



## **Università degli Studi di Padova**

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Gestionale

### **Le biomasse come fonte di energia rinnovabile**

Relatore: Prof. Mirto Mozzon

Dott. Augusto Tassan

Laureanda: Cecilia Maraschin

Matricola: 1047510

Anno accademico 2015-2016



*Ai miei genitori,  
che mi hanno sempre sostenuta  
affinché possano essere fieri di me.*



# Indice

<b>CAPITOLO 1 Generalità sulle biomasse</b>	<b>1</b>
1.1 Definizione e classificazione	1
1.2 Impatto ambientale	2
1.3 Meccanismo di fotosintesi clorofilliana	3
1.4 Utilizzo energetico delle biomasse	5
<b>CAPITOLO 2 I processi termochimici</b>	<b>11</b>
2.1 Combustione diretta	12
2.1.1 Forni a tamburo rotante	13
2.1.2 Forni ad aria controllata	14
2.1.3 Forni a griglia	15
2.1.4 Forni a letto fluido	18
2.2 Carbonizzazione	20
2.3 Pirolisi	20
2.4 Gassificazione	20
2.4.1 Gassificatori a letto fisso	23
2.4.2 Gassificatori a letto fluido	25
2.4.3 Vantaggi e svantaggi dei gassificatori	27
2.4.4 Applicazioni dei gassificatori della biomassa	28
2.4.5 Sistemi di pulizia del syngas	28
2.5 Steam explosion	29
2.6 Produzione di energia termica per il riscaldamento	29
<b>CAPITOLO 3 I processi biochimici</b>	<b>33</b>
3.1 La digestione anaerobica	33
3.1.1 Produzione di biogas	34

3.1.2 Impianti per la produzione di biogas	38
3.1.3 Costo di un impianto e di esercizio	43
<b>3.2 La fermentazione</b>	<b>44</b>
<b>3.3 Bioliquidi e biocarburanti</b>	<b>46</b>
3.3.1 Generalità sugli oli vegetali	46
3.3.2 Caratteristiche chimiche-fisiche degli oli vegetali	47
3.3.3 Tecnologie di conversione: grande e piccola taglia	48
3.3.4 I biocarburanti	49
<b>CAPITOLO 4</b>	
<b>Un recente impianto biogas realizzato a Carbonera (Tv)</b>	<b>55</b>
4.1 Descrizione dell'impianto	56
4.2 Principali strutture che compongono l'impianto	57
4.2.1 Dettagli costruttivi	57
<b>Conclusione</b>	<b>69</b>
<b>Bibliografia e sitografia</b>	<b>71</b>

# Introduzione

In un paese con un'importante presenza di foreste e di terreni agricoli come l'Italia, la biomassa di origine vegetale è potenzialmente un'importante risorsa energetica rinnovabile, in grado di diminuire la dipendenza dalle importazioni di combustibili fossili e nel contempo ridurre la produzione di CO<sub>2</sub>.

Lo sfruttamento energetico delle biomasse locali può inoltre incrementare la cura e la manutenzione del territorio, ed ottimizzare l'uso delle risorse agricole. L'utilizzo di biomassa vegetale permette di ottenere molteplici prodotti energetici: calore, elettricità o combustibili vegetali (olio grezzo, biodiesel, etanolo, biogas, pellet), attraverso trattamenti termochimici come la combustione, la pirolisi, la gassificazione, e trattamenti biochimici comprendenti la fermentazione e la digestione anaerobica. Esistono profonde differenze nell'utilizzazione delle biomasse per la produzione di elettricità o calore. Per quanto riguarda gli impianti di riscaldamento con biomasse, si possono individuare diverse configurazioni a seconda della taglia e del tipo di combustibile utilizzato.

Per la produzione di energia elettrica, attraverso centrali elettriche, utilizza impianti di grande taglia.

Al contrario, nell'ottica di distribuire la produzione su tutto il territorio, la produzione di calore o meglio la cogenerazione, appare la più valida opzione, spesso concretizzata con lo sviluppo di impianti di teleriscaldamento al servizio dei vicini centri abitati. Tale approccio produce importanti ricadute economiche sul territorio: opportunità e alternative di reddito alle imprese agricole e forestali che valorizzano la propria biomassa, tariffe agevolate per le utenze termiche finali. La produzione di energia elettrica in impianti di grande taglia non esclude la produzione di energia termica, realizzata qualora sia possibile utilizzare l'ingente quantità di calore, altrimenti scaricato in ambiente, per alimentare una vicina e consistente utenza termica.

Altra importante risorsa derivante dallo sfruttamento delle biomasse sono i bioliquidi e i biocarburanti (biodiesel, bioetanolo e oli vegetali). I due principali biocarburanti, biodiesel e bioetanolo, vengono utilizzati nel settore dei trasporti come carburanti, in sostituzione di benzina e diesel, o miscelati ad essi. Questo ha come conseguenze una riduzione delle emissioni di sostanze nocive nell'ambiente, oltre che un vantaggio a livello economico, essendo il costo dei biocarburanti inferiore a quello della benzina.

I bioliquidi sono invece impiegati per la produzione di biogas, utilizzato a fini energetici. Il biogas permette di ottenere elettricità e calore ed è indicato dall'U.E. tra le fonti energetiche

non fossili che possono garantire non solo autonomia energetica, ma anche una riduzione graduale dell'attuale stato dell'inquinamento dell'aria. Questo presenta per molte aziende agro zootecniche italiane una grande opportunità, ovvero trasformare i reflui zootecnici in denaro.

Viene di seguito fornito un'analisi generale dei diversi trattamenti attuati per l'utilizzo energetico delle biomasse e delle più importanti filiere di conversione delle biomasse in vettori energetici.



# CAPITOLO 1

## Generalità sulle biomasse

### 1.1 Definizione e classificazione

Il termine biomassa definisce una grande quantità di materiali, di natura anche molto diversa fra loro. Essi sono caratterizzati da una matrice di tipo organico, prodotti da organismi viventi (vegetali o animali) e destinati a fini energetici. Sono da escludere tra le biomasse, i combustibili fossili (carbone, petrolio, gas naturale) e i loro derivati, quali per esempio le materie plastiche.

L'interesse nei confronti di questa risorsa è aumentato considerevolmente nel tempo. Le biomasse sono una fonte rinnovabile di energia molto versatile, che può essere trasformata localmente in tutti i Paesi dell'Unione europea, consentendo di ridurre la dipendenza energetica da aree politicamente instabili. Inoltre, l'utilizzo delle biomasse porta a vantaggi ambientali, poiché, a differenza dei combustibili fossili, le biomasse ed i combustibili da esse derivati rilasciano nell'atmosfera, durante la combustione, una quantità di anidride carbonica più o meno corrispondente a quella assorbita in precedenza dai vegetali durante il processo di crescita.

Le biomasse possono essere essenzialmente suddivise in due categorie: quelle residuali e quelle non residuali, derivanti cioè da apposite colture energetiche.

Le **biomasse residuali** possono essere classificate in funzione del comparto di provenienza:

- agricolo: residui colturali provenienti dall'attività agricola e dalle colture dedicate di specie lignocellulosiche;
- piante oleaginose, per l'estrazione di oli e la loro trasformazione in biodiesel; piante alcoligene per la produzione di bioetanolo;
- forestale e agroforestale: residui delle operazioni selvicolturali o delle attività agroforestali, come ad esempio paglie, potature, ramaglie, cortecce, etc.;
- industriale: residui provenienti dalle industrie del legno o dei prodotti in legno e dell'industria della carta, nonché residui dell'industria agroalimentare (ad esempio vinacce, sanse, scarti vegetali, etc.);
- zootecnico: reflui biotecnici per la produzione di biogas;
- rifiuti urbani: residui delle operazioni di manutenzione del verde pubblico e la sola frazione organica di rifiuti solidi urbani.

Le **biomasse non residuali**, derivanti cioè da coltivazioni energetiche, sono a loro volta classificabili in tre tipologie principali:

- colture alcoligene: caratterizzate da un elevato contenuto zuccherino (come la canna da zucchero, il sorgo zuccherino, la barbabietola da zucchero, il mais, il frumento, etc.) dalle quali si produce etanolo;
- colture oleaginose: contraddistinte da un elevato contenuto di olio vegetale, che può essere utilizzato tal quale o trasformato in biodisel;
- colture ligno-cellulosiche: caratterizzate da elevate produzioni di sostanza secca, che può essere destinata a diversi utilizzi energetici (specie legnose perenni come il pioppo, la robina, etc., specie erbacee perenni oppure specie erbacee annuali).

## **1.2 Impatto ambientale**

In termini del tutto generali, le biomasse traggono origine dal processo di fotosintesi clorofilliana e costituiscono pertanto un'importante fonte di energia rinnovabile direttamente derivante dall'energia solare. La biomassa è considerata una risorsa rinnovabile ed inesauribile, se opportunamente utilizzata.

Il recupero energetico delle biomasse residuali appare doppiamente vantaggioso in quanto da un lato riduce la dipendenza dai combustibili fossili mentre dall'altro alleggerisce le problematiche ambientali legate allo smaltimento di tali residui in discarica. Tale recupero consente inoltre di evitare l'immissione in atmosfera del metano prodotto dai processi naturali di degradazione dei residui stessi.

Sebbene i possibili contributi derivanti dallo sfruttamento delle biomasse residuali possano risultare apprezzabili, appare del tutto evidente come un contributo significativo delle biomasse al soddisfacimento del consumo mondiale di energia possa derivare solamente dal ricorso ad apposite coltivazioni energetiche estese su larga scala. La promozione delle coltivazioni energetiche, oltre a ridurre il consumo di combustibili fossili e limitare le emissioni inquinanti e di gas serra, offre un contributo determinante per alleviare lo stato di crisi del settore agricolo europeo, convertendo parte della superficie agricola coltivabile dalle colture ad uso alimentare a quelle non alimentari.

Le biomasse in relazione alle loro caratteristiche possono essere impiegate per produrre una vasta gamma di combustibili: solidi (cippato, pellets, bricchette), liquidi (etanolo, oli vegetali, biodisel) e gassosi (biogas, gas di sintesi) a loro volta utilizzabili come vettori energetici per

produrre energia elettrica e/o termica o come sostituti dei combustibili fossili nel settore dei trasporti.

Sono diverse le ragioni che stanno alla base del recente impulso impresso alle attività di valorizzazione delle biomasse ai fini della produzione energetica. In primis le biomasse non soffrono di problemi di aleatorietà e discontinuità nella produzione, che invece penalizzano altri impianti alimentati con fonti rinnovabili come gli impianti eolici, solari e idroelettrici; possono quindi essere accumulate in maniera relativamente facile. I benefici che derivano dall'utilizzo delle biomasse per la produzione di energia sono di carattere ambientale oltre che economico: l'impiego delle biomasse a fini energetici limita il rilascio di nuova anidride carbonica, principale responsabile dell'effetto serra.

Altri vantaggi ecologici, legati all'impiego delle biomasse e dei combustibili derivati sono:

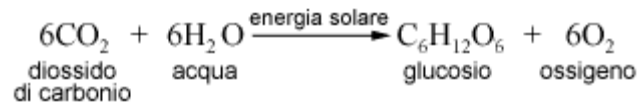
- I) la biodegradabilità, in caso di versamenti accidentali di biocarburanti nell'ambiente,
- II) l'assenza nei fumi di ossidi di zolfo, dal momento che lo zolfo non è contenuto nelle piante;
- III) la riduzione delle emissioni di ossidi di azoto e di particolato;
- IV) la coltivazione delle biomasse (legnose) può portare a considerevoli vantaggi sociali contribuendo, ad esempio, alla difesa del suolo in montagna e stimolando l'occupazione in zone rurali economicamente deboli.

### **1.3 Meccanismo di fotosintesi clorofilliana**

La biomassa rappresenta la più sofisticata forma di accumulo dell'energia solare. Piante e vegetali sono dei convertitori energetici molto sofisticati i quali, mediante il processo di fotosintesi clorofilliana, sono in grado di convertire l'energia radiante in energia chimica, stoccandola sottoforma di molecole complesse.

La fotosintesi è il processo attuato dagli organismi autotrofi (piante e vegetali) per produrre glucosio e ossigeno a partire da acqua e diossido di carbonio, utilizzando come fonte di energia la luce solare assorbita da un particolare pigmento fotosensibile, la clorofilla. Attraverso la clorofilla la radiazione solare incidente attiva un meccanismo di conversione chimica che coinvolge la relazione fra la CO<sub>2</sub> presente nell'aria e l'acqua assorbita dal terreno attraverso le radici per formare i composti organici che andranno a costituire la struttura della pianta e l'ossigeno liberato nell'aria.

Poiché il composto organico originariamente sintetizzato è il glucosio ( $C_6H_{12}O_6$ ), il meccanismo di fotosintesi può essere schematizzato attraverso la seguente reazione elementare:



Il meccanismo reale è ovviamente molto più complesso di quanto non appaia dalla reazione appena riportata; infatti il glucosio viene successivamente convertito in altre molecole più complesse, costituite principalmente da lunghe catene di C, H e O, carboidrati (75%) e lignina (25%).

Lo svolgimento dell'intero processo necessita oltre che di luce ed acqua, anche di adeguate condizioni di temperatura e della disponibilità di nutrienti, ovvero di fertilizzanti a base soprattutto di azoto, fosforo, e potassio. Alla fine del loro ciclo di vita, per decomposizione naturale o mediante processi di combustione, i vegetali restituiscono all'ambiente l'energia e le sostanze che hanno immagazzinato. Se si considera, per esempio, la combustione del glucosio, l'energia di legame chimico viene liberata attraverso la seguente reazione :



Le piante e i vegetali in genere convertono l'energia solare in energia di legame chimico operando un "rendimento" che risulta tuttavia piuttosto modesto. Studiando nel dettaglio il processo di fotosintesi si individua una complessa catena di trasformazioni. Innanzitutto, non tutta la radiazione solare è efficace dal punto di vista del meccanismo di fotosintesi. La frazione di radiazione solare attiva dal punto di vista della fotosintesi è quella con lunghezze d'onda comprese fra 0,4 e 0,7  $\mu\text{m}$ , che costituisce circa il 50% dell'intera radiazione solare incidente al suolo. Una parte, mediamente circa il 20%, della radiazione attiva viene poi riflessa dalla superficie delle foglie o trasmessa sotto forma di energia termica alle foglie stesse. Solo il 40% circa della radiazione solare risulta pertanto effettivamente a disposizione del meccanismo di fotosintesi. Quest'ultimo processo presenta poi una sua efficienza intrinseca di conversione i cui limiti sono stabiliti dalla termodinamica del processo stesso. La fotosintesi può convertire al massimo il 30% circa della radiazione effettivamente a

disposizione, essendo il restante 70% rappresentato da perdite. Infine, una parte dell'energia prodotta dal processo di fotosintesi, circa il 40%, viene consumata dalla pianta stessa per il suo metabolismo interno. Complessivamente, pertanto, il rendimento limite teorico del processo di fotosintesi è circa pari al 7%.

Poiché le piante non crescono certo in condizioni ideali di temperatura, luce e disponibilità di acqua e nutrienti, possiamo constatare che il rendimento medio effettivo del processo di fotosintesi è molto inferiore a quello massimo teorico e si attesta intorno a valori del 0,15–0,30%.

## **1.4 Utilizzo energetico delle biomasse**

Come già detto precedentemente, il termine “biomassa” comprende materiali che possono essere anche molto diversi fra loro, per caratteristiche chimiche e fisiche, e i cui utilizzi a fini energetici, di conseguenza, risultano essere molteplici. Questo vettore energetico può essere utilizzato in un vasto campo di applicazioni energetiche, dalla produzione di energia termica ed elettrica alla produzione di combustibili per i mezzi di trasporto.

Attualmente, il 90% delle fonti energetiche utilizzate sono di origine fossile ed il loro uso è associato all'emissione di anidride carbonica nell'atmosfera. In particolare, ogni anno l'atmosfera del nostro pianeta riceve più di 15 miliardi di tonnellate di CO<sub>2</sub>. Gli scienziati di tutto il mondo sono concordi nell'affermare che, con l'attuale valore di emissione di CO<sub>2</sub> e degli altri gas serra, si procureranno danni irreversibili al clima del pianeta.

Il fabbisogno energetico dell'uomo può essere soddisfatto senza dover necessariamente ricorrere a vettori energetici fossili. Inoltre, dalle risorse energetiche il cui sfruttamento non è associato all'emissione di CO<sub>2</sub>, come l'energia solare, l'energia eolica e le biomasse, si possono ottenere la maggior parte dei vettori energetici attualmente utilizzati.

I processi utilizzati attualmente per l'utilizzo energetico delle biomasse sono riconducibili a due categorie:

- processi termochimici ,
- processi biochimici.

All' interno di questi processi si suddividono le tecnologie attualmente disponibili che, a eccezione della combustione diretta, consistono in pretrattamenti mirati a sfruttare fino in fondo il materiale disponibile, ad aumentare la resa energetica, a migliorare la praticità di impiego e le caratteristiche di stoccaggio e trasporto.

In particolare:

- i processi di conversione **termochimica** come la combustione, la gassificazione e la pirolisi, sono basati sull'azione del calore, che permette le reazioni chimiche necessarie a trasformare la materia in energia;
- i processi di conversione **biochimica** come la fermentazione alcolica e la digestione anaerobica, consentono di ricavare energia attraverso reazioni chimiche dovute alla presenza di enzimi, funghi e altri microrganismi che si formano nella biomassa mantenuta in particolari condizioni.

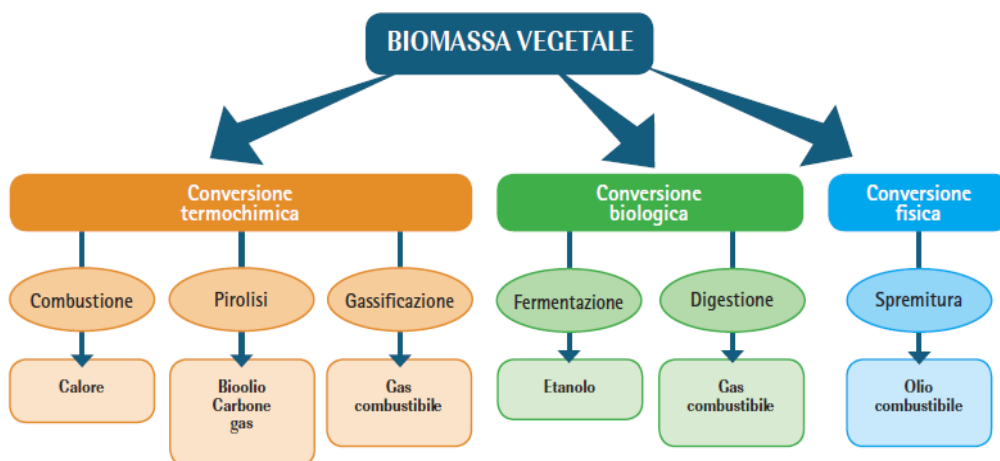
Nel caso poi di specie vegetali o residui ricchi di oli si impiegano processi di conversione di tipo **chimico-fisico** finalizzati all'estrazione degli oli vegetali grezzi e poi, eventualmente, alla loro trasformazione chimica mediante esterificazione in biodisel (ad esempio la transesterificazione).

