

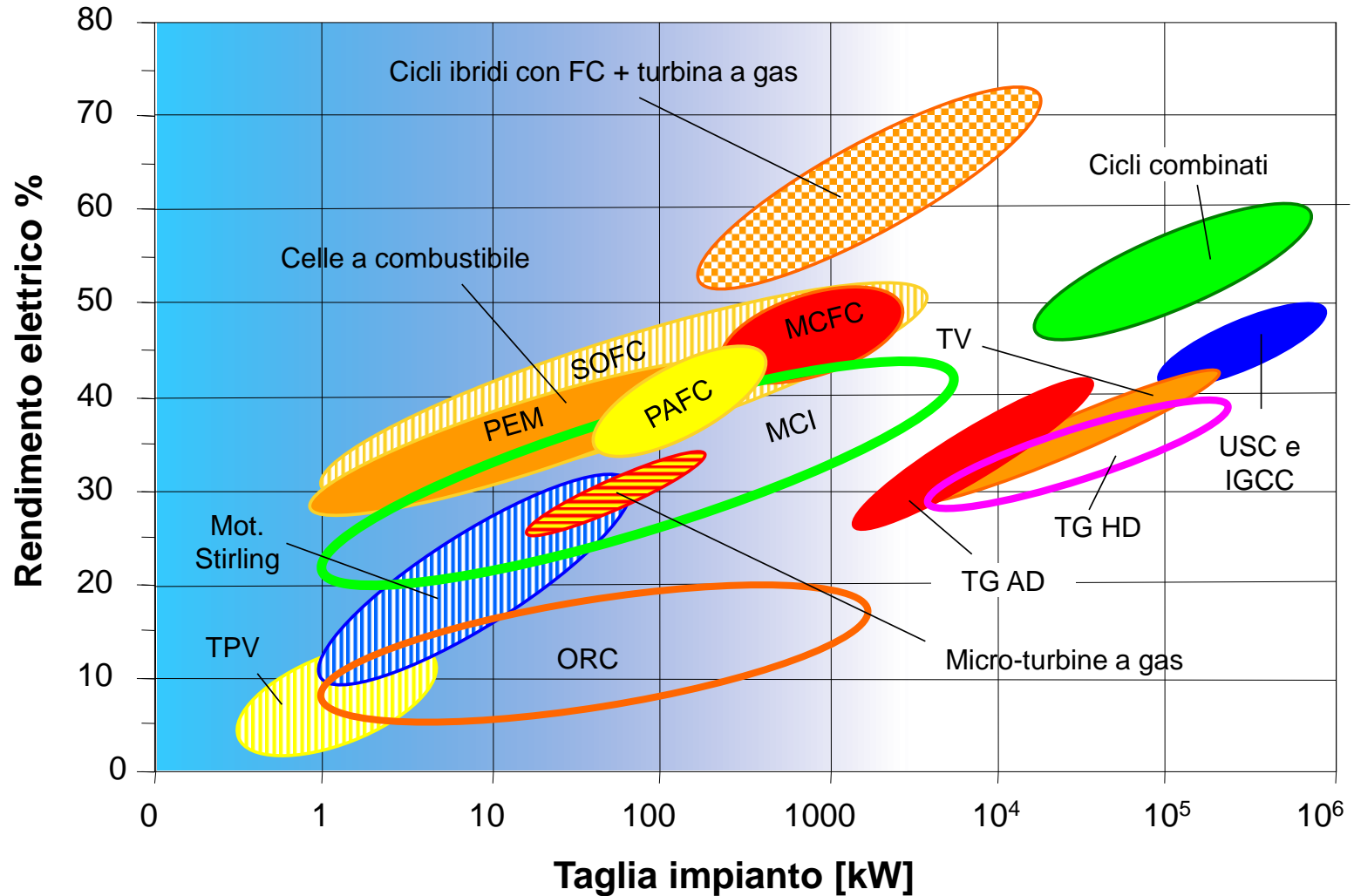
SISTEMI ENERGETICI COGENERATIVI

**Tecnologie consolidate, in fase di
consolidamento e prototipali**

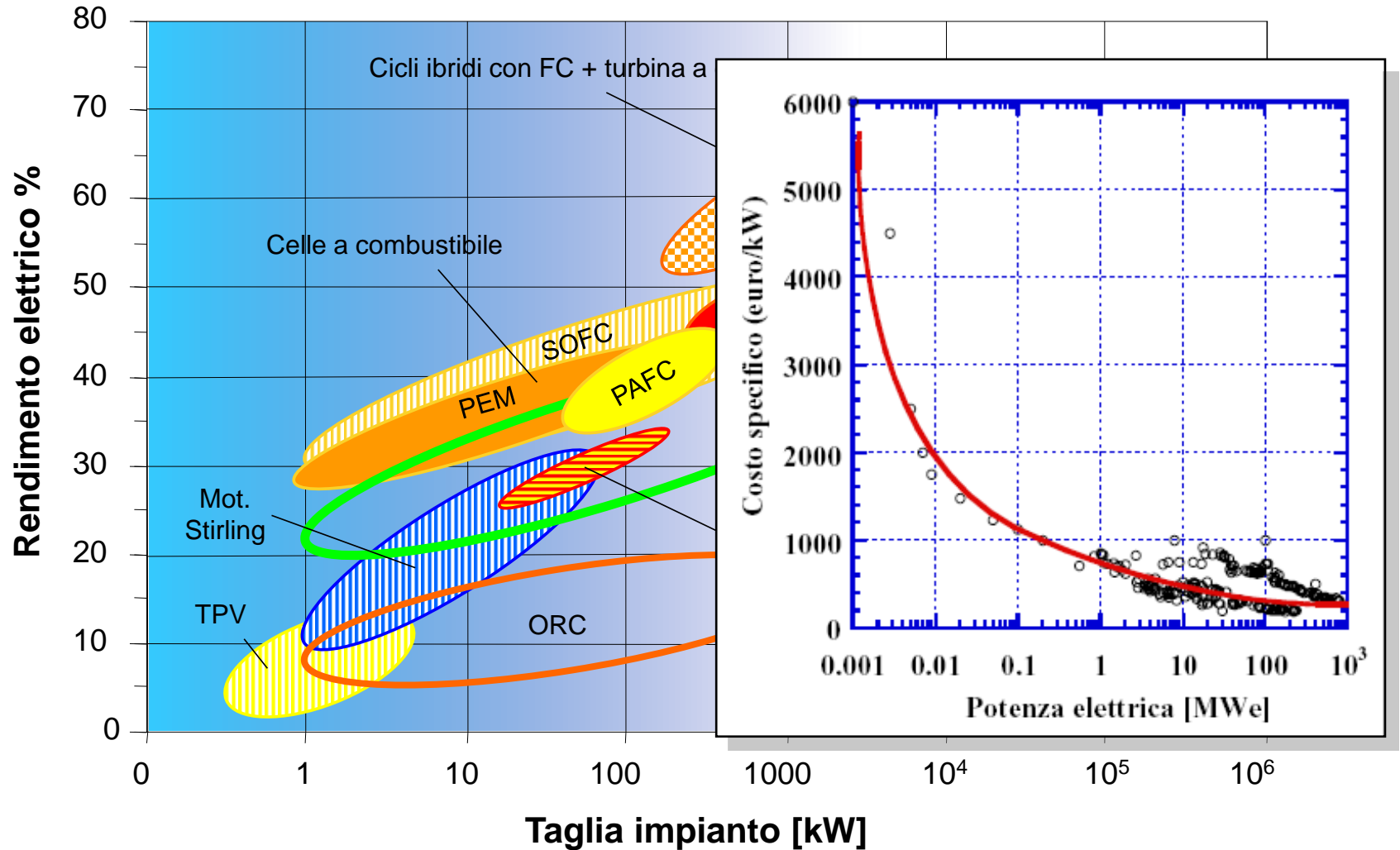
