

Energie rinnovabili

Tecnologia e impiantistica per l'utilizzo delle colture



**Corso di laurea magistrale in Scienze e tecnologie agrarie
a.a. 2012-13 – 3 CFU**

dott. Daniele Dell'Antonia



Impianti di combustione e cogenerazione

Generatori di calore

- **Settore domestico civile**
 - ❖ riscaldamento degli ambienti
 - ❖ produzione di acqua calda sanitaria
- **Utenza termica a bassa temperatura**
 - ❖ serra
 - ❖ piscina
 - ❖ caseificio

Generatori di calore

- **Tipologie di generatori di calore che si differenziano in funzione della forma commerciale assunta dalla biomassa lignocellulosica:**
 - ❖ caldaie per la combustione di legna in ciocchi
 - ❖ caldaie a cippato
 - ❖ caldaie a pellet

Generatori di calore

- In tutte le caldaie il recupero del calore avviene in maniera indiretta per mezzo di un fluido vettore (ad esempio acqua)
- Le caldaie vengono generalmente dimensionati per la copertura del “base load” in quanto un loro funzionamento intermittente ne riduce sensibilmente l’efficienza e aumenta le emissioni nocive

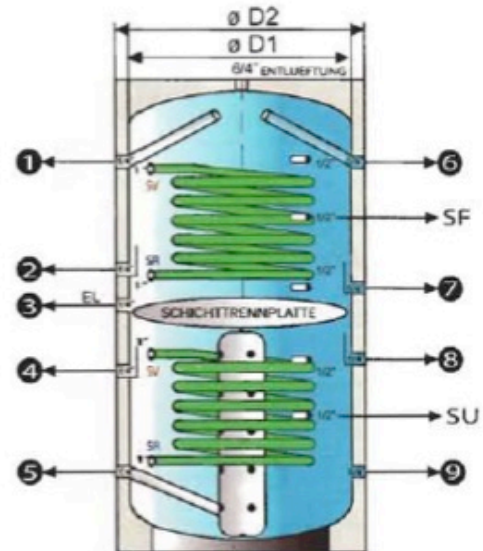
Caldaia e accumulatore termico

- Utilizzo di accumulatori termici (serbatoi d’acqua che fungono da volano) che permettono alla caldaia di funzionare in maniera continua e regolare, indipendentemente dalle esigenze dell’utenza
- Ripartire la potenza con caldaie a combustibile fossile per i picchi di richiesta energetica



Caldaia e accumulatore termico

- 1- Caldaia mandata
- 2 - Mandata per terza fonte di calore
- 3 - Riscaldamento elettrico
- 4 - Ritorno caldaia
- 5 - Circuito riscaldamento ritorno
- 6 - Caldaia olio
- 7 - Circuito riscaldamento mandata
- 8 - Caldaia
- 9 - Ritorno per terza fonte



Stufe a legna

- Utilizza legna in ciocchi come biomassa
- Ampiamente utilizzata nel passato
- Integrazione del riscaldamento nei locali durante l'inverno
- Aspetto negativo l'elevata produzione di CO
 - ❖ Raffreddamento camera di combustione per il carico di combustibile
 - ❖ Pezzature elevata che non consente una buona miscelazione tra combustibile e comburente
- Possibilità della post-combustione con aria secondaria
 - ❖ diminuiscono le emissioni di CO
 - ❖ aumenta l'efficienza dell'impianto

Stufe a legna



Fonte: Dell'Antonia 2007

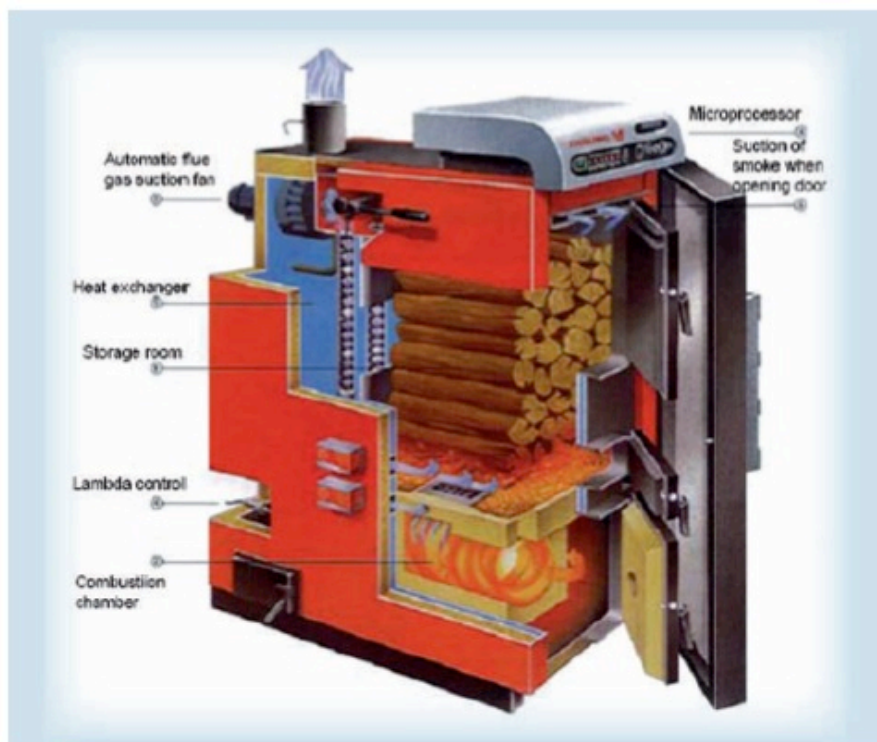
Caldaie a ciocchi di legna

- **Legna da ardere o tronchetti**
 - ❖ tutte le essenze legnose
 - ❖ dimensioni da 50 a 500 mm
 - ❖ umidità inferiore al 20-25%
- **Potenze limitate**
 - ❖ riscaldamento di case isolate e non molto grandi
- **Costi di investimento contenuti**
- **Bassi costi di gestione**
 - ❖ legna in ciocchi 0,13 €/kg
- **Rendimenti energetici non molto alti**
 - ❖ 60-70%
- **Carica manuale della legna due tre volte alla settimana**
- **Molto spazio per lo stoccaggio della legna in ciocchi**

Caldaie a ciocchi di legna

- **Caldaia a fiamma inversa (legna in ciocchi)**
 - ❖ camera di combustione è situata sotto il vano in cui viene caricata la legna
 - ❖ circolazione forzata dei fumi
 - ❖ suddivisione dell'aria in due flussi
 - aria primaria
 - sopra la griglia di combustione
 - inferiore a quella necessaria per la completa ossidazione
 - processo di gassificazione della biomassa
 - ✓ aria secondaria
 - nella camera sottostante la griglia
 - combustione del syngas prodotto
 - ❖ Riduzione delle emissioni
 - ❖ Maggiore efficienza energetica

Caldaie a ciocchi di legna



Caldaie a ciocchi di legna

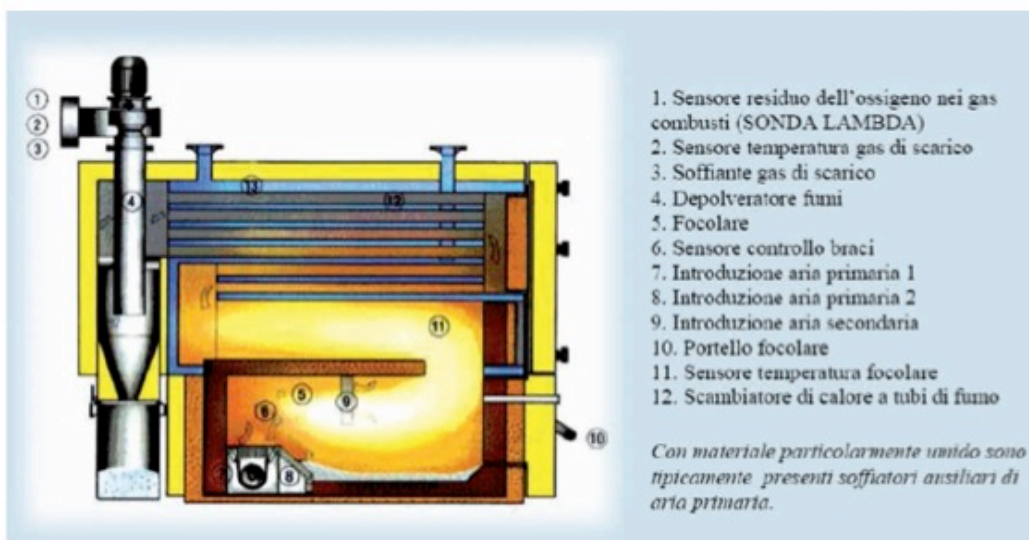


Pyromat ECO

- 1 Ampio vano di carico con portina
- 2 Vano di riempimento a forma conica verso il basso
- 3 Modulo caldaia elettronico
- 4 Zona di gassificazione con griglia in ghisa e letto in chamotte
- 5 Camera di post-combustione in materiale refrattario
- 6 Cassetta di raccolta ceneri di facile accesso
- 7 Scambiatore di calore a tubi verticale
- 8 Coperchio superiore per le operazioni di pulizia
- 9 Contenitore ceneri sottostante lo scambiatore di calore
- 10 Ventilatore gas di scarico con sonda Lambda e sonda temperatura
- 11 Coperchio per le operazioni di manutenzione
- 12 Scambiatore di calore di sicurezza
- 13 Gruppo idraulico anticondensa caldaia

Caldaie a cippato

- **Utilizzo di legno cippato (sminuzzamento) come combustibile**
- **Maggiore autonomia rispetto alla legna in ciocchi**
- **Adatte per il riscaldamento di edifici medio-grandi, anche superiori ad 1 MW(t)**



- 1. Sensore residuo dell'ossigeno nei gas combustibili (SONDA LAMBDA)
- 2. Sensore temperatura gas di scarico
- 3. Soffiante gas di scarico
- 4. Depolveratore fumi
- 5. Focolare
- 6. Sensore controllo braci
- 7. Introduzione aria primaria 1
- 8. Introduzione aria primaria 2
- 9. Introduzione aria secondaria
- 10. Portello focolare
- 11. Sensore temperatura focolare
- 12. Scambiatore di calore a tubi di fumo

Con materiale particolarmente unito sono tipicamente presenti soffiatori ausiliari di aria primaria.

Caldaie a cippato

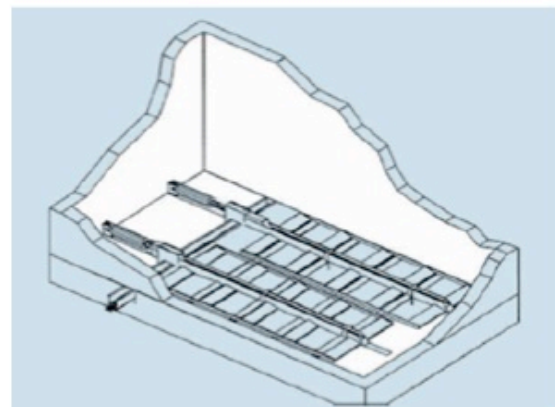


Caldaie a cippato

- **Predisposizione di un silos di stoccaggio per il**
 - ❖ **potenza e rendimento della caldaia**
 - ❖ **caratteristiche del combustibile**
 - ❖ **autonomia**
 - ❖ **rifornimenti**



- **Tipologia di estrattori dei silos**
 - ❖ **a braccio rotante (taglie piccole)**
 - ❖ **a fondo mobile con rastrelliere (taglie grandi-medio)**



Caldaie a cippato

- **Camera di combustione**
 - ❖ **a griglia fissa**
 - ✓ **cippato di piccole dimensioni**
 - ✓ **basso tenore di umidità**
 - ✓ **basso contenuto di ceneri (< 2%)**
 - ❖ **a griglia mobile**
 - ✓ **cippato di grandi dimensioni**
 - ✓ **umidità fino al 50%**
 - ✓ **contenuto di ceneri fino al 10%**

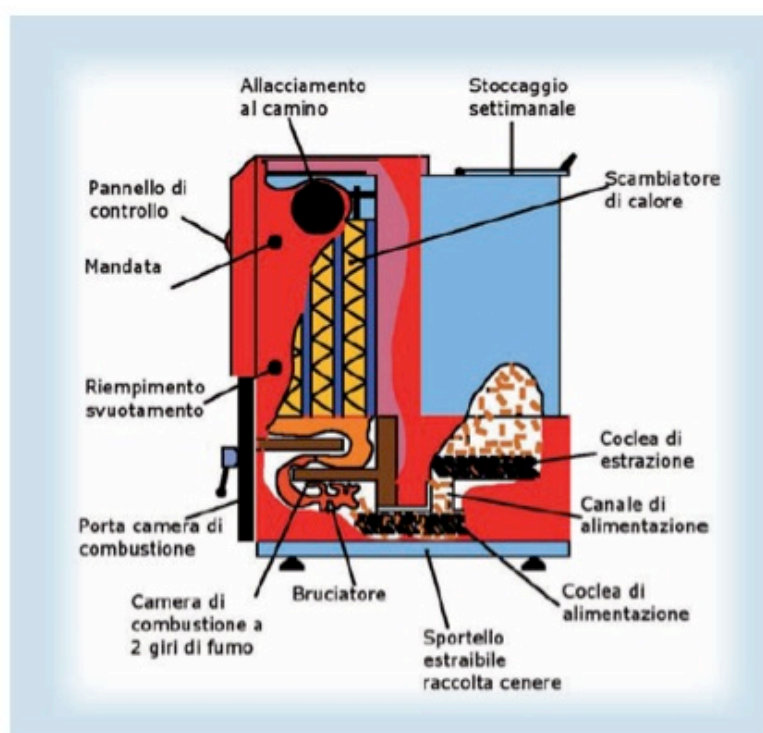
Caldaie a cippato

- **Rendimenti nominale fino a 70-80%**
 - ❖ **Tipo di cippato e umidità**
- **Dispositivi di sicurezza per i ritorni di fiamma**
 - ❖ **serrande tagliafiamma che garantiscono l'interruzione del flusso di combustibile**
 - ❖ **valvole di sicurezza termica le quali, collegate alla rete idrica, immettono in caso di emergenza acqua nel canale della coclea impedendo così il propagarsi del ritorno di fiamma**

