l)	Nitrogen source and concentration (g/l)	Incubation time (h)	Concentration of ethanol produced (g/l)
27817- <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	30	5.5	Glucose (50–200)	Peptone (2) and ammonium sulfate (4)	18–94	5.1–91.8
L-041- <i>S. cerevisiae</i>	30 or 35	–	Sucrose (100)	Urea (1) or ammonium sulfate (1–2)	24	25–50
181- <i>S. cerevisiae</i> (aerobic)	27	6.0	Glucose (10)	Peptone (5.0)	40–160	–
UO-1- <i>S. cerevisiae</i> (aerobic)	30	5.0	Sucrose (20)	Ammonium sulfate (1)	60–96	–
V5- <i>S. cerevisiae</i>	24	–	Glucose (250)	–	36	–
ATCC 24860- <i>S. cerevisiae</i>	30	4.5	Molasses (1.6–5.0)	Ammonium sulfate (0.72–2.0)	24	5–18.4
Bakers' yeast- <i>S. cerevisiae</i>	30	4.5	Sugar (150–300)	–	192	53 (max)
Bakers' yeast- <i>S. cerevisiae</i>	28	5.0	Sucrose (220)	Peptone(5) and ammonium dihydrogen phosphate (1.5)	96	96.71
Fiso- <i>S. cerevisiae</i>	30	5.0	Galactose (20–150)	Peptone, ammonium sulfate and casamino acid (10)	60	4.8–40

Yan Lin, Shuzo Tanaka, 2006, Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects, Appl Microbiol Biotechnol

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biotecnologici

## I lieviti per la fermentazione

Strain-species	Temperature (°C)	pH value	Carbon source and concentration (g/l)	Nitrogen source and concentration (g/l)	Incubation time (h)	Concentration of ethanol produced (g/l)
A3- <i>S. cerevisiae</i>	30	5.0	Galactose (20–150)	Peptone, ammonium sulfate and casamino acid (10)	60	4.8–36.8
L52- <i>S. cerevisiae</i>	30	5.0	Galactose (20–150)	Peptone, ammonium sulfate and casamino acid (10)	60	2.4–32.0
GCB-K5- <i>S. cerevisiae</i>	30	6.0	Sucrose (30)	Peptone (5)	72	27
GCA-II- <i>S. cerevisiae</i>	30	6.0	Sucrose (30)	Peptone (5)	72	42
KR18- <i>S. cerevisiae</i>	30	6.0	Sucrose (30)	Peptone (5)	72	22.5
CMI237- <i>S. cerevisiae</i>	30	4.5	Sugar (160)	Ammonium sulfate (0.5)	30	70 (max)
2.399- <i>S. cerevisiae</i>	30	5.5	Glucose (31.6)	Urea (6.4)	30	13.7 (max)
24860- <i>S. cerevisiae</i>	–	–	Glucose (150)	Ammonium dihydrogen phosphate (2.25)	27	48 (max)
27774- <i>Kluyveromyces fragilis</i>	30	5.5	Glucose (20–120)	Peptone (2) and ammonium sulfate (4)	18–94	48.96 (max)
30017- <i>K. fragilis</i>	30	5.5	Glucose (20–120)	Peptone (2) and ammonium sulfate (4)	18–94	48.96 (max)
30016- <i>Kluyveromyces marxianus</i>	30	5.5	Glucose (100)	Peptone (2) and ammonium sulfate (4)	18–94	44.4 (max)
30091- <i>Candida utilis</i>	30	5.5	Glucose (100)	Peptone (2) and ammonium sulfate (4)	18–94	44.4 (max)
ATCC-32691- <i>Pachysohlen tannophilus</i>	30	4.5	Glucose (0–25) and xylose (0–25)	Peptone (3.6) and ammonium sulfate (3)	100	7.8 (max)

Yan Lin, Shuzo Tanaka, 2006, Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects, Appl Microbiol Biotechnol

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biotecnologici

## I batteri per la fermentazione

Mesophilic organisms	Mmol ethanol produced per mmol glucose metabolized	Mesophilic organisms	Mmol ethanol produced per mmol glucose metabolized
<i>Clostridium sporogenes</i>	up to 4.15 <sup>a</sup>	<i>Erwinia amylovora</i>	1.2
<i>Clostridium indoli</i> (pathogenic)	1.96 <sup>a</sup>	<i>Escherichia coli</i> KO11	0.7–0.1
<i>Clostridium sphenoides</i>	1.8 <sup>a</sup> (1.8) <sup>b</sup>	<i>Escherichia coli</i> LY01	40–50 g ethanol produced/l
<i>Clostridium sordelli</i> (pathogenic)	1.7	<i>Leuconostoc mesenteroides</i>	1.1
<i>Zymomonas mobilis</i> (syn. <i>Anaerobica</i> )	1.9	<i>Streptococcus lactis</i>	1.0
<i>Zymomonas mobilis</i> subsp. <i>pomaceas</i>	1.7	<i>Klebsiella oxytoca</i>	0.94–0.98
<i>Spirochaeta aurantia</i>	1.5 (0.8)	<i>Klebsiella aerogenes</i>	24 g ethanol produced/l
<i>Spirochaeta stenostrepta</i>	0.84 (1.46)	<i>Mucor</i> sp. M105	–
<i>Spirochaeta litoralis</i>	1.1 (1.4)	<i>Fusarium</i> sp. F5	–

Yan Lin, Shuzo Tanaka, 2006, Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects, Appl Microbiol Biotechnol

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## Applicazioni



E' attivo a Crescentino, in provincia di Vercelli, un impianto della Chemtex Italia per la produzione di etanolo della capacità produttiva di 40 000 t annue (con la lignina si producono 13 MW di energia elettrica).

L'impianto tratta biomasse lignocellulosiche (160 000 t) mediante un processo di idrolisi enzimatica.

L'impianto è alimentato prevalentemente con paglia di grano, ma anche da sorgo da fibra, miscanto, panico e stocchi del mais.

E' previsto inoltre che nel giro di qualche anno la maggior parte della biomassa consisterà in arundo donax, cioè canna comune.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie III – Processi biochimici

## Il bio-idrogeno

L'idrogeno può essere uno dei più importanti vettori energetici del futuro. La sua produzione, che ora passa principalmente per il reforming del metano o l'elettrolisi dell'acqua potrà passare per processi biochimici.

I processi per la produzione biologica di idrogeno possono essere classificati in quattro categorie:

1. Biofotolisi dell'acqua da parte di alghe e cianobatteri
2. Fotodecomposizione dei composti organici da parte di batteri fotosintetici
3. Produzione da composti organici mediante fermentazione
4. Processi ibridi di batteri fotosintetici e fermentativi

## Biofotolisi dell'acqua

Il processo è lo stesso utilizzato per la fotosintesi di sostanza organica nelle piante, ma adattato alla produzione di idrogeno.

Nella fotosintesi l'assorbimento di luce è dovuto due distinti processi fotosintetici che operano in serie, uno porta alla decomposizione dell'acqua con sviluppo di ossigeno, l'altro riduce la  $CO_2$  per produrre sostanza organica.

Per sostituire questo secondo processo con la formazione di idrogeno è necessario l'enzima idrogenasi presente nelle microalghe sia eucarioti (alghe verdi) sia procarioti (cianobatteri o alghe verde-blu).

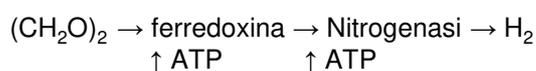
Uno dei maggiori ostacoli alla fotoproduzione di idrogeno è la disattivazione del sistema che produce idrogeno da parte dell'ossigeno fotogenerato.

## Fotodecomposizione

I batteri fototrofi sono considerati in letteratura il sistema microbiologico più promettente per la produzione biologica di idrogeno perché:

- Hanno alte rese di conversione (teorica)
- Non producono ossigeno e quindi non hanno i problemi di disattivazione da ossigeno di altri sistemi
- Sono in grado di utilizzare un ampio spettro di luce
- Possono utilizzare materiale organico proveniente da rifiuti (anche acque di rifiuto)

Uno schema generale per questi processi può essere:



## Fermentazione

La produzione di idrogeno per fermentazione presenta numerosi vantaggi da un punto di vista di una possibile produzione industriale infatti:

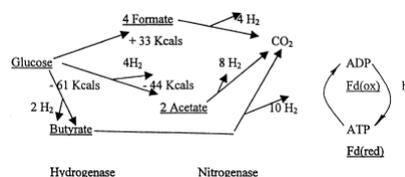
- I batteri che inducono la fermentazione hanno alte velocità di produzione di idrogeno
- la produzione di idrogeno da substrati organici è continua (giorno e notte)
- possono avere velocità di crescita adatte a fornire microorganismi al processo industriale di produzione.

La produzione può essere incrementata con l'efficace accoppiamento dei seguenti fattori:

- una efficiente sorgente di elettroni
- una attiva idrogenasi

## Processi fotosintetico-fermentativi

Per esempio il *Clostridium butyricum* può utilizzare carboidrati per produrre idrogeno attraverso la formazione di acidi organici che a loro volta sono il prodotto di partenza per i batteri fotosintetici nella produzione di idrogeno.



I batteri anaerobici non sono in grado di demolire gli zuccheri a idrogeno e CO<sub>2</sub> ma decompongono i carboidrati con la formazione di acidi organici che non sono ulteriormente decomponibili a idrogeno, cosa che deve essere compiuta dai batteri fotosintetici con l'utilizzo dell'energia della luce; la combinazione dei due tipi di batteri non solo riduce la richiesta di energia luminosa, ma anche aumenta la produzione di idrogeno.

bioenergie IV

# Combustione diretta

Corso: Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili

Anno accademico: 2018/2019

Docente: Mirko Morini

## Utilizzo della biomassa legnosa

- Tecnologia matura, consolidata ed affidabile
- Avviene in **stufe/caldaie** che possono essere di varia potenzialità - da pochi kW a decine di MW

↓

	Taglia	Potenza	Utilizzo tipico
CALDAIE	Piccola	15-100 kWth	Riscaldamento domestico
	Media	0.2-30 MWth	Civile di tipo collettivo /industriale
	Media	0.2-10 MWth	Teleriscaldamento uso civile
	Grande	10-50 MWth	EE , calore, Cogenerazione

I combustibili utilizzati sono:

Legno

Residui e prodotti agricoli

Residui agroalimentari

## Utilizzo della biomassa legnosa

Esempio di caldaia a pellet (uso domestico individuale):



Trattamento della biomassa legnosa:

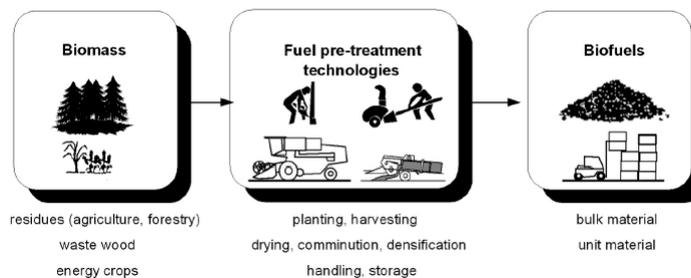
- riduzione delle impurità (aumento della disponibilità dell'impianto)
- combustibile omogeneo (migliore combustione)
- aumento della densità energetica (riduzione dei costi)

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie IV – Combustione diretta

## La filiera della biomassa legnosa

La biomassa legnosa può essere ottenuta da:

- residui:
  - agricoltura (es. paglia)
  - foresta (es. rami, cime di albero, alberi interi, potatura)
  - industria del legno (es. corteccia, segatura)
  - industria alimentare (es. noccioli di oliva)
- coltivazioni energetiche (es. SRF, miscanto)
- legno di scarto (es. demolizioni, fibre, travetti ferroviari)



Fonte: Sjaak van Loo and Jaap Koppejan, 2008, "The Handbook of biomass Combustion and Co-firing", Earthscan, ISBN: 978-1-84407-249-1.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie IV – Combustione diretta

## Biomassa legnosa

Il **pellet** è formato da cilindretti prodotti con polvere di legno (generalmente segatura).



**Cippato** (dall'inglese chips) è costituito da pezzettini di legno sminuzzato, ottenuti da materiale non trattato, come i residui di segherie, potature, scarti boschivi, ecc...



## Biomassa legnosa

Il **bricchetto** è formato da cilindri prodotti con polvere di legno (generalmente segatura), la quale viene essiccata e pressata a caldo, utilizzando i residui e le polveri più grossolane.



Tra i biocombustibili solidi sono compresi anche i pezzi o **ciochi di legno**, il cui costo è superiore ai materiali sopradescritti che sono prodotti utilizzando scarti.



## Biomassa per combustione diretta

I **residui colturali** possono essere paglia, stocchi, residui di patate, semi, erba, etc.



I **residui agroindustriali** possono essere invece la sansa di oliva, la lolla del riso, il panello proteico dei semi oleosi, etc.



## Biomassa legnosa

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

Nome del combustibile	Dimensione tipica	Metodo di preparazione
Bricchette	ø > 25 mm	compressione in una pressa a pistone
Pellet	ø < 25 mm	estrusione
Agglomerati sferoidali	ø < 50 mm	centrifugazione
Combustibile in polvere (polverino)	< 1	macinatura
Segatura	1 - 5 mm	taglio con strumenti affilati
Cippato	5 - 100 mm	taglio con strumenti affilati
Scaglie	varia	frantumazione con strumenti non affilati
Ciochi/ tronchetti/ tondelli	100-1000 mm	taglio con strumenti affilati

## Caratteristiche cippato vs. pellet



• Dimensioni max:	20 x 40 mm	12 mm (6 mm)
• Umidità:	20 % - 30 %	circa 8 %
• PCI:	11.500 kJ/kg	18.500 kJ/kg
• Massa sterica:	200–300 kg/m <sup>3</sup>	700 kg/m <sup>3</sup>
• Costo di produzione: (@ febbraio 2007)	< 50 €/t	< 150 €/t

Per il cippato, si noti che:

- Sono richiesti grandi volumi per lo stoccaggio
- Ci possono essere perdite per fermentazione del materiale

## Caratteristiche

	Umidità (%)	Potere calorifico PCI (MJ/kg)	Densità apparente	
			(kg/mci)	(kg/mcm)
Faggio fresco	50	7,9	669	464
Faggio essiccato naturale	35	11,1	608	375
Faggio essiccato all'aria	18	14,6	482	283
Abete fresco	50	8,1	517	332
Abete essiccato naturale	35	11,3	436	265
Abete essiccato all'aria	18	14,9	345	202
Pellet	10	17,0	-	600
Segatura	10	17,0	-	202
Truciolì	10	17,0	-	120
Paglia di frumento in balle	15	14,4	135	-
Paglia di colza in balle	15	14,3	133	-
Paglia di mais in balle	15	14,8	139	-
Miscanto in balle	15	14,9	140	-
Grano sfuso	15	14,2	-	760

Fonte: Cocco D., Palomba C., Puddu P., 2008, "Tecnologie delle energie rinnovabili", SGE Editoriali, Padova.

## Caratteristiche

LEGNA DA ARDERE:  
Parametri energetici indicativi

	Unità di misura	Valori
Massa volumica	kg/m <sup>3</sup>	600-850
Umidità (w)	%	20
Potere calorifico inferiore	kWh/kg	4-4,5
Densità energetica	kWh/mtsa (spacconi)	1785-2529
	kWh/mtsa (da stufa)	2168-3071
Densità energetica	kWh/msr (da stufa)	1275-1806
Ceneri	%(in peso)	0,2-0,5

BRIQUETTES  
Parametri energetici indicativi

	Unità di misura	Valore
Massa volumica	kg/m <sup>3</sup>	> 900
Umidità (w)	%	< 15
Potere calorifico inferiore	kWh/kg	4,6-5,2
Ceneri	%(in peso)	0,5-1

CIPPATO  
Parametri energetici indicativi

	Unità di misura	Valori
Massa sterica	kg/msr	220-350
Umidità (w)	%	30
Potere calorifico inferiore	kWh/kg	3-3,6
Densità energetica	kWh/msr	650-980
Ceneri	%(in peso)	0,2-0,8

PELLET  
Parametri energetici indicativi

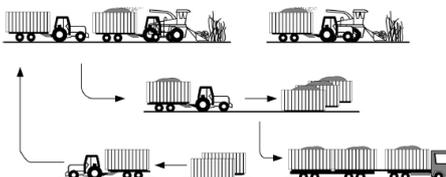
	Unità di misura	Valore
Lunghezza	mm	10-50
Diametro	mm	6-10
Massa volumica	kg/m <sup>3</sup>	1150-1400
Massa sterica	kg/msr	> 650
Umidità (w)	%	8-12
Potere calorifico inferiore	kWh/kg	4,7-5
Ceneri	%(in peso)	0,3 - <1

Fonte: Francesco W., 2004, "Panoramica dei combustibili legnosi e caratteristiche energetiche", Atti del Convegno "Progetto Fuoco", Verona, 20 marzo 2004.