Prof. Pier Ruggero Spina

Dipartimento di Ingegneria - Università di Ferrara

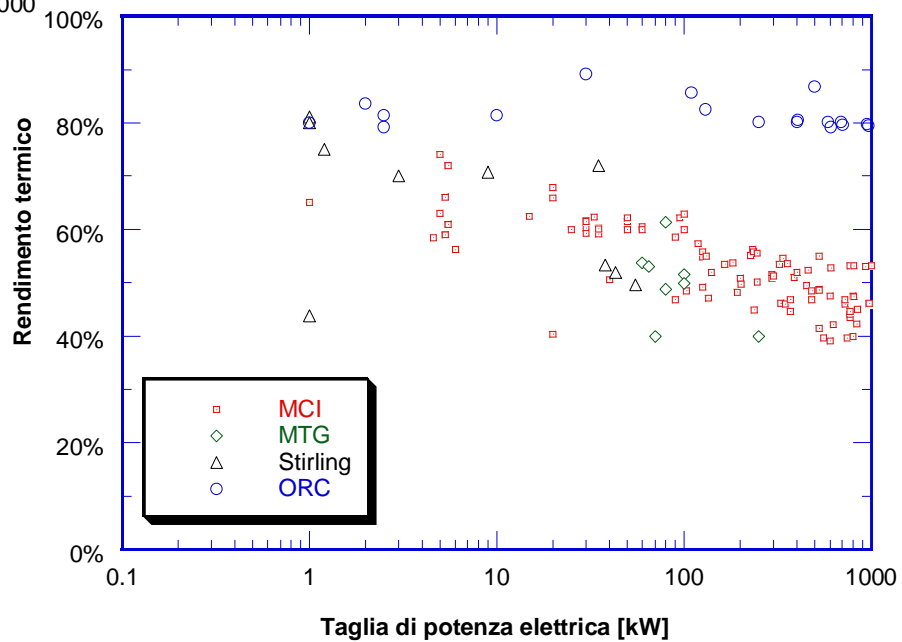
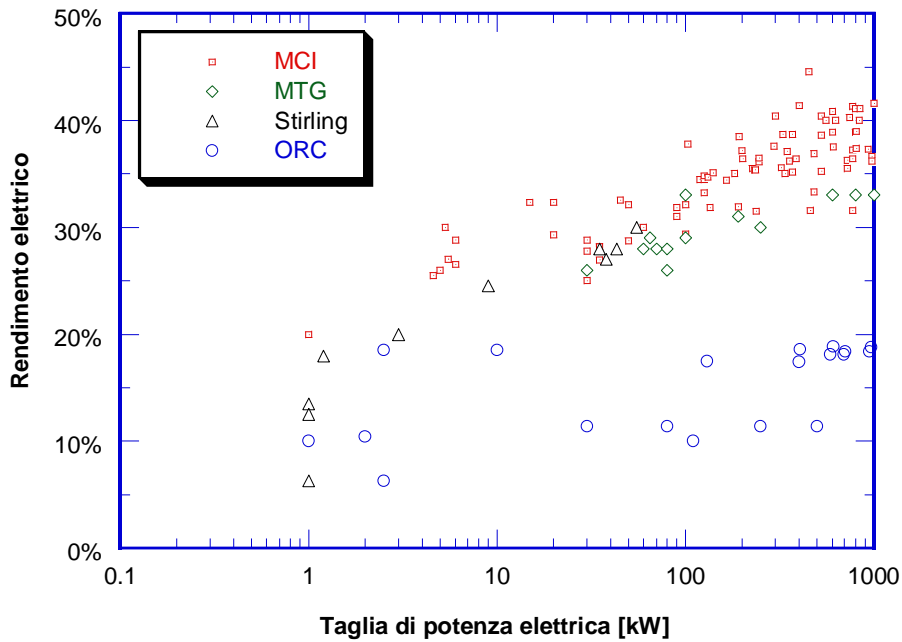
Le tecnologie di generazione elettrica