Caldaie a pellet

- **Caratteristiche simili alle caldaie a cippato**
- **Utilizzo di un combustibile densificato (pellet)**
 - ❖ alta densità energetica
 - ❖ facilità di movimentazione
- **UtENZE medio-piccole**
 - ❖ Abitazioni
- **Elevata rumorosità**
 - ❖ Vani isolati
- **Dispositivi di sicurezza per i ritorni di fiamma**
 - ❖ tubo flessibile di alimentazione con serrande tagliafiamma

Caldaie a pellet



Rete di teleriscaldamento



Cippato di legno



Caldaia a biomassa



Rete



Abitazione



Contatore calore



Scambiatore calore

Fonte: Gubiani, Dell'Antonia 2007

Metodologia per la progettazione

- **Determinazione dei fabbisogni energetici**
- **Progettazione dell'impianto di combustione a biomassa**
- **Progettazione della rete di teleriscaldamento**
- **Quantificazione della presenza di biomassa sul territorio**
- **Determinazione della convenienza economica dell'investimento**

Teleriscaldamento a biomassa

- **Pregi**
 - ❖ basso costo
 - ❖ CO₂ in pareggio
 - ❖ comfort elevato
 - ❖ praticità
- **Difetti**
 - ❖ investimento iniziale
 - ❖ lavori di realizzazione

Caldaie da 300 kWt



Scambiatori di calore



Serbatoi di accumulo (volano termico)



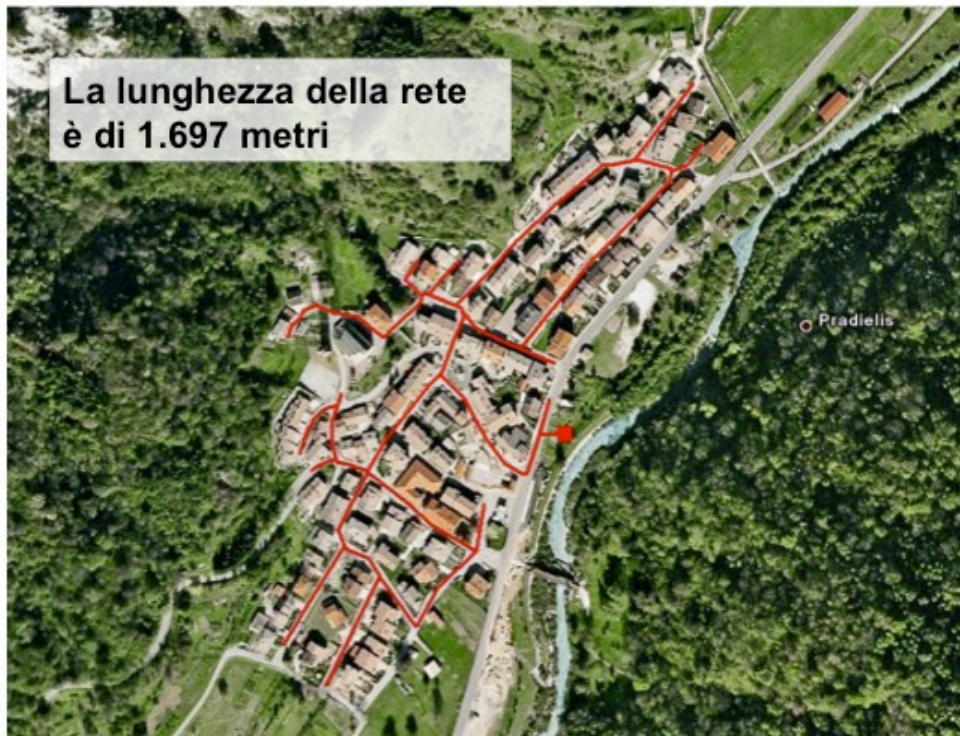
Posa della rete di teleriscaldamento



Posa della rete di teleriscaldamento



Rete di teleriscaldamento



Fonte: Gubiani, Dell'Antonia 2007

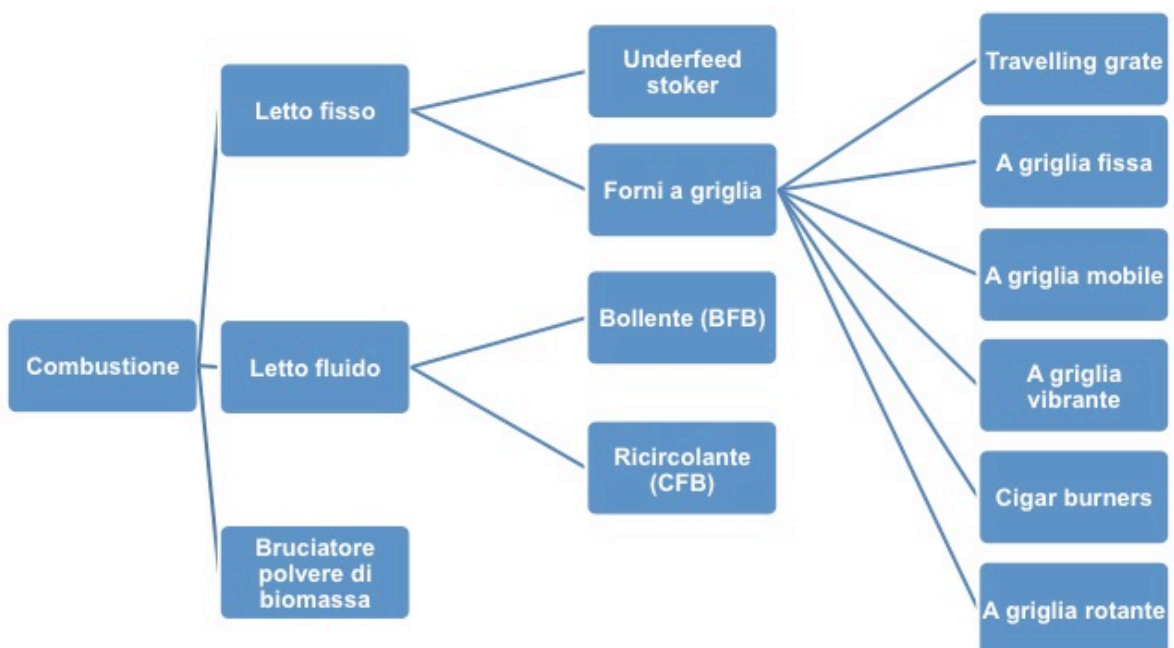
Cogenerazione

- **Cogenerazione**
 - ❖ energia termica
 - ❖ energia elettrica
- **Tipologie di cogenerazione**
 - ❖ combustione della biomassa
 - ✓ turbine a vapore
 - ✓ turbine ORC
 - ✓ microturbine
 - ❖ gassificazione della biomassa
 - ✓ motori endotermici
 - ✓ motori esotermici (Stirling)
 - ❖ Olio vegetale
 - ✓ grandi motori endotermici appositamente realizzati

Cogenerazione con combustione di biomassa

- Sistemi di combustione
 - ❖ a letto fisso
 - ❖ a letto fluido
 - ❖ a polvere di biomassa

Tipologia di impianti industriali per la combustione di biomassa



Combustori a letto fisso

- **Tecnologia più diffusa nei processi di combustione**
 - ❖ semplicità
 - ❖ economicità
 - ❖ affidabilità di funzionamento
- **Diverse tipologie di biomasse**
- **Diversi tenori di umidità**
- **Rendimenti del 70-80%**
- **Elevati tenori di aria (comburente)**
 - ❖ **aria primaria**
 - ✓ insufflata attraverso la biomassa
 - ✓ fasi di pirolisi e gassificazione della biomassa
 - ❖ **aria secondaria**
 - ✓ insufflata sopra la griglia
 - ✓ ossidazione dei gas formati precedentemente

Combustori a letto fisso

- **Combustione a stadi**
 - ❖ due camere separate
 - ❖ poca turbolenza nella camera principale
 - ❖ favorire la turbolenza nella camera secondaria
- **Tipologie di combustori a letto fisso**
 - ❖ forni a griglia
 - ❖ underfeed stokers

Forni a griglia

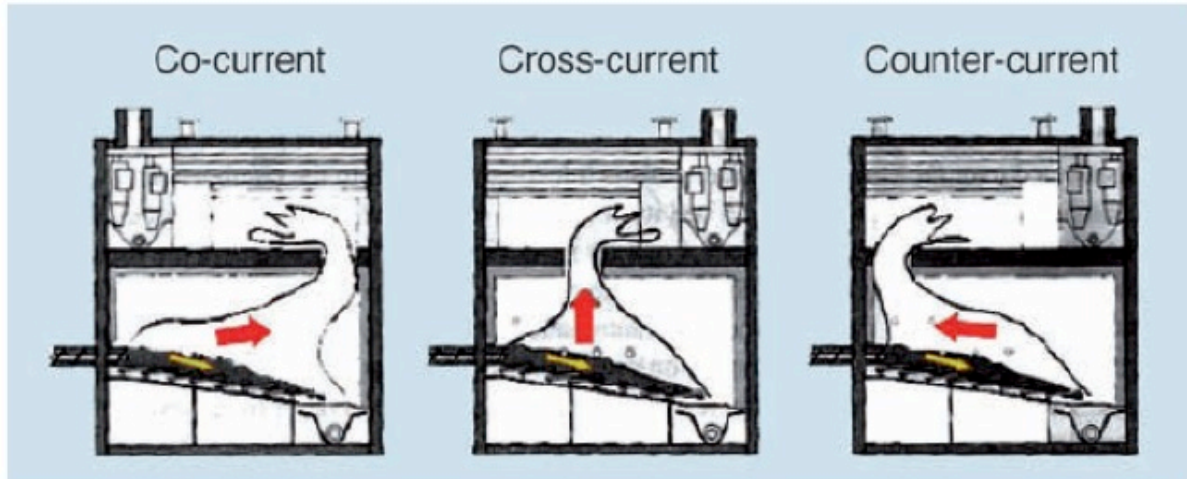
- **Biomasse utilizzabili**
 - ❖ eterogenee sia nella forma che nella composizione
 - ❖ alto contenuto di umidità
 - ❖ alto contenuto di ceneri
 - ❖ miscela di specie legnose diverse
 - ✓ Vinacce
 - ✓ Graspi
 - ✓ potature
 - ❖ sconsigliato l'utilizzo di biomasse legnose ed erbacee insieme
 - ✓ problemi di fusibilità delle ceneri

Forni a griglia

- **Costituenti della griglia**
 - ❖ lega di acciaio e nichel-cromo (barrotti)
 - ❖ temperature di esercizio fino a 1200°C
 - ✓ acqua di raffreddamento
- **Vantaggi**
 - ❖ semplici
 - ❖ economici
 - ❖ affidabili
 - ❖ buona versatilità
 - ❖ funzionamento a carico parziale (25%)
- **Importante**
 - ❖ limitare l'eccesso d'aria
 - ❖ sistema di raffreddamento

Forni a griglia

- **Classificazione in base alla direzione assunta dalla fiamma rispetto al percorso fatto dalla biomassa**



Fonte: ENEA 2008

Forni a griglia

- **Sistemi con flusso in equicorrente (fiamma nella stessa direzione del combustibile)**
 - ❖ **combustibili secchi**
 - ❖ **aria comburente preriscaldata**
 - ❖ **aumento dei tempi di residenza dei gas in camera di combustione**
 - ✓ **riduzione NOX**
 - ✓ **trasporto delle ceneri volatili**

Forni a griglia

- **Sistemi con flusso incrociato (il gas fuoriesce al centro della fornace)**
 - ❖ **camera di combustione secondaria verticale**
 - ❖ **controllo della temperatura**
 - ✓ **ricircolo gas combusti dopo la pulizia delle polveri**
 - ✓ **raffreddamento delle pareti della camera di combustione con acqua**
- **Diminuzione dei fenomeni di sinterizzazione delle ceneri sulle pareti, garantendo così un aumento della vita media del refrattario**

Forni a griglia

- **Sistemi con flusso in controcorrente (fiamma in direzione opposta rispetto al combustibile)**
 - ❖ **basso potere calorico**
 - ❖ **i gas caldi passano sulla biomassa umida**
 - ✓ **essiccazione**
 - ✓ **allontanamento del vapore**
 - ❖ **importante una buona miscelazione dei gas combusti e l'aria secondaria**