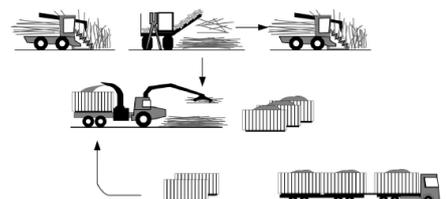
## Short rotation coppice SRC

La pianta più diffusa per la SRC è il salice (17000 ha in Svezia). Di solito, si piantumano 15,000–20,000 esemplari per ettaro (una volta ogni 20 anni). La produttività media annua è di circa 10 t/ha/anno di sostanza secca (per il miscanto è 15 t/ha/anno). Oltre al salice, si può usare il pioppo, l'ontano e la betulla.

Taglio e cippatura



Taglio e "covonatura"



## Short rotation forest SRF



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie IV – Combustione diretta

Fonte: W. Righini, "L'esperienza dei Comuni di Tirano - Sondalo - Valfurva sul teleriscaldamento a biomassa e altre fonti rinnovabili", Milano 12 marzo 2008

## Disponibilità

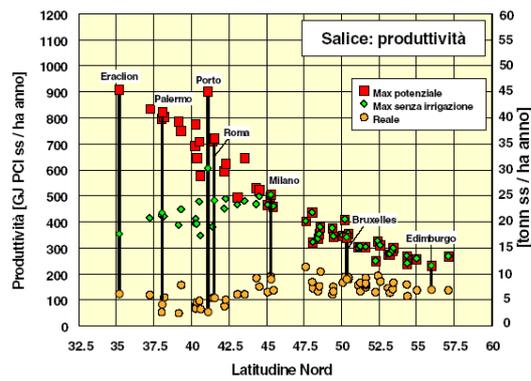


Fig. 3a: Produttività del salice in [GJ di PCI<sub>ss</sub>/ha-anno] e in [ton<sub>ss</sub>/ha-anno] per la serie di territori europei a diversa latitudine considerati da Nonhebel (1997). Per ognuno dei 58 territori considerati la figura riporta la produttività reale oggi conseguita, quella massima stimabile senza irrigazione e quella potenziale massima. Per chiarezza, la figura riporta solamente i nomi di alcune delle aree considerate. La conversione tra produttività massica ed energetica è attuata assumendo PCI<sub>ss</sub> = 19,8 MJ/kg<sub>ss</sub>

Fonte: S. Consonni "Caratteristiche e potenzialità della risorsa energetica biomassa", Atti corso di aggiornamento del Politecnico di Milano, Piacenza 20-22 novembre 2006

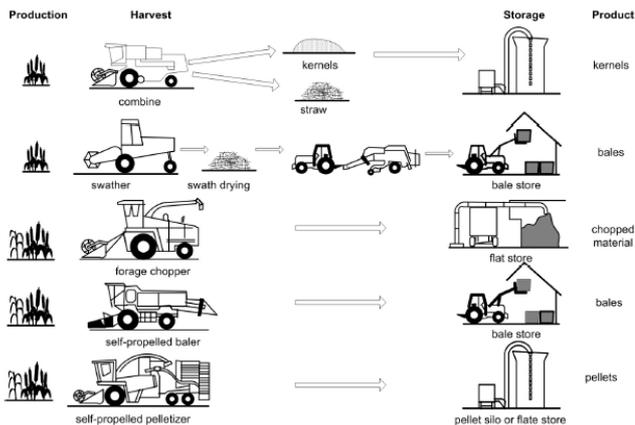
Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie IV – Combustione diretta

## Biomassa erbacea

- Paglia: residuo della coltivazione del grano

Aspetti critici rispetto alla biomassa legnosa:

- formazione di ceneri fuse dannose alla combustione
- emissioni

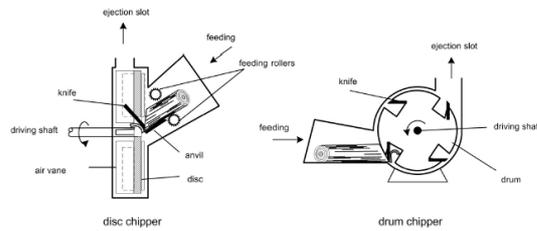


## Trasformazione della biomassa legnosa

## Triturazione

Operazioni per la triturazione della biomassa legnosa:

- pezzettatura (50 – 250 mm)
- cippatura (5 – 50 mm)
- polverizzazione (0 – 80 mm)



Size	Productivity (m <sup>3</sup> bulk per hour)	Diameter of the material (cm)	Fuel-feeding system	Power consumption (kW)
Small-scale	3–25	8–35	Manual crane	20–100
Medium-scale	25–40	35–40	Crane	60–200
Large-scale	40–100	40–55	Crane	200–550

I cippatori a disco sono formati da un disco pesante in rotazione con diametro di 0.6-1.0 m e 2-4 lame.

La dimensione del chip può essere regolata agendo sulla lama e sull'incudine.

I cippatori a disco producono chips abbastanza regolari, poiché l'angolo di taglio rispetto alla fibra dell'albero rimane circa costante, indipendentemente dalla taglia del materiale.

## Cippatura

La cippatura è il processo col quale la legna viene ridotta in minuzzoli. Esistono vari modelli di macchine cippatrici. La principale differenza è l'organi di taglio:

- a disco
- a tamburo
- a vite senza fine



## Cippatori



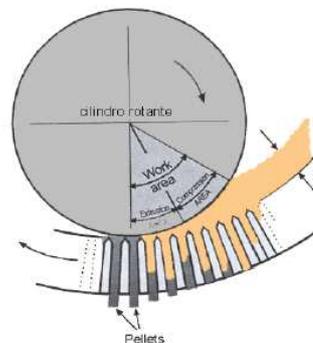
Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie IV – Combustione diretta

Fonte: Sjaak van Loo and Jaap Koppejan, 2008, "The Handbook of biomass Combustion and Co-firing", Earthscan, ISBN: 978-1-84407-249-1.

## Pellettizzazione

Il pellet deriva da un processo industriale attraverso il quale la segatura o le scaglie di legno vergine polverizzate con una umidità compresa tra 10-14%, sono trasformate in piccoli cilindri.

Nella fase di formazione del pellet, il calore di processo attiva l'effetto legante della lignina; solitamente quindi non è necessario l'uso di collanti naturali.



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie IV – Combustione diretta

Fonte: Francesco W., 2004, "Panoramica dei combustibili legnosi e caratteristiche energetiche", Atti del Convegno "Progetto Fuoco", Verona, 20 marzo 2004.

## Pellettizzazione

Cinque fasi:

1. Essiccazione (LHV, rend. comb., stoccaggio, lavorazione)
2. Macinatura
3. Condizionamento
4. Pellettizzazione (0.1 – 10 t/h)
5. Raffreddamento

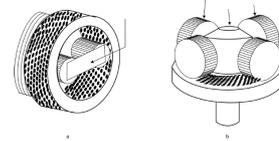


Figure 3.21 Ring die pelletizer (a) and flat die pelletizer (b)

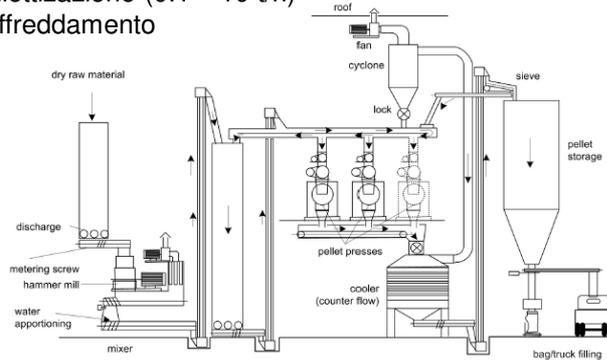


Figure 3.20 Pelletizing plant

Fonte: Sjaak van Loo and Jaap Koppejan, 2008, "The Handbook of biomass Combustion and Co-firing", Earthscan, ISBN: 978-1-84407-249-1.

## Bricchettatura

La Bricchettatrice è un compattatore oleodinamico finalizzato alla riduzione dei volumi degli scarti di lavorazione.

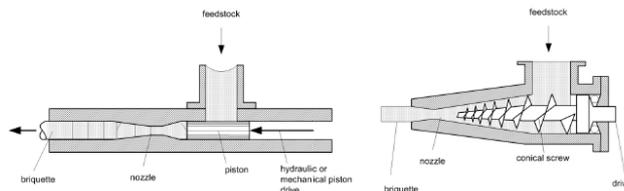


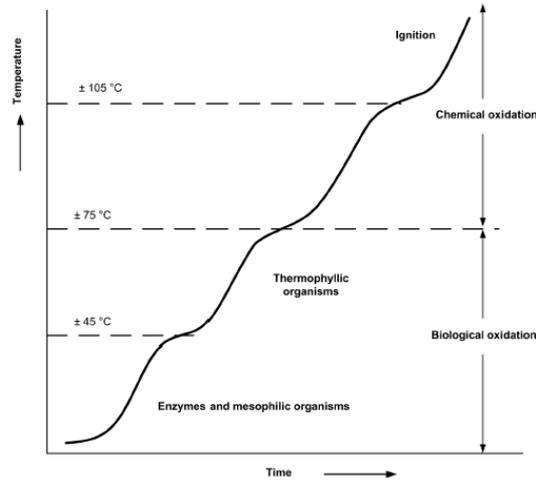
Figure 3.22 Two briquetting technologies





Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
 Bioenergie IV – Combustione diretta

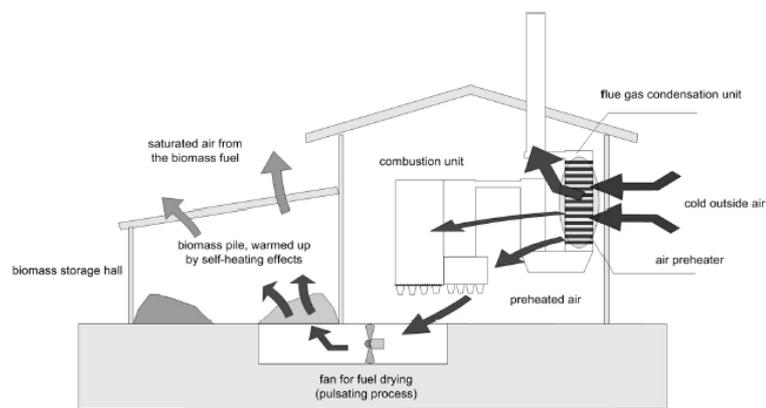
## Lo stoccaggio



**Figure 3.27** Temperature development and processes responsible for self-heating in stored biological material

Fonte: Sjaak van Loo and Jaap Koppejan, 2008, "The Handbook of biomass Combustion and Co-firing", Earthscan, ISBN: 978-1-84407-249-1.

## Essiccazione ad aria



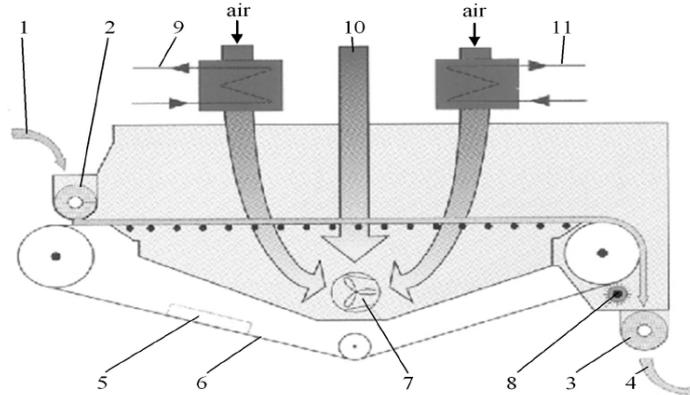
**Figure 3.25** Short-term biomass drying process based on preheated air from a flue gas condensation unit

Fonte: Sjaak van Loo and Jaap Koppejan, 2008, "The Handbook of biomass Combustion and Co-firing", Earthscan, ISBN: 978-1-84407-249-1.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
 Bioenergie IV – Combustione diretta

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
 Bioenergie IV – Combustione diretta

## Essiccazione ad aria



**Figure 3.26** Belt dryer for biomass

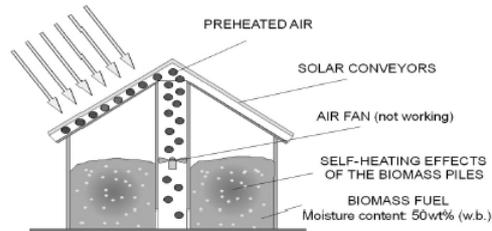
*Explanations:* 1 = raw material; 2 = feeding screw; 3 = outlet screw; 4 = dried product; 5 = belt washing unit; 6 = dryer belt; 7 = exhaust fan; 8 = rotating cleaning brush; energy supply by steam (9) or waste heat from processes (10) or water (11).

Fonte: Sjaak van Loo and Jaap Koppejan, 2008, "The Handbook of biomass Combustion and Co-firing", Earthscan, ISBN: 978-1-84407-249-1.

## Essiccazione a fonte solare

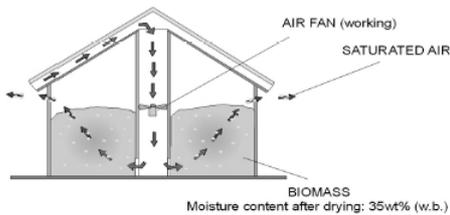
### 1. STEP

- WARMING UP OUTSIDE AIR BY SOLAR CONVEYORS
- SELF-HEATING EFFECTS OF THE BIOMASS PILES



### 2. STEP

- PREHEATED AIR IS BLOWN BY THE AIR FAN THROUGH THE BIOMASS PILES
- THE WATER FROM THE BIOMASS IS CARRIED OUT BY THE AIR



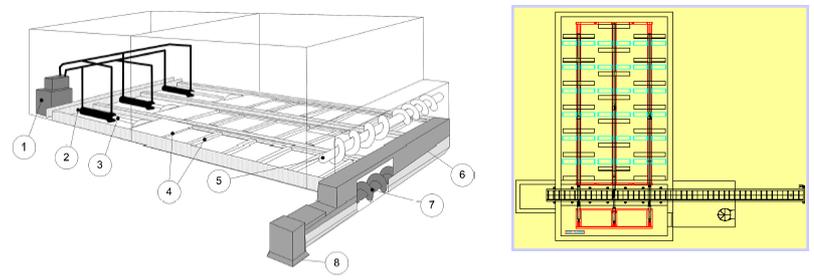
**Figure 3.24** Pulsating solar biomass drying process

Fonte: Sjaak van Loo and Jaap Koppejan, 2008, "The Handbook of biomass Combustion and Co-firing", Earthscan, ISBN: 978-1-84407-249-1.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
 Bioenergie IV – Combustione diretta

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
 Bioenergie IV – Combustione diretta

## Movimentazione

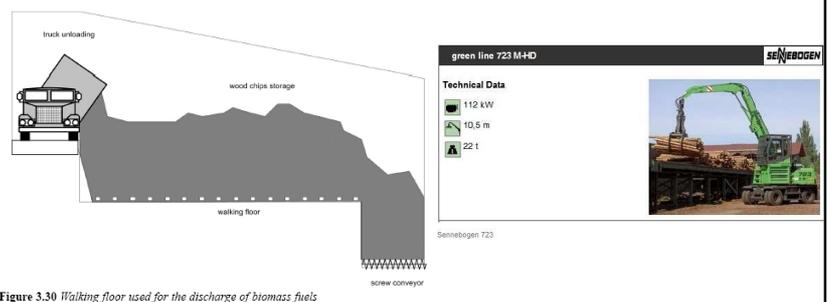


**Figure 3.29** Sliding bar conveyor used for the discharge of bunkers  
 Explanations: 1 = hydraulic generator, 2 = bearing for hydraulic cylinder, 3 = hydraulic cylinder, 4 = sliding bars, 5 = control screw, 6 = drop channel, 7 = screw conveyor, 8 = delivery end.