Ad ogni modo, la composizione delle biomasse ha un' influenza fondamentale nella scelta del processo di conversione.

I fattori che indirizzano la scelta verso uno dei processi sono:

- il rapporto carbonio/azoto (C/N);
- il tenore di umidità alla raccolta.

Quando il rapporto C/N è basso (indicativamente inferiore a 30) e il contenuto di umidità super a i valori del 30%, si utilizzano generalmente processi biochimici; in caso contrario sono più idonei i processi termochimici. Nel caso dei processi termochimici particolare importanza assume il potere calorifico, il quale dipende dal tenore di umidità: più alto è il tenore di umidità, più basso è il potere calorifico e viceversa.

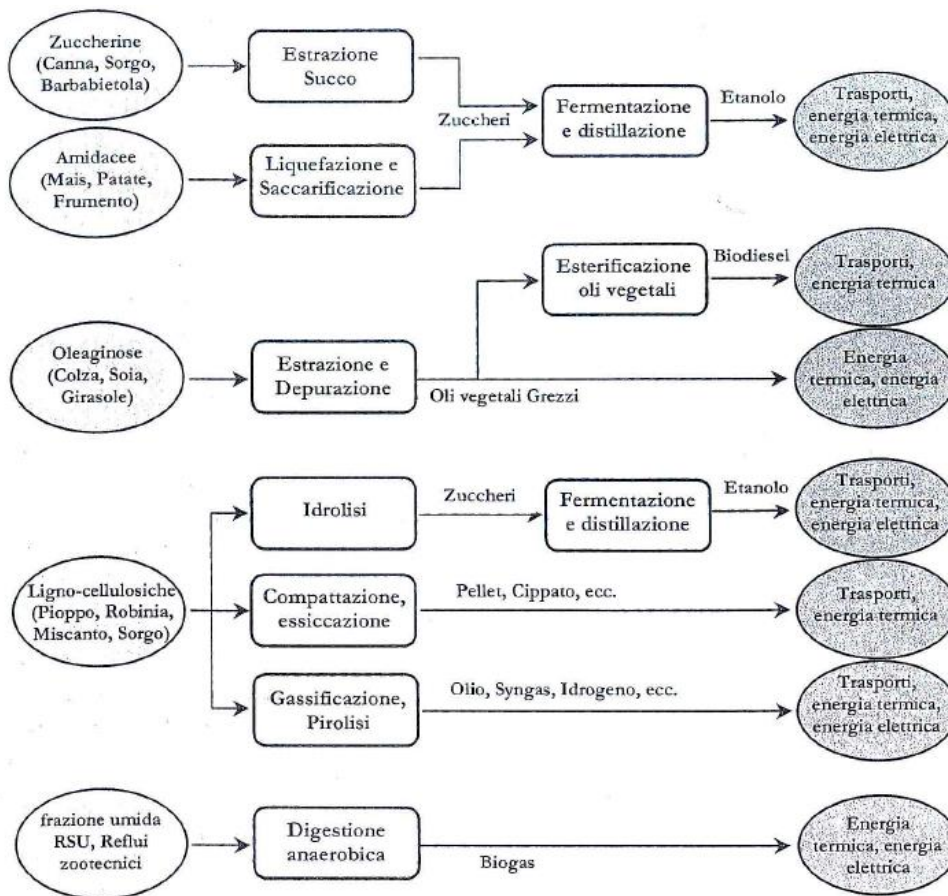


Tipo di biomassa	Rapporto C/N	Umidità	Processo
Piante e residui legnosi e cellulosici	>30	<30	Combustione, carbonizzazione, gassificazione, pirolisi
Piante e residui amilacei	*	>30	Idrosili, fermentazione alcolica
Piante e residui zuccherini	*	15-90	Fermentazione alcolica
Piante e residui fermentescibili	20-30	>30	Digestione alcolica
Piante e residui oleaginosi	*	>30	Estrazione d'olio
Deiezione animale	20-30	70-90	Digestione anaerobica

*Rapporto C/N e umidità di diverse tipologie di biomassa.*

(\* per questa categoria il rapporto C/N può essere qualsiasi)

In relazione alle caratteristiche intrinseche delle specie vegetali considerate (composizione chimica, umidità, densità, etc.) ed alla tipologia di utilizzo finale (combustione per autotrazione, per la produzione di energia termica, di energia elettrica, etc.), le filiere di conversione energetica delle biomasse possono presentare configurazioni anche molto diverse fra loro.



Lo schema sopra riportato illustra in modo schematico le principali filiere di conversione energetica delle biomasse in vettori energetici, impiegabili in sostituzione dei combustibili fossili convenzionali nel settore dei trasporti e per la produzione di energia elettrica e/o di energia termica.

In particolare, le filiere di maggior interesse sono essenzialmente quelle che si originano da specie vegetali ad elevato contenuto di zuccheri o di amidi, a partire dalle quali è possibile produrre l'etanolo impiegabile come sostituto della benzina nei motori a combustione interna per autotrazione, oppure anche per la produzione di energia elettrica e/o termica in sistemi di generazione elettrica ad alta efficienza e basso impatto ambientale come turbine a gas, motori alternativi a combustione interna e celle a combustione. Un' altra filiera importante e già disponibile a livello industriale, e quindi facilmente implementabile, è quella di produzione del biodiesel a partire da colture oleaginose.

L' impiego di specie vegetali ligno-cellulosiche appare invece più variegato e origina diverse filiere di produzione di combustibili derivati. Infine abbiamo la filiera di conversione energetica delle biomasse basata sull' impiego di reflui di tipo zootecnico e della frazione umida dei rifiuti solidi urbani per alimentare processi di digestione anaerobica con



produzione di combustibili gassosi utilizzati poi per produrre energia elettrica e termica in motori a combustione interna o in turbine a gas.

Possiamo quindi concludere affermando che la scelta del processo di conversione più conveniente dipende pertanto essenzialmente dalla composizione delle biomasse, dalle loro proprietà fisiche e dalla loro disponibilità.

Tuttavia il semplice fatto di sostituire combustibili fossili con combustibili di origine vegetale, non è garanzia di una effettiva sostenibilità energetica e ambientale. Infatti per coltivare, raccogliere e trasformare tale biomassa in una forma adatta all'utilizzatore finale, occorre impiegare un quantitativo più o meno elevato di energia e di materiali e quindi e mettere anche sostanze inquinanti nell'ambiente. In linea del tutto generale una generica filiera di conversione energetica delle biomasse può essere pensata come disgregata in 3 fasi principali: la coltivazione (nel caso di colture energetiche) e comunque la raccolta delle biomasse nei siti di produzione, il loro trasporto fino allo stabilimento industriale e la successiva conversione in una forma di energia o in un vettore energetico direttamente impiegabile dall'utente finale. Ciascuna fase richiede un proprio consumo energetico e l'impiego di mezzi di produzione, ma produce anche residui ed emissioni inquinanti.

In termini del tutto generali, nell'ambito di qualunque filiera basata sull'utilizzo delle biomasse occorre considerare le seguenti voci di consumo:

- i combustibili direttamente consumati dalla macchine agricole, dai mezzi di trasporto e dall'impianto di trasformazione dei prodotti agricoli, in ogni caso riportati sotto forma di energia primaria;
- l'energia elettrica direttamente consumata dagli impianti di pompaggio dell'acqua di irrigazione e dall'impianto di trasformazione dei prodotti agricoli;
- l'energia primaria richiesta per produrre i fertilizzanti, le sementi, gli antiparassitari e gli altri eventuali mezzi di produzione.

Analogamente, devono essere valutati i flussi energetici resi disponibili dalla filiera, rappresentati da:

- l'energia utile in uscita;
- il credito energetico degli eventuali residui e sotto-prodotti.



## CAPITOLO 2

### I processi termochimici

I processi di conversione termochimica sono basati sull'azione del calore, che permette le reazioni chimiche necessarie a trasformare la materia in energia, e sono utilizzabili per i prodotti e i residui cellulosici e legnosi in cui il rapporto C/N abbia valori superiori a 30 e il contenuto di umidità non superi il 30%.

Nel caso dei processi termochimici, assume particolare importanza il potere calorifico, a cui si aggiunge anche il tenore di umidità. L'umidità esprime il contenuto d'acqua presente nella biomassa; il componente utile dal punto di vista energetico è costituito dalla sostanza secca, quindi l'acqua rappresenta di fatto il componente indesiderato. Risulta quindi necessario prevedere, nei processi termochimici, pretrattamenti di essiccazione dei materiali per poterne sfruttare appieno l'energia chimica. Potere calorifico e umidità, oltre ad essere strettamente correlati fra loro (una diminuzione del potere calorifico porta ad un contemporaneo aumento della percentuale di umidità), assumono anche un ruolo determinante ai fini dell'effettiva valorizzazione energetica ed economica delle biomasse dal momento che ne condizionano fortemente i costi di raccolta.

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

- la legna e tutti i suoi derivati (segatura, trucioli ecc.);
- sottoprodotti colturali di tipo ligno-cellulosico (paglia di cereali, residui di potatura della vite e dei fruttiferi ecc.);
- scarti di lavorazione (lolla, pula, gusci, noccioli ecc.).

Si possono distinguere cinque principali processi termochimici:

1. combustione diretta;
2. carbonizzazione;
3. pirolisi;
4. gassificazione;
5. steam explosion.

## 2.1 Combustione diretta

La combustione è il più semplice dei processi termochimici : consiste in una reazione chimica di ossidoriduzione avente come reagenti un combustibile (contenente gli elementi che subiscono ossidazione) ed un comburente (tipicamente l'ossigeno contenuto nell'aria). I prodotti di questa reazione sono solitamente anidride carbonica, acqua e calore. La reazione tra il combustibile e il comburente non è spontanea ma avviene ad opera di un innesco esterno. L'innesco può essere rappresentato ad esempio da una fonte di calore o da una scintilla e rappresenta l'energia di attivazione necessaria alle molecole di reagenti per iniziare la reazione e deve essere fornita dall'esterno. In seguito l'energia rilasciata dalla reazione stessa ne rende possibile l'autosostentamento, senza ulteriori apporti energetici esterni. Le temperature raggiunte nella combustione sono molto elevate, dell'ordine dei 2000 °C, e quindi il calore generato può essere utilizzato per la generazione di vapore a scopi termoelettrici o per altri usi industriali.

La combustione è generalmente attuata in apparecchiature (forni) in cui avviene anche lo scambio di calore tra i gas di combustione e i fluidi di processo (acqua, olio diatermico, ecc.). Il processo di combustione della biomassa avviene in quattro fasi distinte:

1. riscaldamento ed essiccazione (fino a 200°C);
2. pirolisi (225°C - 500°C): conduce alla formazione di gas, composti catramosi e carbonio allo stato quasi puro;
3. fase gassosa (500°C ~ 750°C): brucia i gas precedentemente formati;
4. reazione di ossidazione del carbonio.

La combustione di prodotti e residui agricoli si attua con buoni rendimenti, se si utilizzano come combustibili sostanze ricche di glucidi strutturati (cellulosa e lignina) e con contenuti di acqua inferiori del 35%.

I prodotti utilizzabili a tale scopo sono il legno, meglio se in cippato o pellet, paglie di cereali, residui di raccolta di legumi secchi, residui legnosi di potatura di piante e piante da frutto. Gli impianti che producono energia utilizzando la combustione delle biomasse vegetali possono interessare prevalentemente le piccole utenze domestiche. Il mercato infatti, rende già disponibili caldaie che possono essere alimentate a legna, a cippato di legna, a granella di mais, a pellet, che consentono di provvedere alle necessità di riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria.

L'incenerimento consiste nella combustione industriale controllata dei rifiuti con l'intento di eliminarli e di produrre energia con il calore prodotto. Un inceneritore (o termovalorizzatore)

è essenzialmente composto da un forno all'interno del quale vengono bruciati i rifiuti, a volte anche con l'ausilio di metano, che serve ad innalzare la temperatura di combustione nel caso in cui la carica non abbia sufficienti caratteristiche di potere calorifico. Il calore così prodotto porta a vaporizzazione l'acqua in circolazione all'interno della caldaia posta a valle, e il vapore così generato aziona una turbina che trasforma l'energia termica in energia meccanica e quindi elettricità.

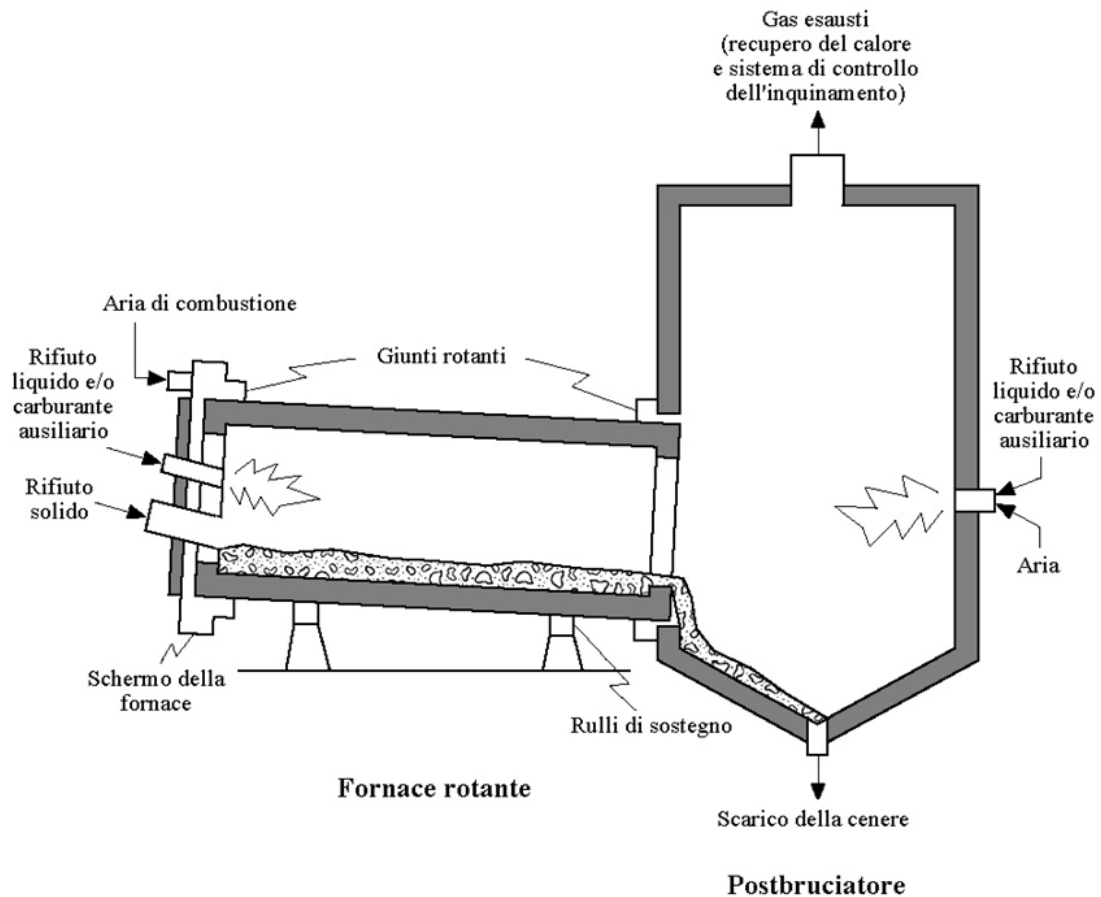
Consideriamo il processo di combustione che avviene all'interno di questi forni di incenerimento, i quali sono disponibili in diverse tipologie, a seconda delle caratteristiche del rifiuto.

Le diverse tecnologie di combustione utilizzate sono:

- a tamburo rotante;
- a griglia;
- a letto fluido;
- ad aria controllata.

#### 2.1.1 Forni a tamburo rotante

Sono forni molto versatili, adatti allo smaltimento di rifiuti solidi di varia natura (urbani ed industriali), come pure di fanghi, melme oleose e rifiuti liquidi. La principale applicazione industriale è comunque nel campo dei rifiuti pericolosi e di vari rifiuti speciali. I forni rotanti appaiono concettualmente molto semplici e sono costituiti da un cilindro rotante attorno al proprio asse, dotato di un'opportuna inclinazione (1÷3%) sull'orizzontale, in modo da favorire il movimento del materiale, quando sono alimentati con solidi. La combustione del letto avviene direttamente a contatto con la parete del forno, solitamente rivestita di refrattario, mentre la carica del materiale avviene attraverso opportune sezioni chiamate testate di carico, poste in corrispondenza dell'estremità più alta del forno. Lo scarico delle scorie e dei residui avviene invece all'estremità opposta rispetto alla testata di carico. Nei forni rotanti il contatto tra combustibile e comburente (aria di combustione) non è molto efficace. Proprio per questo motivo si è cercato di incrementare tale contatto mediante l'introduzione di dispositivi che vadano ad intensificare la movimentazione del letto e il contatto combustibile comburente ( ad esempio palettature che trascinano il materiale). Inoltre sono dei forni che non risultano adatti per il trattamento di quantità di combustibili superiori a qualche tonnellata per ora (fino a 4÷5 t/h).



### 2.1.2 Forni ad aria controllata

I forni ad aria controllata sono forni di piccole dimensioni e in generale con potenzialità non molto elevate (inferiori ad 1 t/h). Risultano costituiti da due camere di combustione, una primaria ed una secondaria. Nella camera primaria viene caricata la biomassa e vi viene inviata aria (con portata controllata) in quantità compresa tra il 40 e il 70%. La temperatura all'interno di questa prima camera è compresa fra i 700 e i 900 °C. All'interno di questa prima camera di combustione non si ha il completamento della combustione; essa funziona come un gassificatore e produce sostanze volatili combustibili che passano poi alla camera secondaria. Nella camera di combustione secondaria viene fornita aria in eccesso (50÷100%) rispetto a quella necessaria per il completamento della combustione. Si ottiene quindi un'ossidazione completa delle sostanze volatili generate nella camera primaria. La temperatura si aggira attorno ai 1000–1100 °C.

### 2.1.3 Forni a griglia

I forni a griglia rappresentano la tecnologia più diffusa e sperimentata nella combustione delle biomasse. La potenzialità di questa tecnologia risulta estremamente elevata e può variare, per ogni singolo forno, da qualche decina di tonnellata al giorno (40÷50 t/g) fino a 800÷1000 t/g nel caso degli impianti di maggiore potenzialità.

La combustione nel forno a griglia viene realizzata in tre fasi :

1. la prima fase consiste nell'essiccamento del combustibile, l'accensione e la combustione in fase solida ed ha luogo sopra alla griglia nella sua parte iniziale;
2. la seconda fase di combustione consiste nella completa ossidazione delle sostanze volatili combustibili liberatesi per pirolisi dalle biomasse che si muovono sopra alla griglia (questa fase ha luogo nella parte centrale e nella parte alta della camera di combustione);
3. nella terza ed ultima fase del processo di combustione, che avviene sopra alla griglia nella sua parte terminale, si realizza l'esaurimento della combustione dei residui solidi, cui segue la precipitazione delle scorie nella zona sottostante la griglia.