Forni a griglia

- **Tipologie di combustori in base alla forma delle griglie e ai meccanismi adottati per il loro movimento (sistemi di avanzamento della biomassa)**
 - ❖ **travelling grate**
 - ❖ **a griglia fissa**
 - ❖ **a griglia mobile (inclinata o orizzontale)**
 - ❖ **a griglia vibrante**
 - ❖ **cigar burners**
 - ❖ **a griglia rotante (alimentata dal basso o a cono)**

Forni a griglia: travelling grate

- **la sostanza organica da sottoporre al processo di combustione viene disposta su una griglia trascinata da un meccanismo a rulli**
 - ❖ **dispositivi meccanici o idraulici**
 - ❖ **possibilità di regolare la velocità (completa combustione)**
 - ❖ **facile smaltimento della cenere**
 - ❖ **efficace raffreddamento delle griglia**
- **Sistema di alimentazione del combustibile**
 - ❖ **a vite**
 - ❖ **a spruzzo**

Forni a griglia: travelling grate

Fig. 3.14 Particolare della griglia e del meccanismo a rulli

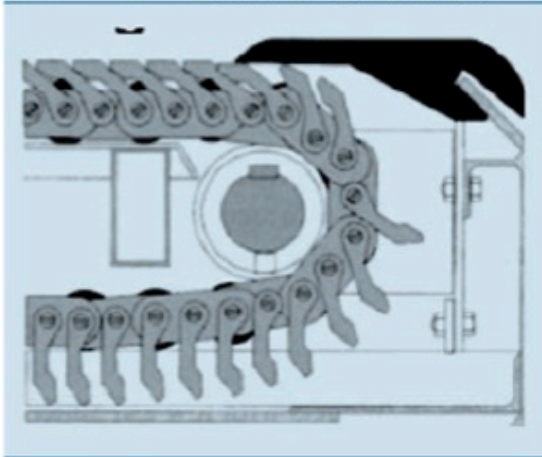
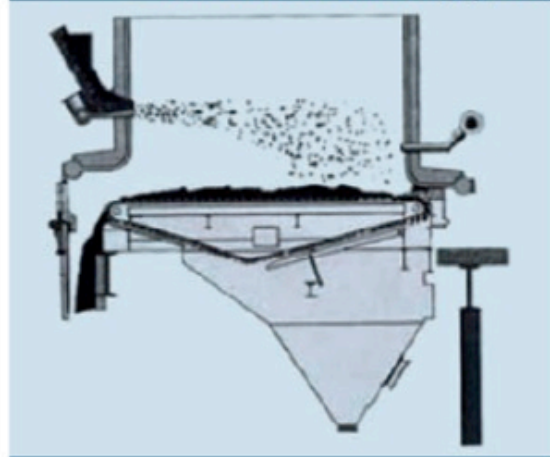


Fig. 3.15 Rappresentazione schematica di un combustore travelling grate



Fonte: ENEA 2008

Forni a griglia: travelling grate

- **Vantaggi**
 - ❖ processo di combustione uniforme
 - ❖ ridotte emissioni di particolato
 - ❖ facilità nelle operazioni di manutenzione.
- **Svantaggi**
 - ❖ tempi di combustione più lunghi
 - ❖ maggior fabbisogno di aria primaria

Forni a griglia: a griglia fissa

- **Tipologia semplice**
- **La caratteristica peculiare è la presenza di un unico piano grigliato fortemente inclinato dove la sostanza organica, che viene introdotta dall'alto, mano a mano che perde consistenza per effetto della combustione avanza fino a cadere in un apposito bacino di raccolta delle scorie collocato nella parte bassa**
- **Basso utilizzo**
- **Difficoltà di distribuzione della biomassa in camera di combustione**

Forni a griglia: a griglia mobile

- **Sistema più diffuso**
- **Costi elevati**
- **Elevata versatilità di funzionamento**
- **Combustori a griglia mobile inclinata**
 - ❖ **pendenza 15-30%**
 - ❖ **elementi mobili alternati a elementi fissi**
 - ❖ **movimento con attuatori elettrici o idraulici**
 - ✓ **lunghezze e frequenze regolabili**
- **Utilizzo di biomasse diverse**
 - ❖ **regolazione velocità griglia**
 - ❖ **regolazione aria**

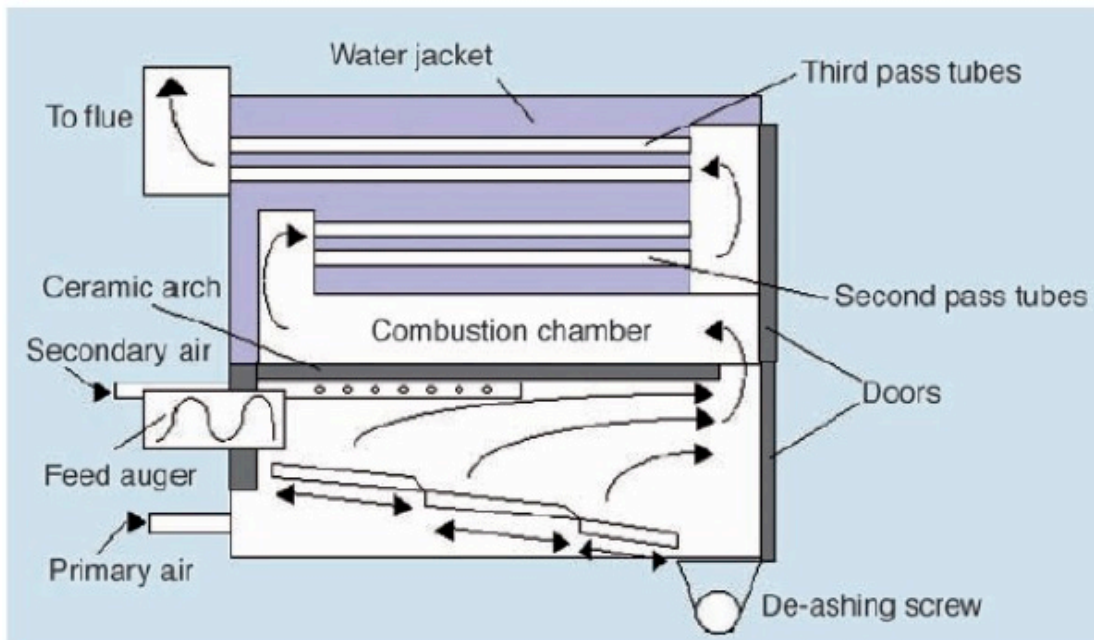
Forni a griglia: a griglia mobile

- **Camera di combustione con volta di materiale ceramico che consente di riflettere in modo particolarmente efficace il calore sviluppato nel letto**
 - ❖ **essiccazione migliore della biomassa**
- **Modalità di raffreddamento**
 - ❖ **air cooled moving grate furnaces; si utilizza l'aria primaria per raffreddare la griglia**
 - ✓ **corteccia umida**
 - ✓ **segatura**
 - ✓ **chips di legno**
 - ❖ **water-cooled moving grate furnaces; si fa uso di acqua**
 - ✓ **combustibili secchi con bassa temperatura di fusione delle ceneri)**

Forni a griglia: a griglia mobile

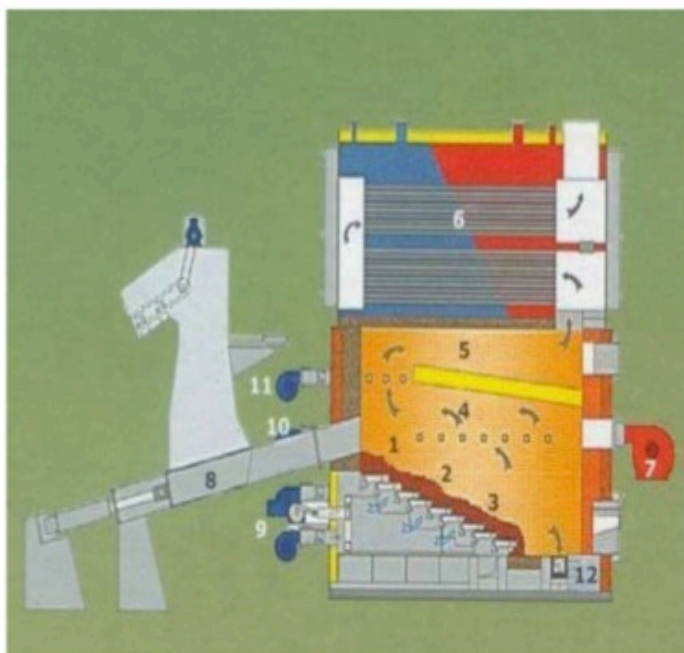
- **Vantaggi**
 - ❖ **utilizzo di combustibili molto diversi in termini di umidità e pezzatura**
 - ❖ **possibilità di rimescolamenti molto efficaci**
 - ❖ **facilità di rimozione delle ceneri**
 - ✓ **no fenomeni di sinterizzazione**
 - ✓ **no bloccaggio**
 - **alte efficienze di conversione visto l'effetto irraggiante prodotto dalla volta**
- **Svantaggi**
 - ❖ **elevati costi**
 - ❖ **difficoltà nel regolare la velocità**
 - ❖ **elevata inerzia termica**

Forni a griglia: a griglia mobile inclinato



Fonte: ENEA 2008

Forni a griglia: a griglia mobile inclinato



Le caldaie a griglia mobile sono in grado di tollerare cippato molto eterogeneo con umidità fino al 55 %

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

Griglia mobile



Griglia di combustione

- Camera di combustione con rivestimento refrattario, focolare ad elementi in ghisa al cromo



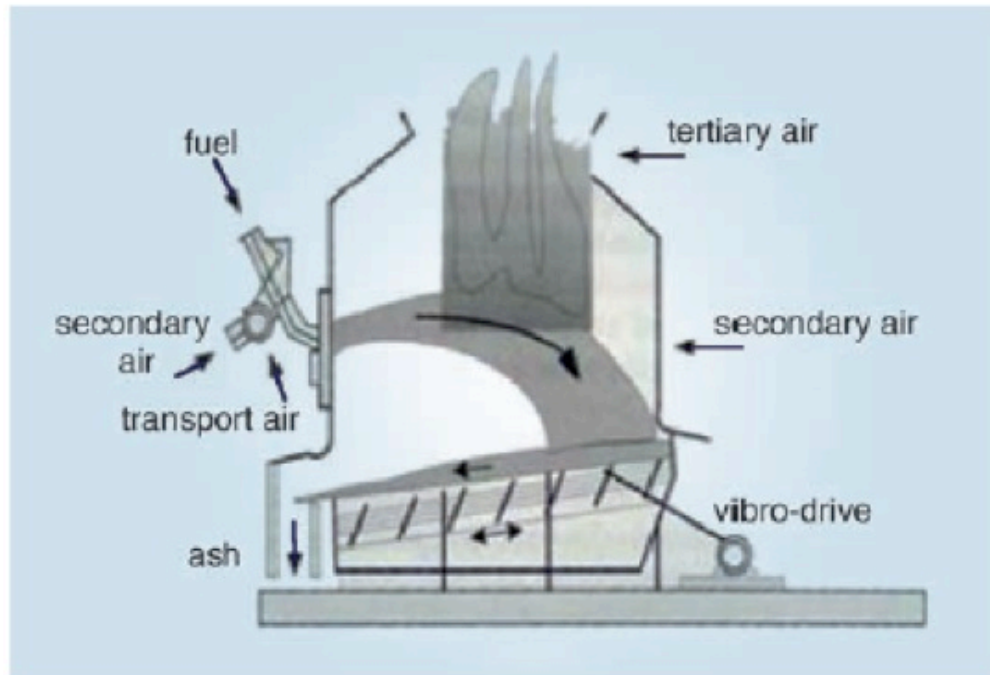
Forni a griglia: a griglia rotante

- Griglia composta da una parete inclinata di tubi che viene posizionata sopra delle molle
- Introduzione della biomassa
 - ❖ spruzzatori
 - ❖ sistemi a vite
 - ❖ sistemi idraulici
- Durante la fase di combustione è soggetta a delle vibrazioni intermittenti generate da due o più motori eccentrici (vibro-drive) che facilitano il processo di mescolamento
- Le oscillazioni ad intervalli brevi evitano la formazione, in camera di combustione, di scorie di grosse dimensioni
 - ❖ sostanza organica che presenta problemi di sinterizzazione
 - ❖ grandi quantitativi di residui e agglomerati
 - ✓ paglia
 - ✓ taluni scarti legnosi

Forni a griglia: a griglia rotante

- Svantaggi
 - ❖ elevata emissione di ceneri volatili per effetto delle vibrazioni della griglia
 - ❖ alta concentrazione di monossido di carbonio nei gas combusti
 - ✓ combustione non completa
 - ✓ oscillazioni sul letto di materiale combustibile.