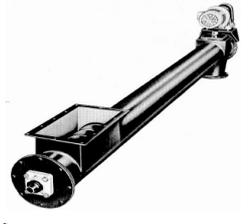


Fonte: Sjaak van Loo and Jaap Koppejan, 2008, "The Handbook of biomass Combustion and Co-firing", Earthscan, ISBN: 978-1-84407-249-1.

## Movimentazione



**Figure 3.30** Walking floor used for the discharge of biomass fuels from a long-term storage hail



**Figure 3.37** Screw conveyor



**Figure 3.36** Chain conveyor  
 Source: [17]

Fonte: Sjaak van Loo and Jaap Koppejan, 2008, "The Handbook of biomass Combustion and Co-firing", Earthscan, ISBN: 978-1-84407-249-1.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
 Bioenergie IV – Combustione diretta

## Processi termochimici

Sono processi basati sull'azione del calore che consente le reazioni chimiche necessarie a trasformare la biomassa in combustibile.

Utilizza i prodotti ed residui cellulosici e legnosi in cui il rapporto C/N abbia valori superiori a 30 ed il contenuto di umidità non superi il 30%.

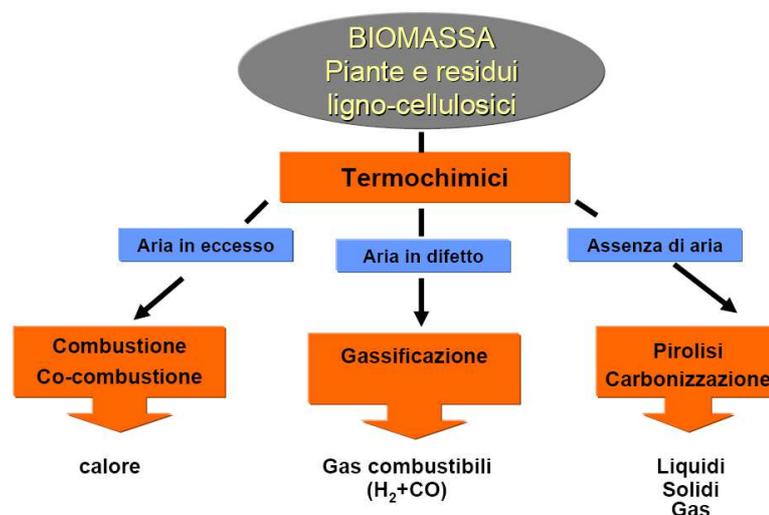
Le biomasse più adatte a subire processi di conversione termochimica sono:

**legna e tutti i suoi derivati** (segatura, trucioli, ecc...);

**sottoprodotti colturali di tipo lignocellulosico** (paglia di cereali, residui di potatura della vite e dei fruttiferi, ecc...);

**scarti di lavorazione** (lolla, pula, gusci, noccioli, ecc.).

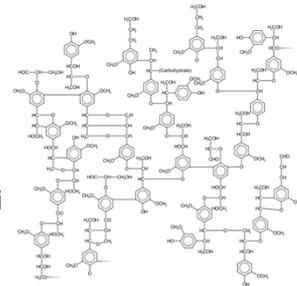
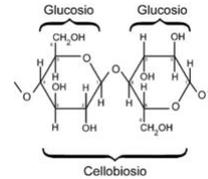
## Processi termochimici



## La biomassa

Le biomasse lignocellulosiche sono composte, oltre che da acqua ed elementi inorganici (Na, K, P, S, N, etc.), per la maggior parte da composti organici quali

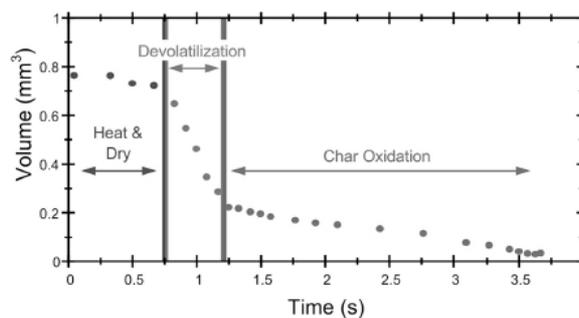
- Cellulosa ( $C_6H_{10}O_5$ ): polimero condensato di glucosio ( $C_6H_{10}O_6$ ). Le pareti cellulari consistono principalmente di cellulosa e corrispondono al 40-45 % del peso secco della biomassa
- Emicellulosa: vari zuccheri diversi dal glucosio, formano la matrice in cui sono immerse le fibre di cellulosa, e rappresentano 20-35 % del peso secco della biomassa
- Lignina ( $C_{40}H_{44}O_6$ ): polimero non zuccherino che fornisce resistenza alle fibre legnose, pari al 15-30 % del peso secco della biomassa.



## La combustione

Nel processo di combustione si possono riconoscere principalmente quattro fasi: essiccazione, pirolisi, gassificazione ed ossidazione.

Le quattro fasi sono idealmente separate, ma in realtà ci sono ampie zone di sovrapposizione e di contemporaneità tra le fasi.



Fonte: Sjaak van Loo and Jaap Koppejan, 2008, The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing, Earthscan

## Le fasi della combustione

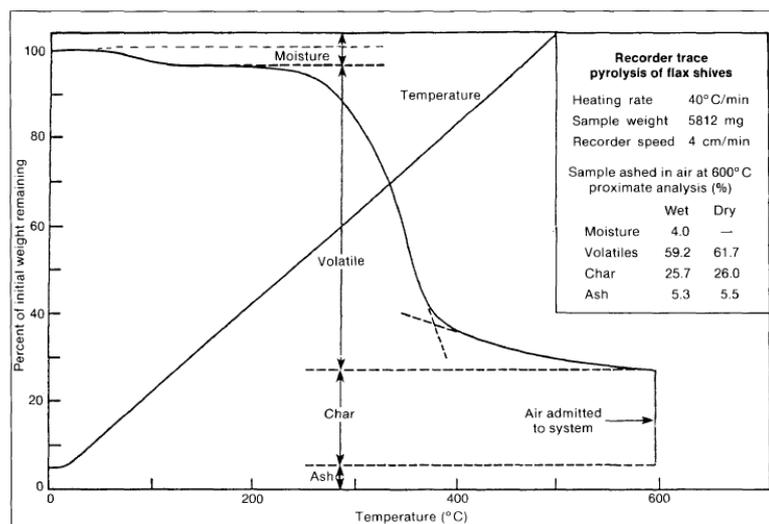
### Essiccazione

L'acqua inizia ad evaporare a temperature inferiori a 100 °C. L'evaporazione avviene utilizzando l'energia rilasciata dal processo di combustione, quindi rallenta il processo stesso. Con umidità superiori al 60% la temperatura rischia di scendere sotto il valore minimo richiesto per mantenere la combustione. Comunque l'incremento dell'umidità rende necessario un tempo più lungo prima che possa iniziare la fase di pirolisi.

### Pirolisi (o devolatilizzazione)

La pirolisi è la degradazione termica del materiale costituente il combustibile in assenza di un agente ossidante esterno. I prodotti sono tar (composti organici ad alto peso molecolare), charcoal e gas a basso peso molecolare ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $CH_4$ ). Il tipo di combustibile, la temperatura, la pressione, la velocità di riscaldamento e il tempo influenzano le caratteristiche dei prodotti della pirolisi.

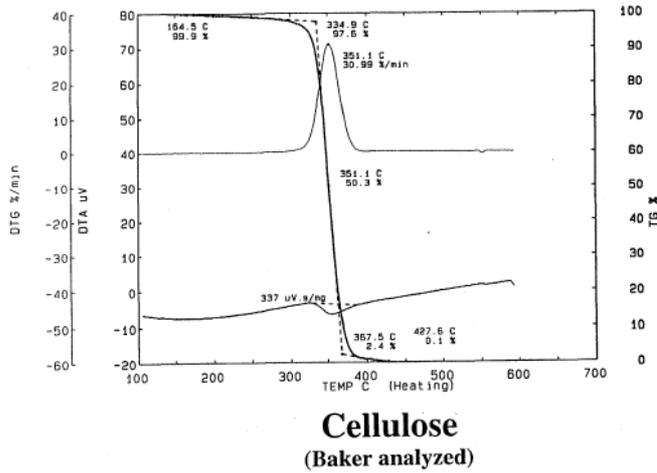
## Il termogramma



Fonte: Reed T.B., Das A., 1988, Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems, SERI

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie IV – Combustione diretta

## Il termogramma – la cellulosa

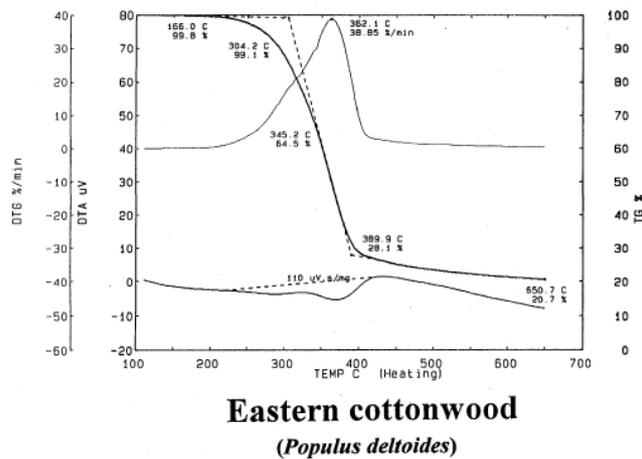


Cellulose (Baker analyzed)	
Heating rate-°C/min:	10
Sample weight-mg:	1.442
T <sub>char</sub> -°C:	164.5
Volatilization	
T <sub>onset</sub> -°C:	334.9
T <sub>mid</sub> -°C:	351.1
T <sub>end</sub> -°C:	367.5
T <sub>max</sub> -°C:	351.1
Rate <sub>max</sub> -mg/min:	30.99
Wt. % <sub>600 °C</sub> :	0.0
ΔH vol. - μV.sec/mg:	337
Proximate analysis	
Volatiles <sub>max</sub> -wt%:	100.0
Volatiles <sub>600 °C</sub> -wt%:	100.0
Volatiles <sub>800 °C</sub> -wt%:	0.0
Fixed carbon-wt%:	0.0
Ash-wt%:	0.0

Fonte: Gaur S., Reed T.B., 1995. An Atlas of thermal Data for Biomass and Other Fuels, NREL

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie IV – Combustione diretta

## Il termogramma - Pioppo

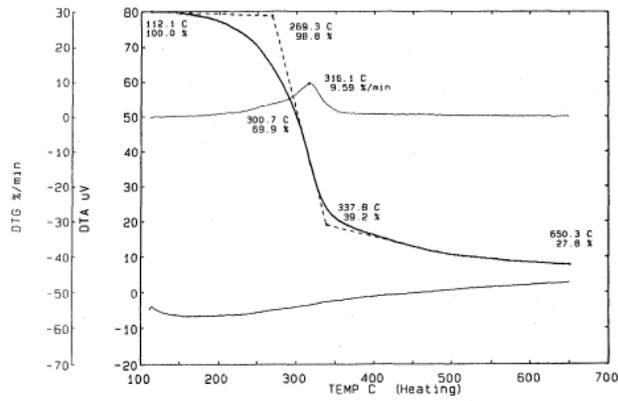


Eastern Cottonwood (Populus deltoides)	
Heating rate-°C/min:	40
Sample weight-mg:	6.390
T <sub>char</sub> -°C:	166.0
Volatilization	
T <sub>onset</sub> -°C:	304.2
T <sub>mid</sub> -°C:	345.2
T <sub>end</sub> -°C:	389.9
T <sub>max</sub> -°C:	362.1
Rate <sub>max</sub> -mg/min:	38.9
Wt. % <sub>600 °C</sub> :	20.7
ΔH vol. - μV.sec/mg:	110
Proximate analysis	
Volatiles <sub>max</sub> -wt%:	82.1
Volatiles <sub>600 °C</sub> -wt%:	79.3
Volatiles <sub>800 °C</sub> -wt%:	2.8
Fixed carbon-wt%:	17.1
Ash-wt%:	0.8

Fonte: Gaur S., Reed T.B., 1995. An Atlas of thermal Data for Biomass and Other Fuels, NREL

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
 Bioenergie IV – Combustione diretta

## Il termogramma – Paglia di grano

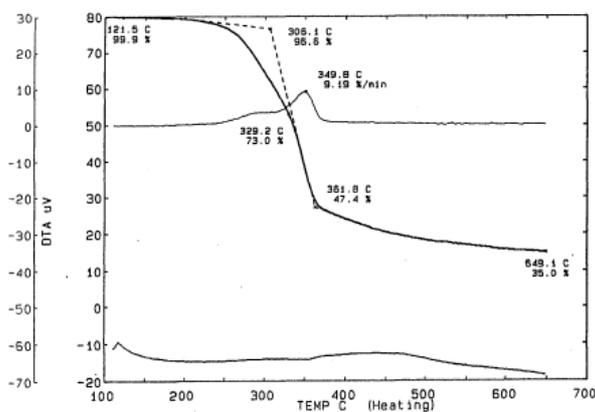


**Wheat Straw**  
*(Triticum aestivum, var Thunderbird)*

Wheat straw ( <i>Triticum aestivum</i> )	
Heating rate-°C/min:	10
Sample weight-mg:	3.518
T <sub>initial</sub> -°C:	112.1
Volatilization	
T <sub>ext.ppt</sub> -°C:	269.3
T <sub>mid.ppt</sub> -°C:	300.7
T <sub>end.ppt</sub> -°C:	337.8
T <sub>max</sub> -°C:	316.1
Rate <sub>max</sub> -mg/min:	9.59
Wt. % <sub>200 C</sub> :	27.8
Δ H <sub>cal</sub> -μV.sec/mg:	NS
Proximate analysis	
Volatiles <sub>total</sub> -wt%:	82.5
Volatiles <sub>200 C</sub> -wt%:	72.2
Volatiles <sub>200-300 C</sub> -wt%:	10.3
Fixed carbon-wt%:	17.5
Ash-wt%:	7.4

Fonte: Gaur S., Reed T.B., 1995. An Atlas of thermal Data for Biomass and Other Fuels, NREL

## Il termogramma – Lolla di riso



**Rice hull**  
*(Oryza sativa)*

Rice hull ( <i>Oryza sativa</i> )	
Heating rate-°C/min:	10
Sample weight-mg:	3.826
T <sub>initial</sub> -°C:	121.5
Volatilization	
T <sub>ext.ppt</sub> -°C:	306.1
T <sub>mid.ppt</sub> -°C:	329.2
T <sub>end.ppt</sub> -°C:	361.8
T <sub>max</sub> -°C:	349.8
Rate <sub>max</sub> -mg/min:	9.19
Wt. % <sub>200 C</sub> :	35.0
Δ H <sub>cal</sub> -μV.sec/mg:	NS
Proximate analysis	
Volatiles <sub>total</sub> -wt%:	67.7
Volatiles <sub>200 C</sub> -wt%:	65
Volatiles <sub>200-300 C</sub> -wt%:	2.7
Fixed carbon-wt%:	14.1
Ash-wt%:	18.2

Fonte: Gaur S., Reed T.B., 1995. An Atlas of thermal Data for Biomass and Other Fuels, NREL

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
 Bioenergie IV – Combustione diretta

## Le fasi della combustione

### Gassificazione

Convenzionalmente si intende con gassificazione l'insieme delle reazioni tra i prodotti della pirolisi e l'atmosfera di reazione. Sono reazioni endotermiche. Per esempio,

- char e vapore d'acqua,  $C+H_2O=CO+H_2$ .
- char e anidride carbonica,  $C+CO_2=2 CO$ .
- char e idrogeno,  $C+2 H_2=CH_4$

### Ossidazione

L'ossidazione è l'insieme delle reazioni tra i prodotti della pirolisi e della gassificazione e l'ossigeno presente nell'atmosfera di reazione. Le reazioni di ossidazioni sono esotermiche, e quindi questa fase fornisce, durante il processo di combustione, il calore necessario alle tre fasi precedenti.