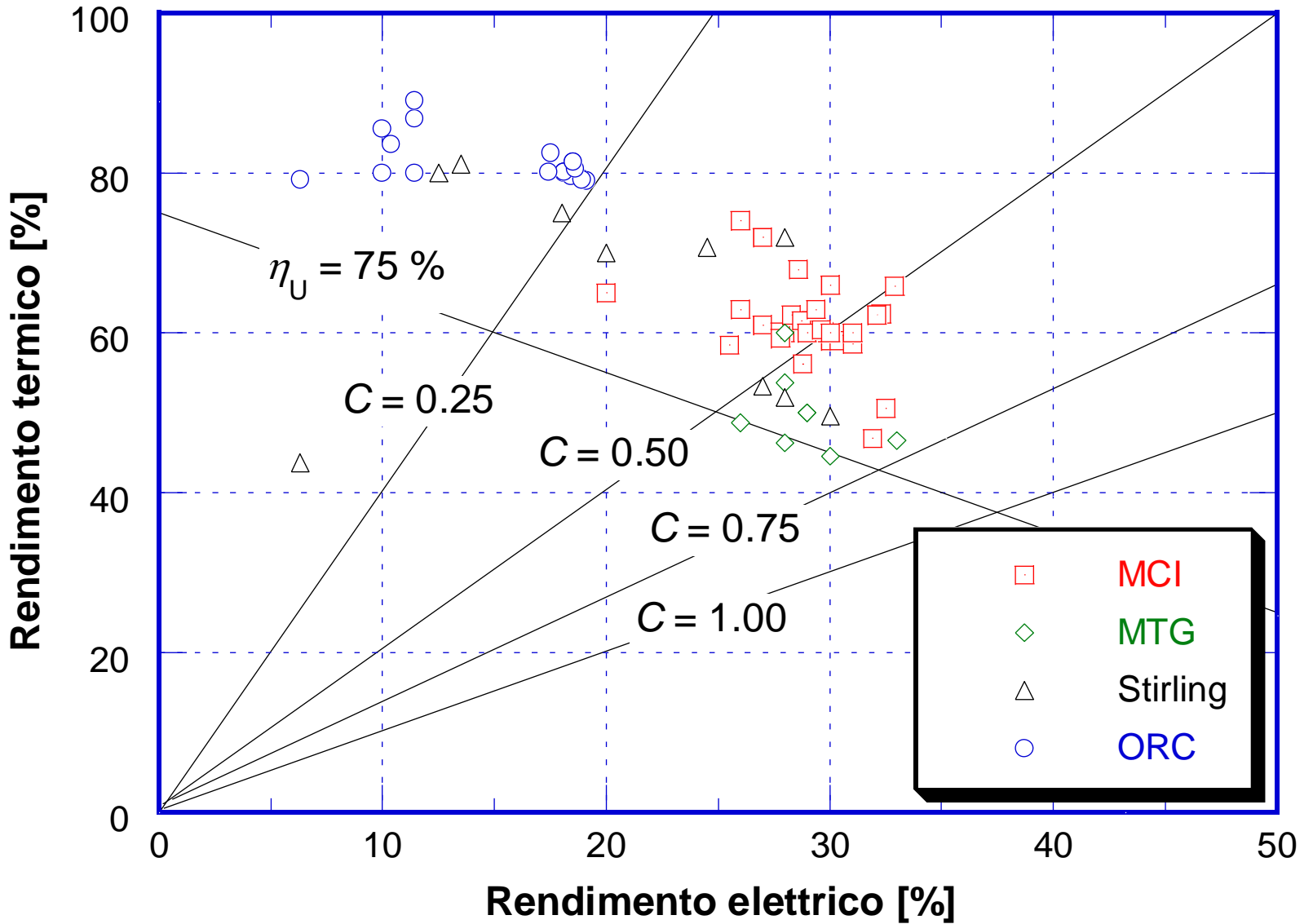
Le tecnologie di generazione elettrica



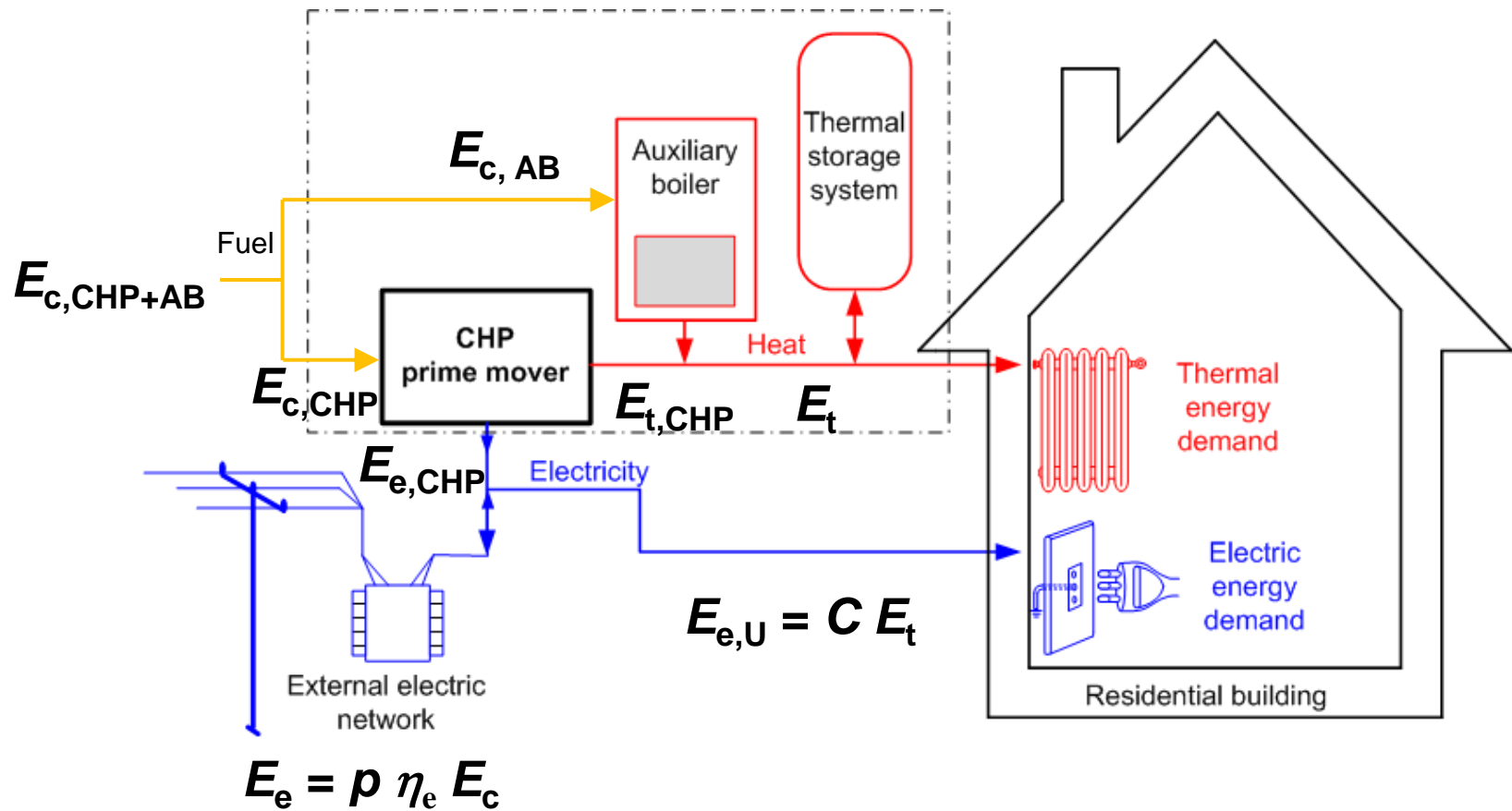
Confronto tra le tecnologie di piccola cogenerazione