La griglia può essere fissa o mobile : su di essa, attraverso una tramoggia, viene formato il letto di fluidi sottoposto a successiva combustione. L'aria viene iniettata sottogriglia, in quantitativi che risultano definiti in base alla quantità di rifiuto presente sul letto; sopra alla griglia viene inviata l'aria necessaria per il completamento della combustione e il controllo della temperatura.

Il sistema a griglia fissa è il primo ad essere stato adottato presso gli impianti di incenerimento. Si presenta con un unico piano fortemente inclinato dove i rifiuti, mano a mano che perdono consistenza per effetto della combustione, avanzano fino a cadere in un apposito bacino di raccolta delle scorie.

Nei forni a griglia mobile, la griglia a contatto con la biomassa è sottoposta a movimentazioni di vario tipo, permettendo il rimescolamento del combustibile, il suo contatto con l'aria comburente e il suo avanzamento fino alla fine della griglia, dove viene scaricato il materiale non combusto.

Generalmente il letto formato dalle biomasse risulta avere uno spessore di qualche decina di centimetri, in modo tale da mantenere condizioni di combustione medie costanti, anche in presenza di alimentazione irregolare.

Il tempo di permanenza del combustibile sulla griglia deve essere sufficiente per permettere la combustione e la gassificazione della parte organica della biomassa (30÷60 minuti); la parte che raggiunge la fine della griglia senza essere bruciata (in quanto incombustibile o per

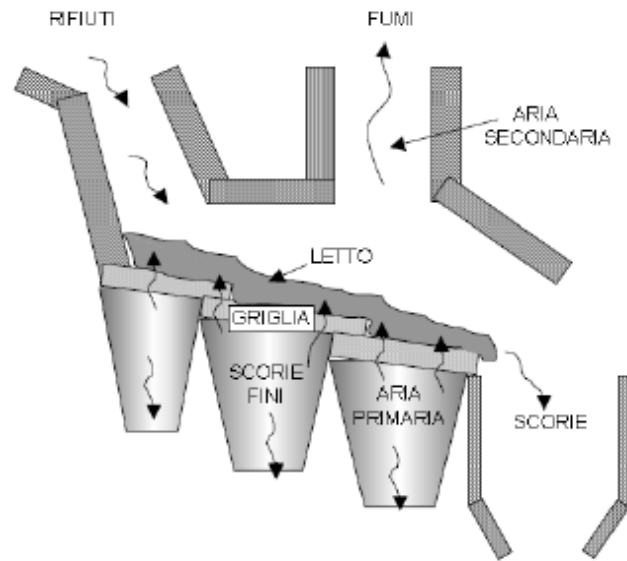
altri motivi), viene scaricata tramite un apposito sistema, raccolta insieme alle scorie passate attraverso la griglia e avviata a trattamento.

Per quanto riguarda l'aspetto costruttivo delle camere di combustione, esse possono essere realizzate con diverse tecniche e possono quindi presentare aspetti diversi le une dalle altre. Descriviamo le principali soluzioni adottate.

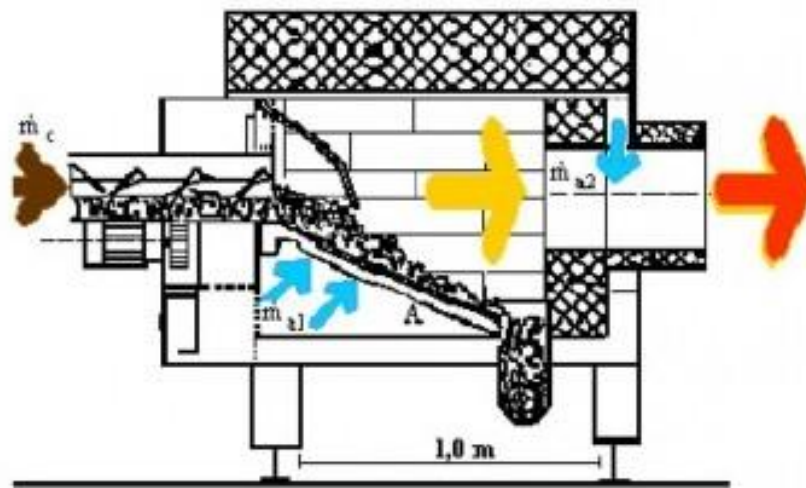
- Pareti completamente in refrattario : carburo di silicio o refrattari a base alluminosa in tutta la camera di combustione. La camera può essere considerata adiabatica, i fenomeni di irraggiamento sono molto consistenti e le pareti assumono temperature molto elevate ( $800 \div 1000$  °C).
- Pareti formate da tubi metallici, utilizzati anche per la produzione di acqua calda o vapore. La camera di combustione non è adiabatica, risulta quindi possibile controllare la temperatura attraverso lo scambio termico. La camera di combustione funziona anche da caldaia.
- Soluzioni intermedie, in cui la camera di combustione sovrastante la griglia è costituita da tubi di acqua mentre il resto della camera è costruito in refrattario.
- Camera di combustione in refrattario, con pareti raffreddate ad aria nelle zone più critiche.

Le ultime due soluzioni sono molto importanti in quanto permettono di controllare la temperatura di parete in vicinanza della griglia e nella zona del letto di combustione; ciò consente di limitare i problemi di usura dei refrattari e della griglia e di ridurre la decomposizione delle scorie.





Schema di funzionamento di un forno a griglia mobile.



Forno a griglia fissa inclinata

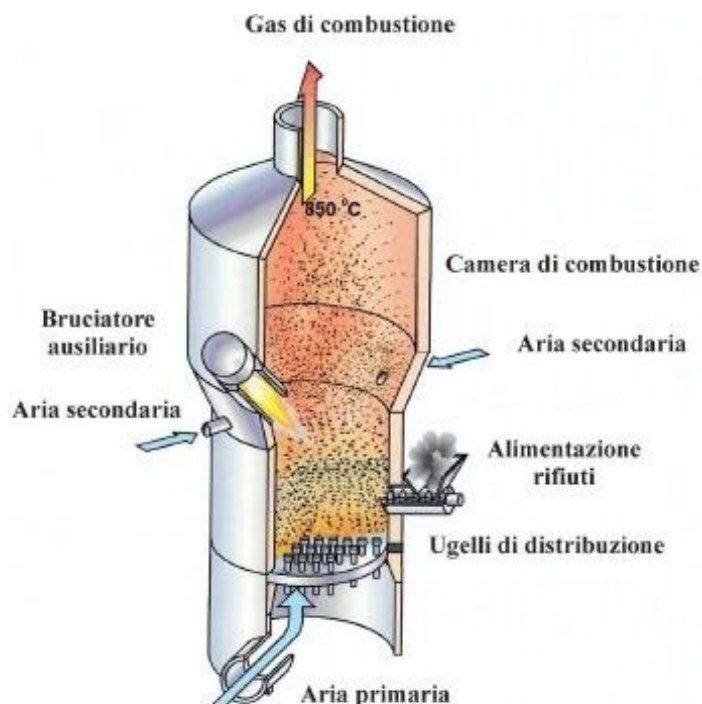
### 2.1.4 Forni a letto fluido

Il combustore a letto fluido è costituito essenzialmente da un cilindro verticale in acciaio rivestito internamente di refrattario, in cui la biomassa viene tenuta in sospensione (fluidificata) da una corrente d'aria, inviata attraverso una griglia posta alla base del cilindro stesso.

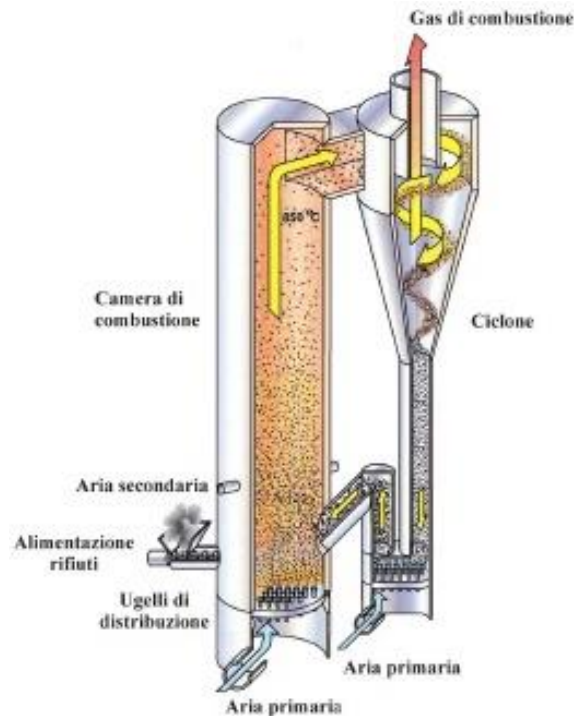
In molti casi il cilindro contiene un inerte che si mescola al materiale da bruciare all'atto dell'alimentazione, così da favorire i processi di scambio termico, fornire sufficiente inerzia termica al sistema, regolarizzare il processo; un tipico inerte è la sabbia.

L'utilizzo dei forni a letto fluido per la combustione delle biomasse richiede un loro pretrattamento che ne modifichi opportunamente la pezzatura e la consistenza. Parametro caratteristico del funzionamento del forno a letto fluido è costituito dalla velocità superficiale dell'aria : velocità di fluidificazione. I letti più diffusi sono quelli a letto bollente (Fig. ), caratterizzato da una velocità di fluidificazione medio-bassa, e a letto ricircolato (o trascinato) (Fig. ), con velocità di fluidificazione elevata. I letti fluidi bollenti sono costituiti essenzialmente da una colonna in cui viene insufflata l'aria dal basso e il combustibile iniettato dall'alto o lateralmente.

Schema di un forno a letto bollente.



Schema di un forno a letto ricircolato.



I parametri e le caratteristiche che definiscono il funzionamento di questi forni sono i seguenti:

- tipi di alimentazione : i letti fluidi vengono alimentati con combustibile ridotto in pezzature opportune (50÷60 mm) in modo da promuovere fenomeni di scambio che concorrono a realizzare un'efficiente combustione;
- temperatura di funzionamento : la temperatura del letto viene mantenuta tra i 750 e gli 850°C; più in particolare nella parte superiore del letto abbiamo una temperatura tra i 950÷1000°C;
- eccesso d'aria : in genere si opera con eccessi di aria compresi fra il 20 e il 40% con picchi massimi attorno al 60–70%;
- carico del letto;

- recupero termico : viene effettuato nella zona del letto e nella parte sovrastante, le quali risultano costituite da pareti a tubi d'acqua. Il rimanente recupero viene effettuato dai fumi a valle del letto;
- inerzia termica : l'inerte contenuto nei letti, quando presente, ha un'elevata inerzia termica, la quale permette di conservare a lungo una temperatura tale da rendere possibile una rapida riaccensione dopo una fermata.

## **2.2 Carbonizzazione**

La carbonizzazione è un processo di tipo termochimico che consente che consente la trasformazione delle molecole strutturate dei prodotti legnosi e cellulosici in carbone (carbone di legna o carbone vegetale ) , ottenuta mediante l'eliminazione dell'acqua e delle sostanze volatili della materia vegetale attraverso l'azione del calore.

## **2.3 Pirolisi**

E' un processo di degradazione termochimica di materiali organici, attraverso l'azione del calore, a temperature elevate ( tra 400 e 800 °C ), in completa assenza di ossigeno. Mentre riscaldando il materiale in presenza di ossigeno avviene una combustione che genera calore e produce composti gassosi ossidati, con lo stesso riscaldamento in condizioni di assenza totale di ossigeno il materiale subisce la scissione dei legami chimici originari con formazione di molecole più semplici. Il calore fornito nel processo di pirolisi viene quindi utilizzato per scindere i legami chimici. I prodotti della pirolisi possono essere gassosi, liquidi o solidi, in proporzioni che dipendono dai metodi di pirolisi (pirolisi veloce, lenta, o convenzionale) e dai parametri di reazione oltre che dalla biomassa di partenza. La produzione di energia basata su questa tecnica presenta ancora alcuni problemi connessi alla qualità dei prodotti così ottenuti, che non hanno raggiunto una qualità sufficientemente adeguata rispetto alle applicazioni (con turbine a gas o con motori diesel).

## **2.4 Gassificazione**

Attualmente il processo termochimico denominato gassificazione, ancora in fase di sperimentazione, viene considerato una della tecnologie più valide e promettenti ai fini della produzione di energia elettrica, sia per quanto riguarda l'efficienza (i gassificatori risultano

avere valori di rendimento nettamente superiori agli impianti a combustione), sia per quanto riguarda l'impatto ambientale.

Il processo consiste nella trasformazione in combustibile gassoso di un combustibile solido o liquido, nel caso specifico della biomassa, attraverso una ossidazione parziale a temperature elevate (900–1000 °C). Il gas ottenuto è una miscela di  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $H_2O$  (vapore acqueo) e  $N_2$ , accompagnati da ceneri in sospensione e tracce di idrocarburi ( $C_2 H_6$ ) chiamata *syngas*. La proporzionalità tra i vari componenti del gas varia notevolmente in funzione dei diversi tipi di gassificatori, dei combustibili e del loro contenuto di umidità.

Questa tecnologia però presenta ancora alcuni problemi principalmente per il basso potere calorifico dei gas ottenuti e per le impurità presenti in essi (polveri, catrami e metalli pesanti). Inoltre l'utilizzo del *syngas* quale vettore energetico è limitato per i problemi connessi ai costi di stoccaggio e trasporto, a causa del basso contenuto energetico per unità di volume rispetto agli altri gas.

Il processo nel complesso può essere suddiviso in tre fasi:

- Fase fortemente esotermica di combustione;
- Fase di pirolisi;
- Fase di conversione del carbonio in gas ( $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ).

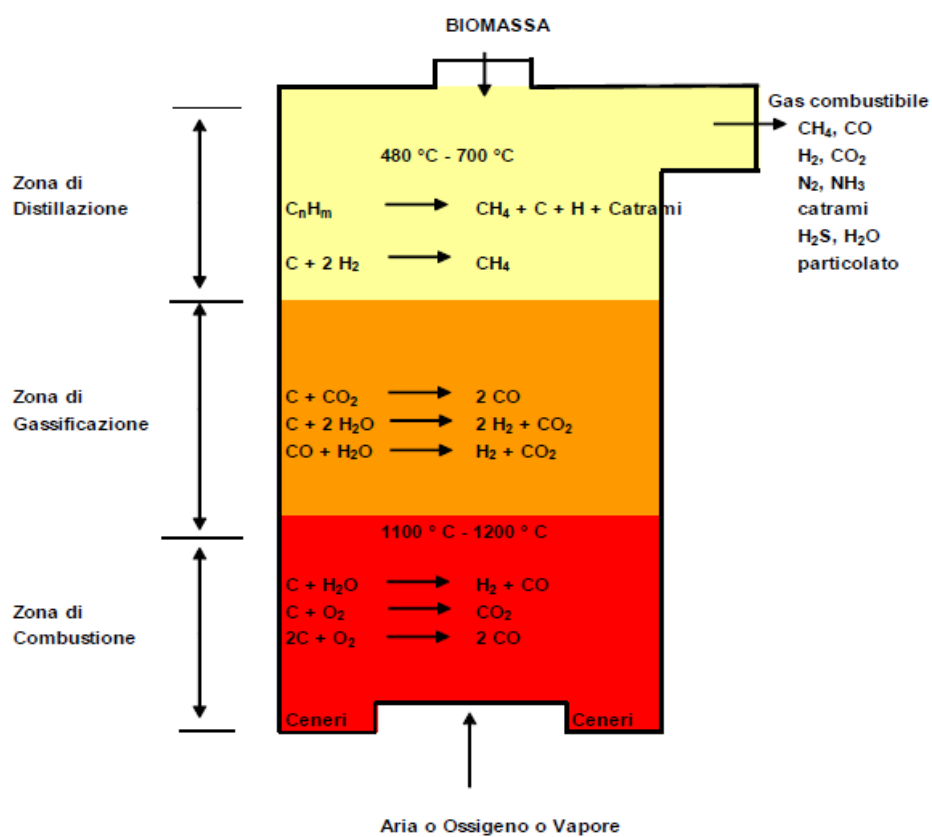
Quanto alle modalità di processo possiamo avere:

- **gassificazione in aria** : se è bruciato con una quantità di aria sottostechiometrica, il combustibile produce *syngas* a basso potere calorifico contenente principalmente  $H_2$  e  $CO$ , ma diluito con una gran quantità di azoto inerte e, per tale motivo, a modesto contenuto energetico. Un gas di questo tipo è utilizzabile per caldaie e motori, ma, a causa del basso potere energetico, non può essere trasportato a grandi distanze;
- **gassificazione con vapore** : in tal caso il gas prodotto non è diluito con l'azoto contenuto nell'aria, per cui il potere calorifico risulta maggiore rispetto al caso precedente;
- **gassificazione in ossigeno** : se il combustibile è bruciato con piccole quantità di ossigeno puro, il *syngas* che si ottiene ha il più elevato potere calorifico ottenibile con questa tecnica ed è utilizzabile anche a distanze limitate, sia in processi termici industriali, sia per la sintesi di metanolo, ammoniaca, benzina, metano e idrogeno.

In figura si riporta lo schema generale di un gassificatore, al suo interno avvengono diverse reazioni a seconda della temperatura a cui si trova la biomassa, pertanto nel suo interno possiamo individuare tre zone, partendo dal basso verso l'alto abbiamo:

1. Zona di combustione (1100°C - 1200°C);
2. Zona di gassificazione (1000°C);
3. Zona di distillazione (480°C - 700°C).

I primi gassificatori realizzati erano a pressione atmosferica ma questi non permettevano di alimentare direttamente una turbina a gas, soltanto dopo la seconda metà del XX secolo si è avuta a disposizione la tecnologia per la gassificazione in condizioni pressurizzate, con un notevole potenziale per lo sviluppo di unità compatte ed adatte all'alimentazione di turbine a gas.



Ci sono due tipologie principali di gassificatori :

- gassificatori a letto fisso;
- gassificatori a letto fluido.

### 2.4.1 Gassificatori a letto fisso

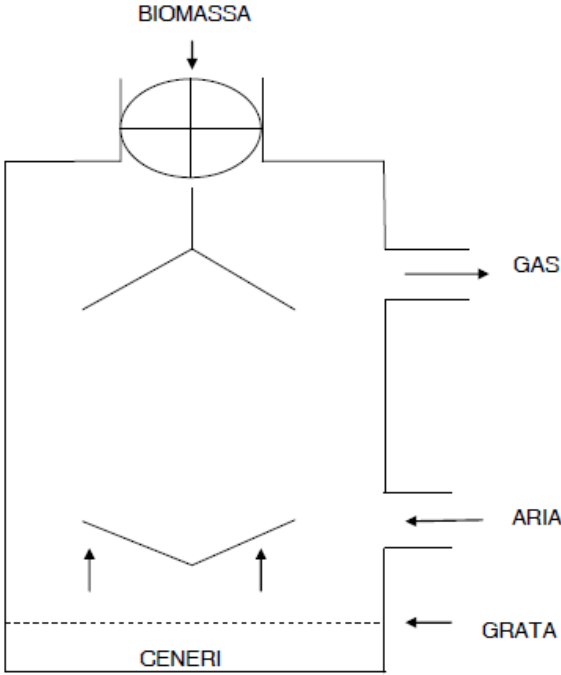
I gassificatori a letto fisso vengono utilizzati per combustibili disponibili in pezzettatura abbastanza grossolana, come potature di alberi, pellet, stocchi di mais.