## Potere calorifico

COMBUSTIBILE	P.C.I. [kcal/kg - kcal/m <sup>3</sup> ]
LEGNA DA ARDERE	2.500 - 4.500
TORBA	3.000 - 4.500
CARBONE DI LEGNA	7.500
LIGNITE	4.000 - 6.200
ANTRACITE	8.000 - 8.500
COKE	7.000
OLIO COMBUSTIBILE	9.800
COMBUSTIBILE PER AEREI	10.400
GASOLIO	10.200
BENZINA PER AUTO	10.500
PETROLIO GREZZO	10.000
GAS DI PETROLIO LIQUEFATTI	11.000
GAS NATURALE	8.300

10 ÷ 19 MJ/kg

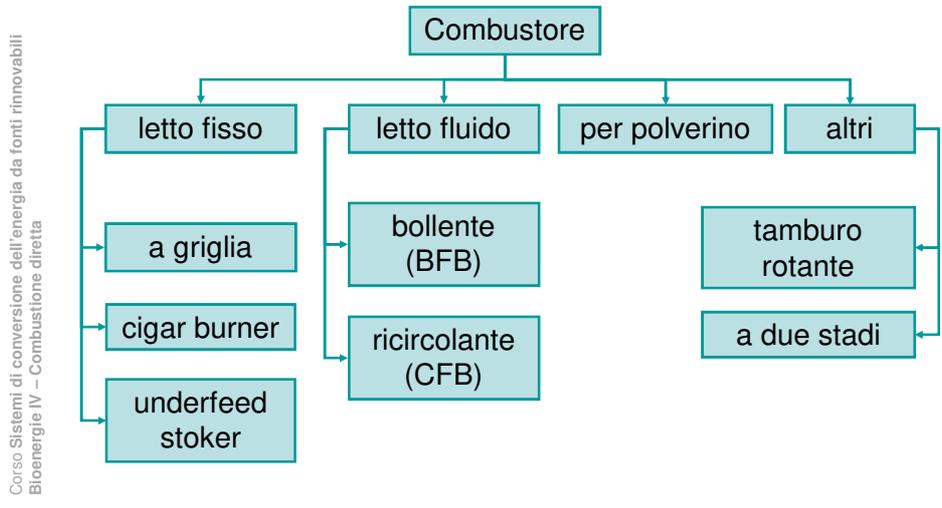
3 ÷ 5 kWh/kg

Grande variabilità per la presenza di ceneri e per l'umidità

Fonte: Itabia, 2009, "I traguardi della bioenergia in italia - Rapporto 2008"

## Le tecnologie per la combustione

Esistono molti tipi di bruciatori per biomasse solide ottimizzati per la tipologia della biomassa bruciata



## Il combustore a griglia

La tecnologia dei forni a griglia è caratterizzata dal movimento della griglia stessa che può essere fissa, mobile, a nastro, vibrante e rotante, a seconda del movimento si hanno quindi combustori

- griglia a nastro
- a griglia fissa
- a griglia mobile inclinata od orizzontale
- a griglia vibrante
- griglie rotanti alimentate dal basso



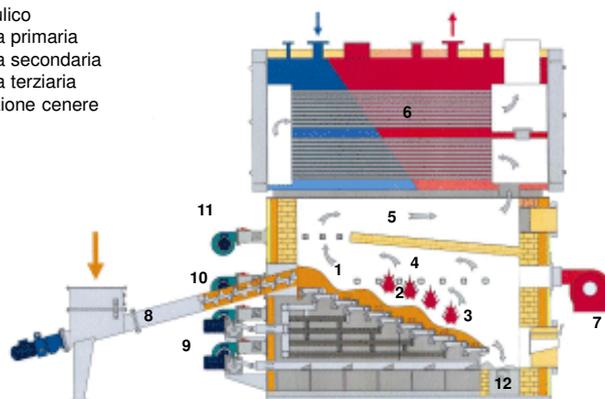
## Il combustore a griglia

- E' adatto per una biomassa avente **dimensione variabili** ma comunque con particelle non troppo piccole;
- Non costituisce un ostacolo l'**elevato contenuto di umidità** della **biomassa** come quello delle **ceneri**;
- Si possono utilizzare **miscele di diverse biomasse legnose**, ma non di legno e biomassa erbacea (es. paglia), a causa delle diverse caratteristiche di combustione, dell'umidità e del diverso punto di fusione delle ceneri.
- E' necessaria una **distribuzione omogenea del combustibile e delle braci** per gestire la distribuzione di aria primaria nelle varie zone della griglia; in tal caso i forni a griglia operano, tramite il controllo dell'aria primaria anche al **25 % del carico**.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie IV – Combustione diretta

## Il combustore a griglia

1. Zona di essiccazione
2. Zona di gassificazione
3. Zona di ossidazione
4. Camera primaria
5. Camera secondaria
6. Scambiatore
7. Bruciatore ausiliario
8. Spintore idraulico
9. Ventilatori aria primaria
10. Ventilatori aria secondaria
11. Ventilatori aria terziaria
12. Coclea estrazione cenere



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie IV – Combustione diretta

## Il combustore a griglia a nastro

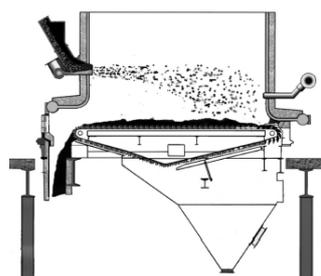
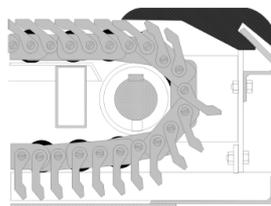
La griglia a nastro è collegata a un meccanismo a rulli e il letto di braci è trasportato dalla griglia.

### Vantaggi

- combustione **uniforme** specie se si utilizza biomassa sottoforma di chips o pellets,
- **basse emissioni** di particolato, dato il letto stabile e fisso di braci
- **facilità di manutenzione** e sostituzione della griglia.

### Svantaggi

- **tempi di combustione più lunghi** rispetto alle griglie mobili
- **necessità di maggiore aria** primaria per ottenere una combustione completa.

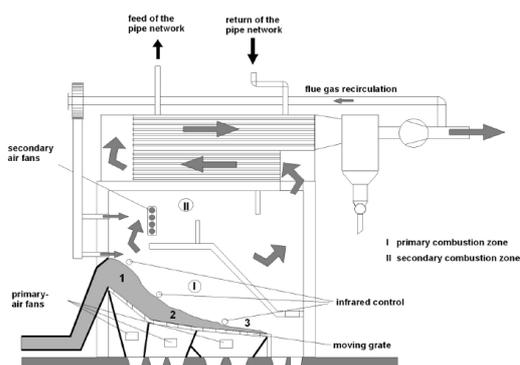


Fonte: Sjaak van Loo and Jaap Koppejan, 2008, The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing, Earthscan

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie IV – Combustione diretta

## Il combustore a griglia mobile

Nei forni a griglia mobile si alternano schiere fisse e mobili e il movimento avanti-indietro alternato trasporta il combustibile sulla griglia. La miscelazione omogenea permette una buona distribuzione di aria primaria sul letto.



La griglia è divisa in varie sezioni che possono essere mosse a velocità diverse a seconda delle condizioni di combustione. A differenza del sistema a nastro, questo tipo di forno consente una complessa regolazione della frequenza di movimento, per evitare una elevata concentrazione di biomassa incombusta nelle ceneri.

Fonte: Sjaak van Loo and Jaap Koppejan, 2008, The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing, Earthscan

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie IV – Combustione diretta

## Il combustore a griglia vibrante

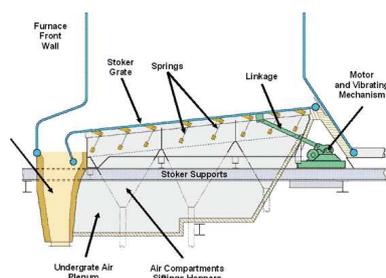
La griglia è composta da una parete inclinata di tubi posizionata sopra delle molle. Sono particolarmente adatti per la combustione di paglia, stocchi, etc.

### Vantaggi:

- Viene evitata la formazione di **scorie di grandi dimensioni** grazie alle vibrazioni
- Adatta per combustibili che presentano problemi di sinterizzazione e formazione di scorie ed agglomerati (paglia, scarti legnosi)

### Svantaggi:

- Elevata **emissione di ceneri volatili**;
- Maggiori emissioni di **CO**
- **Combustione incompleta delle ceneri** (nota come **bottom-ash**) per la difficoltà di controllare il trasporto di combustibile e ceneri



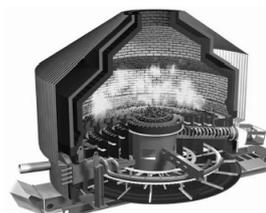
## Combustori a griglia

### Combustori a griglia fissa

Sono sistemi utilizzati solo per impianti di piccola taglia poiché il trasporto (che avviene grazie all'alimentazione e all'inclinazione della griglia) e la distribuzione del combustibile non sono controllabili.

### Griglie rotanti alimentate dal basso

La griglia è conica ed è divisa in sezioni che ruotano in senso opposto. L'aria primaria viene insufflata dal basso nella camera di combustione primaria. L'utilizzo di tali griglie rotanti permette un ottimo mixing tra il combustibile che brucia e il combustibile fresco ed umido.



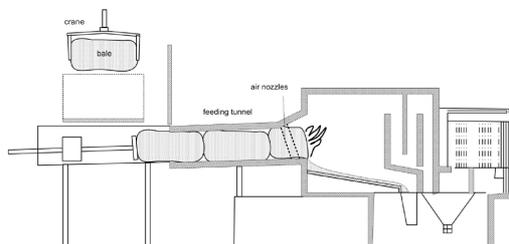
Tali griglie sono molto adatte per la combustione di biomassa molto umida (corteccia, segatura, chip di legno), con contenuto di umidità sino al 65%. I gas combustibili che si formano sono bruciati in una camera di combustione secondaria

Fonte: Sjaak van Loo and Jaap Koppejan, 2008, The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing, Earthscan

## Combustori a letto fisso

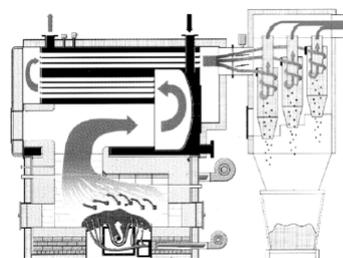
### Cigar burner

Sviluppato in Danimarca per la combustione di paglia e residui della coltivazione dei cereali.



### Underfeed stoker

E' una tecnologia economica e sicura per taglie fino a 6 MW. Adatta per la combustione di biomasse con un basso contenuto di ceneri.



Fonte: Sjaak van Loo and Jaap Koppejan, 2008, The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing, Earthscan

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergia IV – Combustione diretta

## Combustori a letto fluido

I combustori a letto fluido sono costituiti da delle camere cilindriche verticali con pareti refrattarie o membranate e con la base perforata e riempita con un letto composto da materiale inerte e granulare (es. sabbia, dolomite) mantenuto in sospensione da un flusso di aria primaria proveniente dal basso attraverso i fori.

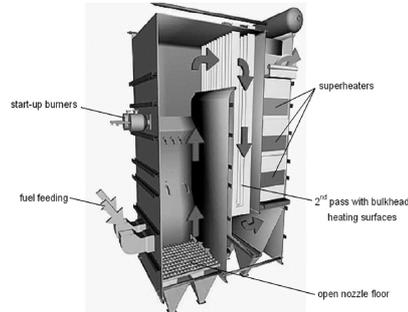
Il materiale del letto rappresenta il 90-98 % della miscela letto-combustibile.

In questi combustori avviene un intenso scambio termico e si verificano delle ottime condizioni per una combustione completa con basso eccesso d'aria.

La temperatura è mantenuta al di sotto di 650-900 °C (circa 100-200 °C inferiore a quella dei combustori a letto fisso) per evitare la sinterizzazione del letto.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergia IV – Combustione diretta

## Combustori a letto fluido

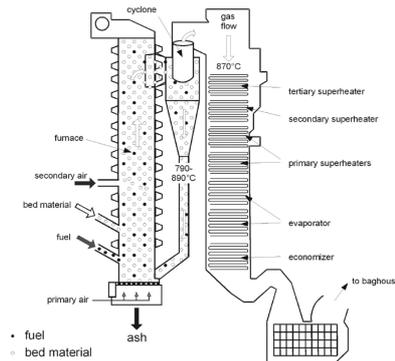


### Letto fluido bollente (BFB)

Il letto è fluidizzato attraverso l'introduzione di aria primaria nella parte inferiore dell'impianto. La velocità di fluidizzazione è circa 1-2.5 m/s.

### Letto fluido ricircolante (CFB)

Il materiale del letto è trasportato con i gas, separato tramite cicloni, e reintrodotta in camera di combustione. La velocità di fluidizzazione è circa 5-10 m/s.



Fonte: Sjaak van Loo and Jaap Koppejan, 2008, The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing, Earthscan

## Combustori a letto fluido

### Vantaggi

- buona flessibilità nei confronti di miscele di diversi combustibili (es. legno e paglia, in proporzione tale da evitare però problemi per la formazione di ceneri bassofondenti) grazie all'ottima miscelazione
- basse emissioni di NO<sub>x</sub>
- la miscelazione permette una buona efficienza degli additivi (ad esempio per catturare lo zolfo)
- il basso valore di eccesso d'aria aumenta l'efficienza di combustione e riduce il volume di gas al camino.

### Svantaggi

- scarsa flessibilità sulle dimensioni della biomassa in ingresso (< 40 mm per CFB e < 80 mm per BFB), necessità di pretrattamenti
- scarsa tolleranza delle impurità (per esempio, metalli)
- mal funzionamento ai carichi parziali
- tempo di avvio è molto lungo (necessità di bruciatori ad olio o a gas).
- alto contenuto di solidi (polveri) nei fumi, necessità di precipitatori e sistemi di pulizia dei fasci tubieri
- il materiale del letto si perde anche con le ceneri ed è quindi necessario un reintegro periodico

## Combustori a polverino

I combustibili, frazionati finemente (segatura, trucioli di legno) vengono iniettati nella fornace tramite l'aria di combustione primaria.

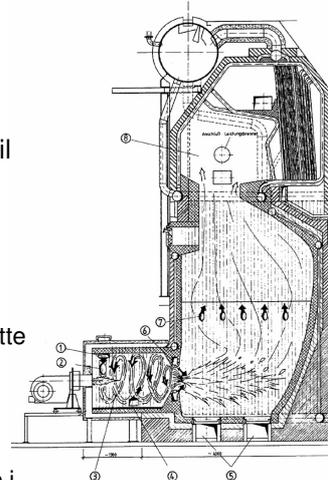
La qualità del combustibile deve essere il più possibile omogenea, la dimensione inferiore a 10-20 mm e l'umidità non superiore a 20% .

### Vantaggi

La piccola pezzatura del combustibile permette una rapida ed efficace variazione di carico. Bassi eccessi d'aria e quindi bassi NOx.

### Svantaggi

Il principale svantaggio di tali bruciatori è che i materiali isolanti si consumano rapidamente per erosione e stress termico.

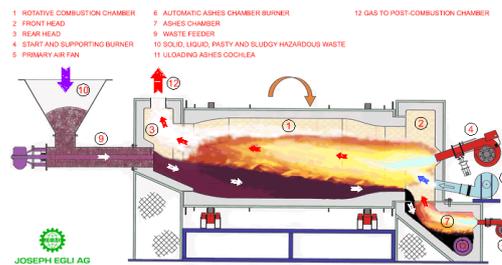


Fonte: Sjaak van Loo and Jaap Koppejan, 2008, The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing, Earthscan

## Gli altri combustori

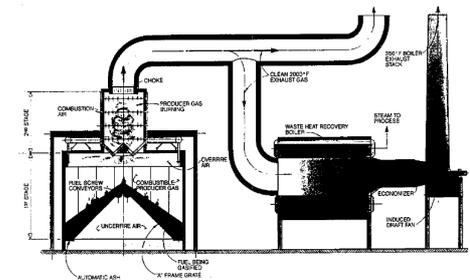
### Combustori a tamburo rotante

Adatto alle applicazioni in cui il combustibile ha caratteristiche termo-fisiche molto povere e contiene elevati carichi inquinanti. Il rimescolamento continuo dovuto alla rotazione del tamburo consente una combustione più completa.



### Combustori doppio stadio

Il processo è diviso in due camere: nella prima avviene la gassificazione e pirolisi del materiale e, nella seconda, la combustione completa dei prodotti gassificati.