Forni a griglia: a griglia rotante



Fonte: ENEA 2008

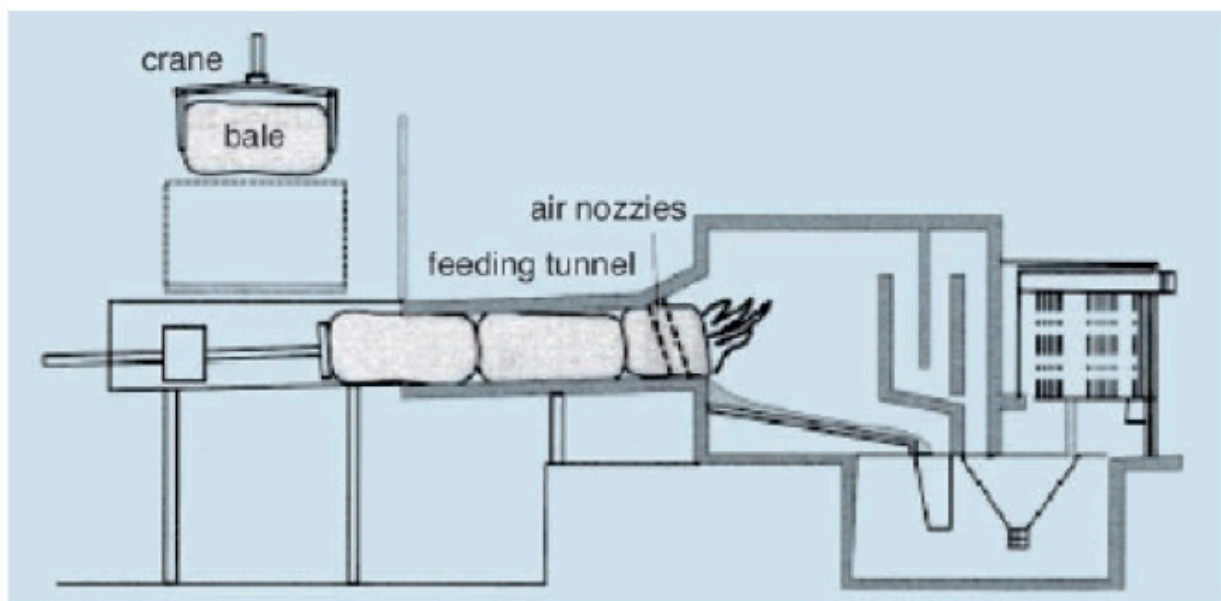
Forni a griglia: cigar burners

- **Sviluppati in Danimarca**
- **Combustione diretta di grosse balle di paglia e cereali le quali vengono introdotte in maniera continua per mezzo di un sistema a pistone idraulico**
- **Processi di combustione**
 - ❖ **nel tunnel di alimentazione comincia il processo di gassificazione della biomassa**
 - ❖ **in camera di combustione la biomassa si presenta quasi totalmente carbonizzata**
 - ❖ **in camera di combustione con l'introduzione dell'aria comburente, si ha la vera e propria fase di ossidazione del carbone prodotto**
- **Importante la temperatura**
 - ❖ **temperature inferiori ai 900°C**
 - ❖ **problemi di sinterizzazione (colture erbacee)**

Forni a griglia: cigar burners

- Sistemi di raffreddamento
 - ❖ utilizzo di acqua
 - ❖ ricircolo dei fumi di combustione
- Svantaggi
 - ❖ gas combustibili
 - ✓ ceneri volatili
 - ✓ vapori alcalini
 - depositi
 - corrosione

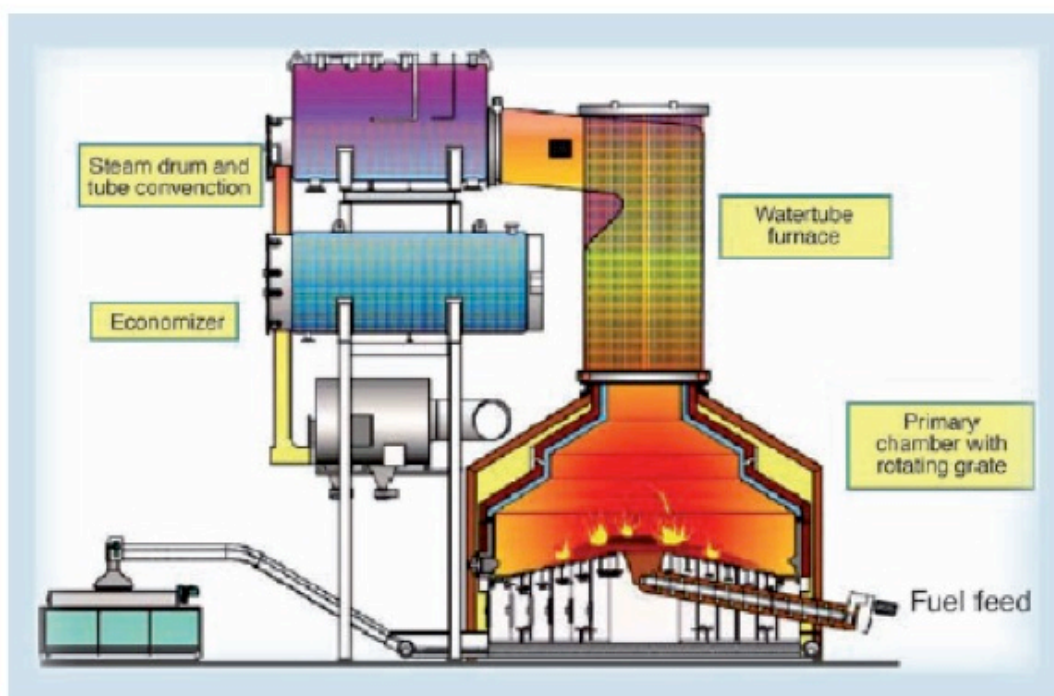
Forni a griglia: cigar burners



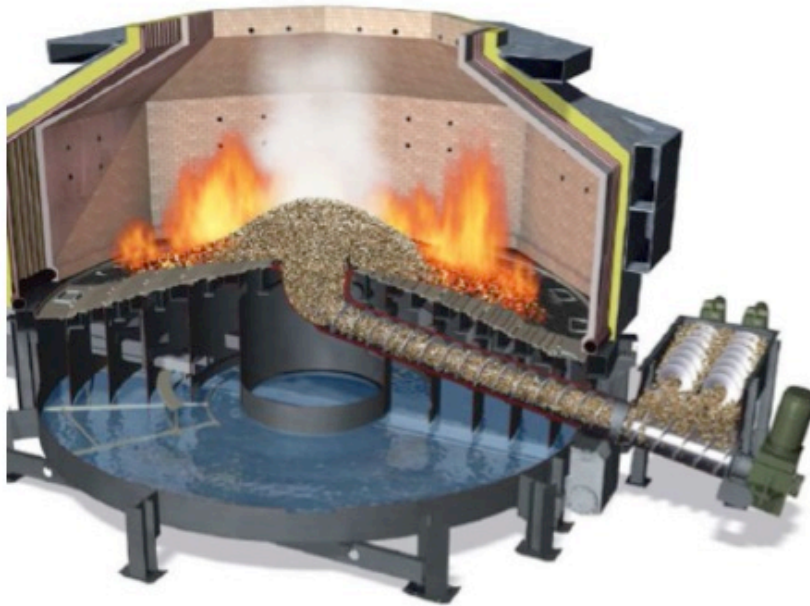
Forni a griglia: a griglia rotante

- Di origine Finlandesi
- Forni caratterizzati dalla presenza di una griglia a forma di cono, nella quale l'alternanza di sezioni che ruotano in senso orario e antiorario determina il mescolamento della biomassa e il suo avanzamento verso la zona di raccolta delle ceneri
- L'aria di combustione
 - ❖ aria primaria insufflata dal basso nella camera di combustione
 - ❖ gas combustibili bruciati con aria secondaria in una seconda camera (orizzontale o verticale)
- Combustibile introdotto dal basso tramite dispositivi a vite
- Biomasse con alti contenuti di umidità
 - ❖ corteccia appena tagliata
 - ❖ segatura appena tagliata
 - ❖ prodotti legnosi misti a fanghi di origine biologica

Forni a griglia: a griglia rotante



Forni a griglia: a griglia rotante



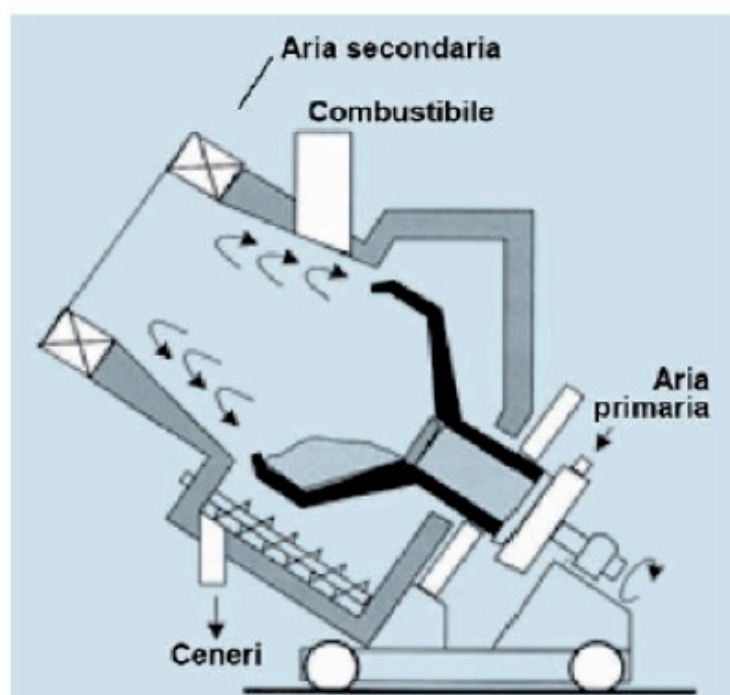
Forni a griglia: a cono rotante

- Di origine tedesca
- Griglia a forma di cono capovolto
 - ❖ mescolamento con una rotazione attorno ad un asse inclinato
- L'aria di combustione
 - ❖ aria primaria attraverso la griglia direttamente sul combustibile
 - ❖ aria secondaria tangenziale ad elevata velocità nella sezione cilindrica del forno
 - ❖ bassi valori di eccesso d'aria (20-30%)

Forni a griglia: a cono rotante

- **Vantaggi**
 - ❖ **basso quantitativo di prodotti volatili nei gas combusti**
 - ✓ **flusso rotazionale aria secondaria**
 - ❖ **biomasse con caratteristiche variabili**
 - ✓ **dimensioni**
 - ✓ **umidità**
 - ✓ **fusibilità delle ceneri**
- **Svantaggi**
 - ❖ **bruciatore ausiliario per l'avvio del forno**
 - ❖ **fermi impianto per rimuovere rossi agglomerati**

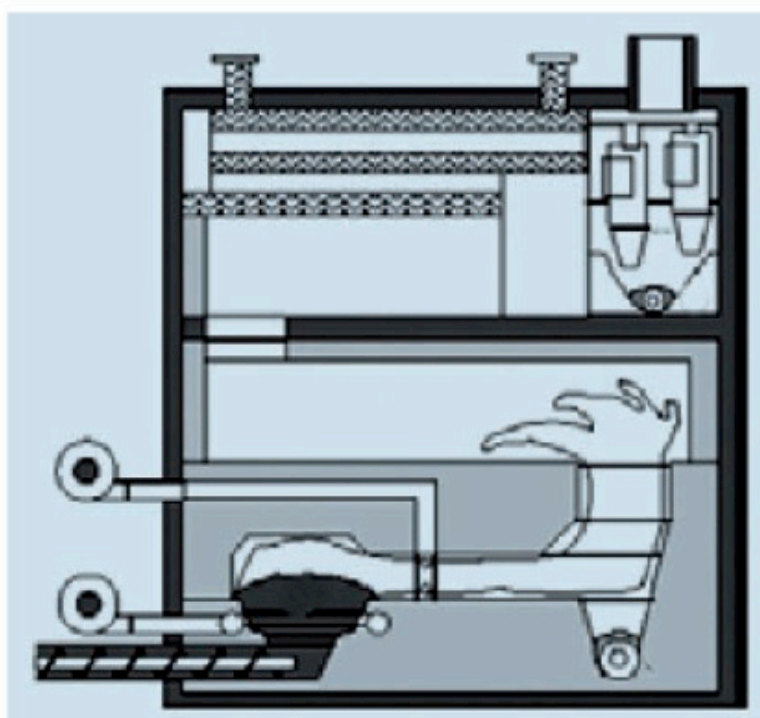
Forni a griglia: a cono rotante



Combustori underfeed stokers

- **Taglie medio-piccole (< 6 MW)**
- **Dispositivo di alimentazione**
 - ❖ coclea che conduce la biomassa alla cavità di forma piramidale
 - ❖ la biomassa risale fino alla prima camera di combustione
- **Tipologia di biomassa**
 - ❖ Chips, pellet e segatura
 - ❖ basso contenuto di cenere
 - ❖ pezzatura inferiore ai 50 mm
- **Possibilità di funzionare a carichi parziali**
- **Problemi per la presenza di cenere sinterizzata**

Combustori underfeed stokers



Combustori a letto fluido

- Camere di combustione cilindriche verticali
- La biomassa brucia in un letto di materiale inerte
 - ❖ sabbia, calcare o dolomite
 - ✓ il calcare diminuisce le emissioni di acidi e la fusibilità delle ceneri
 - ❖ aria combustibile dal basso mantiene in sospensione biomassa e sabbia
- Vantaggi
 - ❖ maggiore controllo della combustione
 - ❖ maggiore distribuzione del calore
 - ❖ minori temperature di esercizio 800-900°C
 - ✓ inferiori di 100-200°C rispetto al letto fisso
 - ✓ minori problemi di fusibilità delle ceneri