Quelli utilizzati oggi si suddividono in due tipologie : updraft o downdraft.

Nei gassificatori updraft ( in controcorrente ) (Fig. ) la biomassa viene introdotta dall'alto, mentre il gas ossidante viene immesso dal fondo: la conversione della biomassa avviene durante la discesa. Nella zona superiore del gassificatore, la biomassa è dapprima essiccata a spese del calore sensibile posseduto dal gas caldo ascendente e successivamente pirolizzata nella zona centrale, producendo un char che continua il suo moto verso la parte bassa del reattore per essere gassificata; mentre i vapori della pirolisi vengono trascinati verso l'alto dal gas. Il tar contenuto in questi vapori può essere condensato quando entra in contatto con la biomassa solida discendente a bassa temperatura, oppure trascinato verso l'alto insieme al gas caldo, conferendogli un contenuto tipicamente alto di tar. La frazione di tar condensata viene dunque riciclata verso le zone di reazione, dove subisce un processo di cracking generando un gas combustibile e un char. Nella parte inferiore del reattore, detta anche zona di gassificazione, il char solido derivante dalla pirolisi e i prodotti del cracking sono parzialmente ossidati dall'aria ascendente. Per aumentare il contenuto di idrogeno nel gas di sintesi, può anche essere iniettato del vapore.

Nei gassificatori downdraft ( in equicorrente ) (Fig. ) la biomassa viene introdotta dall'alto, mentre il gas ossidante è immesso ai lati della griglia di sostegno (sempre nella parte alta del reattore). Entrambi scendono verso la parte bassa del gassificatore attraverso un letto di solidi a pacco, supportati da una strizione del reattore detta "gola", dove avviene la maggior parte delle reazioni di gassificazione. I prodotti della gassificazione vengono miscelati in questa zona, la quale è tipicamente turbolenta e ad elevata temperatura. E' quindi favorito il cracking del tar, processo completato insieme alle reazioni di gassificazione. La biomassa è continuamente immessa attraverso un serbatoio, posto alla sommità, in modo tale da mantenere costanti certi valori del livello del letto. Il gas prodotto viene estratto dal basso sotto una griglia, attraverso un estrattore mosso da un motore alimentato dal gas stesso. L'aria viene aspirata dentro al letto a causa della continua rimozione del gas. Nella zona dell'ingresso dell'aria avviene una parziale combustione esotermica, con temperatura che si aggira tra i 1000 e i 1300 °C, che genera uno strato di carbone sotto l'ingresso dell'aria. Il calore prodotto viene utilizzato per essiccare la biomassa nella zona alta del reattore, e per far avvenire le reazioni endotermiche della gassificazione. Sopra l'ingresso dell'aria, la biomassa subisce una pirolisi; a causa della presenza della gola, si instaura una circolazione turbolenta e quindi i gas della pirolisi vengono mescolati con i gas caldi presenti nella zona di

ossidazione. Quindi anche i gas della pirolisi vengono crackizzati e il gas che ne risulta, presenta un basso contenuto di catrame.



Gassificatore updraft.



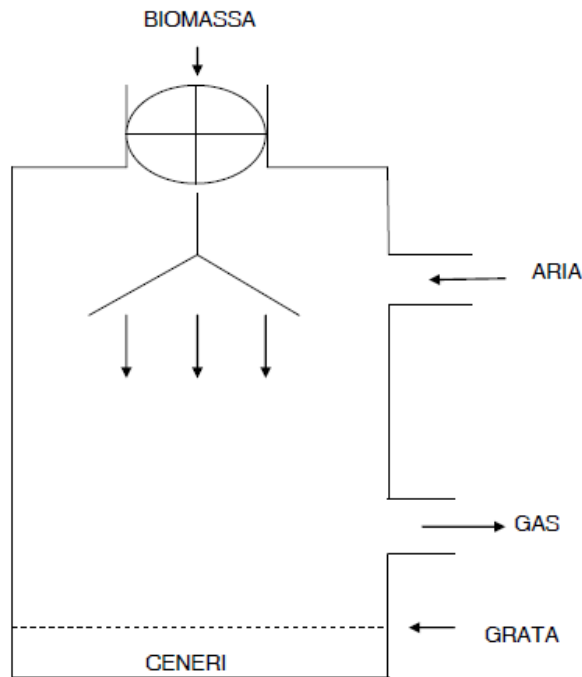


Figura –Gassificatore downdraft.

#### 2.4.2 Gassificatori a letto fluido

Il funzionamento dei gassificatori a letto fisso equicorrente e controcorrente sono influenzati dalle proprietà chimiche, fisiche e morfologiche del combustibile utilizzato.

Problemi comuni incontrati sono:

- mancanza di flusso di bunker flow;
- formazione di scorie;
- elevato salto di pressione all'interno del gassificatore.

Una soluzione ai problemi precedenti è il gassificatore a letto fluido, il quale può essere classificato in due diverse tipologie:

- a letto fluido bollente;
- a letto fluido circolante.

I gassificatori a letto fluido bollente consistono in un contenitore caratterizzato da una grata nella parte inferiore, attraverso la quale viene introdotto il gas ossidante. Sopra la grata è

collocato il letto del materiale particolato di piccole dimensioni tenuto in equilibrio dal flusso del gas ossidante.

Assume grande importanza, per quanto riguarda la biomassa che deve essere immessa nel reattore, la sua preparazione. Ovvero risulta necessario garantire contenuti di umidità compresi fra il 10 e il 15% e dimensione della biomassa fra 20 e 80 mm, al fine di consentire al letto fluido di rimanere in sospensione all'interno del gassificatore. La biomassa viene iniettata all'interno del letto fluido dove viene gassificata, con una temperatura che si aggira fra gli 800 e i 950 °C. In questa zona si genera un mix di char e di composti gassosi, i quali subiscono un processo di cracking a contatto con il materiale caldo del letto fluido, cosicché il syngas fuoriesce con un contenuto di tar relativamente basso (1-3 g/m<sup>3</sup>).

Il gassificatore a letto fluido circolante, a differenza di quello bollente, è in grado di gestire grossi quantitativi di materia prima. Il letto fluido circola esternamente, dove abbiamo la separazione del syngas e delle ceneri, mentre il materiale del letto fluido ritorna all'interno insieme al char residuo. Risulta conveniente l'adozione di questo tipo di gassificatore quando si devono trattare grandi quantitativi di materia prima, sebbene si abbia una perdita di carico più elevata rispetto a quello a letto bollente. Il gassificatore a letto fluido circolante viene adottato per impianti di potenza superiori a 1 MW.

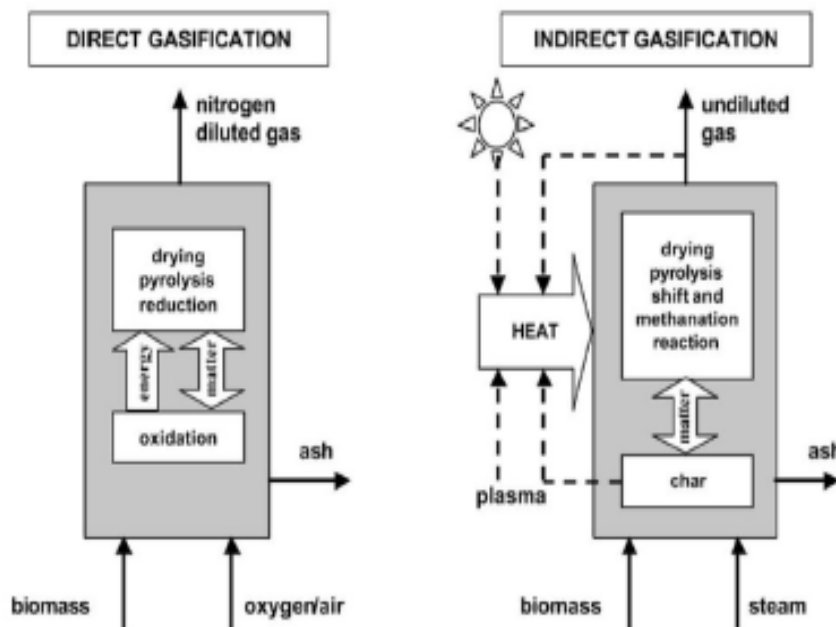


Figura 14. Schema di gassificazione diretta e indiretta

### 2.4.3 Vantaggi e svantaggi dei gassificatori

	<b>VANTAGGI</b>	<b>SVANTAGGI</b>
<b>Gassificatori a letto fisso controcorrente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-semplicità;</li> <li>-possibilità di operare con diverse tipologie di biomasse (paglia, segatura, legname, ecc.)</li> <li>-elevata combustione del carbone di legna e scambio termico del gas in uscita con la biomassa in ingresso;</li> <li>-elevato rendimento di impianto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-formazione di cammini preferenziali interni al gassificatore che portano a situazioni di pericolo a causa della ritenzione di ossigeno all'interno del letto fisso e quindi necessità di installare delle grate mobili</li> <li>-ritenzione dei catrami all'interno del gas</li> </ul>
<b>Gassificatore a letto fisso equicorrente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-produzione di gas senza contenuto di catrami e quindi adatto per alimentazioni di motori endotermici;</li> <li>-basso impatto ambientale a causa del basso livello di composti organici nel condensato.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-la biomassa deve essere pellettizzata o bricchettata prima dell'uso;</li> <li>-a causa della necessità di mantenere uniforme elevate temperature sopra un data area rende impraticabile l'uso di questo tipo di gassificatori per potenze all'albero superiori ai 350 kW.</li> </ul>
<b>Gassificatore a letto fluido</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-applicabile a grande scala (maggiore di 500 kW all'albero)</li> <li>-elevati coefficienti di scambio termico</li> <li>-elevate velocità di reazione</li> <li>-temperature uniformi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-elevata produzione di particolato</li> <li>-richiede pezzatura fine della biomassa combustibile</li> <li>-tecnologia complessa</li> <li>-possibile presenza di carbone nelle ceneri</li> </ul>

#### 2.4.4 Applicazioni dei gassificatori della biomassa

Nel paragrafo precedente sono stati riportati i vari tipi di gassificatori ma fino ad ora non si è parlato del motivo per cui conviene utilizzare un sistema di gassificazione per trasformare la biomassa dallo stato fisico solido a quello gassoso.

Se vogliamo alimentare delle macchine termiche come le turbine a gas o motori a combustione interna è necessario utilizzare combustibili liquidi o gassosi, inoltre un eventuale trasporto di tale combustibili risulta facilitato quando lo si trova in tale stato fisico, ecco perché la gassificazione della biomassa risulta molto sviluppata soprattutto nei paesi in via di sviluppo dove esiste biomassa di varia natura (residui legnosi, erba, paglia, torba, lolla di riso, etc.) che possono facilmente essere convertiti in gas tramite un gassificatore a letto fisso e bruciati con un motore per produrre energia elettrica e termica sufficiente per alimentare una piccola comunità.

Gassificatori connessi a motori stazionari offrono la possibilità di usare biomassa per generare potenza elettrica e termica nel campo da alcuni kW a qualche MW.

Pertanto si possono distinguere applicazioni della gassificazione della biomassa per impianti:

- A larga scala (sopra i 500 kW elettrici) con gassificatori a letto fluido o a letto fisso.
- A media scala (30 – 500 kW elettrici); con gassificatori a letto fisso alimentati da legno, mais, gusci di noci di cocco.
- A piccola scala (7 – 30 kW elettrici); utilizzati prevalentemente gassificatori a letto fisso alimentati da residui agricoli ed installati nei paesi in via di sviluppo per la fornitura di energia per piccole comunità.
- Micro scala (1 - 7 kW elettrici); Questi gassificatori sono a letto fisso e producono energia elettrica necessaria per alimentare motori per sistemi di irrigazione nei paesi in via di sviluppo in piccole e medie aziende agricole.

#### 2.4.5 Sistemi di pulizia del syngas

I sistemi di pulizia devono essere visti come parte integrante dell'impianto di gassificazione, il quale va scelto, a sua volta, in modo tale che il syngas prodotto sia compatibile con la sua destinazione d'uso. Per l'alimentazione di caldaie, motori endotermici, turbine a gas e motori Stirling, ci sono diversi requisiti di pulizia. Il particolato solido (mix di ceneri e di carbonella) può essere rimosso tramite :

- i ciloni : macchinari che permettono la purificazione dell'aria ( o di un generico gas) dalle polveri, sfruttando il principio della forza centrifuga;
- i filtri a barriera (a macchine, a candela ecc.); • i precipitatori elettrostatici (poco usati in queste applicazioni);
- il lavaggio.

### 2.5 Steam explosion (SE)

La Steam Explosion è un trattamento idrotermico che rende più facile e meno severa dal punto di vista ambientale la separazione delle tre frazioni costituenti i comuni substrati vegetali (emicellulosa, cellulosa e lignina), rendendo quindi possibile l'utilizzazione totale delle biomasse.

Tale processo risulta particolarmente interessante grazie al basso consumo energetico e al fatto che non richiede l'utilizzo di particolari prodotti chimici; consiste infatti nell'uso di vapore saturo ad alta pressione per riscaldare rapidamente legno o qualsiasi altro materia lignocellulosica e favorire la rottura delle fibre. Il processo avviene in un reattore ad alimentazione continua o discontinua.

### 2.6 Produzione di energia termica per il riscaldamento

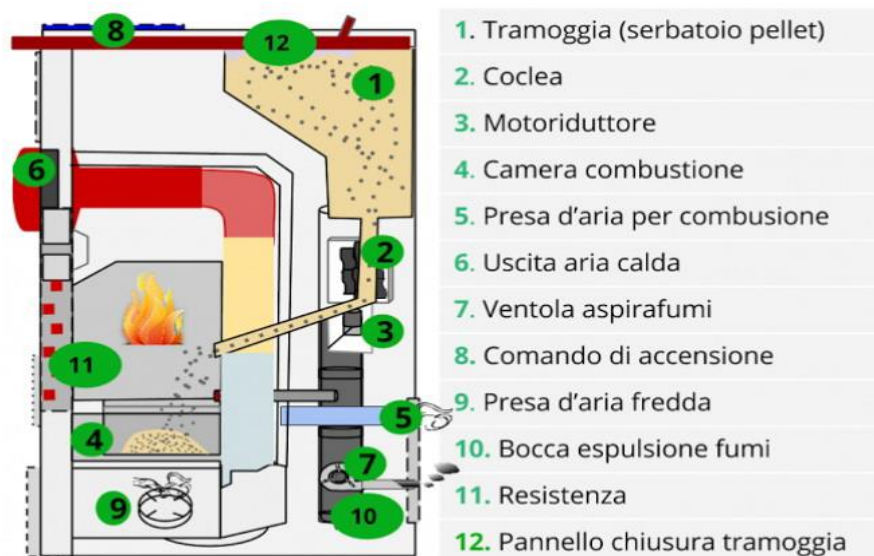
Gli attuali sistemi di riscaldamento alimentati con biomasse presentano configurazioni diverse in relazione alla taglia e al tipo di combustibile alimentato. A seconda della taglia, ovvero della potenza utile prodotta, vengono commercializzate stufe per il riscaldamento di singoli ambienti con potenze termiche a partire da circa 5-10 kW e caldaie per il riscaldamento di singole unità abitative con potenze termiche a partire da circa 10-20 kW, per arrivare a caldaie destinate a riscaldare edifici di maggiori dimensioni, come per esempio una scuola, con potenze a partire da circa 100 kW, fino alle grandi caldaie destinate a reti di teleriscaldamento con potenze dell'ordine di alcuni MW.

Possiamo quindi andare a suddividere gli impianti di grande taglia, utilizzati per la produzione di energia elettrica e/o termica, e gli impianti di piccola taglia utilizzati esclusivamente per la produzione di energia termica.

Negli impianti di minori dimensioni si impiegano di solito combustibili di migliore qualità e di maggiore comodità d'uso come il pellet, anche se caratterizzati da maggiori costi; viceversa

negli impianti di taglia maggiore si preferisce utilizzare la biomassa cippata, solitamente ottenuta dagli scarti di lavorazione del legno e dalla manutenzione dei boschi.

• **Stufe e caldaie a pellet** : sono costituite dalla caldaia vera e propria, dal sistema di alimentazione del pellet e dal serbatoio di stoccaggio. Nel caso delle stufe, tali elementi si ritrovano integrati in un unico componente, mentre nel caso delle caldaie, il locale di caldaia è in genere separato da quello di stoccaggio del combustibile. Nelle caldaie a pellet, grazie alla forma cilindrica, liscia e alle piccole dimensioni, il pellet tende a comportarsi come un fluido, agevolando la movimentazione del combustibile e il caricamento automatico delle caldaie. L'elevato potere calorifico e la facilità di movimentazione rendono il pellet il biocombustibile più adatto per impianti di riscaldamento automatici di tutte le taglie. L'elemento che differenzia una caldaia a pellet da una caldaia convenzionale a gasolio è fondamentalmente rappresentato dal bruciatore e dal sistema di alimentazione. Il bruciatore è una sorta di piattello fisso o rotante all'interno del quale cade il pellet trasportato da una coclea comandata dal sistema di regolazione.



Componenti di una stufa a pellet.

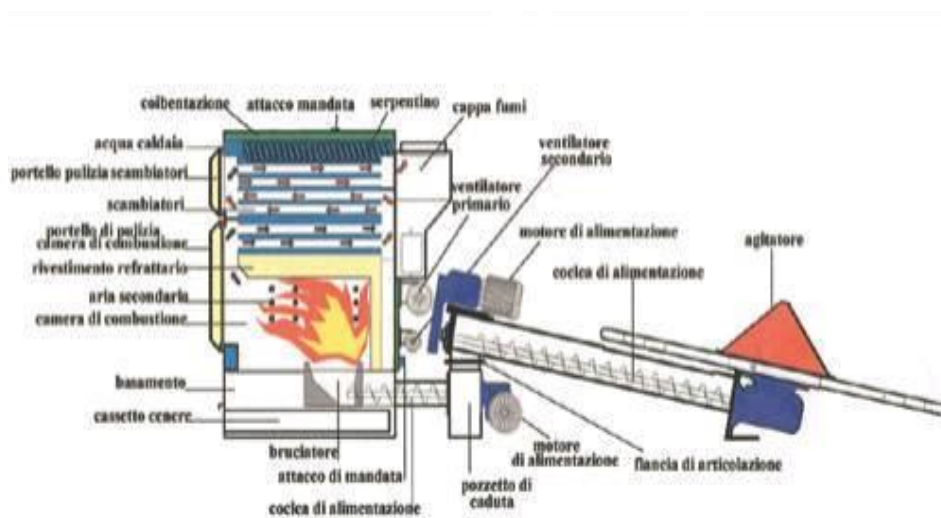
L'accensione del pellet avviene nel piattello attraverso una resistenza elettrica. Inoltre risulta possibile, in alcune caldaie a gasolio, andare a sostituire i bruciatori preesistenti con bruciatori a pellet, senza dover andare a sostituire l'intera caldaia.