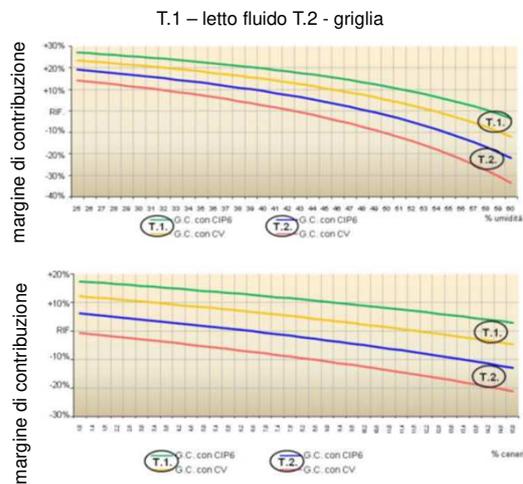


## La qualità del combustibile

La qualità del combustibile influenza sostanzialmente il risultato economico

↑ umidità → ↓ margine

↑ ceneri → ↓ margine



Fonte: G. Castelluccio, D. Scancarollo, S. Franco, "Impatto del Mix di Produzione sui Risultati Economici di un Impianto a Biomasse", Atti III Congresso Nazionale AIGE, Parma, 4-5 Giugno 2009

## La problematiche

- Gestione ceneri
- Emissioni in termini di PM10, NOx e CO superiori sia alla combustione di gasolio sia di gas – necessitano di sistemi di abbattimento

Combustibile	Inquinanti [t/anno]			
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	PM10
<b>Gasolio</b>	26.5	1.88	0.480	0.189
<b>Gas naturale</b>	0.008	1.33	1.12	0.103
<b>Legno secco</b>	0.63	12.1	15.0	9.80

Valori indicativi di emissioni per caldaie da 1 MW<sub>th</sub> con rendimenti tipici per tipo di combustibile

## Controllo emissioni

### Misure primarie

- Ottimizzazione della combustione
    - temperatura di combustione superiore a 850 °C
    - tempo di residenza superiore a 2 secondi a 850 °C
    - tenore di O<sub>2</sub>: 6 – 7%
- ↓
- aria primaria/secondaria
  - fluidodinamica camera combustione
- Riduzione formazione microinquinanti organici

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergia IV – Combustione diretta

## Controllo emissioni

### Misure secondarie

- Rimozione delle polveri:
  - Cicloni;
  - Filtri elettrostatici;
  - Filtri a maniche
- Rimozione gas acidi:
  - lavaggio a secco/semisecco (calce o bicarbonato)
  - lavaggio a umido (acqua,soda)
- Rimozione ossidi di azoto:
  - SNCR (selective non catalytic reduction)
  - SCR (selective catalytic reduction)
- Rimozione microinquinanti:
  - Adsorbimento su carbone attivo
  - Ossidazione catalica (organici)

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergia IV – Combustione diretta

## Le ceneri

La composizione della biomassa utilizzata può determinare una produzione di ceneri (ASH) che può arrivare fino ad oltre il 20 % della massa incenerita.

Raw material	Proximate analysis (wt% by dry basis)			Raw material	Proximate analysis (wt% by dry basis)			Raw material	Proximate analysis (wt% by dry basis)		
	FC	VM	ASH		FC	VM	ASH		FC	VM	ASH
Olive pit	21.2	75.6	3.2	Babul	19.00	79.28	1.72	Peanut hulls	21.09	73.02	5.89
Peach pit	19.8	79.1	1.1	Red wood	19.92	79.72	0.36	RH – CP 4	12.4	63	24.6
Coconut shell	22.1	77.19	0.71	Spruce wood	28.3	70.2	1.5	Rice husk- patni	14.9	69.3	15.8
Akhrot shell	18.78	79.98	1.2	Peltophorum	15.82	82.45	1.73	Saw dust	15.00	82.70	2.30
Pistachio shell	16.84	82.03	1.13	Orchard	14.6	83.3	2.1	Alabama oak wood waste	21.9	74.7	3.4
Groundnut shell	19.48	73.72	6.8	Poplar	16.35	82.32	1.33	Tea bush	21.8	76.5	1.7
Brazil nut shell	22.2	76.1	1.7	Blockwood	14.59	83.32	2.09	W-pallets	15.4	82.1	2.5
Castor seed shell	20	72	8	Corn cob	18.54	80.1	1.36	Coconut waste	24	69.7	6.3
Loblolly pine	33.9	65.7	0.4	Straw	18.3	77.3	3.4	Cottongin trash	15.1	67.3	17.6
Douglas fir bark	32.79	65.46	1.75	Alfalfa seed straw	20.15	72.6	7.25	Tan oak	9.2	90.6	0.2
Wood bark	31.8	66.6	1.6	Wheat straw	23.5	63	13.5				
Wood chips	23.5	76.4	0.1	Barley straw – 1	13.29	82.41	4.3				
Canyon live oak	11.3	88.2	0.5	Rye straw-kustro	15.01	83.02	1.97				
Madrone	15.1	84.5	0.3	Paddy straw	11.8	72.7	15.5				
Beech wood	24.6	74	0.4	Corn stover	14.5	78.1	7.4				
Mango wood	11.36	85.64	2.98	Cotton stalk	19.9	62.9	17.2				
Eucalyptus	16.15	82.62	1.23	Sugarcane bagasse	14.95	73.78	11.27				
Subabul wood	18.52	81.02	1.2	Coconut coir	29.7	66.58	3.72				
Casuarina	19.58	78.58	1.83	Coconut fibre	26.6	70.6	2.8				
Sudan grass	18.6	72.75	8.65	Pine needles	26.12	72.38	1.5				

Fonte: Fuel 86 (2007) 1710–1719

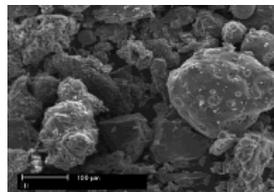
Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie IV – Combustione diretta

## Le ceneri

La legislazione italiana classifica le ceneri risultanti dalla combustione di biomasse come "rifiuti speciali non pericolosi".

Come tali vanno smaltite, ma possono accedere alle procedure semplificate (art. 214 del TUA e decreto ministeriale 5 febbraio 1998) tipo

- produzione di conglomerati cementizi;
- cementifici;
- industria dei laterizi e dell'argilla espansa;
- formazione di rilevati e riutilizzo per recuperi ambientali;
- compostaggio attraverso un processo di trasformazione biologica;
- produzione di fertilizzanti.



Benché ci siano state promettenti sperimentazioni (progetto Biocen) e la pratica sia comune in altri paesi, **non** è permesso l'utilizzo agronomico.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie IV – Combustione diretta

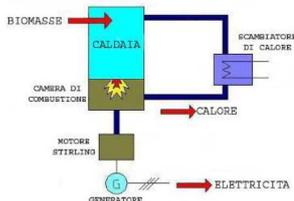
## Applicazioni

Possibilità di accoppiamento con motori primi per la cogenerazione

- turbine a gas a combustione esterna (0.1 – 1 MW)
- motori Stirling (1 – 5 kW)
- cicli vapore (1 – 50 MW)
- cicli ORC (0.2 – 2 MW)

### Progetto ENERWOOD

Microcogenerazione attraverso un motore Stirling alimentato con biomasse



## Applicazioni

Regione Comune (Provincia)	Società di gestione	Capacità di biomasse (t/anno)	Potenza elettrica (MWe)	Tecnologia adottata del forno
<b>Piemonte</b>				
1 Airasca (TO)	STC-ATEL Srl	120.000	14,6	Griglia mobile
2 Crova (VC)	Idroblins Srl	64.000	6,7	Griglia mobile
3 Verzuolo (CN)	Carlere Burgo SpA	95.000	5,5	Letto fluido
<b>Lombardia</b>				
4 Brescia	ASM (III linea)	290.000	20	Griglia mobile
5 Sustinente (MN)	Gruppo Mauro Savola	110.000	8	Griglia mobile
6 Pavia	Riso Scotti Energia Srl	80.000	7,6	Griglia mobile
7 Valle Lomellina (PV)	Curti Riso SpA	42.000	4,5	Griglia mobile
8 Lomello (PV)	Riso Ticino Srl	27.000	3,6	Griglia fissa
9 Castiraga Vidardo (LO)	Ecowatt Vidardo Srl	40.000	3,6	Griglia mobile
<b>Veneto</b>				
10 Ospitale di Cadore (BL)	Sicet Srl	200.000	20	Letto fluido
11 Castellavazzo (BL)	CEB SpA	39.000	5	Griglia mobile

Fonte: W. Merzagora, "Lo stato dell'arte e le prospettive di sviluppo delle biomasse agroforestali per utilizzo energetico", Atti corso di formazione "Lo sviluppo delle bioenergie", Milano 12-14 maggio 2009

## Applicazioni

Regione Comune (Provincia)	Società di gestione	Capacità di biomasse (t/anno)	Potenza elettrica (MWe)	Tecnologia adottata del forno
<b>Friuli-Venezia Giulia</b> 12 Manzano (UD)	<b>Nuova Romano Bolzicco</b>	21.000	2,5	Griglia mobile
<b>Emilia Romagna</b> 13 Bando d'Argenta (FE) 14 Faenza (RA)	<b>S. Marco Bioenergie SpA</b> <b>Cavro Energia Srl</b>	280.000 33.000	20 3,2	Griglia vibrante Griglia mobile
<b>Toscana</b> 15 Scarlino (GR)	<b>Scarlino Energia Srl</b>	120.000	19,5	Letto fluido
<b>Umbria</b> 16 Terni	<b>ENA Srl</b>	90.000	10	Griglia mobile
<b>Molise</b> 17 Termoli (CB) 18 Pozzilli (IS)	<b>Ecoenergy Srl</b> <b>Ergonut Srl</b>	120.000 85.000	14,6 11,4	Griglia mobile Griglia mobile

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie IV – Combustione diretta

Fonte: W. Merzagora, "Lo stato dell'arte e le prospettive di sviluppo delle biomasse agroforestali per utilizzo energetico", Atti corso di formazione "Lo sviluppo delle bioenergie", Milano 12-14 maggio 2009

## Applicazioni

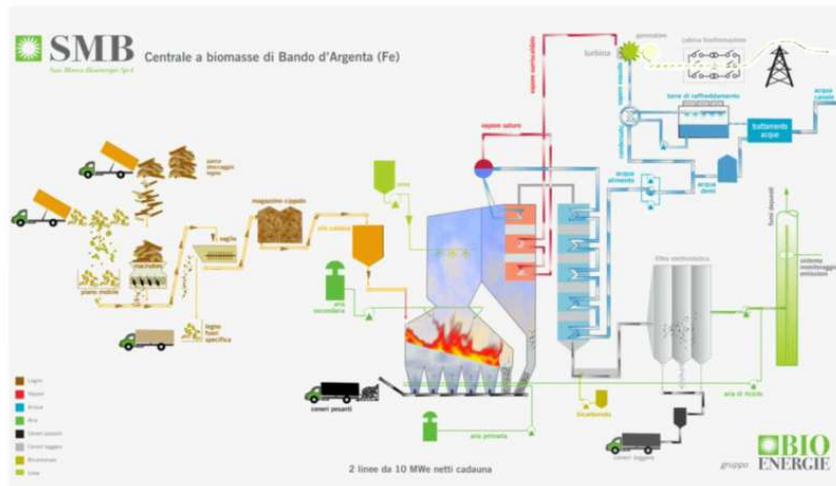
Regione Comune (Provincia)	Società di gestione	Capacità di biomasse (t/anno)	Potenza elettrica (MWe)	Tecnologia adottata del forno
<b>Puglia</b> 19 Monopoli (BA) 20 Maglie (LE)	<b>Ital Green Energy Srl</b> <b>Copersalento SpA</b>	110.000 18.000	12 3	Griglia mobile Griglia mobile
<b>Calabria</b> 21 Strongoli (KR) 22 Crotona 23 Cutro (KR) 24 Rende (CS) 25 Rossano Calabro (CS)	<b>Biomasse Italla SpA</b> <b>Biomasse Italla SpA</b> <b>E.T.A. SpA</b> <b>Ecosesto SpA</b> <b>Rossano Energia Srl</b>	400.000 250.000 190.000 150.000 36.000	40 20 14 12,3 4,2	Letto fluido Griglia vibrante Letto fluido Griglia vibrante Griglia vibrante

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie IV – Combustione diretta

Fonte: W. Merzagora, "Lo stato dell'arte e le prospettive di sviluppo delle biomasse agroforestali per utilizzo energetico", Atti corso di formazione "Lo sviluppo delle bioenergie", Milano 12-14 maggio 2009

## Applicazioni

**Centrale di Bando (Ferrara)** - Due linee da 10 MW elettrici netti, basate sulla tecnologia di combustione a griglia mobile. L'impianto ha un rendimento di circa il 25 %.



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie IV – Combustione diretta

## Co-combustione

Co-combustione è la combustione simultanea di combustibili differenti (principalmente biomasse e/o RSU con carbone)

Opzione meno costosa e tecnicamente attuabile sfruttando impianti esistenti (grande taglia → maggiore efficienza)

Correntemente utilizzata in USA, Finlandia, Danimarca, Germania, Austria, Spagna e Svezia

- % di biomassa nel blend limitata (legno 5-10 %)
- Rendimento < impianto carbone, >>> impianto biomassa
- Modifiche dell'impianto (dovute alla variazione del combustibile)

### Riguardo le biomasse

Risolve problemi di approvvigionamento  
Rappresenta una via realistica ed efficiente per aumentare la produzione di energia da fonte rinnovabile

### Riguardo il carbone

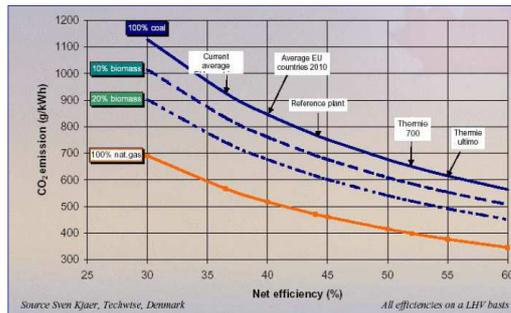
Riduce le emissioni globali e locali  
Abbassa i costi del combustibile (incentivi)  
Riduce il debito di CO<sub>2</sub>

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie IV – Combustione diretta

## Co-combustione

La co-combustione di biomasse e carbone permette quindi

- Lo sfruttamento del migliore rendimento dei cicli a vapore di grossa taglia (i moderni USC superano il 45% netto)
- La riduzione delle emissioni specifiche rispetto all'energia prodotta, considerando l'impatto della CO<sub>2</sub> di origine non fossile
- Un 5% di co-combustione su tutte le installazioni a carbone, comporterebbe circa 2 Mt/anno di riduzione di CO<sub>2</sub> ed un raddoppio dei TWh di origine biomasse (in alcune applicazioni in EU/US il co-combustione può superare il 20% e si inizia a parlare di 30 ÷ 50%)

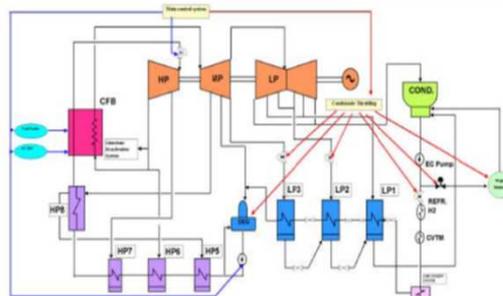
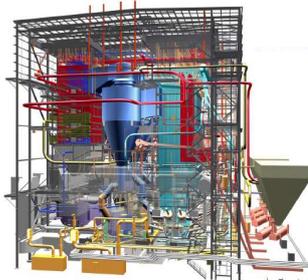


## Co-combustione - Esempi

### Centrale Enel del Sulcis

Unità 2: impianto a vapore da 340 MW alimentato da una caldaia a letto fluido ricircolante (CFB).

Nel 2005, Enel ha modificato l'impianto in modo da poterlo alimentare in contemporanea con carbone e biomasse (legno e sansa esausta) fino all'8% dell'input termico.



bioenergie V

# Gassificazione e pirolisi

Corso: Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili

Anno accademico: 2018/2019

Docente: Mirko Morini

## Gassificazione

La gassificazione è la conversione della biomassa in composti gassosi (ossido di carbonio, anidride carbonica, metano, idrogeno), eseguito tramite parziale reazione di ossidazione con aria, ossigeno, vapore d'acqua.