Combustori a letto fluido

- Elevato mescolamento di biomassa comburente ed inerte
 - ❖ elevata trasmissione del calore
 - ✓ convezione
 - ✓ irraggiamento (poco)
 - ❖ completa combustione con bassa richiesta di aria
 - ✓ eccesso d'aria del 40%
 - ✓ diminuzione degli NO_x
 - ✓ diminuzione dell'effluente gassoso
 - ❖ utilizzo di diverse miscele di combustibili
- Attenzione alle dimensioni e alle impurità della biomassa
 - ❖ trattamenti di pre-pulizia
 - ❖ dimensioni piccole della biomassa

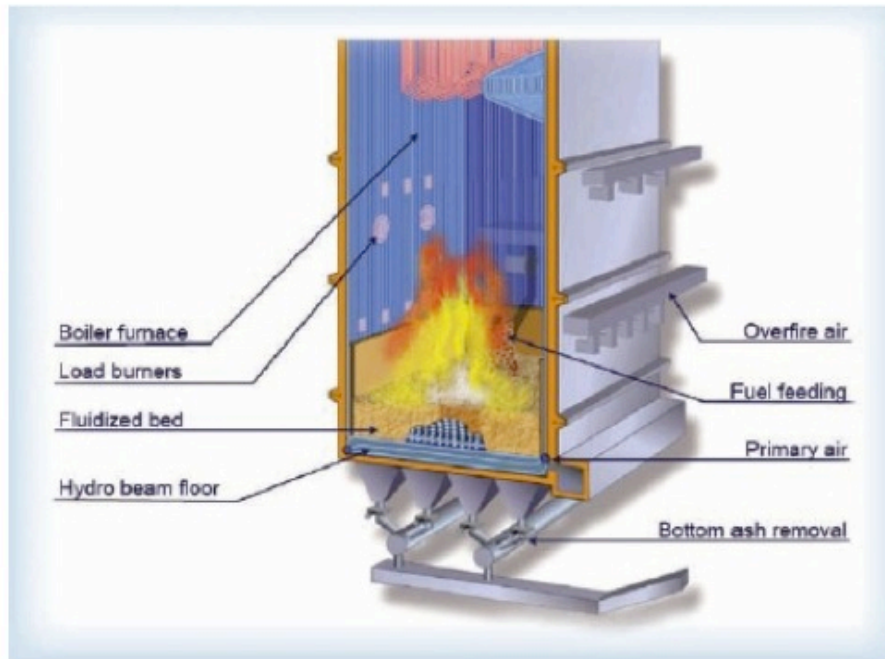
Combustori a letto fluido

- **Svantaggi**
 - ❖ **elevato contenuto di polveri nei gas**
 - ✓ presenza di precipitatori e sistemi di pulizia
 - ✓ si limita il fenomeno di agglomerazione di ceneri basso fondenti
 - ❖ **perdita del materiale inerte con ceneri e fumi di combustione**
 - ❖ **mal funzionamento ai carichi parziali**
 - ❖ **elevati tempi di avvio**
 - ✓ 15 ore
 - ✓ bruciatori a olio o a gas
- **Tipologie di combustori a letto fluido**
 - ❖ **a letto fluido bollenti (BFB)**
 - ❖ **a letto ricircolante (CFC)**

Combustori a letto fluido bollente (BFB)

- **Letto fluidizzato costituito da sabbia silicica di 1 mm**
 - ❖ **si mantiene nella parte bassa del reattore**
 - ❖ **bassa velocità di fluidizzazione (1-2,5 m/s)**
- **Caratteristiche della biomassa**
 - ❖ **dimensioni di 80 mm**
 - ❖ **introdotta nel letto del reattore**

Combustori a letto fluido bollente (BFB)



Fonte: ENEA 2008

Combustori a letto fluido ricircolante (CFC)

- **Elevate velocità di fluidizzazione (5-10 m/s)**
 - ❖ **maggiore mescolanza**
 - ❖ **maggiore turbolenza**
 - ❖ **maggiore scambio termico**
 - ❖ **maggiore distribuzione del calore**
- **Combustione più stabile ed efficiente**
 - ❖ **biomassa di piccola dimensione (0,1-40 mm)**
 - ❖ **minori volumi di gas combusti**
- **Problemi nelle dimensioni della biomassa**
 - ❖ **elevati costi pretrattamento**
 - ❖ **difficoltà nell'alimentazione**
 - ✓ **elevata velocità di fluidificazione**
 - ✓ **bassa densità biomassa**

Combustori a letto fluido ricircolante (CFC)

- **Maggiori costi di installazione**
 - ❖ **dimensioni**
 - ❖ **cycloni per separare materiale inerte**
 - ✓ **sabbia con granulometria variabile da 0,2–0,4 mm**
- **Dimensioni da 30 a 80 MW**

Combustori a letto fluido ricircolante (CFC)



Combustori a letto fluido

- **Combustori a letto fluido bollente (BFB)**
 - ❖ molto dispendiosa
 - ❖ aumento della sua diffusione
 - ❖ taglie grandi (30-80 MW)
- **Combustori a letto fluido ricircolante (CFC)**
 - ❖ maggiore convenienza economica a taglie medio-piccole

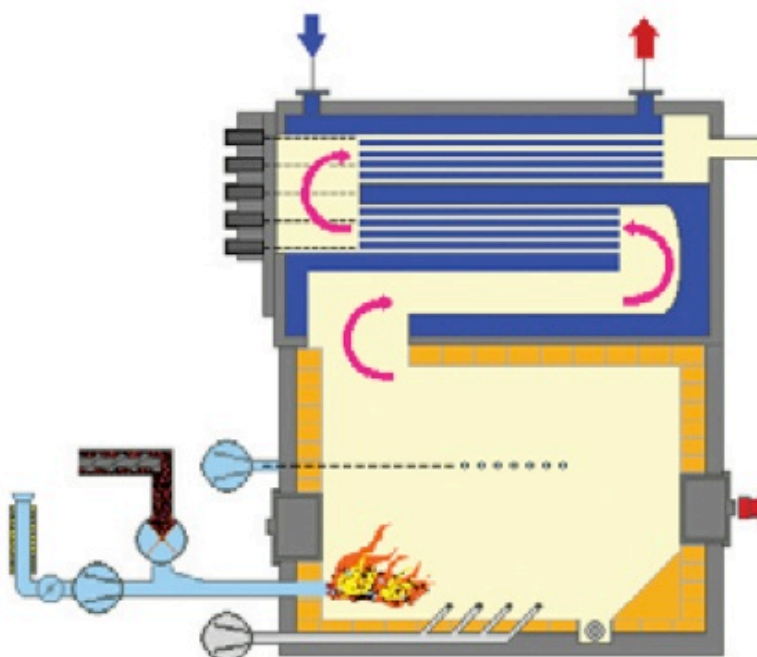
Combustori a polvere di biomassa

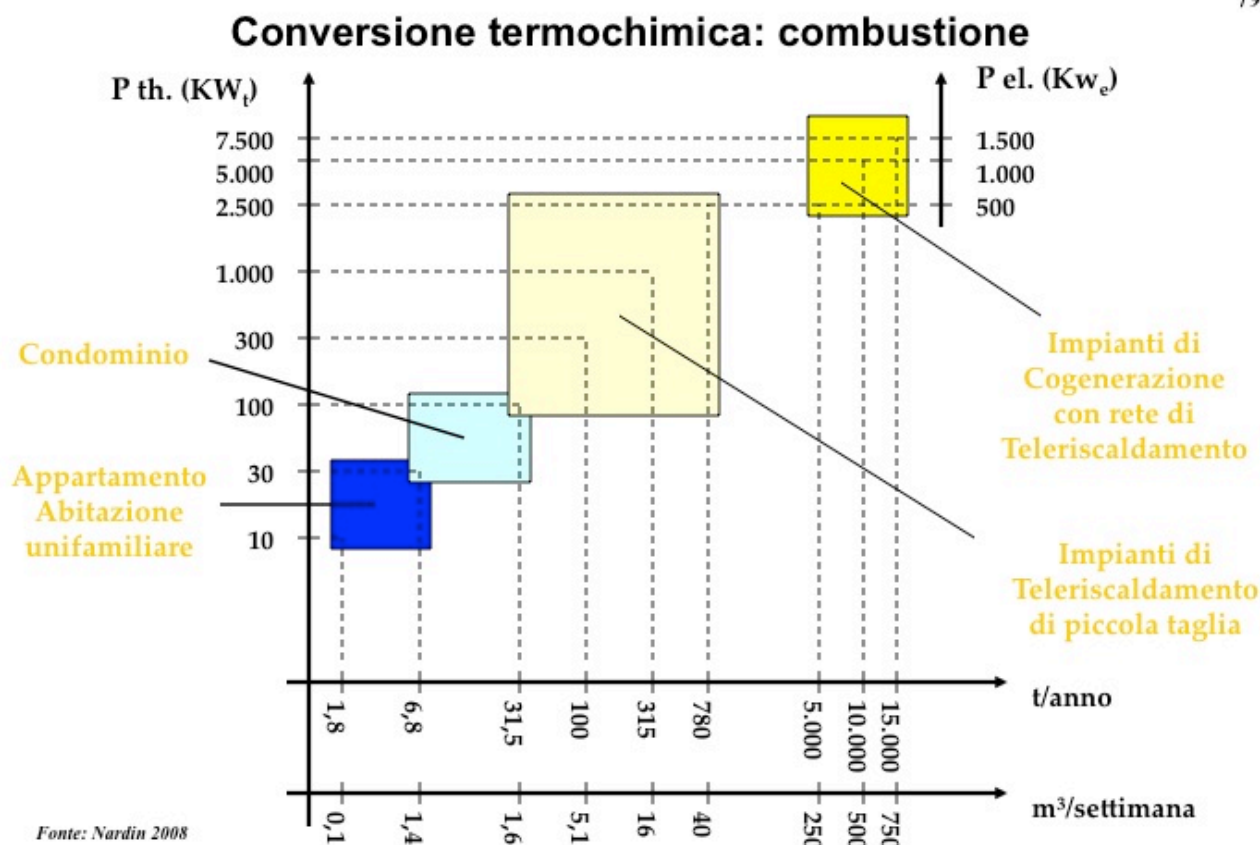
- **Tipologia di biomassa**
 - ❖ materiale polverulento e leggero
 - ✓ lolla di riso
 - ✓ segatura polvere di legno
 - ✓ paglia triturrata
 - ❖ dimensioni non superiori a 20 mm
 - ❖ umidità inferiore al 20%
 - ❖ materiale estremamente omogeneo
- **La biomassa è iniettata pneumaticamente all'interno del forno in miscela con la corrente di aria primaria che li trasporta e li mantiene in sospensione**
 - ❖ flusso tangenzialmente
 - ❖ moto vorticoso rotazionale
 - ❖ i processi di gassificazione e successiva combustione del materiale carbonizzato sono molto veloci

Combustori a polvere di biomassa

- **Elevato grado di miscelazione combustibile-comburente**
 - ❖ bassi eccessi d'aria
 - ❖ elevate efficienze termiche
 - ❖ basse emissioni di NO_x
- **Svantaggi**
 - ❖ elevati livelli di temperatura
 - ✓ alta densità energetica della biomassa
 - ❖ raffreddamento con sistemi ad acqua
 - ❖ deterioramento materiale isolante
 - ✓ elevato stress termico
 - ✓ azione corrosiva particelle biomassa (moto vorticoso)
 - ❖ bruciatore ausiliario
 - ✓ accensione impianto

Combustori a polvere di biomassa





Cogenerazione

- La norma UNI 8887/1987 definisce il processo di cogenerazione come
 - ❖ “Insieme delle operazioni volte alla produzione combinata di energia meccanica/elettrica e calore, entrambi considerati effetti utili, partendo da una qualsivoglia sorgente di energia. Il processo di cogenerazione deve realizzare un più razionale uso dell’energia primaria rispetto a processi che producono separatamente le due forme di energia. La produzione di energia meccanica/elettrica e calore deve avvenire in modo sostanzialmente interconnesso in cascata”

Cogenerazione

- **Produzione contemporanea di energia elettrica e calore**
 - ❖ **la produzione deve avvenire in modo interconnesso**
 - ❖ **legame tecnico e di mutua indipendenza tra produzione elettrica e utilizzo in forma utile del calore**
- **Calore generato come**
 - ❖ **vapore**
 - ❖ **acqua calda**
 - ❖ **aria calda**
- **Utilizzo del calore**
 - ❖ **riscaldamento**
 - ❖ **raffrescamento**
 - ❖ **usi industriali**
 - ✓ **caseificio**

Cogenerazione

- **Vantaggi**
 - ❖ **economici-strategici**
 - ✓ **migliori rendimenti**
 - ✓ **minori consumi energetici**
 - ✓ **maggiori rendimenti complessivi**
 - ❖ **ambientali**
 - ✓ **a parità di energia minori consumi**
 - ✓ **a parità di energia minori emissioni**
- **Elevati costi di investimento**
 - ❖ **maggiore complessità dei sistemi**

Cogenerazione

- **Corrispondenza della domanda energetica**
 - ❖ **elettrica**
 - ✓ non è possibile accumularla
 - ✓ deve essere immessa sulla rete nazionale
 - ✓ possibilità di produzione continua
 - ❖ **termica**
 - ✓ possibilità di accumularla per brevi periodi
 - ✓ domanda giornaliera non costante (abitazioni)
 - ✓ domanda annuale non costante (abitazioni)
 - ✓ valutare utenze industriali con domanda costante

