



**Sistemi energetici di piccola taglia,  
gassificazione e uso di motori Stirling**

***Biomasse: prospettive di uso energetico in Emilia-Romagna  
e sistemi di calcolo e monitoraggio su GIS***

**Ing. Filippo Marini**

# La cogenerazione da cippato di legno

Durante la progettazione preliminare le tecnologie presenti sul mercato permettevano la cogenerazione da cippato di legno solo per impianti di taglia superiore a 400-600 kWel, associati a reti di teleriscaldamento medio grandi.

Consumi di legno superiori alle **10.000 ton/anno** in zone localizzate

Bacino di approvvigionamento esteso

Forte dispersione di calore nei mesi estivi

Scarso rendimento elettrico

Investimenti economici elevati da parte di società private

## Difficoltà di applicazione nel territorio

Biomasse in genere legnose a basso costo di estrazione (boschi ad alto fusto, buone vie di comunicazione, terreni che permettano una elevata ricrescita annua)

Obbligano la posa di lunghe condotte di teleriscaldamento

# La cogenerazione da cippato di legno

L'impianto di Castel d'Aiano: una esperienza per lo sviluppo della micro-cogenerazione distribuita nel territorio, è stato il primo sistema in Europa a produrre energia elettrica e termica di piccola taglia

Efficienza  
energetica  
elevatissima

Bacino di approvvigionamento  
ristretto ai territori limitrofi

Generazione di energia elettrica e  
termica distribuita nel territorio anche in  
zone difficilmente raggiungibili

Minima dispersione di calore e conseguente  
valorizzazione delle risorse locali

Coinvolgere le realtà  
agricole e forestali locali

Sistema ideale per il territorio dell'Appennino Emiliano



Impianto pilota con monitoraggio  
sui parametri di funzionamento  
per la replicabilità del sistema





# Impianto pilota

Cogenerazione, applicabile a reti di teleriscaldamento per comuni montani dell'Appennino



# Obiettivi

Costruire un modello replicabile nei comuni dell'Appennino Tosco-Emiliano, che permetta:

- lo sviluppo di piccole reti di teleriscaldamento distribuite nel territorio
- l'avviamento di piccole filiere del legno forestale
- Un significativo incremento della produzione di energie rinnovabili

Attraverso una forte innovazione tecnologica, basata sulla tipologia impiantistica della gassificazione di legno, considerata la tecnologia per il futuro delle biomasse agricole; a questa è stata applicata un'altra tecnologia fortemente innovativa, quella dei motori a combustione esterna di tipo Stirling: il connubio fra queste realtà tecniche si ritiene possa portare ad una effettiva applicazione di piccola scala

Innovazione

Occupazione locale

Migliorare la qualità dei servizi

Attenzione verso l'ambiente





The image shows a complex industrial setup. On the right, a large green cylindrical gasifier is mounted on a black base. To its left is a blue cylindrical combustion engine, also on a black base. A network of white pipes connects these units to a stainless steel structure on the left, which includes a vertical pipe and a horizontal tank. The background is a plain white wall with some electrical conduits.

**La concezione dell'impianto:  
gassificazione e motori a combustione  
esterna**

# Impianto di cogenerazione combinato

Produrre energia termica ed elettrica da biomassa vegetale (cippato di legno, sostanze organiche da colture dedicate), abbinando:

Gassificazione



**STIRLINGOK**  
Clean Power Production

Motori a combustione  
esterna di Stirling



# Gassificatore up-draft

I sistemi di gassificazione in controcorrente, un processo ottimale per gli impianti di piccola taglia:

Tenore di polveri estremamente basse



Pulizia in camera di combustione, basse concentrazioni di polveri nei fumi senza la necessità dell'utilizzo di sistemi di abbattimento

Processo semplice



Facilità di controllo e di regolazione in funzione della tipologia legnosa in ingresso

Elevata stratificazione termica e processi termochimici agevolati in presenza di acqua



Biomassa con  $W=50-60\%$   
Temperature di combustione minori  
Utilizzo di biomassa meno nobile





# Combustione diretta del gas di legno

Il gas di legno viene bruciato direttamente in camera di combustione senza nessun tipo di purificazione a temperature di fiamma molto elevate