Per quanto riguarda il caricamento delle stufe, questo non è automatico, ma richiede l'intervento dell'utente che si limita alla carica del serbatoio e allo svuotamento periodico del

cassetto delle ceneri. Il dimensionamento della caldaia non differisce sostanzialmente dal dimensionamento di una caldaia a gas o a gasolio, se non per il fatto che risulta opportuno evitare eccessivi sovradimensionamenti del sistema sia per motivi di natura economica, sia dal punto di vista operativo (rendimento, emissioni, ecc.). Risulta invece preferibile prevedere la presenza di una caldaia a gas o a gasolio con il compito di integrare semplicemente la richiesta termica nelle situazioni più gravose.

- **Caldaie a cippato** : sono composte dagli stessi componenti già descritti a proposito delle caldaie a pellet. La principale differenza è data dall'eterogeneità del combustibile che comporta alcune complicazioni impiantistiche. Gli impianti con caldaie a cippato sono totalmente automatizzati e non hanno limiti dimensionali, potendo raggiungere potenze anche di diversi MW; sono quindi più adatte a sistemi di taglia grande. Il cippato, ovvero legna di varia provenienza opportunamente sminuzzata in piccoli pezzi con dimensioni di circa 4–6 cm, viene alimentato alla camera di combustione mediante una coclea comandata dal sistema di regolazione e controllo.

La camera di combustione è basata su una griglia fissa o mobile nella quale l'aria viene insufflata dal basso. La dosatura dell'aria viene regolata attraverso la misura della concentrazione di ossigeno nei fumi. Il caricamento del combustibile in caldaia avviene in modo automatico; tuttavia, è necessario realizzare un locale di stoccaggio del combustibile nel caso di impianti di elevata potenza. In alcuni modelli esiste la funzione di mantenimento braci, che consente alla caldaia di mantenere una piccola quantità di brace accesa durante le pause di funzionamento, permettendo l'accensione immediata al riavvio dell'impianto.



Schema di una caldaia a cippato.

• **Caldaia a fiamma inversa** : hanno potenze che vanno da circa 20–30 kW fino a 100–200kW, e sono pertanto adatte a utenze mono-famigliari o pluri-famigliari. In questa tipologia di caldaie la camera di combustione è posizionata al di sotto del vano in cui viene caricata la legna. La circolazione dell'aria comburente, la quale attraversa dall'alto verso il basso il vano del combustibile, viene garantita dalla presenza di una ventola per la circolazione forzata. Una parte dell'aria (primaria) viene introdotta in caldaia immediatamente sopra la griglia sulla quale è appoggiata la legna. L'aria primaria consente l'avvio della combustione (fase di gassificazione), con la formazione di uno strato di braci a contatto della griglia e lo sviluppo di gas combustibili derivanti dalla pirolisi del legno. I gas sprigionati vengono spinti in basso attraverso la griglia e giungono nella camera sottostante, dove viene insufflata aria secondaria per il completamento della combustione. L'inversione della fiamma consente di ottenere una combustione progressiva della legna, che non prende totalmente fuoco nel vano di carico, ma brucia solamente in quando si trova in prossimità della griglia. La potenza erogata dalla caldaia quindi risulta essere più stabile nel tempo e la combustione risulta essere controllata in modo migliore, con un aumento del rendimento (oltre il 90%) e riduzione delle emissioni inquinanti.



Caldaia a fiamma inversa.



# CAPITOLO 3

## I processi biochimici

I processi di conversione biochimica permettono di ricavare energia attraverso reazioni chimiche dovute alla presenza di enzimi, funghi e altri microrganismi che si formano nella biomassa mantenuta in particolari condizioni. Vengono impiegati per quelle biomasse in cui il rapporto C/N sia inferiore a 30 e il contenuto di umidità sia superiore del 30%. Risultano idonei alla conversione biochimica le colture acquatiche, alcuni sottoprodotti colturali, i reflui zootecnici e alcuni scarti di lavorazione, nonché alcune tipologie di reflui urbani ed industriali.

### 3.1 La digestione anaerobica

La digestione anaerobica consiste nella decomposizione di materia organica in prodotti più semplici mediante un'attività di trasformazione biochimica da parte di microrganismi, in completa assenza di ossigeno. Il prodotto della digestione anaerobica è il biogas, una miscela di gas di composizione variabile, in linea di massima costituita da metano e anidride carbonica, oltre che da vapore acqueo, azoto e idrogeno. Il biogas, grazie al metano che costituisce la componente infiammabile, può essere utilizzato per la generazione di energia elettrica e/o termica, dopo aver subito i dovuti trattamenti di depurazione. Il biogas si può ottenere da qualunque frazione organica, anche se le fonti principali da cui si ricava sono i residui ottenuti da impianti di depurazione di reflui (allevamenti, produzioni agroalimentari ecc.) e la raccolta differenziata dell'umido e delle discariche. Dal fissaggio dell'azoto presente nella frazione organica, si possono ricavare, come sottoprodotti della digestione anaerobica, prodotti fertilizzanti. La produzione di biogas impedisce che il metano prodotto naturalmente vada a contribuire all'effetto serra.



Tabella –Composizione del biogas

### 3.1.1 Produzione di biogas

Come già affermato precedentemente, la produzione di biogas è dovuta alla degradazione biologica della sostanza organica in condizioni di anaerobiosi. Essa determina la formazione di diversi prodotti, tra cui i più abbondanti sono il metano e il biossido di carbonio. Nel processo si possono distinguere quattro stadi :

1. **idrolisi** : le molecole organiche subiscono scissione in componenti più semplici; in questa prima fase, grazie all'intervento di diversi gruppi batterici, si ha che i componenti primari, ovvero le proteine, i grassi e i carboidrati vengono trasformati in composti più semplici ovvero in aminoacidi, acidi grassi e monosaccaridi in forma solubile;

2. **acidogenesi** : altri batteri specializzati, detti acidogeni, trasformano queste sostanze in molecole ancora più semplici come gli acidi grassi volatili ( acido acetico, propionico, butirrico e valerico ) con produzione di ammoniaca, anidride carbonica e acido solfidrico quali sottoprodotti (sottoprodotti non desiderati la cui concentrazione deve essere tenuta sotto controllo) ;

3. **acetogenesi** : le molecole semplici prodotte nel precedente stadio sono ulteriormente digerite producendo biossido di carbonio, idrogeno e acido acetico;

4. **metaogenesi** : vengono prodotti metano, biossido di carbonio e acqua. La produzione di metano rappresenta la conclusione della digestione anaerobica, infatti il metano è l'unico composto non reattivo nell'intero processo e , quindi, può essere considerato il prodotto finale.

Il processo di digestione anaerobica è notevolmente influenzato dalla temperatura operativa e dal tempo di permanenza del substrato. Infatti, il quantitativo di biogas prodotto dall'unità di massa di substrato aumenta al trascorrere del tempo, tanto più elevata è la temperatura. E' importante evidenziare che l'attività anaerobica può aver luogo in un ampio intervallo di temperatura : tra -5 e +70 °C.

In base all'intervallo termico di appartenenza, possiamo individuare differenti specie di microrganismi :

- psicrofili (temperature inferiori a 20 °C);
- mesofili (temperature comprese tra i 20 e i 40 °C);
- termofili (temperature superiori ai 45 °C).

Gli andamenti di sviluppo e crescita delle diverse popolazioni batteriche presentano picchi in corrispondenza di ben definiti intervalli di temperatura. Dunque, la produzione di biogas non

comincia subito, ma attraversa una fase transitoria, dovuta alla necessità di creare un ambiente adatto alla proliferazione e alla crescita dei batteri (questa fase richiede circa 10–20 giorni).

In generale possiamo andare a definire per ogni tipo di batterio, i rispettivi tempi di digestione, che come detto in precedenza dipendono dalla velocità di crescita dei microrganismi e dalla temperatura a cui avviene la digestione :

- nel caso di batteri psicrofili le reazioni si completano nel giro di 40–100 giorni;
- per quelli mesofili si passa a 25–40 giorni;
- infine quelli termofili hanno tempi di digestione dell'ordine delle settimane (due o tre).

Con il termine substrato indichiamo il materiale che i microrganismi devono digerire. Esso risulta definito attraverso una serie di parametri :

- TS : (solidi totali) misura il contenuto di sostanza secca del substrato;
- TVS : (solidi totali volatili) rappresentano in prima approssimazione la frazione organica della sostanza secca;
- COD : (domanda chimica di ossigeno) misura la sostanza organica ossidabile presente nel campione. Ovvero rappresenta la quantità di ossigeno necessaria per la completa ossidazione dei composti organici e inorganici presenti in un campione.

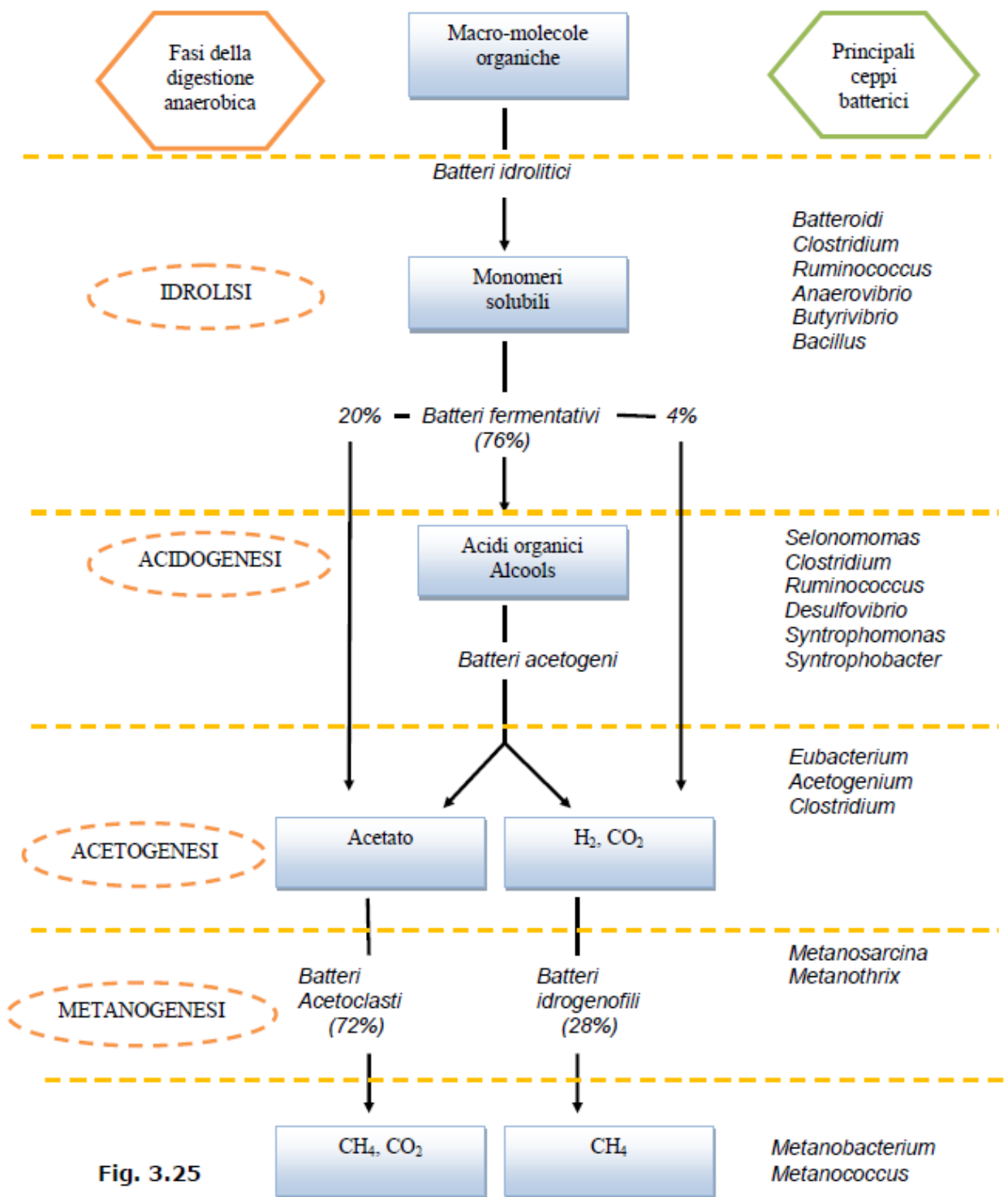
La resa in biogas di un determinato substrato viene espressa in funzione della sostanza secca (solidi totali) e misurata in Nm<sup>3</sup>.

Inoltre, il substrato deve presentare un adeguato valore di acidità; un pH basso impedisce la crescita dei batteri metanigeni e la generazione di biogas. Il valore del pH per essere ottimale deve essere compreso tra 7 e 7,5.

Come substrati vengono utilizzati soprattutto le deiezioni suine e quelle bovine che hanno una buona resa in biogas, specie nelle aziende agricole; negli impianti alimentati con la frazione umida dei rifiuti solidi urbani vengono utilizzati sfalci, residui ortofrutticoli e altri simili. E' inoltre importante andare a notare come la presenza di alcuni fattori possa inibire o limitare sia la crescita dei batteri, sia la resa di trasformazione del substrato nel prodotto finale. I parametri che possono influenzare negativamente l'intero processo sono rappresentati dal substrato stesso e da eventuali elementi inibenti quali metalli pesanti, sali, residui di pesticidi e prodotti farmaceutici, detersivi e disinfettanti, solventi, inibitori da trattamenti chimici per la conservazione di cibi ecc. La possibilità di aggiungere un co-substrato di

origine vegetale al substrato di origine animale è molto interessante dal punto di vista energetico, poiché porta ad un aumento della resa in biogas.

Infine, prima di andare ad utilizzare il biogas a fini energetici, deve essere sottoposto a dei trattamenti atti ad aumentare la percentuale di metano a discapito di quella degli altri gas, al fine di accrescerne il potere calorifico. Infatti il potere calorifico risulta strettamente correlato alla percentuale di metano nella miscela : maggiore è la percentuale di questo gas, maggiore è il potere calorifico. L'effetto contrario si ottiene dalla presenza di anidride carbonica, azoto e acqua.



Schematizzazione del processo di digestione anaerobica.

### 3.1.2 Impianti per la produzione di biogas

Un impianto a biogas risulta incentrato sul digestore e sull'unità di cogenerazione. Gli altri componenti dell'impianto sono: i tubi per il trasporto del substrato, dispositivi per il miscelamento, sistemi di stoccaggio del substrato e di co-substrati, sistemi di stoccaggio del biogas prodotto e di desolforazione.

Il **digestore** rappresenta la parte più importante degli impianti di digestione anaerobica. Si tratta di un contenitore di grandi dimensioni a tenuta stagna, in cui vengono introdotti il substrato e il co-substrato. In questo ambiente, privo di ossigeno, i batteri produrranno il biogas. Nella maggior parte dei digestori per accelerare il processo di produzione del biogas viene fornito calore, cioè viene riscaldato il substrato attraverso le tubazioni disposte lungo le pareti interne, all'interno della quali circola acqua calda proveniente dal gruppo di cogenerazione o dalla caldaia. Il biogas prodotto può essere utilizzato per produrre sia energia termica, sia energia elettrica, oppure entrambe. Quest'ultima opzione viene detta cogenerazione per la contemporanea produzione di energia termica ed elettrica ed è la più utilizzata. Il calore prodotto può essere utilizzato per riscaldare il digestore, mentre la parte in eccesso può essere usata, ad esempio, per riscaldare le stalle oppure per il riscaldamento residenziale.

Oltre al biogas, il processo di digestione anaerobica produce il digestato come residuo finale. Quest'ultimo può essere direttamente utilizzato come fertilizzante in agricoltura, oppure può essere separato nelle sue componenti solida e liquida. La parte solida rappresenta in genere non più del 10–15% circa del peso del digestato ed è caratterizzata da un contenuto di sostanza secca relativamente alto, solitamente superiore al 20% circa. In essa si concentrano la sostanza organica residua, l'azoto organico ed il fosforo. La frazione liquida invece rappresenta almeno l'85–90% del volume del digestato il quale è caratterizzato da un tenore di sostanza secca mediamente compreso tra l'1.5 e l'8%. In essa si concentrano i composti solubili, tra cui l'azoto in forma ammoniacale, che può arrivare a rappresentare sino al 70–90% dell'azoto totale presente.

Gli impianti di digestione anaerobica vengono generalmente classificati a seconda che siano di piccola, media o grande taglia.

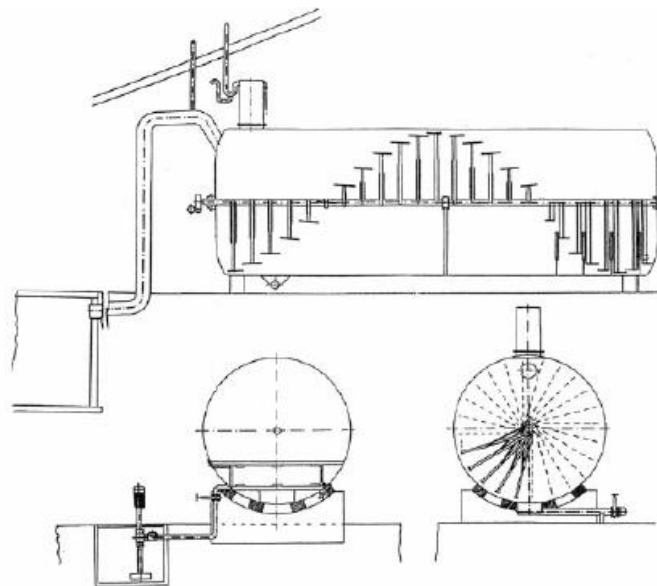
- Piccola taglia: si tratta di digestori semplici con volume che varia da 5 a 100 m<sup>3</sup> per piccole quantità di substrato (100–1000 t);
- Media taglia: digestori con capacità compresa tra 100 e 800 m<sup>3</sup>, sono destinati alle aziende agricole in grado di trattare 1000–15.000 t di substrato all'anno;

- Grossa taglia: si tratta di un digestore in grado di utilizzare oltre 15.000t di substrato all'anno. L'utilizzo di digestori di grandi dimensioni fa sì che la digestione anaerobica e i successivi trattamenti del residuo della digestione risultino economicamente vantaggiosi.

I digestori possono essere classificati in orizzontali e verticali.