Cogenerazione

- **Elementi fondamentali di un sistema cogenerativo**
 - ❖ sistema che attua la conversione dell'energetica termica in meccanica
 - ❖ generatore che trasforma l'energia meccanica in elettrica
 - ❖ scambiatori di calore per il recupero termico
 - ❖ eventuali dispositivi di introduzione aggiuntiva di calore
 - ✓ es. caldaie supplementari
 - ❖ reti di distribuzione del calore
 - ❖ strumentazione di controllo e regolazione dell'impianto
 - ❖ impianto di allacciamento alla rete elettrica
 - ❖ sistemi di abbattimento degli inquinanti

Cogenerazione

- **Possibili cicli termodinamici di base**
 - ❖ **cicli con cambiamento di fase**
 - ✓ ciclo Rankine (turbina a vapore)
 - ✓ ciclo con olio diatermico (ORC)
 - ✓ ciclo con aria sotto pressione (microturbina)
 - ❖ **ciclo con solo gas**
 - ✓ turbina a gas
 - ✓ motore esotermico (Stirling)
 - ✓ motore endotermico (combustione interna)

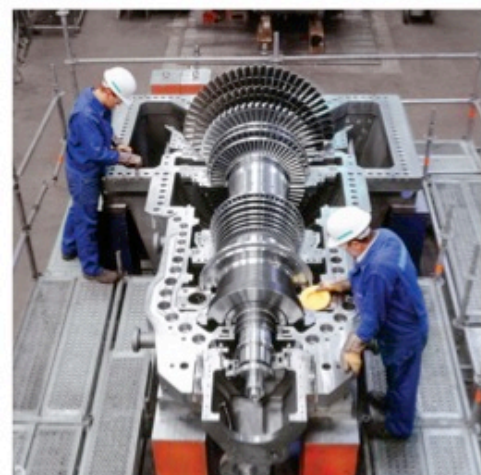
Turbine a vapore d'acqua

- **Questo tipo di impianti è basato sul ciclo termodinamico Rankine-Hirn a vapore surriscaldato**
- **Gli impianti industriali con turbine a vapore reali forniscono calore di recupero ad alta temperatura**
- **Utilizzano il vapore proveniente da un opportuno generatore**
- **Tecnologia matura degli impianti a vapore**
 - ❖ elevata affidabilità di esercizio
 - ❖ facilità di condotta
 - ❖ efficacia del sistema di regolazione
 - ❖ bassa rumorosità
 - ❖ basso utilizzo di lubrificanti
- **Svantaggi**
 - ❖ scarsa flessibilità
 - ❖ progettazione accurata ad ogni caso specifico

Turbine a vapore d'acqua

- **Principio di funzionamento**
 - ❖ una caldaia produce il calore
 - ✓ evaporazione dell'acqua
 - ❖ il vapore generato viene fatto espandere in una turbina
 - ✓ produzione di energia meccanica
 - ❖ l'alternatore trasforma l'energia meccanica in energia elettrica
 - ❖ recupero del calore con la condensazione del vapore
 - ❖ il liquido ritorna al generatore di calore

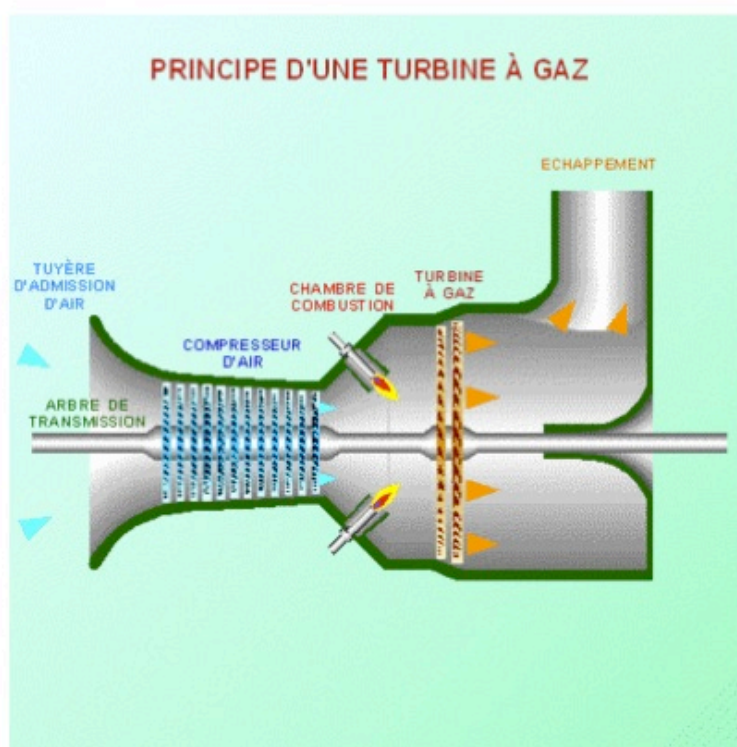
Turbine a vapore d'acqua



Turbine a gas

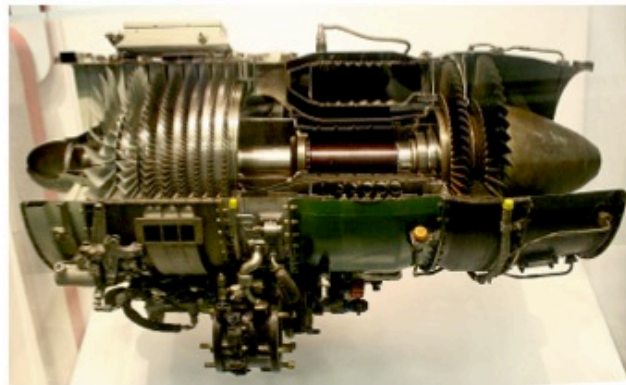
- La turbina è azionata dai fumi provenienti da una camera di combustione
- Macchine relativamente giovani (anni 50)
- Possibilità della post combustione
 - ❖ utilizzo dei gas in uscita dalla turbina
 - ✓ alta percentuale di ossigeno
 - ✓ aumento energia termica
- Larga indipendenza della potenza termica disponibile da quella meccanica prodotta
 - ❖ maggiore flessibilità di esercizio
- Installazione delle turbine
 - ❖ semplicità costruttiva
 - ❖ bassi tempi di consegna
 - ❖ diminuzione dei costi di installazione

Principio di una turbina a gas



Turbine a gas

- **Impiego di combustibili pregiati**
 - ❖ gas metano
 - ❖ oli leggeri
- **L'utilizzo dei fumi di combustione della biomassa provoca danni all'impianto di cogenerazione**
 - ❖ corrosione e abrasione delle palette della turbina



Cogenerazione con motori endotermici alternativi

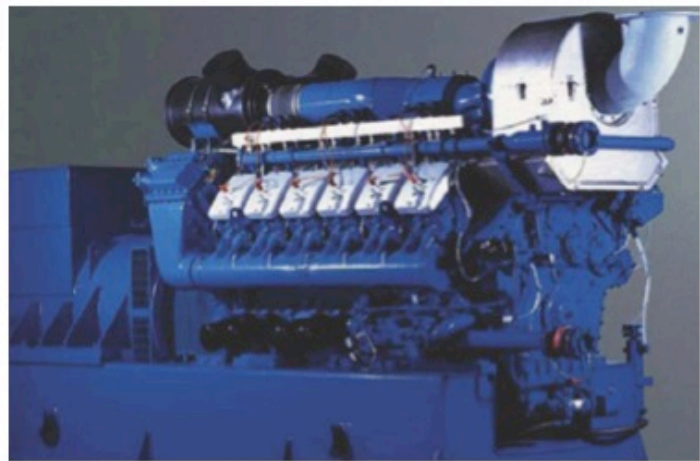
- **Principio di funzionamento**
 - ❖ motore endotermico
 - ❖ alternatore che trasforma l'energia meccanica in energia elettrica
 - ❖ recupero termico
 - ✓ aria di sovralimentazione (12%)
 - ✓ acqua di raffreddamento (25%)
 - ✓ olio di lubrificazione (13%)
 - ✓ gas di scarico (50%)
- **Vantaggi**
 - ❖ indipendenza della generazione elettrica da quella termica
 - ❖ alti rendimenti elettrici
 - ❖ utilizzo a carichi parziali
 - ❖ modularità dei gruppi che vengono realizzati

Cogenerazione con motori endotermici alternativi

- **Svantaggi**
 - ❖ aumento dei costi di manutenzione
 - ❖ cambio filtri e olio motore
 - ❖ calore a bassa temperatura (140°C)
 - ❖ alte rumorosità e vibrazioni
 - ❖ maggiori emissioni di NO_x

Cogenerazione con motori endotermici alternativi

- **Wärtsilä 46 20V46F/600**
 - ❖ Potenza 22.425 kW
 - ❖ 600 giri al minuto
 - ❖ Efficienza elettrica 46,8%



Cogenerazione con ciclo Rankine a fluido organico

- I turbogeneratori basati sul ciclo Rankine a fluido organico (ORC: Organic Rankine Cycle) sono una soluzione molto promettente per la cogenerazione a biomassa
 - ❖ filiera corta con potenze tra i 250 e i 2500 kWe per unità.
- Vantaggi
 - ❖ elevata disponibilità
 - ❖ costi di manutenzione contenuti
 - ❖ funzionamento completamente automatico
 - ❖ alta efficienza elettrica
- Il principio di generazione di energia elettrica attraverso un ciclo ORC corrisponde al ciclo Rankine convenzionale
 - ❖ utilizzo di un fluido organico (olio diatermico)

Cogenerazione con ciclo Rankine a fluido organico

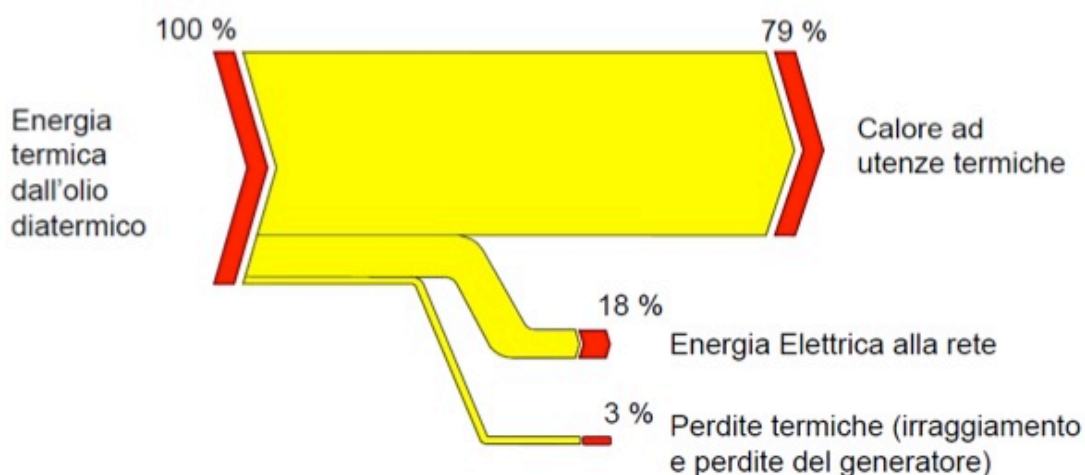
- Vantaggi nell'utilizzo del fluido diatermico
 - ❖ bassa pressione nella caldaia
 - ❖ elevata inerzia termica (stabilità nei cambiamenti di carico)
 - ❖ semplicità e sicurezza di regolazione e controllo
 - ❖ temperatura utilizzata (circa 300°C) nella parte calda dell'impianto assicura lunga durata all'olio diatermico
 - ❖ consente il funzionamento senza un operatore patentato

Cogenerazione con ciclo Rankine a fluido organico

- Il fluido di lavoro organico pressurizzato viene vaporizzato e surriscaldato per mezzo dell'olio diatermico nell'evaporizzatore e successivamente espanso in una turbina assiale direttamente connessa al generatore asincrono
- In un secondo momento, il fluido organico passa attraverso un rigeneratore (dove avviene un recupero di calore) prima di entrare nel condensatore
- La condensazione del fluido di lavoro avviene a un livello di temperatura che permette l'utilizzazione del calore recuperato in sistemi di teleriscaldamento o in processi industriali.