La combustione di gas non presenta residui, polveri e ceneri volatili

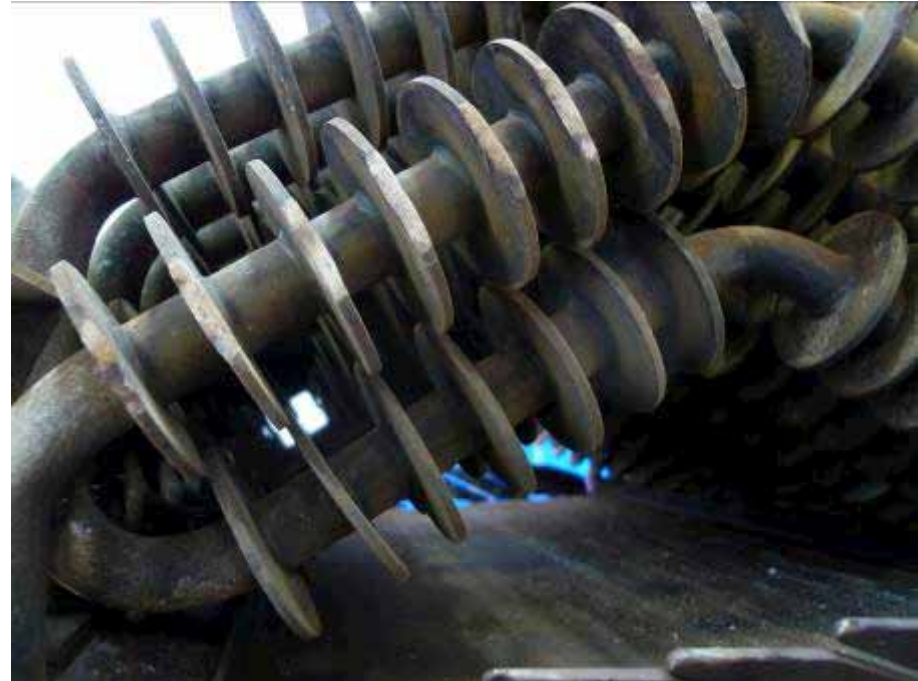


Assenza di depositi in camera di combustione e sui fasci tubieri

Controllo di processo semplice e accurato



Rendimenti elevati

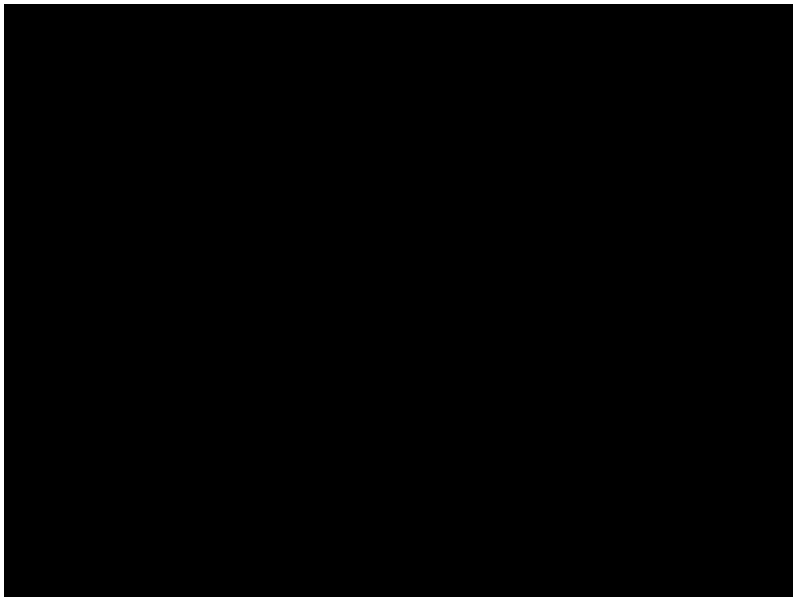


*Scambiatore di calore del motore Stirling dopo 1.000 ore di lavoro*

Utilizzo di aria preriscaldata a 550 °C con temperature elevate in camera di combustione e incremento della qualità dell'energia



Processi termodinamici più efficienti



# Conversione energetica tramite motori a combustione esterna

Il calore viene utilizzato dal ciclo Stirling per produrre energia elettrica e termica, il combustibile non entra mai a contatto con gli organi interni del motore