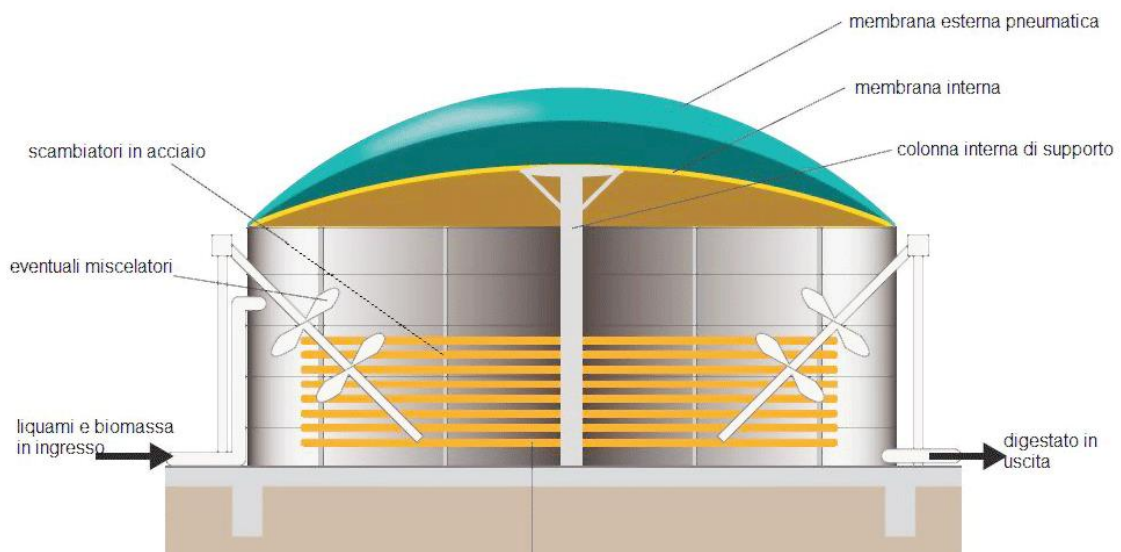
I **digestori orizzontali** sono relativamente piccoli e risultano costituiti da un grosso serbatoio in acciaio e da un sistema di miscelazione. Il volume standard di un digestore orizzontale varia tra i 50 e i 150 m<sup>3</sup>. Il mescolamento del substrato avviene tramite pale calettate sull'asse del miscelatore e, quindi immerse nel substrato. Il moto della materia avviene in direzione orizzontale, mentre il suo mescolamento in senso verticale. Mescolando la biomassa verticalmente non viene favorito il mescolamento di porzioni di materiale che, trovandosi in differenti posizioni assiali, sono coinvolte in differenti fasi dell' anaerobiosi batterica: conseguentemente la resa in biogas è maggiore.

Questo tipo di digestore richiede sempre l'immagazzinamento esterno del gas. Il substrato entra da un lato e il residuo della digestione esce da quello opposto; ne consegue che una determinata quantità di substrati transita con ritmo regolare attraverso il digestore.



I **digestori verticali** hanno forma cilindrica e normalmente hanno un volume che varia fra i 300 e i 1500 m<sup>3</sup>. Il materiale organico in esso contenuto viene riscaldato dal calore fornito da una rete di tubazioni in cui scorre acqua calda, disposte lungo le pareti perimetrali del digestore; le pareti sono, inoltre, coibentate per ridurre le dispersioni termiche verso l'ambiente esterno. Sia per i sistemi di riscaldamento sia per quelli di miscelazione possono essere adottate diverse soluzioni. La sommità del digestore è coperta da una membrana

deformabile in materiale sintetico, che consente lo stoccaggio del biogas prodotto all'interno del reattore stesso; viceversa il biogas può essere immagazzinato in un deposito esterno. Nella maggior parte dei casi un digestore verticale risulta essere meno costoso di uno orizzontale, in quanto vengono utilizzati materiali più economici, come il calcestruzzo, e la sua costruzione risulta meno complicata.



Altra componente importante di un impianto biogas è l'**unità di cogenerazione**, ovvero un impianto che permette la conversione dell'energia chimica del biogas in energia elettrica e/o termica. In tali impianti il calore prodotto durante la combustione, generalmente ceduto ad un fluido di raffreddamento, anziché essere disperso nell'ambiente, viene recuperato mediante uno scambiatore. Parte del calore recuperato viene utilizzato per riscaldare il digestore, mentre la restante parte viene inviata alle utenze.

La produzione combinata di energia elettrica e calore può incrementare l'efficienza di utilizzo del combustibile fossile fino ad oltre l'80%; a ciò corrispondono minori costi per l'approvvigionamento del combustibile fossile e minori emissioni di inquinanti e di gas ad effetto serra rispetto alla produzione separata di elettricità e calore. La pratica cogenerativa è applicabile in vari settori, purché vi sia una simultanea richiesta di energia termica ed elettrica. Nella sua forma più semplice un impianto di produzione combinata comprende motori alternativi e delle microturbine.



I **motori alternativi** si suddividono in due tipologie: a ciclo diesel e a ciclo otto. Tali motori risultano ampiamente reperibili sul mercato, per taglie fino ad alcune decine di MW. I motori Diesel possono inseguire il carico in modo soddisfacente fino a circa metà del valore nominale. Anche i motori a gas sono idonei all'inseguimento, conservando a metà carico l'85-90% del loro rendimento nominale. Ci si può attendere un rendimento di circa il 42% per un motore diesel da 1 MW e 38% per un motore a gas. Il punto di forza del motore diesel è il contenuto costo di installazione, sebbene le restrizioni sulle emissioni inquinanti aggravino i costi in funzione della loro severità, soprattutto per le piccole taglie; i motori a gas risultano invece più costosi, ma meno penalizzanti dal sistema di abbattimento delle emissioni.

Per quanto riguarda le **microturbine**, queste sono delle particolari turbine a gas che garantiscono buone prestazioni anche per taglie notevolmente inferiori a quelle degli usuali turbogas industriali. La microturbina si presta bene a cedere il proprio calore di scarico a un'utenza termica, non solo dal punto di vista termodinamico, ma anche perché è probabile che ai siti idonei alla generazione elettrica distribuita corrisponda la presenza di utenze termiche in loco, a differenza di quanto spesso succede per gli impianti di grossa taglia. La velocità di rotazione è attorno al centinaio di migliaia di giri al minuto; le potenze sono tra le decine di kW e i 100-200kW, i rendimenti tra il 20-25%.

Un' importante aspetto che caratterizza gli impianti biogas è il riscaldamento e l'isolamento del digestore. Sappiamo infatti che il processo di digestione anaerobica richiede determinate temperature in funzione del tipo di batteri.

Risulta pertanto necessario andare a riscaldare opportunamente il substrato fino alla temperatura richiesta, generalmente sfruttando il calore prodotto in cogenerazione. Esistono tre tipi di riscaldamento del substrato :

1. con sistema di riscaldamento integrato nel meccanismo di miscelazione;
2. con riscaldamento del substrato mediante una serie di tubazioni disposte sulle pareti interne in cui circola un opportuno fluido termovettore;
3. con uno scambiatore di calore in controcorrente posizionato nel digestore.

E' importante che il digestore sia isolato, in modo tale da evitare dispersioni termiche. I materiali isolanti maggiormente utilizzati sono la lana di roccia, il polistirene espanso oppure la schiuma di poliuretano, ma anche materie organiche come la lana, il cotone e il sughero. Per le pareti laterali si utilizza il poliuretano, mentre la lana di roccia viene usata sia per il fondo, sia per le pareti laterali. Infine consideriamo gli altri componenti dell'impianto ovvero i tubi per il trasporto del substrato, dispositivi di miscelamento, sistemi di stoccaggio del substrato, sistemi di stoccaggio del biogas e i sistemi di desolforazione.

Per quanto riguarda il trasporto del substrato verso il digestore può avvenire in **tubi** pressurizzati o non pressurizzati. I primi, mediante l'utilizzo di una pompa, devono avere un diametro di almeno 100mm per consentire il flusso del materiale. Per lunghe distanze si utilizza un diametro di 150mm. Al fine di evitare la formazione di sedimenti sul fondo dei tubi si dovrebbe calcolare una velocità minima di scorrimento di circa 1m/s. I tubi non pressurizzati, soggetti alla forza di attrazione gravitazionale, necessitano di un diametro minimo di 200mm. Generalmente i tubi utilizzati per gli impianti di digestione anaerobica sono in acciaio, ma possono essere utilizzati anche altri materiali come matrici plastiche.

La necessità di dotare un impianto biogas di **sistemi di miscelamento** deriva dalle seguenti ragioni:

- mescolare il materiale organico (substrato) già presente nel reattore con quello nuovo;
- garantire l'assenza di variazioni termiche nel substrato (temperatura uniforme);
- evitare la formazione di agglomerati e stratificazioni.

Le apparecchiature di miscelazione presenti nei digestori anaerobici possono essere di tipo meccanico o idraulico. I comuni dispositivi di miscelamento meccanici sono a pale o a immersione; questa soluzione è applicabile a digestori di volume fino 1000m<sup>3</sup>. Nel caso di miscelatori idraulici, il substrato viene mescolato attraverso una pompa. La biomassa viene aspirata da un punto del digestore, solitamente la sommità, e reintrodotta in esso in un'altro punto, tipicamente il fondo. Questa soluzione richiede la realizzazione di un'apposita rete di tubazioni che deve essere tale da garantire che tutto il substrato in trasformazione, venga opportunamente mescolato. Tra i vantaggi vanno sottolineate la mancanza di organi in movimento all'interno dell'ambiente di reazione ed una migliore efficacia di mescolamento rispetto a sistemi di tipo meccanico.

Per lo **stoccaggio** delle deiezioni animali devono essere utilizzati locali dedicati. Il tempo di stoccaggio del substrato deve essere il più breve possibile, perché il processo di digestione comincia già durante lo stoccaggio, andando così a diminuire la resa in biogas nel successivo utilizzo nel digestore. Lo stoccaggio di biogas dipende dai consumi del cogeneratore; in particolare, se il funzionamento è conservativo, il volume di stoccaggio sarà piccolo, viceversa i volumi saranno più grandi. Se lo stoccaggio avviene esternamente, i serbatoi possono essere distinti in base alla pressione di esercizio; si hanno così serbatoi di bassa, media e alta pressione. I serbatoi di bassa pressione funzionano a una pressione di poco superiore a quella atmosferica e comunemente sono costruiti con lamine flessibili. La pressione di funzionamento viene regolata attraverso una valvola a farfalla disposta lungo le tubazioni di mandata del gas verso il cogeneratore, oltre che dal peso della lamina flessibile. I serbatoi di media pressione funzionano con una pressione compresa tra i 5 e i 20 bar,

mentre quelli di alta pressione funzionano a una pressione che varia tra i 200 e i 300 bar. In tutti i casi viene utilizzato l'acciaio per la loro realizzazione. Nel corso degli anni sono state sviluppate diverse tipologie di impianto a digestione anaerobica. Attualmente, gli impianti possono anche essere classificati a seconda delle caratteristiche della digestione anaerobica che attuano.

Consideriamo infine i **sistemi di desolforazione**, i quali sono sistemi necessari ad abbattere i composti a base di zolfo. Questo può essere attuato tramite filtri chimici riempiti con ossidi di ferro che provocano la precipitazione dei composti e quindi, la loro estrazione; tramite torri di lavaggio che lavano il gas in controcorrente attraverso un flusso di acqua e ossido ferrico; oppure mediante desolforazione biologica, immettendo nel digestore una percentuale di aria equivalente a circa il 5–10% del gas, in modo da consentire a particolari ceppi batterici di innescare una reazione di precipitazione biologica dello zolfo.

### 3.1.3 Costi di impianto e di esercizio

In prima analisi, i costi per un impianto di digestione anaerobica sono pari alla somma dei costi dei vari elementi dell'impianto (digestore, serbatoi di stoccaggio). Gli organi dell'impianto che risultano avere un costo apprezzabile sul totale sono il sistema di riscaldamento del digestore, l'impianto di trattamento del biogas e il cogeneratore.

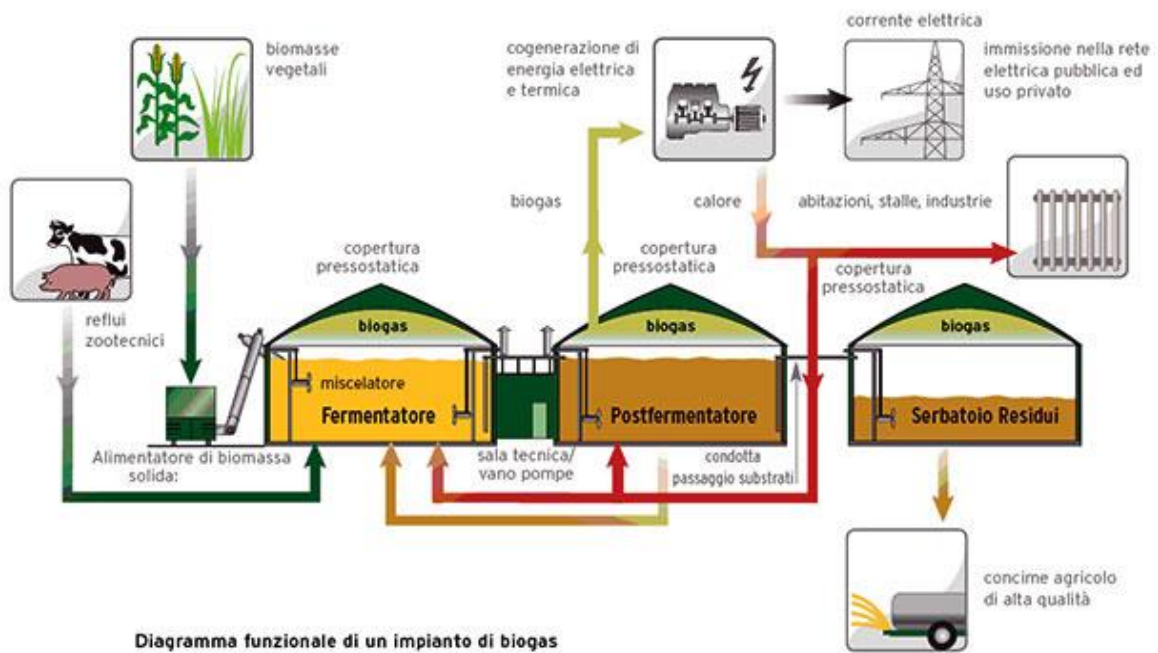
Bisogna inoltre valutare anche il costo di gestione delle varie parti dell'impianto (costi di esercizio):

–manutenzione delle opere edilizie;

–manutenzione del cogeneratore;

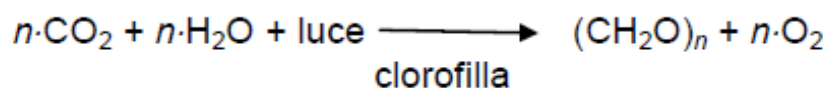
–manutenzione del digestore.

Nella valutazione economico-finanziaria di un impianto devono essere considerati, oltre agli investimenti, alle spese giornaliere e di manutenzione ed ai ricavi derivati dalla vendita dell'energia elettrica, anche gli eventuali ricavi derivanti dalla vendita del substrato digerito come fertilizzante, così come gli eventuali risparmi sui costi di smaltimento dei reflui zootecnici oppure dei residui utilizzati come co-substrato. In ogni caso il costo maggiore è da imputare all'unità di cogenerazione. Il costo dell'impianto, per kW, può variare da circa 3500 euro/kW per impianti di piccola taglia, fino a 2500 euro/kW per impianti di grande taglia.



### 3.2 La fermentazione

Le piante usano l'energia solare per combinare l'anidride carbonica con l'acqua per formare blocchi di zuccheri e ossigeno come mostrato nella equazione seguente:



I composti principali delle piante sono cellulosa (40–80%), emicellulosa (15–30%) e lignina (10–25%). La cellulosa è un polimero di glucosio cristallino, l'emicellulosa è un polimero amorfo complesso, mentre la lignina è un grande composto poliaromatico. Altri componenti che compongono la biomassa sono trigliceridi, alcaloidi, pigmenti, resine, steroli, terpeni (C<sub>10</sub>H<sub>16</sub>), cere. Alcune piante come colza e soia possono avere grandi contenuti di queste sostanze. I biocombustibili ottenuti attraverso il processo di fermentazione si differenziano in biocombustibili di prima e seconda generazione. La prima generazione di biocombustibili è ottenuta dalla fermentazione di grano, mais, frumento, barbabietola, canna da zucchero. La seconda generazione di biocombustibili è ottenuta dalla fermentazione della cellulosa delle

piante, tale tecnologia è ancora nella fase di sviluppo ed è molto promettente in termini di resa per ettaro di superficie coltivata. I biocombustibili di seconda generazione risultano preferibili oltre in termini di resa anche in termini di evitata sottrazione di alimenti alla popolazione mondiale. Per questa ragione cercheremo di approfondire i biocombustibili ottenuti da cellulosa. Nella fig. riportiamo la composizione della biomassa prima e dopo la reazione di idrolisi che permette di ottenere da cellulosa glucosio in forma acquosa. Successivamente tramite il processo di fermentazione si ottiene bioetanolo.

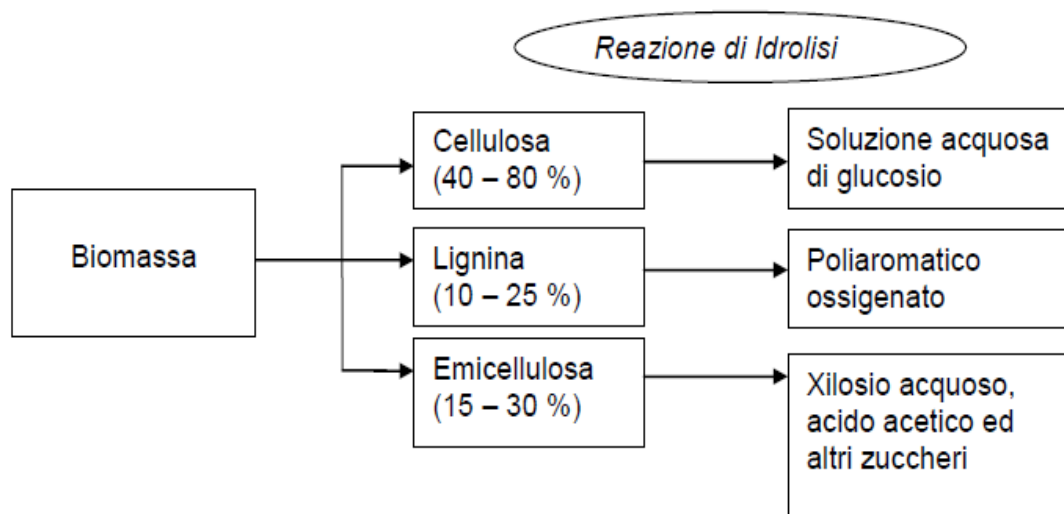
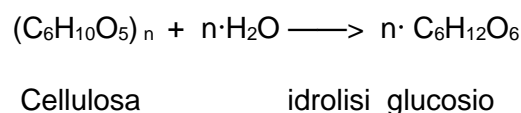


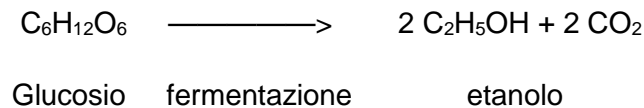
Fig. -Composizione della biomassa lignocellulosica.

La cellulosa è un polimero costituito di solo glucosio mentre l'emicellulosa è un polimero costituito da 5 atomi di carbonio (xiloso e arabinosio) e zuccheri a 6 atomi di carbonio (galattosio, glucosio e mannosio). La reazione di idrolisi per la conversione della cellulosa in polimeri di zucchero è rappresentata dalla relazione seguente:



Nel caso di idrolisi enzimatica il rendimento di conversione della cellulosa in glucosio può superare il 95%. La produzione di etanolo da fermentazione di carboidrati è la tecnologia principale per la produzione di combustibili liquidi da biomassa, quando l'ossigeno è

insufficiente per la normale respirazione cellulare prende posto la respirazione anaerobica da parte di lieviti che convertono il glucosio in etanolo e anidride carbonica. Gli zuccheri, pertanto, sono convertiti in etanolo ad opera di lieviti come il *Saccharomyces cerevisiae* e la relazione di conversione è rappresentata dalla seguente equazione chimica:



Tali lieviti fermentano glucosio, mannosio, fruttosio e galattosio. Come si può vedere dalla equazione metà della massa zuccherina viene convertita in anidride carbonica, ma comunque tutta l'energia contenuta nello zucchero viene immagazzinata nel bioetanolo.