Cogenerazione con ciclo Rankine a fluido organico

- Efficienza elettrica 18-19%
- Efficienza totale di sistema 97%

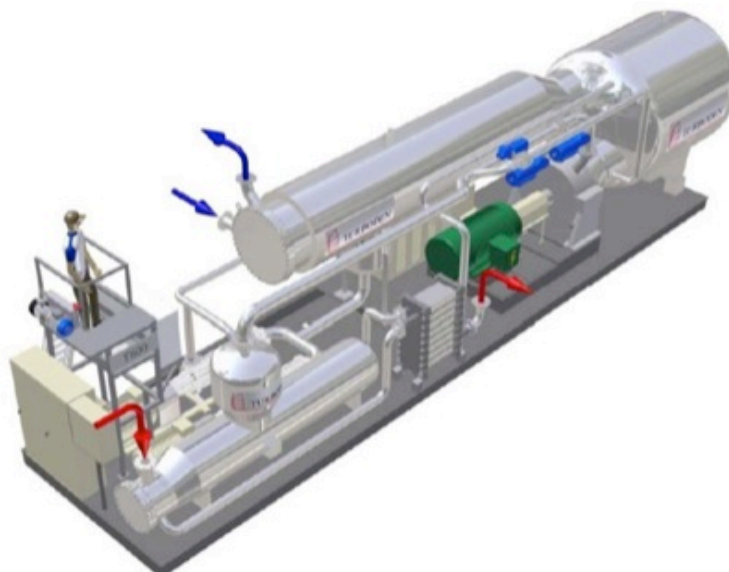


Cogenerazione con ciclo Rankine a fluido organico



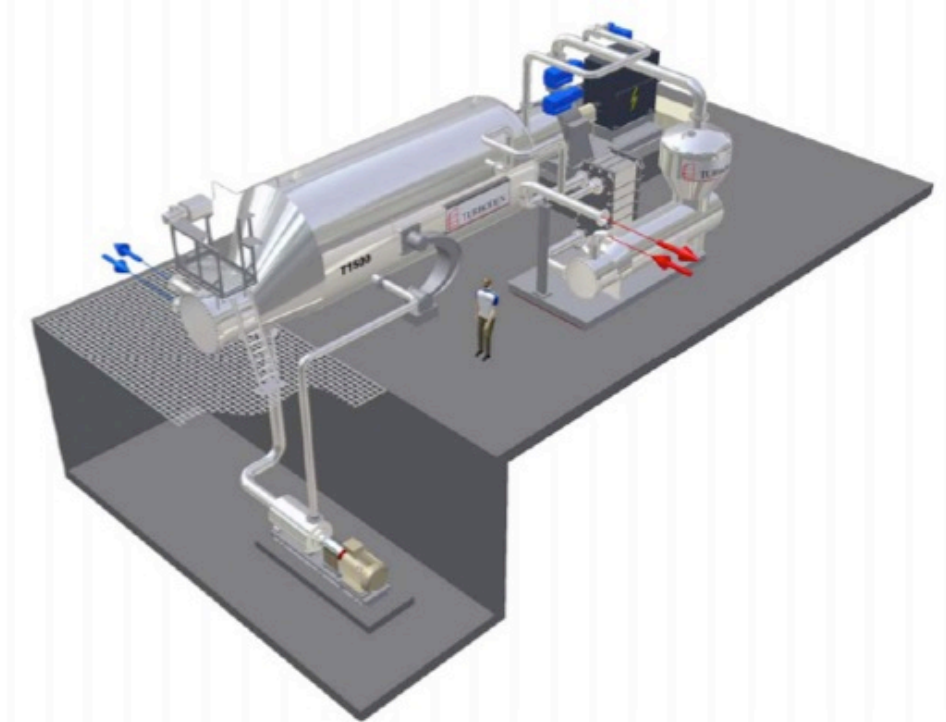
Cogenerazione con ciclo Rankine a fluido organico

- **Modello da 600 kWe**



Cogenerazione con ciclo Rankine a fluido organico

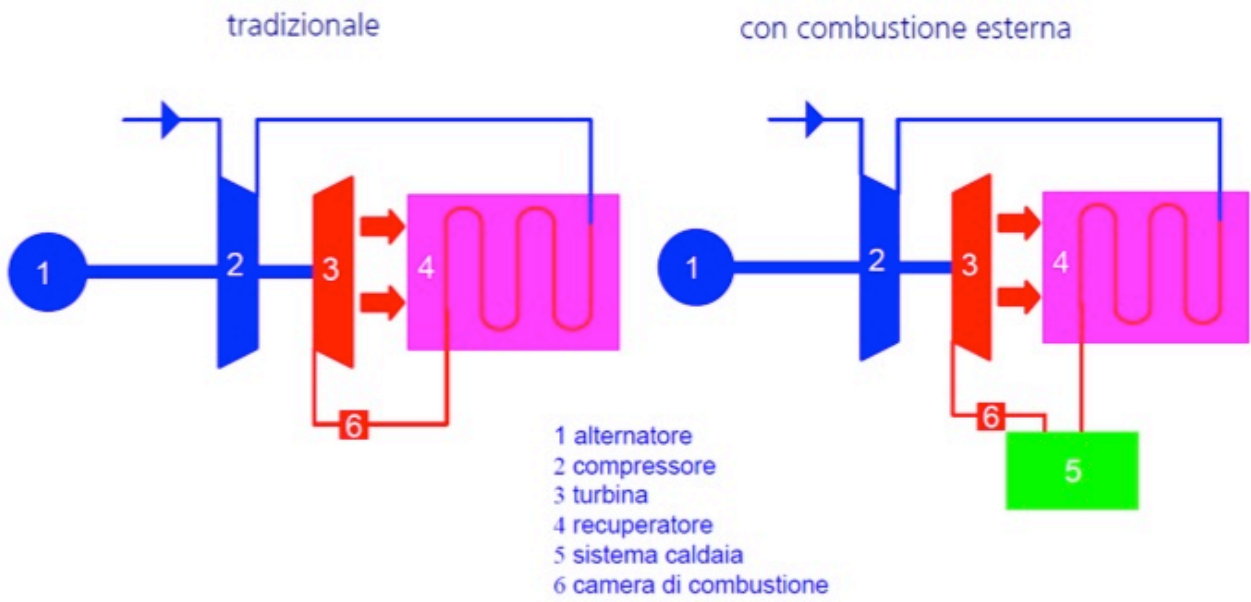
- **Modello da 1500 kWe**



Microturbina

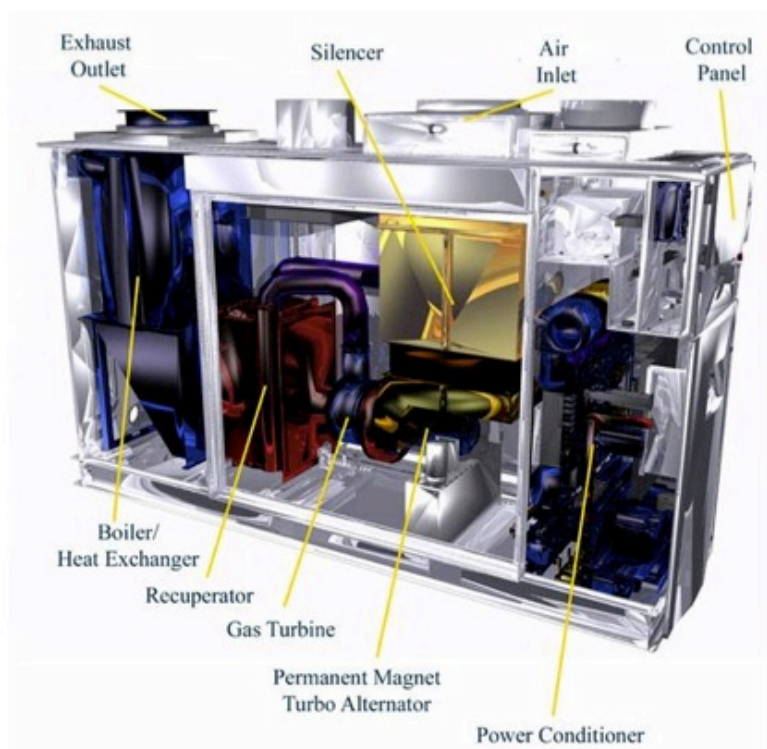
- **L'impianto con microturbina**
 - ❖ una caldaia alimentata a biomassa lignocellulosica
 - ❖ una microturbina a gas modificata per la connessione con il sistema a combustione esterna
 - ❖ un sistema di controllo in grado di gestire l'intero sistema senza apporto di combustibile tradizionale, durante tutte le fasi (avviamento, marcia, arresto)

Microturbina



Fonte: Giglioli 2005

Microturbina



Gassificazione

- **Tipologia applicative di impianti di gassificazione con taglie medio-piccole**
 - ❖ **gassificatore con uso di motori endotermici**
 - ❖ **gassificatore con uso di motori esotermici**
 - ✓ **motori stirling**

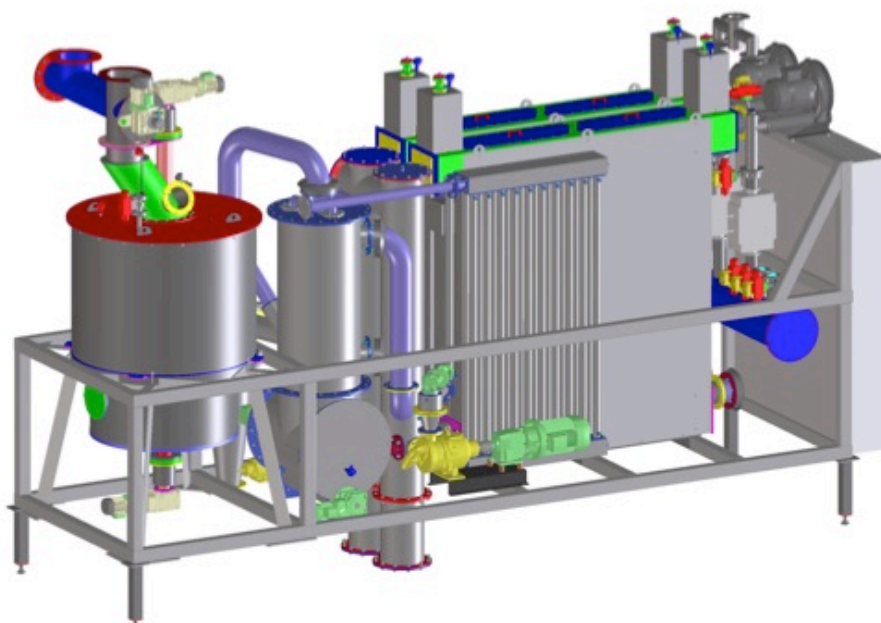
Gassificatore con uso di motori endotermici

- **Gassificatore (costituito da un reattore di gassificazione downdraft)**
- **Sistemi di filtrazione del gas**
 - ❖ **cycloni**
 - ❖ **scrubber**
 - ❖ **filtri elettrostatici**
- **Essiccatoio per la riduzione dell'umidità della biomassa in ingresso**
 - ❖ **fumi del motore endotermico**
- **Gruppo elettrogeno con motore diesel**

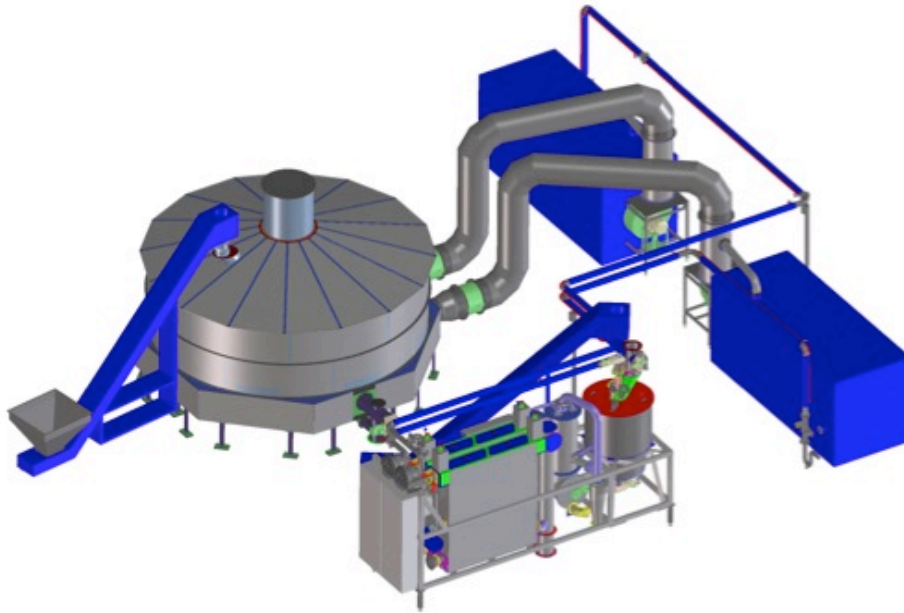
Gassificatore con uso di motori endotermici



Gassificatore con uso di motori endotermici



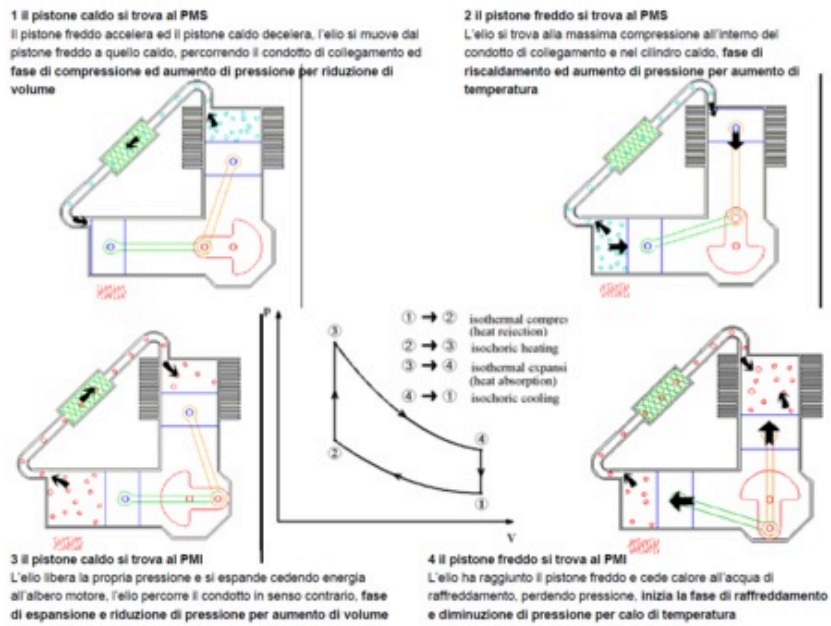
Gassificatore con uso di motori endotermici



