

# Dispensa del corso di “SISTEMI ENERGETICI”

**Argomento: Sistemi Energetici (parte 3.2)**

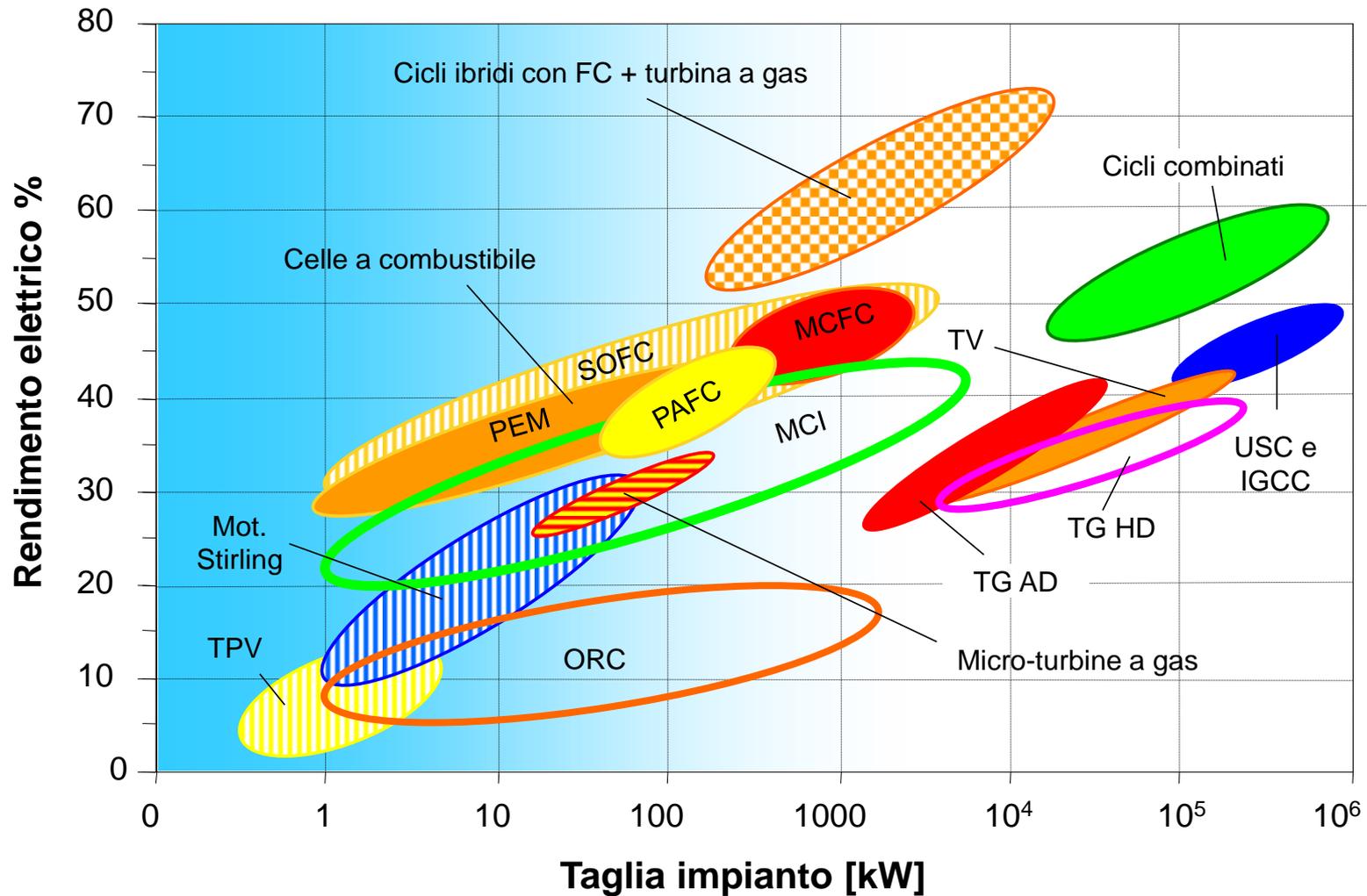
**Prof. Pier Ruggero Spina**  
**Dipartimento di Ingegneria**



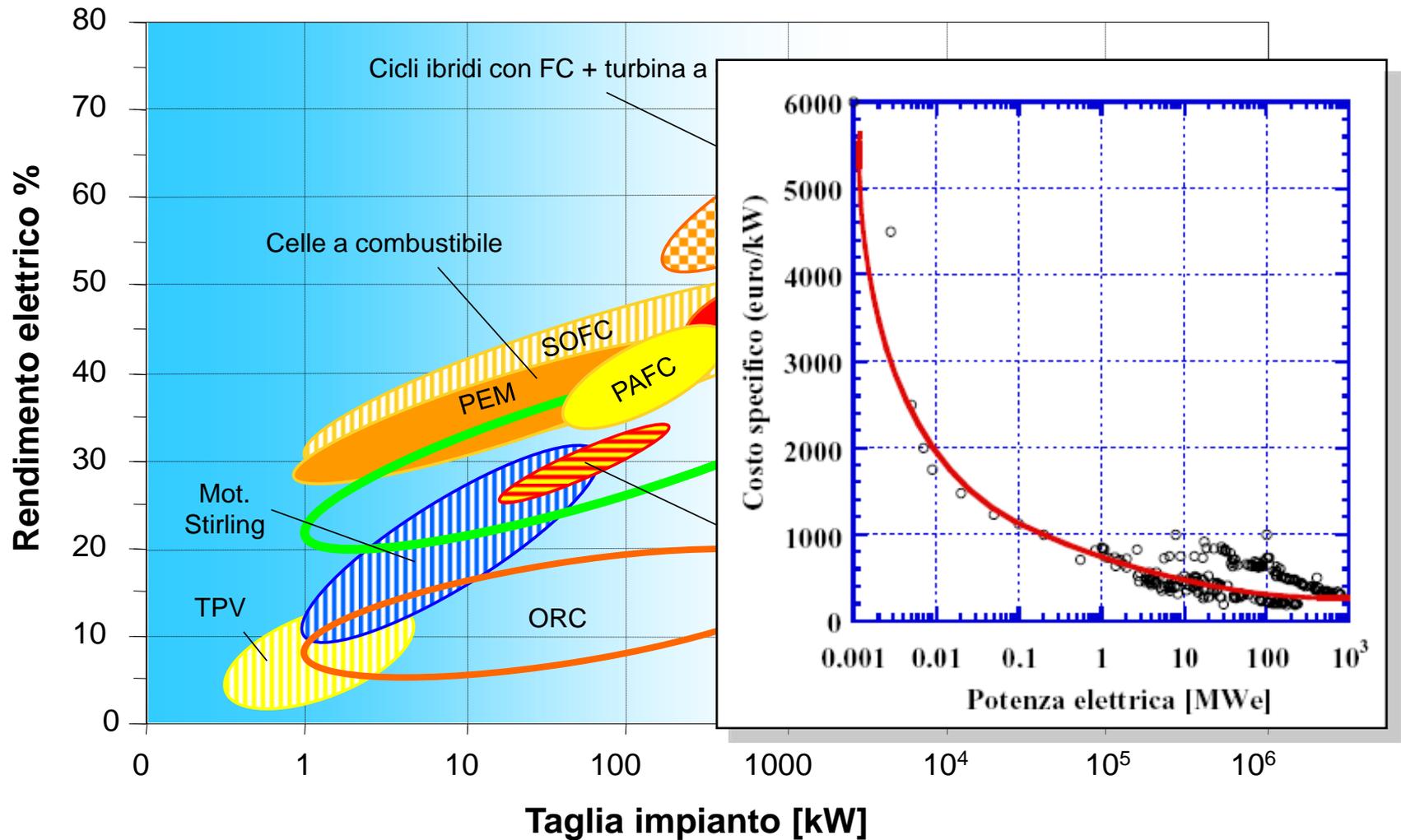
**università di ferrara**  
DA SEICENTO ANNI GUARDIAMO AVANTI.

# **SISTEMI ENERGETICI CONSOLIDATI ED INNOVATIVI PER LA COGENERAZIONE**

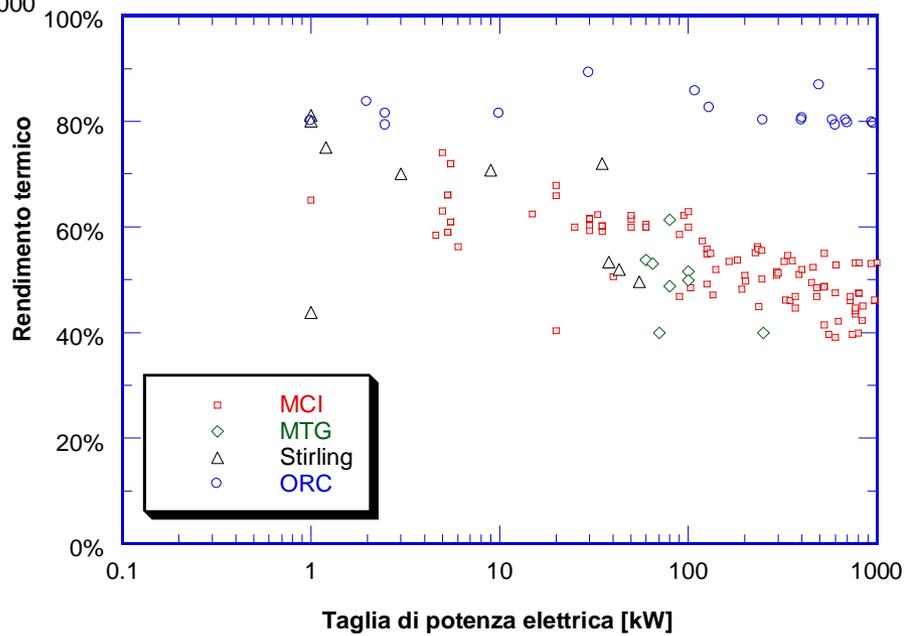
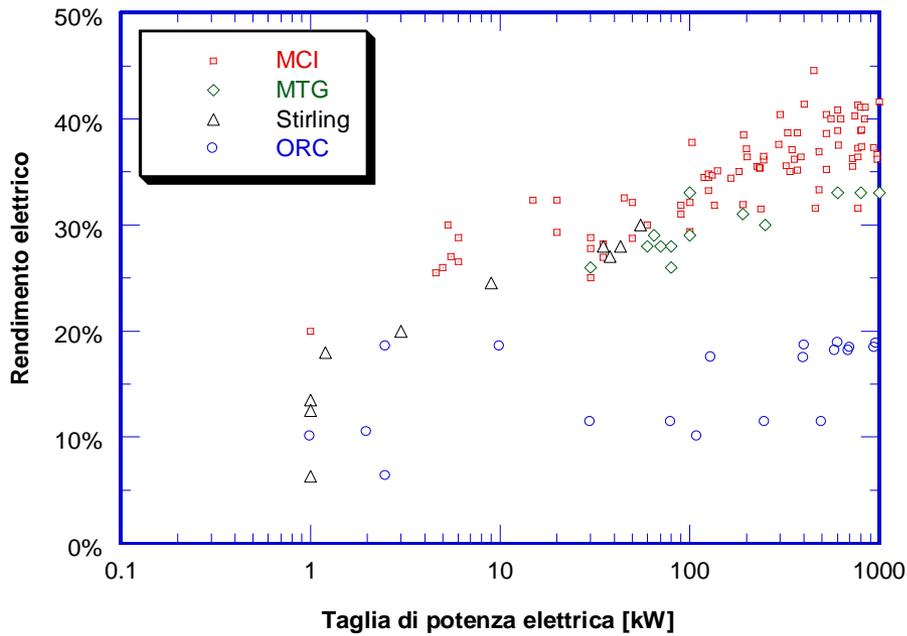
# Le tecnologie di generazione elettrica



# Le tecnologie di generazione elettrica

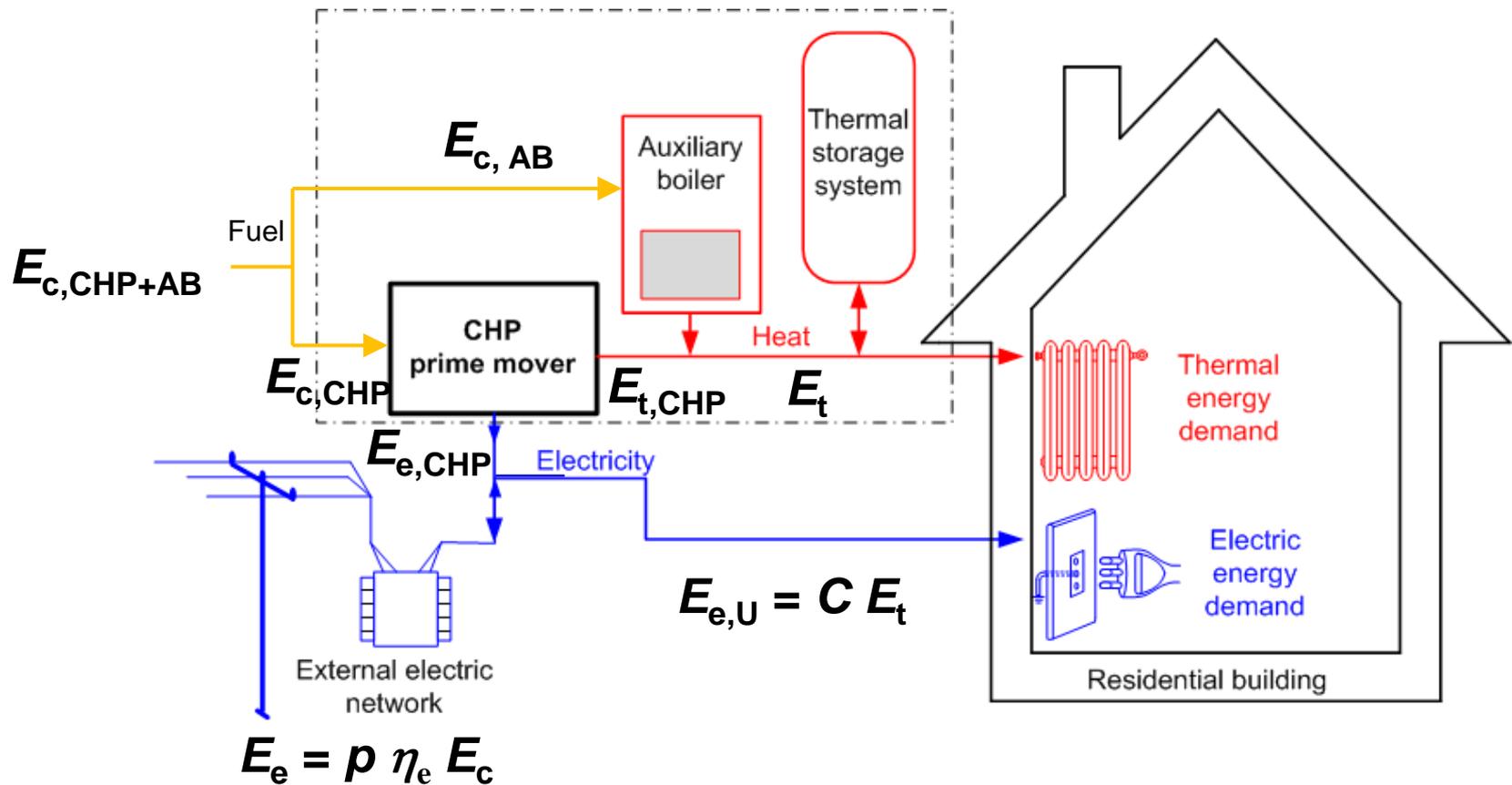


# Confronto tra le tecnologie di piccola cogenerazione

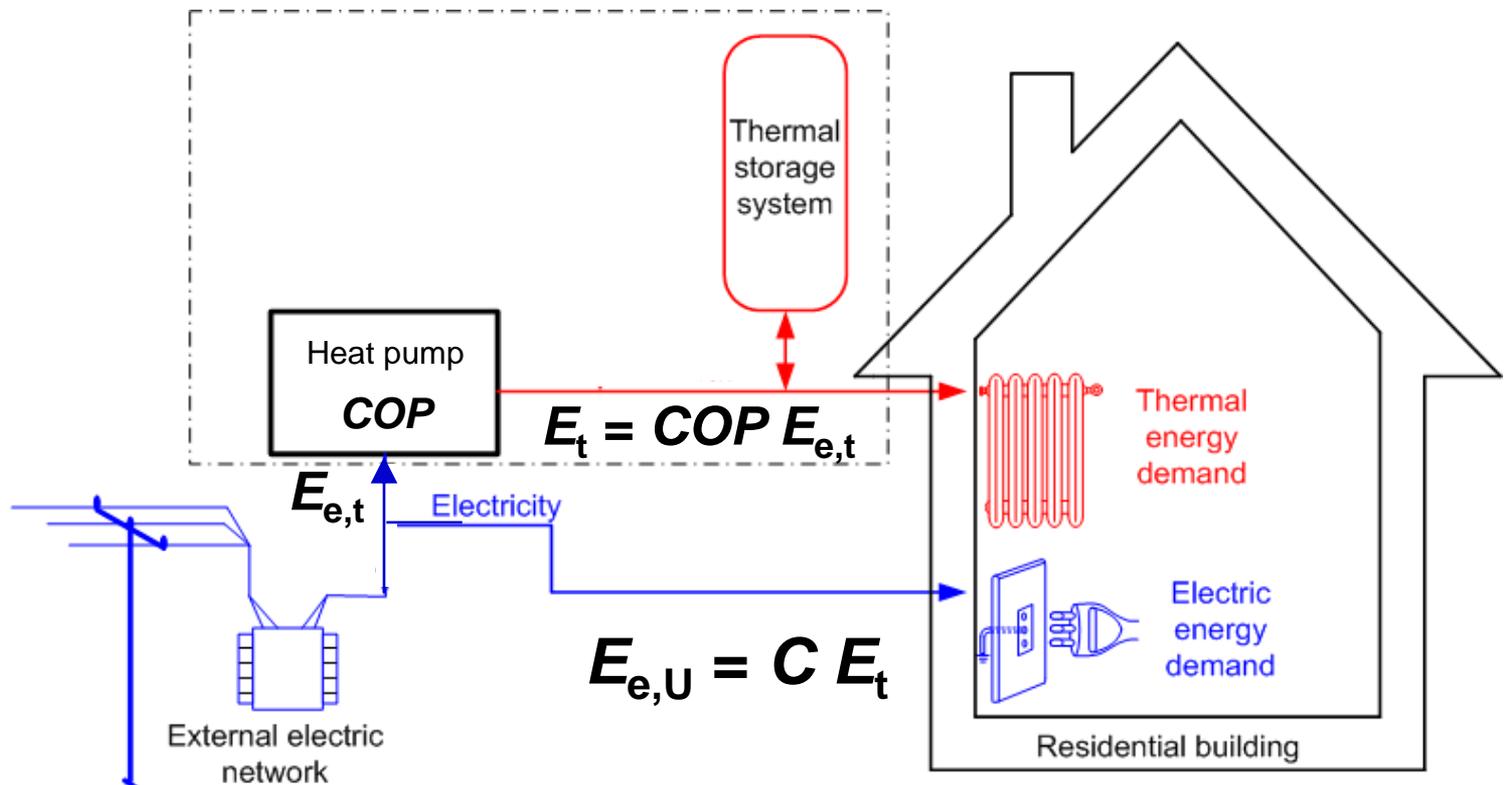




# Cogenerazione per il soddisfacimento del fabbisogno energetico dell'edificio



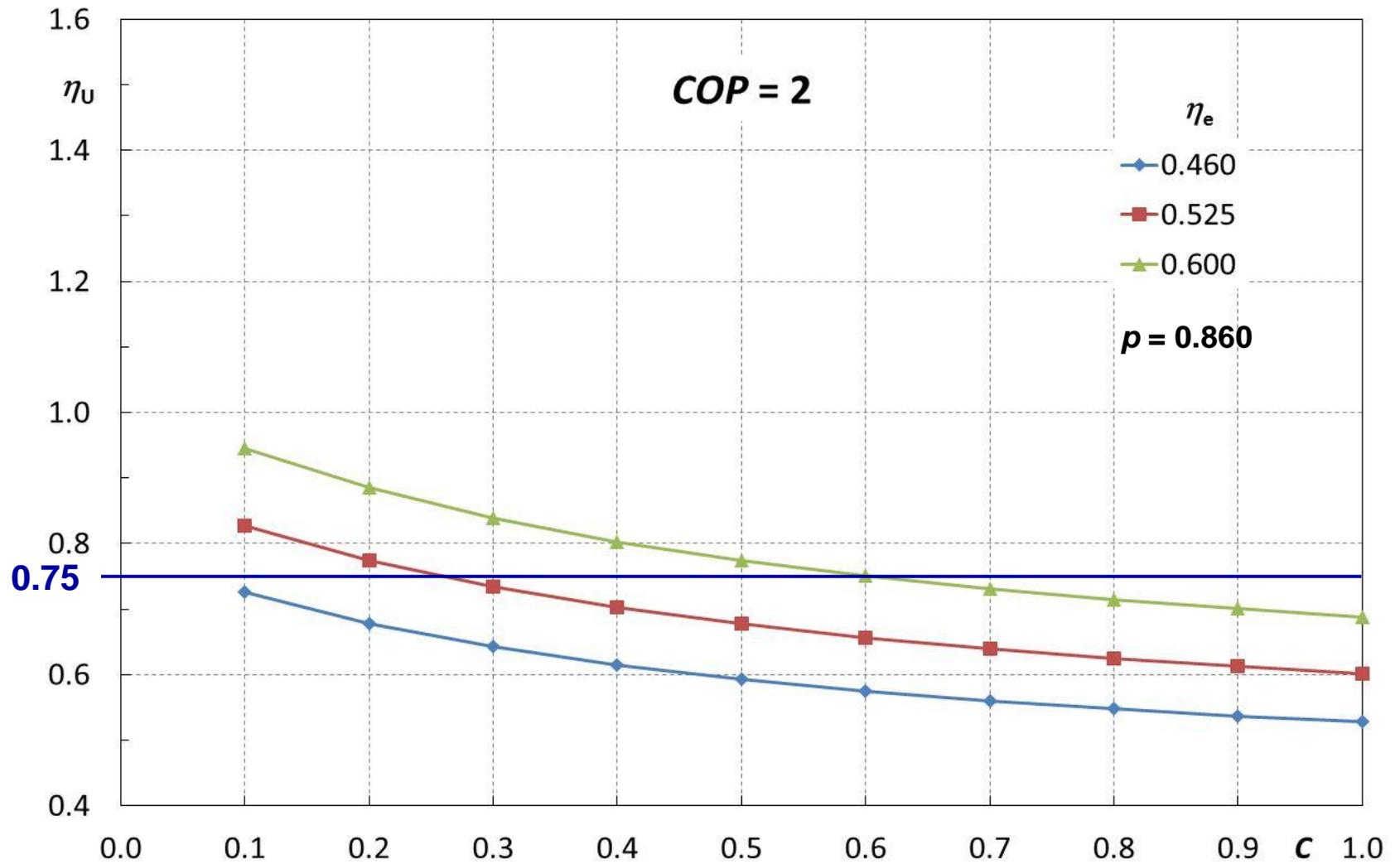
# Rendimento totale equivalente $\eta_U$ con pompa di calore



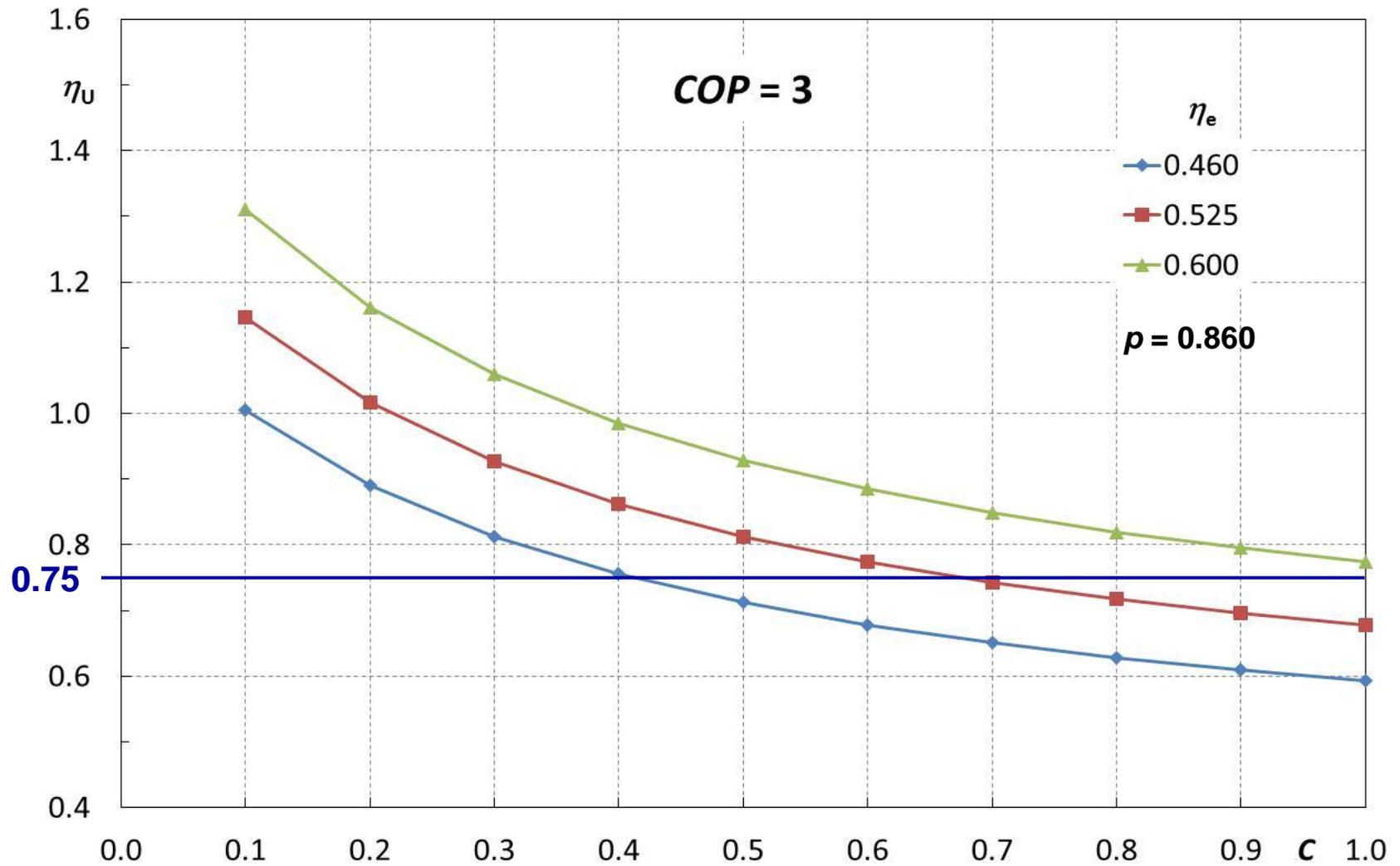
$$E_e = p \eta_e E_c$$

$$\eta_U = \frac{E_{e,U} + E_t}{E_c} = \frac{p \eta_e}{1 + COP \cdot C} COP \cdot (1 + C)$$

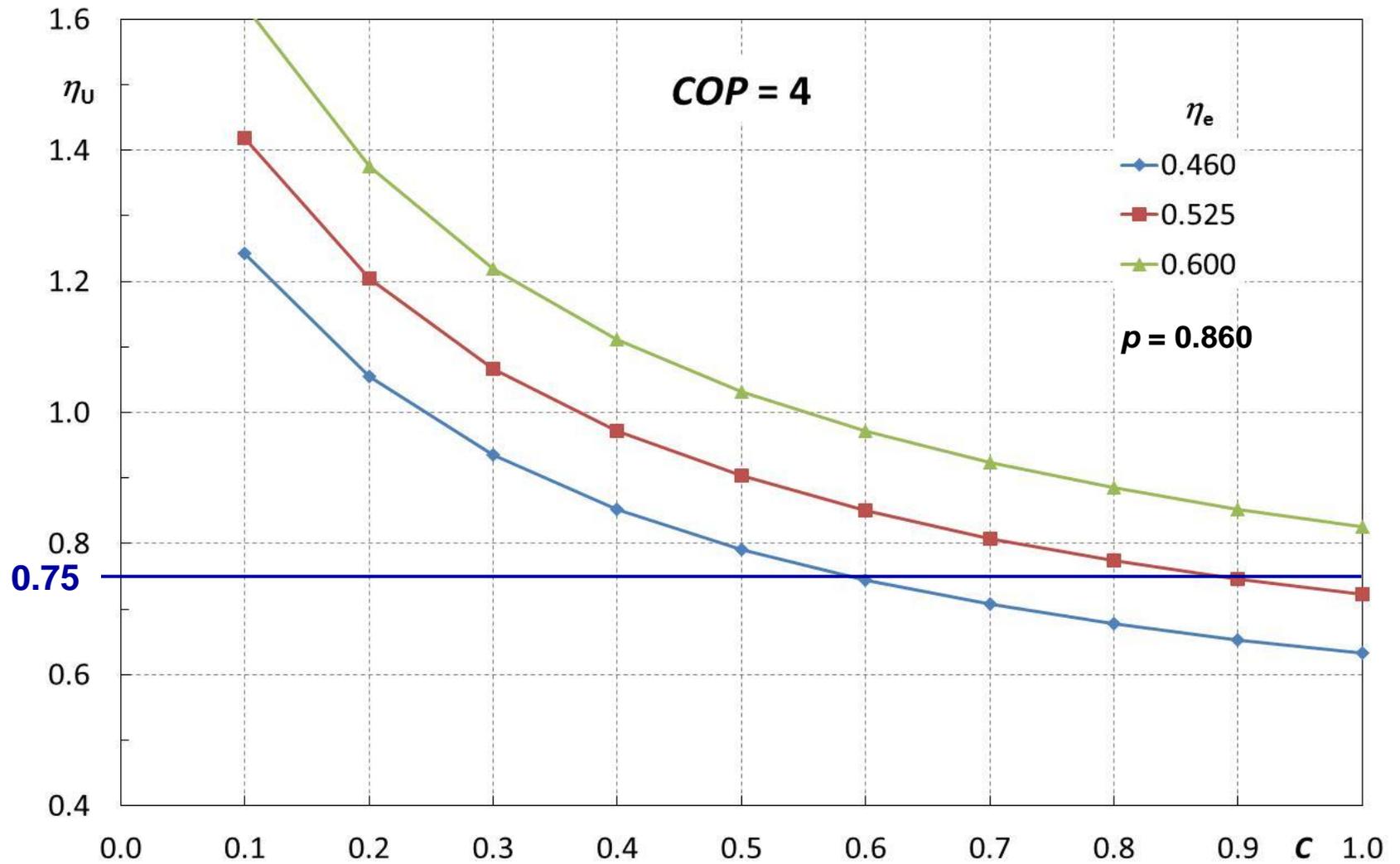
# Rendimento totale equivalente $\eta_U$ con pompa di calore



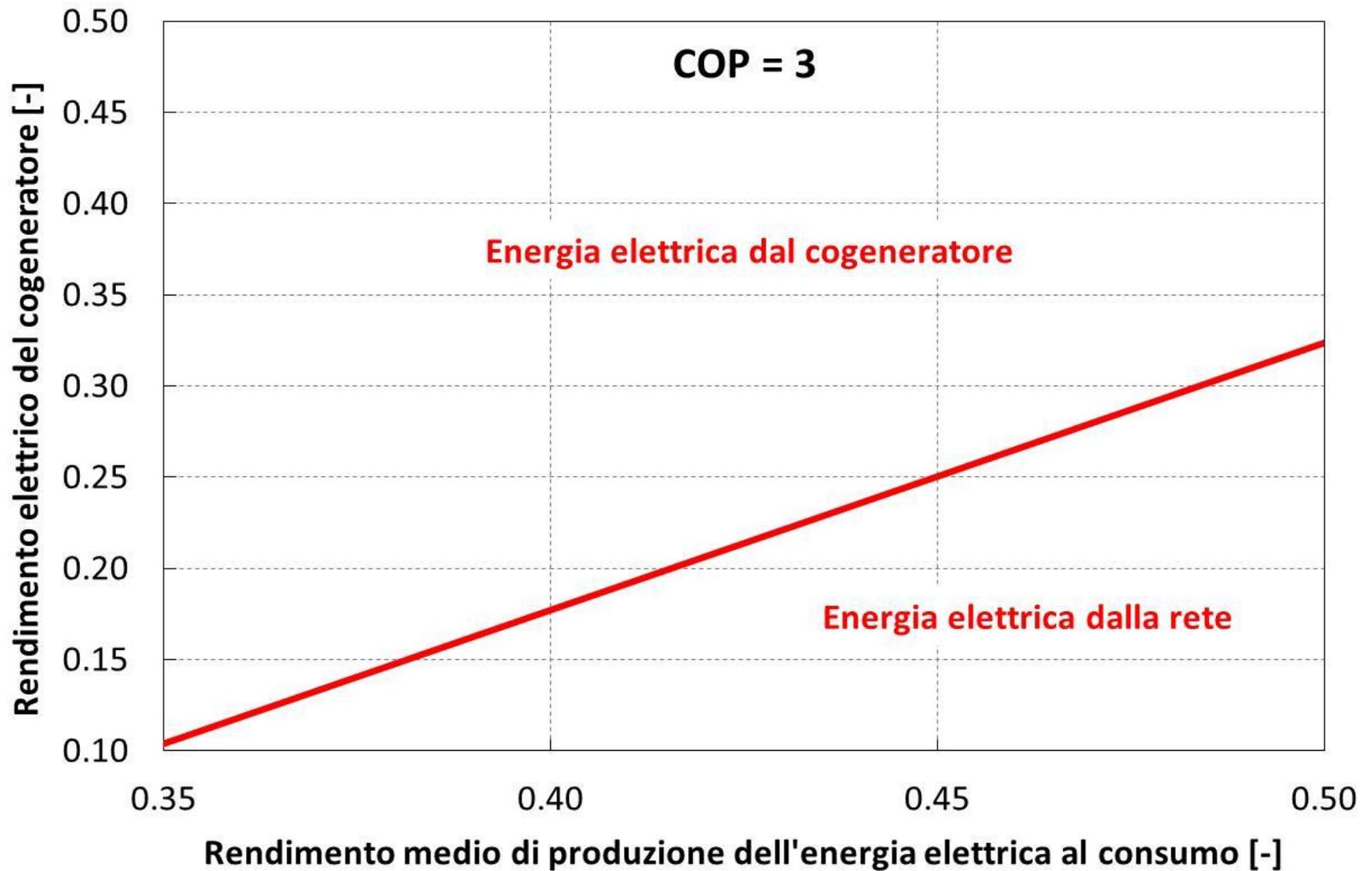
# Rendimento totale equivalente $\eta_U$ con pompa di calore



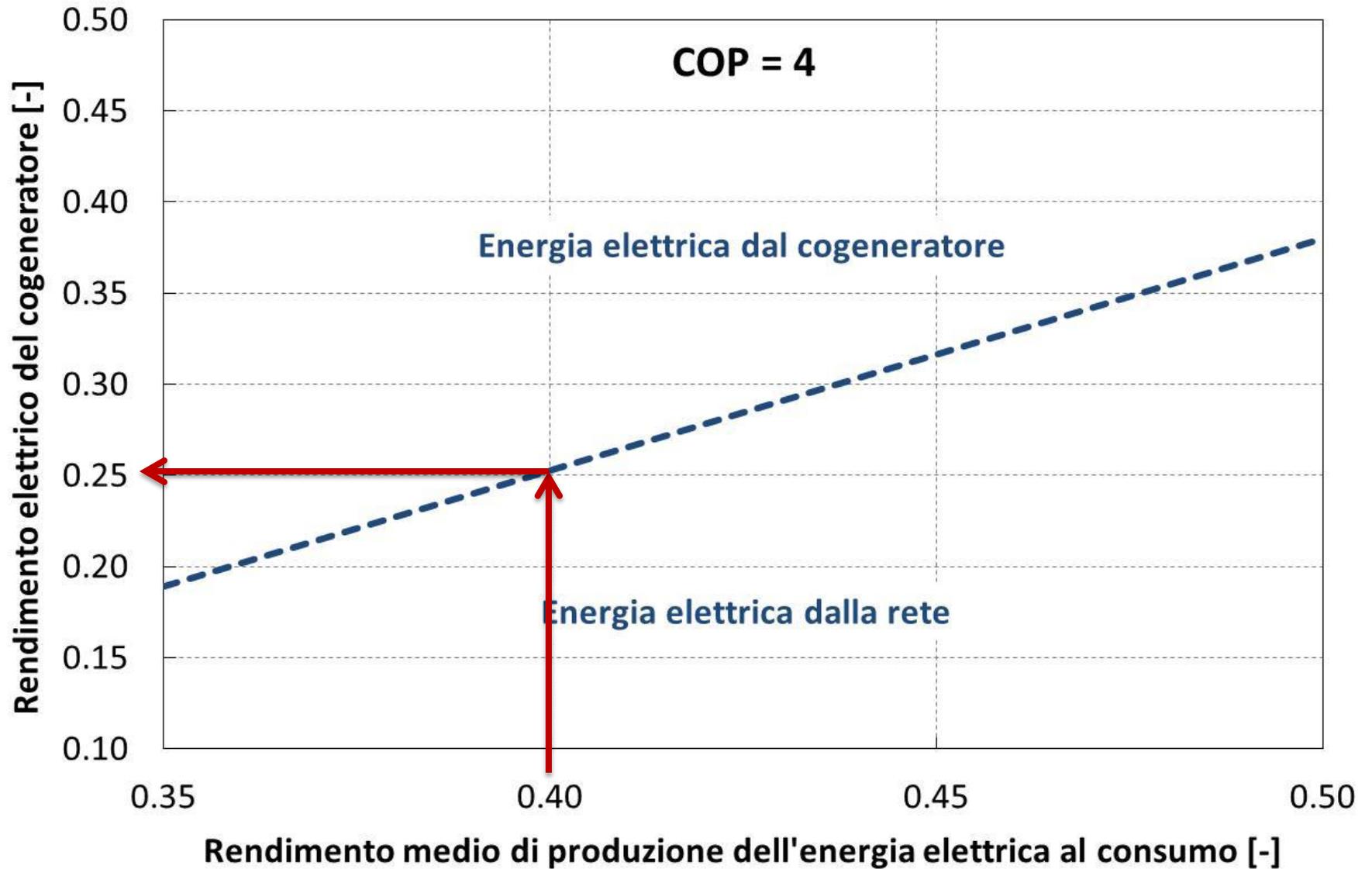
# Rendimento totale equivalente $\eta_U$ con pompa di calore



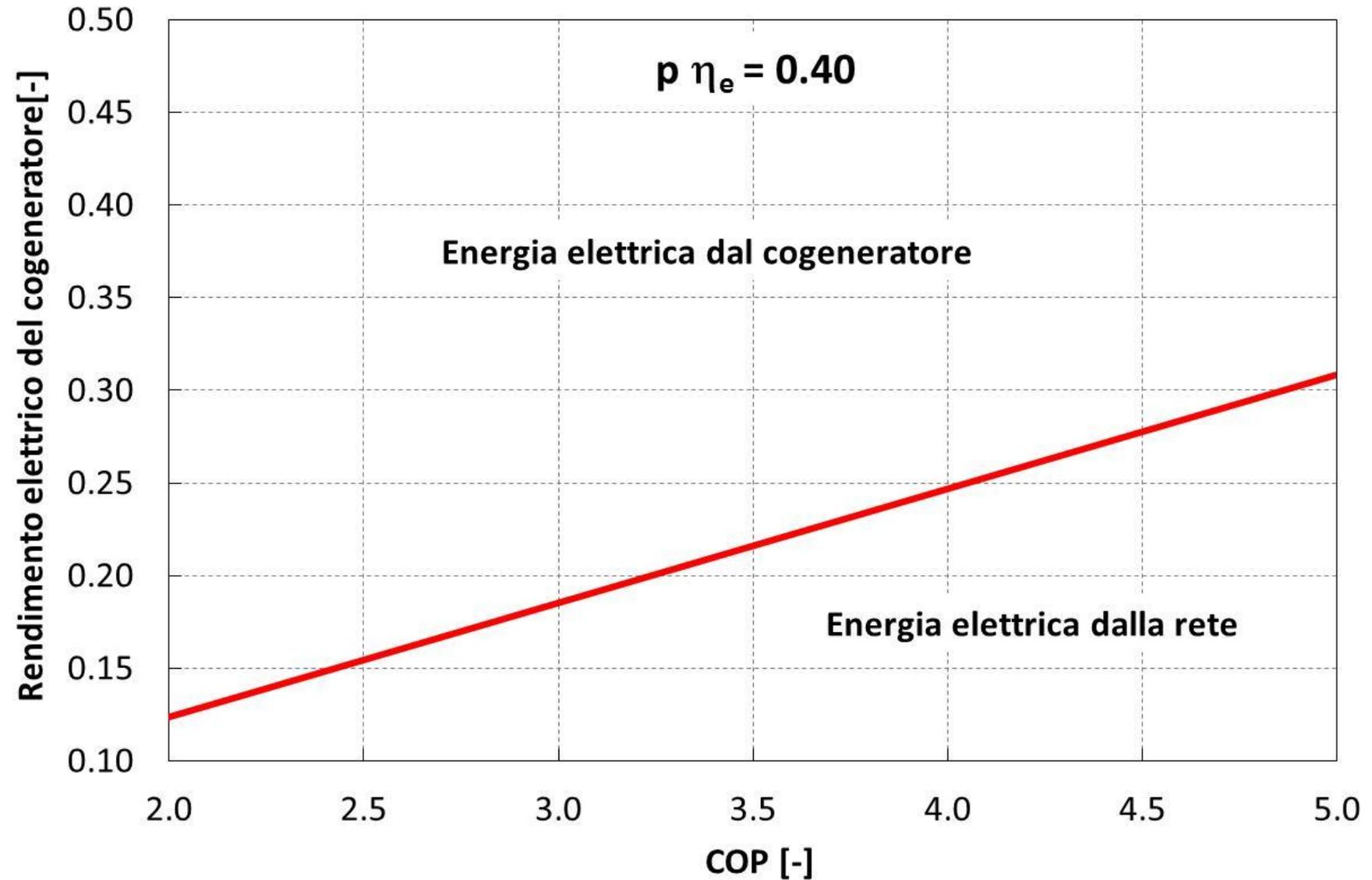
## Cogeneratore Vs. pompa di calore



# Cogeneratore Vs. pompa di calore

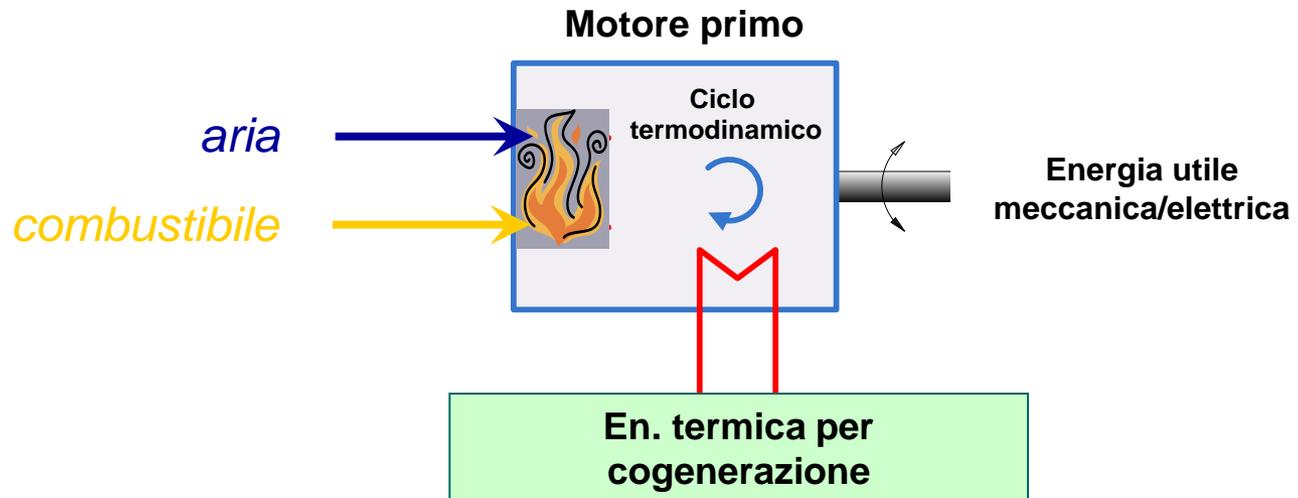


# Cogeneratore Vs. pompa di calore



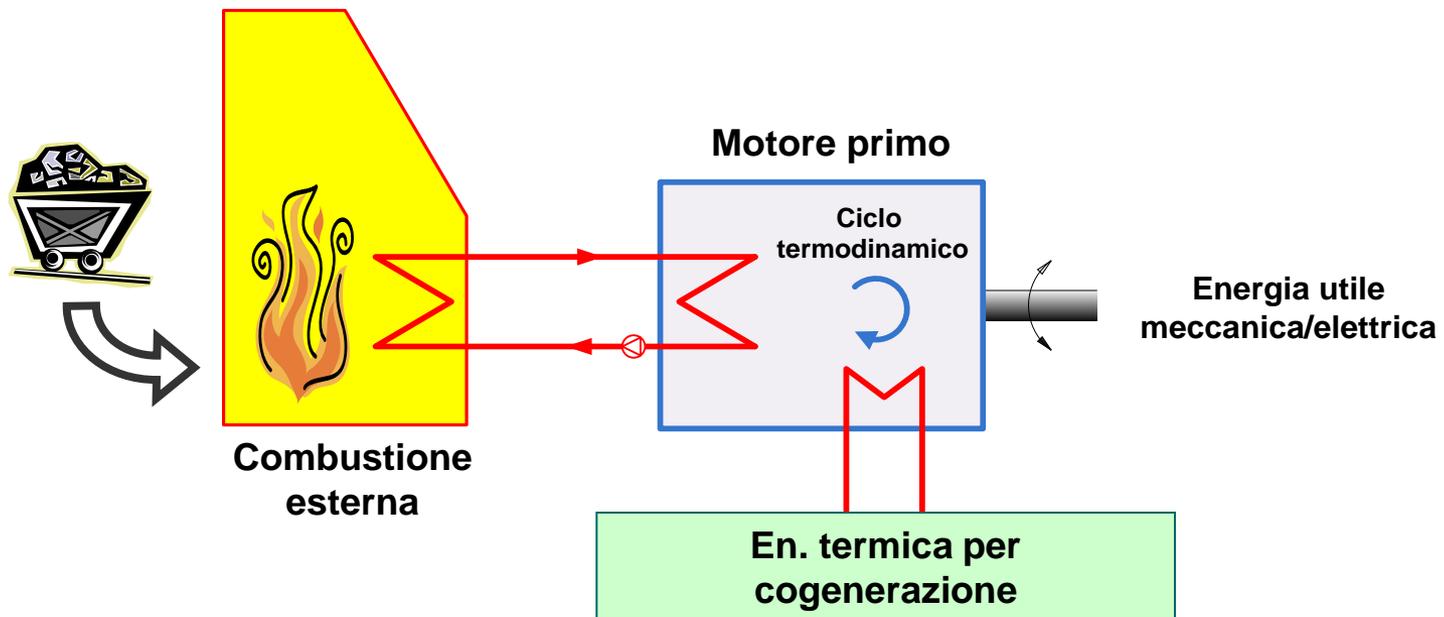
# La combustione interna

- ✓ La combustione avviene direttamente all'interno del motore primo
- ✓ Necessità di avere combustibili "puliti" (raffinazione per i prodotti petroliferi, sistemi di purificazione e filtrazione per biogas, syngas, pyrogas)
- ✓ Maggiore rendimento



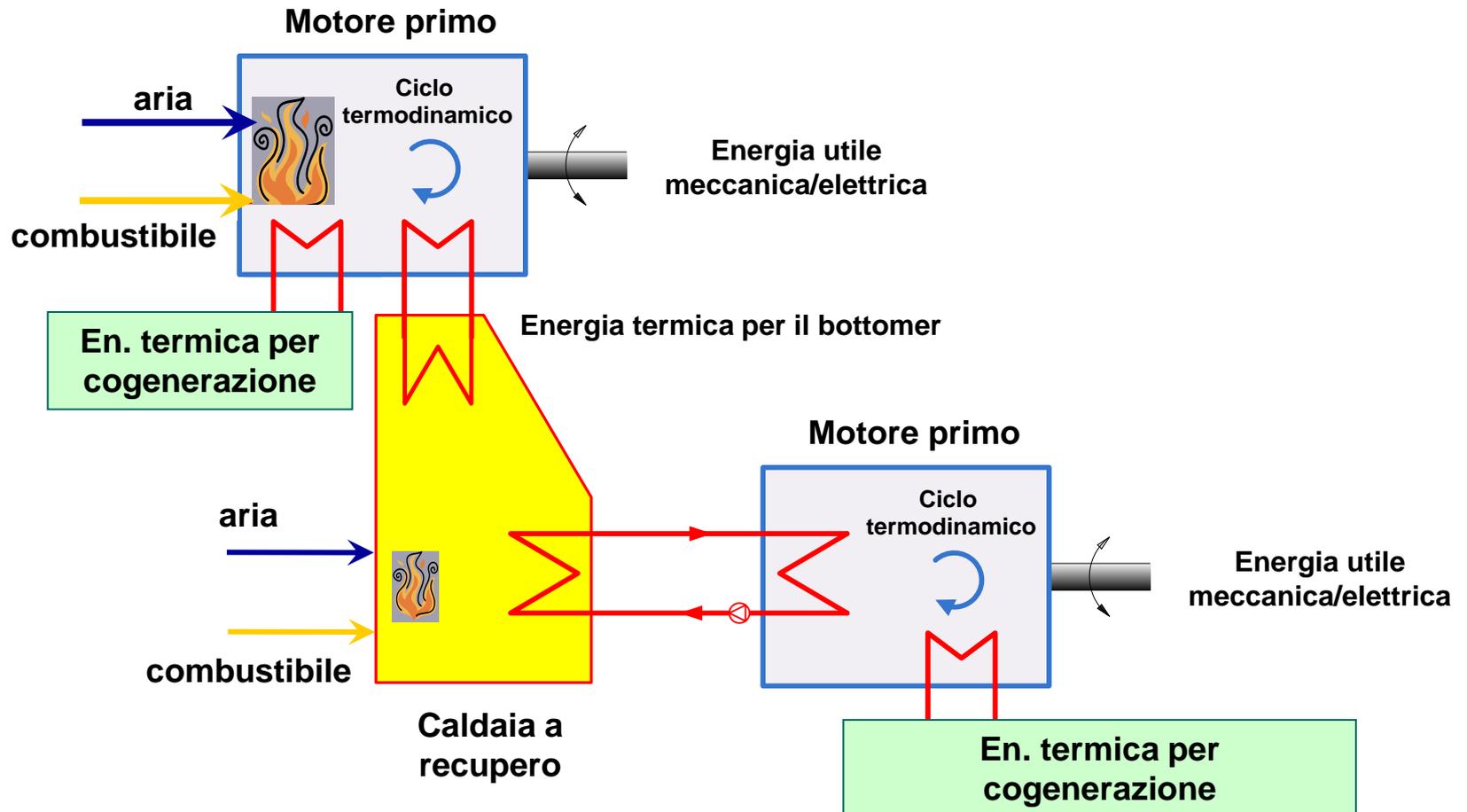
# La combustione esterna

- ✓ Separa il sistema di combustione (caldaia) dal motore primo
- ✓ Consente la combustione di combustibili di varia origine (carbone, prodotti petroliferi "grezzi", biomasse solide, CDR, syngas, biogas, oli vegetali, ecc...)
- ✓ Richiede un fluido termovettore tra caldaia e motore primo



# Il ciclo combinato

- ✓ Costituito da un motore primo (topper) e da un utilizzatore dell'energia termica (bottomer), anch'esso motore primo
- ✓ Energia termica per la cogenerazione possibile da entrambi



# Le tecnologie

## **Tecnologie CHP a combustione interna**

Consolidate

- ✓ **Motori alternativi a combustione interna (MCI)**
- ✓ **Turbine a Gas (TG) e Micro Turbine a Gas (MTG)**

## **Tecnologie CHP a combustione esterna**

- ✓ **Turbine a Vapore (TV)**
- ✓ **Motori Alternativi a Vapore (MAV)**
- ✓ **Cicli Rankine a fluido Organico (ORC)**
- ✓ **MTG a combustione esterna (EFMGT)**
- ✓ **Motori Stirling**

Consolidate

In fase di  
consolidamento

# Le tecnologie

## Tecnologie CHP a combustione interna

Prototipali

- ✓ Celle a combustibile - Fuel Cell (FC)
- ✓ Sistemi termofotovoltaici (TPV)

## Tecnologie CHP a combustione esterna

Prototipali

- ✓ Sistemi termofotovoltaici (TPV)
- ✓ Sistemi termoelettrici (TE)