Assenza di corrosione e deterioramento degli componenti interni in movimento

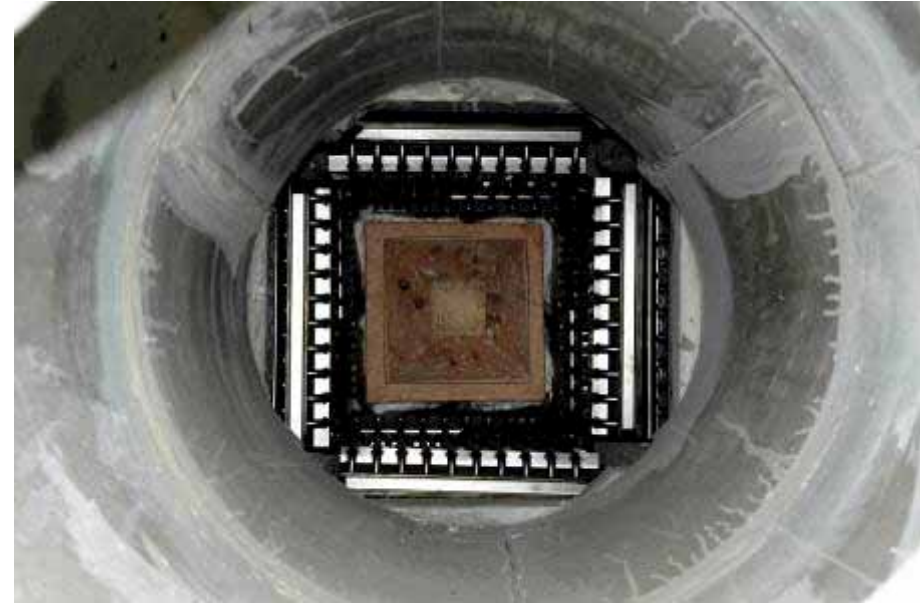


Minimizzazione delle operazioni di manutenzione e lunga durata del motore

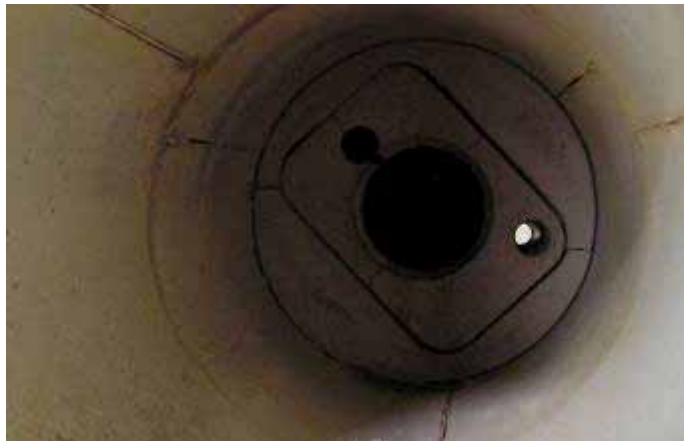
Assenza di sistemi di pulizia del gas



Impianto semplice con bassa manutenzione



*Scambiatore di calore dentro la camera di combustione, unico elemento a contatto con i gas combusti*