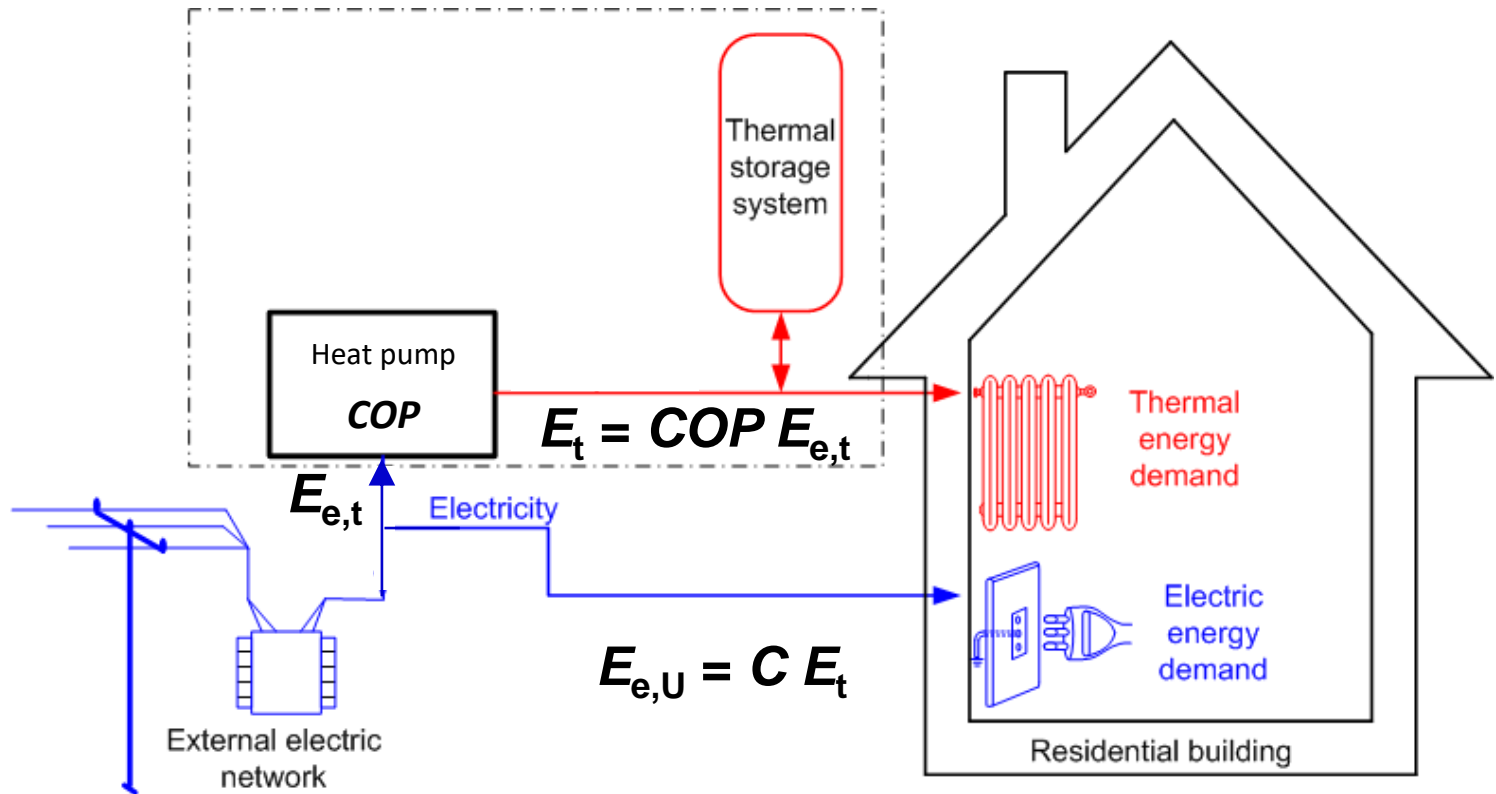
Potenzialità delle tecnologie di cogenerazione fino a 100 kW_e



Cogenerazione per il soddisfacimento del fabbisogno energetico per la climatizzazione



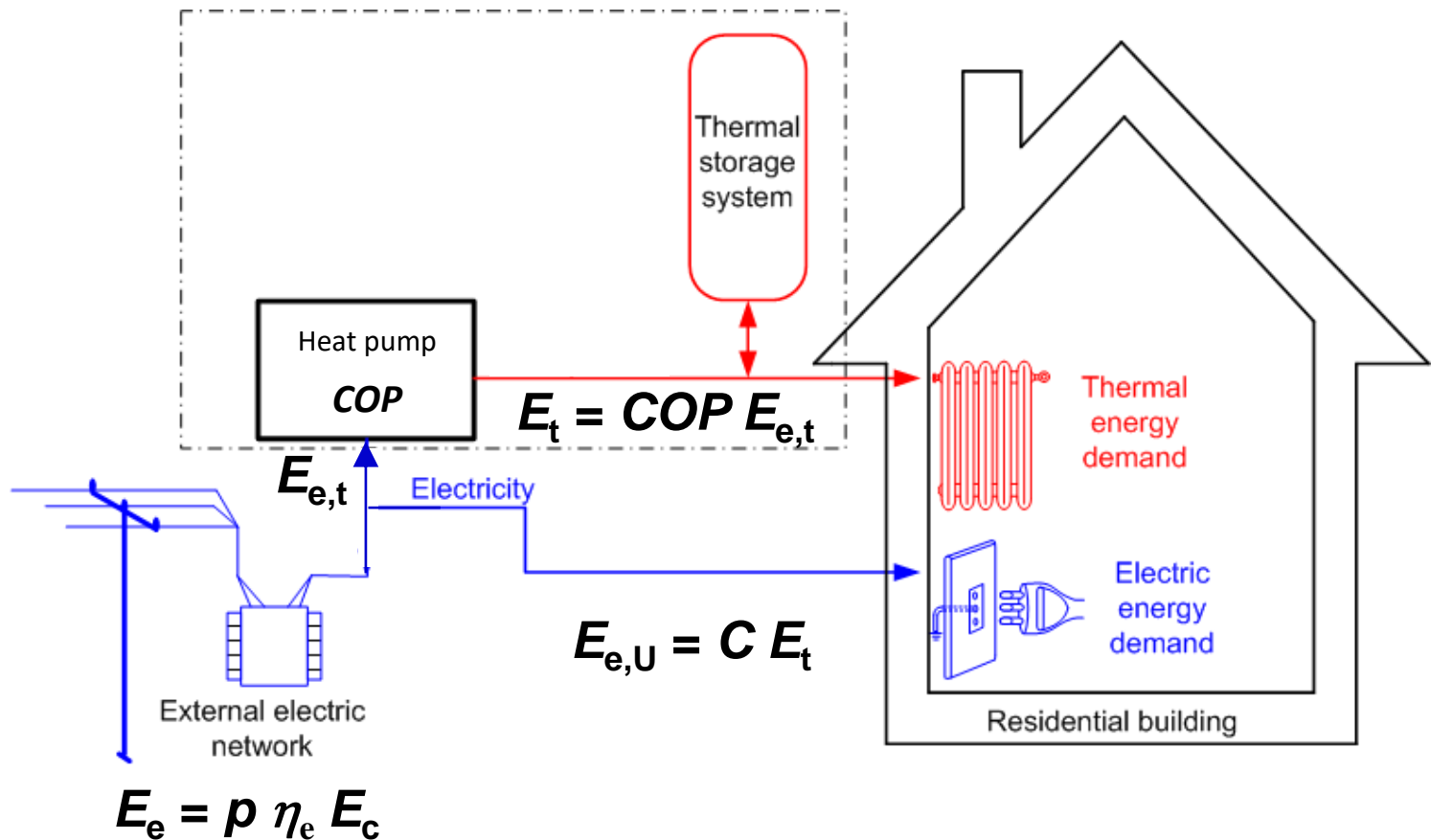
Rendimento totale equivalente η_U con pompa di calore