## Tecnologie CHP a combustione interna/esterna

- ✓ Ciclo combinato gas-vapore
- ✓ Ciclo combinato MCI-ORC
- ✓ Ciclo combinato MTG-ORC

Consolidate

In fase di  
consolidamento

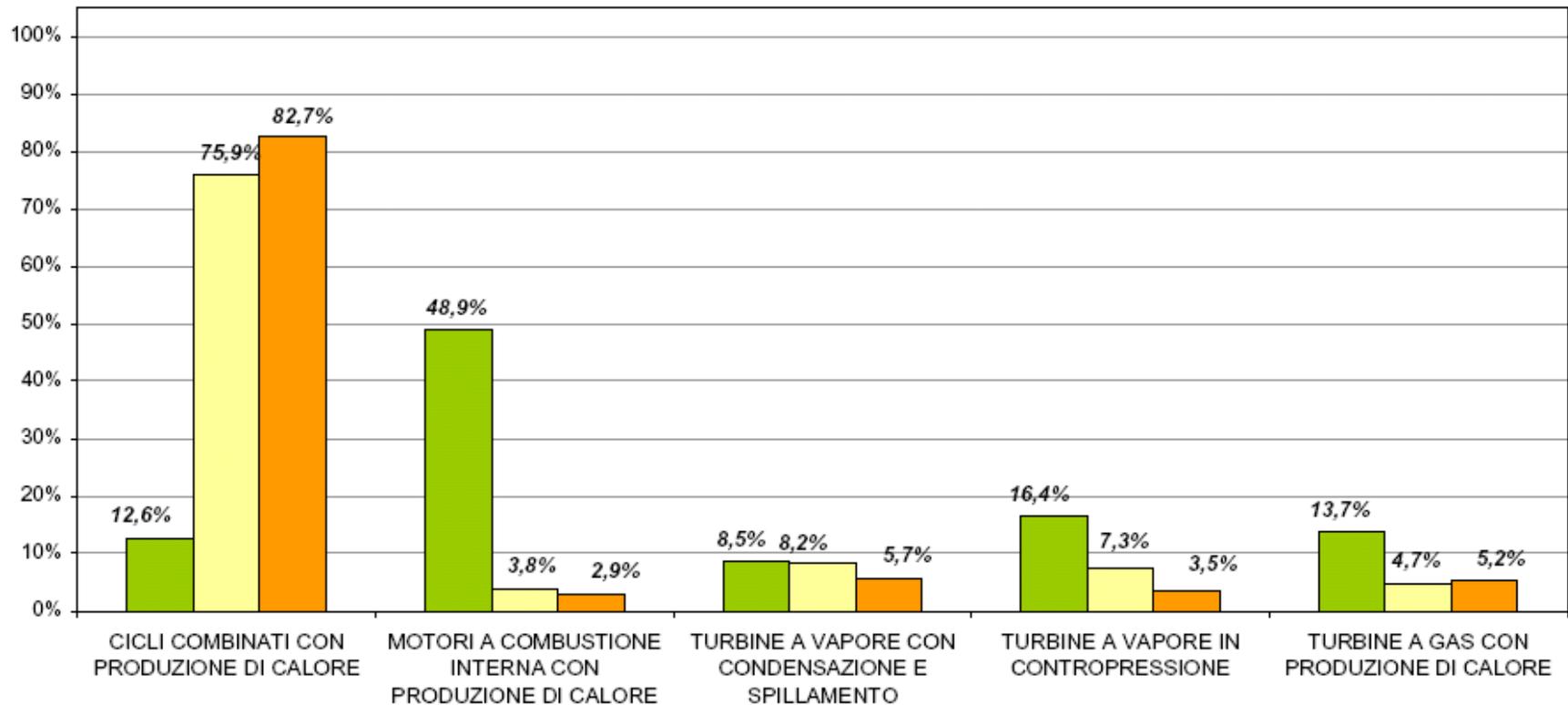
# Sezioni, potenza e produzione impianti di cogenerazione per tecnologia (dati AEEG, anno 2008)

Numero totale sezioni: 1.154

Potenza efficiente lorda: 21.522 MW

Produzione lorda: 102.925 GWh

■ Numero sezioni    ■ Potenza efficiente lorda    ■ Produzione lorda



# Sezioni, potenza e produzione impianti di cogenerazione GD per tecnologia (dati AEEG, anno 2008)

Numero totale sezioni: 963

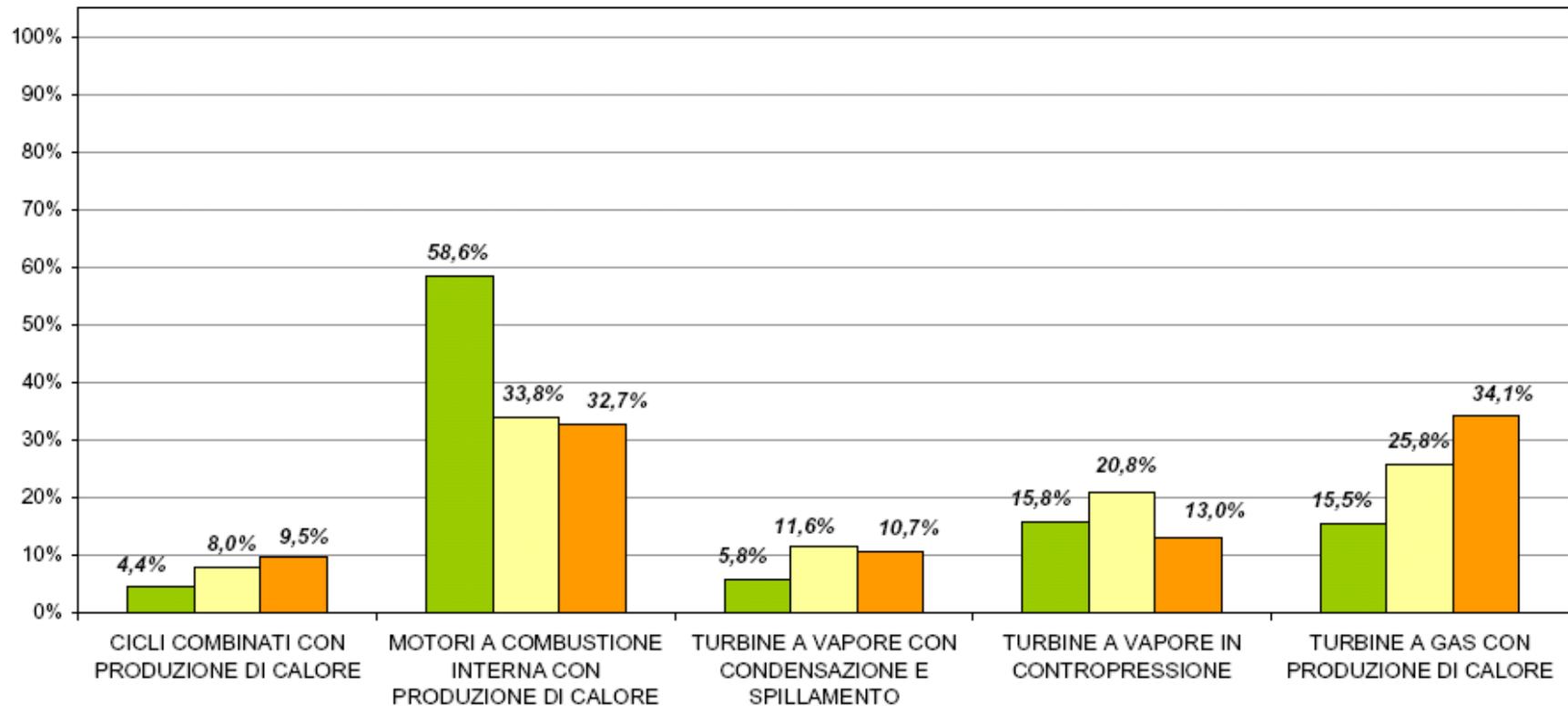
Potenza efficiente lorda: 2.267 MW

Produzione lorda: 8,67 TWh

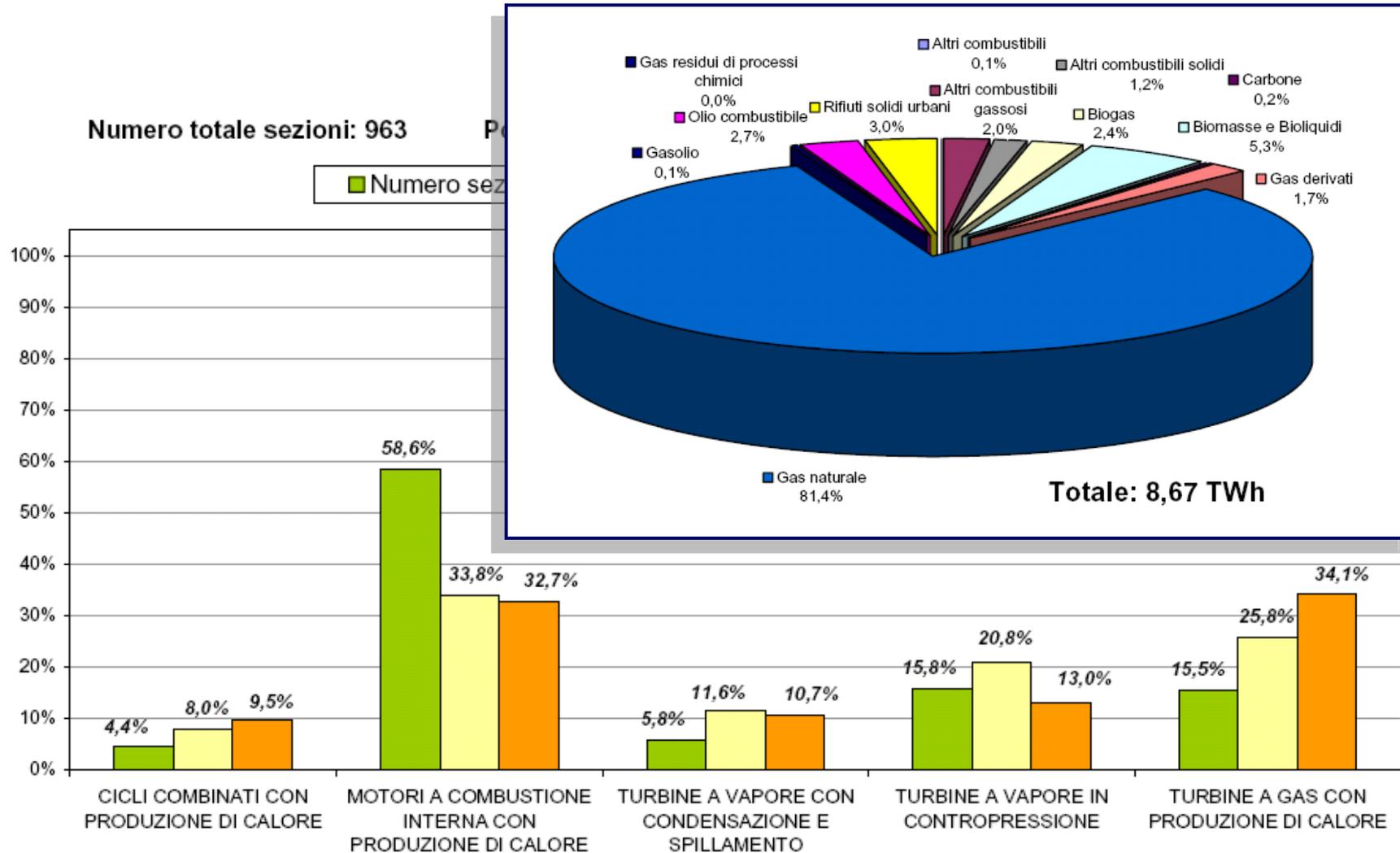
■ Numero sezioni

■ Potenza efficiente lorda

■ Produzione lorda



# Sezioni, potenza e produzione impianti di cogenerazione GD per tecnologia (dati AEEG, anno 2008)



# Sezioni, potenza e produzione impianti di cogenerazione PG per tecnologia (dati AEEG, anno 2008)

Numero totale sezioni: 237

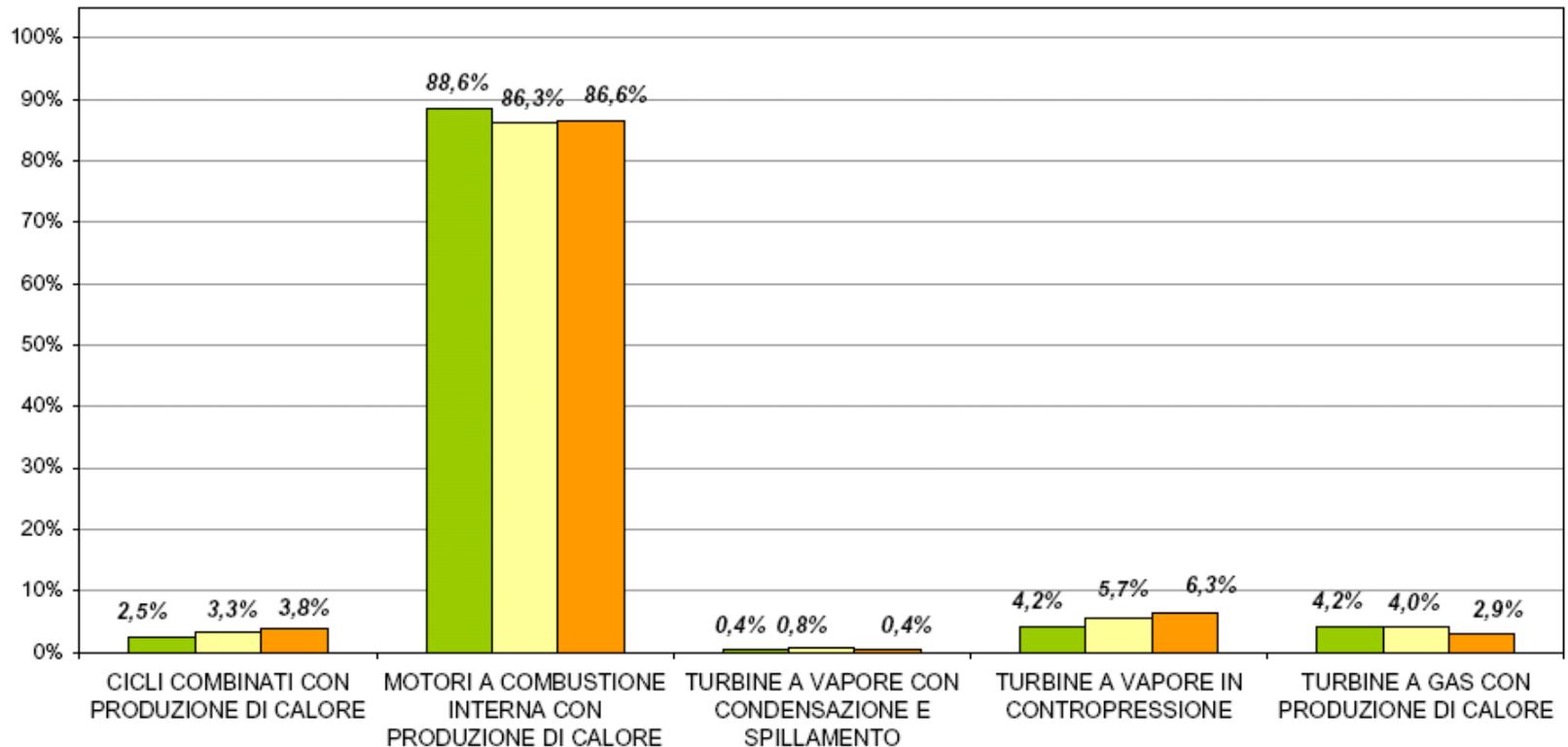
Potenza efficiente lorda: 99 MW

Produzione lorda: 240 GWh

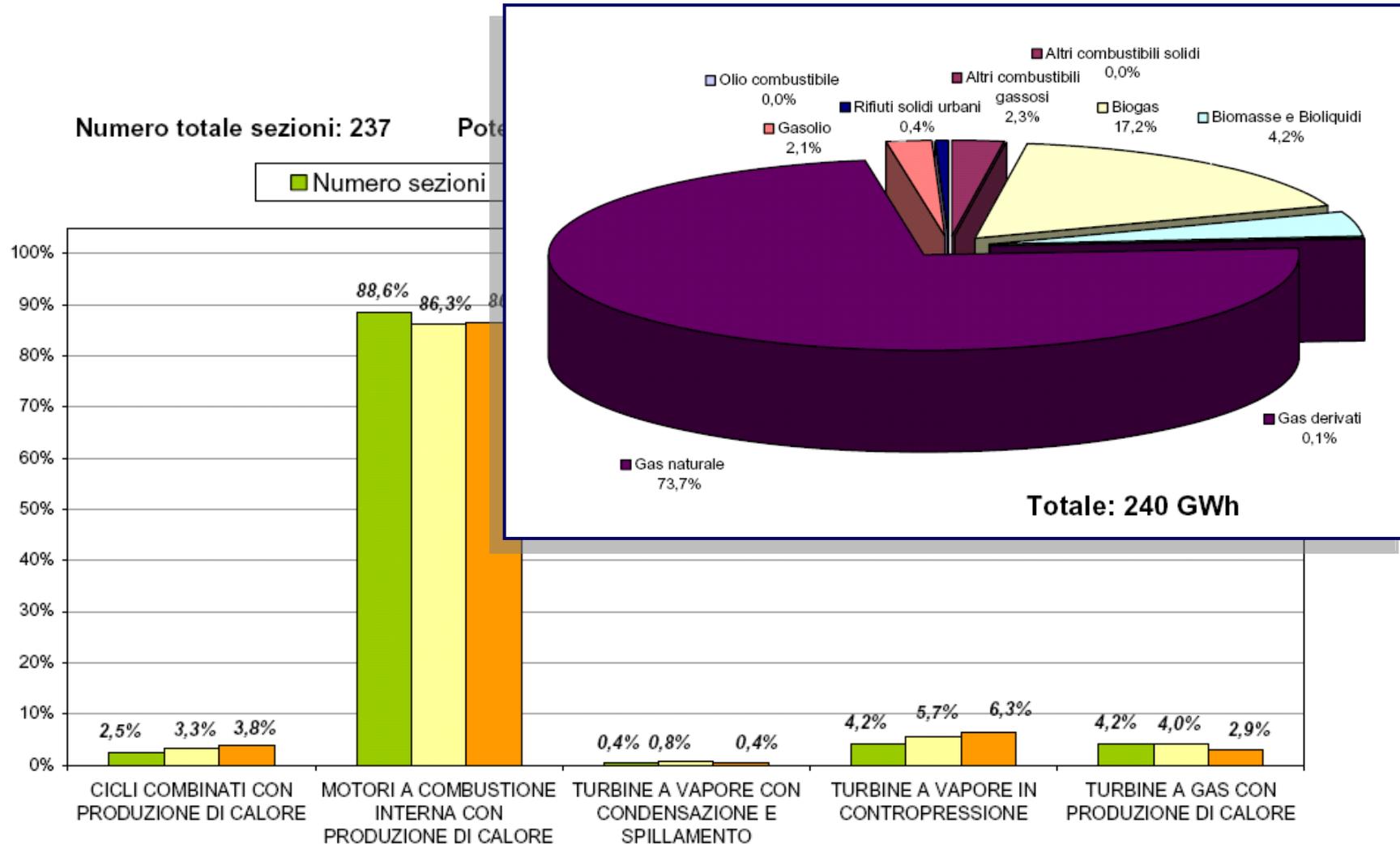
■ Numero sezioni

■ Potenza efficiente lorda

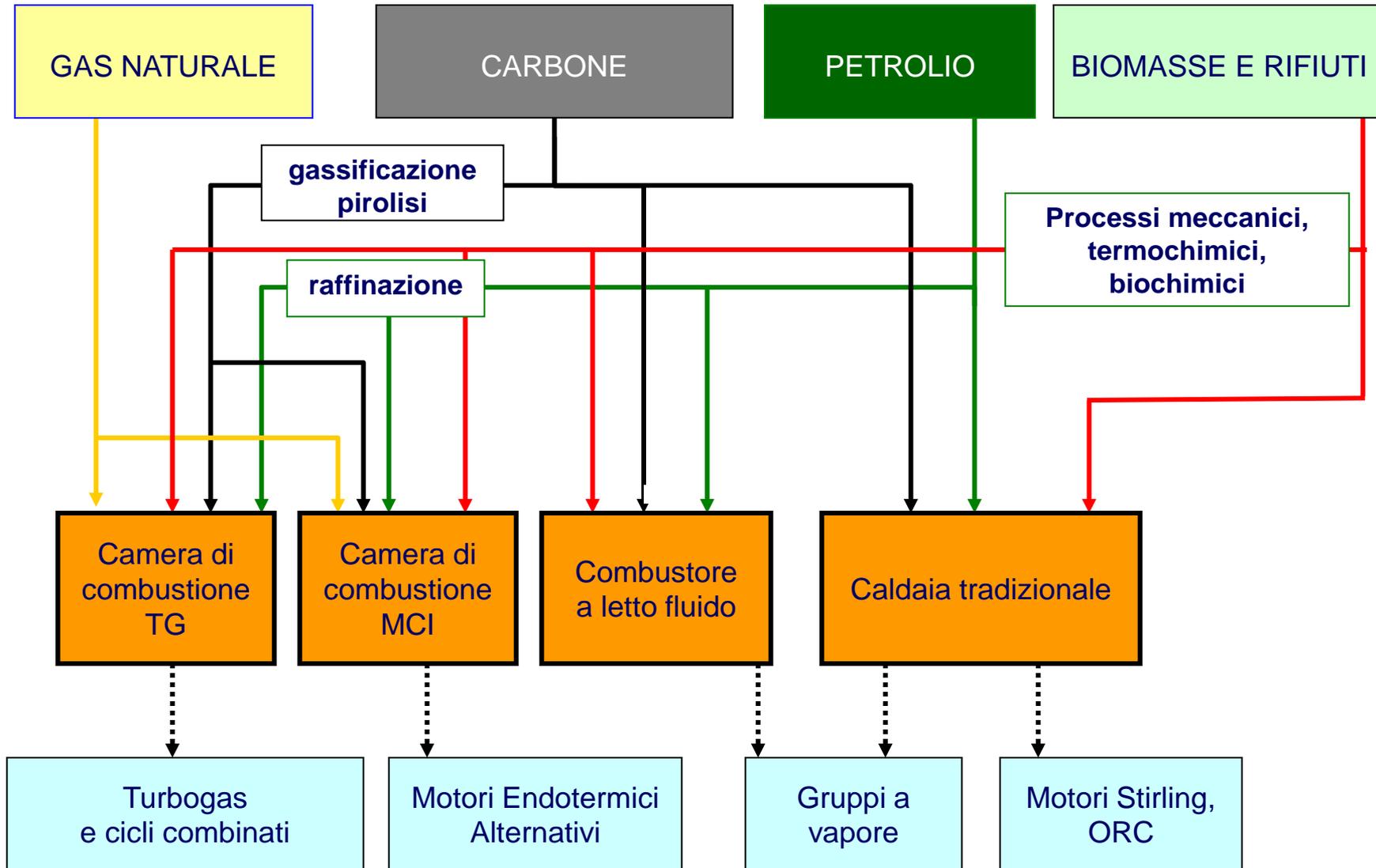
■ Produzione lorda



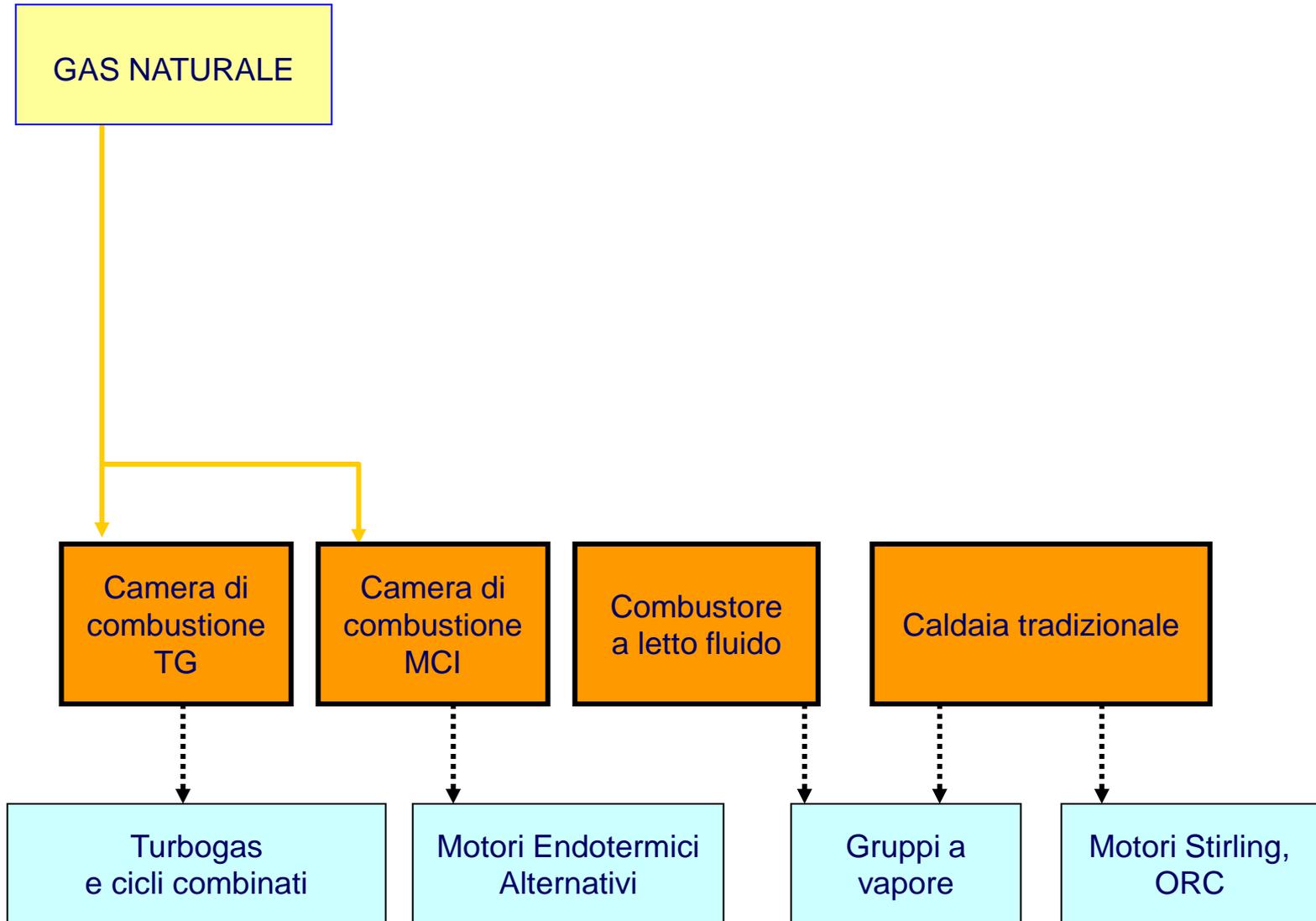
# Sezioni, potenza e produzione impianti di cogenerazione PG per tecnologia (dati AEEG, anno 2008)