### **3.3 Bioliquidi e biocarburanti**

Una categoria di biomassa che sfugge alle precedenti classificazioni è quella dei bioliquidi. Le principali tipologie sono il biodiesel, il bioetanolo e gli oli vegetali. Biodiesel e bioetanolo rappresentano la quasi totalità dello scenario che riguarda il settore dei trasporti e vengono classificati come biocarburanti. Per quanto riguarda la produzione di energia elettrica in motori stazionari, si utilizzano oli vegetali. Bioliquidi e biocarburanti presentano numerosissime caratteristiche comuni che giustificano la prassi di considerarli in comune; ma tuttavia, le differenze negli usi di questi due combustibili (i primi destinati ad applicazioni stazionarie e i secondi all'autotrazione), e le conseguenti differenti norme e prassi connesse al loro utilizzo, rendono necessaria la loro separazione.

#### 3.3.1 Generalità sugli oli vegetali

Nonostante i bioliquidi siano potenzialmente ricavabili da un'ampia varietà di materie prime, ad oggi la filiera a cui si fa in assoluto maggiormente ricorso in ambito energetico è indubbiamente quella basata sull'impiego degli oli vegetali, ed in particolare dell'olio di palma. Gli oli vegetali vengono utilizzati come combustibili in motori a combustione interna per la produzione di energia elettrica. Il loro utilizzo è legato alla facilità di reperimento sul mercato di questi materiali e alle loro particolari caratteristiche, che li rendono adatti per questo scopo. Si riscontrano però differenti proprietà chimico-fisiche rispetto ai comuni combustibili fossili, il che comporta la necessità di adattare il motore e i sistemi di stoccaggio.

Un "olio vegetale" è una sostanza grassa in fase liquida a temperatura ambiente. In realtà con il termine olio vegetale si possono indicare anche oli vegetali che a questa temperatura si presentano allo stato solido: ne è un esempio l'olio di palma. L'olio vegetale è ottenuto dalla spremitura di semi e piante oleaginose, mediante processi di estrazione sia meccanici che chimici.

Le materie prime utilizzate per la produzione di oli per generazione di energia sono :

- semi oleaginosi: colza, girasole, lino ecc.;
- frutti oleaginosi: arachide, palma, ecc.;
- grassi e oli di origine animale;
- oli esausti: olio fritto ecc.

La materia prima subisce una prima fase di spremitura per poi essere inviata all'estrazione con solvente, dove si separa la quasi totalità dell'olio ivi contenuta. Si ottengono come sottoprodotto farine proteiche destinate all'alimentazione animale. A seconda del processo e della destinazione dell'olio estratto, si eseguono i seguenti processi: neutralizzazione (elimina gli acidi liberi), decolorazione, deodorazione, degommaggio e filtrazione. Si esegue un trattamento molto simile a quello appena descritto per gli oli vegetali, anche sui grassi animali che vengono ottenuti da scarti di processo. Una materia prima interessante da utilizzare è l'olio esausto di recupero (come l'olio vegetale per frittura), il quale prima di poter essere utilizzato, deve subire dei processi di pulizia e raffinazione chimica. La classificazione degli oli e dei grassi è una materia complessa da trattare e risulta soggetta a continui aggiornamenti normativi.

### 3.3.2 Caratteristiche chimico-fisiche degli oli vegetali

Analizzando gli oli vegetali dal punto di vista chimico, essi risultano essere una miscela di acidi grassi liberi, trigliceridi, glicerolo, composti fosforici e cere. La presenza di acidi contenenti legami doppi i quali causano problematiche all'interno dei motori (formazione di depositi in numerose parti interne), è fortemente influenzata dalle condizioni ambientali in cui si trova a crescere la pianta. Il numero di iodio, definito come la quantità di iodio molecolare necessario a saturare i doppi legami presenti nell'olio considerato, rappresenta il parametro che misura la quantità di insaturazioni presenti in un dato olio, e risulta caratterizzato da un limite superiore definito dalle specifiche del produttore.

Una prima differenza fra oli vegetali e gasolio è la densità, che risulta superiore di circa il 12% negli oli vegetali rispetto al gasolio.

Altra importante differenza è la viscosità cinematica; un elevato valore di questa, comporta problemi per gli organi di pompaggio, che risultano soggetti a maggiori stress meccanici, e peggiora la qualità dell'atomizzazione del combustibile, con ripercussioni sulla qualità del processo di combustione. La viscosità degli oli vegetali si riduce al crescere della temperatura. Il riscaldamento del combustibile è uno dei primi interventi realizzati in questi impianti. Il potere calorifico degli oli vegetali varia in funzione della materia prima. Il numero di cetano è un parametro che viene utilizzato come indicatore del comportamento dei combustibili in fase di accensione, e risulta influenzato dal numero di doppi legami e dalla loro posizione all'interno della molecola; per la maggior parte degli oli vegetali utilizzati nei motori, il valore di tale parametro si aggira intorno a 40, accettabile per quasi tutti i motori, anche se inferiore (10–20%) rispetto a quello del gasolio.

Alle basse temperature gli oli, utilizzati come combustibili, tendono a formare cere e depositi, ed in particolare l'olio di palma risulta solido per temperature inferiori di 40 °C. Infine un'altro importante parametro che definisce la qualità dell'olio come combustibile è il fosforo, che risulta associato alla formazione di depositi e all'avvelenamento delle marmitte catalitiche.

### 3.3.3 Tecnologie di conversione: sistemi di generazione di grande e piccola taglia

Nei sistemi di generazione di grande taglia, la principale tecnologia per la produzione di energia elettrica e di calore con oli vegetali è il motore a combustione interna. Molti dei produttori di motori alimentati con combustibili tradizionali hanno recentemente ampliato la loro gamma modificando generatori a gasolio per le specifiche caratteristiche degli oli vegetali.

I motori oggi commercialmente disponibili coprono un intervallo di potenza assai ampio, da generatori e cogeneratori di poche decine di kW a decine di MW. Per tale ragione vengono adottate diverse soluzioni tecnologiche. Si passa da motori con velocità di rotazione medie con regimi di 1500 g/m, a motori lenti con regimi di 500 g/m. Le velocità di rotazioni più basse si hanno nei motori policilindrici. Per quanto riguarda le prestazioni in termini di rendimento, ma soprattutto di minori consumi specifici, e la ridotta manutenzione si verificano per bassi regimi di rotazione. Si può quindi affermare che per le grandi macchine al crescere della potenza, si tende a ridurre la velocità di rotazione e quindi la velocità media del pistone, con conseguente capacità di utilizzare combustibili grezzi e di qualità inferiore. L'elevata viscosità dell'olio vegetale rappresenta però un problema da non sottovalutare, poiché causa una combustione incompleta (dovuta all'incapacità degli iniettori di atomizzare l'olio grezzo), che determina la formazione di depositi di carbone nella camera di combustione. Risulta opportuno andare quindi a ridurla attraverso un riscaldamento fra gli 80–100 °C in modo da



favorire le prestazioni del motore e limitare le emissioni. Un'altra soluzione per andare a ridurre la viscosità è quella di realizzare miscele di olio e gasolio. Nel caso di percentuali di olio comprese fra il 10 e il 15% possono essere utilizzate anche in motori non modificati con effetti sulle prestazioni, le emissioni e la durata del motore. Nel caso di percentuali maggiori di olio è necessario eseguire alcune modifiche meccaniche e tecniche:

- utilizzare l'iniezione indiretta e iniettori autopulenti;
- prevedere un sistema di preriscaldamento (con tubazione e filtri riscaldati elettricamente o ad acqua) del combustibile per non ostruire i filtri (60–70 °C);
- favorire l'accensione del motore con gasolio in ambienti freddi, e una volta raggiunta temperatura, alimentare ad olio;
- aumentare il flusso di carburante per mantenere potenza e coppia simili a quelle dell'alimentazione a gasolio;
- utilizzare olio lubrificante con alto potere detergente;
- evitare frequenti accensioni e spegnimenti che potrebbero causare problemi.

I motori di piccola taglia (definiti tali se la potenza elettrica è dell'ordine di grandezza del MW), non differiscono da quelli di grande taglia per quanto riguarda la necessità di modifiche ed aggiustamenti tecnici dell'impianto. Al diminuire della taglia dell'impianto, risulta preferibile alla sola produzione elettrica la cogenerazione. Vi è possibilità di recuperare calore oltre che dai fumi, anche dai circuiti di raffreddamento di olio lubrificante e acqua. Tali sistemi risultano più versatili rispetto alla domanda di calore. Nel caso poi di potenze estremamente piccole (decine di kW), per la valorizzazione energetica degli oli vegetali in cogenerazione risultano interessanti anche le microturbine a combustione esterna. A fronte di efficienze elettriche inferiori rispetto a quelle dei tradizionali motori a combustione interna offrono alcuni vantaggi, quali: ridotti costi di manutenzione e disponibilità di calore a temperature elevate (700 °C).

#### 3.3.4 I biocarburanti

Il biocarburante è un prodotto derivato dalle biomasse che consente di produrre energia pulita a partire dagli scarti di alcuni alimenti derivati dalla lavorazione di piante, semi, scarti agricoli o, addirittura, da coltivazioni ad hoc. In particolare definiamo i due principali tipi di biocarburante: il **biodiesel**, ricavato da un olio vegetale e il **bioetanolo**, ottenuto dalla fermentazione di alcuni prodotti agricoli ricchi di zuccheri. L'energia che se ne ricava viene

utilizzata come carburante per diversi mezzi di trasporto, in sostituzione di benzina e diesel e consente di ridurre notevolmente l'emissione di sostanze nocive nell'ambiente.

Mentre l'olio vegetale si ricava dalla spremitura e dalla filtrazione di semi di piante oleaginose, il biodiesel rappresenta il risultato di un'ulteriore processo di lavorazione dell'olio vegetale stesso. Biodiesel e olio vegetale, quindi, condividono le medesime biomasse di partenza, ma non il medesimo processo produttivo. Il biodiesel deriva infatti dalla transesterificazione degli oli vegetali. Tale processo permette di spezzare le lunghe molecole, e quindi viscosi, dei trigliceridi, trasformandole in esteri degli acidi grassi, che sono molecole a catena corta e quindi meno viscosi di quelle dei trigliceridi.

Ne deriva un combustibile con caratteristiche chimico-fisiche simili al diesel, che può essere utilizzato come combustibile nei motori ad accensione spontanea. Il biodiesel può quindi sostituire totalmente o parzialmente (in miscela) il gasolio. Il biodiesel rispetto al gasolio risulta caratterizzato da: un minore potere calorifico con conseguenti consumi specifici leggermente superiori, riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>, elevato contenuto di ossigeno che ne migliora la combustione, maggiore viscosità, punto di infiammabilità più alto (120 °C rispetto a 70 °C), e quindi maggiore sicurezza nel trasporto e nello stoccaggio.

La produzione di biodiesel può avvenire a partire sia da oli vegetali grezzi (come l'olio di colza, di girasole, di soia, di palma, ecc.) sia da grassi animali, alghe e oli alimentari usati. La filiera di produzione del biodiesel prevede le fasi di coltivazione, raccolta e trasporto dei semi, estrazione e raffinazione degli oli e dei grassi ed infine transesterificazione dell'olio vegetale. Gli oli grezzi estratti contengono generalmente delle impurezze come acidi grassi liberi, fosfolipidi, steroli e acqua; anche dopo la fase di raffinazione, tutti gli oli e i grassi contengono ancora piccole quantità di acidi grassi liberi e acqua.

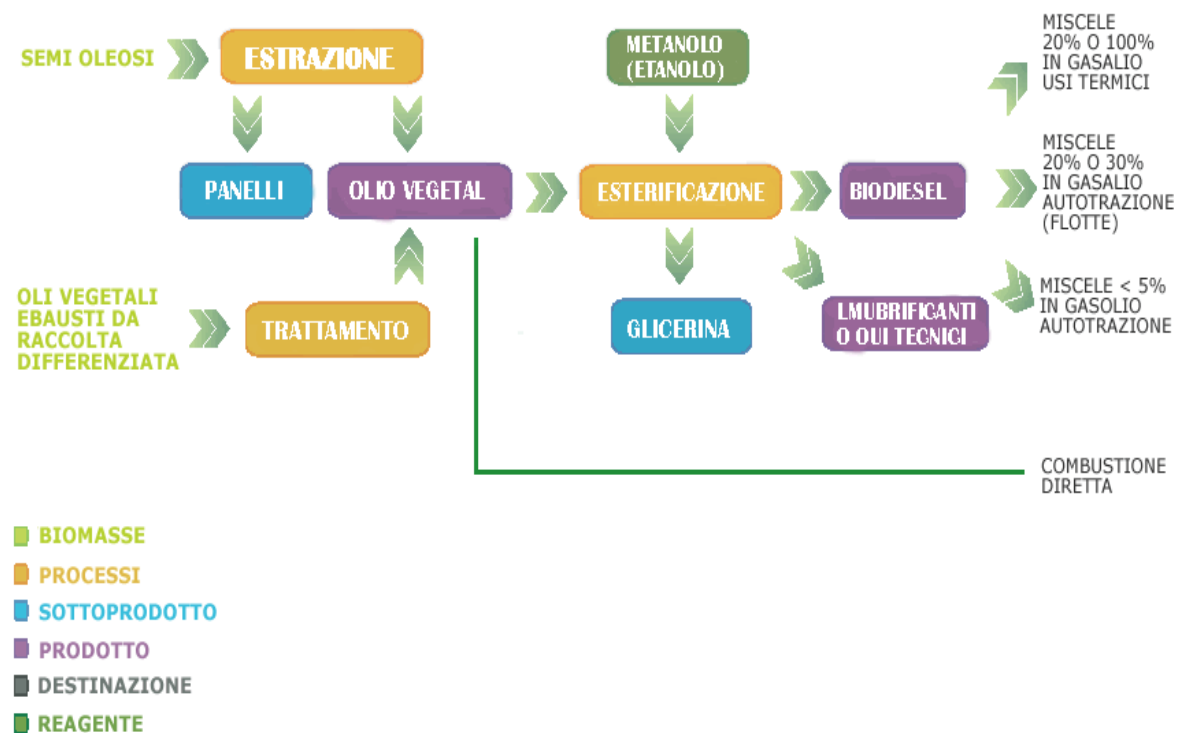
Il processo di estrazione è generalmente meccanico e consiste nella semplice spremitura dei frutti e pressatura dei semi.; dopo la spremitura gli oli vengono filtrati. L'estrazione può essere fatta anche attraverso solventi, come l'esano, che poi viene recuperato separandolo dall'olio grezzo, facendolo evaporare. I residui di queste prime lavorazioni sono costituiti dal apello proteico (nel caso di sola spremitura meccanica) o dalle farine (nel caso di estrazione con solventi), che complessivamente costituiscono il 60-70% della massa iniziale di semi. Tali residui trovano impiego in ambito zootecnico e costituiscono pertanto un sottoprodotto al quale può essere attribuito un credito energetico (e un valore economico). Gli oli vegetali grezzi devono essere raffinati per rimuovere le sostanze indesiderate (proteine, acidi grassi liberi e fosfati, glicerolo, carboidrati, resine e metalli); tali sostanze possono essere eliminate attraverso una raffinazione di tipo corrosivo. Il tipico processo di raffinazione include la degommazione, la raffinazione fisica o chimica, lo sbiancamento e la

deodorazione. Quest'ultima operazione è molto importante e consiste nell'introdurre vapore a pressione compresa tra 1 e 6 mmHg nell'olio che si trova a temperatura di 550K per eliminare acidi grassi liberi,aldeidi, idrocarburi insaturi e chetoni, che sono la causa di odori sgradevoli nell'olio.

Il degommaggio serve per eliminare dall'olio i fosfolipidi, così come i metalli pesanti, mentre lo sbiancamento consente la rimozione di pigmenti e matalli. L'olio grezzo degommato è soggetto ad un ulteriore processo di raffinazione (attuato attraverso l'aggiunta di soda caustica). A questo punto il sapone e le impurità vengono separate dall'olio attraverso la centrifugazione.

Alla fine di questa fase si ottiene, come prodotto principale, l'olio vegetale che in teoria potrebbe già essere utilizzato nei motori diesel; per andare a ridurre l'elevata viscosità si sottopone l'olio ad un processo di transesterificazione. Per accelerare il processo si può operare in due modi :

1. aggiunta di metanolo/etanolo in eccesso;
2. eliminazione della glicerina formata.



Filiera del biodiesel

Il bioetanolo è un alcool ottenuto mediante un processo di fermentazione di diversi prodotti agricoli ricchi di carboidrati e zuccheri, quali cereali (mais, sorgo, frumento, orzo), le colture zuccherine (bietola e canna da zucchero), frutta, patate e vinacce.

La fermentazione alcolica è il processo di trasformazione biochimica per mezzo del quale gli zuccheri sono trasformati in alcool etilico. La produzione di etanolo a partire da biomasse ad alto contenuto di zuccheri è ampiamente collaudata e permette di ottenere etanolo ad un costo competitivo con quello della benzina.

Il bioetanolo è un combustibile liquido ossigenato, incolore e non tossico, dotato di parametri chimico-fisici simili a quelli della benzina; viene quindi utilizzato come combustibile nel settore dei trasporti in sostituzione alla benzina e può essere miscelato in diverse percentuali, oppure può essere utilizzato dalla raffinerie per la produzione di ETBE, un additivo impiegabile per la produzione delle benzine riformulate. L'effetto principale che ne deriva, è una riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>.

Le principali fasi del processo di produzione del bioetanolo sono:

1. **Macinazione** : tramite un mulino la biomassa viene ridotta in polvere fine denominata pasta;
2. **Liquefazione** : la pasta, mescolata con acqua, viene riscaldata in modo che l'amido venga liquefatto. La liquefazione avviene in due fasi: una a temperatura elevata (120–150°C) che mira a ridurre i livelli di batteri nella miscela acquosa, e una a temperatura più bassa (circa 95°C).
3. **Saccarificazione** : la miscela acquosa che esce dai fornelli di cottura è raffreddata e addizionata con glucoamilasi per convertire l'amido liquefatto in zuccheri fermentabili;
4. **Fermentazione** : l'aggiunta di lievito alla pasta ottenuta con le operazioni precedenti fa fermentare gli zuccheri, che si trasformano così in etanolo e CO<sub>2</sub>.
5. **Disidratazione** : l'alcool estratto viene inviato a un sistema di disidratazione che ne rimuove l'acqua residua, ottenendo così etanolo anidro;
6. **Denaturazione** : a questo punto, prima di poter essere utilizzato come combustibile, l'etanolo viene addizionato con benzina, in percentuali che variano tra il 2 e il 5%. Dal processo di produzione del bioetanolo si ottengono due principali sottoprodotti: il residuo della distillazione e la CO<sub>2</sub>. Il residuo dei distillatori, usato bagnato o asciutto, è un alimento altamente nutriente per il bestiame.