$$E_e = p \eta_e E_c$$

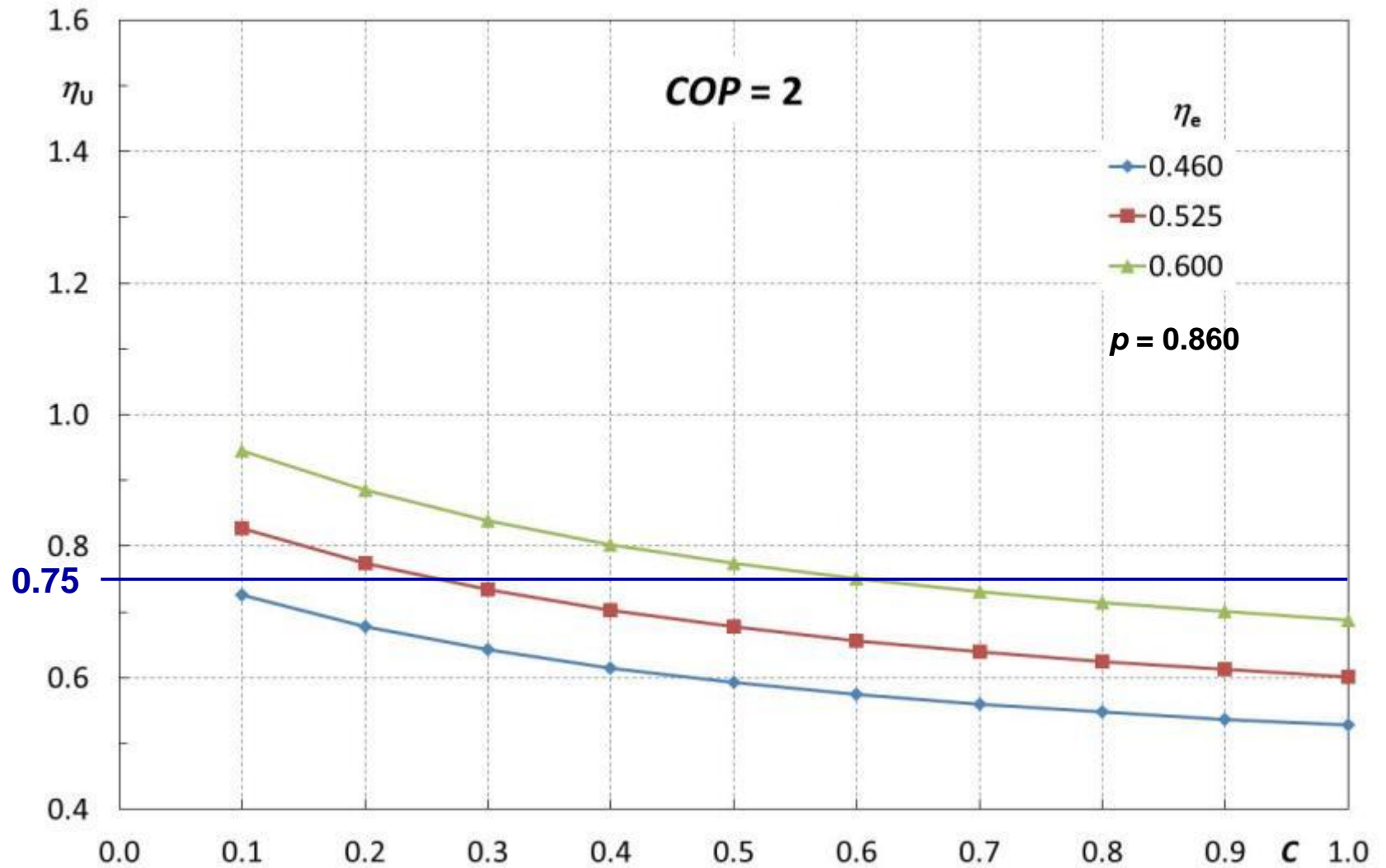
$$\eta_U = \frac{E_{e,U} + E_t}{E_c} = \frac{E_t(1+C)}{(E_{e,U} + E_{e,t})/p\eta_e} = p\eta_e \frac{E_t(1+C)}{E_t(C+1/COP)}$$

Rendimento totale equivalente η_U con pompa di calore

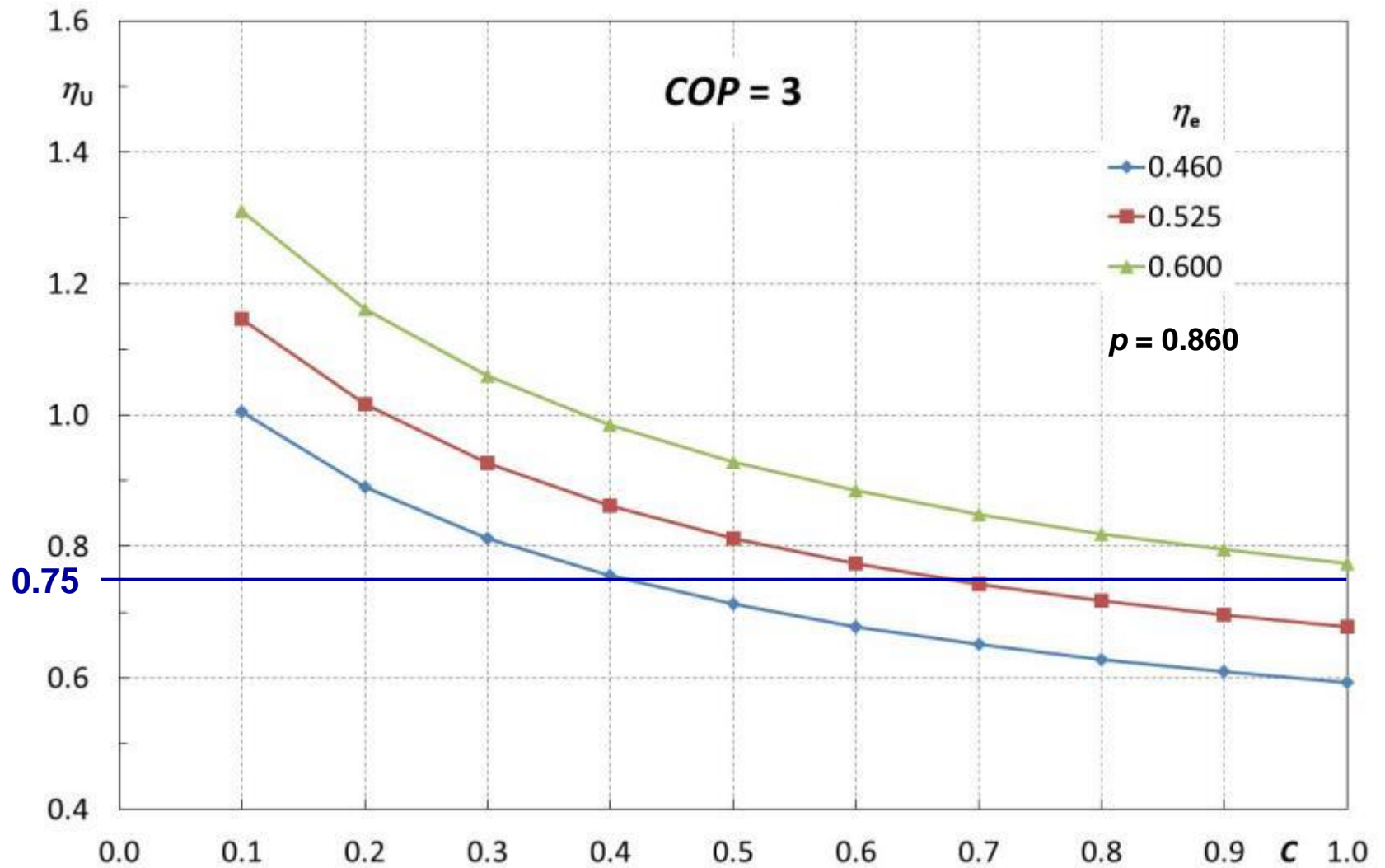


$$\eta_U = \frac{E_{e,U} + E_t}{E_c} = \frac{p \eta_e}{1 + COP \cdot C} COP \cdot (1 + C)$$