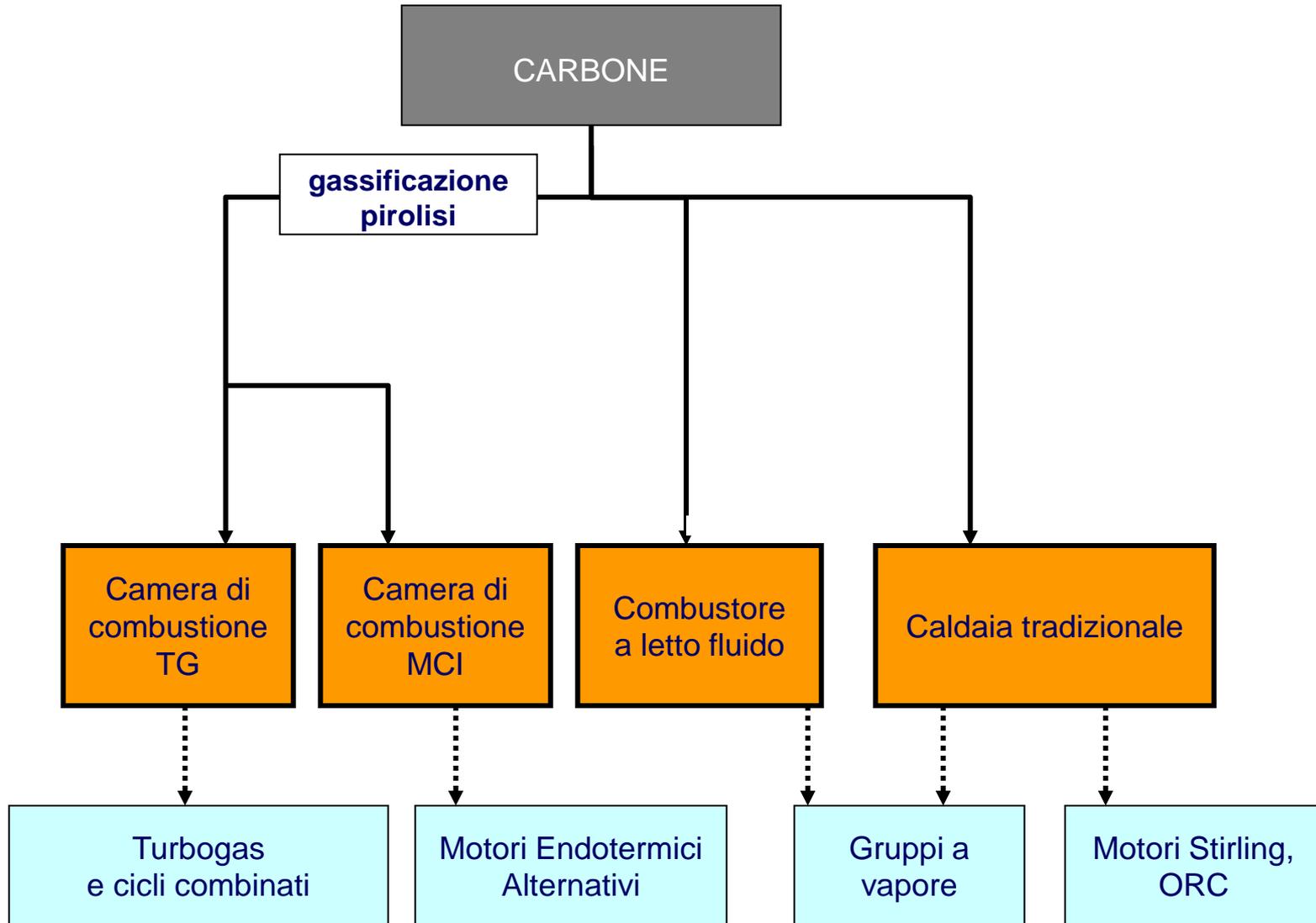
# Conversione mediante combustione



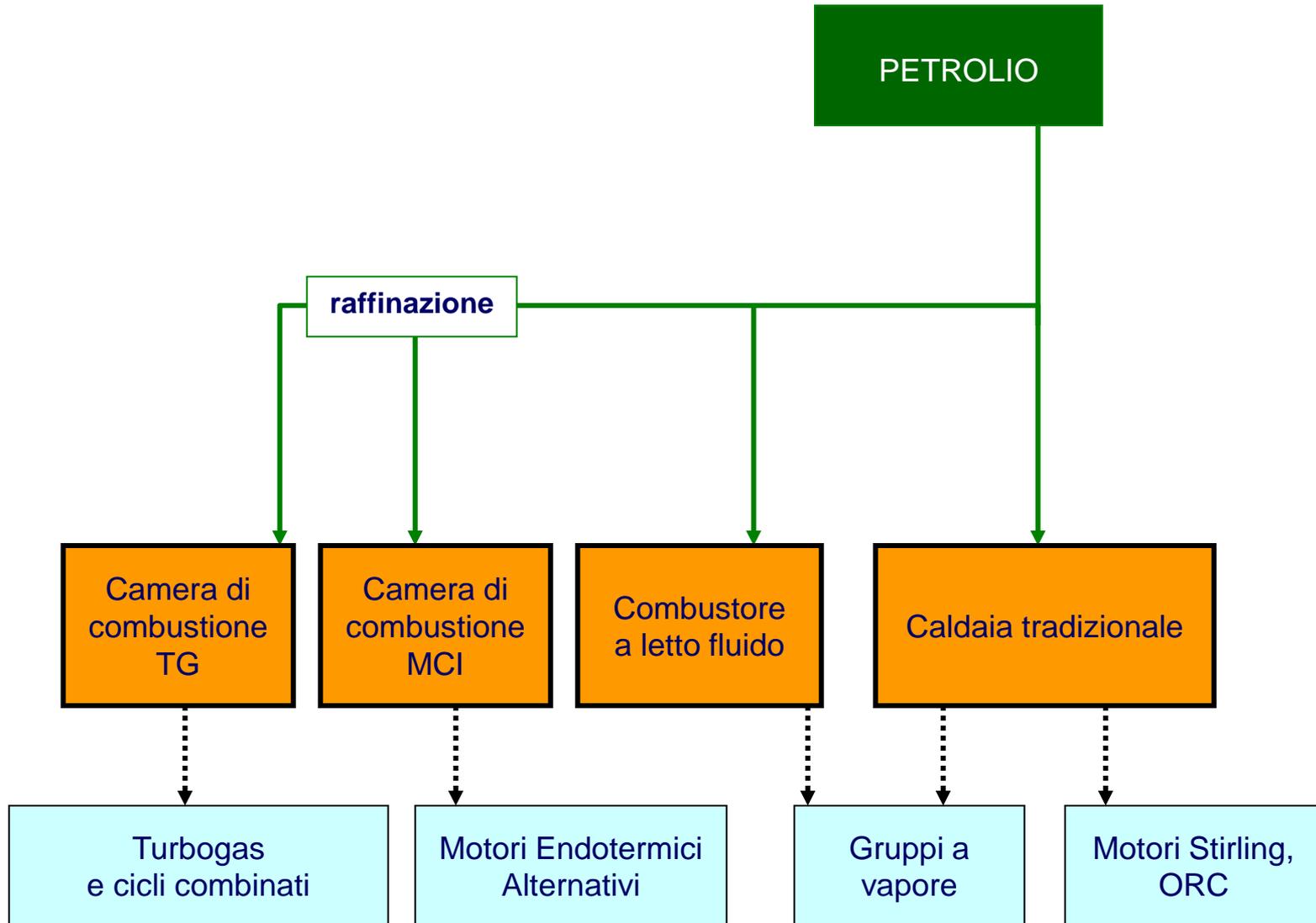
# Conversione mediante combustione



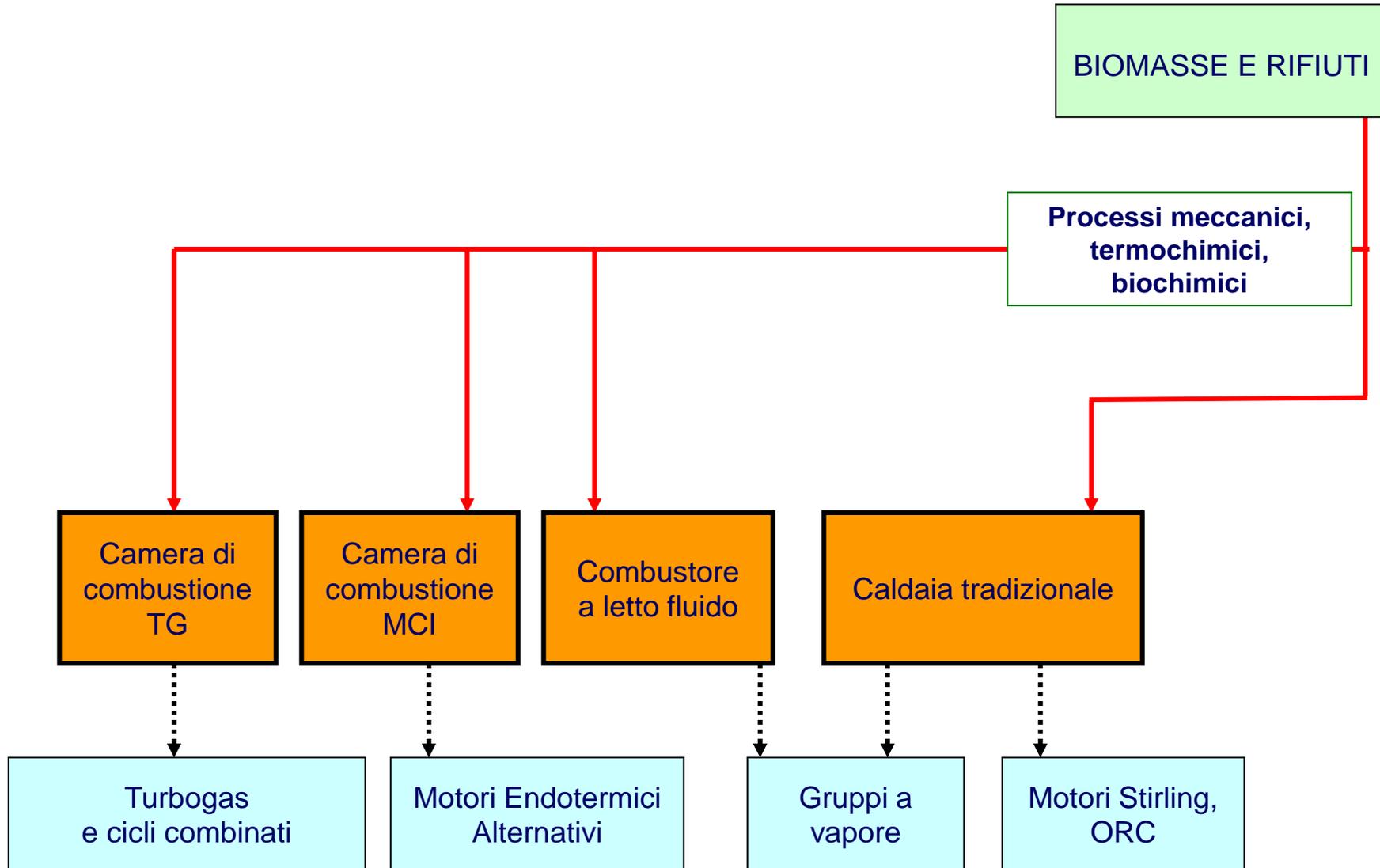
# Conversione mediante combustione



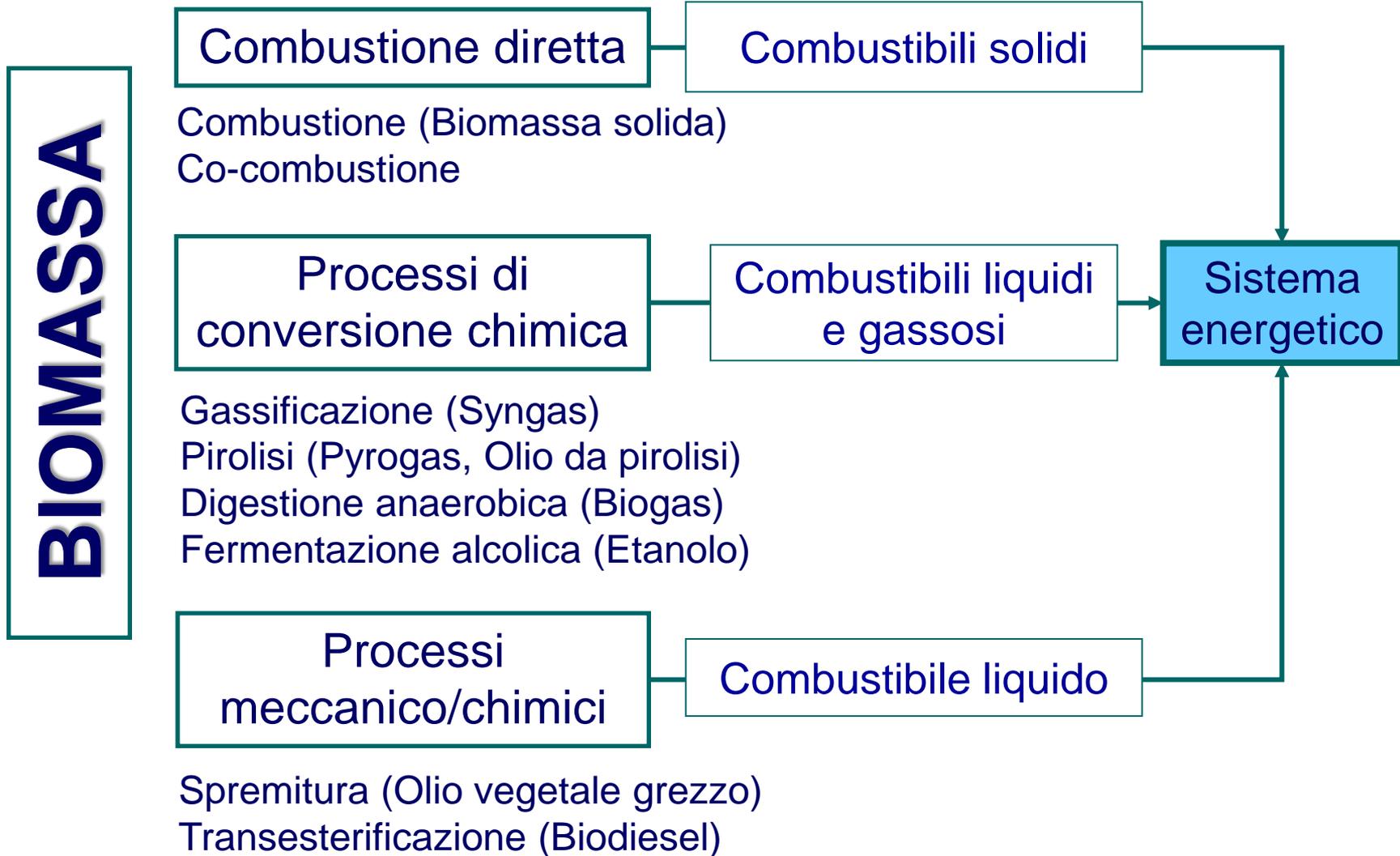
# Conversione mediante combustione



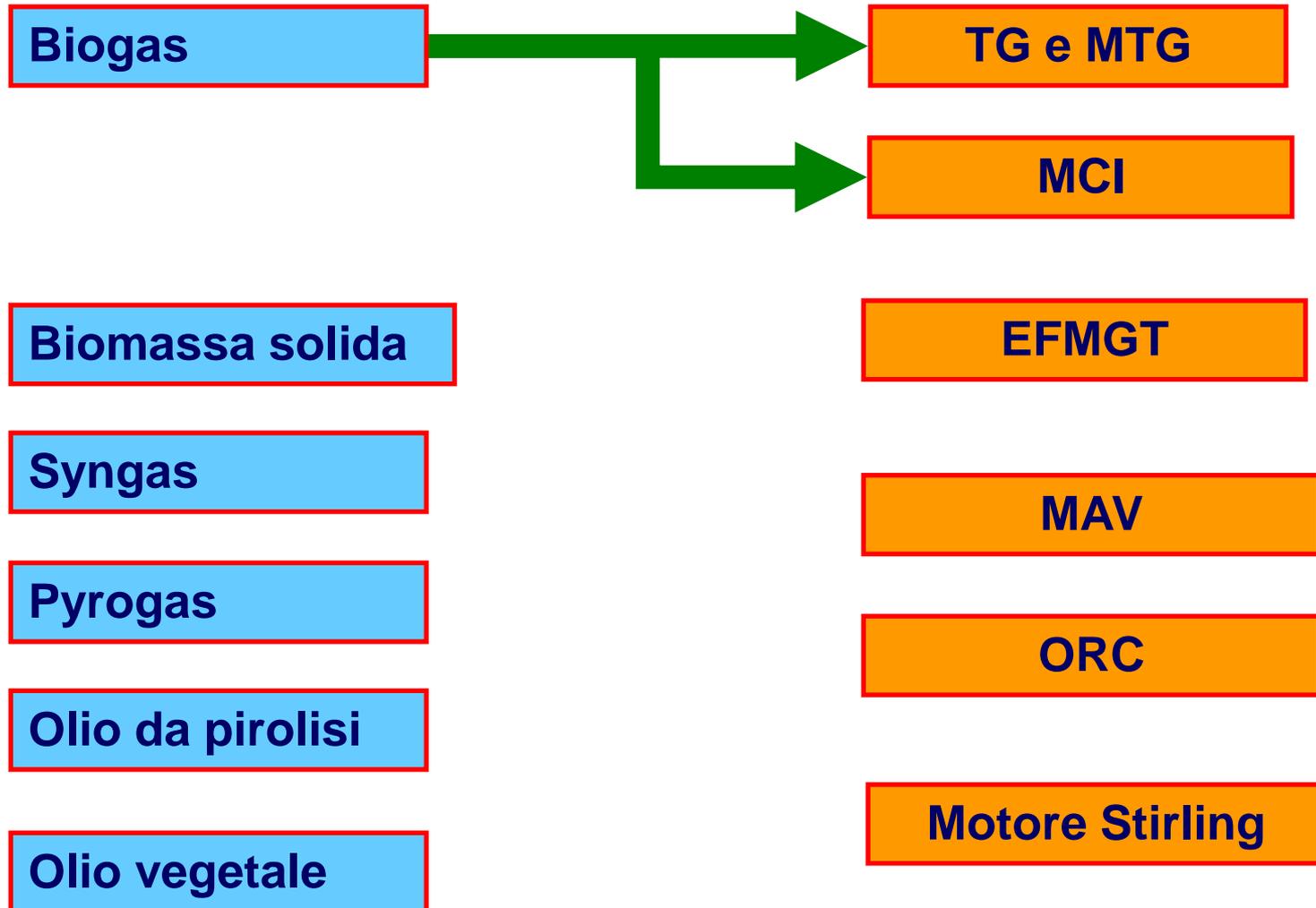
# Conversione mediante combustione



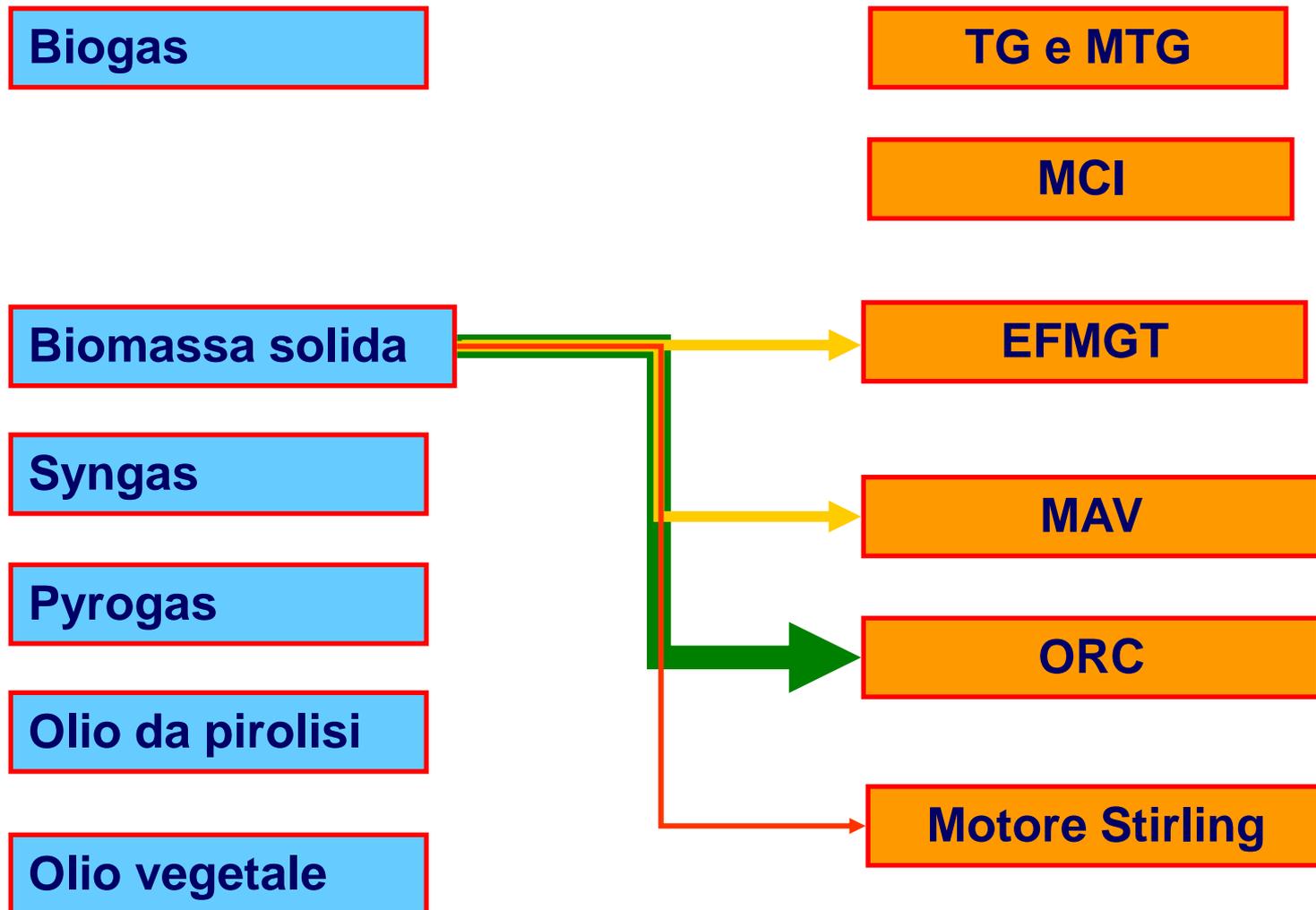
# I biocombustibili



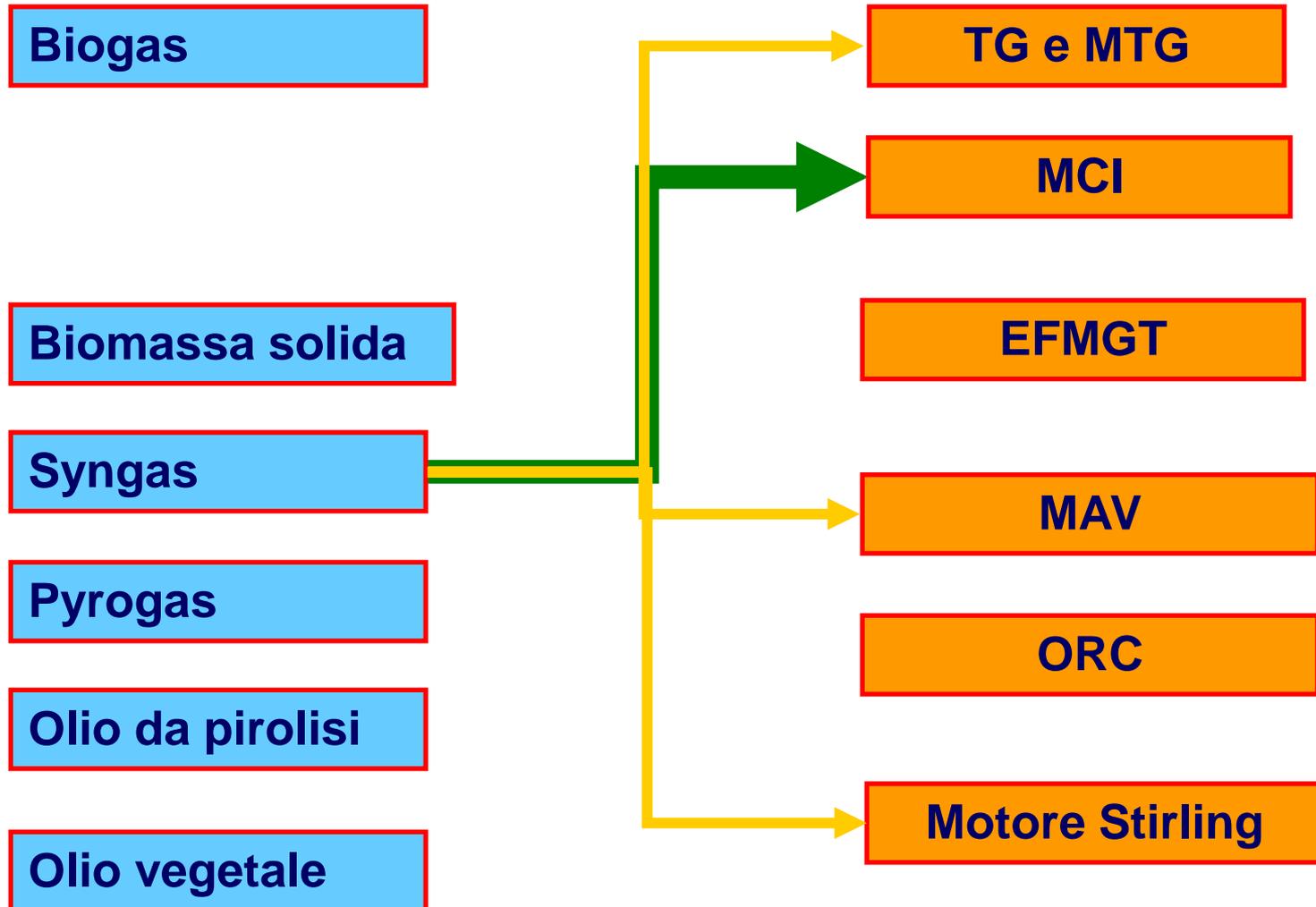
# Biocombustibile/Sistema energetico



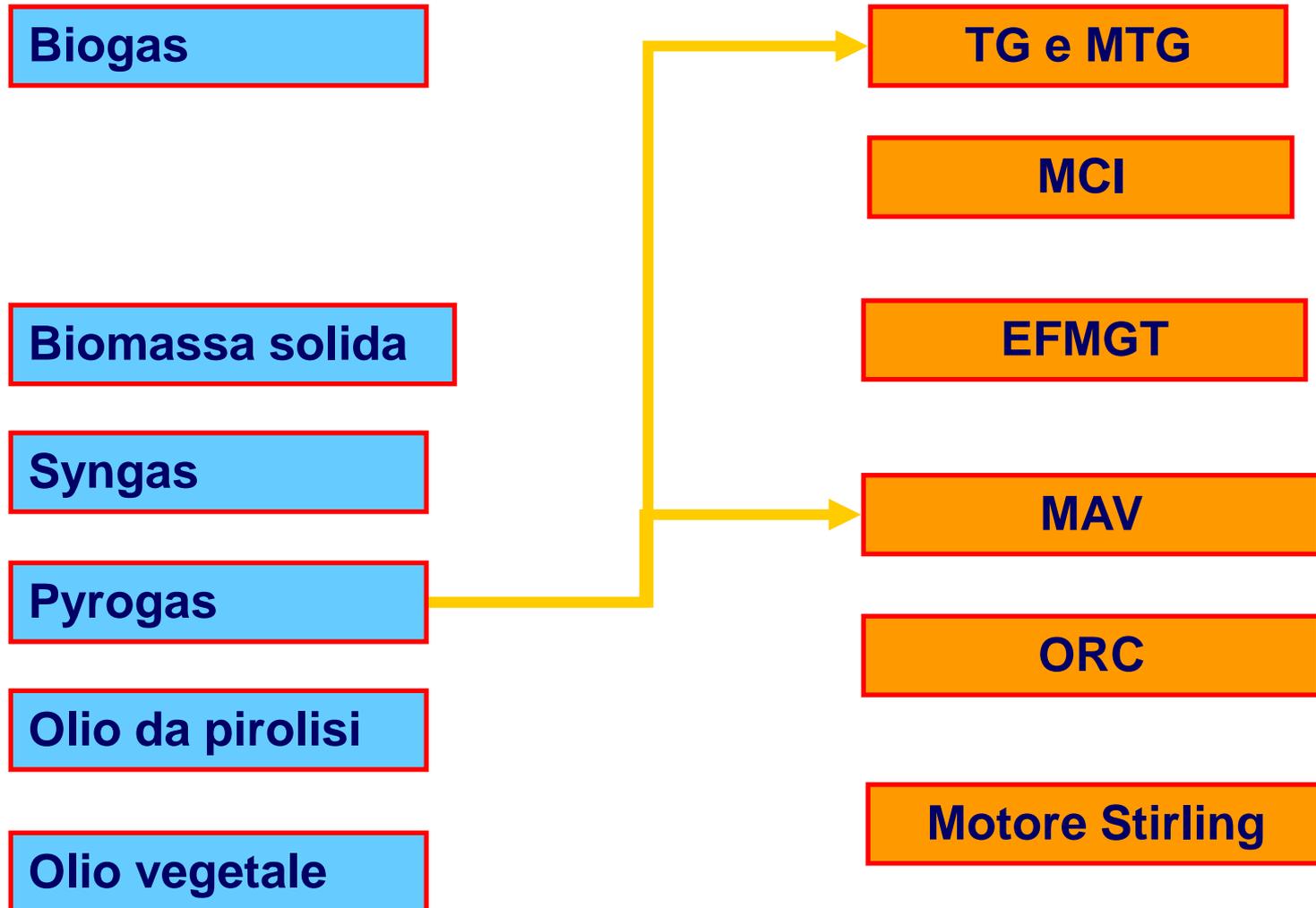
# Biocombustibile/Sistema energetico



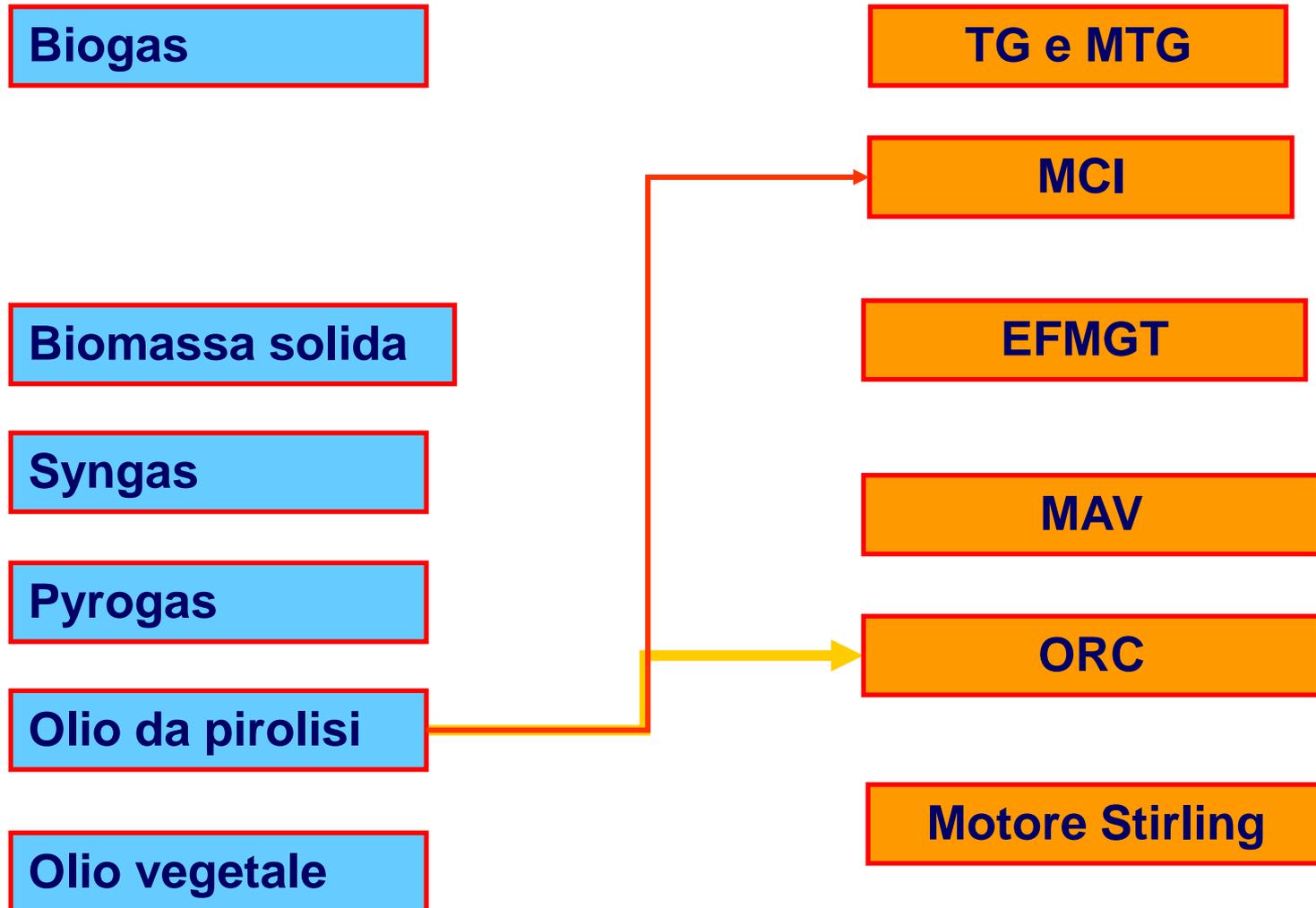
# Biocombustibile/Sistema energetico



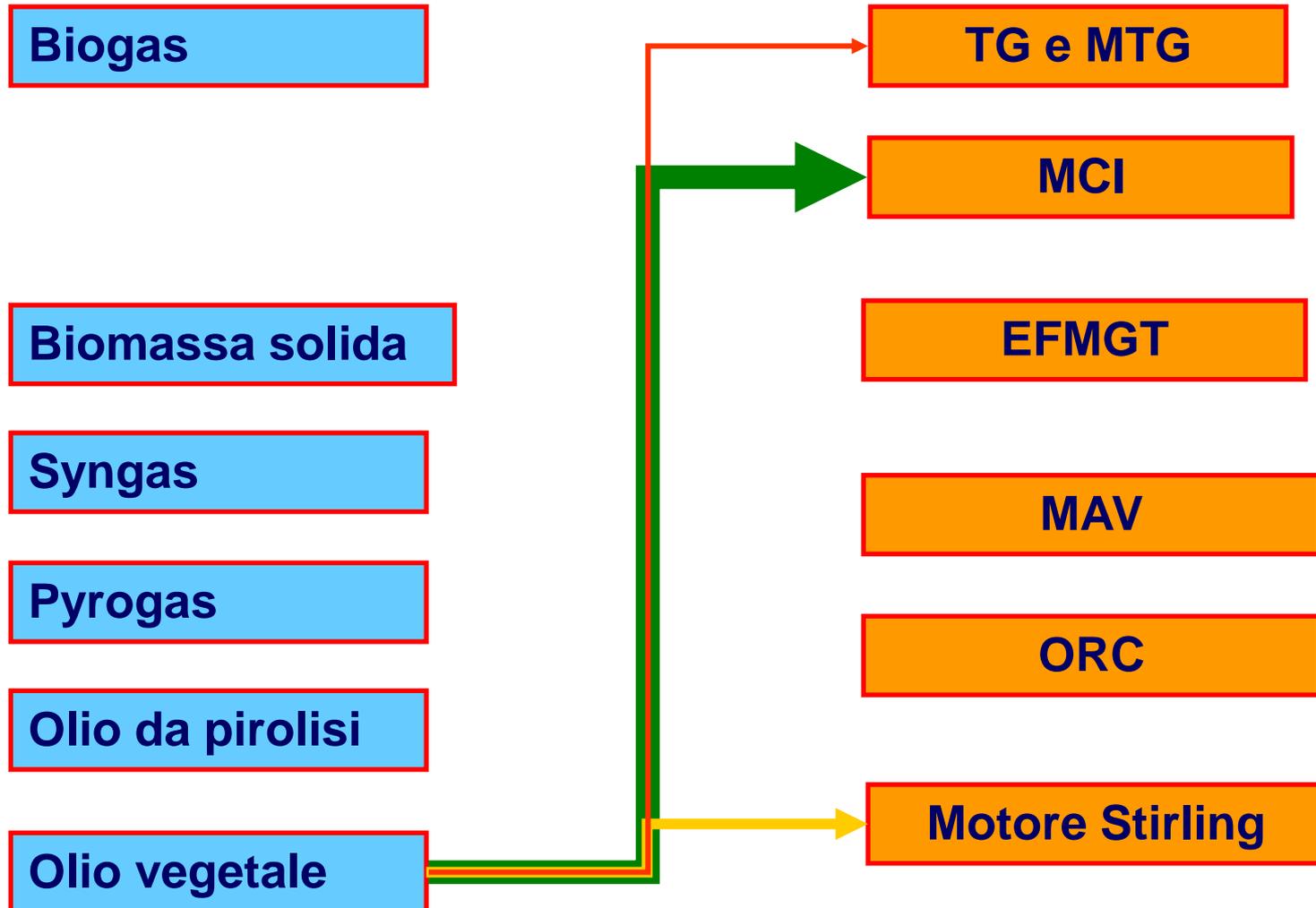
# Biocombustibile/Sistema energetico



# Biocombustibile/Sistema energetico



# Biocombustibile/Sistema energetico



# Le tecnologie

## Tecnologie CHP a combustione interna

Consolidate

- ✓ **Motori alternativi a combustione interna (MCI)**
- ✓ Turbine a Gas (TG) e Micro Turbine a Gas (MTG)

## Tecnologie CHP a combustione esterna

- ✓ Turbine a Vapore (TV)
- ✓ Motori Alternativi a Vapore (MAV)
- ✓ Cicli Rankine a fluido Organico (ORC)
- ✓ MTG a combustione esterna (EFMGT)
- ✓ Motori Stirling

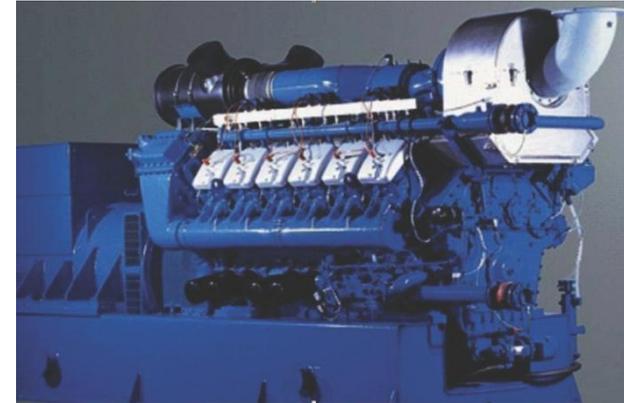
Consolidate

In fase di  
consolidamento

# Motori alternativi a Combustione Interna (MCI)

## VANTAGGI

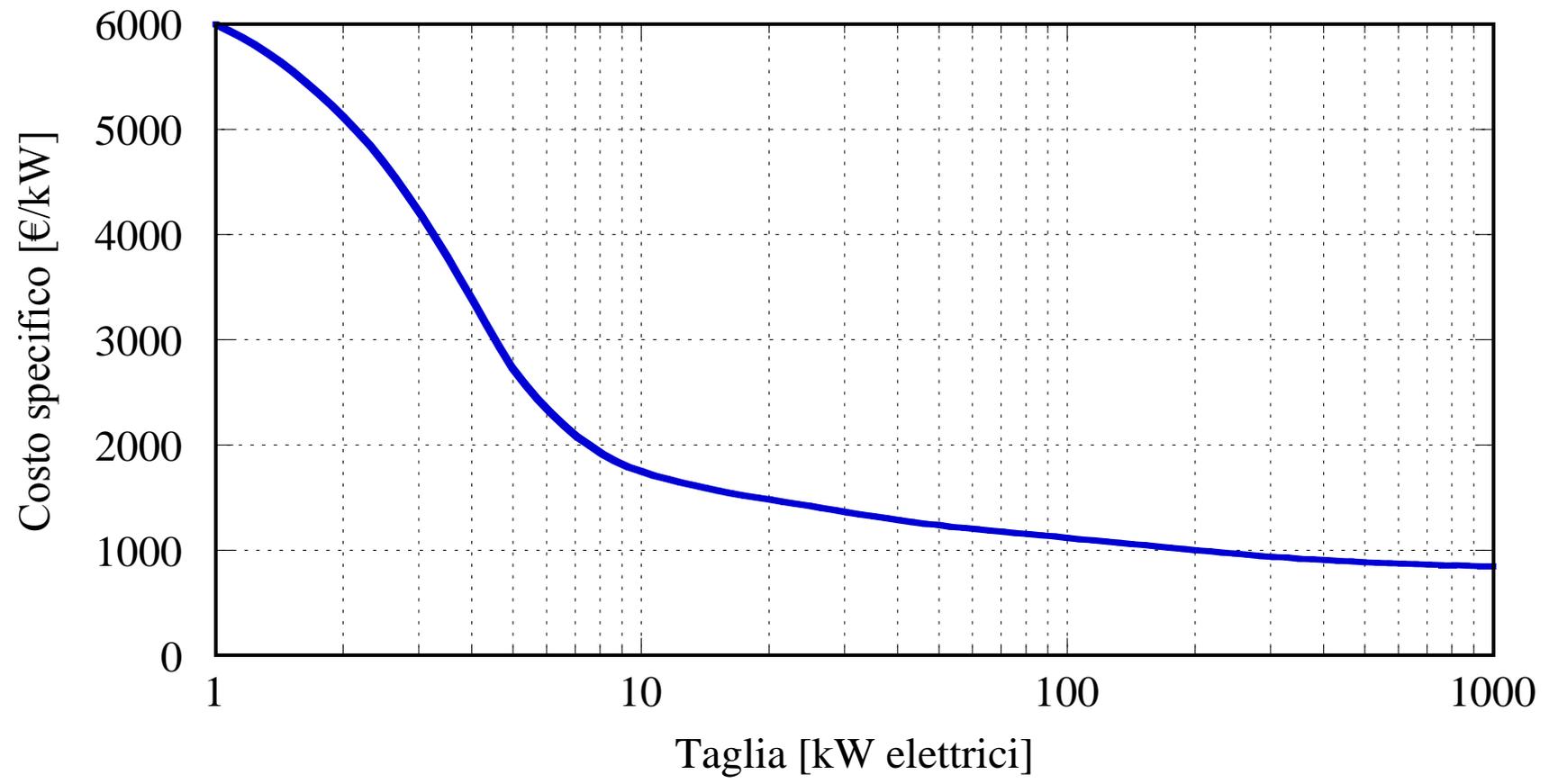
- ✓ taglie da 1 kW<sub>e</sub> a circa 5 MW<sub>e</sub>
- ✓ tecnologia matura impiegata in diversi campi
- ✓ elevata affidabilità
- ✓ buoni rendimenti di conversione
- ✓ costi di investimento contenuti
- ✓ elevata flessibilità di esercizio



## SVANTAGGI

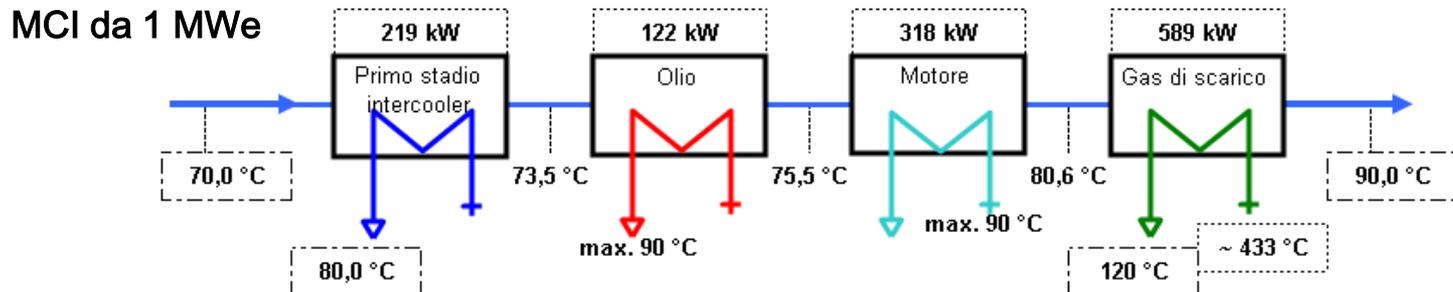
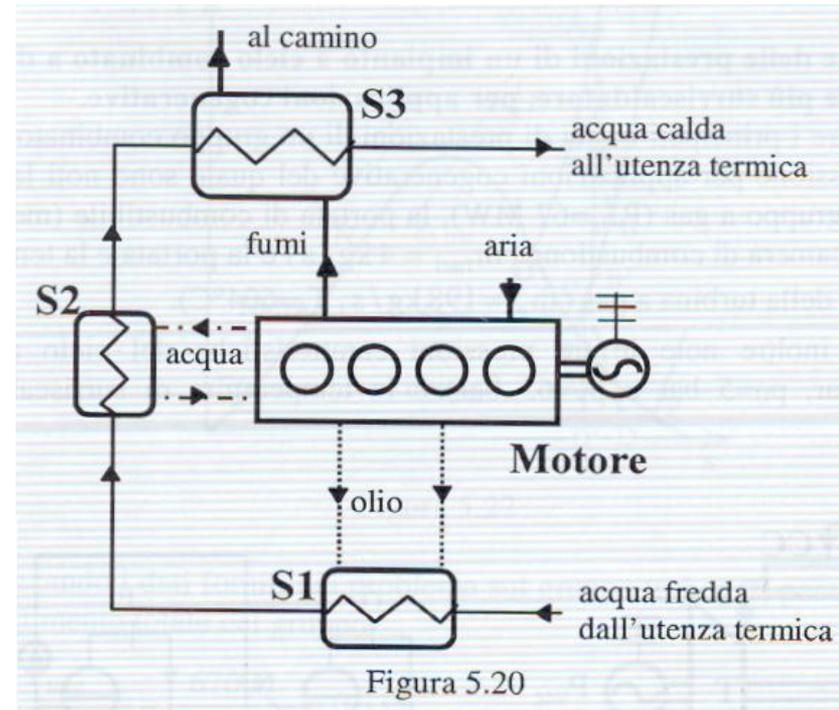
- ✓ elevati costi di manutenzione (8÷25 €/MWh)
- ✓ rumorosità e vibrazioni
- ✓ elevati valori delle emissioni (NO<sub>x</sub> e CO)

# I costi specifici dei MCI



# Cogenerazione con MCI

- ✓ Sistema ad un grado di libertà: il calore recuperabile è univocamente legato all'energia elettrica prodotta
- ✓ Il recupero termico non influenza le prestazioni del MCI
- ✓ Calore recuperabile da: olio, acqua di raffreddamento, fumi ed eventuale intercooler
- ✓ Presenza di scambiatore ausiliario per dissipare eventuale calore in eccesso
- ✓ Gestione di tipo “elettrico segue” o “termico segue”



# Bilancio energetico di un MCI da 1 MWe

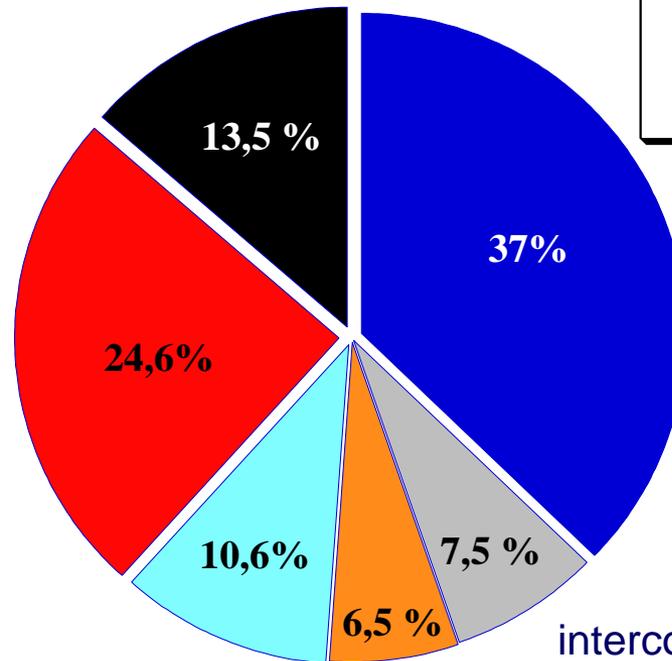
- ✓ Oltre alla potenza termica disponibile è importante valutare:
  - ♦ le ore di funzionamento annuali in cogenerazione (energia!)
  - ♦ la temperatura alla quale è disponibile



fumi -  $T > 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$

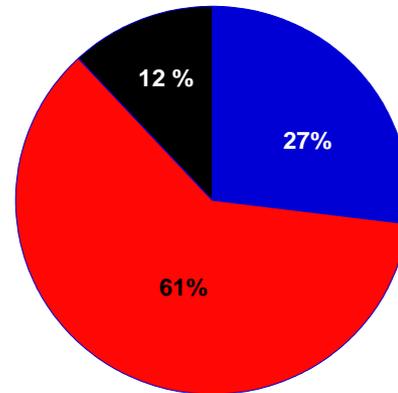
Acqua di raffr. -  $T \approx 90\text{-}95 \text{ }^{\circ}\text{C}$

olio -  $T \approx 75\text{-}85 \text{ }^{\circ}\text{C}$

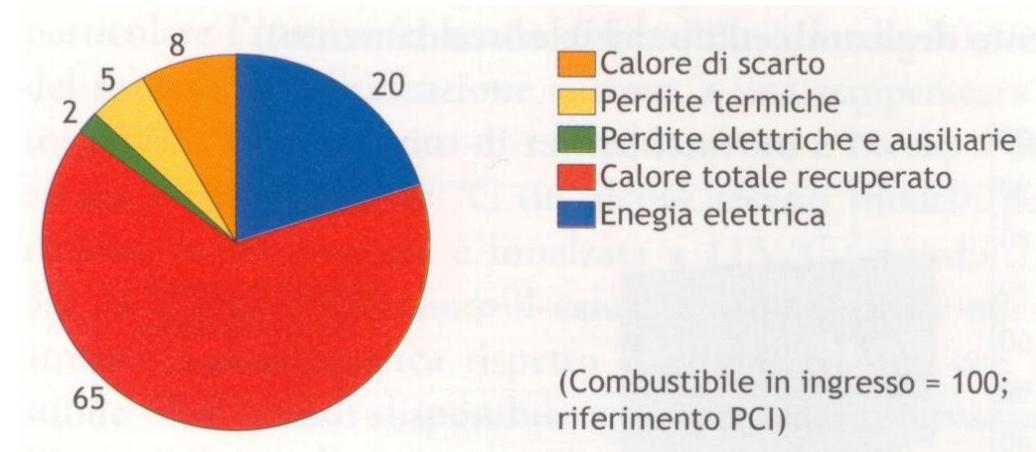


intercooler -  $T \approx 30/40 \text{ }^{\circ}\text{C}$

# Bilancio energetico di un MCI da 5 e 1 kWe

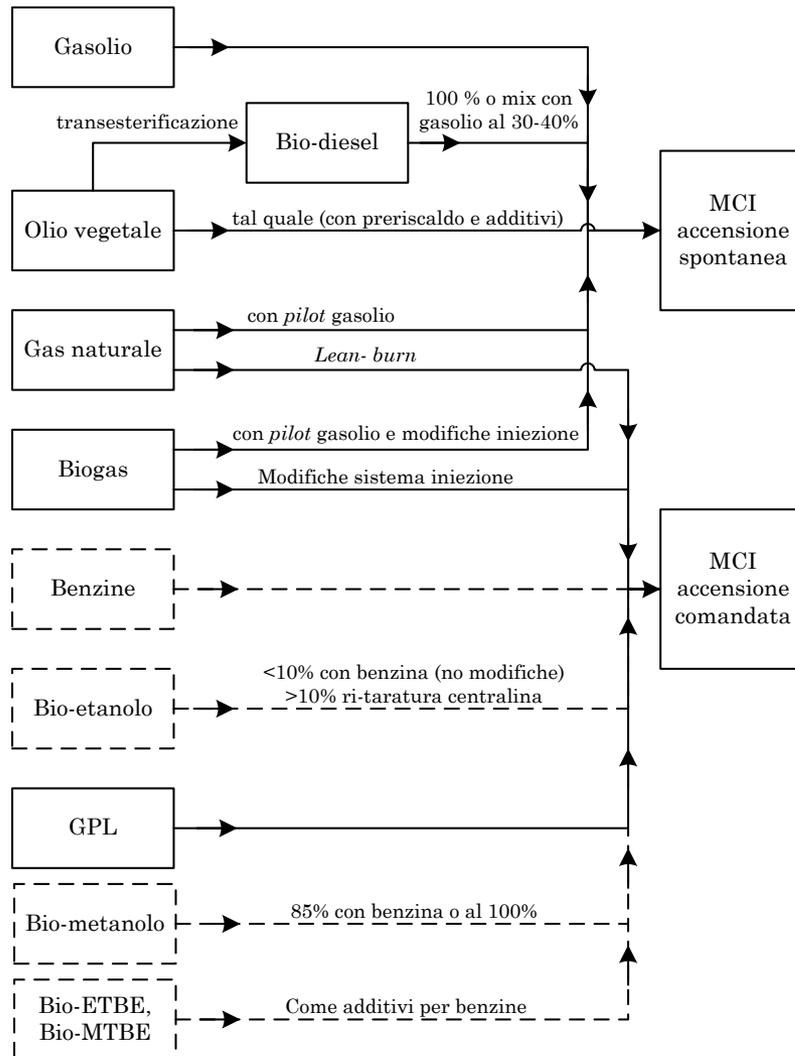


- Energia elettrica
- Energia termica
- Perdite

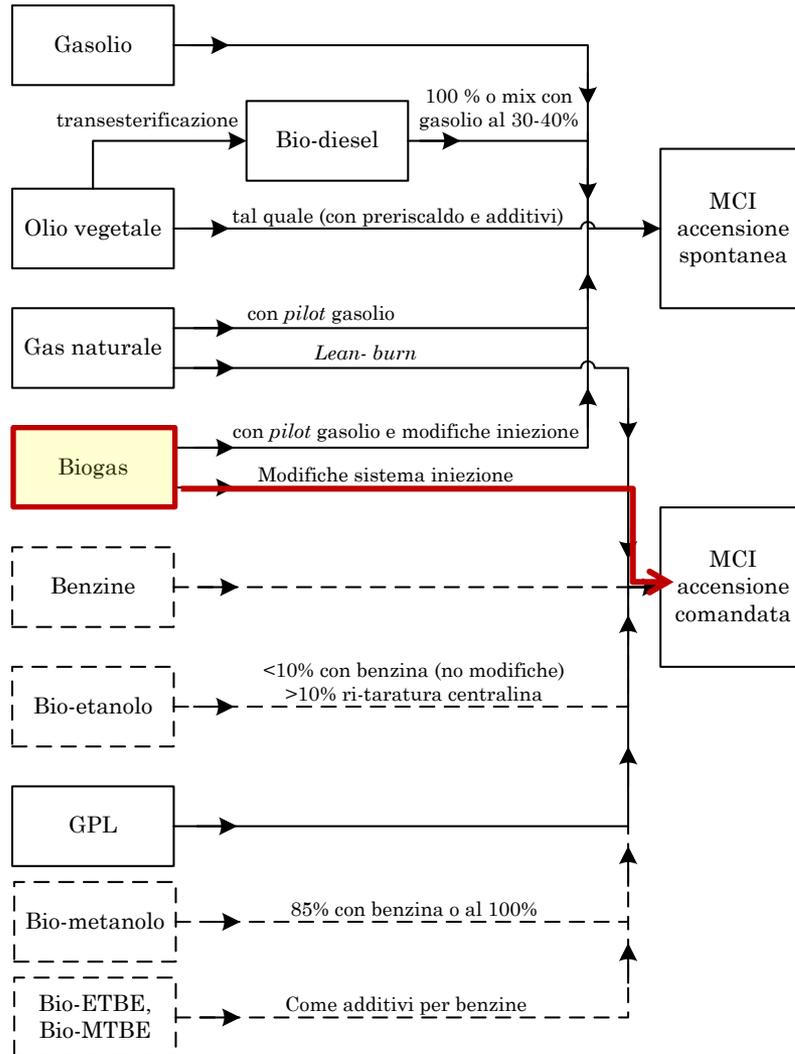


- Calore di scarto
- Perdite termiche
- Perdite elettriche e ausiliarie
- Calore totale recuperato
- Energia elettrica

# Combustibili nei MCI



# Combustibili nei MCI

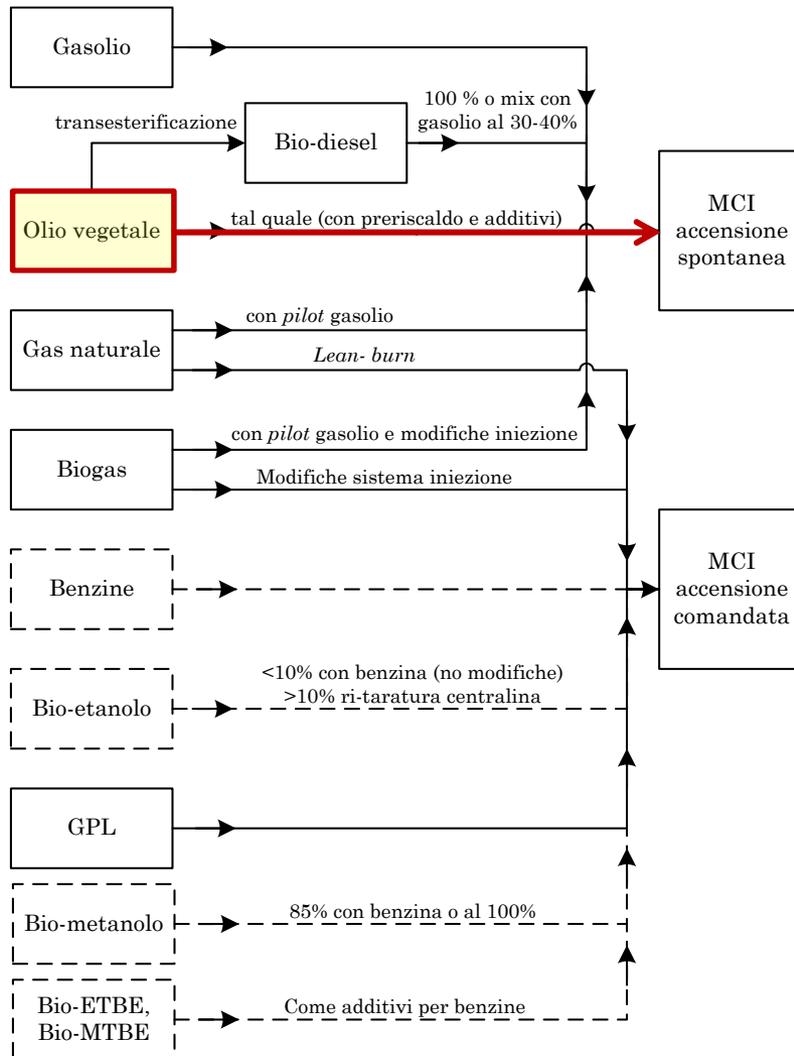


- **Motori ad accensione comandata (a ciclo “Otto”)**

## Uso del biogas

- adeguamento dell’anticipo all’accensione
- riduzione della potenza erogata (a causa del PCI inferiore)
- possibilità di aumentare il rapporto di compressione
- necessità di trattare il biogas (ad esempio umidità,  $H_2S$  → necessitano di sistemi di pretrattamento del biogas)

# Combustibili da biomasse nei MCI

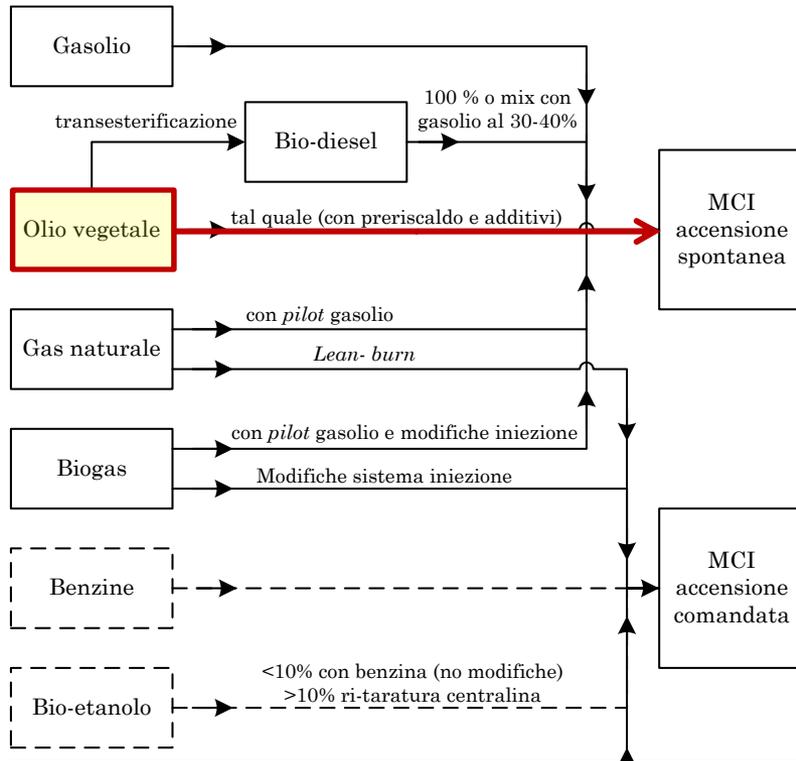


- **Motori ad accensione spontanea (a ciclo “Diesel”)**

## Uso degli oli vegetali

- **alta viscosità** degli oli vegetali (difficoltà di avviamento a freddo; intasamento filtri, linea di alimentazione e iniettori; usura precoce del motore) → preriscaldamento dell’olio e/o suo trattamento chimico
- presenza di gomme, fosfati e ceneri (intasamento filtri, linea di alimentazione e iniettori; usura precoce del motore) → raffinazione e filtrazione olio
- basso numero di cetano degli oli vegetali (difficoltà di avviamento a freddo; cattiva combustione) → regolazione tempo e anticipo di iniezione, funzionamento a gasolio puro ai carichi parziali, trattamento chimico dell’olio
- riduzione potenza e rendimento

# Combustibili da biomasse nei MCI



- **Motori ad accensione spontanea (a ciclo “Diesel”)**

## Uso degli oli vegetali

- **alta viscosità** degli oli vegetali (difficoltà di avviamento a freddo; intasamento filtri, linea di alimentazione e iniettori; usura precoce del motore) → preriscaldamento dell’olio e/o suo trattamento chimico
- presenza di gomme, fosfati e ceneri (intasamento filtri, linea di alimentazione e iniettori; usura precoce del motore) → raffinazione e filtrazione olio
- basso numero di cetano degli oli vegetali (difficoltà di avviamento a freddo; cattiva

Con il recente interesse verso gli oli vegetali si stanno affermando sul mercato motori di taglie anche ridotte ( $P_e < 500 \text{ kW}_e$ )

# Le tecnologie

## Tecnologie CHP a combustione interna

Consolidate

- ✓ Motori alternativi a combustione interna (MCI)
- ✓ **Turbine a Gas (TG) e Micro Turbine a Gas (MTG)**

## Tecnologie CHP a combustione esterna

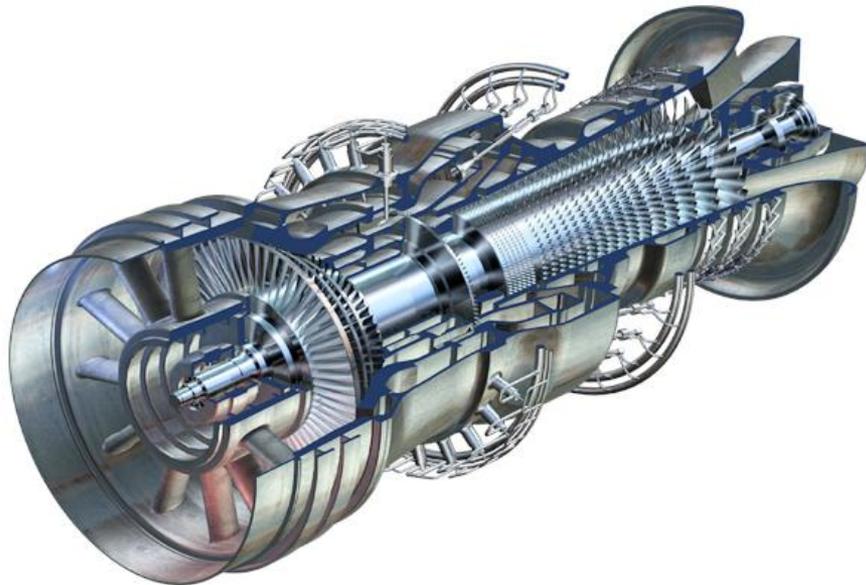
- ✓ Turbine a Vapore (TV)
- ✓ Motori Alternativi a Vapore (MAV)
- ✓ Cicli Rankine a fluido Organico (ORC)
- ✓ MTG a combustione esterna (EFMGT)
- ✓ Motori Stirling

Consolidate

In fase di  
consolidamento

# Turbine a Gas (TG)

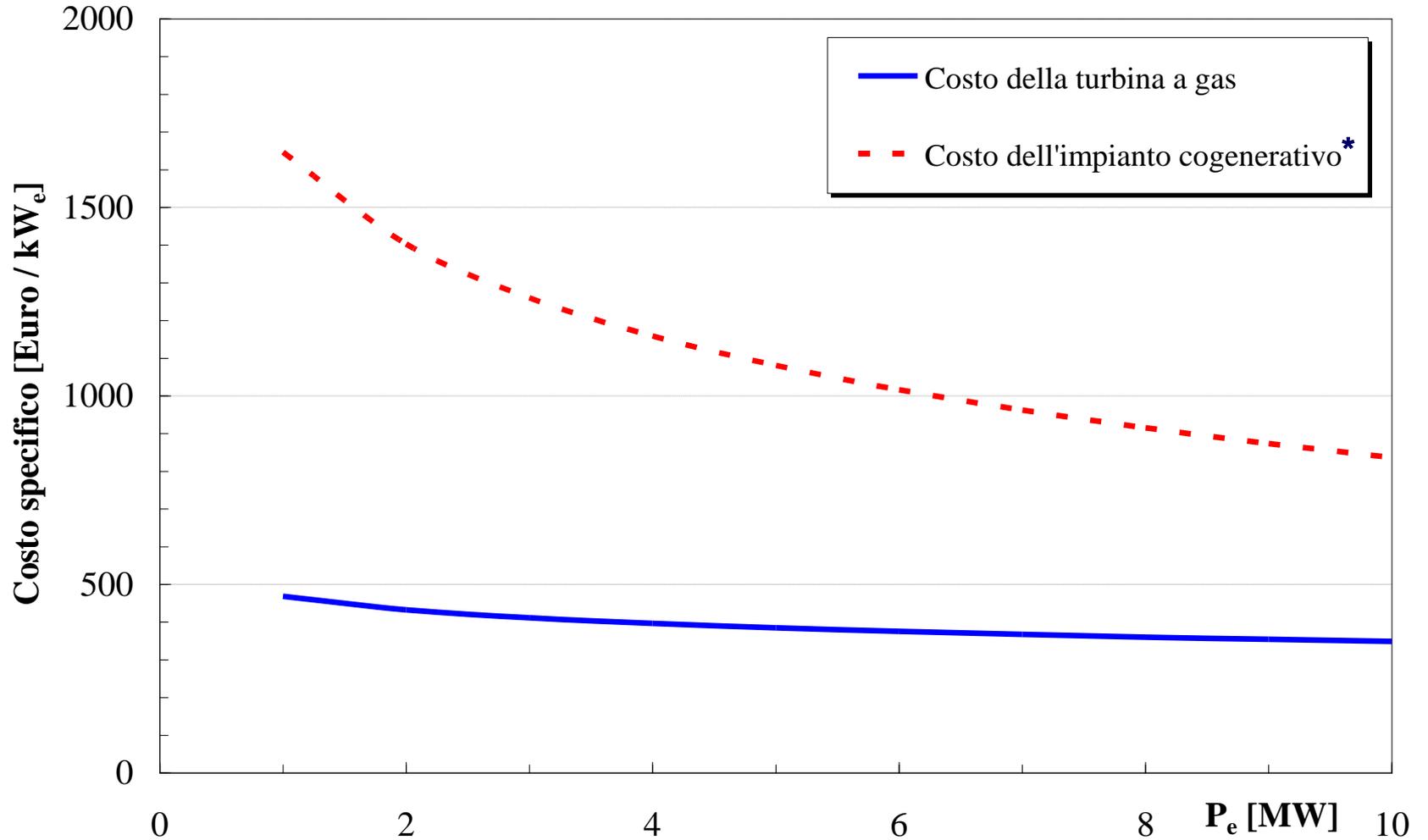
- **Tecnologia consolidata**
- **Disponibilità in taglie che vanno da 30 kW a 250 MW**



**Caratterizzata da**

- **Semplicità**
- **Bassi pesi e ingombri**
- **Libertà di installazione (assenza di sistema di raffreddamento)**
- **Bassi tempi di avviamento/fermata**
- **Solo combustibili “puliti”**
- **Alti rendimenti di conversione per le taglie elevate**

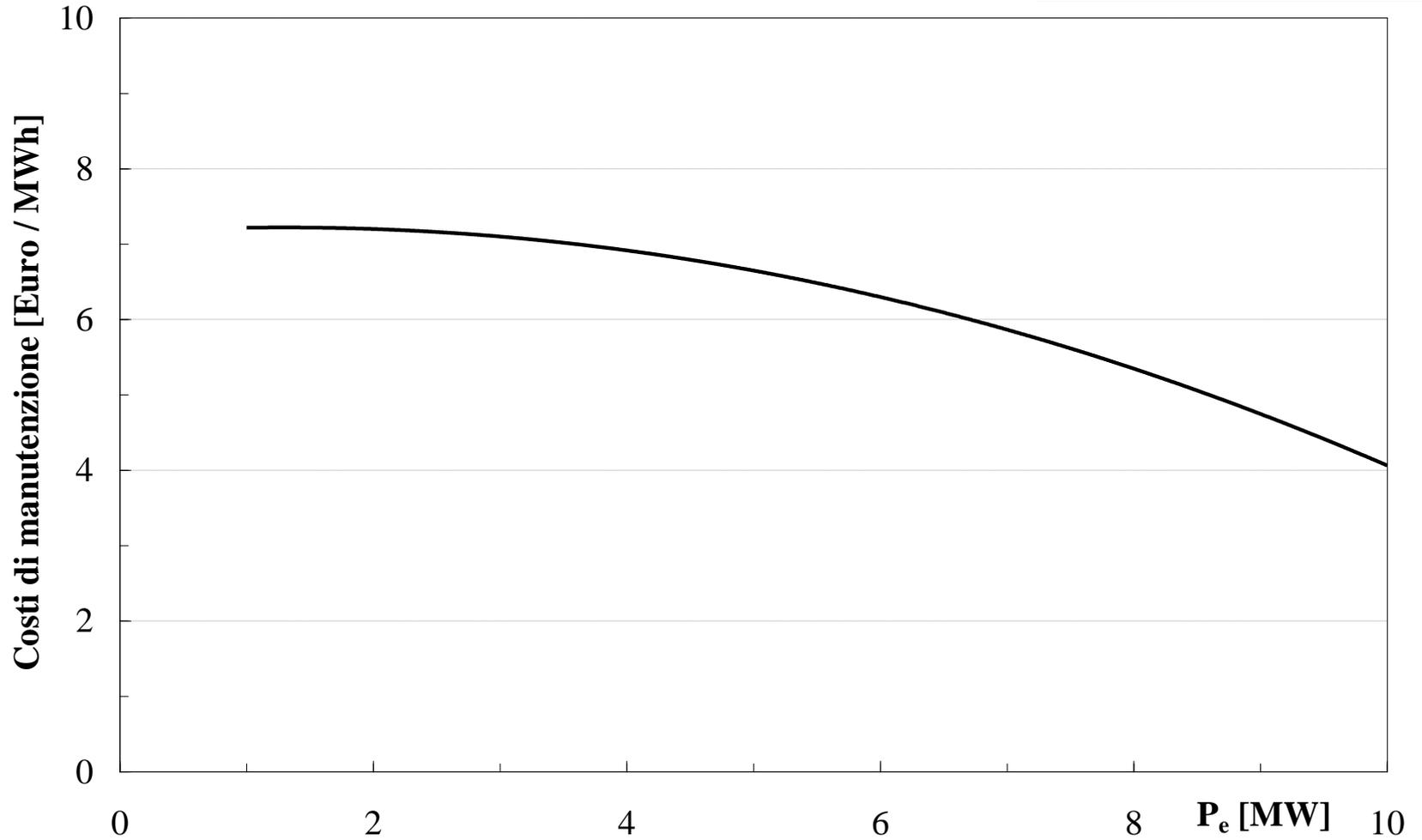
# Turbine a Gas (TG)



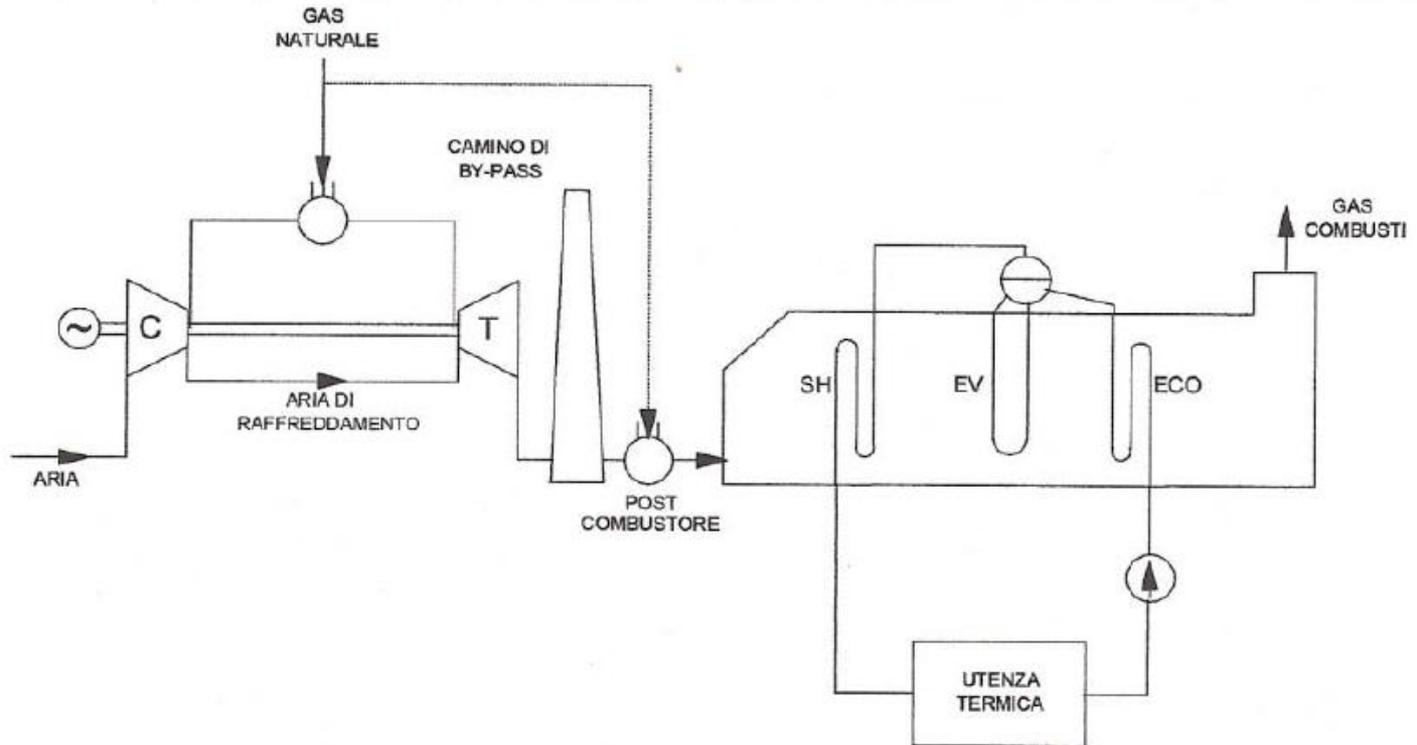
\*tiene conto di: HRSG, compressore NG, impianto elettrico, cantiere

# Turbine a Gas (TG)

MCI = 8÷25 €/MWh



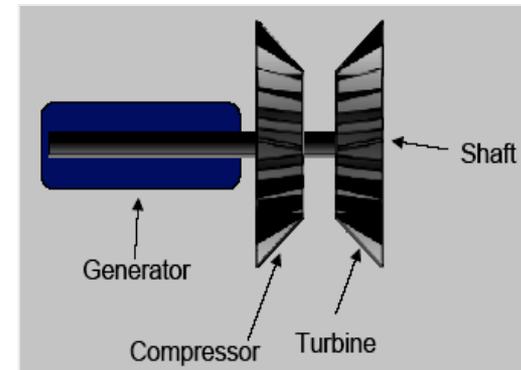
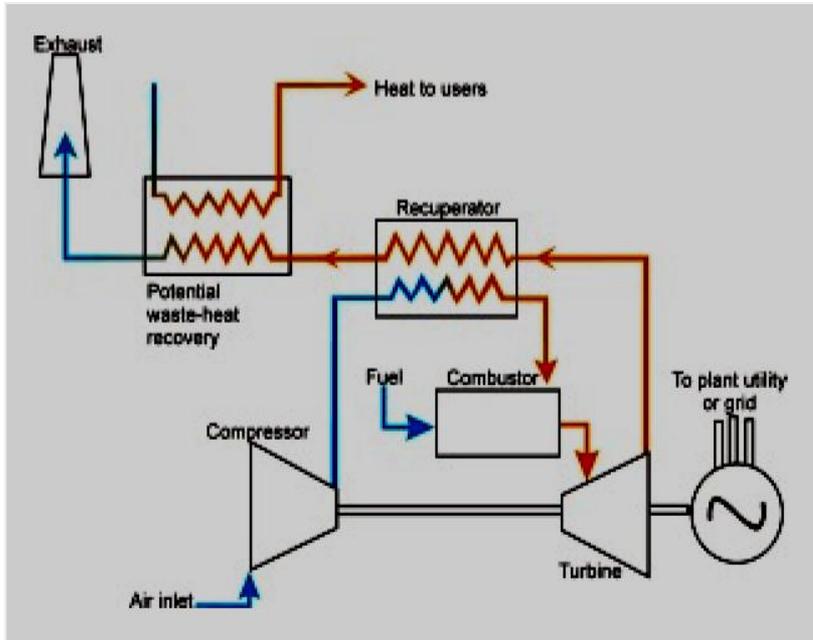
# Cogenerazione con TG