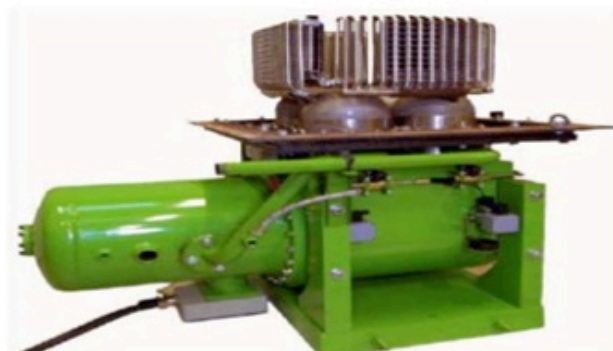
Gassificatore con uso di motori esotermici

- Gassificatore updraft che produce gas combustibile a partire da cippato
- Generatore di calore dove il gas viene bruciato
 - ❖ contatto con la testata del motore Stirling
- Motori Stirling
- Accumulatore termico

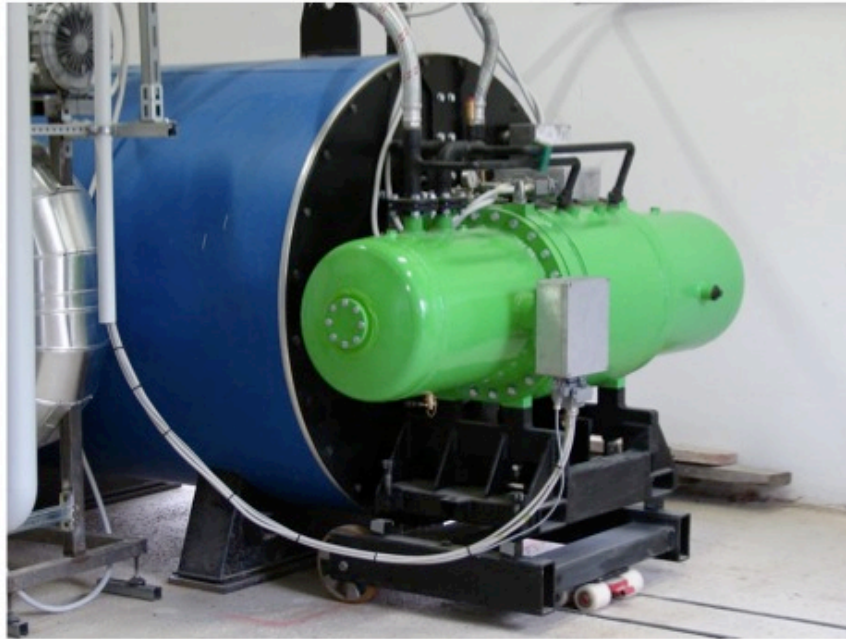
Motore Stirling



Gassificatore con uso di motori esotermici

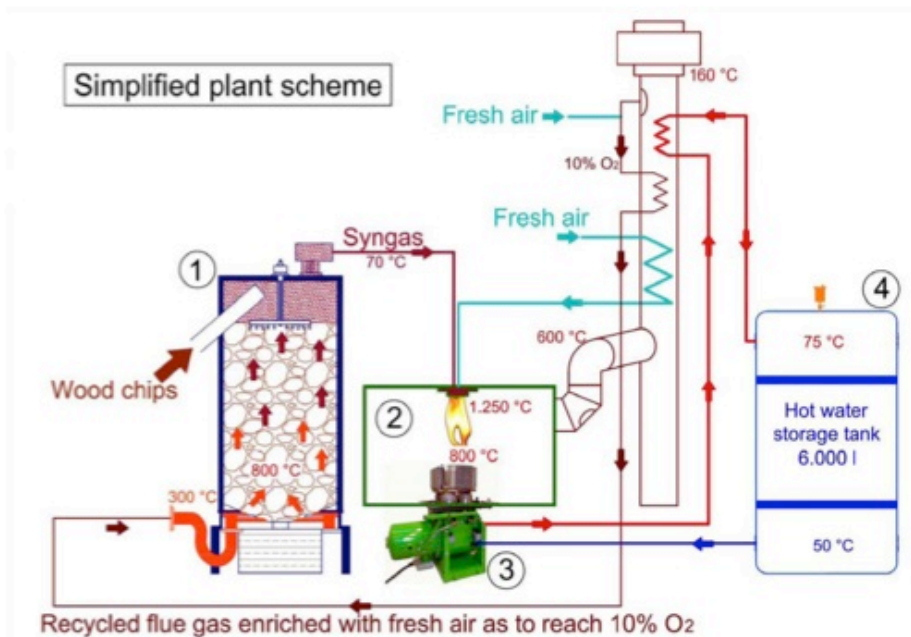


Gassificatore con uso di motori esotermici



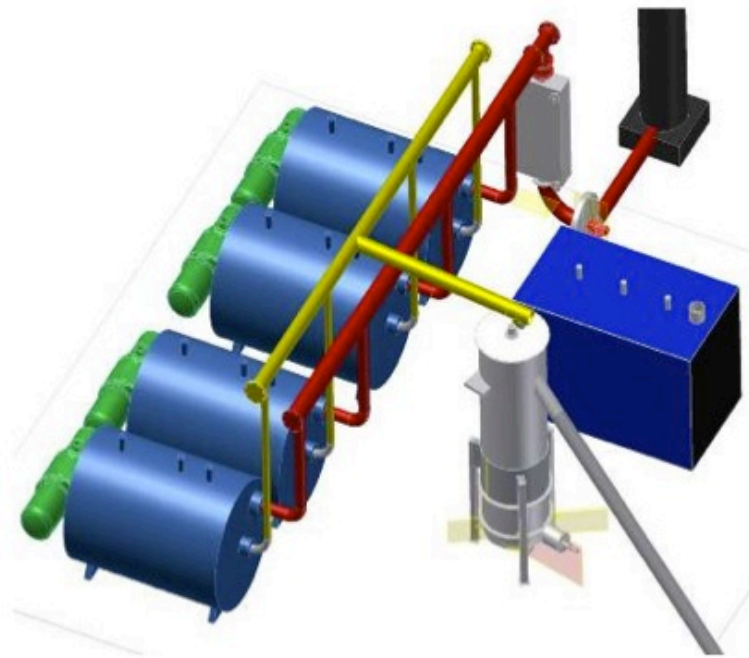
Fonte: Marini 2007

Gassificatore con uso di motori esotermici



Fonte: Marini 2007

Gassificatore con uso di motori esotermici



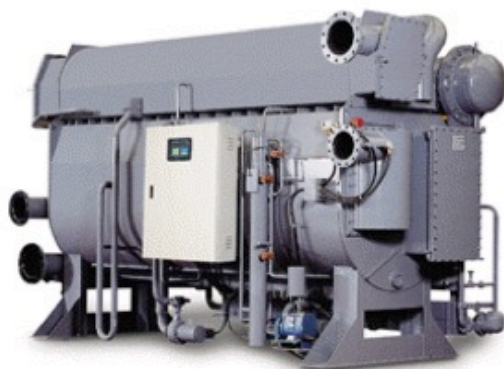
Fonte: Marini 2007

Energia frigorifera

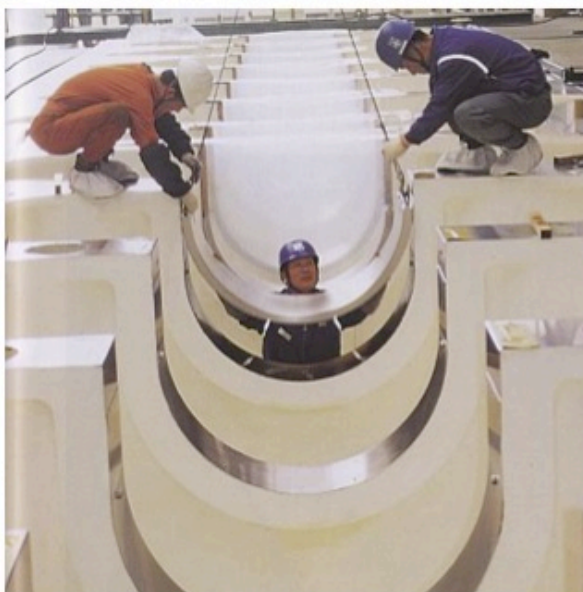
- **Con le attuali tecnologie termosolari è possibile ottenere anche energia frigorifera**
 - ❖ **per refrigerazione con temperatura fino a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ utilizzando il ciclo frigorifero ad assorbimento acqua/ammoniaca**
 - ❖ **per processi industriali con temperatura fino a $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ utilizzando il ciclo frigorifero ad assorbimento acqua/silica gel**
 - ❖ **per condizionamento con temperatura fino a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ utilizzando il ciclo frigorifero ad assorbimento acqua/bromuro di litio**

Energia frigorifera (Chiller)

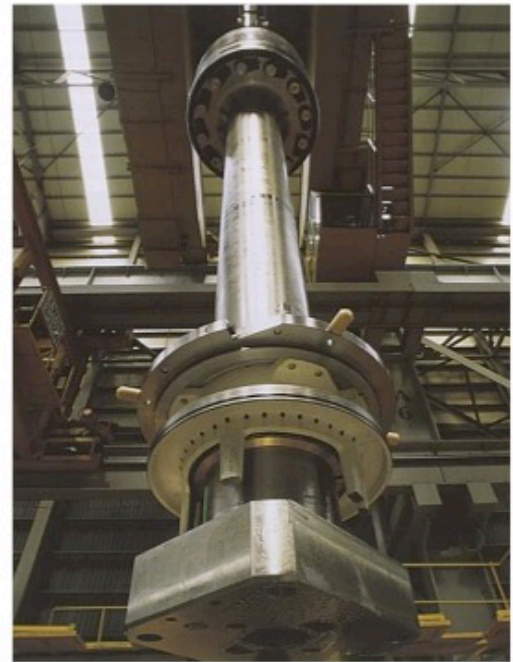
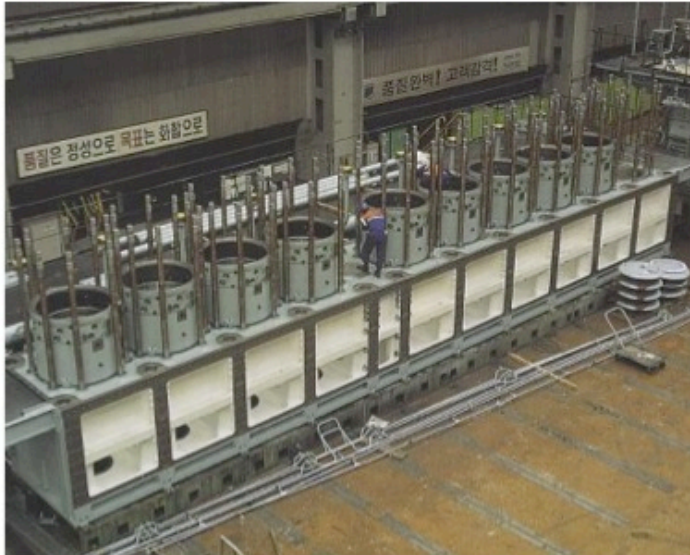
- refrigeratore ad assorbimento alimentato da fluido caldo
 - ❖ la trasformazione dell'energia termica in energia frigorifera è resa possibile dall'impiego del ciclo frigorifero ad assorbimento il cui funzionamento si basa su trasformazioni di stato del fluido refrigerante in combinazione con la sostanza utilizzata quale assorbente
 - ❖ il calore di input può essere dato da una caldaia a gas ma anche dal fluido caldo dei sistemi termosolari



Il più potente motore diesel navale del mondo



Il più potente motore diesel navale del mondo



Il più potente motore diesel navale del mondo

- **Versione da 14 cilindri**
 - ❖ motore alternativo due tempi turbo
 - ❖ cilindrata di 1.820 litri per pistone
 - ❖ potenza di 80.080 kW
 - ❖ 92-102 giri al minuto
 - ❖ peso di 2.086 tonnellate
 - ❖ consumo medio di circa 6.000 litri/ora
 - ❖ rendimento oltre il 50%



Caratteristiche degli impianti termici e cogenerativi a biomasse

121

Tecnologia	Caldaia biomassa (1)	Turbina vapore (2)	Turbina ORC (2)	Microturbina	Gassificatore downdraft con motore endotermico	Gassificatore e updraft con motore esotermico	Motore a olio vegetale
Taglia dell'impianto (MW)	1-20	1-800	0,25-2,5	0,1-0,5	0,1-1	0,03-0,2	0,03-8
Potenza elettrica (%)	-	18-30	17-18	12-15	21-23	17-18	35-45
Potenza termica (%)	80-90	60-70	78-80	40-60	45	60-70	40-45
Costo (k€/kW)	0,20-0,35	0,5-2 ⁽³⁾	1-3 ⁽³⁾	9-11	4-5	7-8	0,7-1,5

(1) Solo calore per il riscaldamento

(2) Senza il rendimento termico della caldaia (80-90%)

(3) Senza il costo della caldaia per il gruppo cogenerativo (1.000 €/kW)