	<b>aria</b>	<b>ossigeno</b>	<b>vapore</b>
<b>CO</b>	12-15	30-37	32-41
<b>CO<sub>2</sub></b>	14-17	25-29	17-19
<b>H<sub>2</sub></b>	9-10	30-34	24-26
<b>CH<sub>4</sub></b>	2-4	4-6	12.4
<b>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub></b>	0.2-1	0.7	2.5
<b>N<sub>2</sub></b>	56-59	2-5	2.5
<b>potere calorifico inferiore (MJ/Nm<sup>3</sup>)</b>	3.8-4.6	10	12-13
<b>resa del gas (Nm<sup>3</sup>/kg legno secco)</b>	2.3-3	1.3-1.45	-

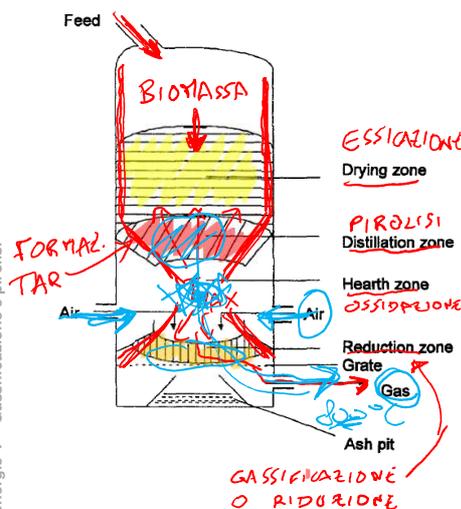
Per questa applicazione vengono utilizzati legno e scarti legnosi, residui colturali o agroindustriali secchi, colture dedicate.

## Il gassificatore

	Tipo gassificatore	T <sub>reaz.</sub> [°C]	T <sub>syngas</sub> [°C]	Syngas tars [mg/Nm <sup>3</sup> ]	Contenuto Particolato [mg/Nm <sup>3</sup> ]	Capacità max Biomassa [t/h]	Dimen-sioni pellet [cm]	Campo potenze [MW <sub>e</sub> ]
LETTO FISSO	Downdraft	1000	800	Molto Basso (50-500)	Modesto (100-8000)	0.5	1 - 10	0,1 - 1
	Updraft	1000	250	Molto Alto (10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup> )	Basso (100-1000)	10	0.5 - 5	1 - 10
	Cross current	900	900	Molto Alto (60 +600)	Modesto (100-8000)	1	1 - 10	0,1 - 2
	Open core	900	900	Molto Basso	Modesto	0.5	0.1-0.3	0,1 - 1
LETTO FLUIDO	Reattore singolo	850	800	Medio (4 10 <sup>3</sup> +2 10 <sup>4</sup> )	Alto (8 10 <sup>3</sup> -10 <sup>5</sup> )	10	< 2	1 - 20
	Letto fluido veloce	850	850	Basso	Molto Alto	20	< 1	2 - 50
	Letto circolante	850	850	Basso	Molto Alto (5 10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup> )	20	< 1	2-100
	Letto trascinato	1000	1000	Medio (10 <sup>4</sup> +8 10 <sup>4</sup> )	Molto Alto	20	<0.2	5-100
	Doppio reattore	800	700	Alto	Alto	10	< 2	2 - 50

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie V - Gassificazione e pirolisi

## Il gassificatore downdraft



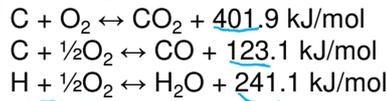
In questo tipo di reattori la biomassa e il gas si muovono entrambi verso il basso. La "hearth zone" fornisce calore per gli altri processi solo per irraggiamento. Il vantaggio è la ridotta quantità di tar poiché viene ossidato nella "hearth zone", mentre gli svantaggi sono l'elevato contenuto di polveri nel producer gas, la scarsa flessibilità rispetto al combustibile (pezzatura e umidità) e l'elevata temperatura del producer gas. E' comunque il più diffuso nell'accoppiamento con motori a combustione interna.

Quaak P., Knoef H., Stassen H., 1999, A Review of Combustion and Gasification Technologies, WTP 422

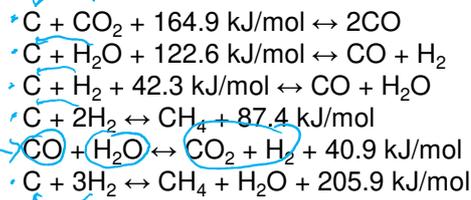
Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie V - Gassificazione e pirolisi

## Teoria della gassificazione

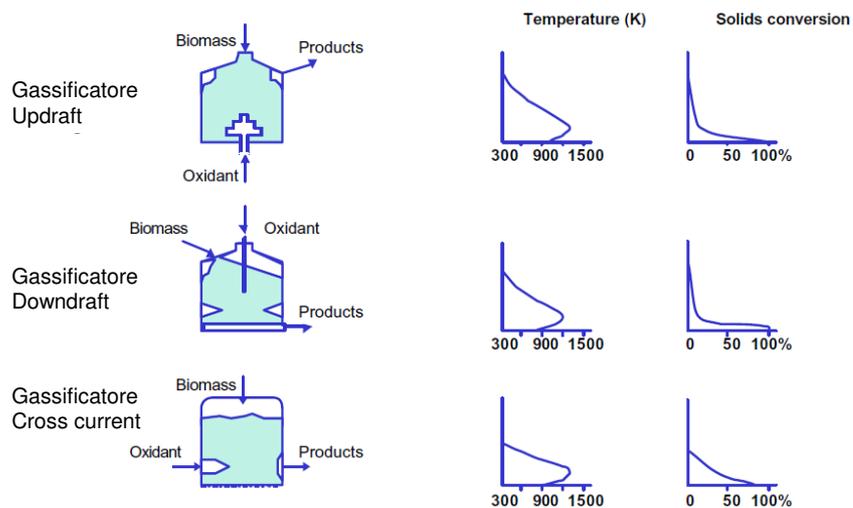
Le reazioni che forniscono l'energia al processo di gassificazione sono quelle di ossidazione che avvengono nella "hearth zone"



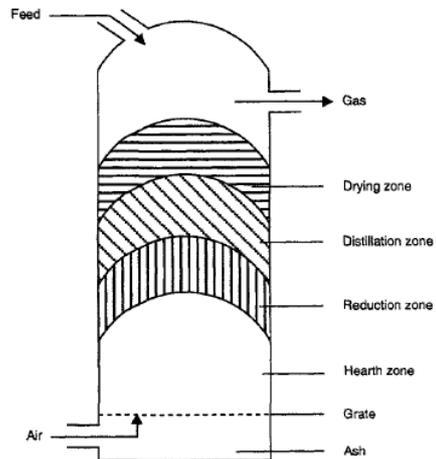
L'energia risultante da queste reazioni viene usata per essiccare la biomassa, per consentirne la devolatizzazione e per permettere le reazioni che avvengono nella zona di riduzione e che consentono la formazione del producer gas



## Teoria della gassificazione



## Il gassificatore updraft



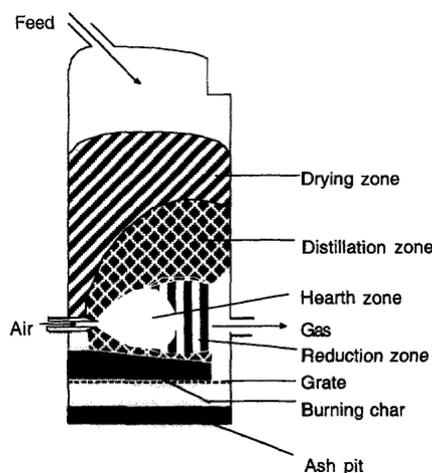
In questo tipo di reattori la biomassa si muove verso il basso, mentre il gas va verso l'alto. Ciò consente un migliore scambio termico e di conseguenza un miglior rendimento.

Gli svantaggi di questo tipo di applicazione è la maggior quantità di tar nel producer gas a causa del fatto che i prodotti della pirolisi non attraversano la "hearth zone". Questo non è un problema se il gas non viene bruciato in un motore a combustione interna.

Quaak P., Knoef H., Stassen H., 1999, *A Review of Combustion and Gasification Technologies*, WTP 422

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie V – Gassificazione e pirolisi

## Il gassificatore cross current



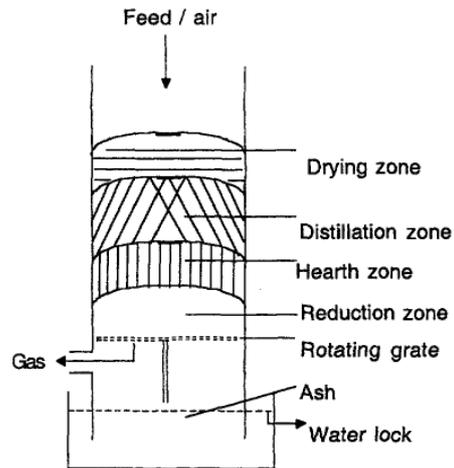
Il gassificatore cross current è adatto per la gassificazione del charcoal. La gassificazione del charcoal è caratterizzata da temperature molto alte nella "hearth zone" (maggiori di 1500 °C), che possono provocare problemi ai materiali.

Il vantaggio di questi sono le piccole dimensioni che possono raggiungere (< 10 kW), lo svantaggio è la scarsa conversione del tar (è necessaria quindi una alimentazione con charcoal di qualità al fine di evitarne la formazione).

Quaak P., Knoef H., Stassen H., 1999, *A Review of Combustion and Gasification Technologies*, WTP 422

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie V – Gassificazione e pirolisi

## Il gassificatore open-core

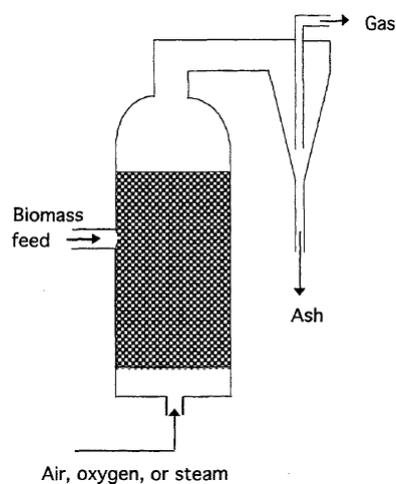


Il gassificatore open-core è adatto per il processamento di materiali fini con bassa densità, come la lolla di riso. Per questo tipo di materiali non è possibile applicare lo strozzamento nella "hearth zone" per evitare il fenomeno di bridging e il conseguente blocco dello scorrimento della biomassa. Una grata rotante può essere applicata per rimescolare la biomassa. Le ceneri cadono in un catino d'acqua dal quale vengono rimosse.

Quaak P., Knoef H., Stassen H., 1999, *A Review of Combustion and Gasification Technologies*, WTP 422

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie V – Gassificazione e pirólisi

## Il gassificatore a letto fluido



Il principio di funzionamento è lo stesso dei combustori a letto fluido. Rispetto a quelli a letto fisso sono più adatti a trattare biomasse ad alto contenuto di ceneri, ma l'utilizzo di questo tipo di gassificatori è limitato alle alte potenze (> 10 MW). Hanno anche una maggior flessibilità nei confronti dell'umidità. Di contro è maggiore la presenza di tar e polveri nel producer gas.

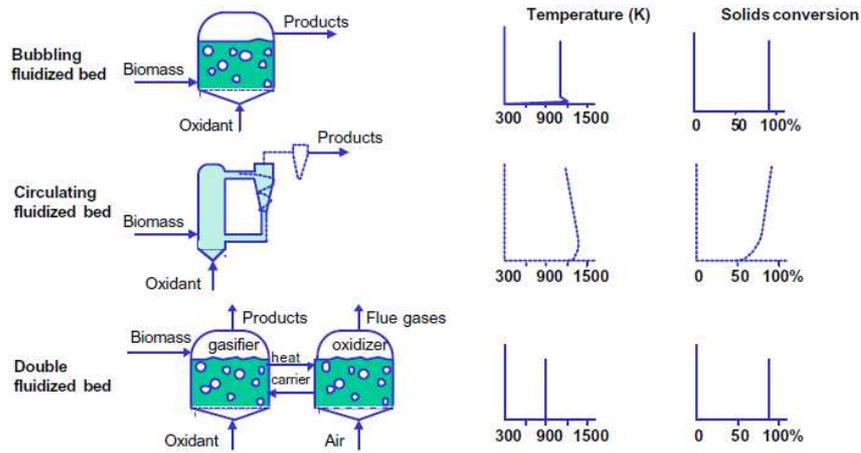
Esistono anche applicazioni di gassificatori in pressione per alimentare direttamente turbine a gas.

Quaak P., Knoef H., Stassen H., 1999, *A Review of Combustion and Gasification Technologies*, WTP 422

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie V – Gassificazione e pirólisi

## Il gassificatore a letto fluido

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie V – Gassificazione e pirólisi



H.E.M. Stassen, W. Prins and W.P.M. van Swaaij, 2002, Thermal conversion of biomass into secondary products, the case of gasification and pyrolysis, Proceeding of Twelfth European Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection

## I prodotti della gassificazione

Il producer gas è composto principalmente da monossido di carbonio (CO), idrogeno (H<sub>2</sub>), anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), metano, ed acqua, ma è contaminato da Tar (idrocarburi pesanti), particolato, metalli alcalini, tracce di ammoniaca (NH<sub>3</sub>), acido solfidrico (H<sub>2</sub>S) e acido cloridrico (HCl), ceneri.

		Gassificatore Downdraft	Gassificatore Updraft	Letto Fluido
Fuel moisture	% mf	6-25	n.d. <sup>a</sup>	13-20
Particles	mg/Nm <sup>3</sup>	100-8000	100-3000	8000-100,000
Tars	mg/Nm <sup>3</sup>	10-6000	10,000-150,000	2000-30,000
LHV	MJ/Nm <sup>3</sup>	4.0-5.6	3.7-5.1	3.6-5.9
H <sub>2</sub>	Vol. %	15-21	10-14	15-22
CO	Vol. %	10-22	15-20	13-15
CO <sub>2</sub>	Vol. %	11-13	8-10	13-15
CH <sub>4</sub>	Vol. %	1-5	2-3	2-4
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	Vol. %	0.5-2	n.d. <sup>a</sup>	0.1-1.2
N <sub>2</sub>	Vol. %	rest	rest	rest

<sup>a</sup> n.d. = not determined.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie V – Gassificazione e pirólisi

Hasler, P.; Nussbaumer, Th., 1999, Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification, Biomass & Bioenergy

## I contaminanti del producer gas

Contaminante	Problemi
Particolato (ceneri, particelle di char, materiale inerte in gassificatori a letto fluido)	Erosione
Metalli alcalini (composti di Na e K)	Corrosione a caldo
Composti dell'azoto (principalmente NH <sub>3</sub> ed HCN)	Formazione di NOx
Tar	Intasamento filtri, difficoltà di combustione, depositi all'interno dell'impianto, avvelenamento catalizzatori
Composti di zolfo e cloro (H <sub>2</sub> S, HCl)	Corrosione, emissioni, avvelenamento catalizzatori

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie V – Gassificazione e pirólisi

## La pulizia del producer gas

Vista la presenza dei contaminanti il producer gas va trattato in funzione della tecnologia nella quale è previsto il suo impiego (caldaie, turbine, motori a combustione interna, etc.).