- ✓ La maggior parte del calore da recuperare può essere ad alta temperatura ( $\approx 500 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ed è concentrato nei fumi → particolarmente interessante per applicazioni industriali (vapore ad alta pressione, gas caldi)
- ✓ Recupero termico non influenza le prestazioni della turbina → grande flessibilità di funzionamento
- ✓ Fluido termovettore standard → vapore

# Micro Turbine a Gas (MTG)

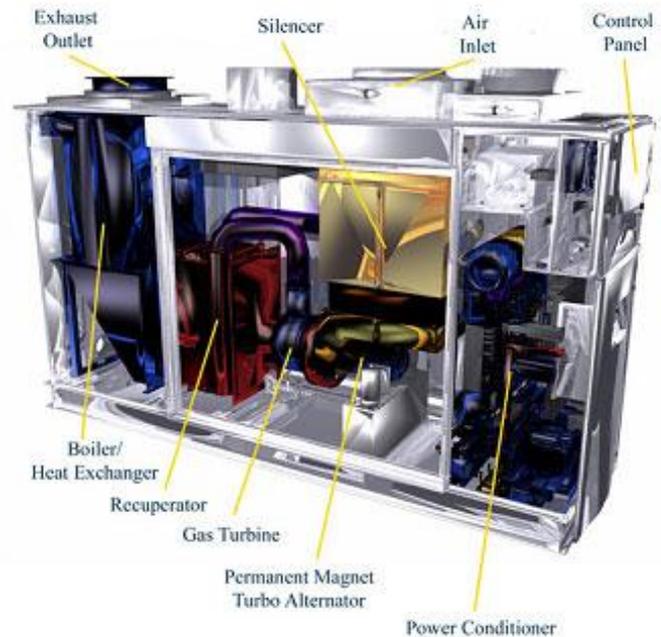
- Con MicroTurbina a Gas si identificano le turbina a gas di piccola/piccolissima taglia (  $P_{el} = 30 \text{ kW} \div 300 \text{ kW}$  )
- Costituita essenzialmente da
  - compressore centrifugo (monostadio)*
  - camera di combustione (continua)*
  - turbina centripeta (monostadio)*
  - recuperatore*



# Micro Turbine a Gas ( $P_e < 250$ kW)

Non sono uno *scale-down* delle turbine a gas industriali, ma nascono da una nuova progettazione:

- ✓ turbine non raffreddate ( $TIT < 950$  °C)
- ✓ turbina e compressori radiali a basso rapporto di compressione ( $\beta = 3-5$ )
- ✓ ciclo rigenerativo
- ✓ elevata velocità di rotazione variabile (50.000 – 120.000 rpm)

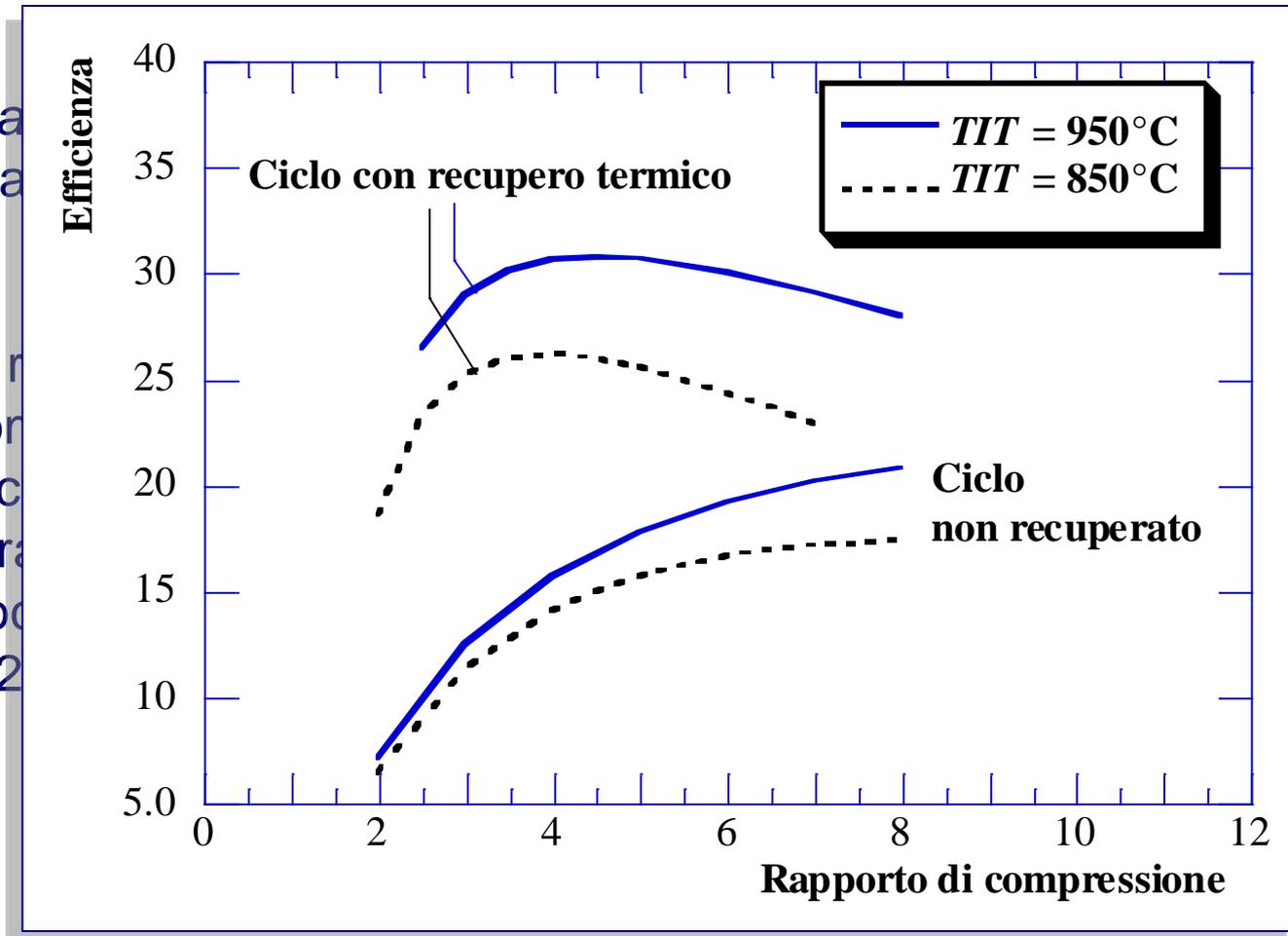


Typical microturbine package

# Micro Turbine a Gas ( $P_e < 250$ kW)

Non sono uno scafo  
gas industriali, ma  
progettazione:

- ✓ turbine non r
- ✓ turbina e cor  
rapporto di c
- ✓ ciclo rigenera
- ✓ elevata veloc  
(50.000 – 12



# MTG sul mercato

Costruttore	Modello	Pe [kWe]	$\eta_e$ [%]	$\eta_t$ [%]	velocità [rpm]	$\beta$	T fumi [°C] (no CHP)
<b>Capstone</b>	<b>C30</b>	<b>30</b>	<b>26</b>	-	<b>96000</b>	<b>3.5</b>	<b>275</b>
<i>Capstone</i>	<i>C60</i>	<i>60</i>	<i>28</i>	<i>53.7</i>	<i>96000</i>	<i>3.7</i>	<i>360</i>
<b>Capstone</b>	<b>C65</b>	<b>65</b>	<b>29</b>	<b>50.0</b>	<b>96000</b>	<b>3.7</b>	<b>309</b>
<i>Ingersoll Rand</i>	<i>MT70</i>	<i>70</i>	<i>28</i>	<i>40.0</i>	<i>44000</i>	-	<i>210</i>
<b>Bowman</b>	<b>TG80CG</b>	<b>80</b>	<b>26</b>	<b>48.8</b>	<b>68000</b>	-	<b>278</b>
<i>Elliott</i>	<i>TA80</i>	<i>80</i>	<i>28</i>	<i>60.0</i>	-	<i>4.0</i>	<i>230</i>
<b>Elliott</b>	<b>TA100</b>	<b>100</b>	<b>29</b>	<b>50.0</b>	-	<b>4.0</b>	<b>293</b>
<b>Turbec</b>	<b>T100</b>	<b>100</b>	<b>30</b>	<b>46.5</b>	<b>70000</b>	<b>4.5</b>	<b>270</b>
<b>Capstone</b>	<b>C200</b>	<b>190</b>	<b>33</b>	<b>40.0</b>	<b>65000</b>	-	<b>280</b>
<b>Ingersoll Rand</b>	<b>MT250</b>	<b>250</b>	<b>30</b>	<b>44.6</b>	<b>45000</b>	-	<b>249</b>

# MTG sul mercato

## Capstone (30-200 kW)



Costruttore

Capstone

Capstone

Capstone

Ingersoll

Bowman

Elliott

E

T

C

I

Pe  
[kWe]

$\eta_e$   
[%]

$\eta_t$   
[%]

velocità  
[rpm]

temperatura  
[°C]  
CHP)

30

26

-

960

275

60

## Bowman (80 kW)

28

33.7

960

360



250

30

44.6

960

309

440

210

6800

## Turbec (100 kW)

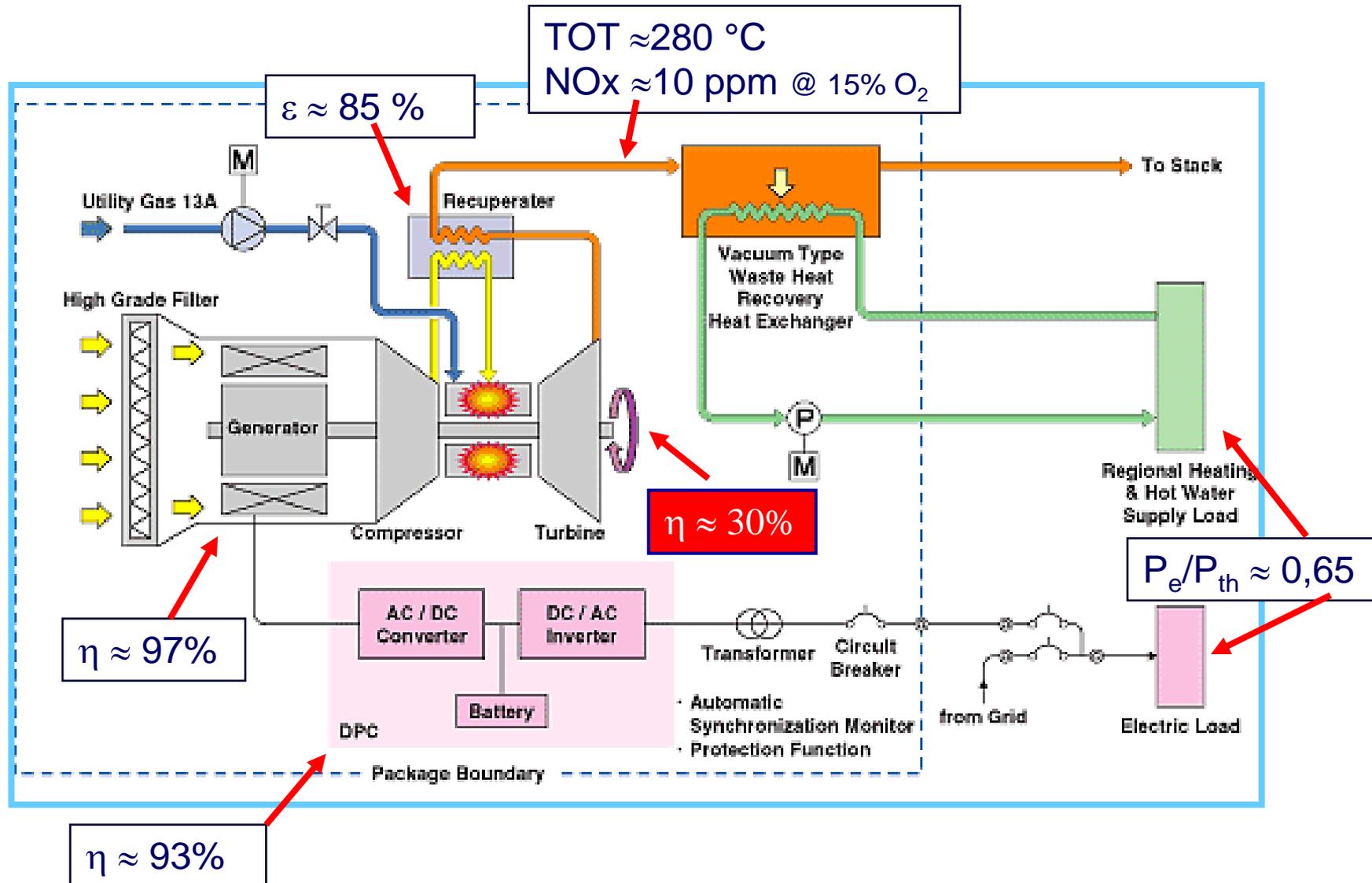


## Elliott (100 kW)

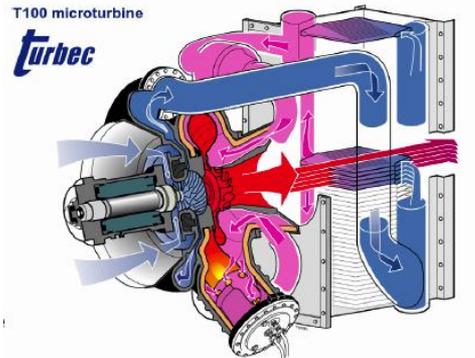
TC80CG

TA80

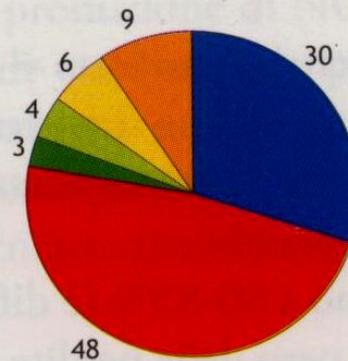
# Cogenerazione con MTG



# Bilancio energetico di una MGT

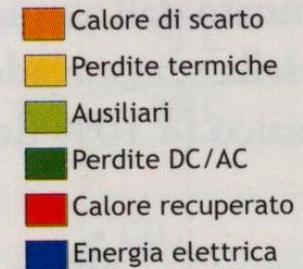
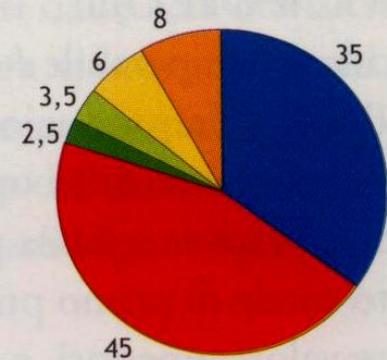


Bilancio energetico MTG  
taglia 100 kWe



(Combustibile in ingresso = 100;  
riferimento PCI)

Bilancio energetico MTG  
taglia 200-400 kWe



(Combustibile in ingresso = 100;  
riferimento PCI)

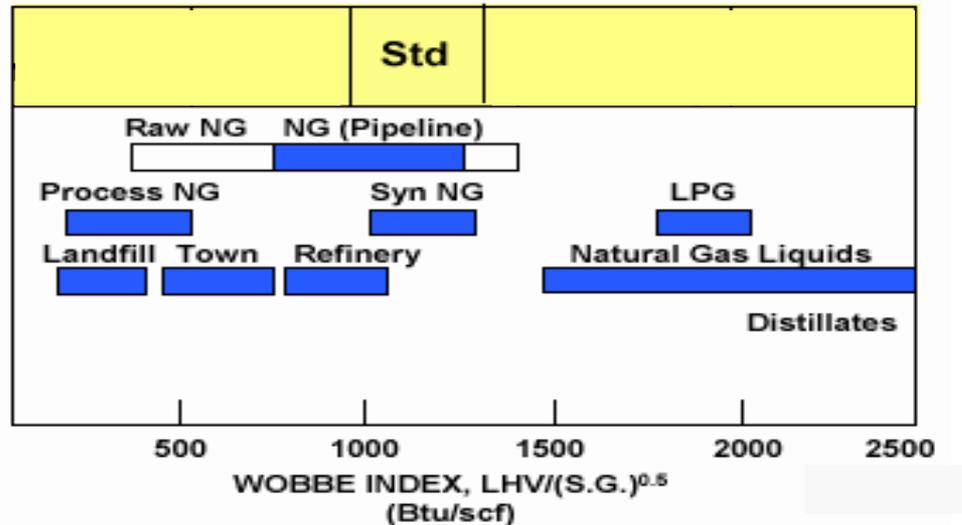
# Applicazioni MTG



Cogenerazione in  
applicazioni  
residenziali

# Biogas e syngas nelle TG

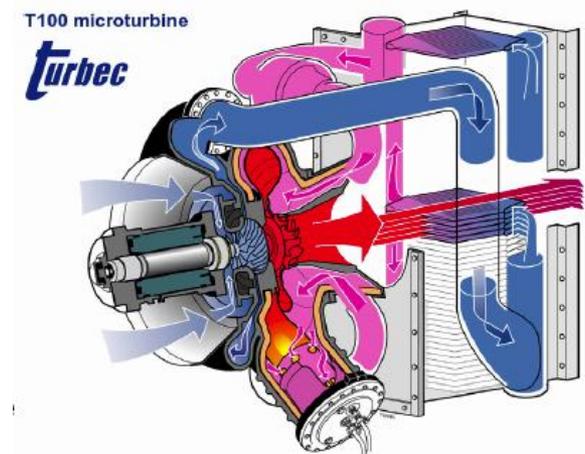
- ✓ Gas Naturale → 32000÷38000 kJ/Nm<sup>3</sup>
- ✓ Negli ultimi anni opportunità di alimentazione con **combustibili alternativi**
  - Gas da gassificazione di biomassa → 3500÷7000 kJ/Nm<sup>3</sup>
  - Biogas da digestione o da discarica → ≈ 20000 kJ/Nm<sup>3</sup>
- ✓ A causa del diverso PCI e della diversa composizione possono essere necessari adeguamenti



# Biogas nelle TG

- ✓ Con biogas di composizione tipica ( $\text{CH}_4$  - 60 %,  $\text{CO}_2$  - 40 %) si utilizza una macchina con sistema di combustione convenzionale.
- ✓ L'avviamento della macchina e lo spegnimento devono essere fatti con un altro combustibile (gas naturale o Diesel). Risulta difficile utilizzare il biogas puro a carichi inferiori al 60%.

Inizialmente si deve mescolare il biogas con gas naturale (25 %<sub>vol</sub> di gas naturale e 75 %<sub>vol</sub> di biogas). La quantità di gas naturale viene poi progressivamente ridotta fino ad alimentare la turbina unicamente a biogas



# Biogas nelle TG

- ✓ Vasto range di composizione del biogas ( $\text{CH}_4 > 30\%$ )
- ✓ Rendimento pressoché costante al variare della % di  $\text{CH}_4$
- ✓ Buona tollerabilità al contenuto di  $\text{H}_2\text{S}$  nel combustibile

*Tollerabilità all'  $\text{H}_2\text{S}$*

*Microturbina → 3000÷7000 ppm*

*Motore a c.i. → < 250 ppm*

- ✗ Presenza di tracce di  $\text{H}_2\text{S}$  nei gas di combustione → altamente corrosivo
- ✗ Difficoltà di combustione ai bassi regimi
- ✗ Vapore acqueo nel combustibile



# Biogas e MTG (Ingersoll Rand – Turbec)

CONDIZIONI BIOGAS		
	IR MT250	TURBEC T100
Temperatura minima in ingresso	1°C	0°C
Temperatura massima in ingresso	66°C	60°C
Pressione per condotto 4"	5 bar	Pressione 8 bar
Pressione per condotto 8"	14 bar	
Limite H <sub>2</sub> S	300 ppm	3000 ppmv
Limite siloxani	0,06 mg/m <sup>3</sup>	100 mg/m <sup>3</sup>

MANUTENZIONE		
	IR MT250	TURBEC T100
Ciclo di vita [h]	80.000	60.000
Ciclo di manutenzione [h]	8000	6000
Sostituzione filtri aria [h]	8000	/
Sostituzione termocoppia [h]	16000	/
Sostituzione iniezione [h]	16000	/
Revisione rotore [h]	40.000	30.000

# Biogas e MTG (Capstone)

		<b>C30</b>	<b>C65-ICHP</b>	<b>C200</b>	<b>C600</b>
<b>Potere calorifico gas</b>	<b>kJ/Nm<sup>3</sup></b>	12000-32000	20500-32500	20500-32500	20500-32500
<b>Potenza netta</b>	<b>kW</b>	30	65	200	600
<b>Potenza termica fumi</b>	<b>kW</b>	-		394	1183
<b>Potenza termica acqua*</b>	<b>kW</b>	-	74	-	-
<b>Rendimento elettrico</b>	<b>%</b>	23	29	33	33
<b>Rendimento termico</b>	<b>%</b>	-	62	-	-
<b>Portata fumi</b>	<b>kg/h</b>	1116	1764	4680	14400
<b>Temperatura fumi</b>	<b>°C</b>	275	309	280	280
<b>Limite H<sub>2</sub>S</b>	<b>ppmv</b>	7'000	5'000	5'000	5'000
<b>NOx</b>	<b>mg/Nm<sup>3</sup></b>	18	18	18	18

\*T<sub>in</sub> = 38 ° C, Q<sub>H2O</sub> = 2.5 kg/s



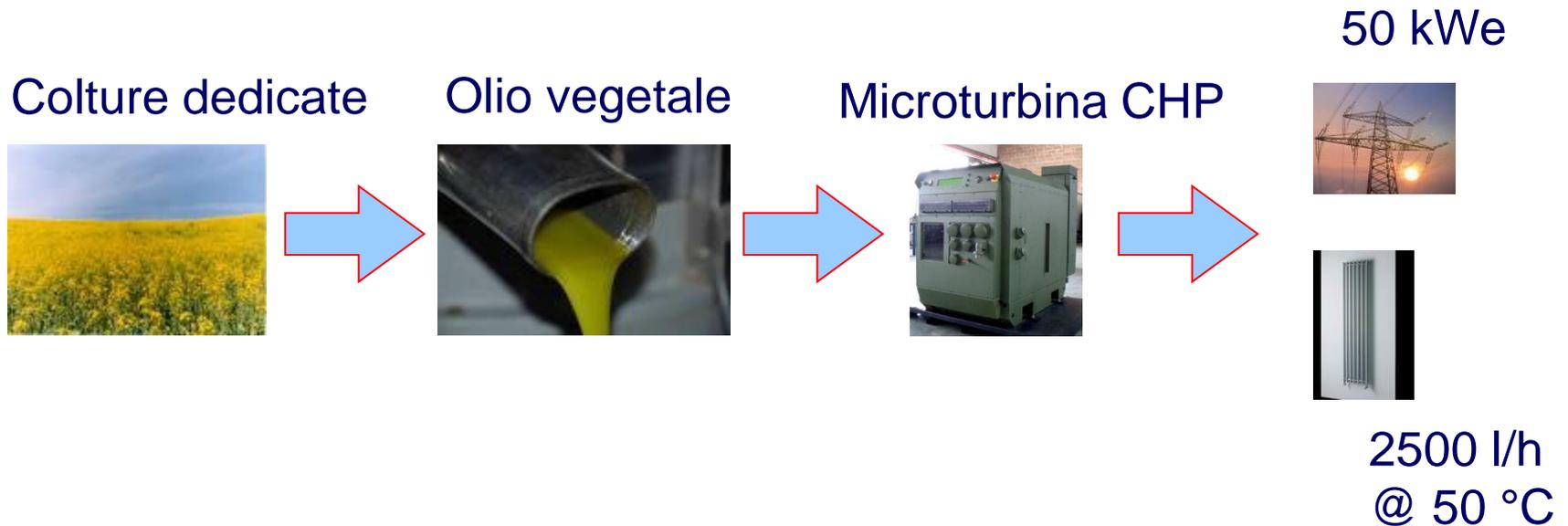
# MTG ad olio vegetale

**Ferrara: progetto sulla produzione di biomasse per l'energia.**

Produzione di energia da oli vegetali con microturbina a gas.

Realizzazione di un impianto pilota

(coltivazione – spremitura olio – microturbina).



# MTG vs MCI

## VANTAGGI MTG

- ✓ ridotte emissioni di NOx e CO (<10 ppm @ 15% O2)
- ✓ ingombri e pesi contenuti
- ✓ bassa rumorosità e vibrazioni
- ✓ manutenzione ridotta (ogni 10.000 ore)
- ✓ elevata vita utile (80.000 ore)

- ✓ Rumore
- ✓ Intervallo di manutenzione
- ✓ Costi di manutenzione

## SVANTAGGI MTG

- ✗ tecnologia emergente
- ✗ costo specifico elevato
- ✗ rendimenti elettrici inferiori
- ✗ bassa temperatura fumi (280 °C)

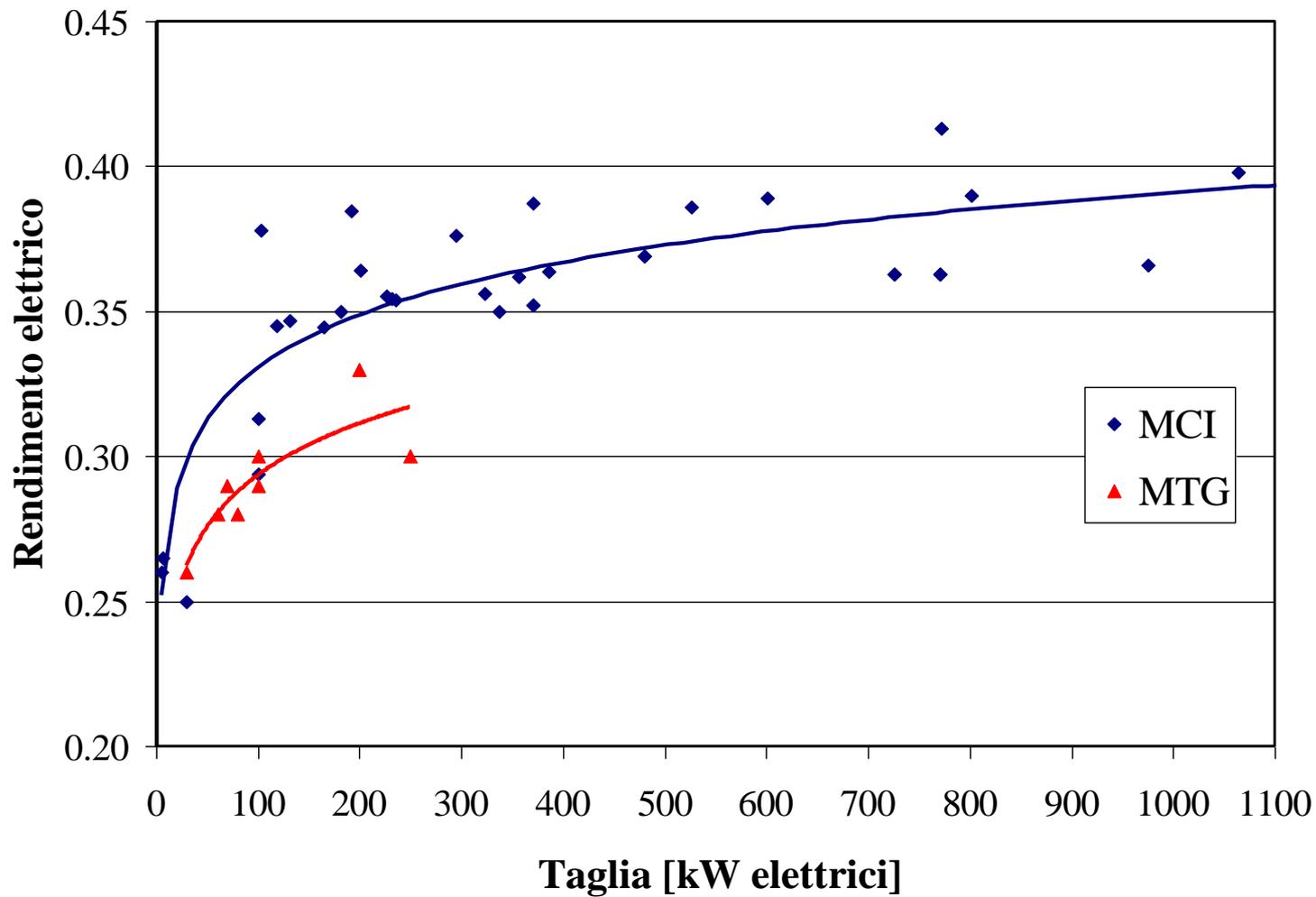
70-80 dB(A)@1m

Attuale → 8 000 h

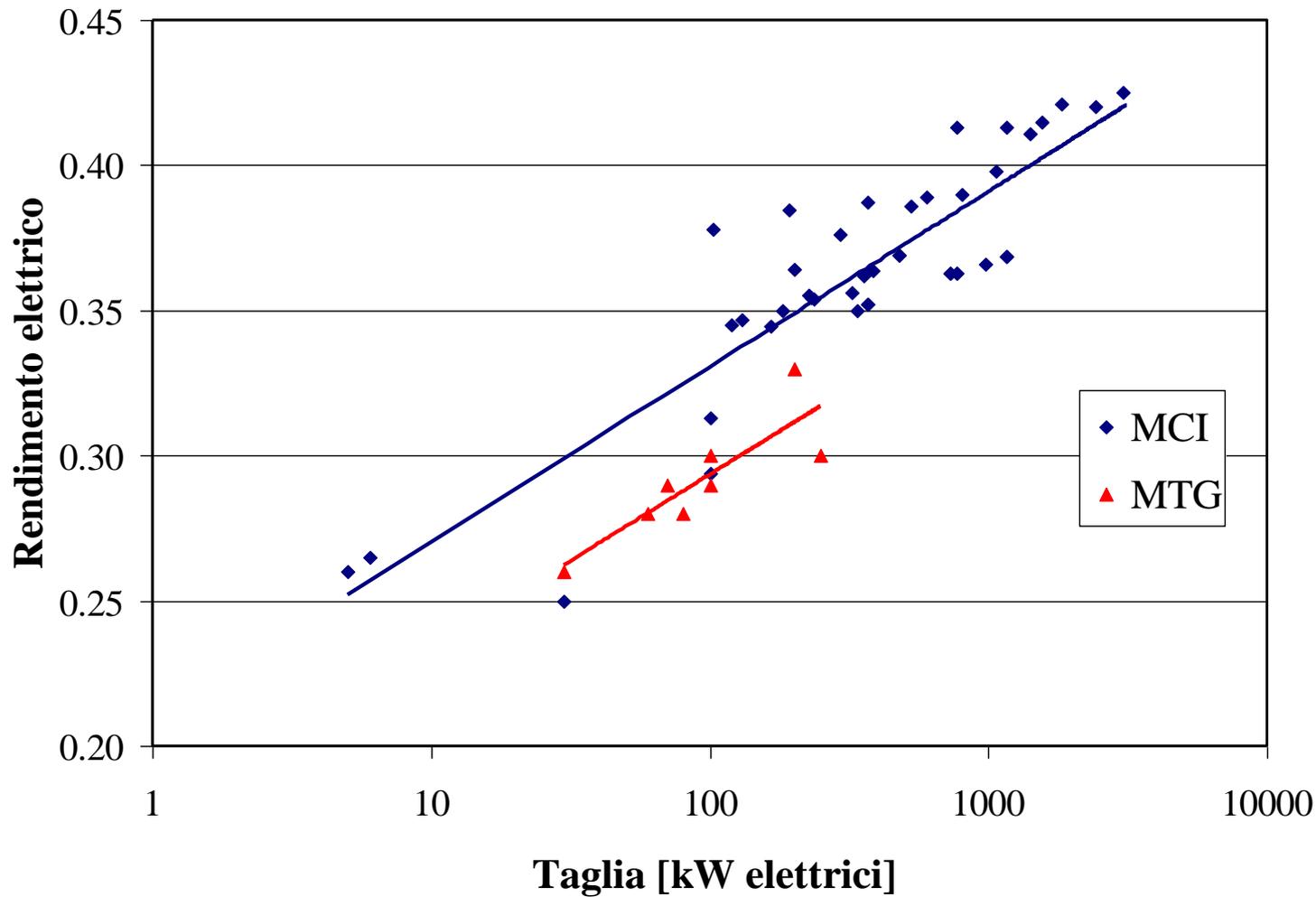
Target → 11 000 h

10 €/MWh

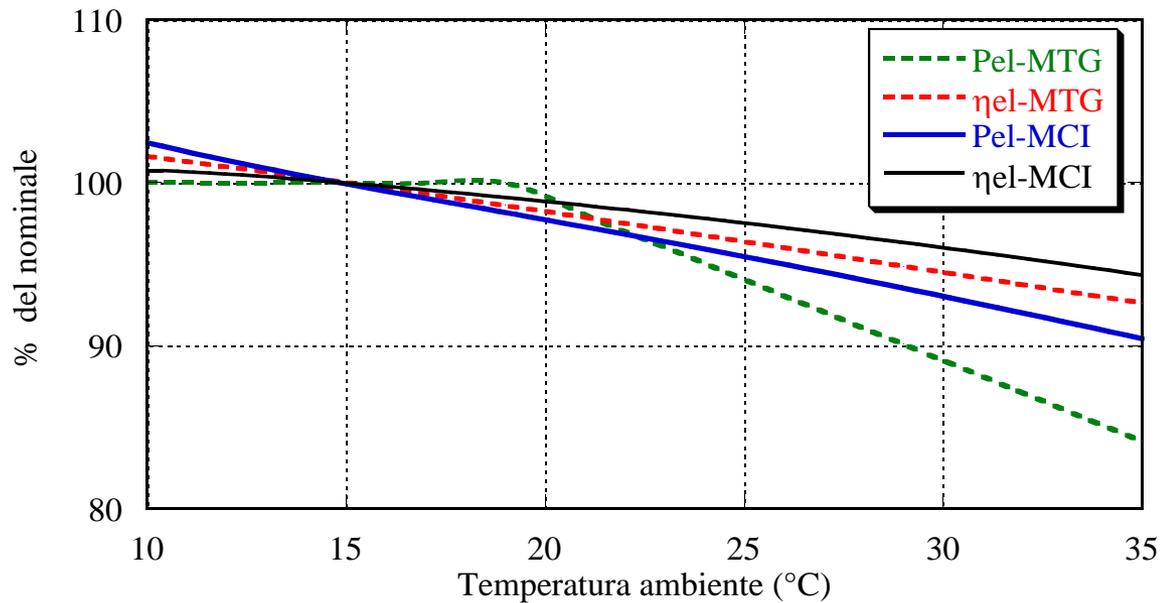
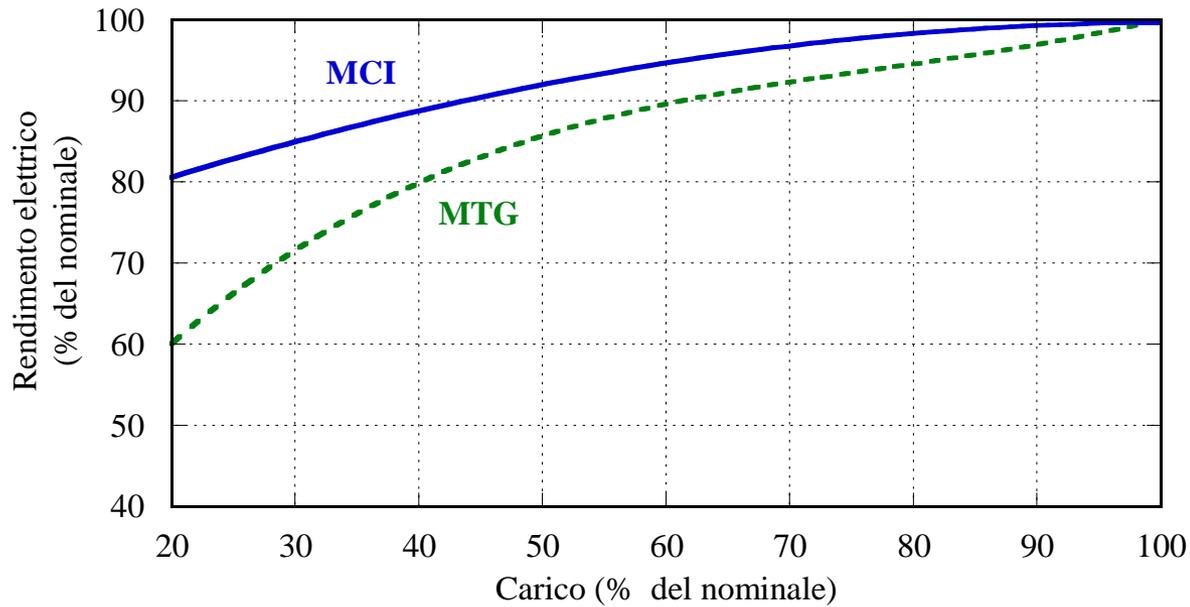
# MTG vs MCI



# MTG vs MCI



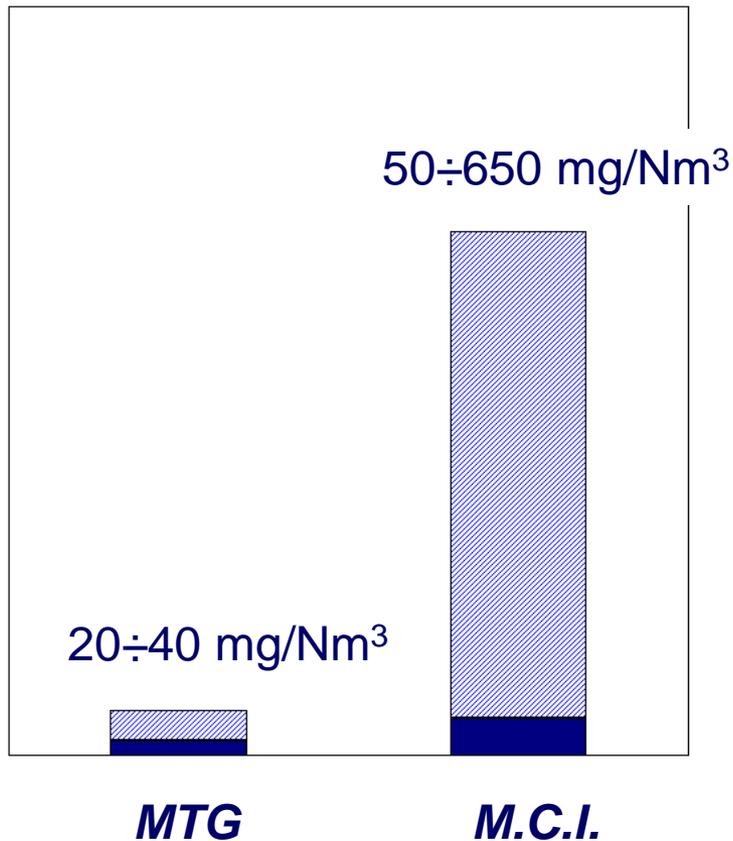
# MTG vs MCI



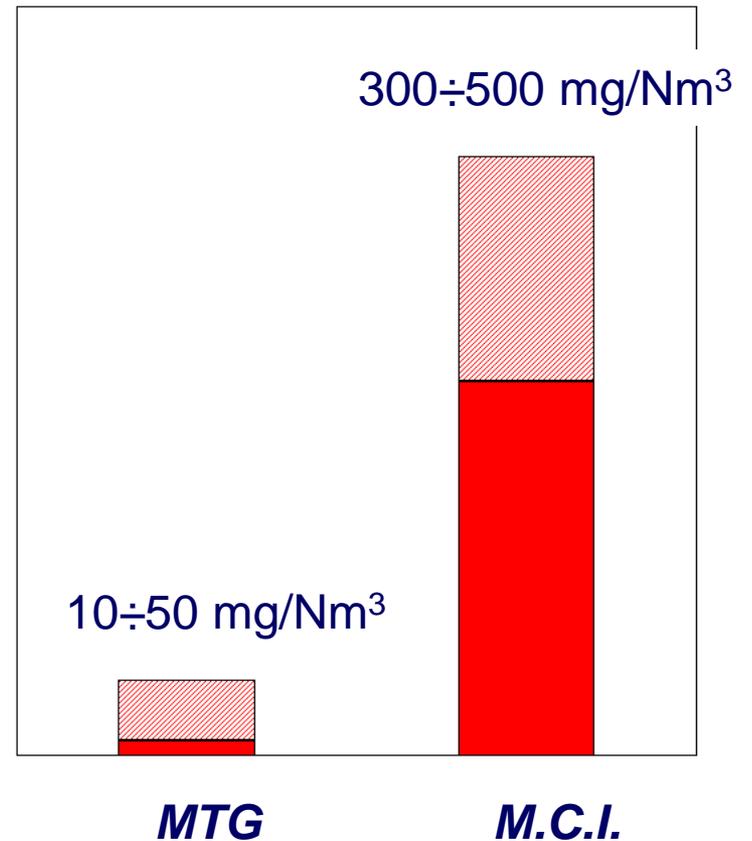
# MTG vs MCI

- ✓ **Emissioni ridotte:** fattore 10/100 rispetto ad un MCI

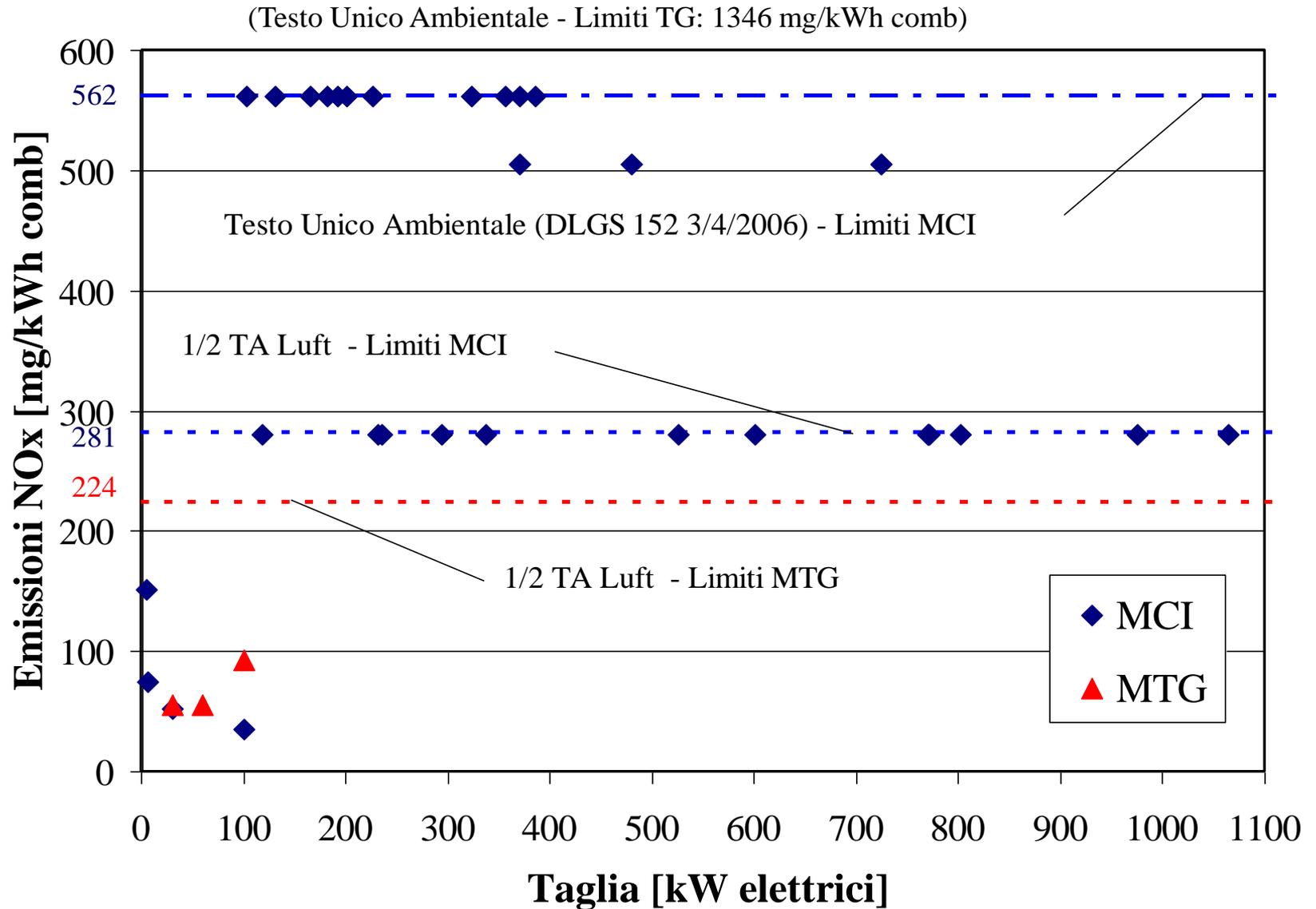
$\text{NO}_x @ 15\% \text{O}_2$



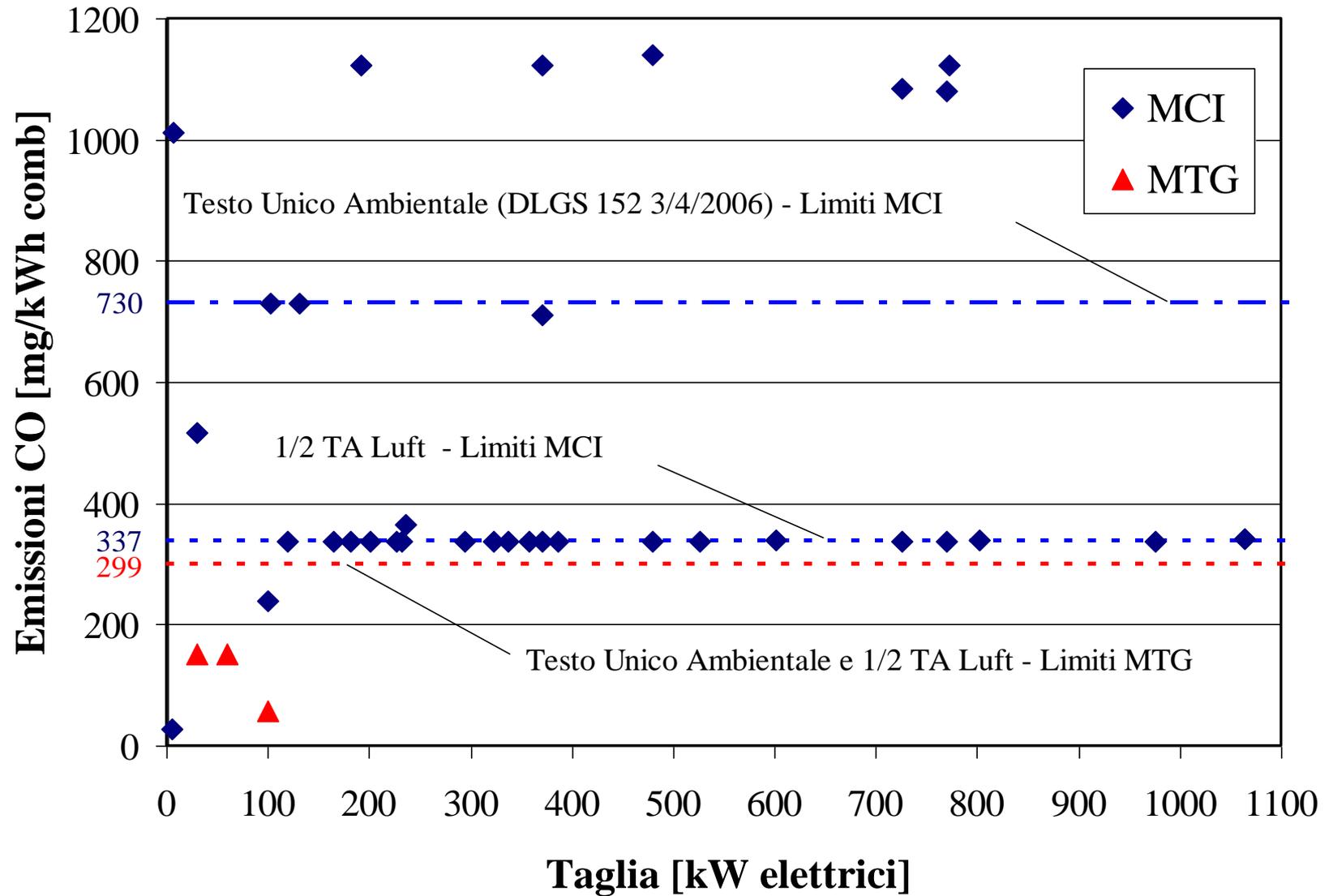
$\text{CO} @ 15\% \text{O}_2$



# MTG vs MCI



# MTG vs MCI



# Le tecnologie

## Tecnologie CHP a combustione interna

Consolidate

- ✓ Motori alternativi a combustione interna (MCI)
- ✓ Turbine a Gas (TG) e Micro Turbine a Gas (MTG)

## Tecnologie CHP a combustione esterna

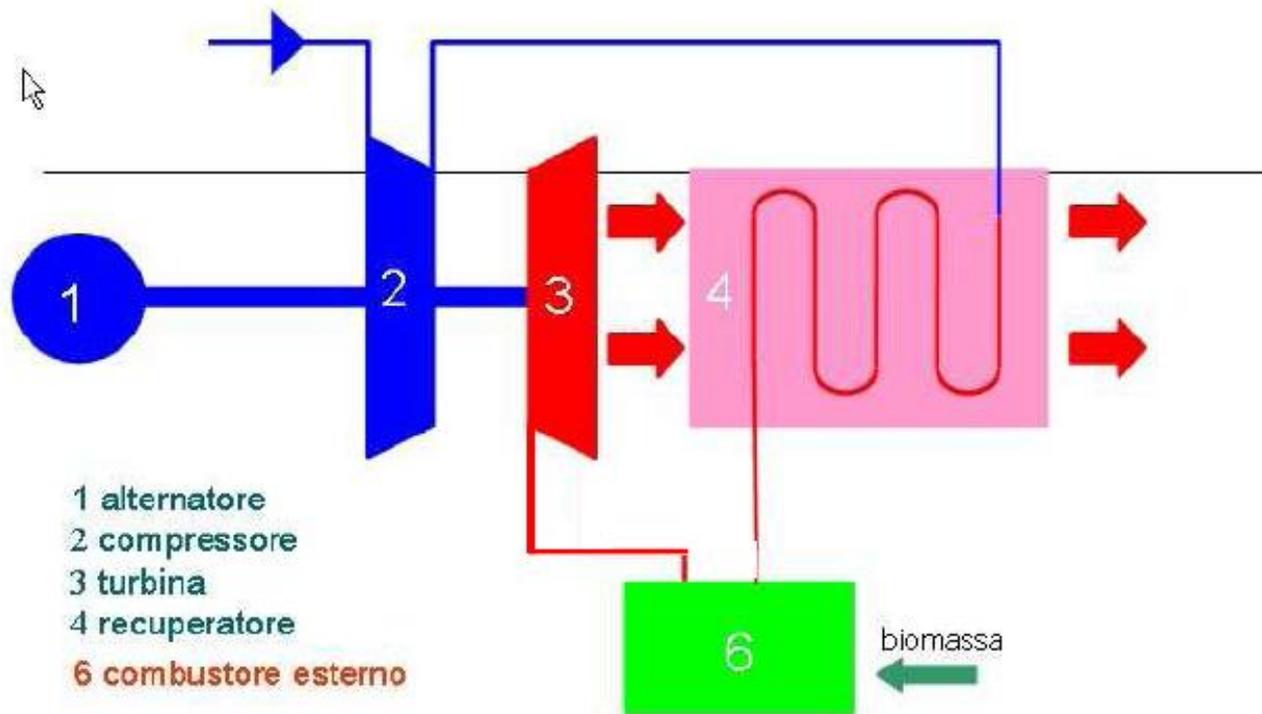
- ✓ Turbine a Vapore (TV)
- ✓ Motori Alternativi a Vapore (MAV)
- ✓ Cicli Rankine a fluido Organico (ORC)
- ✓ **MTG a combustione esterna (EFMGT)**
- ✓ Motori Stirling

Consolidate

In fase di  
consolidamento

# MTG a combustione esterna

- ✓ Il sistema è basato su una microturbina convenzionale nella quale la camera di combustione viene sostituita da uno scambiatore di calore aria/gas, che innalza la temperatura del fluido fino alle temperature adeguate per il ciclo di Brayton



# Sistema Power Tep - EPS

- ✓ La **microturbina** utilizzata è un TURBEC T100
- ✓ La turbina è messa a punto per funzionare, a pieno carico, ad una potenza inferiore al valore tipico con alimentazione a gas naturale (80 kW contro 100 kW)



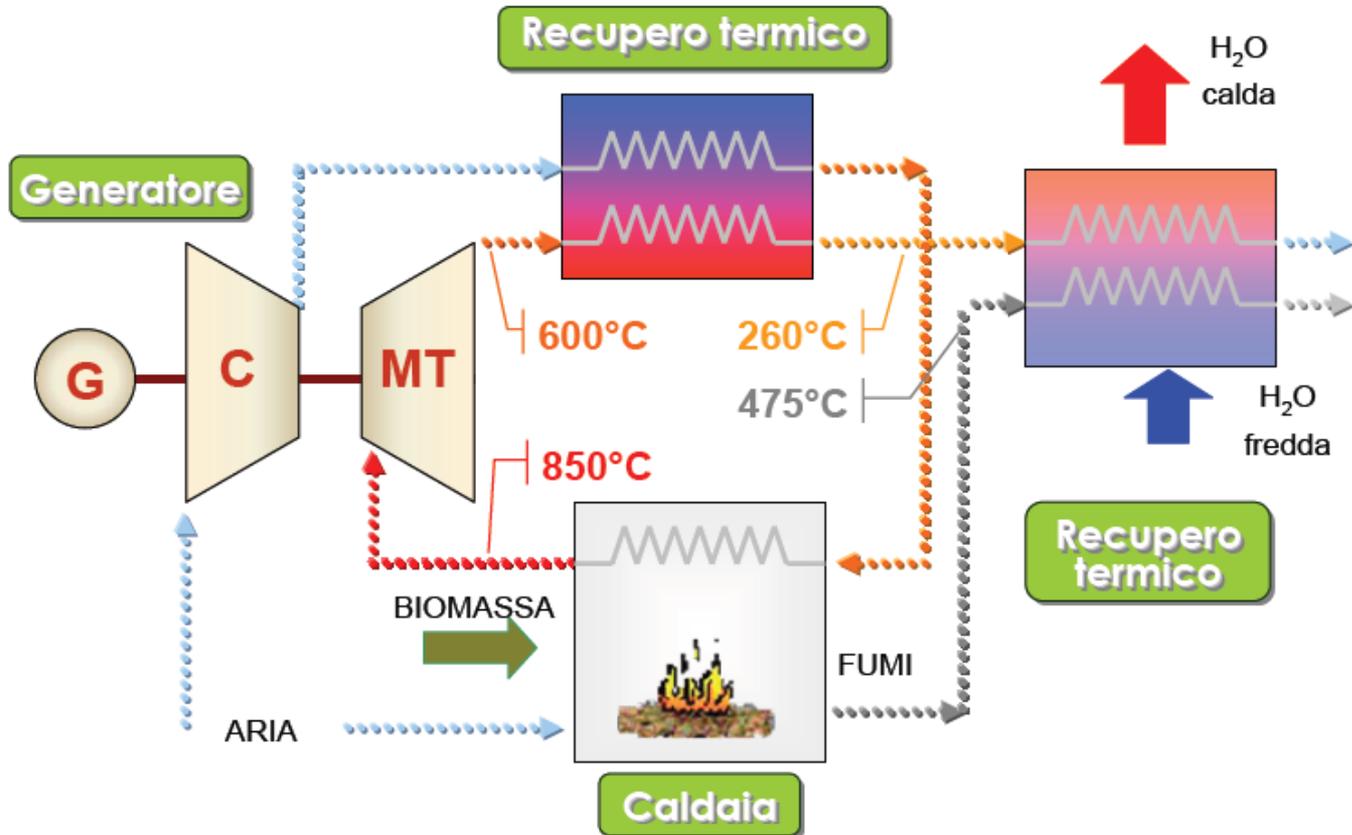
# Sistema Power Tep - EPS

- ✓ Il **combustore** ha un rendimento termico superiore al 90%. E' prevista la presenza di un focolaio a griglia fissa per trattare sia cippato fine o pellet sia materiale legnoso molto eterogeneo.
- ✓ L'**alimentazione dell'aria primaria** è regolata su 3 livelli tramite serrande ad alette contrapposte azionate da un comando proporzionale.
- ✓ Il **sistema di alimentazione** della caldaia avviene tramite una coclea. Il materiale viene poi trasferito ad un caricatore a vite senza fine che ha il compito di introdurre il materiale in caldaia.