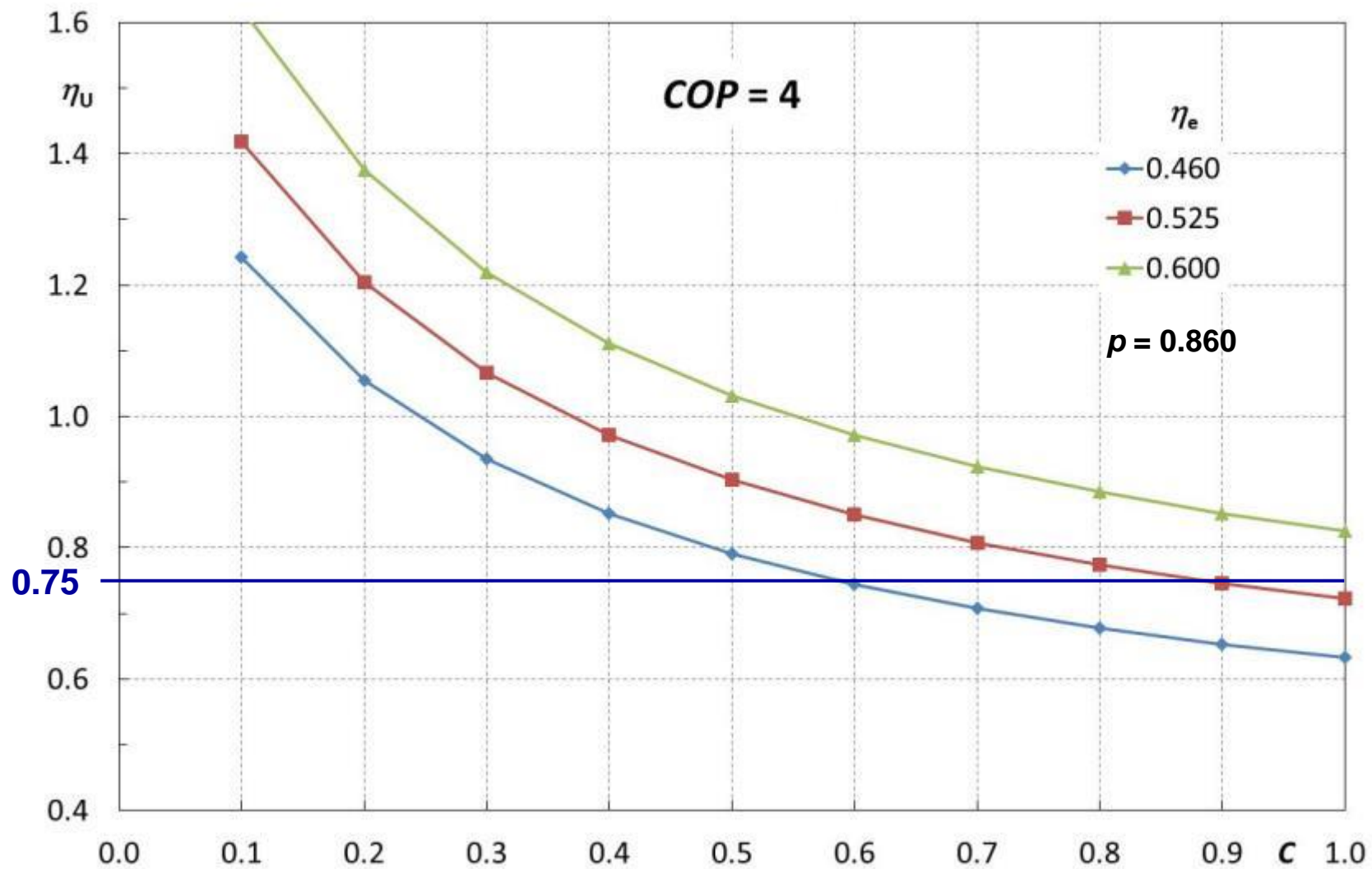
Rendimento totale equivalente η_U con pompa di calore



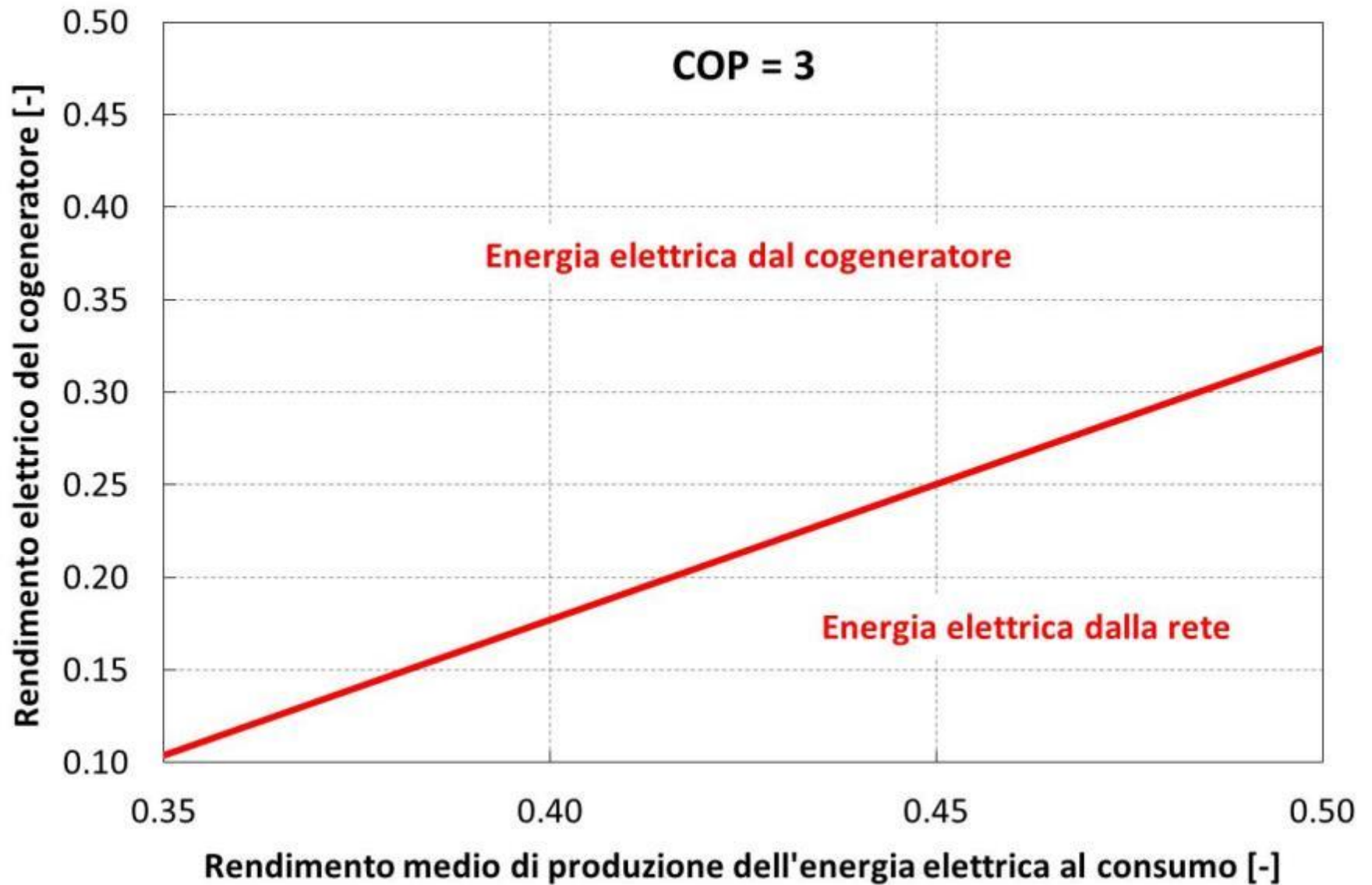
Rendimento totale equivalente η_U con pompa di calore