		IC engine	Gas turbine
Particles	mg/Nm <sup>3</sup>	< 50	< 30
Particle size	µm	< 10	< 5
Tar	mg/Nm <sup>3</sup>	< 100	
Alkali metals	mg/Nm <sup>3</sup>		0.24

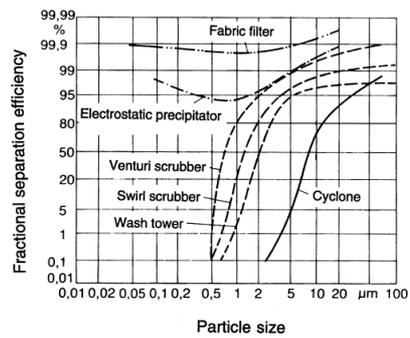
Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie V – Gassificazione e pirólisi

Hasler, P.; Nussbaumer, Th., 1999, Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification, Biomass & Bioenergy

## Rimozione delle polveri

I principali sistemi sono:

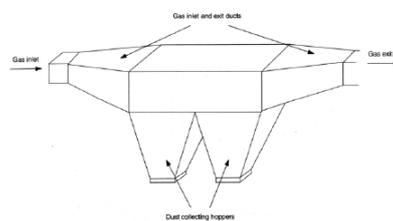
- Camere di calma
- Cicloni
- Filtri a barriera (a maniche, a candela, packed)
- Precipitatori elettrostatici
- Lavaggio (wet scrubbers, Venturi scrubbers)



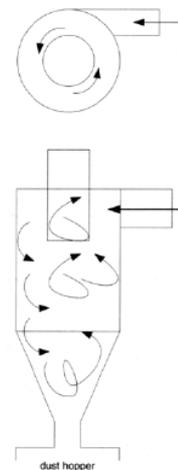
Hasler, P.; Nussbaumer, Th., 1999, Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification, Biomass & Bioenergy

## Rimozione delle polveri

Camera di calma

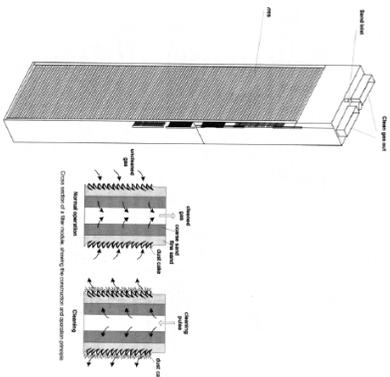


Ciclone

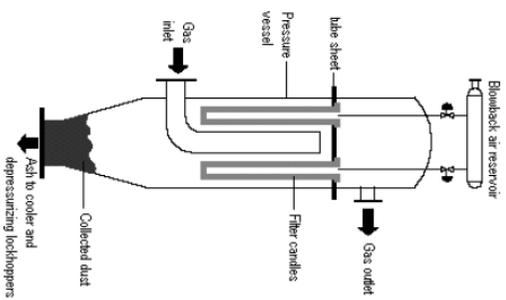


## Rimozione delle polveri

### Filtri a barriera



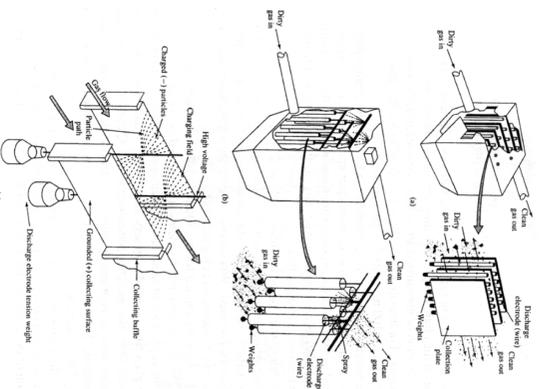
### Filtri a candele



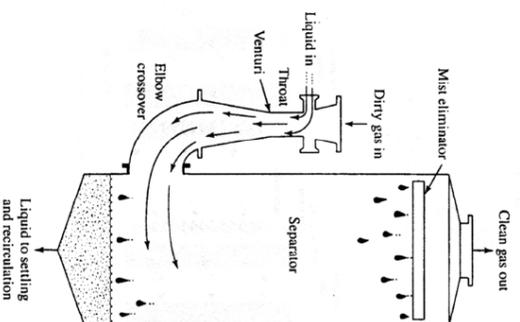
Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie V – Gassificazione e pirolisi

## Rimozione delle polveri

### Precipitatori elettrostatici



### Scrubber (e.g. Venturi)



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie V – Gassificazione e pirolisi

## Rimozione del tar

Il tar deve essere sempre rimosso quando

- il gas è raffreddato prima del suo utilizzo
- il gas è compresso prima del suo utilizzo
- il gas è utilizzato in sistemi quali MCI o TG

Due principali sistemi per la rimozione dei tar

- Rimozione fisica – si condensano gocce di tar e le si rimuovono con sistemi simili a quelli per il particolato

- Rimozione chimica

**Cracking catalitico:** consente di raggiungere livelli di rimozione maggiori del 99% usando catalizzatori a base di dolomite o nickel a temperature di 800 – 900 °C. I catalizzatori metallici sono più suscettibili alla contaminazione, alla bassa concentrazione di idrogeno e alla presenza di solfuri nel combustibile

**Cracking termico:** tramite ossidazione parziale o contatto termico diretto. Diversi esperimenti hanno mostrato che il cracking termico a 800 – 1000 °C consente di ridurre la presenza dei tars nel gas fino a livelli paragonabili a quelli di gassificatori downdraft. Comunque, il tar derivanti da biomasse risultano ardui da rimuovere per via unicamente termica.

## Rimozione dei composti alcalini

Per la maggior parte delle applicazioni il gas deve essere raffreddato al di sotto dei 600 °C.

A queste temperature i sali dei metalli alcalini precipitano sotto forma di parcelle o aderiscono a particelle di polvere.

L'importanza della rimozione di queste particelle consiste nel fatto che i sali a temperature elevate vaporizzano e creano problemi agli impianti nei quali è utilizzato il producer gas come combustibile.

Le tecnologie precedentemente illustrate (filtri, precipitatori, scrubber) possono rimuovere queste particelle

Si deve però raffreddare il flusso molto al di sotto dei 600 °C per potere utilizzare questi sistemi.

Per pulire il gas (preservandone l'elevata temperatura) si possono utilizzare le candele ceramiche.

## Rimozione dei composti di S e Cl

### Composti dello zolfo

Le biomasse non contengono molto zolfo ma per l'impiego in sistemi energetici a combustione interna può essere necessaria la rimozione dei composti dello zolfo mediante (i) aggiunta della dolomite nel processo di gassificazione o (ii) con letto caldo di ossido di zinco.

### Composti del cloro

Derivano generalmente dai residui di erbicidi e pesticidi presenti nelle biomasse e da residui organici di origine animale.

Possono essere rimossi tramite adsorbimento con materiali attivi sia direttamente nel gassificatore che in un reattore secondario oppure mediante soluzione in un sistema di lavaggio umido.

## Rimozione dei composti dell'azoto

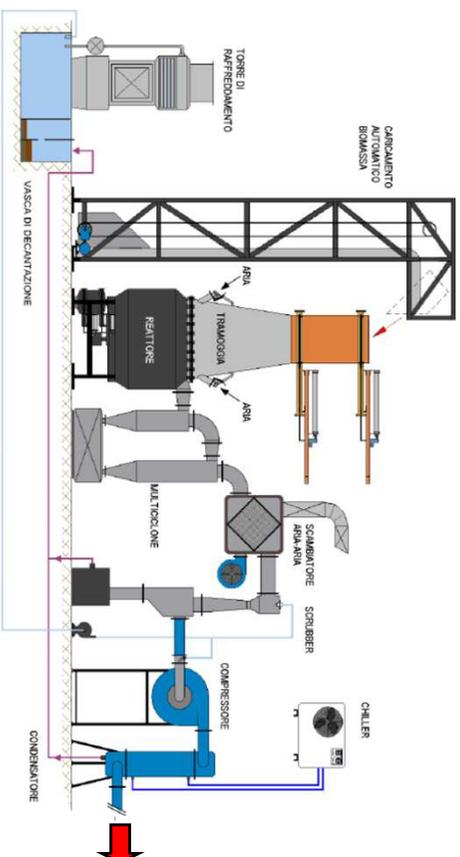
Sostanzialmente si tratta della rimozione dell'ammoniaca, che darebbe origine agli NOx durante la combustione

I metodi principali sono

- Distruzione catalitica: si utilizzano catalizzatori simili a quelli per la distruzione dei tar. Ciò dovrebbe consentire una rimozione del 99% dell'ammoniaca con catalizzatori base-ferro, a temperature di circa 900 °C
- Lavaggio ad umido: è possibile soprattutto nei sistemi in cui il gas è raffreddato. Il sistema è molto efficace per rimuovere i composti azotati.

Poiché fondamentalmente i composti dell'azoto nel producer gas sono generati dall'azoto presente nella biomassa è ovvio che una riduzione di questi composti parte dalla scelta di una biomassa povera di azoto.

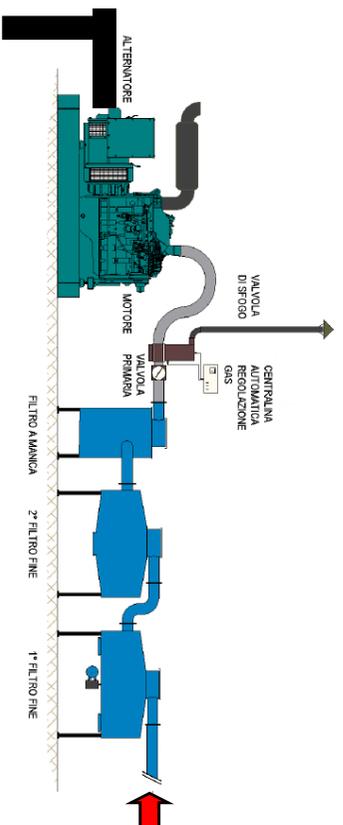
# L'impianto di gassificazione



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie V – Gassificazione e pirolisi

impianto Ankur Scientific – fonte sito Caerna s.r.l.

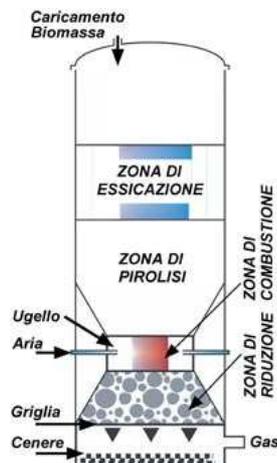
# L'impianto di gassificazione



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie V – Gassificazione e pirolisi

impianto Ankur Scientific – fonte sito Caerna s.r.l.

## Il gassificatore



Gassificatore downdraft a letto fisso

Alimentazione a cippato di legno

Rendimento  $\approx 80\%$  (con ricircolo del charcoal)

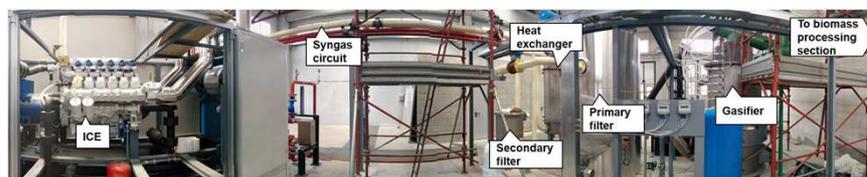
PCI  $\approx 5 \text{ MJ/Nm}^3$

fonte sito Caema s.r.l.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie V – Gassificazione e pirolisi

## Applicazione

**Campus dell'Università di Parma.** Impianto installato all'interno del progetto Synbiose (Siram by Veolia, CIDEA-UniPr e DI-UniFe). Produce energia elettrica e termica a partire da cippato di legno combinando un impianto di gassificazione downdraft con un motore a combustione interna della potenza elettrica di 125 kW.



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie V – Gassificazione e pirolisi



<http://www.synbiose.it/>

## Pirolisi

La pirolisi è la decomposizione termochimica di materiali organici ottenuta tramite applicazione di calore a temperature comprese fra 400 °C e 1000 °C in presenza di una ridottissima quantità od in assenza di ossigeno.

Il risultato è la produzione di una mix di tipi diversi di combustibile (solido, liquido, gassoso) in rapporto alla temperatura ed al tipo di procedimento seguito

- gas: 13-85 %
- liquido (bio-oil): 5-60 %
- solido (char): 10-35 %

	Temperatura (°C)	Tempo di residenza	Liquidi	Solidi (char)	Gas
Pirolisi Fast Flash	~ 500 - 650 >700	~ sec < sec	75	12	13
Pirolisi - Gassificazione	600-1000	lunghi	5	10	85

## Pirolisi

Sono state studiate numerose configurazioni di Reattori per pirolisi:

- Letti Fluidi (Fluid Beds – FB) e letti Fluidi Ricircolanti (Circulating Fluidised Beds – CFB) si sono affermati
- altre tipologie di reattori (ablative, transported bed, cono rotante, vacuum moving bed, entrained flow)

Reactor type	Organisations
Fluid bed	Aston University, Dynamotive, Hamburg University, INETI, IWC, Leeds University, NREL, Oldenberg University, RTI, Sassari University, UEF, VTT, Zaragoza University, ZSW-Stuttgart University
Ablative	NREL, Aston University, BBC, Castle Capital
Circulating fluid bed	CRES, CPERI, ENEL/Pasquali
Entrained flow	GTRI, Egemin
Rotating cone	Twente University, BTG/Schelde/Kara
Transported bed	Ensyn, (at ENEL, Red Arrow, VTT)
Vacuum moving bed	Laval University/Pyrovac

## Applicazione



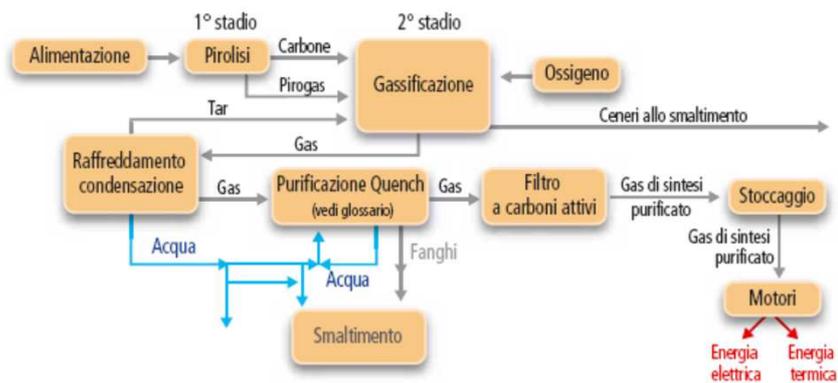
**Terni.** Impianto sperimentale per la produzione di energia mediante pirolisi di biomasse con potenza complessiva 80 kW (Turbina Elliott T80).

Cofinanziato dalla regione Umbria e oggetto di un Progetto di Rilevante Interesse Nazionale dell'Università di Perugia insieme alle Università di Bologna, Ferrara, Trieste.

Attivato uno spin-off accademico (Bio-net Srl) per lo sfruttamento dell'idea.