# Sistema Power Tep - EPS

- ✓ Potenza elettrica:  $80 \text{ kW}_e$
- ✓ Potenza termica caldaia:  $500 \text{ kW}_t$
- ✓ Potenza termica scaricata:  $300 \text{ kW}_t$
- ✓ Consumo orario biomassa secca:  $120 - 150 \text{ kg/h}$
- ✓ Rendimento elettrico:  $15 \%$



# Sistema Turbomass – Sib Siber

- ✓ Il sistema del tutto analogo al precedente
  - ✓ Potenza elettrica:  $80 \text{ kW}_e$
  - ✓ Potenza termica caldaia:  $450 \text{ kW}_t$
  - ✓ Potenza termica scaricata:  $155 \text{ kW}_t$
  - ✓ Rendimento elettrico: 18 %



# Sistema Turbomass – Sib Siber

La **caldaia a biomassa** ha lo scopo di generare il calore da trasferire all'aria di processo della microturbina mediante lo scambiatore ad alte prestazioni aria/fumi. Il combustore è del tipo a coclea sottoalimentato ed è appositamente progettato e realizzato allo scopo di utilizzare cippato, pellet, mais, o altri tipi di biomassa solida con contenuto di umidità fino al 35 % sul totale. La potenza termica al focolare è di circa 450 kW ed il rendimento termico è superiore al 90%.

Lo **scambiatore di calore** di caldaia avente la funzione di scambio termico tra i fumi di caldaia e l'aria di processo della turbina, è alloggiato all'interno della struttura del combustore.

<b>SCAMBIATORE LATO ARIA MICROTURBINA</b>		
Temperatura in ingresso:	°C	400÷560
Temperatura in uscita:	°C	850÷950
Portata aria:	kg/s	0,74 (Max 0,78)
Pressione di esercizio:	bara	Max 4,5

# BIC Lazio

- ✓ Sistema trigenerativo per alimentare l'incubatore di impresa presso BICLAZIO (Business Innovation Centre) a Colleferro (Roma)
- ✓ Verde comunale, sfalci boschivi dalla raccolta di municipalizzate e conferite da ditte private



# BIC Lazio

- ✓ Sistema trigenerativo per alimentare l'incubatore di impresa presso BICLAZIO (Business Innovation Centre) a Colferro (Roma)
- ✓ Verde comunale, sfalci boschivi dalla raccolta di municipalizzate e conferite da ditte private
- ✓ Consumo orario biomassa: 100-150 kg/h (in funzione dell'umidità)
- ✓ Potenza elettrica: 75 kW<sub>el</sub>
- ✓ Potenza termica caldaia: 450 kW<sub>t</sub>
- ✓ Potenza termica utile: 300 kW<sub>t</sub>
- ✓ Potenza frigorifera utile: 100 kW<sub>t</sub>
- ✓ Rendimento elettrico: 16 %

# Le tecnologie

## Tecnologie CHP a combustione interna

Consolidate

- ✓ Motori alternativi a combustione interna (MCI)
- ✓ Turbine a Gas (TG) e Micro Turbine a Gas (MTG)

## Tecnologie CHP a combustione esterna

- ✓ **Turbine a Vapore (TV)**
- ✓ **Motori Alternativi a Vapore (MAV)**
- ✓ Cicli Rankine a fluido Organico (ORC)
- ✓ MTG a combustione esterna (EFMGT)
- ✓ Motori Stirling

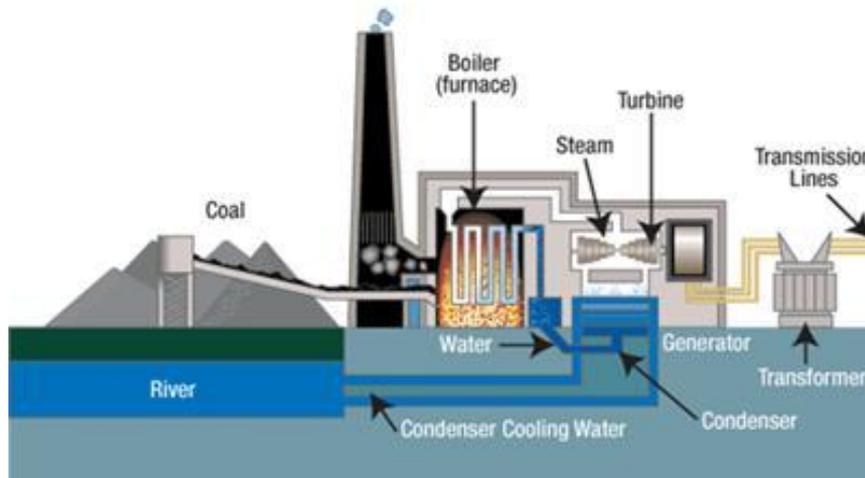
Consolidate

In fase di  
consolidamento

# Impianti a vapore d'acqua

L'impianto è costituito da una pompa, una caldaia, una turbina ed un condensatore e utilizza come fluido operatore acqua.

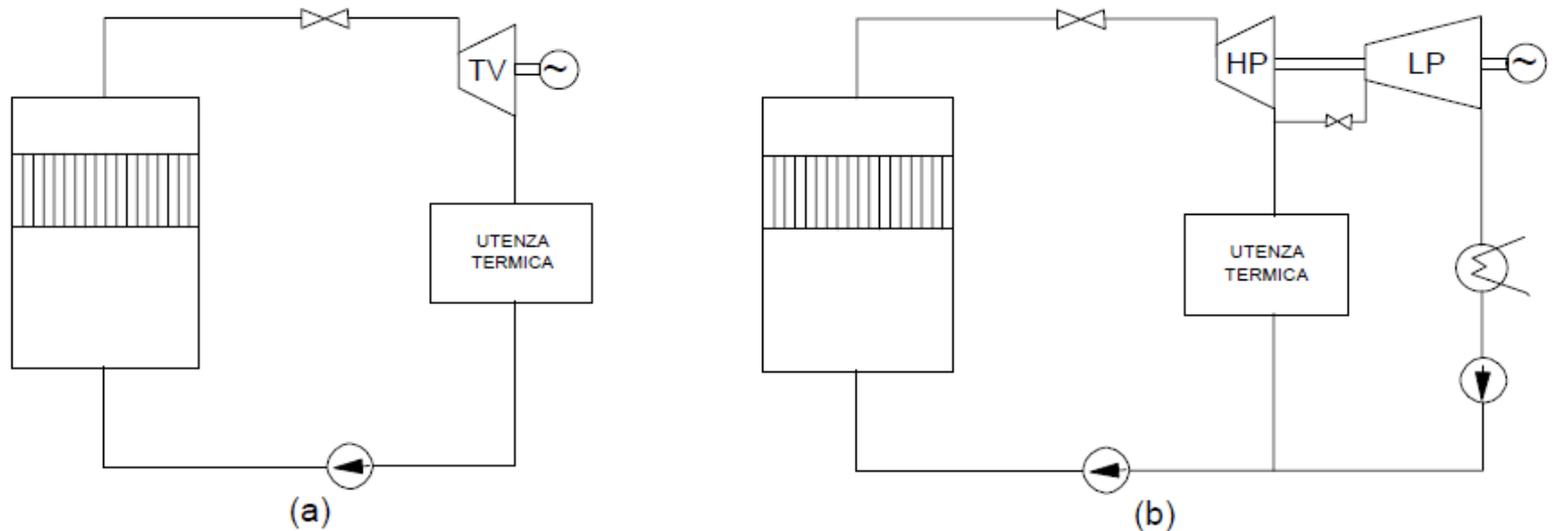
Il ciclo a vapore è molto flessibile riguardo alle fonti utilizzabili per produrre energia in quanto le diverse tipologie di caldaie (a griglia, letto fluido, a polverino, ecc.) permettono l'impiego di gas naturale, olii, carbone, biomasse, rifiuti solidi urbani (termovalorizzatori), etc.



Le taglie degli impianti vanno da alcuni MW fino ad oltre il GW con più turbine in parallelo. Il rendimento elettrico aumenta con l'incrementare della taglia poiché si possono utilizzare variazioni impiantistiche più complesse. Per impianti di grossa taglia il rendimento si aggira attorno al 40%.

# Impianti a vapore d'acqua

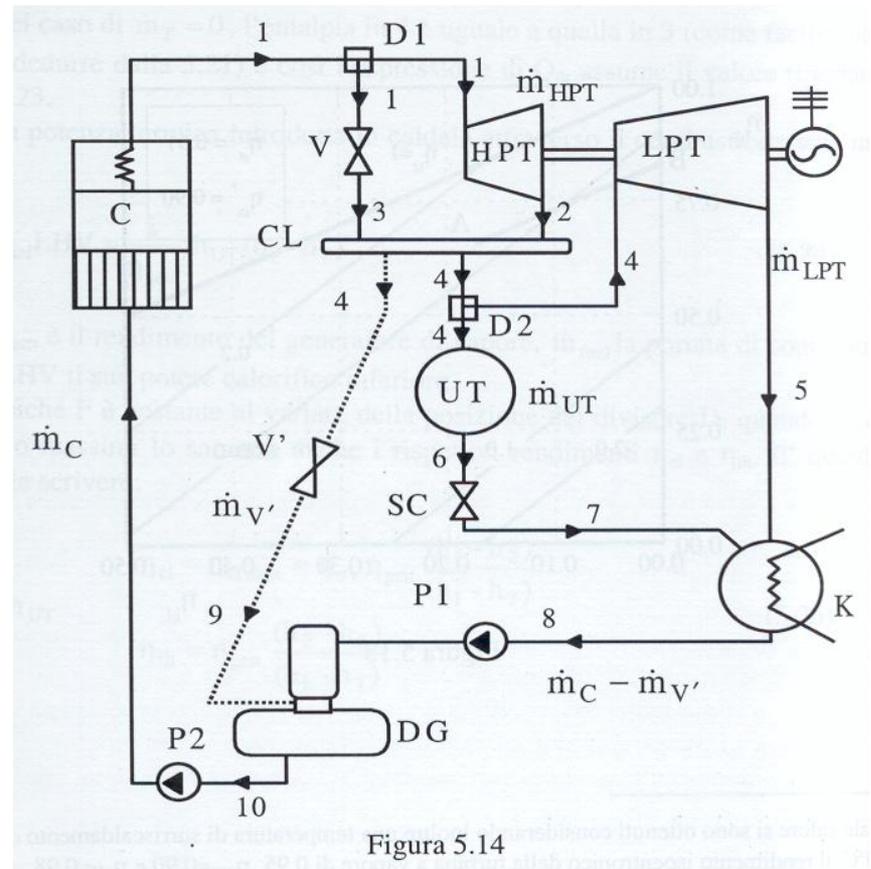
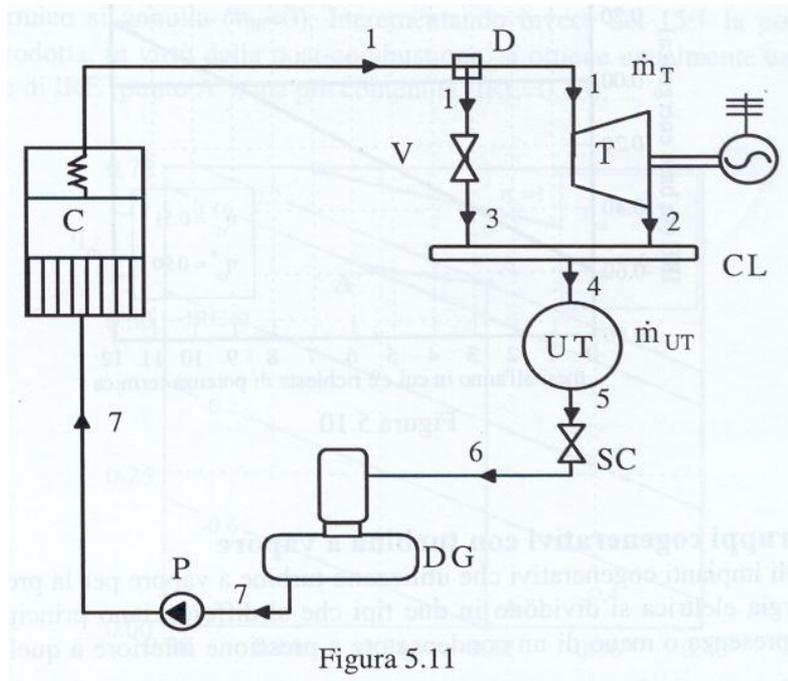
- ✓ Un ciclo a vapore cogenerativo può essere a contropressione o a spillamento



Schemi dell'impianto a contropressione (a sinistra)  
e dell'impianto a spillamento e condensazione (a destra)

# Impianti a vapore d'acqua

- ✓ Un ciclo a vapore cogenerativo può essere a contropressione o a spillamento

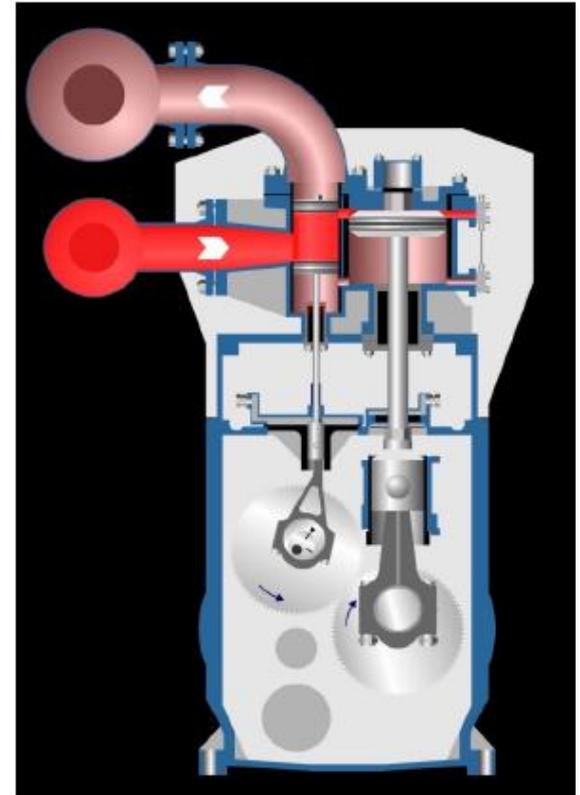


# Impianti a vapore d'acqua

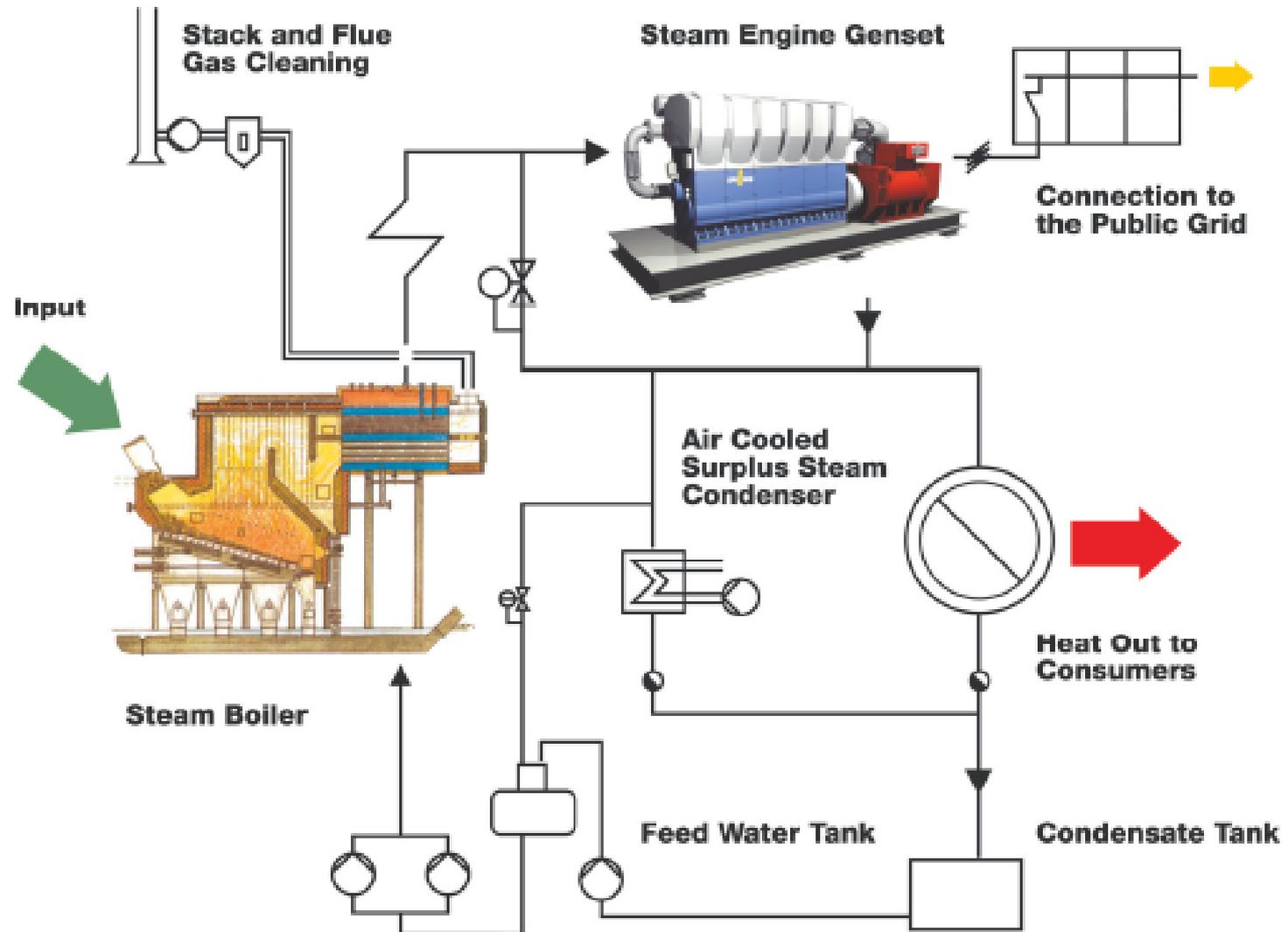
- ✓ Gli impianti a vapore hanno un rendimento elettrico in assetto cogenerativo che si attesta nel range 15-30 % e un rendimento termico che può arrivare al 60 %.
- ✓ L'energia termica è messa a disposizione sotto forma di vapore a pressioni dell'ordine di decine di bar.
- ✓ E' possibile impiegare qualsiasi tipo di combustibile dotandosi dell'apposito generatore di vapore.
- ✓ L'elevato costo di questi impianti e il basso indice elettrico li rende adatti ad applicazioni in ciclo combinato, generando il vapore mediante recupero termico da un motore primo (turbine a gas o motori endotermici alternativi), o ad applicazioni con combustibili solidi (non utilizzabili in turbine a gas o motori a combustione interna).

# Motori a vapore

- ✓ I cicli a vapore convenzionali necessitano di elevate potenze per poter essere applicabili, soprattutto a causa della presenza della turbina a vapore, che limita le potenze inferiormente.
- ✓ Per taglie sotto i 2 MW, si possono utilizzare **motori alternativi a vapore (MAV)**.
- ✓ Funzionano con valori di ammissione di  $p$ ,  $T$  piuttosto limitati in accordo con la possibilità di alimentazione da generatori a tubi di fumo capaci di surriscaldamento.
- ✓ Sono in commercio motori con pressione/temperatura di ammissione  $p_1 = 28$  bar e  $T_1 = 350$  °C (vapore surriscaldato) con pressione di scarico  $p_2 = 1.5$  bar e  $T_2 = 110$  °C.
- ✓ In piccoli impianti il rendimento di conversione elettrica raggiunge  $\eta = 6 - 10$  % nella versione monostadio e  $12 - 20$  % nella versione polistadio



# Motori a vapore - Spilling



# Motori a vapore - Spilling



2003

Wood Waste Incineration  
Plant

District Heating and  
Process Steam Supply  
for a Sawmill

El. Output: 230 kW  
Heat Delivery: 2.000 kW  
Live Steam Data: 3.5 t/h / 15 bar



2004

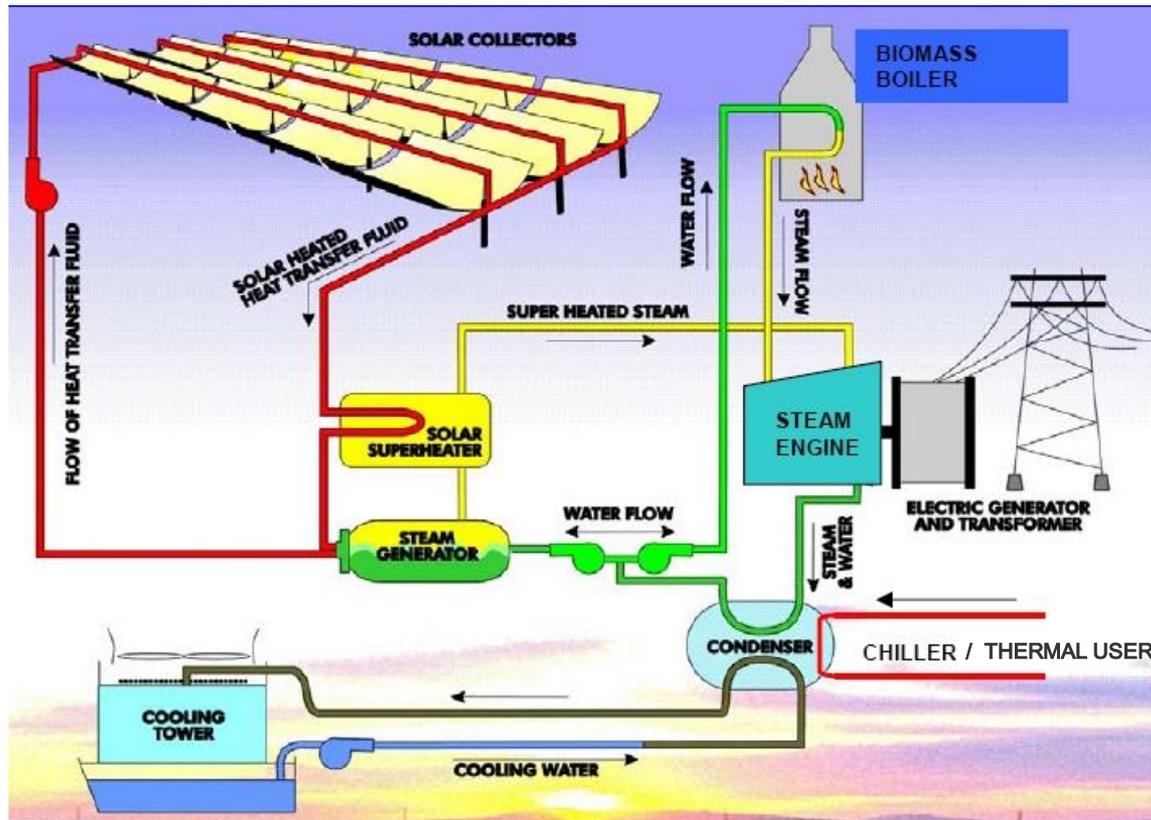
Bio Sludge Incineration  
Plant

Exhaust Steam  
Utilization for Boiler  
Feed Water Preheating

El. Output: 514 kWel  
Live Steam Data: 11 t/h / 8 bar / Saturated

# Motori a vapore - Spilling

- ✓ Uso combinato solare a concentrazione e biomasse
- ✓ Espansori a vapore per microgenerazione
  - buon comportamento fuori-progetto, quindi adatto alla variabilità tipica dell'alimentazione solare;
  - condizioni allo scarico adatte ad utenza tri-generativa



# Motori a vapore - Spilling

- ✓ Uso combinato solare a concentrazione e biomasse
- ✓ Espansori a vapore per microgenerazione
  - buon comportamento fuori-progetto, quindi adatto alla variabilità tipica dell'alimentazione solare;
  - condizioni allo scarico adatte ad utenza tri-generativa

Campo solare: **500 - 2000 m<sup>2</sup>**

Potenza caldaia: **1 MW**

Potenza motore: **200 kW**

Energia da solare: **1 GWh/anno**

Producibilità dei collettori per m<sup>2</sup>: **470 kWh/m<sup>2</sup>**

Energia da biomassa: **7,6 GWh/anno**

Energia convertita: **1,4 GWh/anno**

Temperatura acqua di raffreddamento: **100 °C**

Emissioni evitate (solare): **750 t CO<sub>2</sub> /anno**

# Le tecnologie

## Tecnologie CHP a combustione interna

Consolidate

- ✓ Motori alternativi a combustione interna (MCI)
- ✓ Turbine a Gas (TG) e Micro Turbine a Gas (MTG)

## Tecnologie CHP a combustione esterna

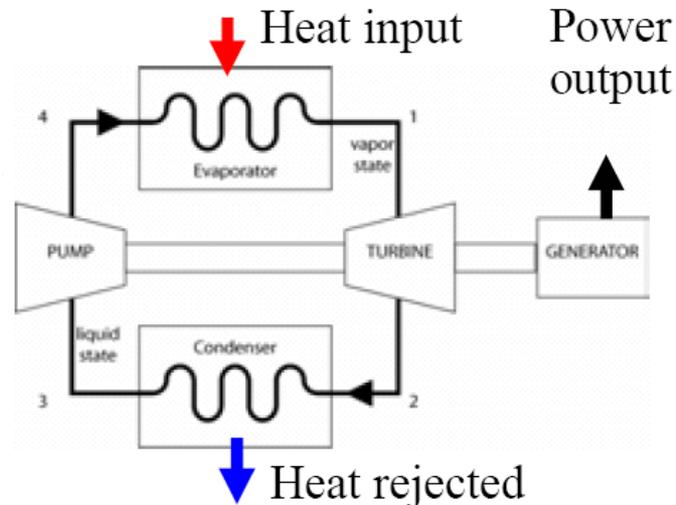
- ✓ Turbine a Vapore (TV)
- ✓ Motori Alternativi a Vapore (MAV)
- ✓ **Cicli Rankine a fluido Organico (ORC)**
- ✓ MTG a combustione esterna (EFMGT)
- ✓ Motori Stirling

Consolidate

In fase di  
consolidamento

# Organic Rankine Cycle (ORC)

- ✓ Basati sul ciclo a vapore (ciclo Rankine)
- ✓ Tecnologia consolidata
- ✓ Il calore viene introdotto per combustione esterna in una caldaia e trasferito al fluido di lavoro tramite uno scambiatore (possibilità di utilizzare combustibili di natura diversa)
- ✓ Possibilità di utilizzare il **calore scaricato** da MTG o MCI (micro-cicli combinati gas-vapore)



# Organic Rankine Cycle (ORC)

- ✓ I cicli a **fluido organico (ORC)** consentono di superare alcuni limiti imposti dall'utilizzo del vapore d'acqua.

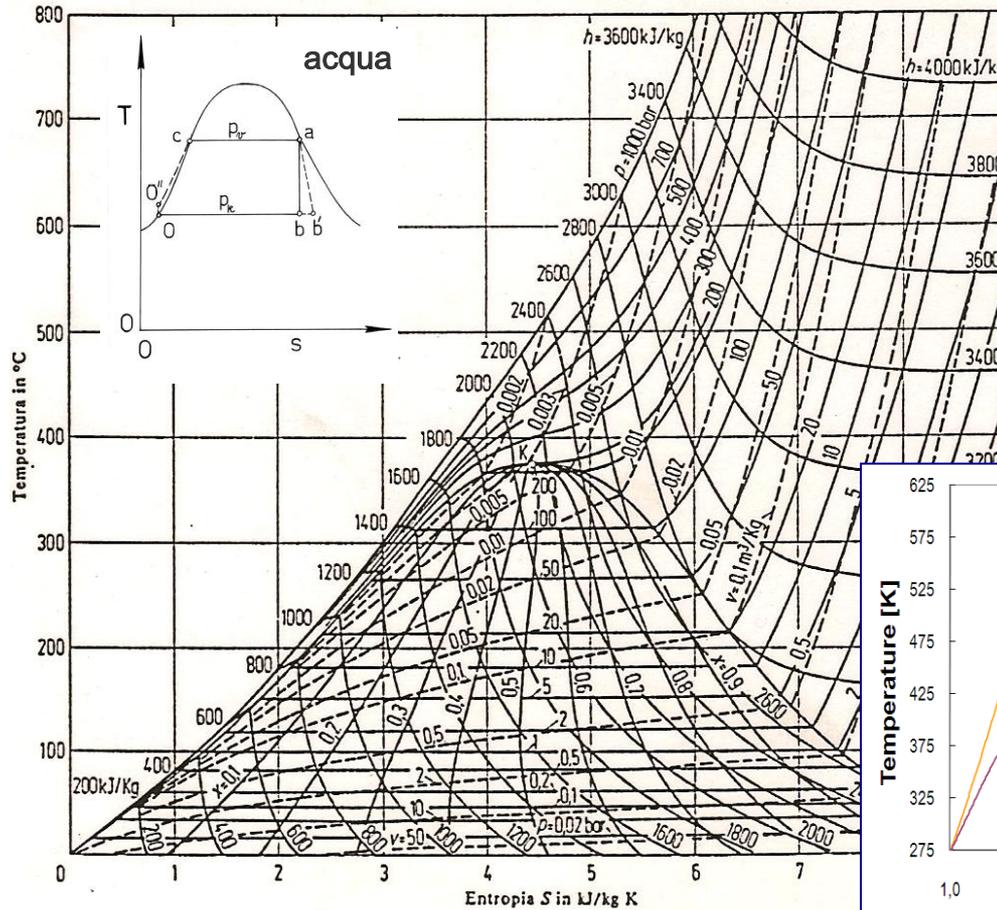
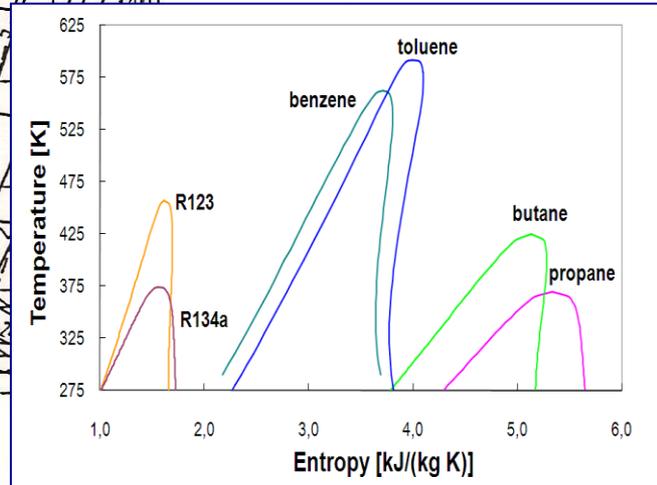
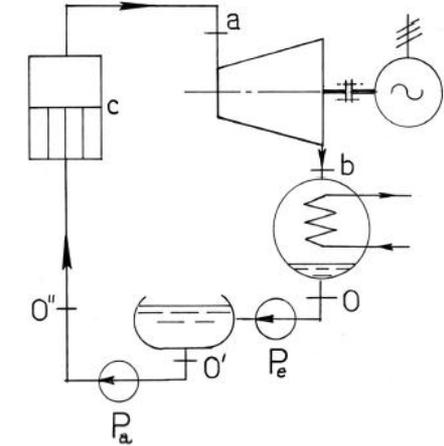
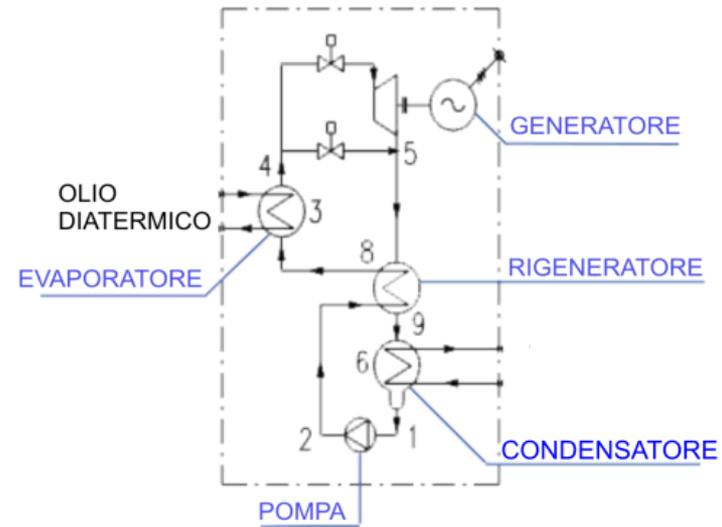
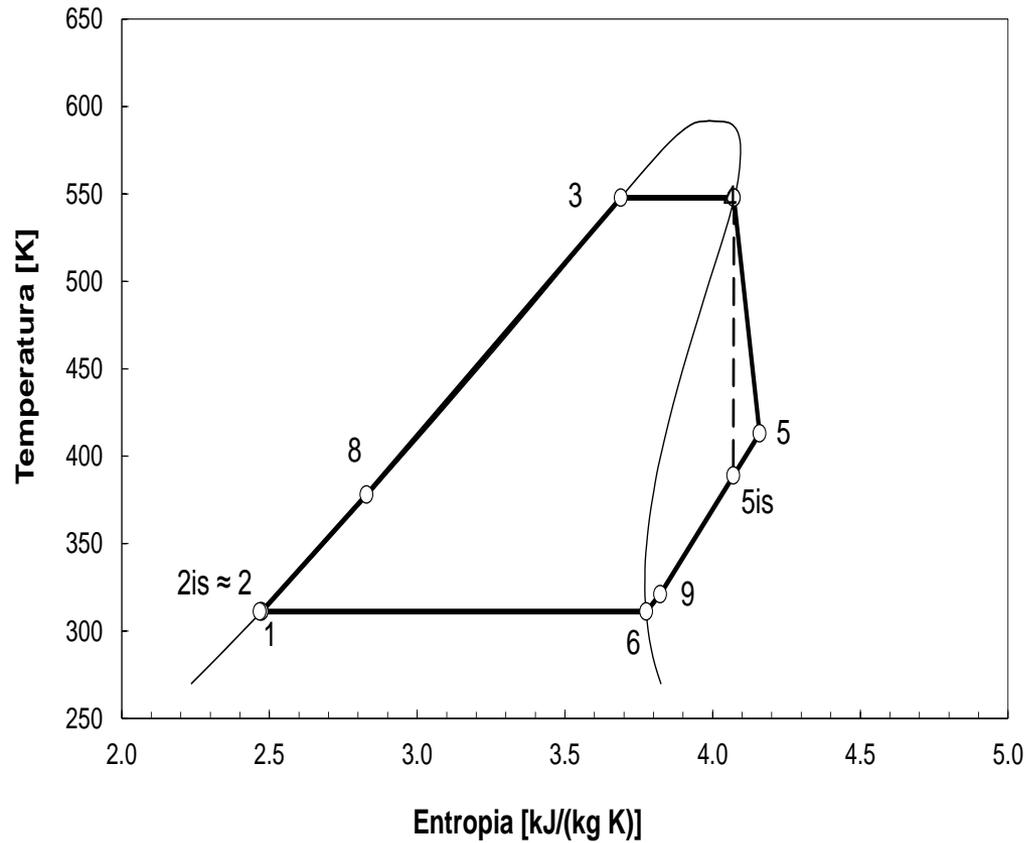


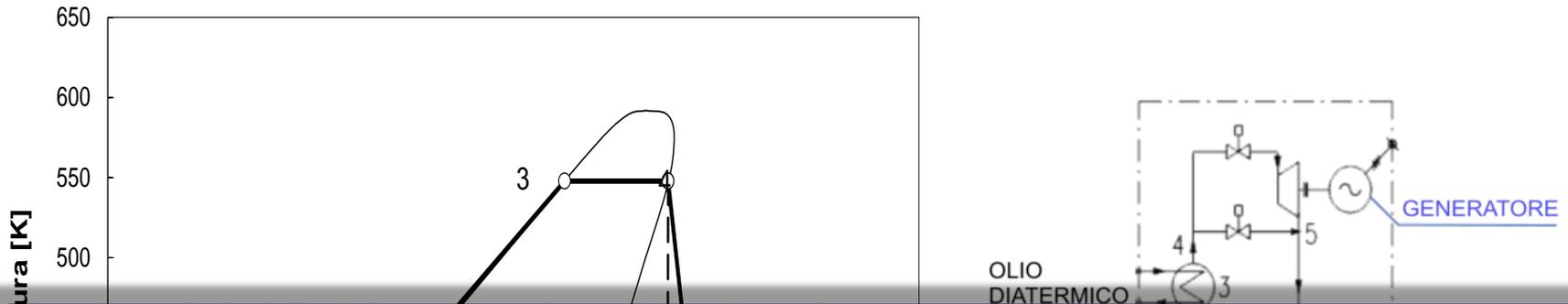
Diagramma  $T, s$  per il vapore d'acqua (Editori Springer e R. Oldenbourg)



# Organic Rankine Cycle (ORC)



# Organic Rankine Cycle (ORC)

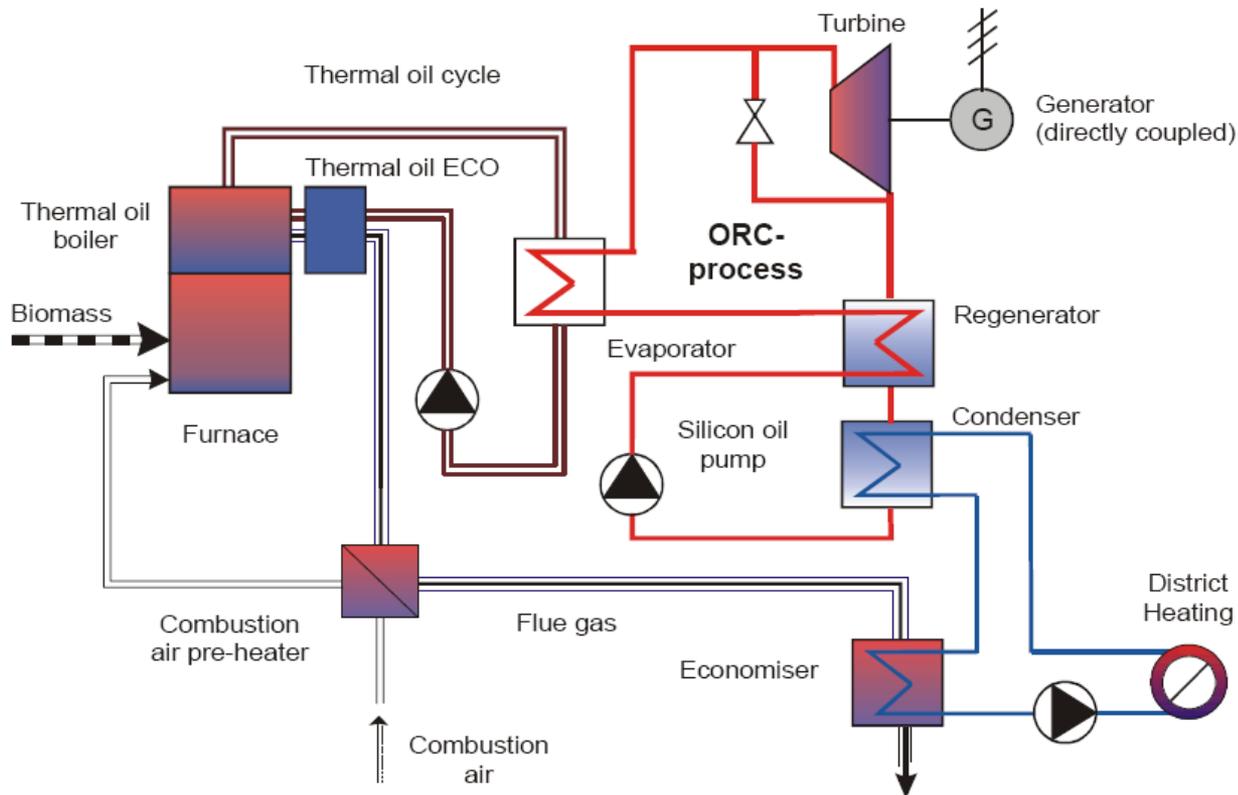


## Vantaggi del fluido organico rispetto al vapor d'acqua

- ✓ Possibilità di sfruttare sorgenti di calore a bassa temperatura (100 ÷ 400 °C)
- ✓ Basse pressioni di vaporizzazione, anche per condizioni prossime a quelle critiche
- ✓ Modesti salti entalpici da sfruttare ed elevati pesi molecolari del fluido di lavoro, con conseguente possibilità di utilizzo di turbine con basso numero di stadi (anche uno solo) e dalle velocità di rotazione ridotte (accoppiamento diretto al generatore elettrico)
- ✓ Tempi di avviamento rapidi

# Organic Rankine Cycle (ORC)

- ✓ Fluido vettore: olio diatermico a 250-300°C
- ✓ Rigeneratore per recuperare parte del contenuto entalpico non sfruttato in turbina



*Esempio di ORC alimentato a biomasse e con impiego CHP civile*

# Organic Rankine Cycle (ORC)

## Modulo ORC



1 Economizzatore

2 Condensatore

3 Turbina

4 Generatore elettrico

5 Pompa

6 Pre-riscaldatore

7 Evaporatore

8 Ingresso acqua di condensazione

9 Uscita acqua di condensazione

10 Ingresso olio diatermico

11 Uscita olio diatermico

# Organic Rankine Cycle (ORC)

Taglie Standard e prestazioni tipiche di Impianti CHP (cogenerativi) con split\*

	TURBODEN 4 CHP - split	TURBODEN 6 CHP - split	TURBODEN 7 CHP - split	TURBODEN 10 CHP - split	TURBODEN 14 CHP - split	TURBODEN 18 CHP - split	TURBODEN 22 CHP - split
INPUT - olio diatermico							
temperatura nominale circuito alta temperatura (in/out)	°C 310/250	310/250	310/250	310/250	310/250	312/252	312/252
potenza termica circuito alta temperatura	kW 2100	2965	3485	4690	6130	8935	10975
temperatura nominale circuito bassa temperatura (in/out)	°C 250/130	250/130	250/130	250/130	250/130	252/132	252/132
potenza termica circuito bassa temperatura	kW 200	275	330	450	585	855	1045
potenza termica totale in ingresso	kW 2300	3240	3815	5140	6715	9790	12020
OUTPUT - acqua calda							
temperatura acqua calda (in/out)	°C 60/80	60/80	60/80	60/80	60/80	60/90	60/90
potenza termica all'acqua	kW 1844	2600	3060	4100	5350	7850	9630
PRESTAZIONI							
potenza elettrica attiva lorda	kW 424	617	727	1001	1317	1862	2282
efficienza elettrica lorda	0.184	0.19	0.191	0.194	0.196	0.19	0.189
autoconsumi elettrici	kW 24	30	38	51	62	87	107
potenza elettrica attiva netta	kW 400	587	689	950	1255	1775	2175
efficienza elettrica netta	0.174	0.181	0.181	0.184	0.186	0.181	0.181
generatore elettrico	asincrono trifase B.T. 400V	asincrono trifase B.T. 660V	asincrono trifase B.T. 660V				
configurazione impianto	single skid	single skid	single skid	single skid	multiple skid	multiple skid	multiple skid
consumo biomassa **	kg/h 1005	1416	1667	2247	2935	4279	5254

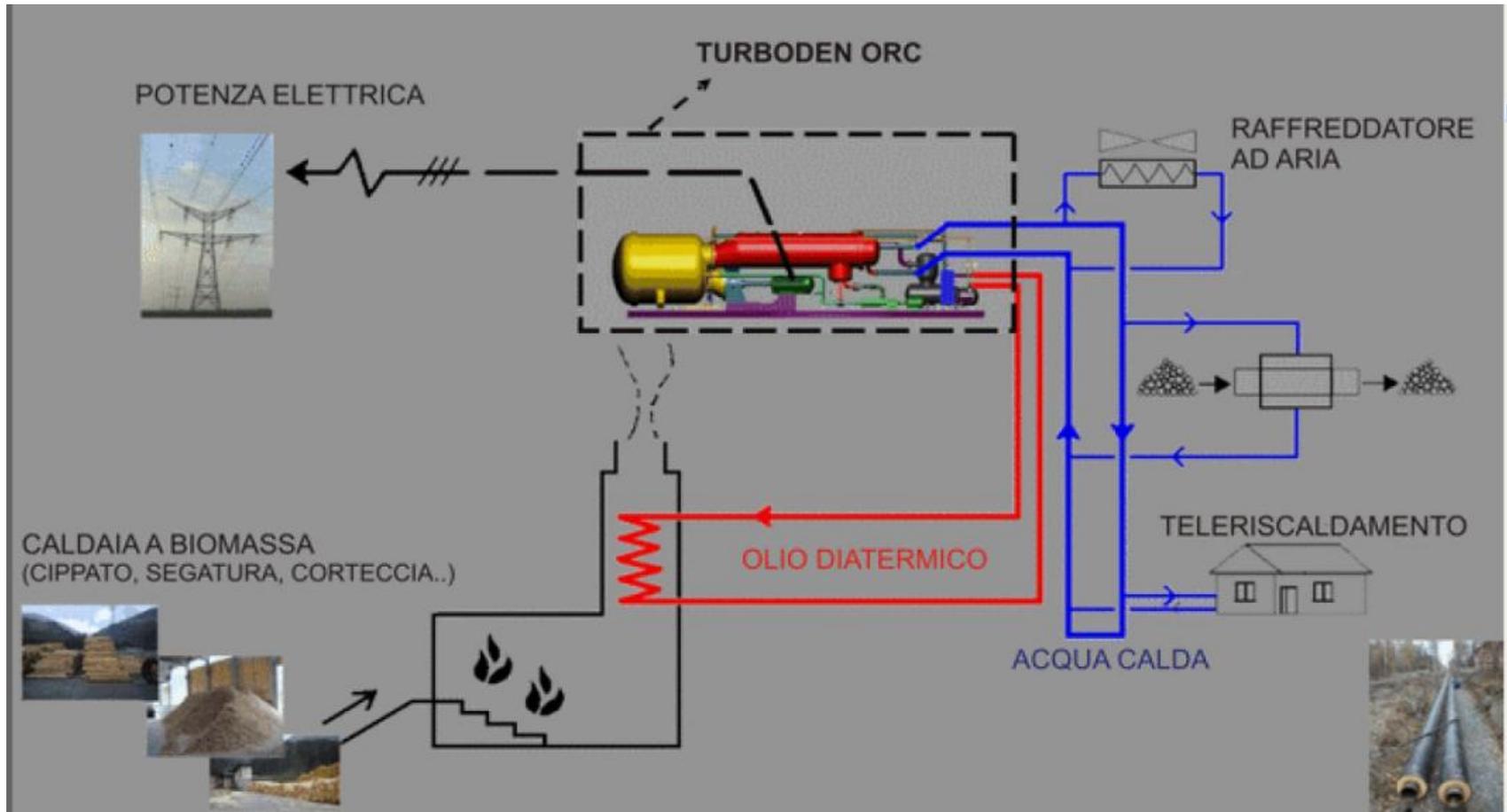
\* Il sistema split Turboden permette di massimizzare la produzione elettrica a pari consumo biomassa.

\*\* Assumendo potere calorifico della biomassa=2,6 kWh/kg ed efficienza della caldaia=0,88. La caldaia ad olio diatermico non è compresa nello scopo di fornitura Turboden.