## IL PROCESSO INDUSTRIALE DI PRODUZIONE DELL'ETANOLO





## CAPITOLO 4

### Un recente impianto biogas realizzato a Carbonera (Treviso)

Si riporta una breve descrizione di un recente **impianto per la produzione di energia da co-fermentazione anaerobica di biomasse di origine vegetale e zootecnica**, realizzato in Comune di Carbonera (TV) località Mignagola in via Valdemoneghe, di proprietà di **“SOCIETA’ AGRICOLA BIOPOWER S.C.A.R.L.”**

La produzione di energia elettrica dell’impianto è pari a 0,295 MW.

Il biogas prodotto dalla co-fermentazione anaerobica delle biomasse è utilizzato all’interno dello stesso impianto per alimentare un cogeneratore atto alla produzione di energia elettrica e termica.

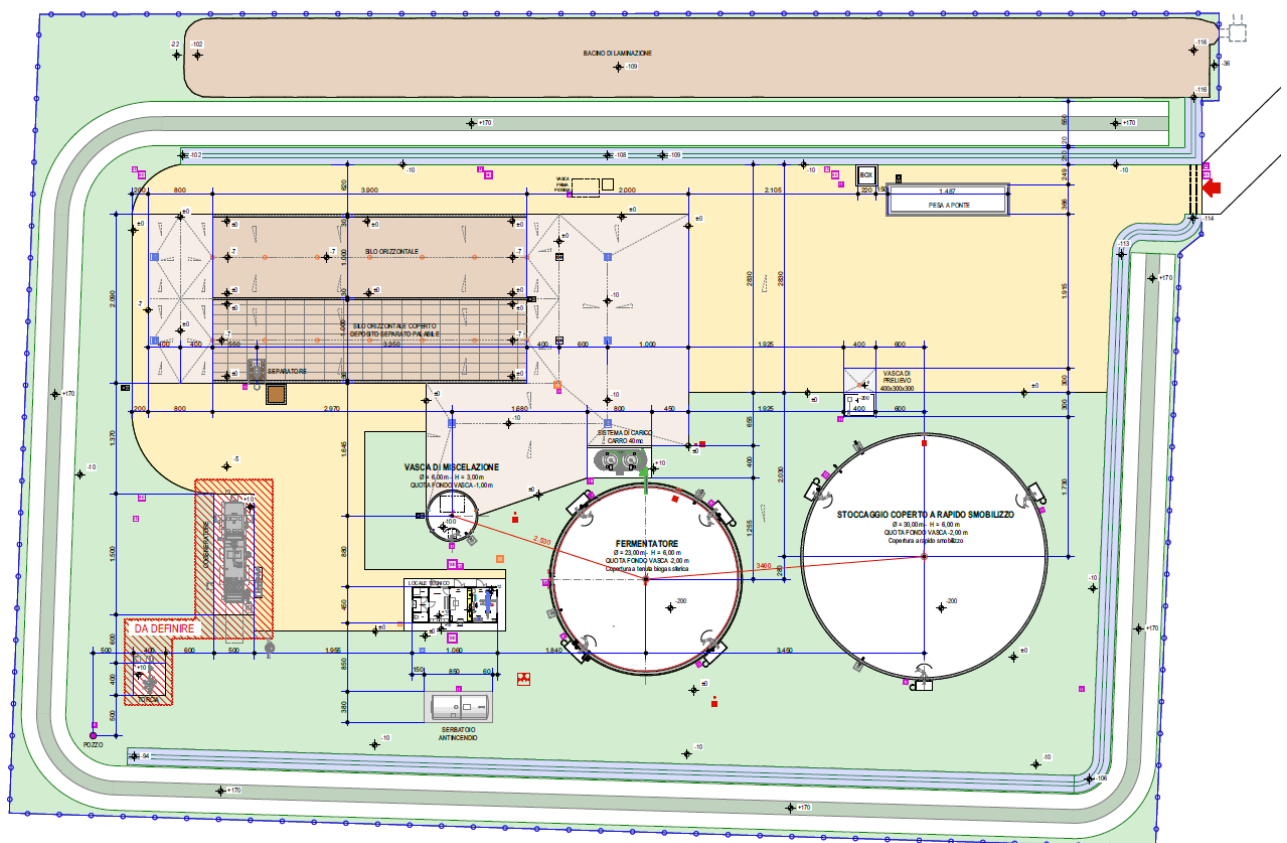
L’energia elettrica prodotta (al netto degli autoconsumi degli ausiliari) viene immessa in media tensione nella rete Enel di distribuzione nazionale.

L’energia termica è utilizzata per il mantenimento del regime mesofilo all’interno delle vasche di fermentazione.



## 4.1 Descrizione dell'impianto

Le biomasse utilizzate, di origine aziendale (mais ceroso, liquame bovino, letame bovino) ed extraaziendale (letame bovino), sono conferite all'impianto e adeguatamente stoccate. Dagli stoccaggi, attraverso un sistema di caricamento, le biomasse vengono inviate al fermentatore dove avviene il processo di digestione anaerobica. Il digestato in uscita dal fermentatore è inviato ad un separatore solido/liquido. Il separato liquido (chiarificato) è inviato ad una vasca di stoccaggio coperta con il fine di stabilizzare il digestato esausto prima dello spargimento agronomico sui terreni coltivati. Il separato palabile è stoccato in opportuno deposito coperto. Il biogas ottenuto, dopo un opportuno trattamento, è convogliato al motore cogenerativo.





## 4.2 Principali strutture che compongono l'impianto

In estrema sintesi l'impianto è composto da:

- Strutture per lo stoccaggio e la conservazione dell'insilato: un silos a trincea;
- una prevasca, che funziona da stoccaggio del liquame bovino e da vasca di miscelazione nel caso di guasto al sistema di carico;
- Strutture per la fermentazione primaria: un digestore, dotato di sistema di carico;
- Strutture per lo stoccaggio del digestato: una vasca di stoccaggio coperta a rapido smobilizzo, un deposito separato palabile coperto, con annesso separatore solido/liquido;
- Strutture tecniche: sala pompe, sala quadri, locale spogliatoio con annessi servizi;
- un cogeneratore ed impianto trattamento biogas,
- una cabina elettrica di consegna dell'energia in MT;
- Impianti annessi: platee di pavimentazione, pozzetto raccolta condensa, gruppo pompe antincendio, riserva antincendio, torcia, recinzione, manufatti e condotte per la raccolta delle acque meteoriche e rete di distribuzione dell'energia termica.

### 4.2.1 Dettagli costruttivi

#### **Digestore:**

Dimensioni:

Numero : 1

Diametro : 23,0 m

Altezza vasche : 6,0 m

Altezza di riempimento : 5,2 m

Volume : 2160 m<sup>3</sup>

Regime di funzionamento : mesofilo



Il digestore è stato realizzato mediante una vasca circolare riscaldata in cemento armato vibrato, all'interno della quale ha luogo il processo di digestione anaerobica con conseguente formazione del biogas.

Le principali caratteristiche del manufatto sono:

1. Fondazioni del tipo a Platea, pareti circolari di elevazione realizzate in cemento armato vibrato classe di esposizione XA2;
2. Isolamento della platea e della parete con pannelli in polistirene espanso estruso dello spessore di 100 mm;
3. Riscaldamento interno a parete, composto da 4 anelli di tubo di acciaio inox, collegati all'inizio e alla fine ad un collettore di distribuzione;
4. Cupola gasometrica a doppia membrana con intercapedine d'aria; la membrana interna è composta in PE impermeabile al gas con funzione di accumulatore pressostatico del biogas e una membrana esterna in PVC resistente alle intemperie per la protezione dell'accumulatore pressostatico dagli agenti atmosferici.

Una soffiante centrifuga (montata sulla parete del digestore) la quale fornisce il sostegno pneumatico mantenendo una pressione di esercizio costante tra le due membrane (in un intervallo compreso tra 0 e 5 mbar);

5. Rivestimento della muratura interna del digestore, nella parte esposta al biogas, con foglio protettivo con membrana in polipropilene.

#### **Dispositivo di miscelazione:**

Il digestore è dotato di quattro miscelatori ad immersione, posti a 90 ° tra l'uno e l'altro, opportunamente dimensionati al fine di garantire una continua omogeneizzazione del substrato e l'eliminazione della biomassa flottante. Ogni agitatore è montato su di una profilato guida ed è dotato di una staffa a tenuta di biogas per la regolazione dell'altezza di lavoro e della direzione del getto.



### **Caricamento della biomassa palabile:**

Il mais ceroso e il letame vengono prelevati e portati al modulo di carico per mezzo di pala gommata.

La capacità del carro miscelatore sarà di circa 40 mc, e considerando il fabbisogno giornaliero di biomassa solida pari a circa 31,5 ton/gg, si considera un'autonomia di alimentazione pari a 1 giorno.

Il modulo di carico è dotato di sistema di controllo a perdita di peso in continuo e pertanto garantisce una corretta dosatura giornaliera del materiale palabile, il quale viene accoppiato ad un sistema di coclee orizzontali e verticali.



### **Caricamento del liquame suino:**

Il liquame bovino giunge all'impianto per mezzo di carri-botte e viene caricato direttamente alla prevasca. Dalla stessa, per mezzo di pompa dedicata viene convogliato al digestore.



### **Separatore:**

Il digestato, dopo un opportuno tempo di ritenzione, viene inviato dal digestore ad un separatore installato sul muro della concimaia coperta. Qui avviene la separazione solido-liquidi. La parte liquida (chiarificato) va per caduta in una vasca di raccolta posta sotto il separatore esterna alla concimaia e da qui viene pompata all'interno della vasca di stoccaggio. Il separato solido invece cade all'interno della concimaia dove viene stoccato.



### **Concimaia aperta:**

La concimaia ha le dimensioni di 10 metri di larghezza per 39 di profondità ed è stata coperta mediante struttura in acciaio e telo di copertura in PVC.



### **Vasca di stoccaggio:**

Dimensioni:

Numero : 1

Diametro : 30,0 m

Altezza vasca : 6,0 m

Altezza di riempimento : 5,8 m

Volume : 4100 m<sup>3</sup>

Le caratteristiche costruttive e l'allestimento di questa vasca sono analoghe a quelle del digestore ad eccezione dell'assenza di coibentazione, del sistema di riscaldamento e della presenza di tre miscelatori.

All'interno della vasca circolare di stoccaggio, con telo di copertura a rapido smobilizzo non c'è alcuna produzione di biogas, in quanto il digestato liquido introdotto è privo di sostanza organica e di conseguenza non ha alcuna capacità metanigena.



### **Modalità di prelievo del separato liquido dalla vasca di stoccaggio**

Qui di seguito si descrive brevemente la modalità di prelievo del separato liquido dalla vasca di stoccaggio.

Il digestato, una volta raccolto all'interno della vasca di stoccaggio, viene prelevato tramite carro botte, il quale andrà a pescare da una apposita vasca realizzata in cemento armato dove confluirà il digestato per gravità. La vasca infatti è stata realizzata con un interramento leggermente più basso dello stoccaggio per permettere il corretto flusso del digestato; per il

controllo del flusso del digestato è stata installata una valvola a galleggiante. Per una maggiore sicurezza a bordo stoccaggio è installata anche una valvola a ghigliottina manuale.

Tutti i possibili spandimenti accidentali che si possono avere in fase di carico vengono raccolti in un pozzetto posizionato nella platea in cls realizzata antistante alla vasca di carico e mediante una serie di tubazioni convogliati all'interno del fermentatore.



### **Locale tecnico**

L'edificio è suddiviso in un locale pompe, un locale quadri elettrici e controllo, un locale spogliatoio con annessi servizi igienici;



### **Locale Pompe**

All'interno di questo locale sono montati i dispositivi di movimentazione del digestato e i compressori per l'aria di comando delle valvole pneumatiche.

Il gruppo pompe è costituito da una stazione centralizzata equipaggiata con pompa a vite e saracinesche automatiche.

### ***Sala quadri elettrici***

All'interno di questo locale sono montati tutti i quadri di bassa tensione e il sistema di controllo e gestione dell'intero ciclo di produzione del biogas.



### **Trincea insilati**

Il mais ceroso necessario ad alimentare il processo di digestione anaerobica viene stoccato in una trincea avente larghezza pari a 10 ml e lunghezza pari a 39 ml, per un'area complessiva pari a 390 mq.

Il riempimento dei silos avviene tramite dei mezzi agricoli, nello specifico con l'ausilio della pala gommata, che mentre procede al riempimento della trincea, per un'altezza media di circa 4 metri, provvede al suo costipamento, questo per una massima riduzione del volume e per la sua conservazione.

Lo stoccaggio una volta riempito viene coperto tramite un telone in PVC, minimizzando la dispersione e gli eventuali impatti odorigeni. Il percolato prodotto nel silos orizzontale è captato e convogliato, tramite condotte dedicate, all'interno del fermentatore.



### **Area trattamento biogas:**

Prima di essere inviato ad alimentare il motore, il biogas in uscita dai digestori necessita di un trattamento di purificazione e deumidificazione. All'interno dell'area di trattamento biogas il gas viene sottoposto ai seguenti trattamenti:

1. **Filtraggio** con filtro a cartuccia per l'eliminazione delle particelle solide;
2. **Deumidificazione** tramite scambiatore a fascio tubiero fisso per raffreddarlo ad una temperatura di circa 3-4 °C. Nel fascio tubiero circola il biogas, mentre nel mantello circola una miscela di acqua e glicole (come presidio antigelo), mantenuta a bassa temperatura da un chiller. La condensa che si attraversa il processo di deumidificazione fuoriesce dallo scambiatore e viene convogliata in uno scarico;
3. **Compressione** in soffiante centrifuga multistadio e pompaggio del gas alla rampa di alimentazione del motore.



Il filtraggio e la deumidificazione del biogas migliorano il rendimento di combustione e allungano gli intervalli tra le manutenzioni del motore.



### **Cogeneratore:**

Il modulo di cogenerazione è allestito in container insonorizzato in lamiera d'acciaio. La copertura e le pareti sono realizzate con pannelli componibili in lamiera verniciata. L'interno del container è completamente coibentato con materiale fonoassorbente in classe 1" di reazione al fuoco senza materiali che in presenza di fuoco emettono gas tossici.

All'interno del container vi è un motore a combustione interna a ciclo otto turbocompresso alimentato a biogas, accoppiato con alternatore sincrono su base antivibrante, completo di:

- quadro elettrico di gestione;
- sistema di regolazione automatica della combustione interna per il controllo delle emissioni.

Appena davanti al motore è stato posizionato il collettore per la distribuzione dell'energia termica il quale è stato cofanato con struttura in alluminio



## Trasformazione

Il trasformatore con i relativi quadri di media e bassa tensioni è alloggiato in un locale prefabbricato posizionato al fianco del motore



## Torcia

In caso di emergenza il biogas prodotto non utilizzabile nel processo di produzione di energia viene bruciato in una torcia con le seguenti caratteristiche:

- Portata biogas : 250 Nm<sup>3</sup>/h;
- Carpenteria interamente in acciaio INOX AISI 304 laminato caldo, bruciatore multi lance in AISI 310.

La torcia adotta i seguenti sistemi di sicurezza:

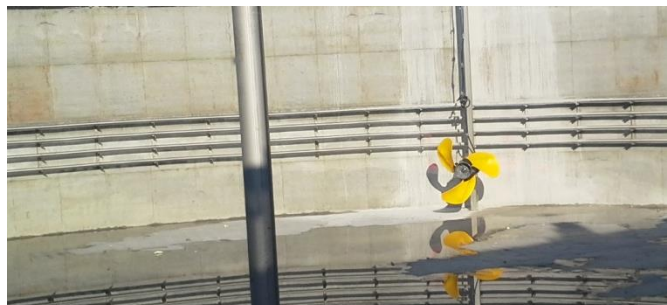
- Filtro arrestatore;
- Valvola di blocco gas principale;
- Sistema di rilevamento fiamma;
- Sistema di blocco per mancata accensione.



## Recupero del calore

### CIRCUITO RAFFREDDAMENTO ACQUA MOTORE

Il circuito di raffreddamento acqua motore è un circuito CHIUSO che raccoglie la potenza termica dell'olio motore e dell'acqua di raffreddamento utilizzando come fluido vettore una soluzione di acqua e glicole. La potenza termica recuperata alimenta il circuito primario di uno scambiatore a piastre al servizio di una rete di teleriscaldamento ovvero (quella in eccesso) viene dissipata attraverso uno scambiatore aria-acqua.



Il circuito di raffreddamento acqua motore è un circuito chiuso che, in esercizio, non richiede alcuna presa di adduzione acqua.

## **Cabina di consegna dell'energia**

La cabina elettrica è una struttura monolitica autoportante con fondazione "a vasca" omologata ENEL.

La realizzazione, la posa e l'allestimento rispettano leggi, D.M., norme CEI e disposizioni ENEL attualmente in vigore.

La cabina è compartimentata in 3 vani (locale ENEL/ MISURE/ UTENTE) come da specifica tecnica.



## Conclusioni

Attraverso questa analisi si vuole dimostrare che l'energia derivante dalle biomasse può essere una valida alternativa per la produzione di energia elettrica, rispetto alla produzione tramite combustibili fossili. Poiché il termine biomassa comprende una grande varietà di materiali, di conseguenza, i suoi utilizzi a fini energetici risultano essere molteplici: si possono cioè ottenere diversi vettori energetici impiegabili per diversi scopi.

Per fare in modo che questa tecnologia risulti conveniente anche dal punto di vista economico, oltre che da quello ambientale, risulta necessario porre particolare attenzioni alle fasi di coltivazione, raccolta e al loro trasporto fino agli stabilimenti delle biomasse.

Utilizzare le biomasse si riducono le emissioni di anidride carbonica, elemento molto importante e da non sottovalutare, in quanto con l'attuale valore di emissione di CO<sub>2</sub> e di altri gas serra, a lungo andare, si procurerebbero danni irreversibili al clima del pianeta.

A differenza degli altri impianti alimentati con fonti rinnovabili come gli altri impianti eolici, solari e idroelettrici, gli impianti alimentati a biomasse non soffrono di problemi di aleatorietà e questo risulta essere un importante aspetto da valutare. Infine, un ulteriore vantaggio legato all'impiego di biomasse è dato dalle coltivazione delle biomasse, che possono portare a considerevoli vantaggi sociali e stimolare l'occupazione delle zone rurali economicamente più deboli.



## **BIBLIOGRAFIA**

- Rubini Luca, Sangiorgio Silvia, 2012, “Le energie rinnovabili. Le nuove tecniche di produzione elettrica e termica. Eolico e idroelettrico-solare fotovoltaico e termodinamico-solare termico, geotermia, biomasse-nuovo conto energia, certificati verdi”, HOELPI
- Daniele Cocco, Chiara Palomba, Pierpaolo Puddu, 2008, “Tecnologie delle Energie Rinnovabili” SGE Editoriali, Padova
- Articolo redazionale IES BIOGAS Srl Pordenone

## **SITOGRAFIA**

-[www.eni.it](http://www.eni.it)

-[www.wikipedia.it](http://www.wikipedia.it)

-[www.enel.it](http://www.enel.it)

-[www.iesbiogas.it](http://www.iesbiogas.it)