*Particolare camera di combustione dopo 1.000 ore di lavoro*

Assenza di lubrificanti



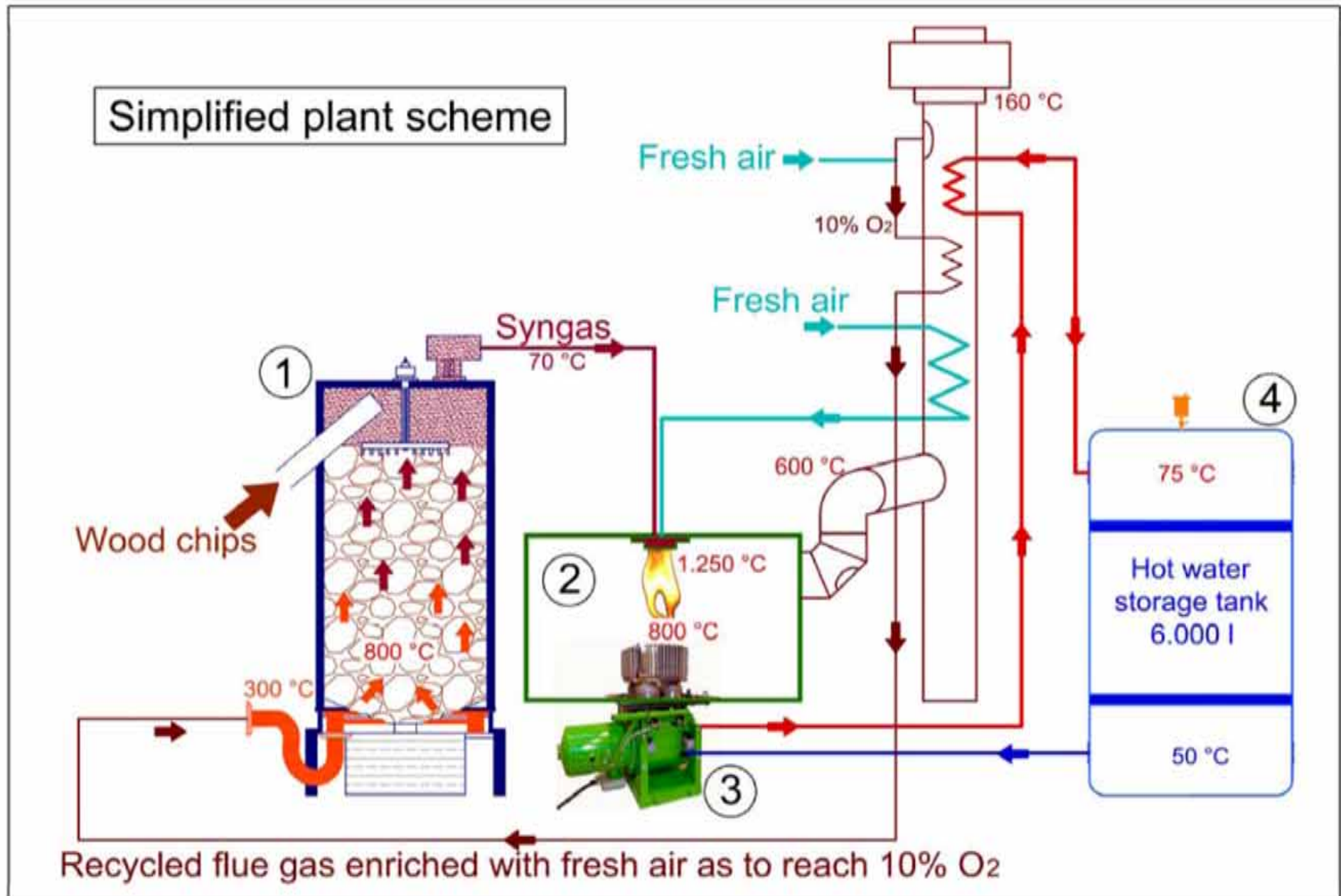
Lunghi periodi di esercizio senza necessità di manutenzione, sostituzione integrale dei componenti di consumo (cuscinetti e fasce di tenuta)

A photograph of an industrial facility. The central focus is a large, horizontal cylindrical tank with a blue upper section and a bright green lower section. This tank is connected to a complex network of stainless steel pipes and white PVC pipes. To the left, there are several vertical stainless steel pipes and a smaller cylindrical component. The entire system is supported by a metal frame. The background shows a white wall with some electrical conduits and a yellow light fixture. The floor is a light-colored, possibly concrete or stone tile.