**Costo: 900 ÷ 2500 Euro/kW<sub>e</sub>**

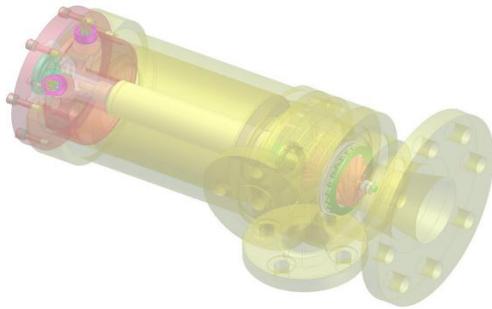
# ORC - Applicazioni

- ✓ Può essere conveniente soprattutto con biomassa solida e syngas
- ✓ Possibilità di recupero di calore scaricato da motori (ciclo combinato)



# ORC di piccola potenza

- ✓ Recentemente proposti ORC di taglie inferiori a 200 kW



## FreePower FP120

Potenza termica ingresso	kW	742
Potenza elettrica netta	kW	120
Rendimento elettrico netto	%	16
Potenza termica scaricata	kW	612
Temperatura acqua per cogen	°C	64
Temperatura fumi	°C	457



Potenza termica ingresso acqua	kW	542
Potenza elettrica netta	kW	50
Rendimento elettrico netto	%	9
Temperatura IN	°C	82-121

Potenza termica ingresso fumi	kW	592
Potenza elettrica netta	kW	50
Rendimento elettrico netto	%	8.4
Temperatura fumi	°C	200-500

# Micro Cicli Rankine

## **Genlec - Energetix (UK)**

- ORC
- espansore tipo scroll
- $P_e = 1 \text{ kW}_e$ ,  $P_{th} = 10 \text{ kW}_{th}$



## **Cogen Microsystem (Australia)**

- $\text{H}_2\text{O}$
- espansore tipo scroll
- $P_e = 2.5 - 10 \text{ kW}_e$
- $P_{th} = 11 - 44 \text{ kW}_{th}$

## **Otag (Germania)**

- $\text{H}_2\text{O}$
- espansore alternativo
- $P_e = 2.1 \text{ kW}_e$ ,  $P_{th} = 16 \text{ kW}_{th}$
- In commercio dal 2006



# Le tecnologie

## Tecnologie CHP a combustione interna

Prototipali

- ✓ Celle a combustibile - Fuel Cell (FC)
- ✓ Sistemi termofotovoltaici (TPV)

## Tecnologie CHP a combustione esterna

Prototipali

- ✓ Sistemi termofotovoltaici (TPV)
- ✓ Sistemi termoelettrici (TE)

## Tecnologie CHP a combustione interna/esterna

- ✓ **Ciclo combinato gas-vapore**
- ✓ Ciclo combinato MCI-ORC
- ✓ Ciclo combinato MTG-ORC

Consolidate

In fase di  
consolidamento



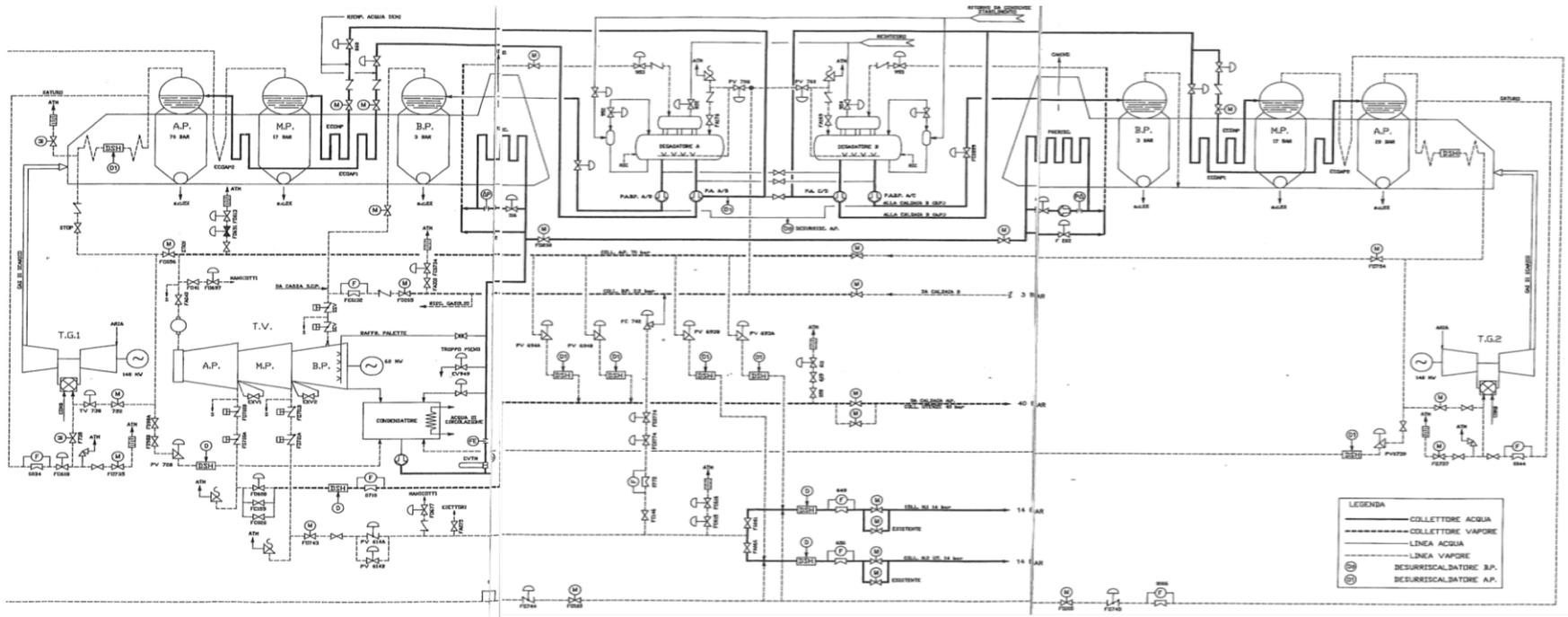






# Il ciclo combinato gas-vapore

- **Nr. 2 TG SIEMENS V94.2, (ciascuno)  $P_e = 150$  MW**
- **Nr. 1 TV a condensazione e spillamenti,  $P_e = 80$  MW**
  - I ammissione:  $p = 70$  bar,  $T = 530$  °C
  - II ammissione:  $p = 2.2$  bar,  $T = 126$  °C
  - I spillamento :  $p = 42$  bar
  - II spillamento :  $p = 16$  bar
  - scarico :  $p = 0.05$  bar
- **Nr. 2 GVR a tre livelli di pressione (AP 70 bar, MP 16 bar, BP 3 bar)**



# Le tecnologie

## Tecnologie CHP a combustione interna

Prototipali

- ✓ Celle a combustibile - Fuel Cell (FC)
- ✓ Sistemi termofotovoltaici (TPV)

## Tecnologie CHP a combustione esterna

Prototipali

- ✓ Sistemi termofotovoltaici (TPV)
- ✓ Sistemi termoelettrici (TE)

## Tecnologie CHP a combustione interna/esterna

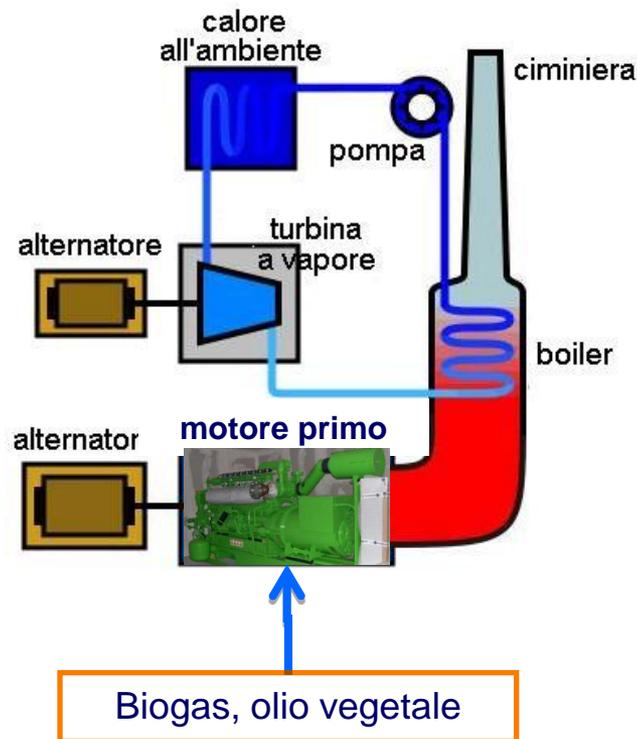
- ✓ Ciclo combinato gas-vapore
- ✓ **Ciclo combinato MCI-ORC**
- ✓ **Ciclo combinato MTG-ORC**

Consolidate

In fase di  
consolidamento

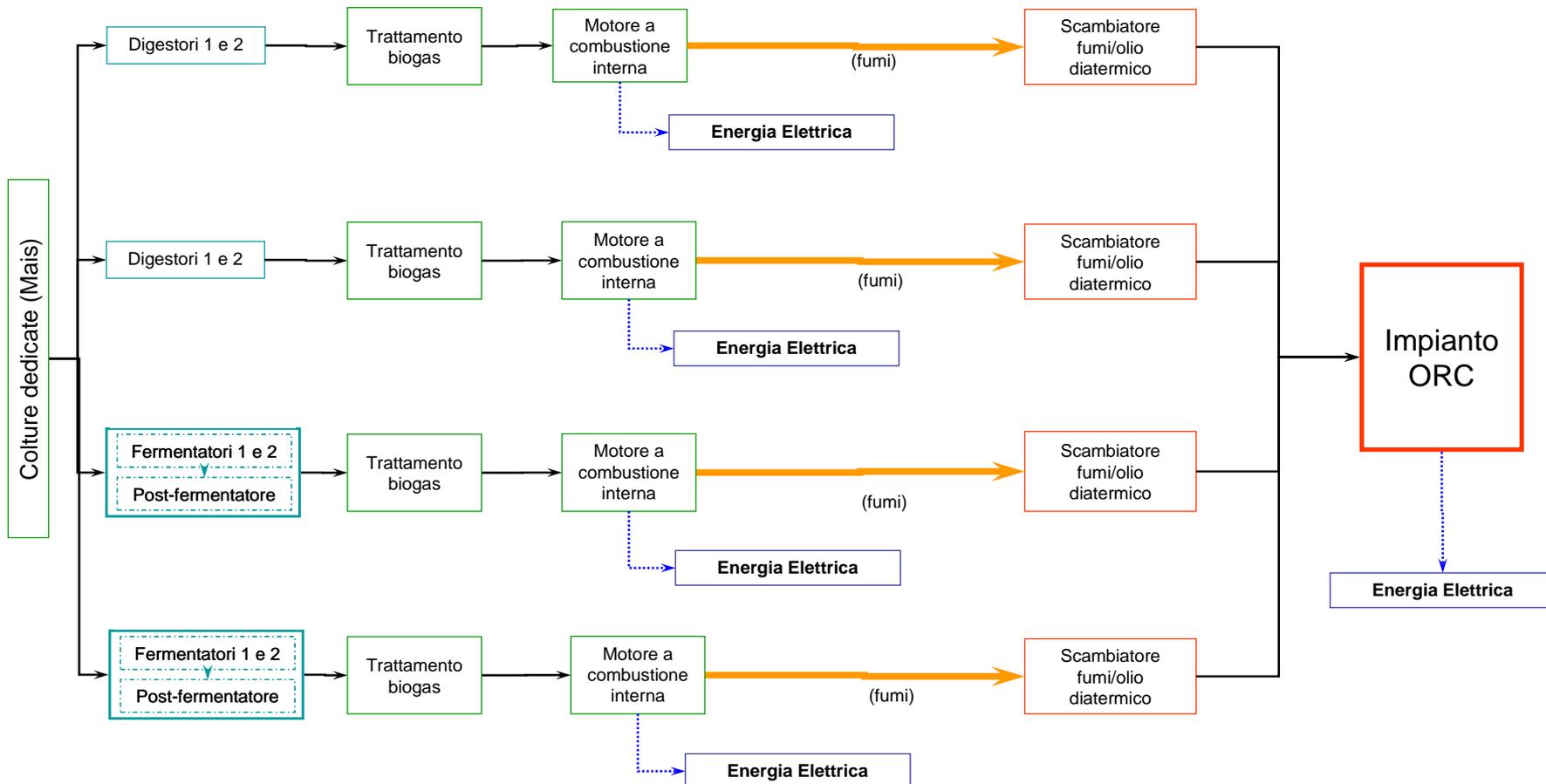
# Il ciclo combinato MCI/TG-ORC

- ✓ Il calore scaricato da MCI, TG e MTG ha ancora una temperatura sufficientemente elevata per poter essere sfruttata da un ciclo a vapore o da un ciclo ORC
- ✓ Per le taglie classiche della cogenerazione distribuita è più indicato l'ORC
- ✓ E' necessario avere taglie dell'ordine del MW
- ✓ Accoppiamento tramite scambiatori di calore



# Il ciclo combinato con MCI

- ✓ Schema di ciclo combinato con più motori primi (MCI: 4 MW – ORC: 350 kW)



# Le tecnologie

## Tecnologie CHP a combustione interna

Consolidate

- ✓ Motori alternativi a combustione interna (MCI)
- ✓ Turbine a Gas (TG) e Micro Turbine a Gas (MTG)

## Tecnologie CHP a combustione esterna

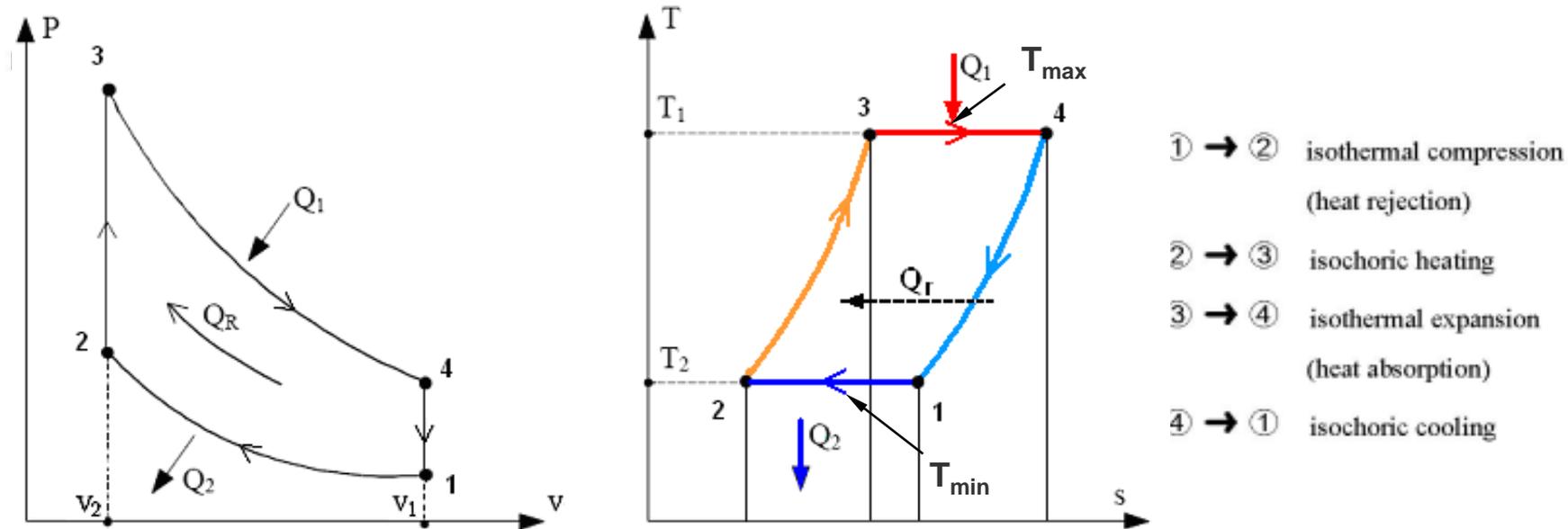
- ✓ Turbine a Vapore (TV)
- ✓ Motori Alternativi a Vapore (MAV)
- ✓ Cicli Rankine a fluido Organico (ORC)
- ✓ MTG a combustione esterna (EFMGT)
- ✓ **Motori Stirling**

Consolidate

In fase di  
consolidamento

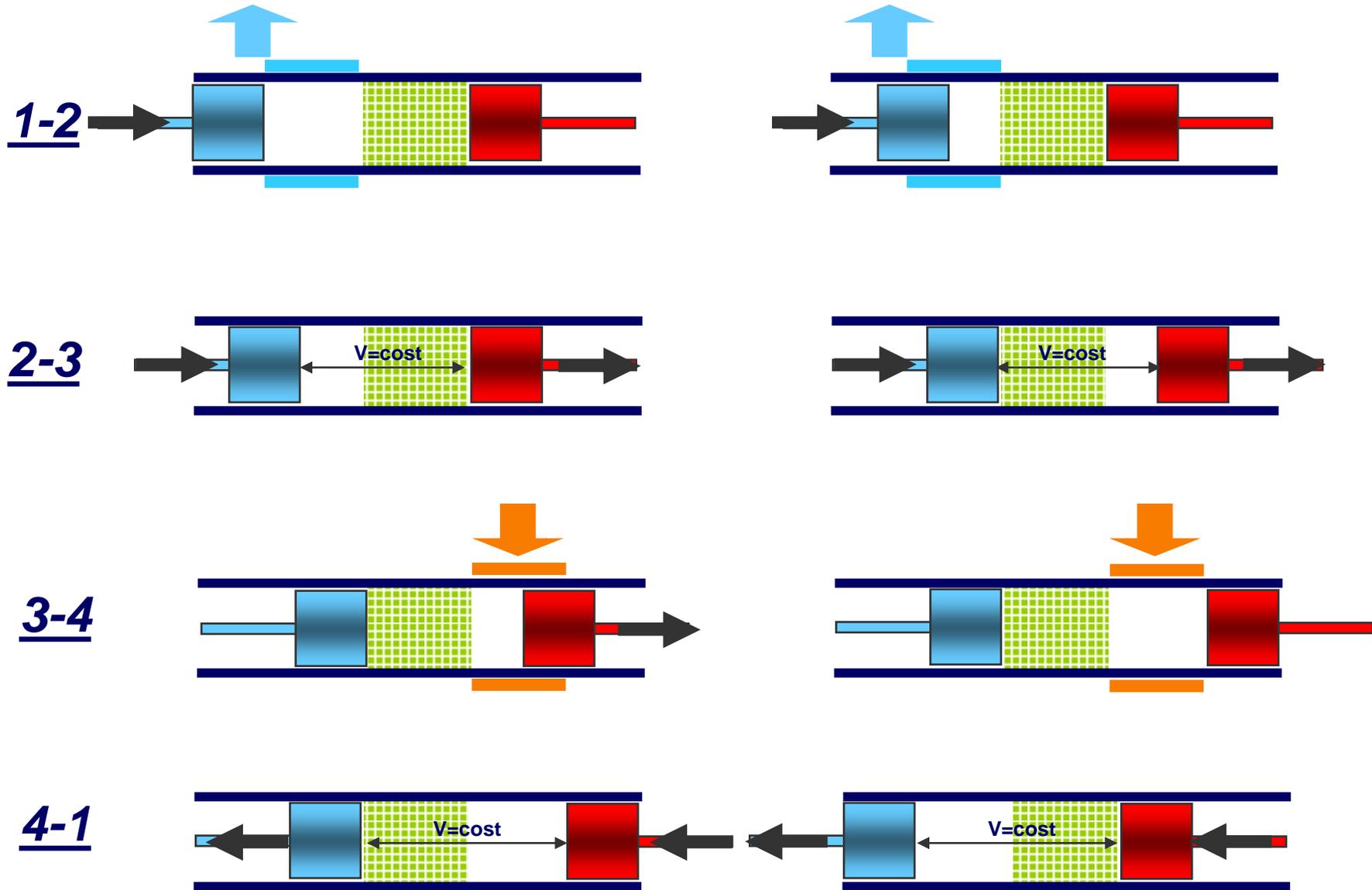
# Motori Stirling

- ✓ opera secondo un **ciclo chiuso a gas** (elio, azoto, aria)
- ✓ combustione esterna e continua (**libertà sulla scelta del combustibile**, minori emissioni gassose e sonore)
- ✓ calore introdotto e scaricato attraverso scambiatori di calore
- ✓ rigenerazione completa del calore lungo le isocore



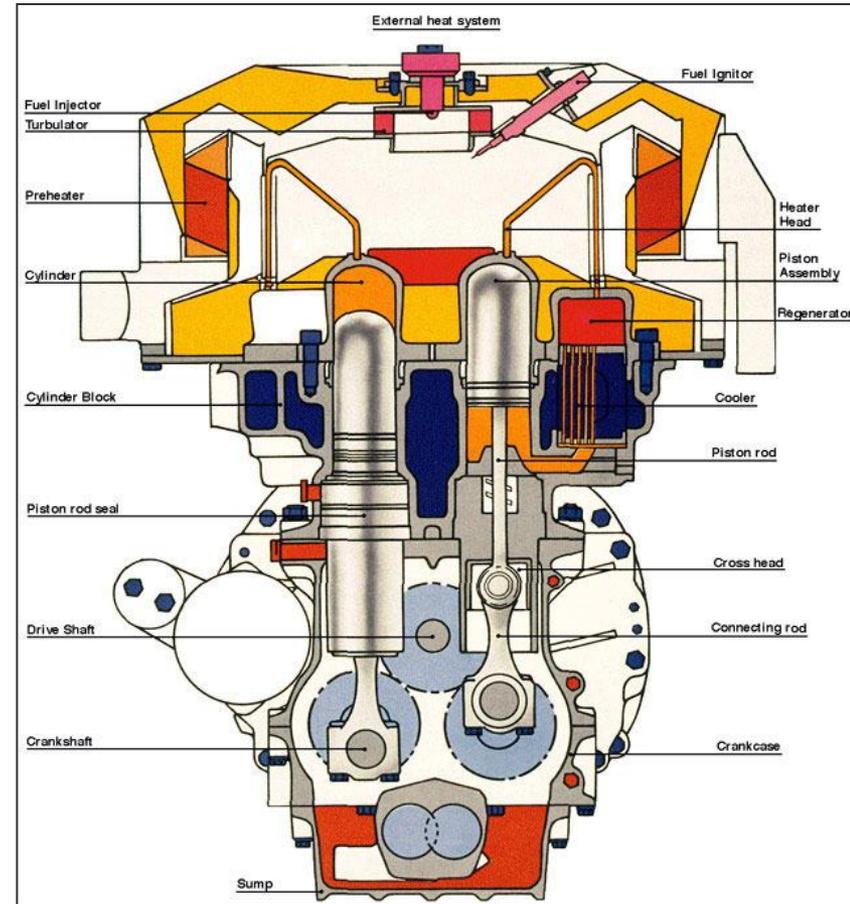
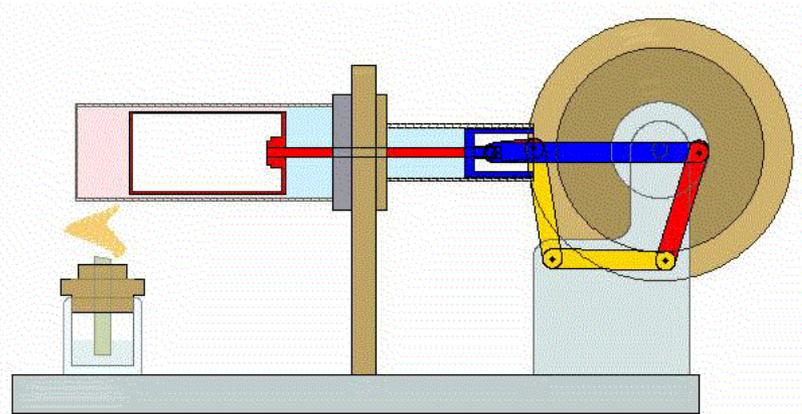
$$\eta_t = 1 - (T_{min}/T_{max}) \text{ rendimento del ciclo termodinamico ideale}$$

# Motori Stirling



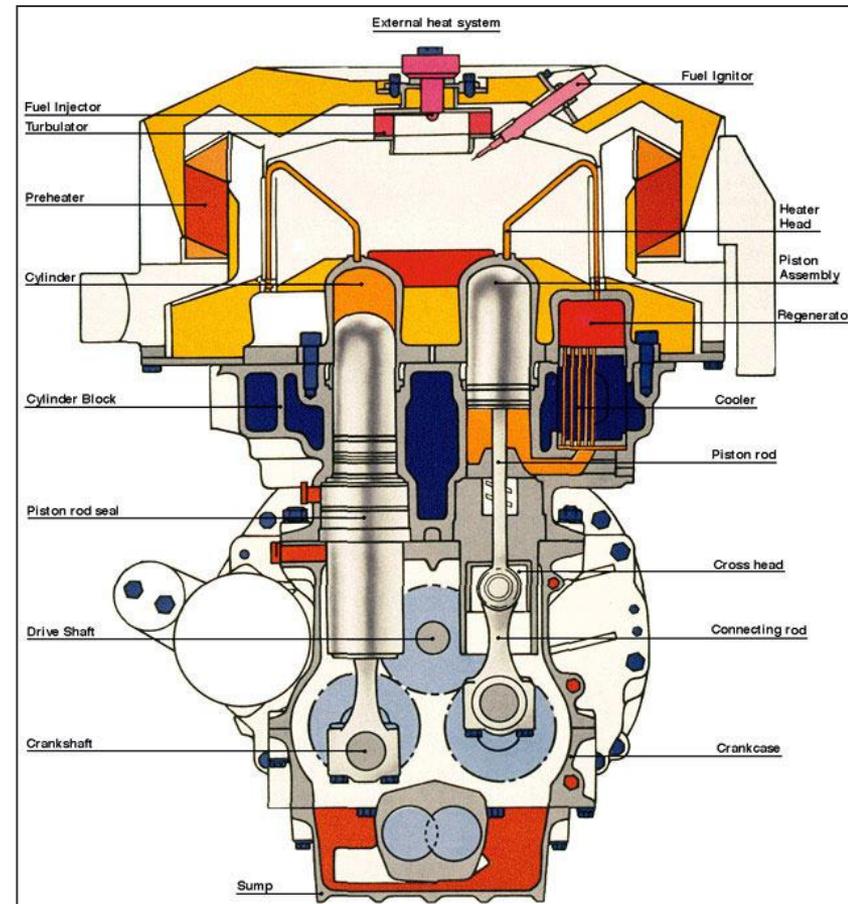
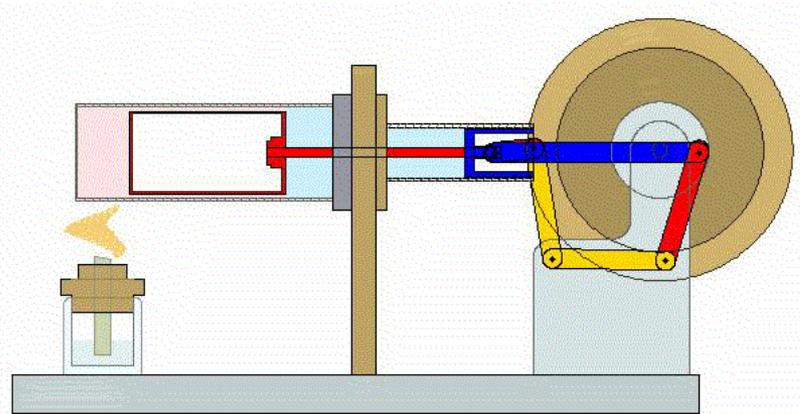
# Motori Stirling

- ✓ possibile recupero di flussi termici a bassa temperatura (250 °C)
- ✓ taglie fino a qualche decina di kW<sub>e</sub>
- ✓  $\eta_e = 10-35\%$



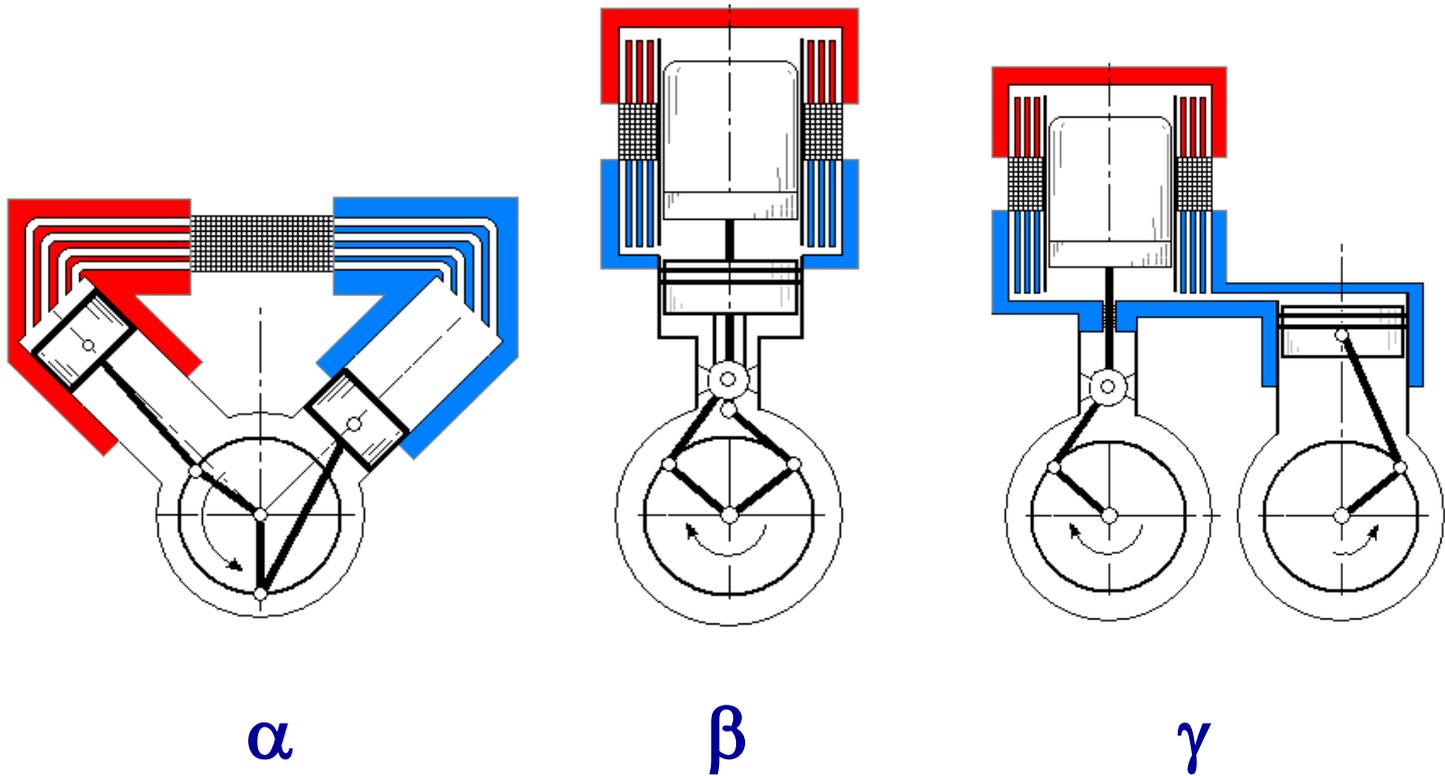
# Motori Stirling

- ✓ possibile recupero di flussi termici a bassa temperatura (250 °C)
- ✓ taglie fino a qualche decina di kW<sub>e</sub>
- ✓  $\eta_e = 10-35\%$
- ✓ elevati tempi di avviamento
- ✓ complessità e varietà di architetture
- ✓ costi  $\approx 3000$  €/kW<sub>e</sub>



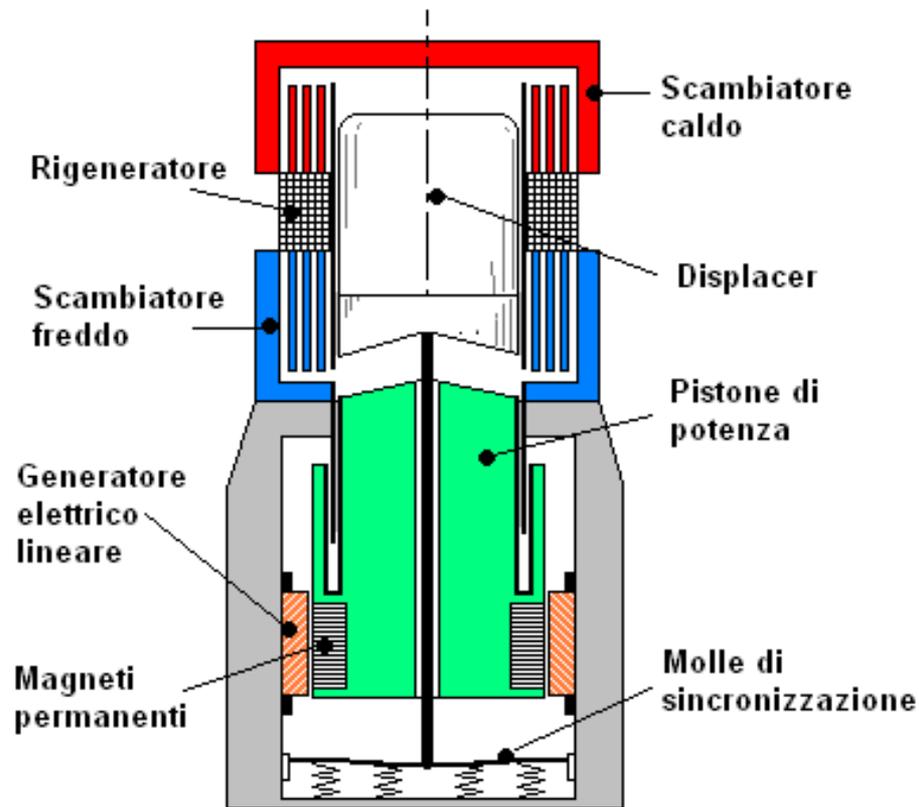
# Motori Stirling

a guida cinematica



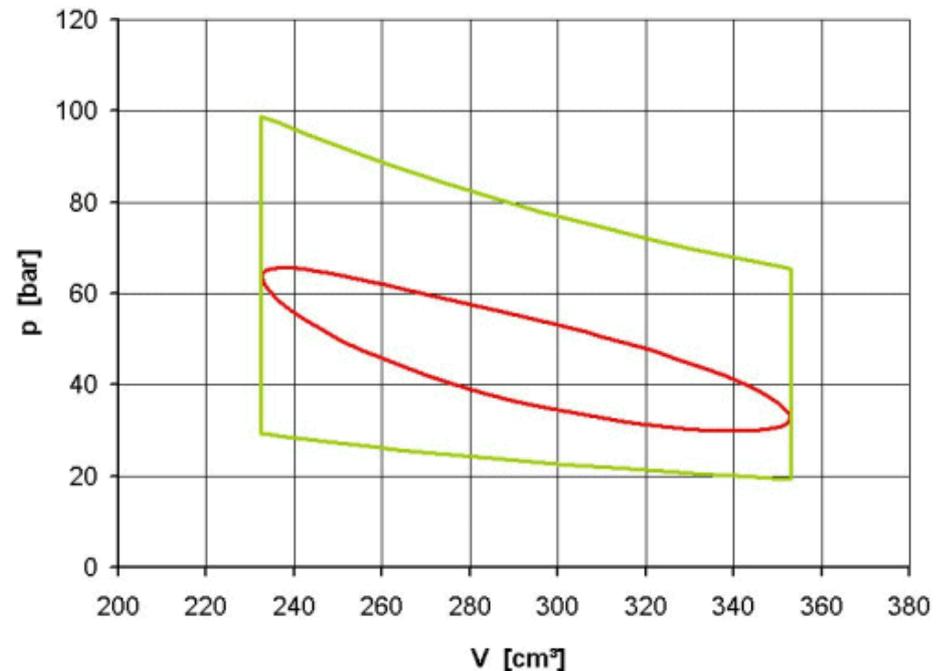
# Motori Stirling

## a pistoni liberi



# Motore Stirling: ciclo ideale vs reale

- ✓ variazione del volume continua (e non discontinua);
- ✓ introduzione e scarico calore attraverso scambiatori di calore esterni;
- ✓ spazio morto (rigeneratore, tubi, scambiatori) che riduce il rapporto di compressione;
- ✓ perdite di calore e inerzia termica del rigeneratore;
- ✓ perdite di pressione attraverso gli scambiatori ed il rigeneratore;
- ✓ trafiletti tra cilindro e pistone;
- ✓ attriti meccanici;
- ✓ ecc.



# Motore Stirling: ciclo ideale vs reale

$$\eta_e = \frac{P_e}{P_{\text{fuel}}} = \eta_b \eta_t \eta_i \eta_m \eta_o \eta_{\text{gen.el.}} = 0.08 - 0.35$$

$\eta_b$  = 0.85-0.92 rendimento del bruciatore

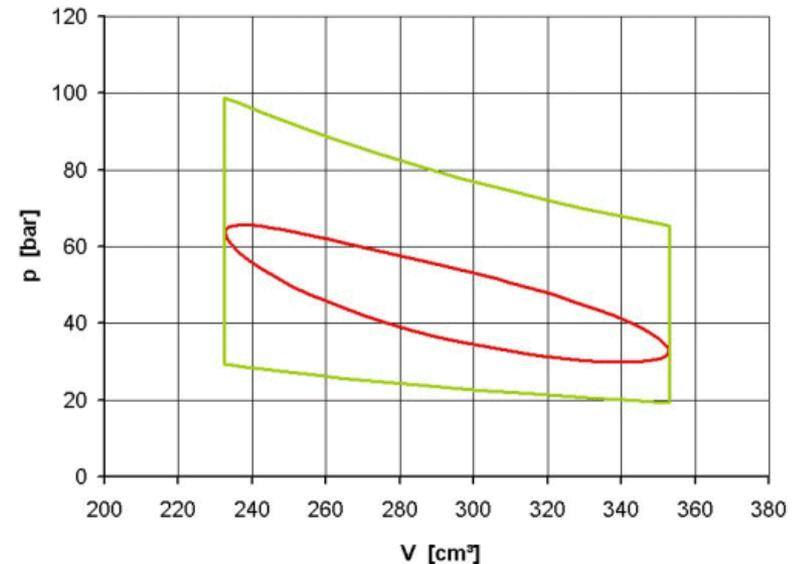
$\eta_t$  = **0.65-0.72 rendimento del ciclo termodinamico ideale**

$\eta_i$  = 0.24-0.63 rendimento indicato  
(rapporto tra lavoro dei cicli di indicatore reale e ideale)

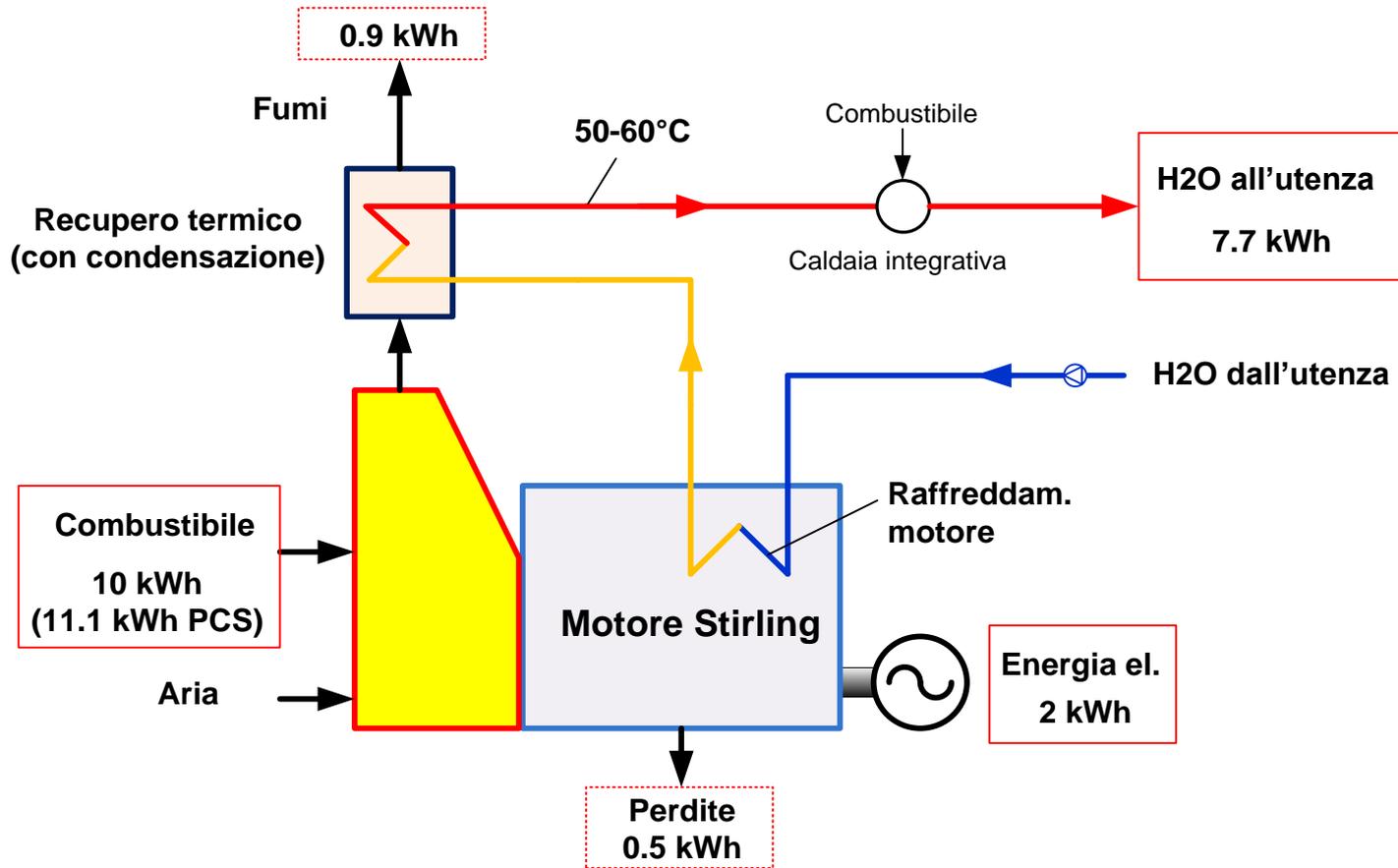
$\eta_m$  = 0.75-0.95 rendimento meccanico

$\eta_o$  = 0.85-0.90 rendimento organico

$\eta_{\text{gen.el.}}$  = 0.96-0.98 rendimento del generatore elettrico



# Cogenerazione con motori Stirling

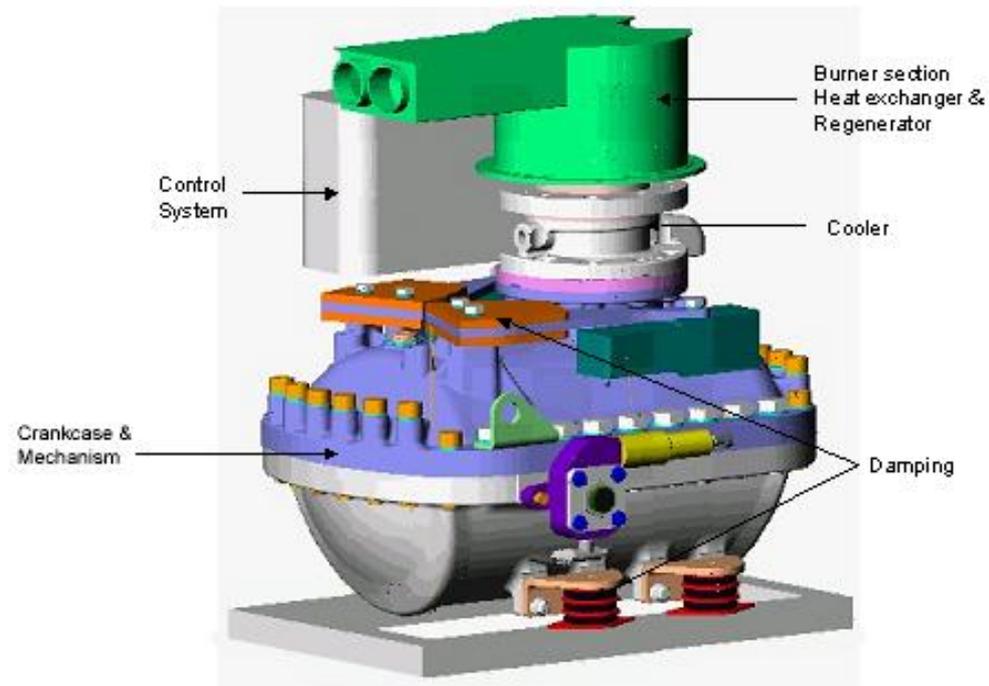


Caso di motore Stirling con rendimento 20 % (rappresentativo)

# Motori Stirling

## Disenco

- $P_e = 3 \text{ kW}_e$
- $P_{th} = 12-18 \text{ kW}_{th}$
- $\eta_U = 92 \%$



# Motori Stirling

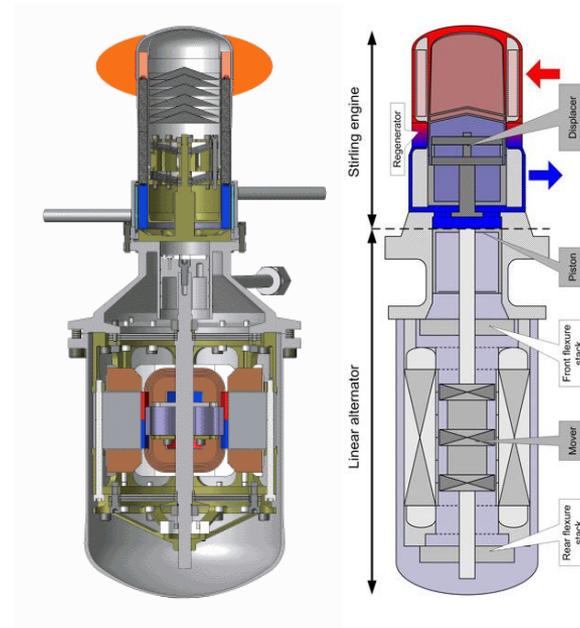
www.infiniacorp.com

- ① **Water cooled exhaust manifold**  
Condotto fumi raffreddato ad acqua
- ② **Engine burner**  
Bruciatore motore
- ③ **Booster boiler**  
Caldaia supplementare
- ④ **Stirling Engine**  
Motore Stirling
- ⑤ **Suspensions**  
Sospensioni
- ⑥ **Dump load resistor**  
Resistenza di avviamento/stop
- ⑦ **Stratification hydroblock**  
Gruppo idraulico
- ⑧ **Stratification tank**  
Accumulo a stratificazione
- ⑨ **DHW Pump**  
Pompa sanitaria



## Infinia

- $P_e = 1 \text{ kW}_e$
- $P_{th} = 6.4 \text{ kW}_{th}$
- $\eta_e = 12.5 \%$
- $\eta_{th} = 80.0 \%$
- $\eta_U = 92.5 \%$



# Motori Stirling

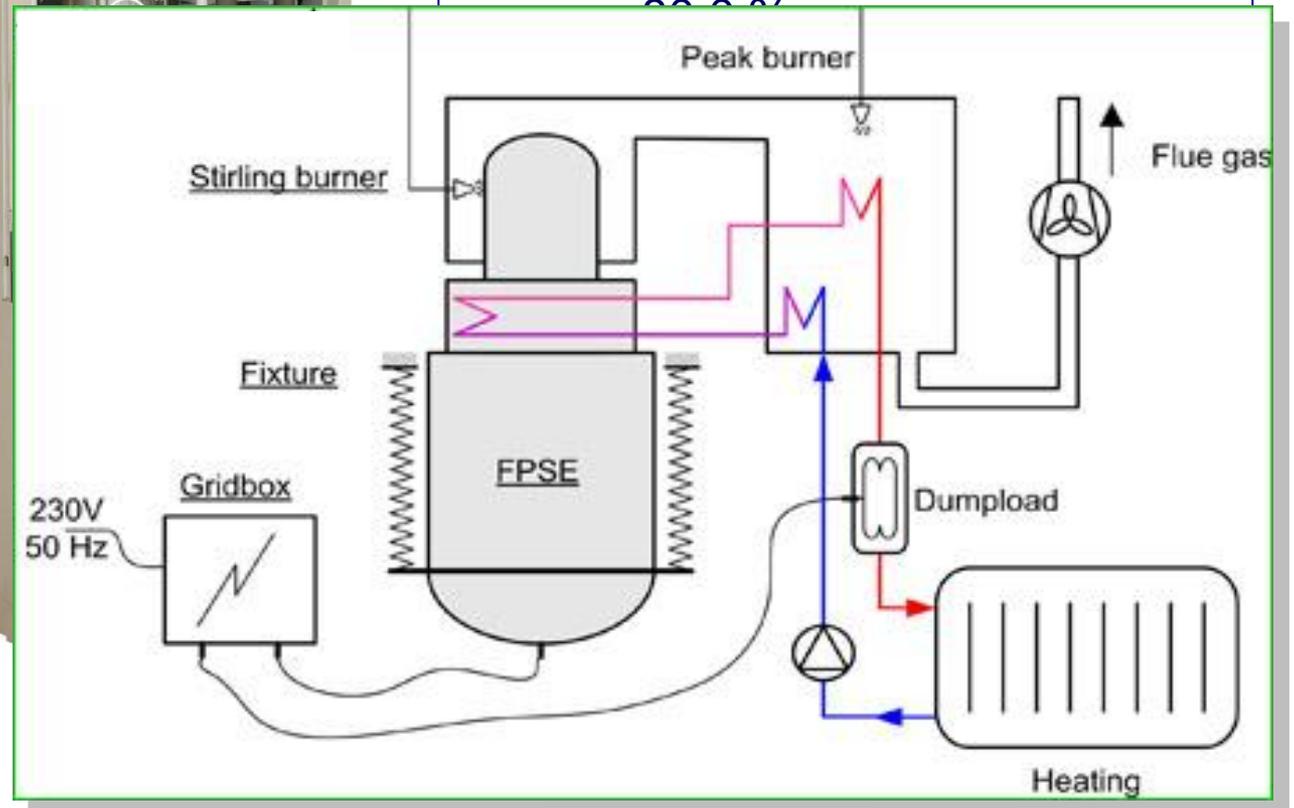
www.infiniacorp.com

- ① **Water cooled exhaust manifold**  
Condotto fumi raffreddato ad acqua
- ② **Engine burner**  
Bruciatore motore
- ③ **Booster boiler**  
Caldaia supplementare
- ④ **Stirling Engine**  
Motore Stirling
- ⑤ **Suspensions**  
Sospensioni
- ⑥ **Dump load resistor**  
Resistenza di avviamento/stop
- ⑦ **Stratification hydroblock**  
Gruppo idraulico
- ⑧ **Stratification tank**  
Accumulo a stratificazione
- ⑨ **DHW Pump**  
Pompa sanitaria



## Infinia

- $P_e = 1 \text{ kW}_e$
- $P_{th} = 6.4 \text{ kW}_{th}$
- $\eta_e = 12.5 \%$



## **Infinia** – applicazione solare

$P_e = 3 \text{ kW}_e$  (specchi puliti,  $T_{\text{amb}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , insolazione  $850 \text{ W/m}^2$ )



# Motori Stirling



## Microgen

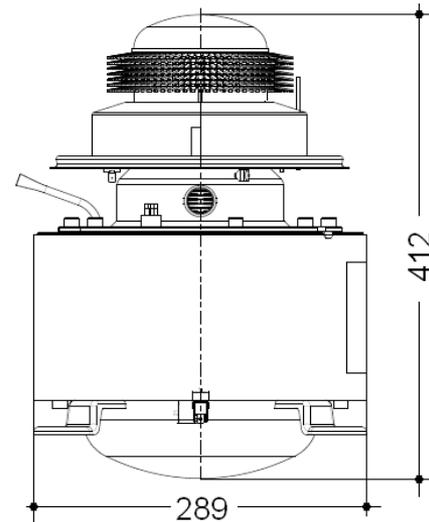
- $P_e = 1 \text{ kW}_e$
- $P_{th} = 6 \text{ kW}_{th}$
- $\eta_e = 13.5 \%$
- $\eta_{th} = 81.1 \%$
- $\eta_U = 94.6 \%$

# Motori Stirling

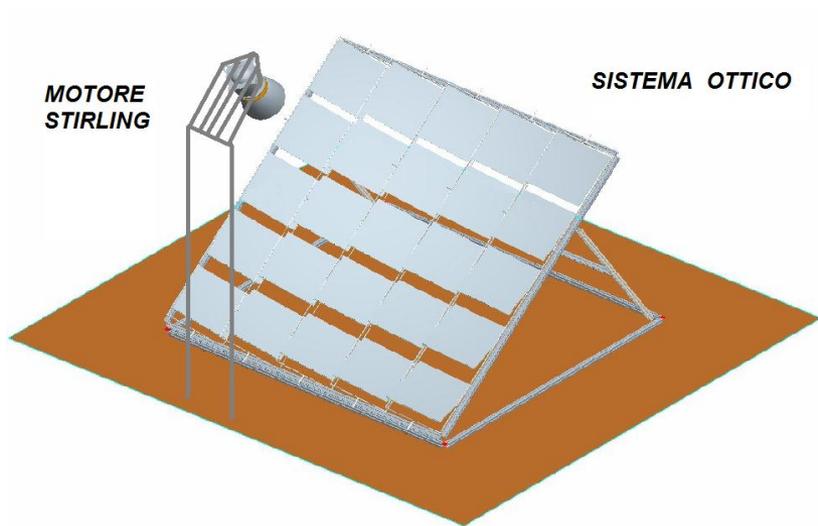


## Microgen

- $P_e = 1 \text{ kW}_e$
- $P_{th} = 6 \text{ kW}_{th}$
- $\eta_e = 13.5 \%$
- $\eta_{th} = 81.1 \%$
- $\eta_U = 94.6 \%$