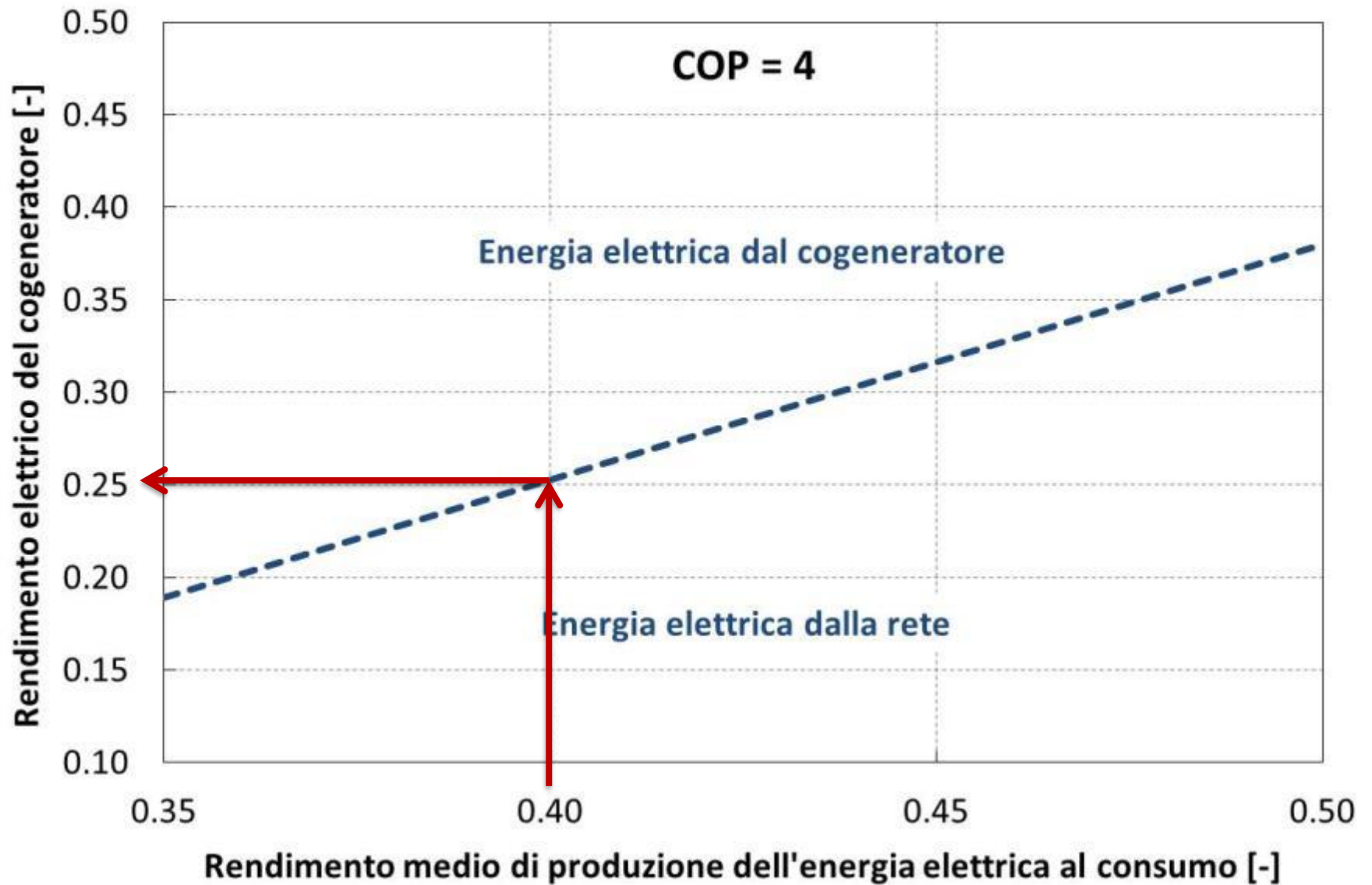
Rendimento totale equivalente η_U con pompa di calore