# Caratteristiche dell'impianto



# Schema di funzionamento



## Parametri principali

Funzionamento 5.800 ore/anno

1.160 MWh  
energia  
primaria

435 t/anno  
W=40 %

480 MWh  
energia  
termica

20 famiglie



200 MWh  
energia  
elettrica

68 famiglie





## Confronto con altre FER

Funzionamento

5.800 ore/anno

200.000 kWh energia elettrica

180 kW fotovoltaico

1.500 m<sup>2</sup> di pannelli

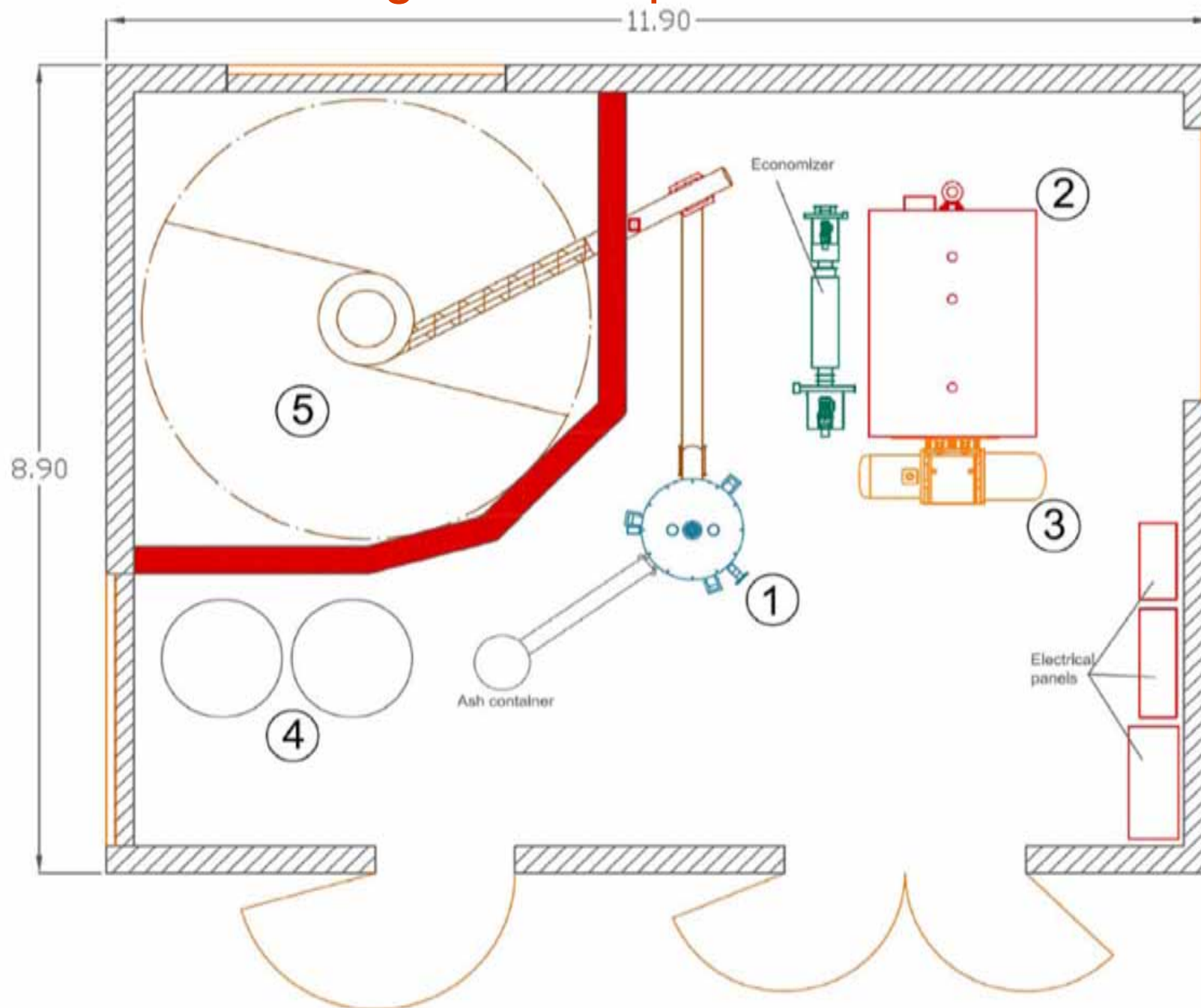


140 kW eolico

7 pale da 20 kW alte  
25-30 m



# Ingombri e opere edili





# Tipologie di biomassa



## Valutazione dei processi termo-chimici

Ipotesi del processi fondamentali nelle varie zone del gassificatore, calcolo dei tempi di permanenza del legno durante le varie fasi di degradazione e analisi dei campioni.