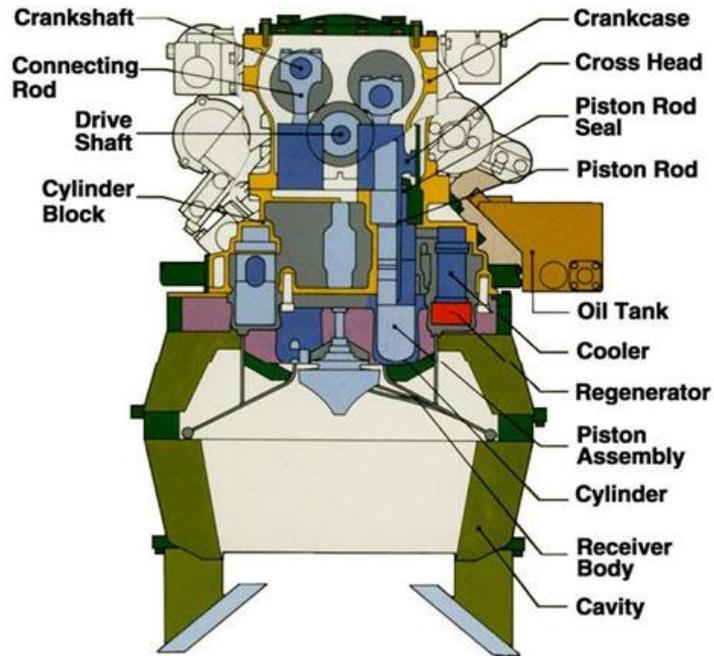


## Microgen – applicazione solare



## Stirling Energy Systems (SES) (USA)

Motore Stirling ad energia solare



## Stirling Energy Systems (SES) (USA)

Motore Stirling ad energia solare



# Motori Stirling

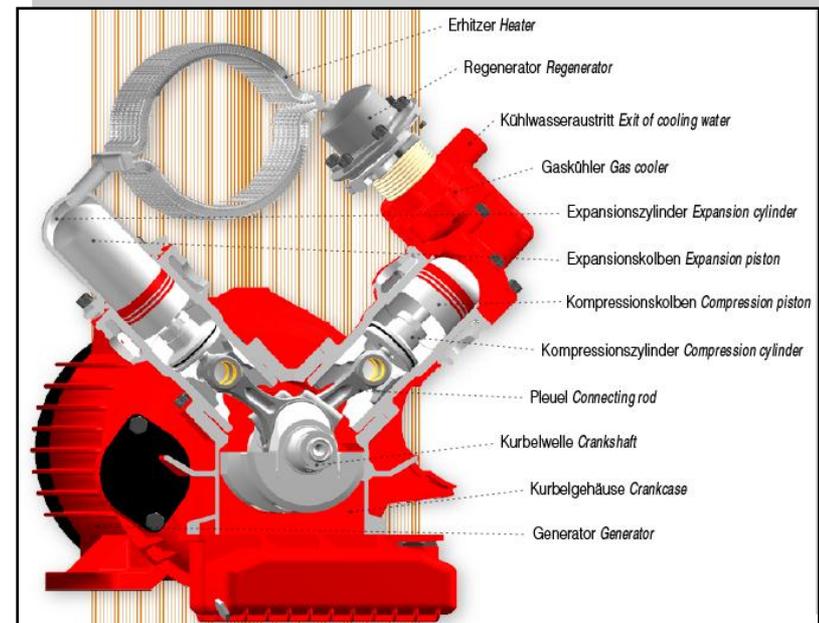
## Stirling Systems (già SOLO STIRLING) (Germania)

### Technical Data

### STIRLING Engine

### Natural gas CHP module

Electrical power	2 - 9 kW ( $\pm 5\%$ )*
Thermal power	8 - 26 kW
Electrical efficiency	22 - 24,5 % ( $\pm 1$ )*
Total efficiency	92 - 96 %*
Fuel consumption (net calorific value)	1,2 - 3,8 Nm <sup>3</sup> /h
Working gas	Helium
Service interval	4.000 - 6.000 h
Emissions CO (at 5% O <sub>2</sub> )	50 mg/m <sup>3</sup>
Emissions NOx (at 5% O <sub>2</sub> )	80 mg/m <sup>3</sup>
Oil consumption	keiner/none
Dimensions L x W x H	1280 x 700 x 980 mm
Weight	460 kg
* temperature at heating inlet 50°C	

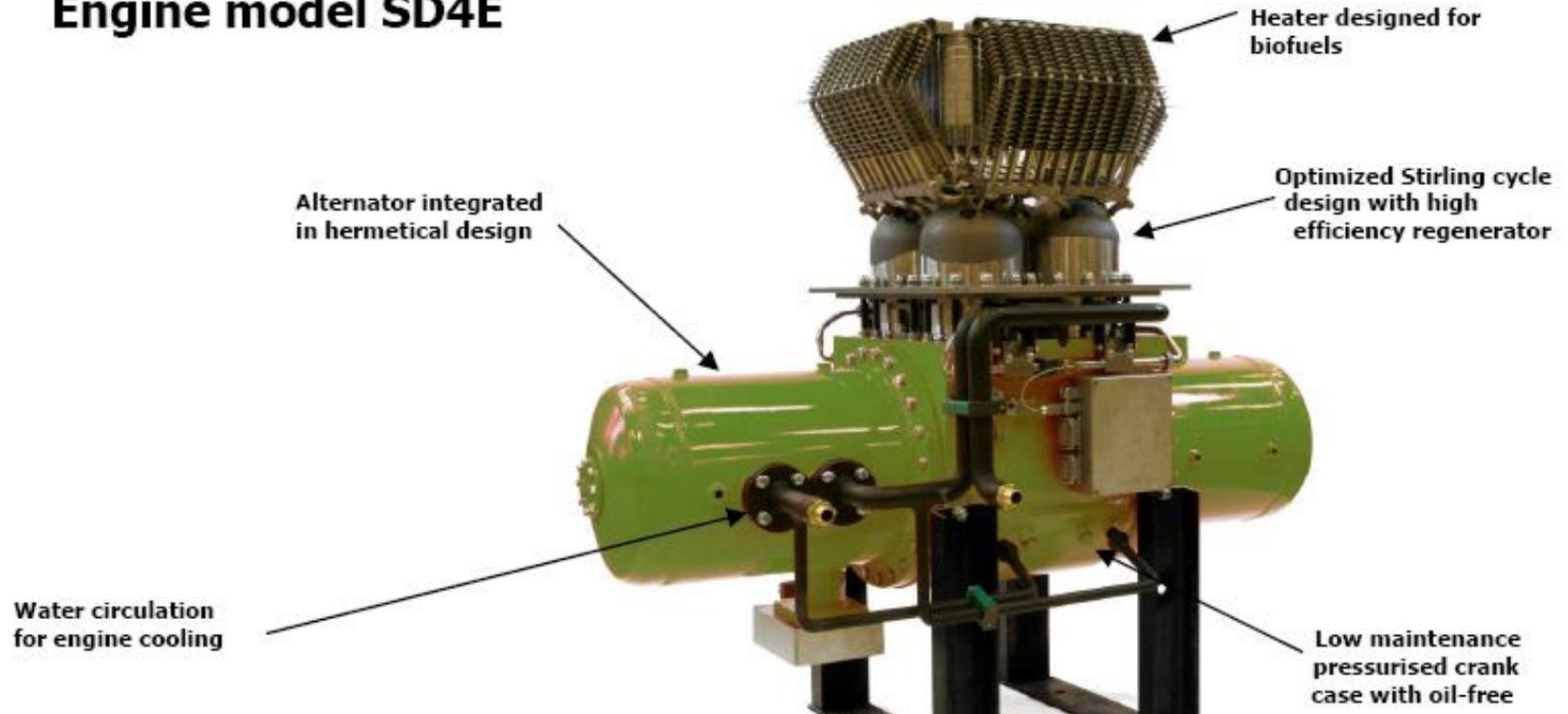


# Motori Stirling

## Stirling Danmark

- $P_e = 35 \text{ kW}_e$
- $\eta_e = 28 \%$

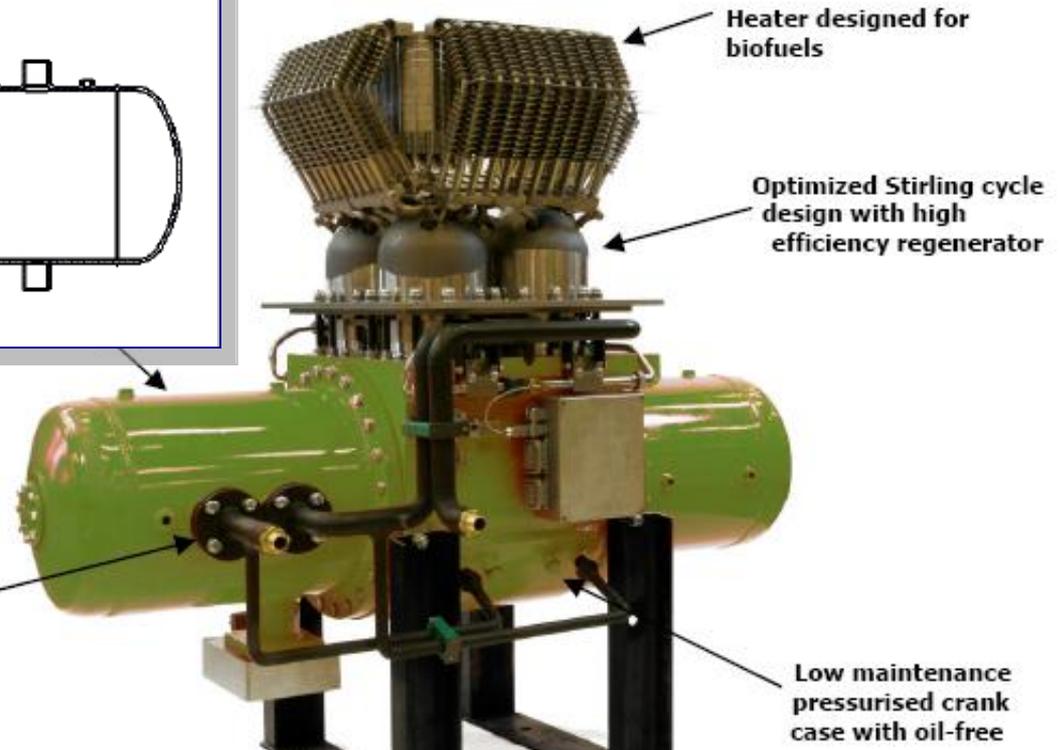
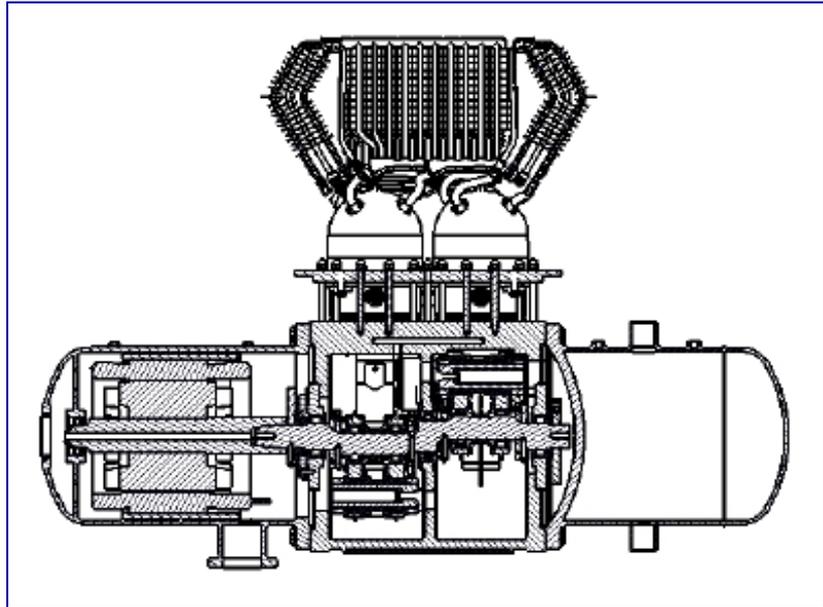
### Engine model SD4E



# Motori Stirling

## Stirling Danmark

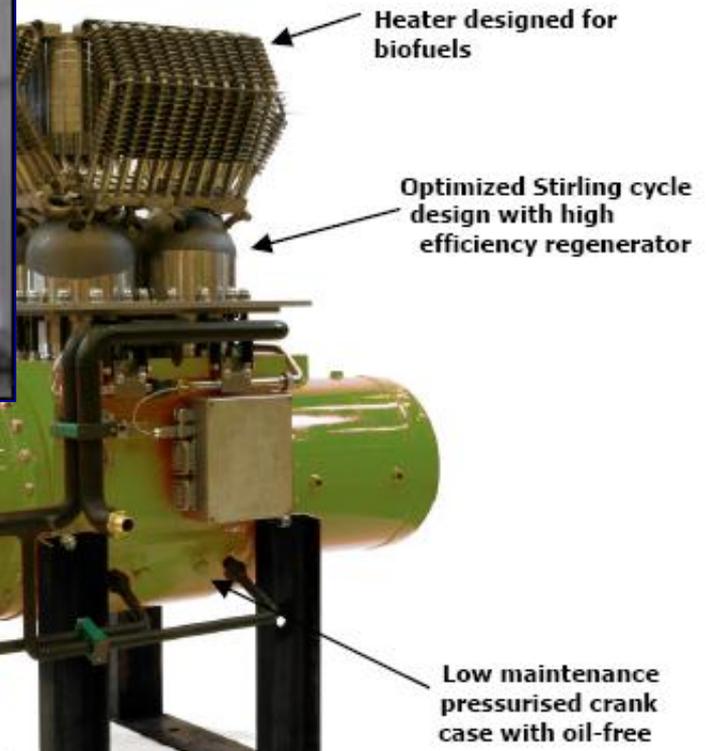
- $P_e = 35 \text{ kW}_e$
- $\eta_e = 28 \%$



# Motori Stirling

## Stirling Danmark

- $P_e = 35 \text{ kW}_e$
- $\eta_e = 28 \%$



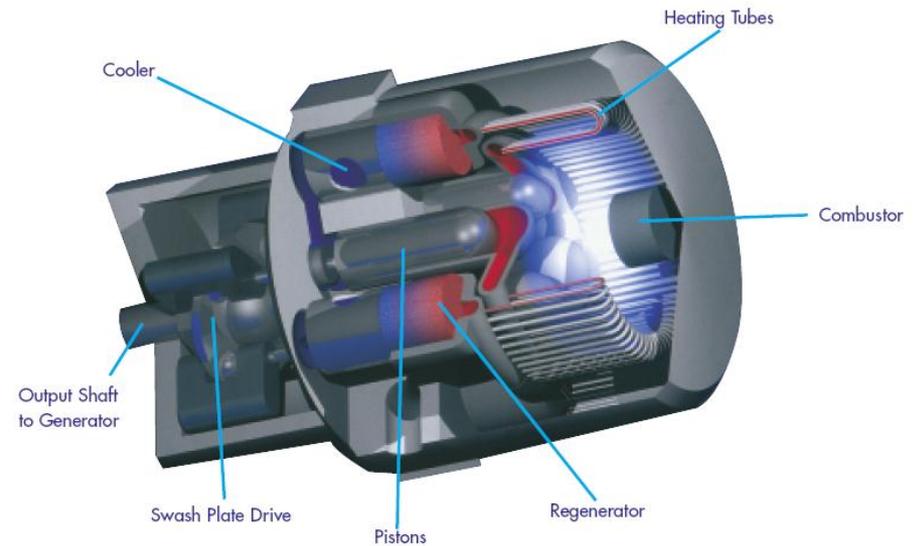
Water circulation  
for engine cooling

# Motori Stirling



## STM Corporation

- $P_e = 55 \text{ kW}_e$
- $P_{th} = 91 \text{ kW}_{th}$
- $\eta_e = 30 \%$
- $\eta_{th} = 50 \%$
- $\eta_U = 80 \%$



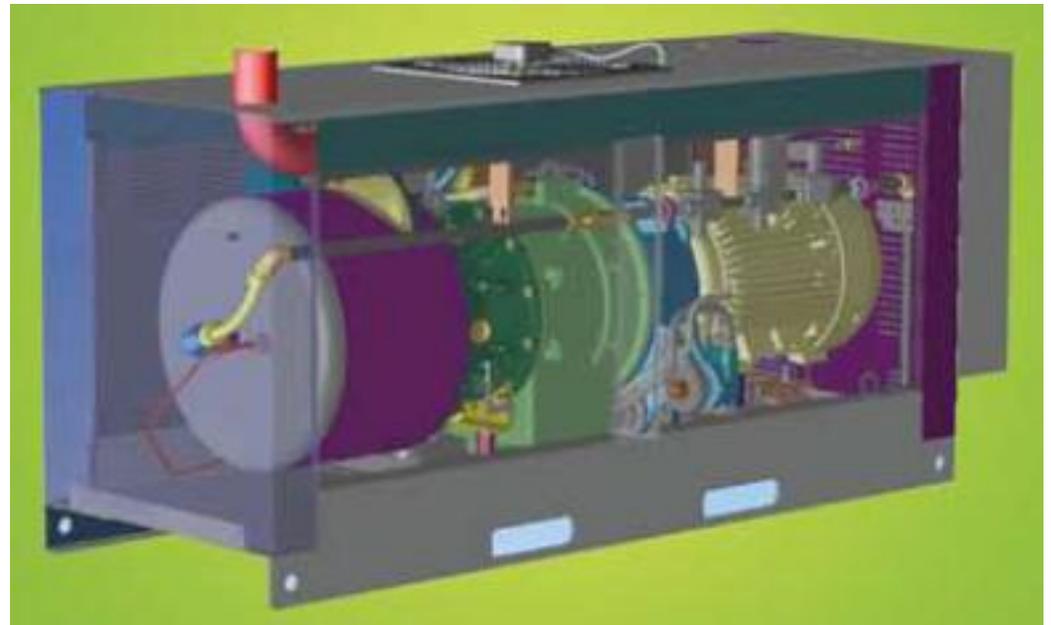
**STM 4-Piston Stirling Engine**

# Motori Stirling



## Stirling Biopower

- $P_e = 38 \text{ kW}_e$
- $P_{th} = 68 - 71 \text{ kW}_{th}$
- $\eta_e = 27 - 28 \%$
- $\eta_U = 75 - 80 \%$



# Motori Stirling



## Sunmachine (Germania)

Motore Stirling cogenerativo alimentato a pellet

Electr. power fed to grid:	1.5 – 3 kW
Thermal power:	4.5 – 10.5 kW
Efficiency (electric):	20 – 25 %
Overall efficiency:	approx. 90 %
Outgoing temperature:	50 - 75° C
Return temperature,	max. 60° C
Optimal:	30° C
Sound emission:	approx. 49 dB
Color:	RAL 5001 (blue-green)
Weight: (without covering)	410 kg
Dimensions LxWxH in mm:	760x1160x1590

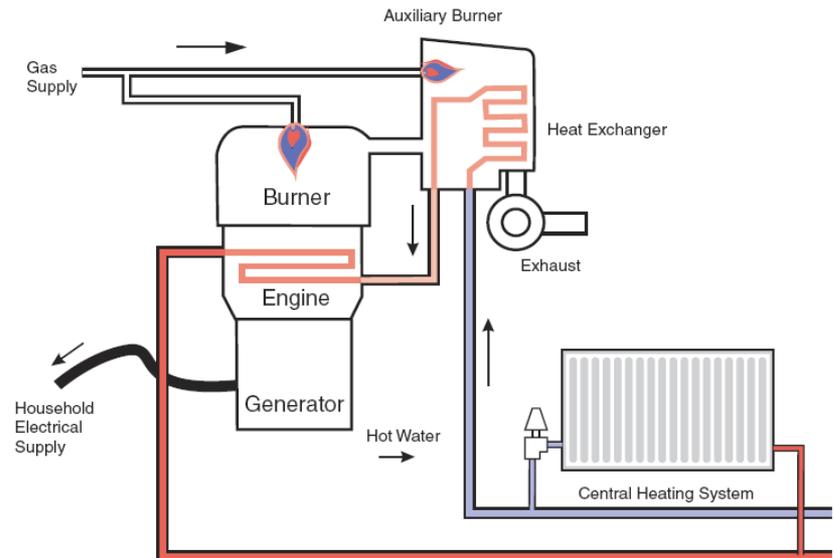


# Motori Stirling

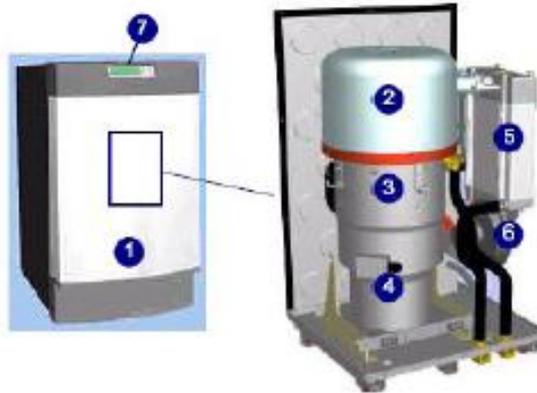


## Whispertech

- $P_e = 1.2 \text{ kW}_e$
- $P_{th} = 7 \text{ kW}_{th}$
- $\eta_e = 12 \%$
- $\eta_U = 95 \%$



# Motori Stirling



- 1 Steel enclosure with stainless steel front panel
- 2 Burner assembly
- 3 Stirling engine assembly
- 4 Sealed Alternator
- 5 Exhaust Heat Exchanger
- 6 Burner Fan
- 7 Control panel

Motore WhisperTech da 1.2 kW<sub>el</sub>,  
 $\eta_{el}=12\%$  per cogenerazione  
domestica; sperimentato in UK,  
Nuova Zelanda.

Soluzioni simili sperimentate  
anche da altre società (British  
Gas; consorzi Olanda-USA).

➤ Il basso rapporto EE/calore  
si adatta bene alle applicazioni  
residenziali; rendimento totale  
95-98%.

➤ costi attuali elevati

## PROSPETTIVE FUTURE:

- ✓ Costi attesi fino a 500 €/kW<sub>el</sub> anche per piccole taglie

# Le tecnologie

## **Tecnologie CHP a combustione interna**

Prototipali

- ✓ **Celle a combustibile - Fuel Cell (FC)**
- ✓ Sistemi termofotovoltaici (TPV)

## **Tecnologie CHP a combustione esterna**

Prototipali

- ✓ Sistemi termofotovoltaici (TPV)
- ✓ Sistemi termoelettrici (TE)

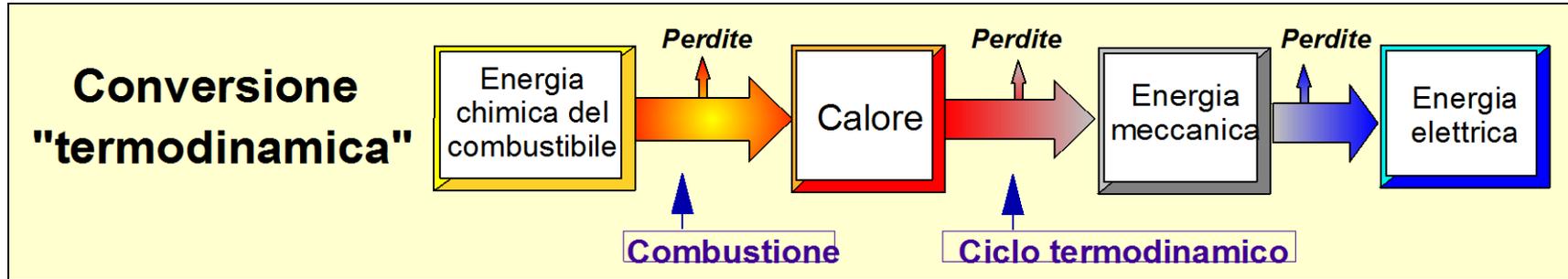
## **Tecnologie CHP a combustione interna/esterna**

- ✓ Ciclo combinato gas-vapore
- ✓ Ciclo combinato MCI-ORC
- ✓ Ciclo combinato MTG-ORC

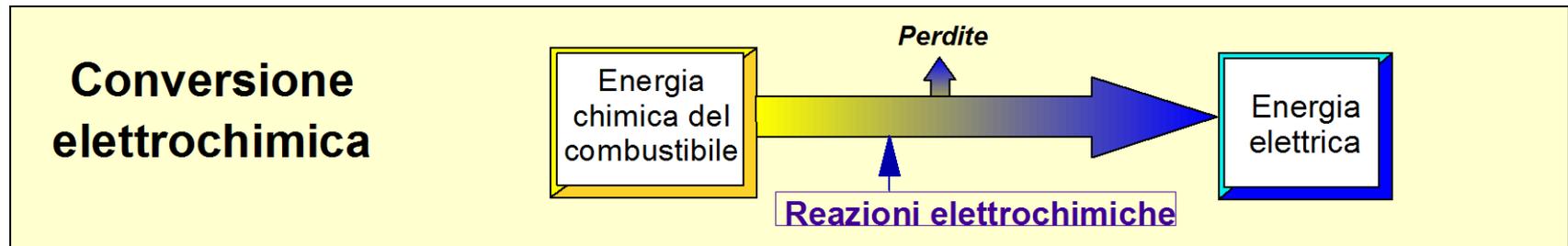
Consolidate

In fase di  
consolidamento

# Celle a combustibile



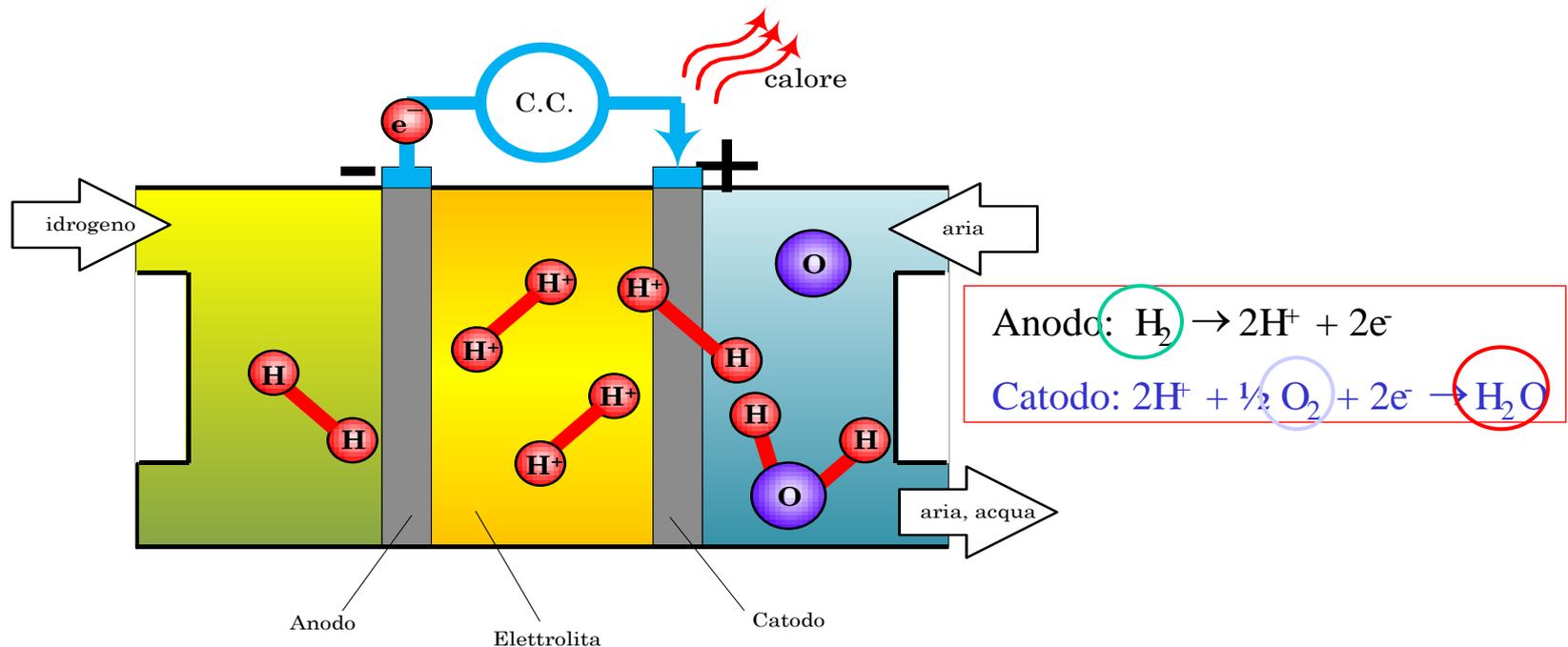
- ✓ In alternativa alla classica conversione "termodinamica", la trasformazione dell'energia chimica di un combustibile in energia elettrica può avvenire direttamente mediante reazioni elettrochimiche all'interno delle celle a combustibile (*Fuel Cell - FC*)



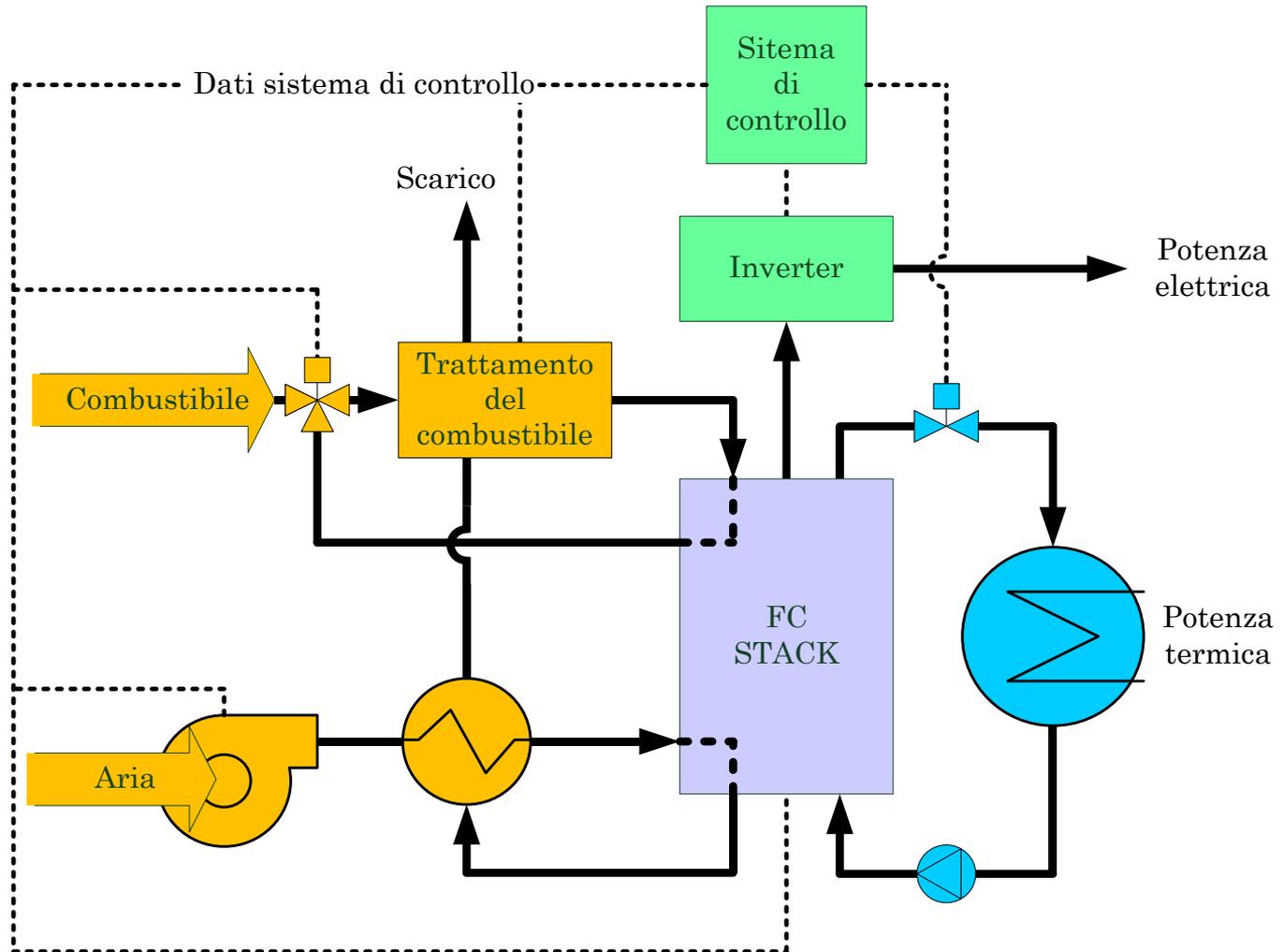
- ✓ La trasformazione elettrochimica può essere estremamente efficiente in quanto non deve sottostare alle limitazioni di rendimento imposte dal rendimento di Carnot
- ✓ La potenziale assenza di processi di combustione riduce le emissioni

# Celle a combustibile

- ✓ La struttura di una FC è analoga a quella di una pila elettrochimica; sono presenti due elettrodi (anodo e catodo) ed un elettrolita disposto tra i due elettrodi. Il combustibile, solitamente  $H_2$ , viene alimentato dall'esterno al comparto anodico, mentre un flusso di ossidante (aria o ossigeno puro) viene convogliato verso il catodo. La presenza di catalizzatore sugli elettrodi favorisce due semireazioni: di ossidazione elettrochimica dell'idrogeno e di riduzione elettrochimica dell'ossigeno con scambio di ioni attraverso l'elettrolita e formazione di acqua; in definitiva le reazioni liberano elettroni sull'anodo generando un flusso di corrente continua: tali elettroni possono essere convogliati su un carico elettrico esterno.



# Celle a combustibile



# Celle a combustibile

Le FC si classificano in base all'**elettrolita** che condiziona:

- le temperature di esercizio
- specie chimiche che reagiscono
- tolleranza alle impurezze

L'**elettrolita** può essere:

- solido (membrana polimerica)
- liquido alla temperatura ambiente (ad. es. acqua distillata)
- soluzione elettrolitica (ad. es. sali disciolti in acqua)
- sali fusi (ad. es. cloruri, carbonati)
- solidi ionici drogati e con vacanze (ad. es. alogenuri)

# Celle a combustibile

	<b>PEMFC</b>	<b>AFC</b>	<b>PAFC</b>	<b>MCFC</b>	<b>SOFC</b>
<b>Elettrolita</b>	Membrana polimerica (ioni H <sup>+</sup> )	Soluzione alcalina (ioni OH <sup>-</sup> )	Acido fosforico (ioni H <sup>+</sup> )	Carbonati di litio fusi (ioni CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	Ossido di zirconio (ioni O <sup>2-</sup> )
<b>Reforming interno</b>	No	No	No	Si	Si
<b>Ossidante</b>	Aria	O <sub>2</sub>	Aria	Aria	Aria
<b>Temperatura di funzionamento</b>	60-110°C	90-250°C	150-210°C	600-700°C	700-1000°C
<b>Rendimento del sistema <sup>(1)</sup></b>	25-35%	32-40%	35-40%	40-50%	45-55%
<b>Sostanze nocive</b>	CO, Zolfo	CO, CO <sub>2</sub> , Zolfo	CO, Zolfo	Zolfo	Zolfo

(1) con riferimento al potere calorifico superiore, HHV

# Celle a combustibile

	Tipo di FC	Reazione anodica	Ione trasportato nell'elettrolita	Reazione catodica	Temperatura operativa (°C)
BT	PEMFC	$H_2 \rightarrow 2e^- + 2H^+$	$H^+ \longrightarrow$	$2H^+ + 1/2 O_2 + 2e^- \rightarrow H_2O$	60-80
	AFC	$2e^- + 2H_2O \leftarrow H_2 + 2(OH)^-$	$\longleftarrow OH^-$	$2(OH)^- \leftarrow H_2O + 1/2 O_2 + 2e^-$	< 120
	PAFC	$H_2 \rightarrow 2e^- + 2H^+$	$H^+ \longrightarrow$	$2H^+ + 1/2 O_2 + 2e^- \rightarrow H_2O$	200
AT	MCFC	$2e^- + H_2O + CO_2 \leftarrow H_2 + CO_3^-$	$\longleftarrow CO_3^-$	$CO_3^- \leftarrow 1/2 O_2 + CO_2 + 2e^-$	650
	SOFC	$2e^- + H_2O \leftarrow H_2 + O^-$	$\longleftarrow O^-$	$O^- \leftarrow 1/2 O_2 + 2e^-$	800-1000

The diagram shows an external circuit connecting the anode (left, marked with a minus sign ⊖) and the cathode (right, marked with a plus sign ⊕) of the fuel cells. Electrons (e<sup>-</sup>) flow from the anode to the cathode through the circuit, which includes a glowing light bulb, indicating that the fuel cells are generating electricity.

# Celle a combustibile

- ✓ utilizzo di **idrogeno** come combustibile principale
- ✓ bassa densità di potenza (le PEMFC hanno la più alta densità di potenza)
- ✓ produzione di **corrente continua** (necessità di inverter)
- ✓ alta efficienza ai carichi parziali
- ✓ adattamento alle variazioni di carico
- ✓ generazione di **calore** sfruttabile per **cogenerazione**
- ✓ ridotte emissioni inquinanti grazie alla **combustione evitata**
- ✓ conversione statica: **assenza di parti meccaniche in movimento** e ridotto inquinamento acustico
- ✓ modularità (taglia “stack” teoricamente illimitata)
- ✓ assenza di effetto taglia

# Celle a combustibile

Il combustibile principale utilizzato dalle FC è l'idrogeno

- le celle a bassa temperatura non sono tolleranti al CO e necessitano di un impianto di trattamento per convertire il combustibile disponibile in un gas con un contenuto più o meno elevato di idrogeno (“reformer”)
- le celle ad alta temperatura (MCFC e SOFC) possono essere in grado di effettuare autonomamente un reforming interno, ovvero di essere alimentate con gas naturale o gas di sintesi (es. miscela  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ )

E' inoltre necessario ridurre la concentrazione di impurezze o di elementi dannosi (es. lo zolfo in tutti i suoi composti:  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{COS}$  ...), capaci di degradare le prestazioni della cella anche in modo irreversibile

# Celle a combustibile

Celle singole formano una pila (“stack”), da cui moduli di potenza maggiore ed impianti di grande potenza ottenuti sommando più moduli.



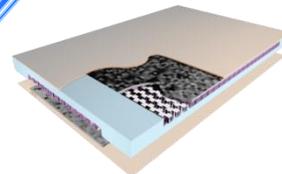
**Modulo**



**Stack**



**Modulo**



**Fuel Cell**



**Impianto**

**Esempio di moduli MCFC FuelCell Energy**

# Celle a combustibile

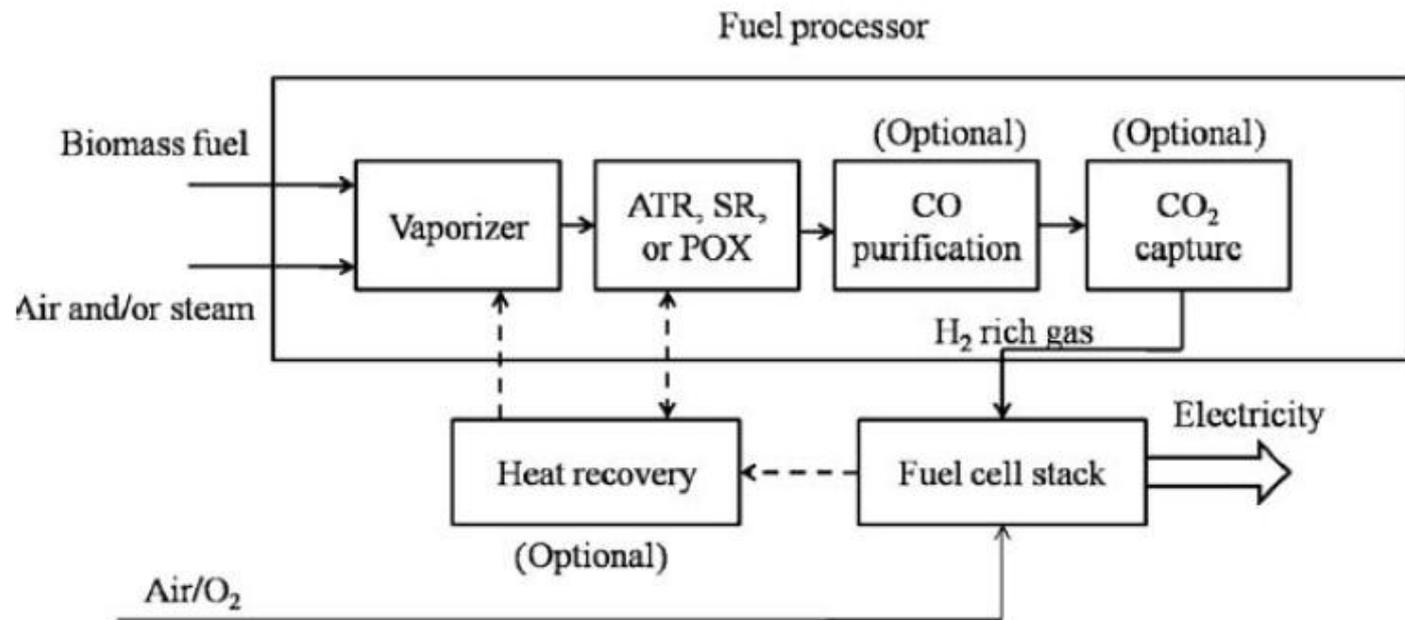
Tipologia	$\eta_e$	$\eta_{tot}$	Impiego	Costi sistema cogenerativo a Gas Naturale
<b>PEMFC</b>	<b>&lt; 0.40</b>	<b>0.80-0.85</b>	<b>Riscaldamento acqua sanitaria (50-60 °C)</b>	<b>4000 €/kW<sub>el</sub></b> <b>Target: &lt;600</b>
MCFC	< 0.5	0.75-0.91	Vapore ad uso industriale (~500 °C)	3500 €/kW <sub>el</sub> Target: < 600
SOFC	< 0.55	0.75-0.93	Vapore ad uso industriale (~800 °C)	3000 €/kW <sub>el</sub> Target: < 600

# Biomasse e Celle a combustibile

- ✓ Recentemente si stanno affermando i sistemi integrati biomassa/celle a combustibile, comunemente chiamati **Biomass-Integrated gasification fuel cell (B-IGFC)**
- ✓ Basati sulla presenza di una gassificazione associata alla conversione energetica in una cella a combustibile
- ✓ Le celle più indicate per queste applicazioni sono le MCFC e le SOFC, ma studi recenti pongono attenzione anche alle PEM

# Biomasse e Celle a combustibile

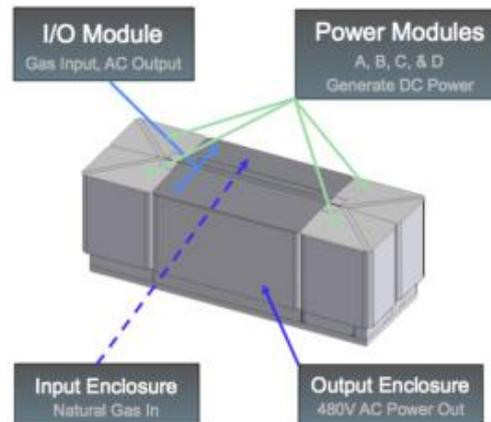
- ✓ Componente essenziale è il reformer dove il generico combustibile viene convertito in un gas ricco di idrogeno



- ✓ Le SOFC sono tra le più indicate grazie a:
  - alta tolleranza alle impurità
  - possibilità di effettuare il reforming internamente

# Biomasse e SOFC

- ✓ Cella combustibile SOFC alimentata direttamente a biogas prodotta dalla Bloomenergy



---

## ES-5000 Energy Saver

---

<b>Potenza combustibile</b>	kW	194
<b>Potenza elettrica netta</b>	kW	100
<b>Rendimento elettrico netto</b>	%	52

---

*Dimensioni package: 5.7 x 2.1 x 2.1 m*  
*Peso package : 10000 kg*

# Le tecnologie

## Tecnologie CHP a combustione interna

Prototipali

- ✓ Celle a combustibile - Fuel Cell (FC)
- ✓ Sistemi termofotovoltaici (TPV)

## Tecnologie CHP a combustione esterna

Prototipali

- ✓ Sistemi termofotovoltaici (TPV)
- ✓ Sistemi termoelettrici (TE)

## Tecnologie CHP a combustione interna/esterna

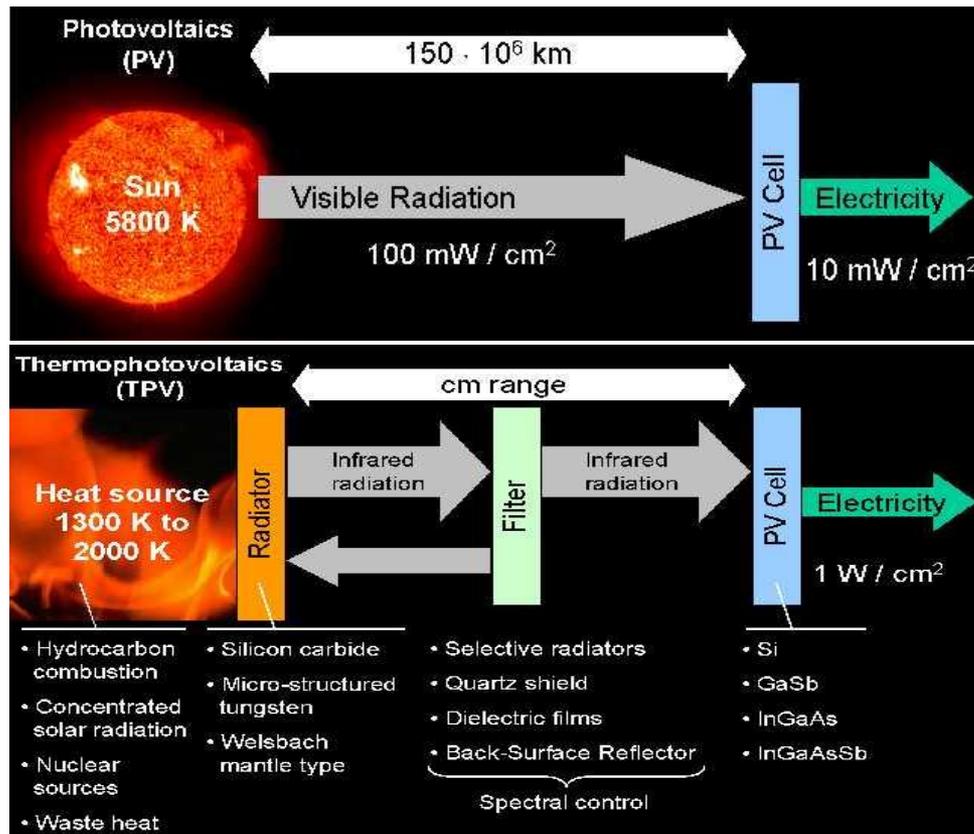
- ✓ Ciclo combinato gas-vapore
- ✓ Ciclo combinato MCI-ORC
- ✓ Ciclo combinato MTG-ORC

Consolidate

In fase di  
consolidamento

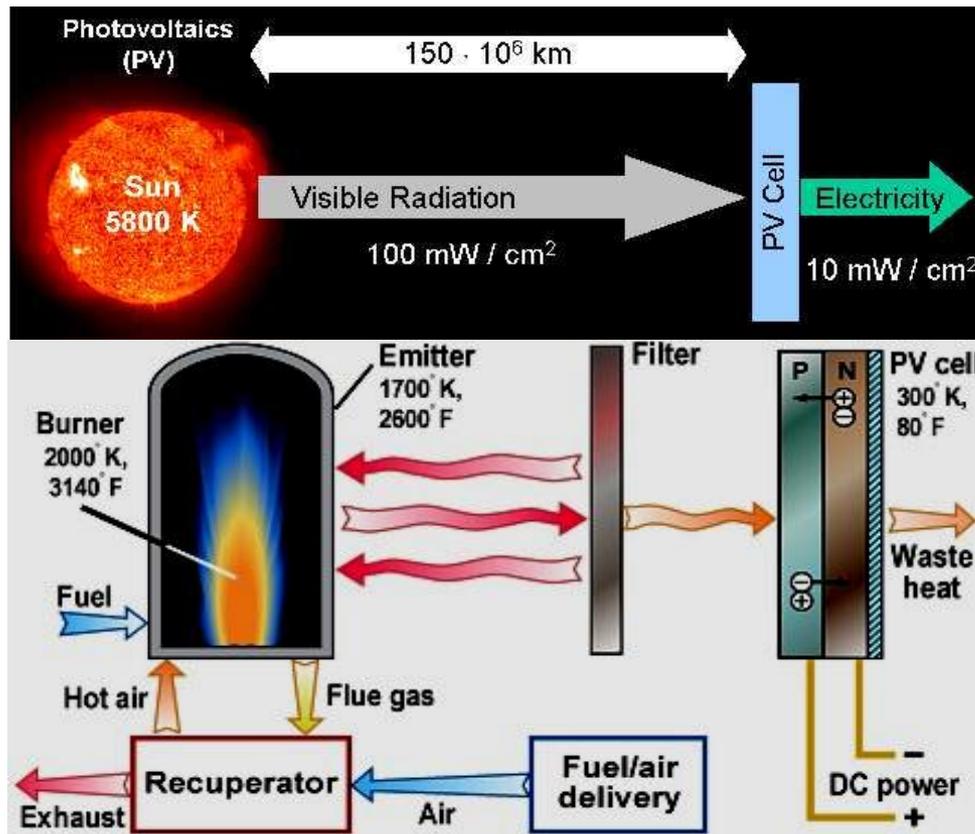
# Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

- ✓ La tecnologia termofotovoltaica (TPV) è basata sulla conversione dell'energia irradiata da un emettitore in elettricità attraverso celle fotovoltaiche (PV)



# Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

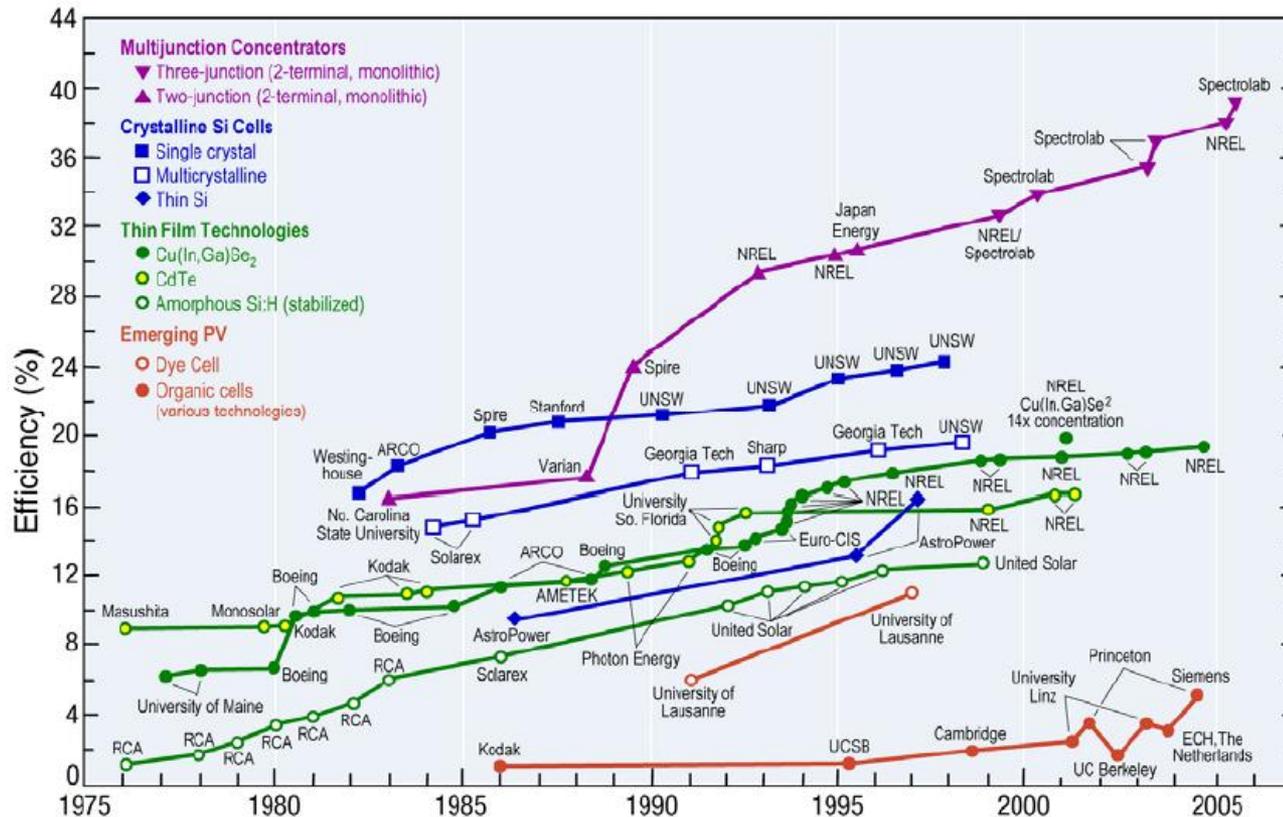
- ✓ La tecnologia termofotovoltaica (TPV) è basata sulla conversione dell'energia irradiata da un emettitore in elettricità attraverso celle fotovoltaiche (PV)



# Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

✓ Questa tecnologia nasce attorno agli anni '60 al MIT ma solo negli ultimi anni ha ricevuto nuovo impulso grazie