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie V – Gassificazione e pirolisi

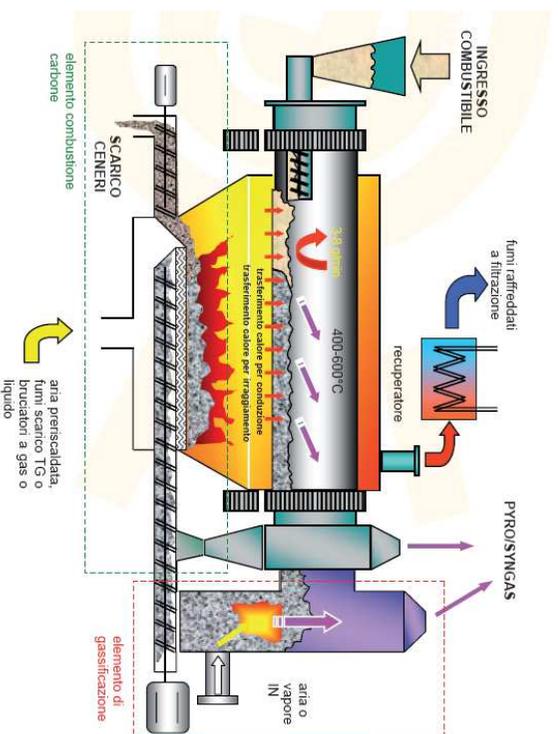
## Pirogassificazione



Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie V – Gassificazione e pirolisi

# Pirogassificazione

Corso Sistemi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili  
Bioenergie V – Gassificazione e pirolisi



Per quanto riguarda i modelli all'equilibrio per la simulazione del processo di gassificazione potete fare riferimento alla presentazione che segue e a questo articolo

*A non-stoichiometric equilibrium model for the simulation of the biomass gasification process*

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917310103>

per i modelli non stechiometrici, mentre per i modelli stechiometrici potete scaricare l'articolo

*Development of an equilibrium model for the simulation of thermochemical gasification and application to agricultural residues*

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148112002042>

Il link funzionano solo da rete di Ateneo o tramite [VPN](#)



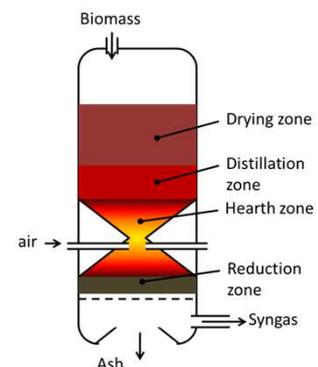
UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PARMA



ICAE 2016 – The 8th International Conference on Applied Energy  
October 8-11, Beijing, China

## A model for the prediction of pollutant species production in the biomass gasification process

Agostino Gambarotta, **Mirko Morini**, Andrea Zubani  
Industrial Engineering Department – [mirko.morini@unipr.it](mailto:mirko.morini@unipr.it)



Research on biomasses is important because they have a wide variety of applications in sustainable development



Green chemistry



Direct combustion



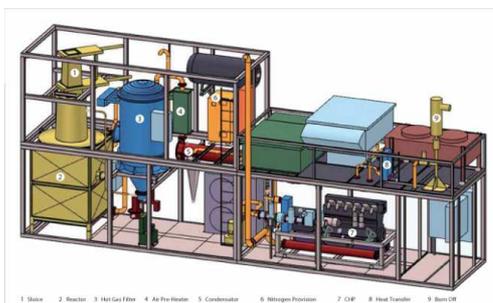
Biochemical conversion



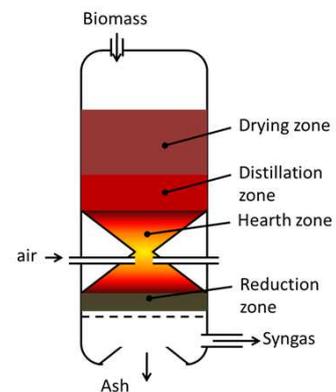
Thermochemical conversion

Universities of Parma and Ferrara cooperate with Siram by Veolia in the project SYNBIOSE Funded by Italian Ministry of Economic Development

Design for maintenance of the whole system

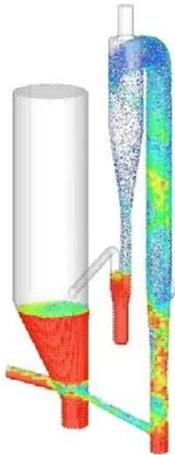


Optimization of gasification process



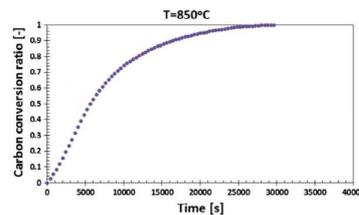
Mainly three types of models are used in literature, depending on the purpose of the analysis

CFD models

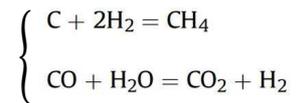


Kinetic models

$$k = k_0 e^{-\frac{\Delta E}{RT}}$$



Equilibrium models

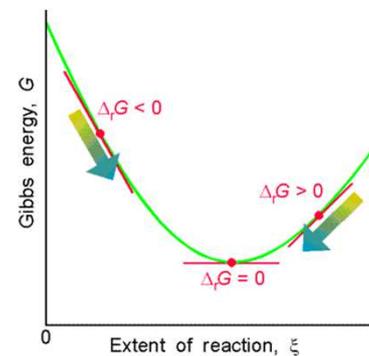


$$K_1 = \frac{p_{\text{CH}_4}}{(p_{\text{H}_2})^2} = \frac{x_{\text{CH}_4}}{(x_{\text{H}_2})^2} \left(\frac{p}{p_0}\right)^{-1}$$

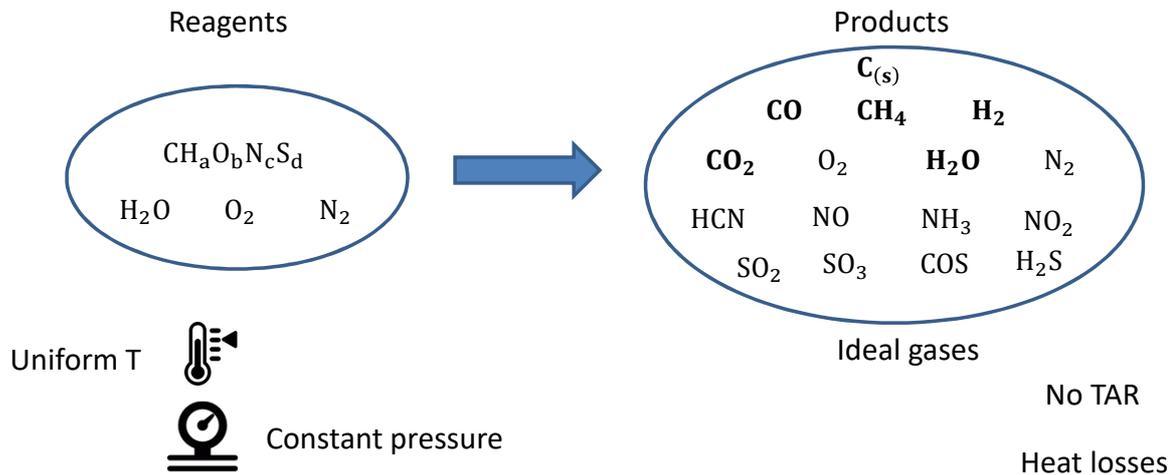
$$K_2 = \frac{p_{\text{CO}_2} p_{\text{H}_2}}{p_{\text{CO}} p_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{x_{\text{CO}_2} x_{\text{H}_2}}{x_{\text{CO}} x_{\text{H}_2\text{O}}}$$

A non-stoichiometric approach has been used to calculate equilibrium composition by minimizing Gibbs free energy

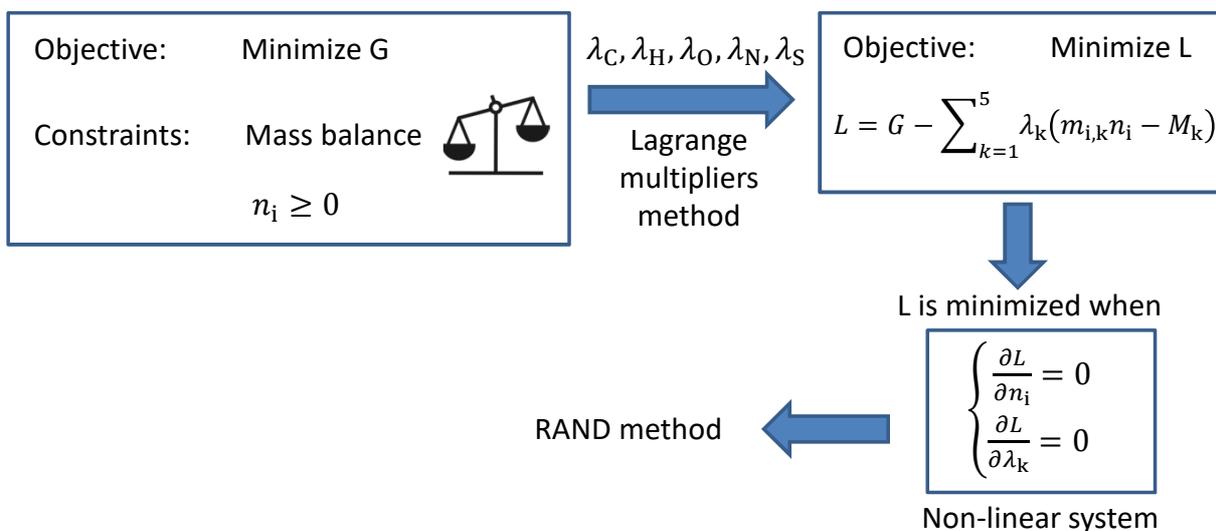
$$G = \sum_{i=1}^M n_i G_i^\circ + \sum_{i=1}^M n_i RT \cdot \ln(n_i/n_{\text{tot}})$$



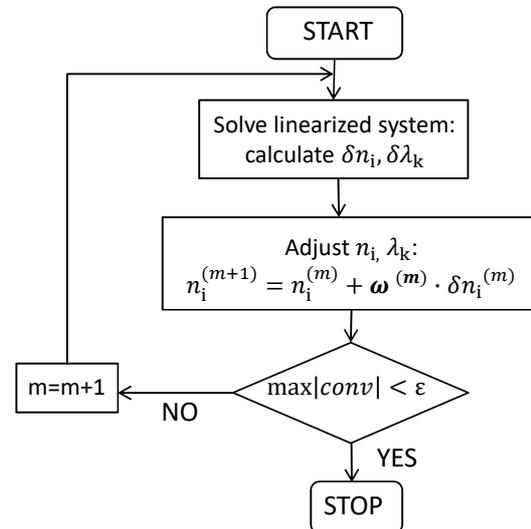
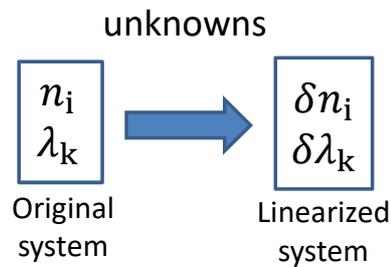
5 elements have been taken into consideration and 16 chemical species have been considered in the products



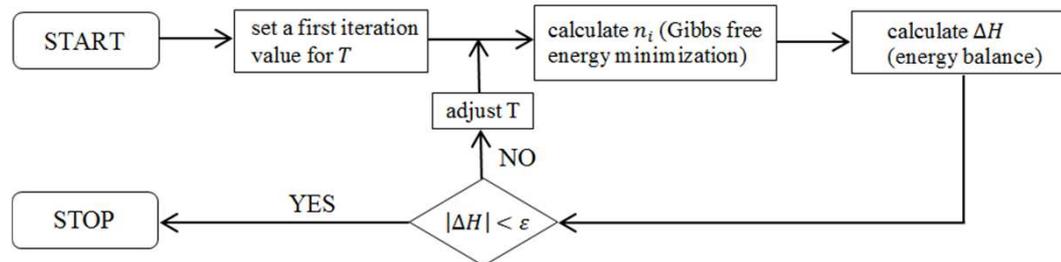
A constrained optimization problem must be solved to find the concentration of all products



RAND methode is an iterative method used to solve the non-linear system by linearization



Moles calculation is nested into a cycle that calculates the process temperature by means of the bisection method



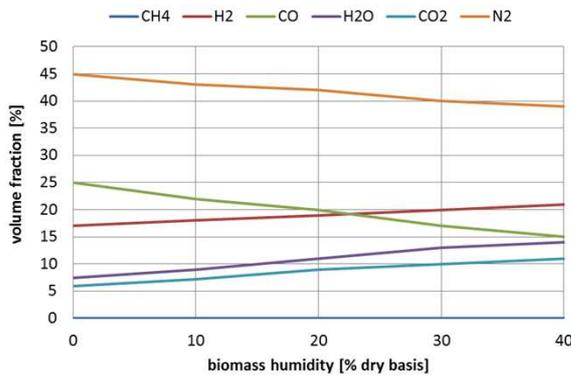
Energy balance:

$$\sum_{j=1}^N n_j \left( H_{f,j}^\circ + \int_{T_{\text{rif}}}^{T_{\text{in}}} c_{p,j}(T) dT \right) = \sum_{i=1}^M n_i \left( H_{f,i}^\circ + \int_{T_{\text{rif}}}^T c_{p,i}(T) dT \right) + Q_{\text{loss}}$$

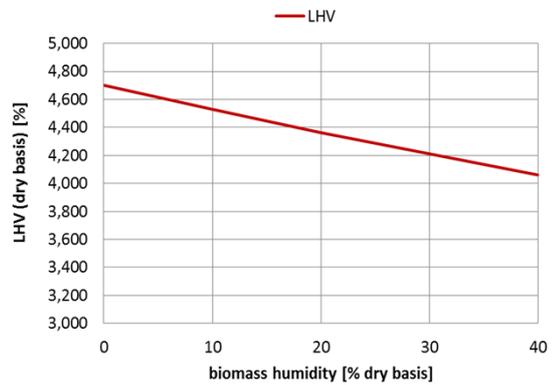


An increase in humidity causes a decrease of the LHV: a higher amount of energy is used for water evaporation

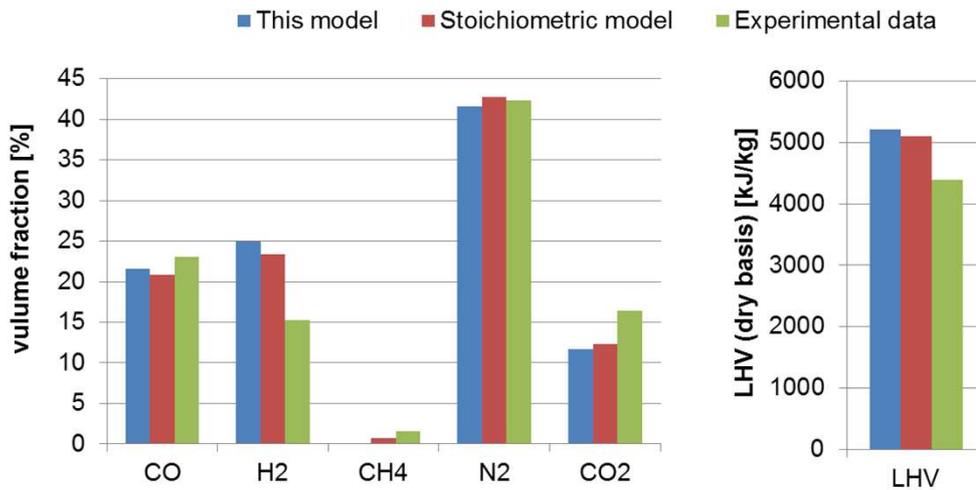
Composition:



Lower heating value:

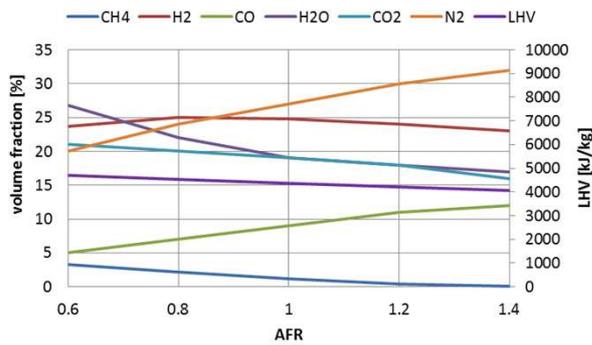


The model is validated by comparison with a stoichiometric model and experimental data found in literature

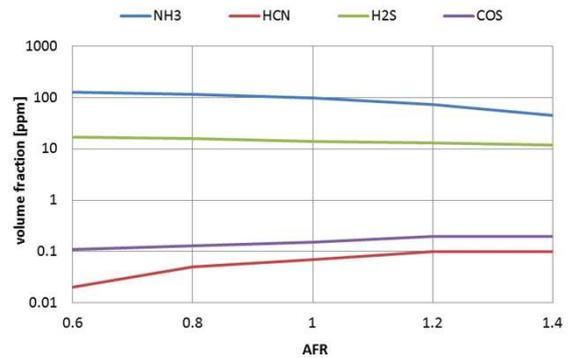


# Model application to forest waste gasification shows that NH<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>S are present in non-negligible amounts

Major species:



Minor species (pollutants):

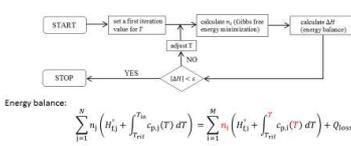


# The model is effective in the simulation of gasification, but it shows the typical limitations of equilibrium models

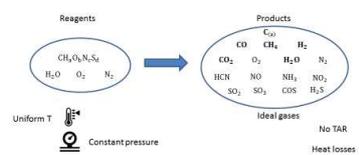
A non-stoichiometric approach has been used to calculate equilibrium composition by minimizing Gibbs free energy

$$G = \sum_{i=1}^M n_i G_i^* + \sum_{i=1}^M n_i RT \cdot \ln(n_i/n_{tot})$$

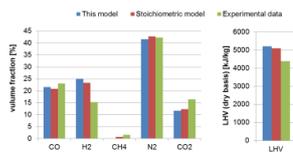
Moles calculation is nested into a cycle that calculates the process temperature by means of the bisection method



5 elements have been taken into consideration and 16 chemical species have been considered in the products



The model is validated by comparison with a stoichiometric model and experimental data found in literature



Model application to forest waste gasification shows that NH<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>S are present in non-negligible amounts