sample number		7626	7627	7628	Database values (based on mentioned samples)			
sample name		Robinia I	Lafenice II	Castel III	av.	min.	max.	samples
C	[mg/kg TS]	451.600	452.700	478.500	516.326	304.000	590.000	48
H	[mg/kg TS]	53.300	54.200	56.800	57.448	36.000	62.400	16
N	[mg/kg TS]	5.060	1.670	4.610	11.495	340	59.300	48
S	[mg/kg] TS	516	146	383	530	100	1.800	39
Cl	[mg/kg] TS	232	25	120	178	10	1.645	39
Si	[mg/kg] TS	16.600	30.700	17.900	2.415	239	9.265	23
Ca	[mg/kg] TS	20.900	3.890	9.360	4.175	869	18.730	61
Mg	[mg/kg] TS	2.980	831	1.030	805	144	1.767	61
K	[mg/kg] TS	4.160	2.570	3.750	3.110	503	8.408	61
Na	[mg/kg] TS	863	902	633	85	20	235	61
Al	[mg/kg] TS	3.060	5.080	3.710	225	26	1.641	51
Fe	[mg/kg] TS	1.490	2.030	1.730	142	32	770	54
Mn	[mg/kg] TS	45	62	113	395	64	1.247	52
Zn	[mg/kg] TS	26	14	49	36	7	104	61
Ba	[mg/kg] TS	35	48	123	0	0	0	6
GCV	[kJ/kg TS]	17.500	17.300	18.900	18.601	15.607	20.040	10
W	%	49,10	55,60	55,40				
Aschegehalt	Anteil v. 1	0,113	0,103	0,085				
softening point	[ °C ]	1.230	1.170	1.180				
hemisere piont	[ °C ]	1.260	1.300	1.230				
ash flow point	[ °C ]	1.260	1.430	1.240				

## Test con cippato di legno

Per caratterizzare in modo chiaro il funzionamento dell'impianto con diverse tipologie di essenze, di umidità e pezzatura, si sono svolti alcuni test con differenti tipologie di legno, in modo da definire anche i limiti di umidità e quali essenze legnose siano più adatte alla gassificazione.

Le analisi chimiche hanno rilevato una presenza elevata di minerali, probabile concausa dei problemi in fase di gassificazione



Parametri caratteristici		Robinia I	Lafenice II	Castel III
LEGNO	umidità [%]	49,1	55,6	55,4
	potere calorifico sul secco [kJ/kg]	17.500	17.300	18.900
	punto di fusione delle ceneri [°C]	1.260	1.430	1.240
	percentuale ceneri [%]	11,3	10,3	8,5
	Consumo [kg/h]	82	85	85
IMPIANTO	depressione media in camera di combustione [mmW]	32,6	34,8	35,0
	T fumi dopo lo scambiatore del motore Stirling [°C]	830	836	832
	T fumi al camino [°C]	205	203	202
	P termica utile al teleriscaldamento [kWth]	132	134	132
MOTORE	P elettrica motore Stirling [kWe]	29,4	28,1	28,0
	P termica motore Stirling [kWth]	94,6	93,4	93,4
	T media cilindri [°C]	610	593	585
	T media heater [°C]	708	696	691
GASSIFICAT ORE	T pirolisi [°C]	650	648	648
	T gas in uscita [°C]	70	70	70
	T miscela di gassificazione [°C]	345	338	332
CENERI	quantità [kg/h]	4,1	4,3	4,3
	colore	Grigio chiaro	Nocciola	Nocciola
	consistenza	Polvere	Polvere	Polvere
	granulometria	fine	fine	fine
FUMI (in riferimento all'11% di O <sub>2</sub> residuo)	CO [mg/Nm <sup>3</sup> ]	32	39	35
	NO <sub>2</sub> [mg/Nm <sup>3</sup> ]	104	98	99
	SO <sub>2</sub> [mg/Nm <sup>3</sup> ]	12	3	2
	NO <sub>x</sub> [mg/Nm <sup>3</sup> ]	162	158	160
	O <sub>2</sub> [%]	7,9	8,1	8,0

## Test con cippato di legno

I valori ottenuti dai test dimostrano la possibilità di alimentare il gassificatore con legno che abbia le caratteristiche di umidità fino al 50% e con contenuto di ceneri anche elevato, mentre il sistema soffre la presenza di minerali nel legno, di corpi estranei e di pezzature troppo fini. I consumi sono mediamente pari a 70-80 kg/h con W=40%).