✓ progressi nella tecnologia delle celle fotovoltaiche



# Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

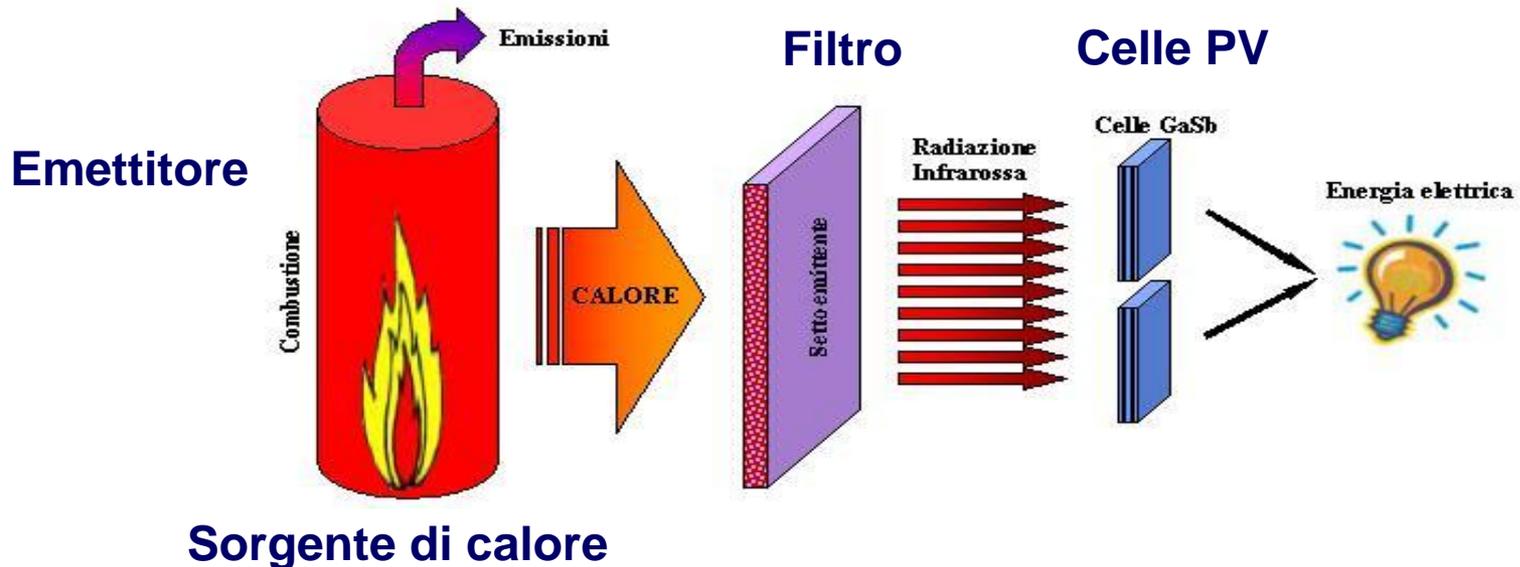
- ✓ Questa tecnologia nasce attorno agli anni '60 al MIT ma solo negli ultimi anni ha ricevuto nuovo impulso grazie
  - ✓ progressi nella tecnologia delle celle fotovoltaiche
  - ✓ particolare adattabilità a numerosi settori di nicchia quali:
    - elettronica (1-2 W)
    - sistemi portatili e batterie (10-50 W)
    - produzione energia on-board di veicoli (100-300 W)
    - microgenerazione residenziale (1000-3000 W)**

# Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

- ✓ La tecnologia TPV presenta una serie di fattori positivi
  - ✓ funzionamento silenzioso (no parti in movimento)
  - ✓ particolare adattabilità a combustibili di varia natura (può essere utilizzato anche con combustione esterna)
  - ✓ emissioni molto basse
  - ✓ densità di potenza molto elevate (100 volte quelle di un sistema a celle fotovoltaiche basate sulla radiazione solare)
- ✓ Limiti della tecnologia
  - ✓ ancora necessaria R&D per ingegnerizzare il sistema
  - ✓ rendimento elettrico molto basso (1-10 %), ma elevati rapporti  $P_{th}/P_e$  (10-20)
  - ✓ costi medio-alti ma in fase di rapido calo

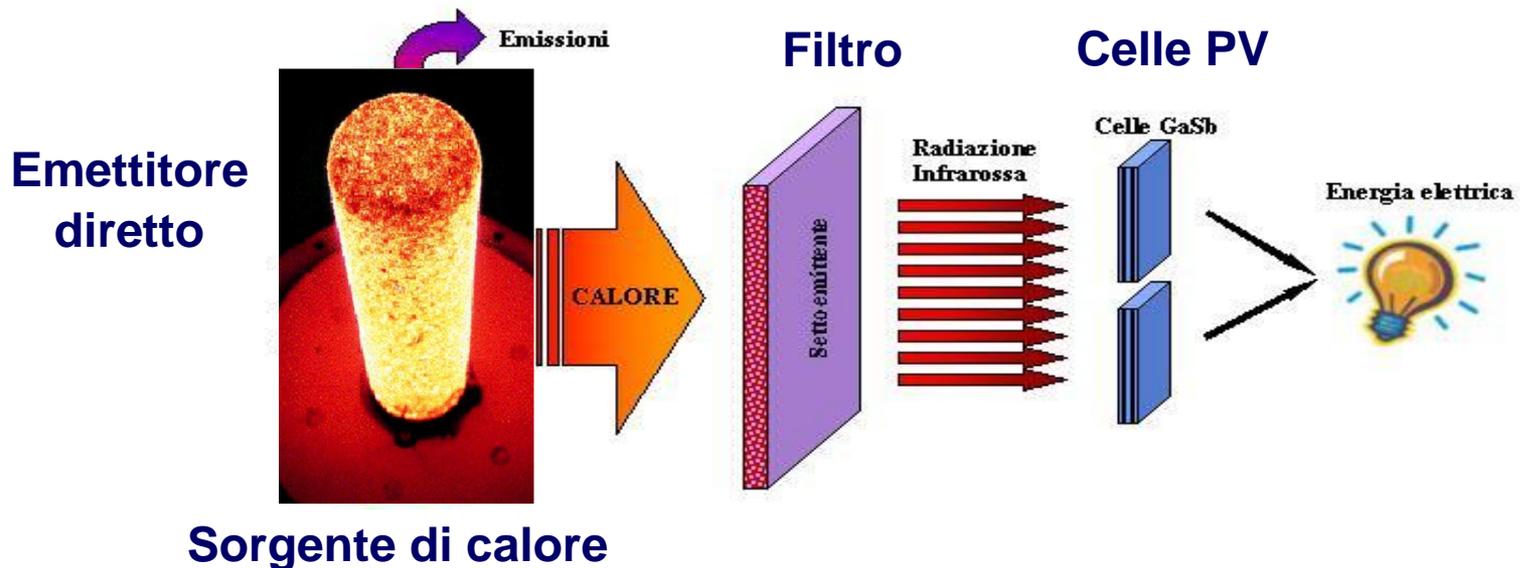
# Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

- ✓ Un sistema di generazione termofotovoltaico è composto essenzialmente da quattro elementi:
  - una sorgente di calore
  - un emettitore
  - un filtro
  - una serie di celle fotovoltaiche



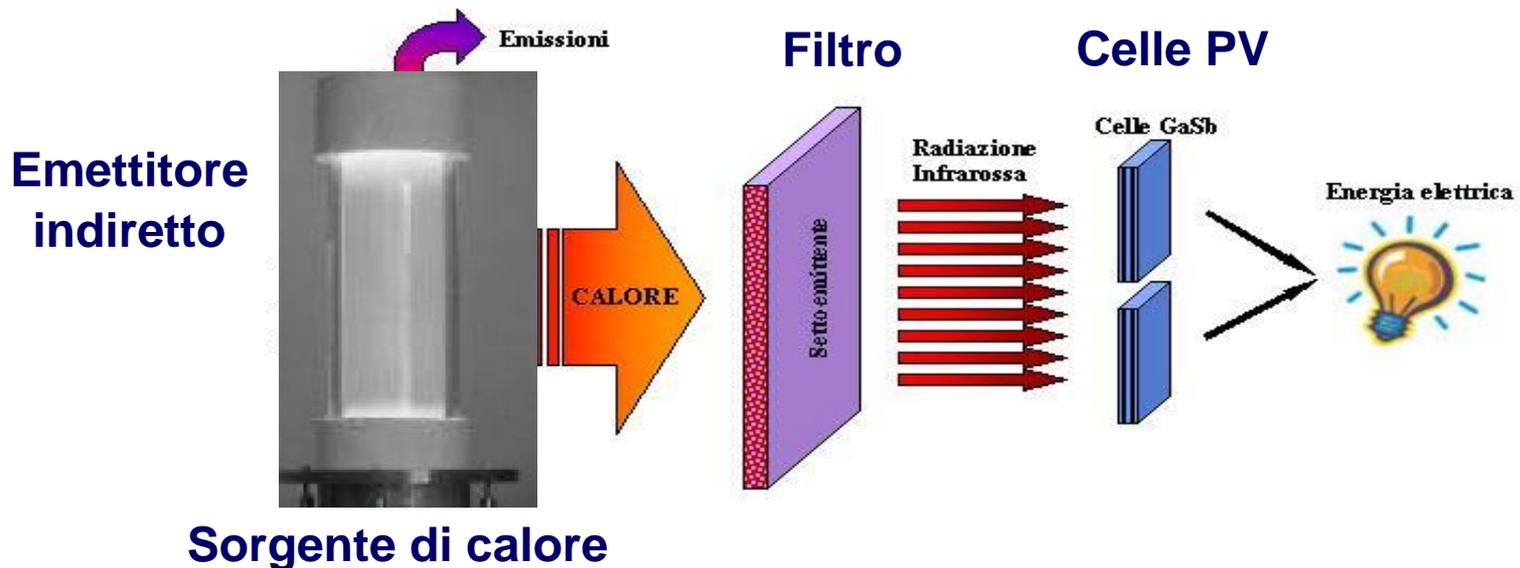
# Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

- ✓ Un sistema di generazione termofotovoltaico è composto essenzialmente da quattro elementi:
  - una sorgente di calore
  - un emettitore
  - un filtro
  - una serie di celle fotovoltaiche



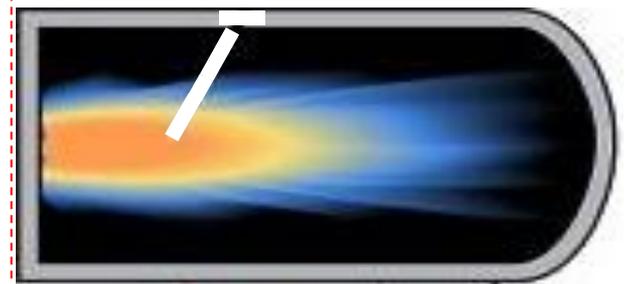
# Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

- ✓ Un sistema di generazione termofotovoltaico è composto essenzialmente da quattro elementi:
  - una sorgente di calore
  - un emettitore
  - un filtro
  - una serie di celle fotovoltaiche

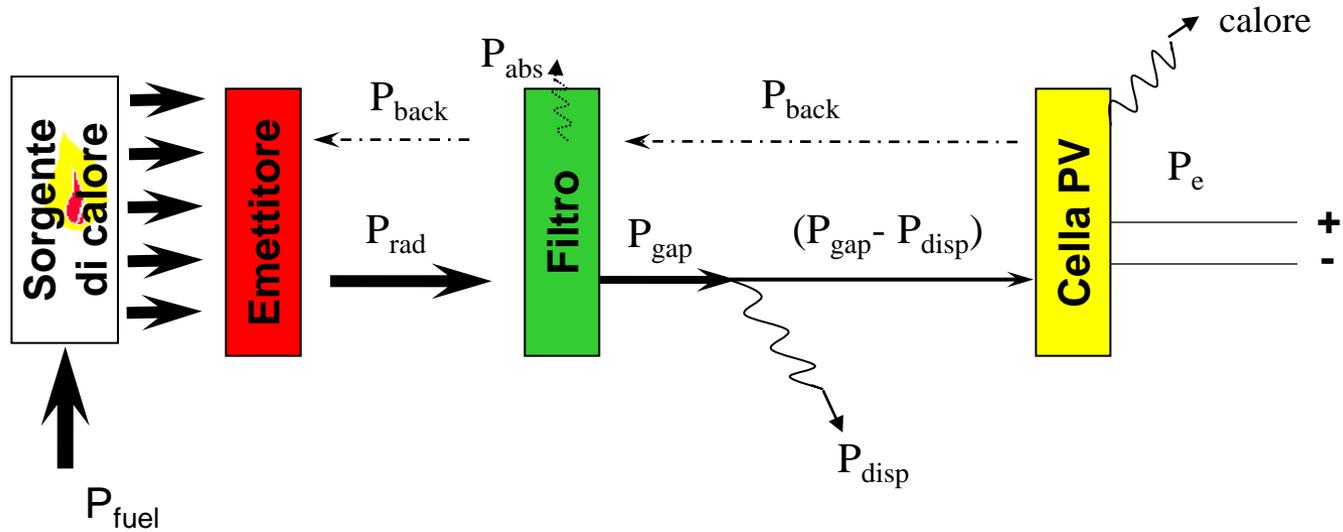


# Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

- ✓ In un *sistema di combustione* che interagisce indirettamente con l'emettitore il calore sviluppato dalla combustione viene trasmesso per scambio termico ad un radiatore, che diventa *incandescente*
  - ☑ poichè il sistema è a combustione esterna, è possibile utilizzare un combustibile qualsiasi (biogas, bio-oli, biomasse, oli vegetali, RSU, ecc.)



# Sistemi Termofotovoltaici (TPV)



Rendimento radiante	$\eta_{RAD} = \frac{P_{rad}}{P_{fuel}}$	Rendimento di vista	$\eta_{VF} = \frac{P_{gap} - P_{disp}}{P_{gap}}$
Rendimento spettrale	$\eta_{SP} = \frac{P_{gap}}{P_{rad}}$	Rendimento cella PV	$\eta_{PV} = \frac{P_e}{P_{gap} - P_{disp}}$

$$\eta_{TPV} = \frac{P_e}{P_{fuel}} = \eta_{RAD} \eta_{SP} \eta_{VF} \eta_{PV}$$

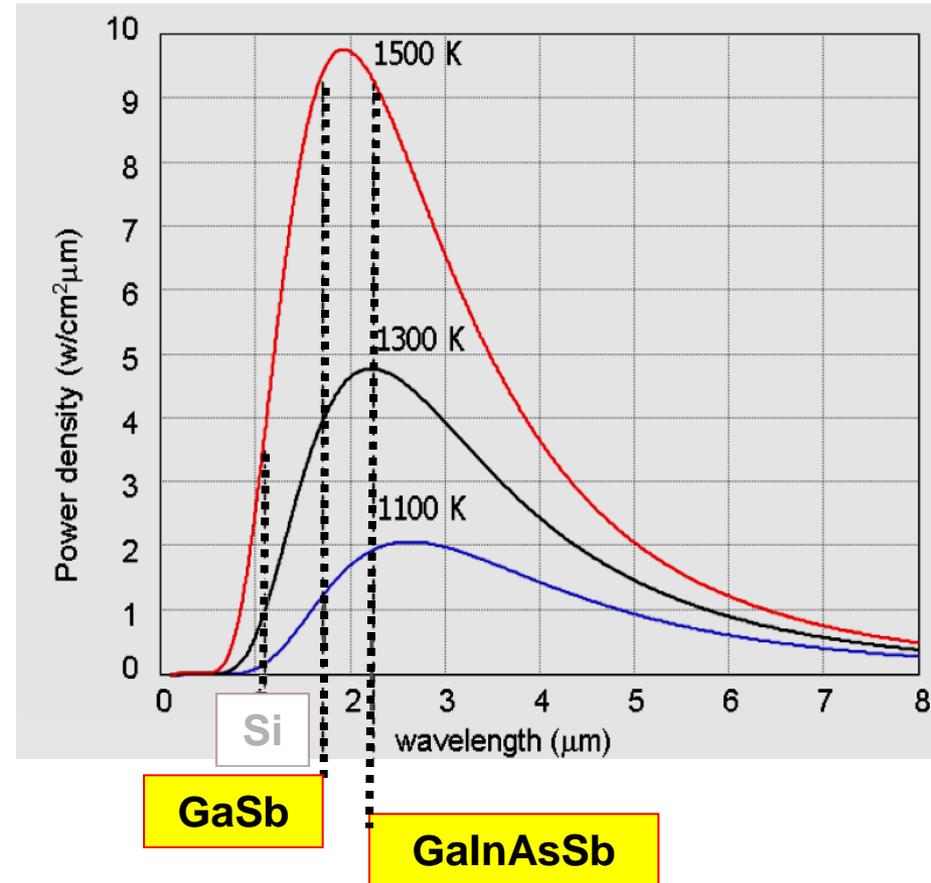
# Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

✓ Le celle PV al Silicio (Si) o al Germanio (Ge), che sono relativamente meno costose e più diffuse, presentano bande di valenza elevate per le applicazioni TPV

Si (1.1 eV)  
Ge (0.8 eV)

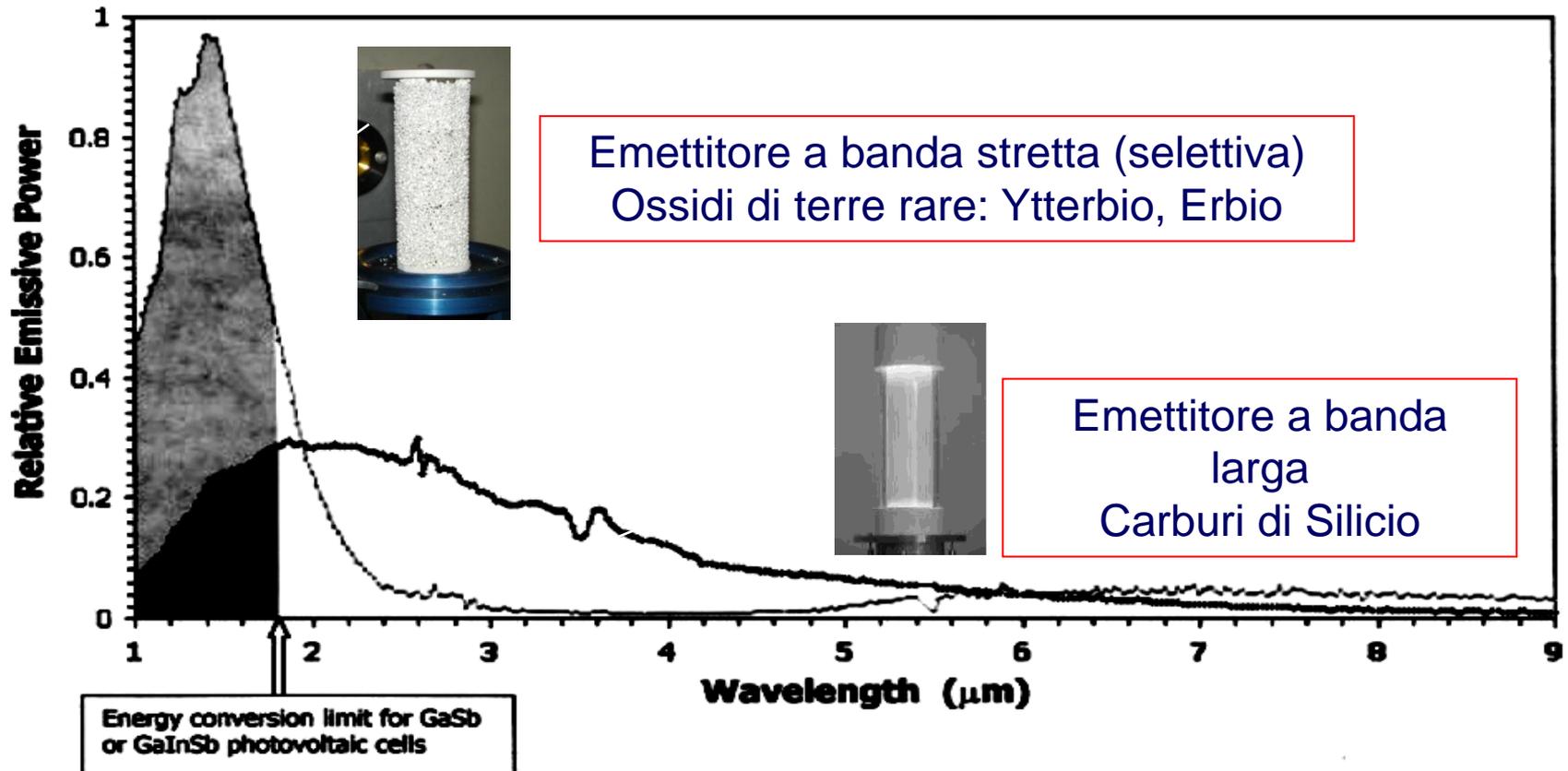
✓ Recentemente vengono sperimentate ed utilizzate celle PV a base di Gallio (Ga), Antimonio (Sb), Indio (In) ed Arsenico (As) (più efficienti ma contengono elementi tossici (Sb, As) e la loro produzione è ancora piuttosto costosa)

GaSb ( $E_g = 0.73$  eV)  
GaInAs ( $E_g = 0.72$  eV)  
GaInAsSb ( $E_g = 0.53$  eV)



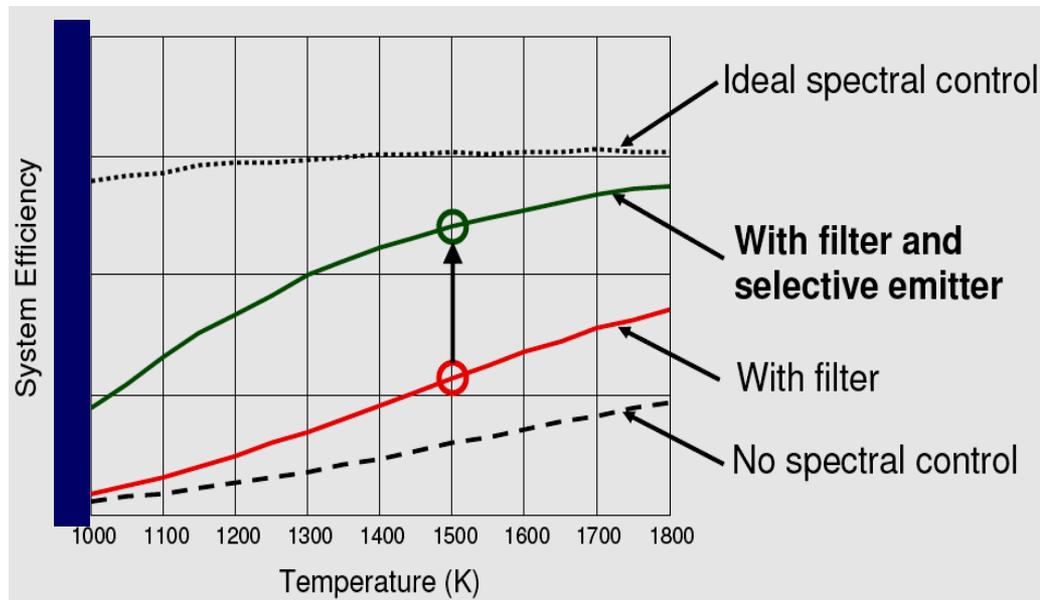
# Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

- Requisito essenziale dell'*emettitore* è quello di irraggiare ad una frequenza ottimizzata per le celle fotovoltaiche



# Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

- Il filtro permette di far passare alle celle PV solo l'energia radiante che ha un livello energetico sufficiente per attivare le celle PV
- L'energia radiante che non viene fatta passare dal filtro viene in parte assorbita dal filtro (e trasformata in calore) e in parte riflessa verso l'emettitore e/o verso altre zone del sistema dove può essere utilizzata come energia utile



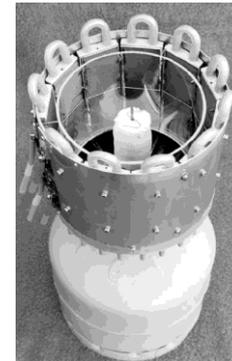
# Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

## JX Crystal (USA) - Midnight Sun



$$P_e = 100 W_e$$
$$\eta_e = 1.4 \%$$

## Paul Scherrer Institute (Svizzera)



$$P_e = 50 W_e$$
$$\eta_e = 2.5 \%$$

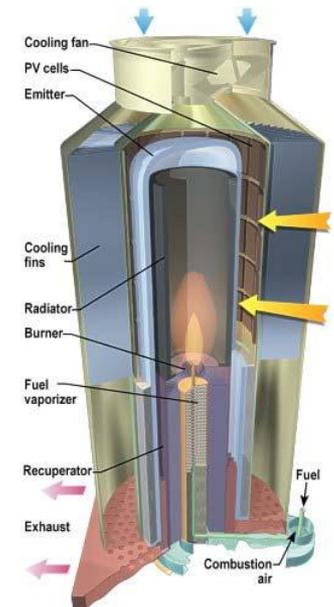
## CANMET(Canada)

$$\eta_e = 2.5 \%$$

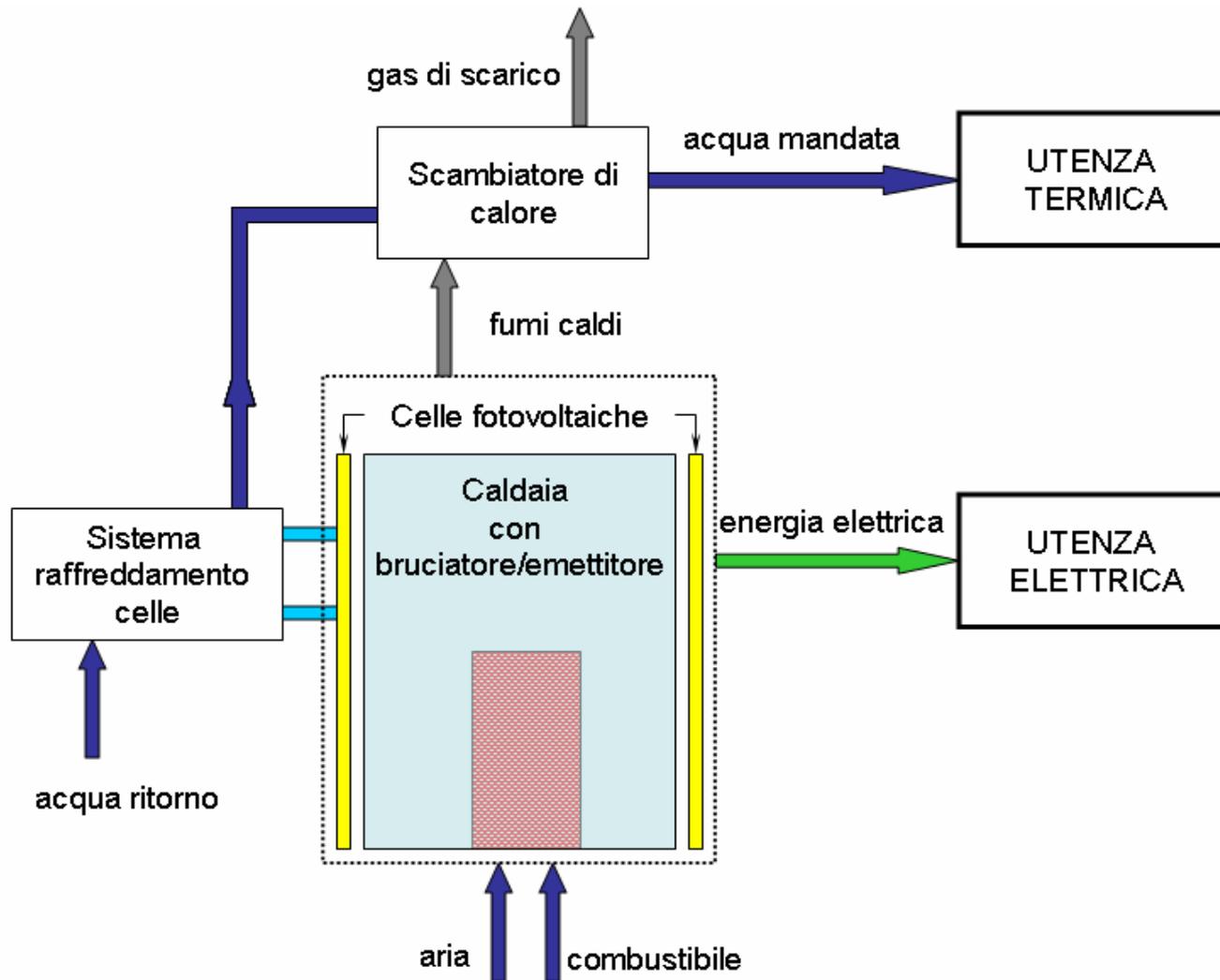


## JX Crystal (USA)

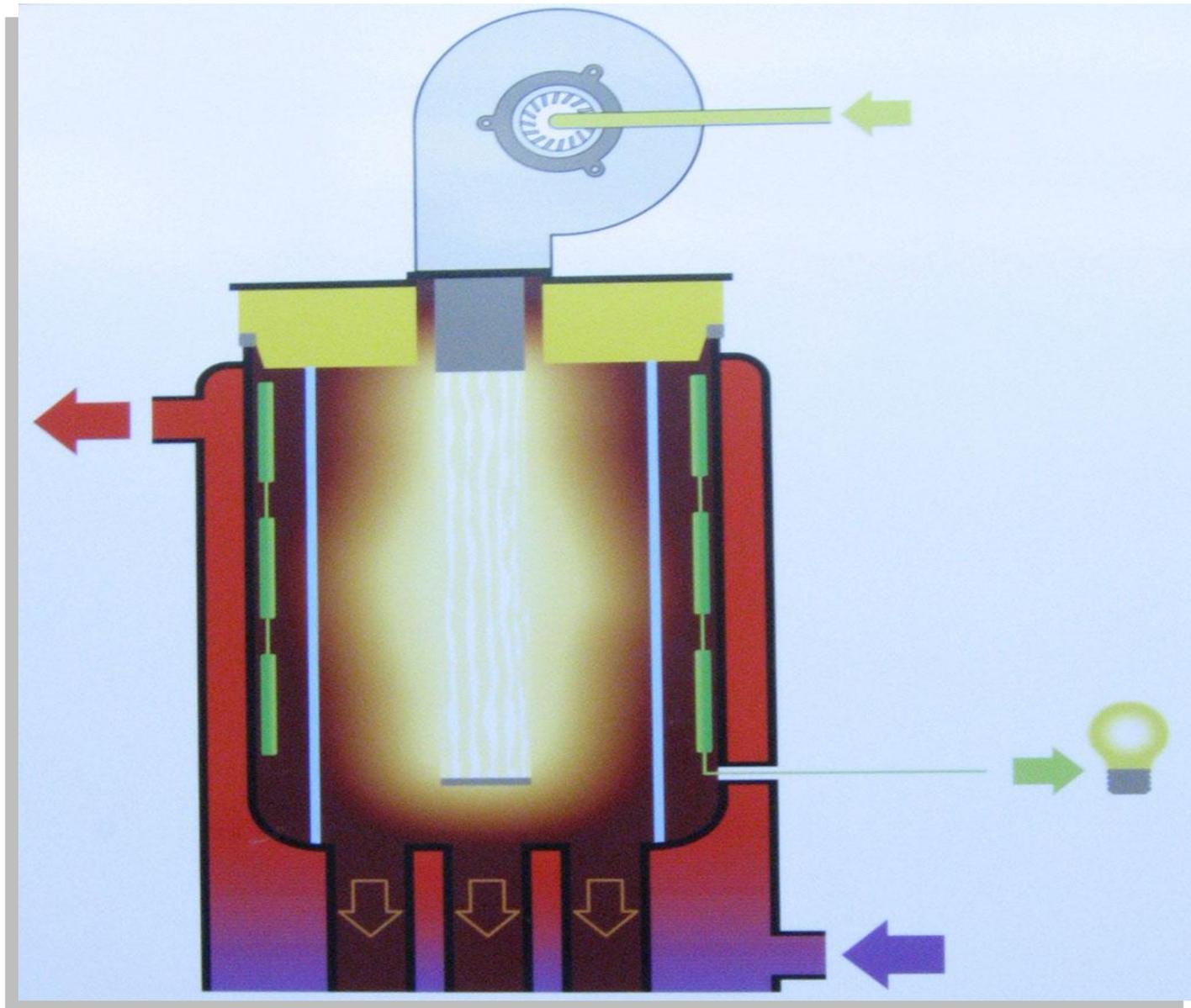
$$P_e = 500 W_e$$
$$\eta_e = 12.3 \%$$



# Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

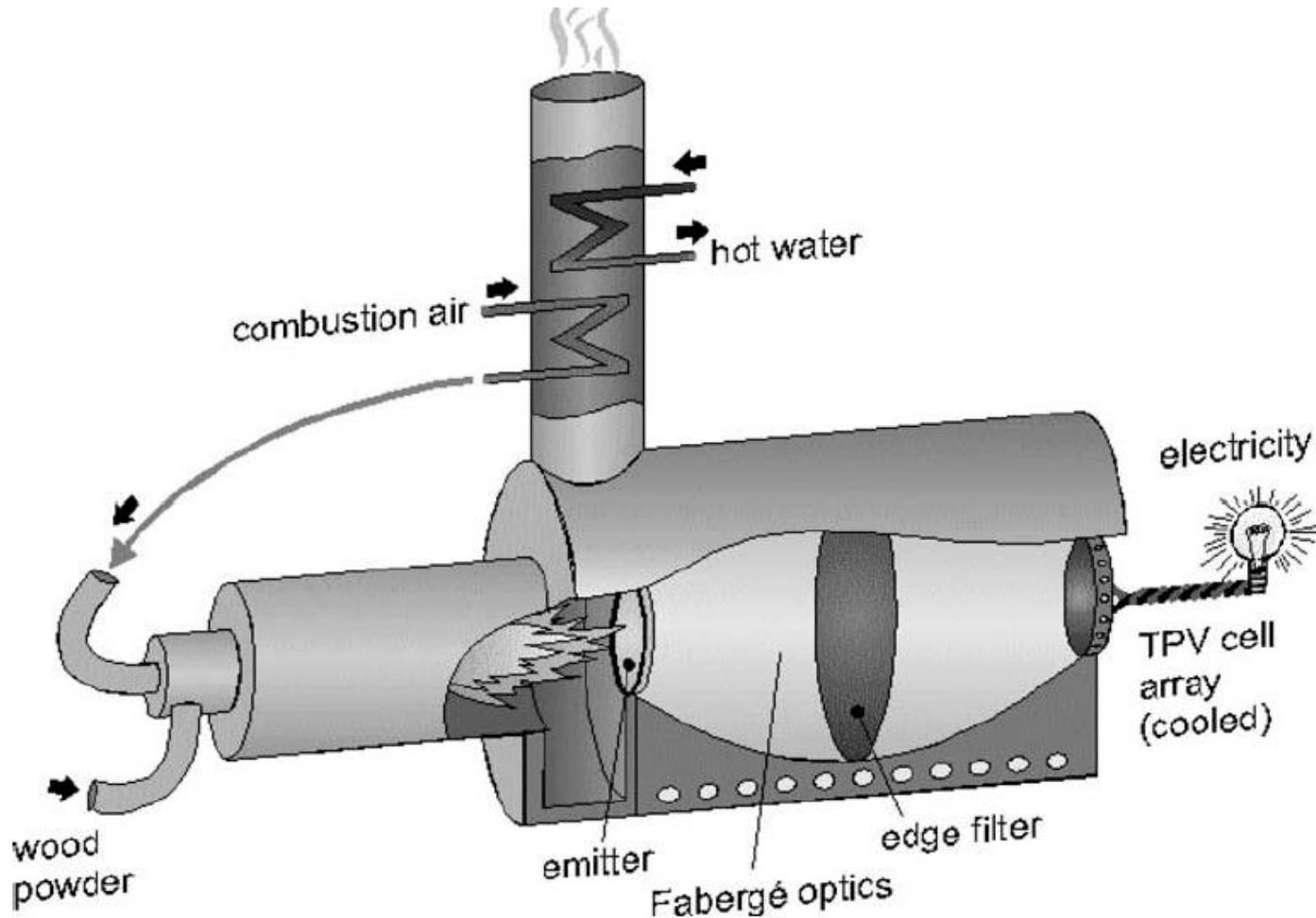


# Sistemi Termofotovoltaici (TPV)



# Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

- Proposta del Solar Energy Research Center SERC (Sweden)
- Stufa a biomassa per applicazioni remote



# Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

Modello	$P_e$	$P_{in}$	$\eta_e$	$\eta_{cog}$	Costo	
JX Crystal (Midnight Sun)	100 W	7.3 kW	1.4 %	n.d	n.d	n.d.
JX Crystal <sup>1</sup>	1.5 kW	12.2 kW	12.3 %	n.d	5250 €	3500 €/kW
JX Crystal <sup>2</sup>	550 W	5.7 kW	9.6 %	75 %	800 €	1800 €/kW
Paul Scherrer Inst. <sup>2</sup>	200 W	20 kW	1.0 %	n.d	590 €	2950 €/kW

<sup>1</sup> Costo riferito al sistema complessivo caldaia + sistema TPV (senza inverter)

<sup>2</sup> Costo riferito al solo sistema TPV (senza inverter)

# Le tecnologie

## Tecnologie CHP a combustione interna

Prototipali

- ✓ Celle a combustibile - Fuel Cell (FC)
- ✓ Sistemi termofotovoltaici (TPV)

## Tecnologie CHP a combustione esterna

Prototipali

- ✓ Sistemi termofotovoltaici (TPV)
- ✓ Sistemi termoelettrici (TE)

## Tecnologie CHP a combustione interna/esterna

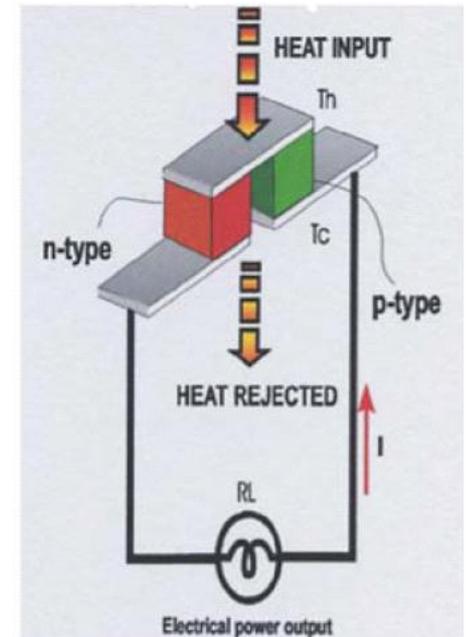
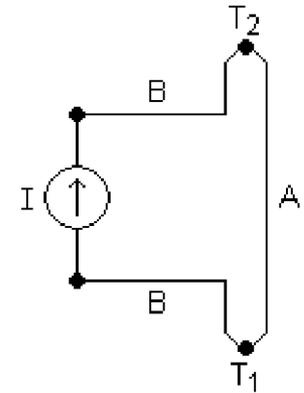
- ✓ Ciclo combinato gas-vapore
- ✓ Ciclo combinato MCI-ORC
- ✓ Ciclo combinato MTG-ORC

Consolidate

In fase di  
consolidamento

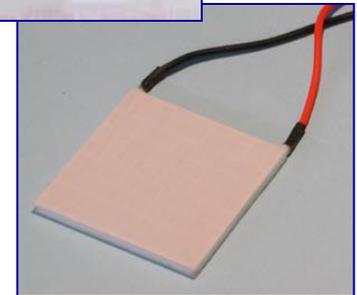
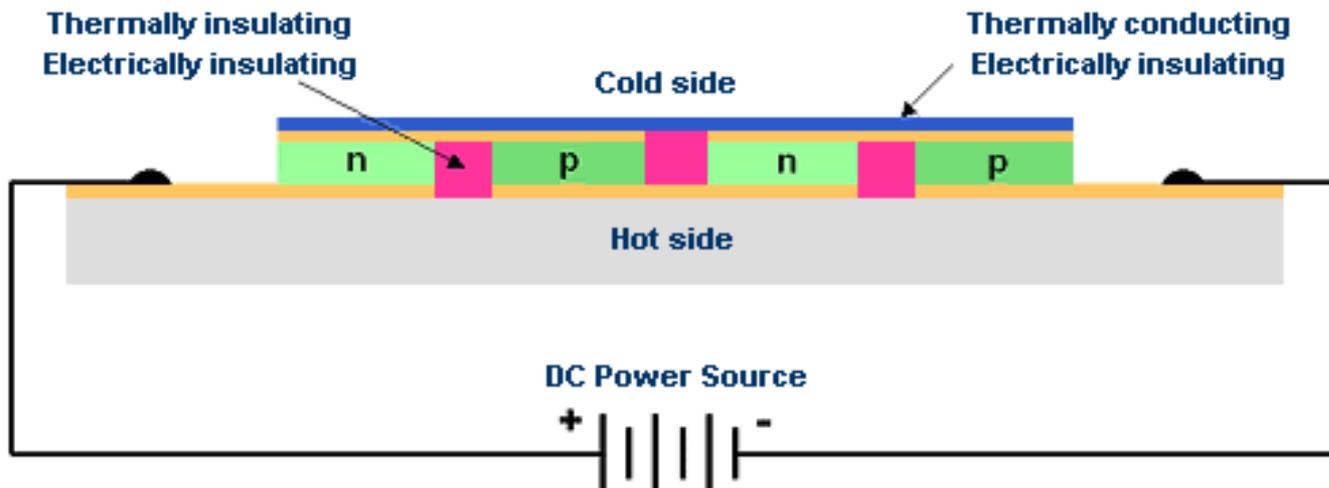
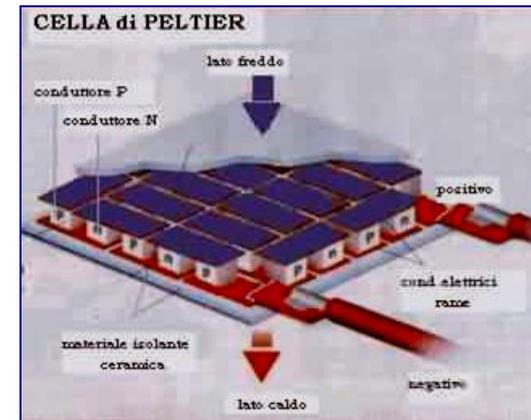
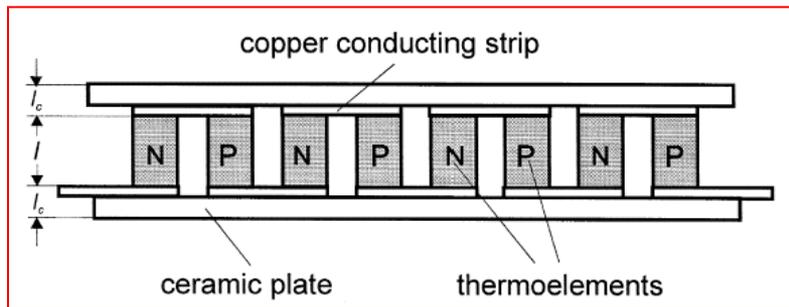
# Sistemi Termoelettrici

- ✓ Un circuito bimetallico percorso da corrente continua mostra una differenza di temperatura nella giunzione tra i due metalli (Effetto Peltier)
- ✓ Il fenomeno è reversibile: quando due conduttori o semiconduttori uniti tra di loro a formare un termoelemento (o termocoppia) hanno le giunzioni sottoposte ad una differenza di temperatura, all'interno del circuito circola corrente elettrica (Effetto Seebeck)



# Sistemi Termoelettrici

- ✓ La maggior parte dei dispositivi termoelettrici è basata su semiconduttori di tipo **p** e di tipo **n** connessi elettricamente in serie attraverso strisce di metallo (rame), impaccate attraverso piastre ceramiche che fungono da conduttori di calore e da isolanti elettrici



# Sistemi Termoelettrici

- ✓ La maggior parte dei dispositivi termoelettrici è basata su semiconduttori di Bismuto-Tellurio di tipo **p** e di tipo **n**

**Cifra di merito:**

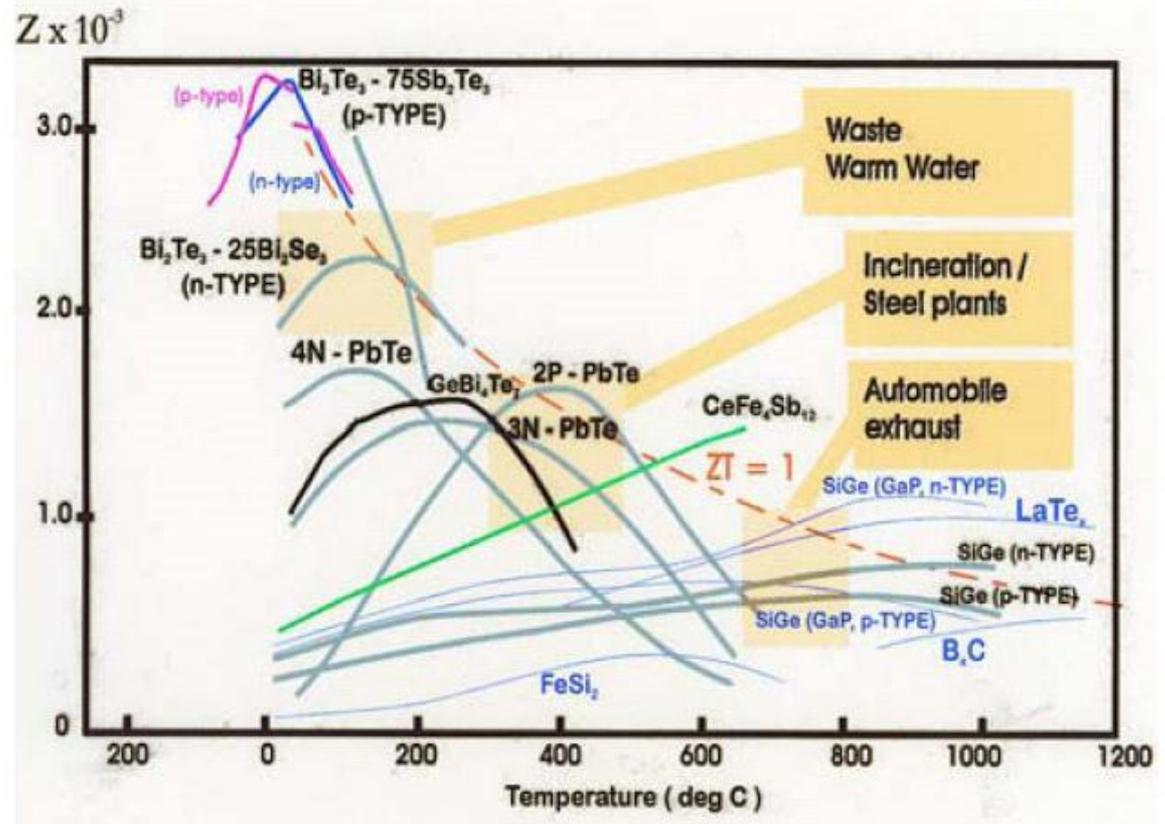
$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \lambda} \left[ \frac{1}{\text{K}} \right]$$

$\alpha$ : coeff. di Seebeck [V/K]

$\rho$ : resistività [ $\Omega \text{ m}$ ]

$\lambda$ : conducibilità termica

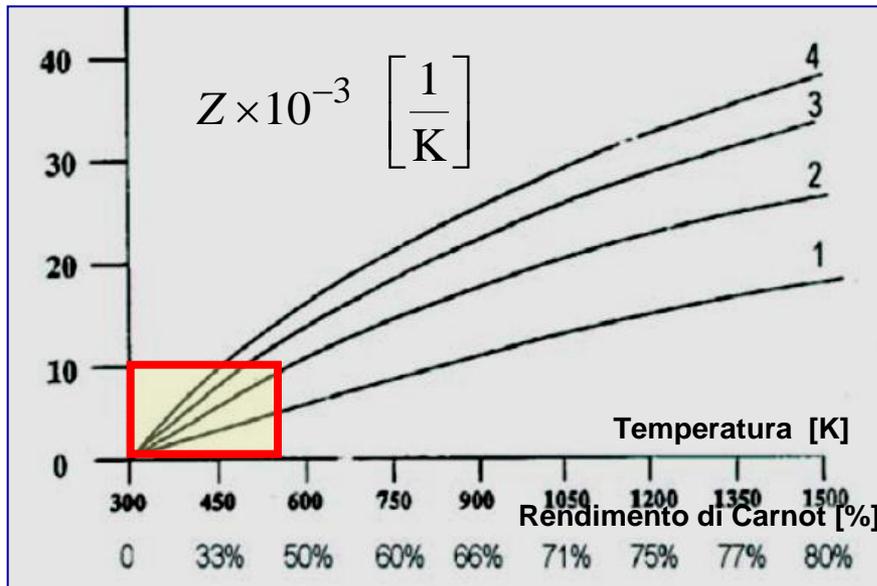
[W/(m K)]



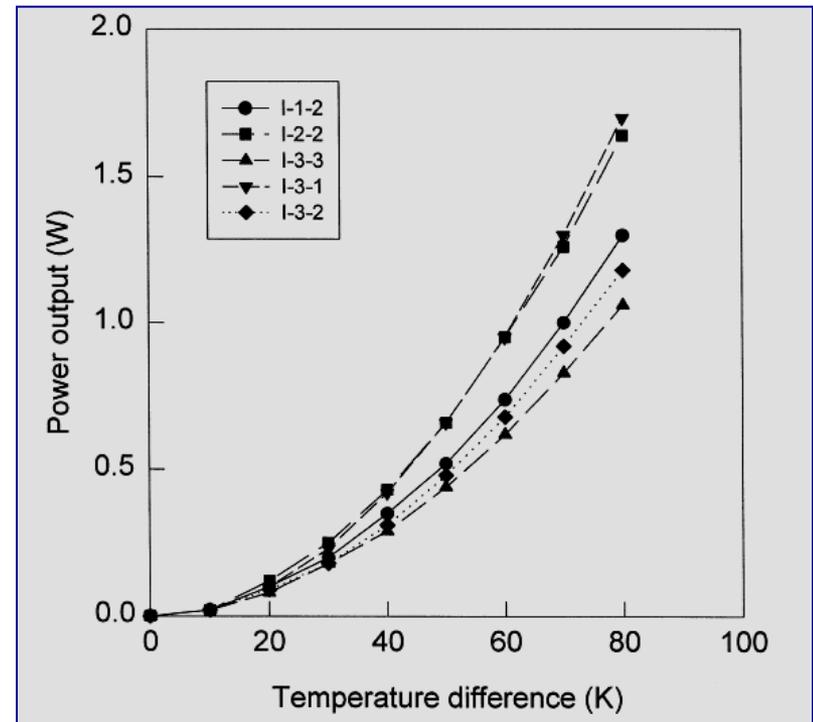
# Sistemi Termoelettrici

- ✓ Rendimenti di conversione (< 5%) e potenza generata per singolo modulo relativamente bassi
- ✓ Qualora l'alimentazione sia effettuata tramite calore di scarto, il costo per il combustibile è nullo

Rendimento di conversione [%]



(Temp. giunto freddo: 300 K)



# Sistemi Termoelettrici

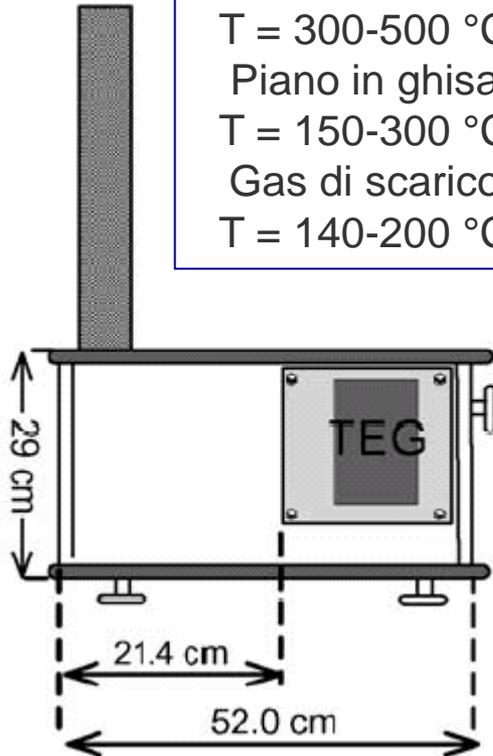
- ✓ I principali vantaggi offerti dai dispositivi termoelettrici sono
  - assenza di vibrazioni e rumore (non ci sono parti in movimento)
  - vita utile molto elevate (100'000 ore)
  - possibilità di utilizzo come dispositivo reversibile (fornendo energia elettrica può essere utilizzato per refrigerare o riscaldare)
- ✓ Limiti della tecnologia
  - ancora necessaria R&D per ingegnerizzare il sistema
  - rendimenti elettrici molto bassi (1-10 %)
  - costi elevati

# Sistemi Termoelettrici

Royal Institute of Technology  
(Sweden)

[finanziato dalla Eriksson]

Base del camino  
 $T = 300-500\text{ }^{\circ}\text{C}$   
Piano in ghisa  
 $T = 150-300\text{ }^{\circ}\text{C}$   
Gas di scarico  
 $T = 140-200\text{ }^{\circ}\text{C}$



$$P_e = 4 W_e$$