## Le coltivazioni dedicate

Sulla base dell'esperienza condotta durante il primo anno di funzionamento, si suppone che con un gassificatore ottimizzato si possa trattare biomassa da coltivazioni dedicate come il miscanto e il pioppo con ottimi risultati.







**Impatto ambientale**



## Analisi fumi

Analizzatore fumi in grado di rilevare il contenuto di CO, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e memorizzare i dati delle misurazioni in una memoria esterna, in modo da archiviare i dati in formato Excel

Valori medi misurati (riferiti all'11% O <sub>2</sub> )		
CO	46	mg/m <sup>3</sup>
NO	96	mg/m <sup>3</sup>
NO <sub>2</sub>	1	mg/m <sup>3</sup>
NO <sub>x</sub>	145	mg/m <sup>3</sup>

Media delle misurazioni di tutti i test nel periodo di monitoraggio

### Plant/stack: Stirlingmotor

Parameter	Unit	Average
Date	dd-mm-yy	29-09-2010
Measuring period	hh:mm	10:15 - 13:23

### Operation parameters

Temperature	°C	188
Flowrate	m <sup>3</sup> (s,d)/h	460

### Concentrations

Particles	mg/m <sup>3</sup> (s,d)	0,44
-----------	-------------------------	------

(s,d) indicates dry gas at standard conditions (0°C, 101,3 kPa)

FORCE Technology

7 October 2010

Ole Schiecher  
Quality assurance

Jørgen Boje  
Project manager

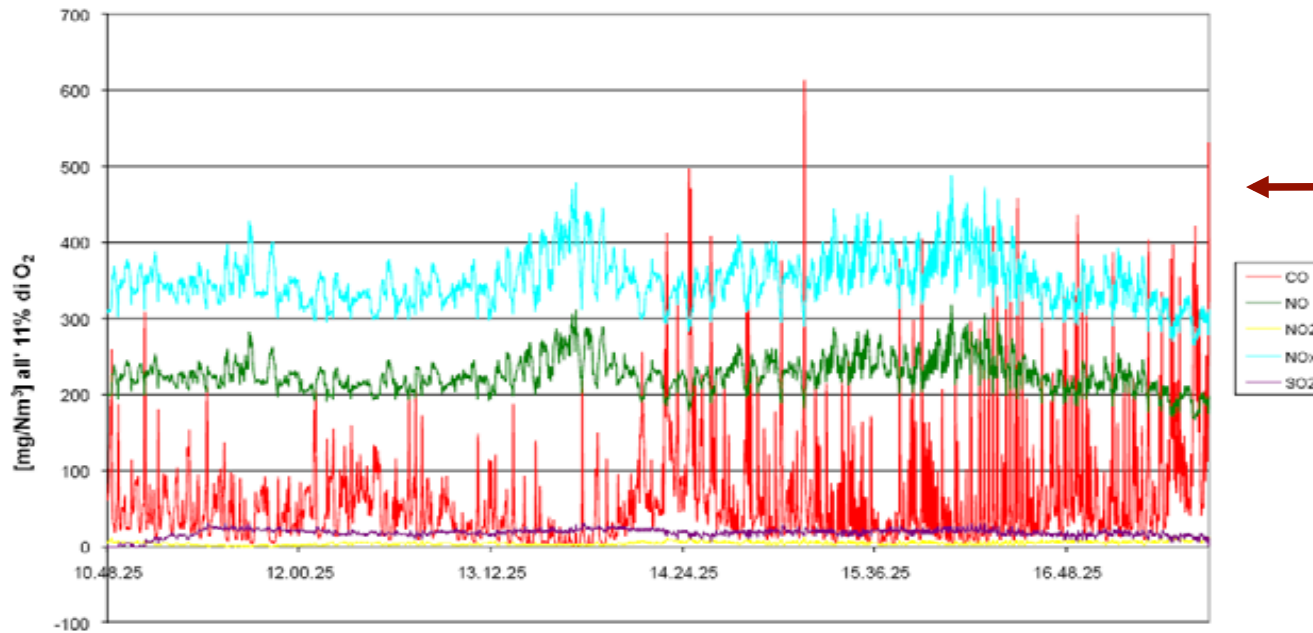
Analisi delle polveri presso il DTU di Lyngby

Potenza termica nominale dell'impianto (MW)	[1] >0,15 ÷ <1
polveri totali	100 mg/Nm <sup>3</sup>
carbonio organico totale (COT)	-
monossido di carbonio (CO)	350 mg/Nm <sup>3</sup>
ossidi di azoto (espressi come NO <sub>2</sub> )	500 mg/Nm <sup>3</sup>
ossidi di zolfo (espressi come SO <sub>2</sub> )	200 mg/Nm <sup>3</sup>

Massimi di riferimento:  
**Allegato IX parte III**  
**sezione 2 del d.lgs. n**  
**°152/2006**

# Analisi fumi

Ottimizzazione della combustione tramite la regolazione elettronica



***Primi test***  
← La regolazione portava a brevi picchi di concentrazioni di CO e valori medi di Nox dell'ordine 350 mg/Nmc

***Ultimi test***  
La regolazione fine della camera di combustione permette concentrazioni di CO e Nox estremamente bassi →





# Analisi fumi

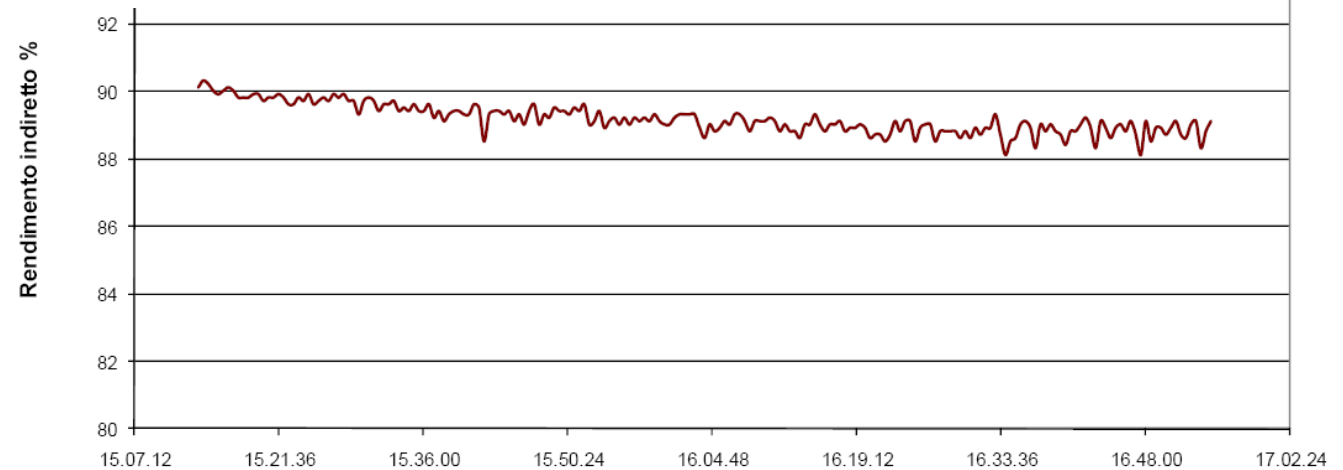
Ottimizzazione della combustione tramite la regolazione elettronica

VALORI MEDI DELL'ANALISI DEI FUMI	
O2 [%]	8,44
CO_11%O2	72,29
NO_11%O2	87,82
NO2_11%O2	0,00
NOX_11%O2	134,15
SO2_11%O2	7,05
T_gas	189,32
T_aria	14,18
CO2 [vol%]	12,16
Efficienza%	89,16
Eccesso_aria	1,67

## Ultimo test 21-10-2010

Ha riportato una regolazione ottimale della combustione con i valori medi riportati a fianco, pur mantenendo un'efficienza del sistema molto elevata

Rendimento indiretto %





A photograph of a massive sequoia tree in a forest. The tree has a thick, reddish-brown trunk and a dense canopy of green needles. The text "Grazie per l'attenzione" is overlaid in the center in a bold, yellow font with a blue outline. The background shows other trees and a clear blue sky.

**Grazie per  
l'attenzione**