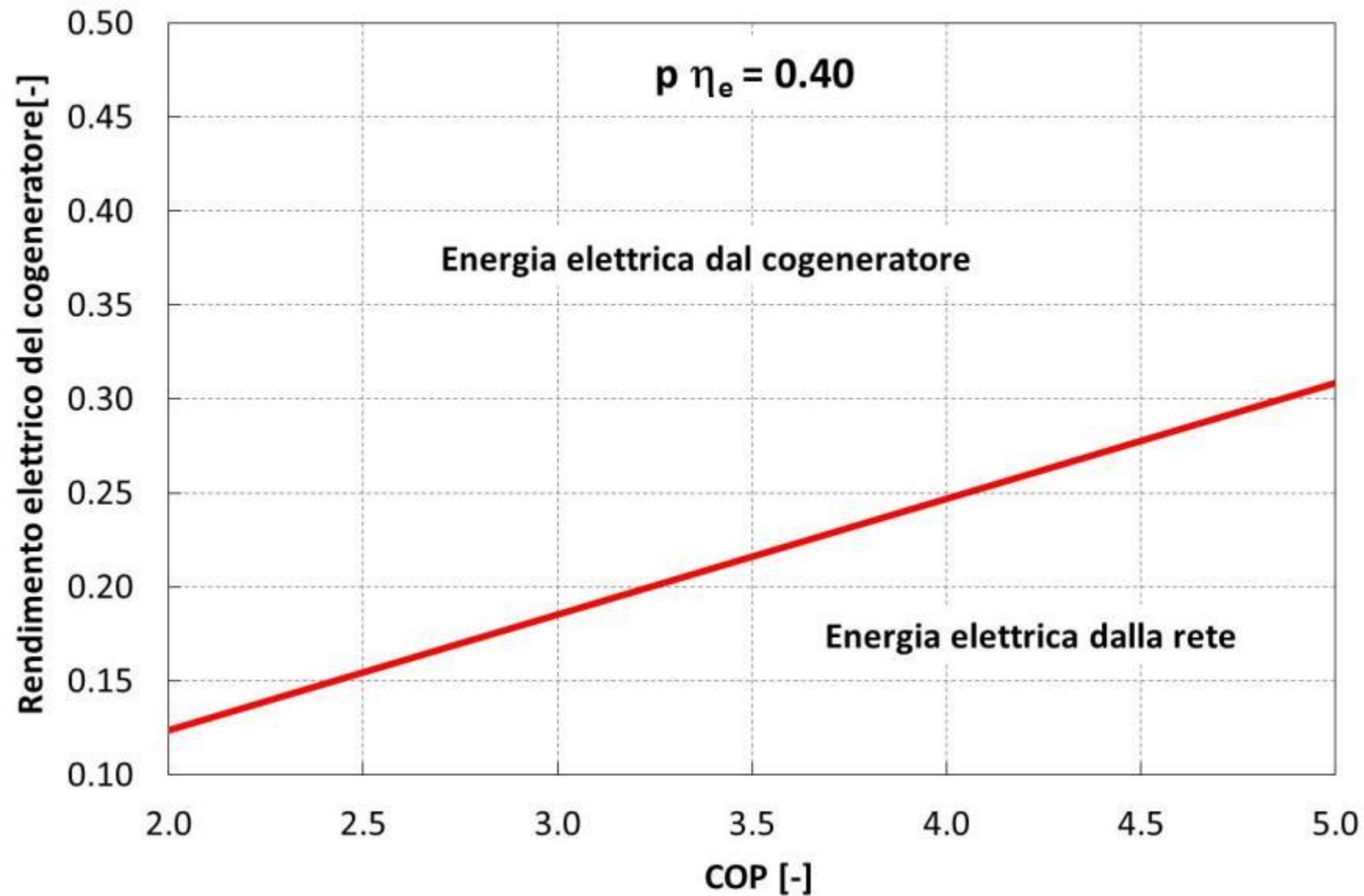
Cogeneratore Vs. pompa di calore



Cogeneratore Vs. pompa di calore

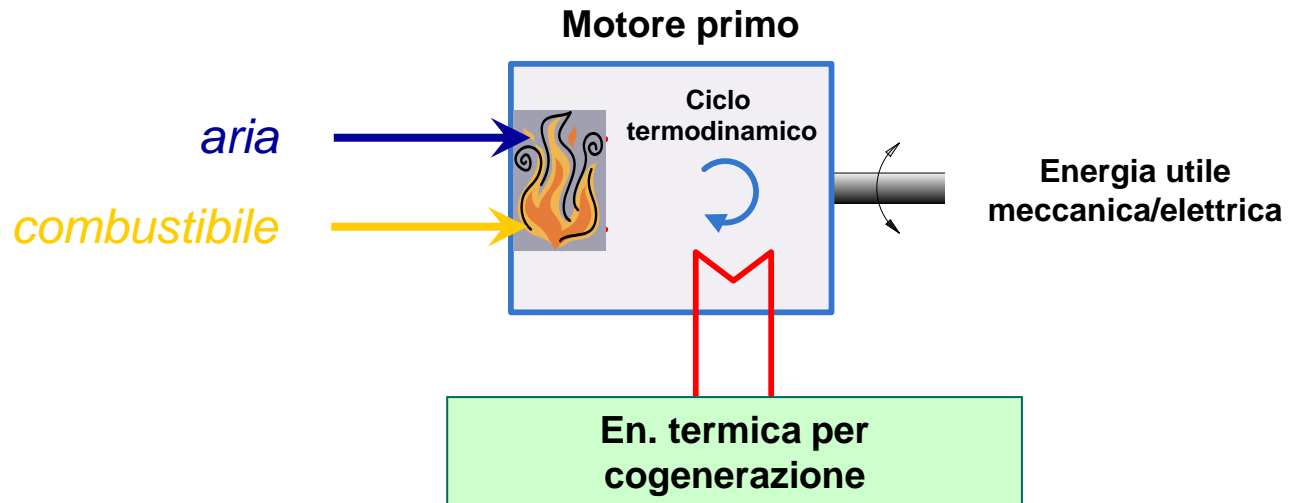


Cogeneratore Vs. pompa di calore



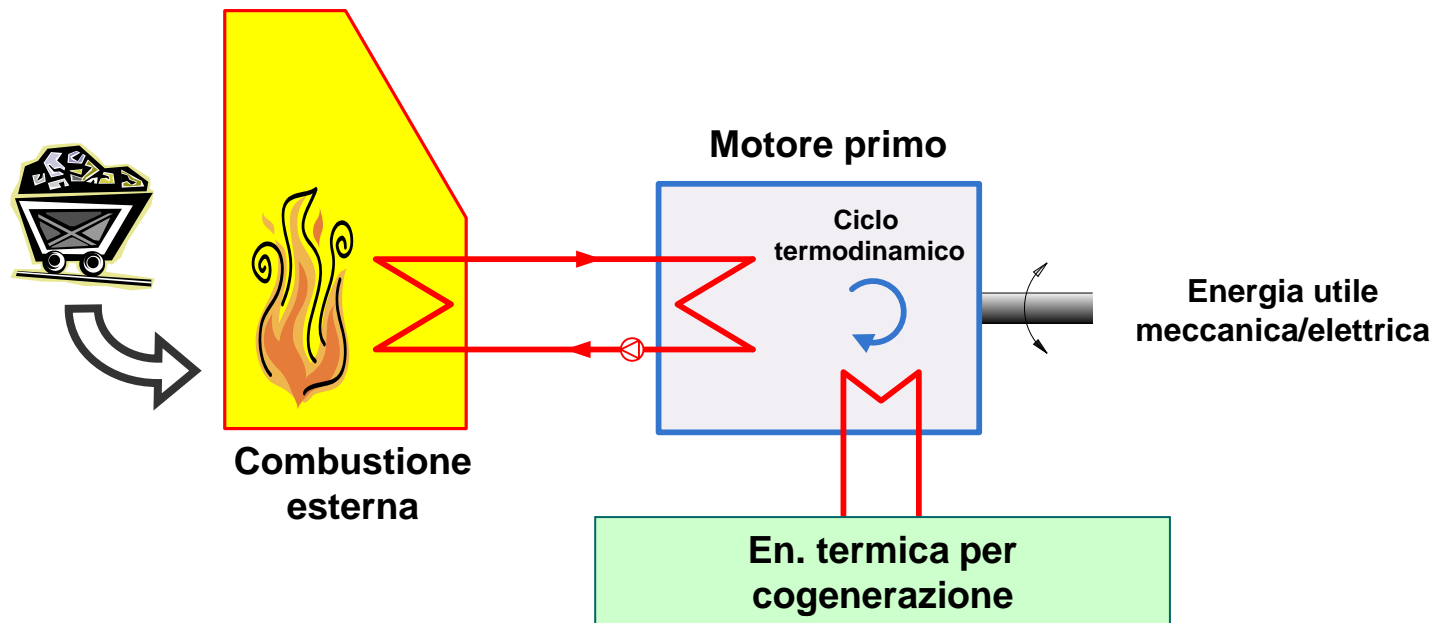
La combustione interna

- ✓ 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



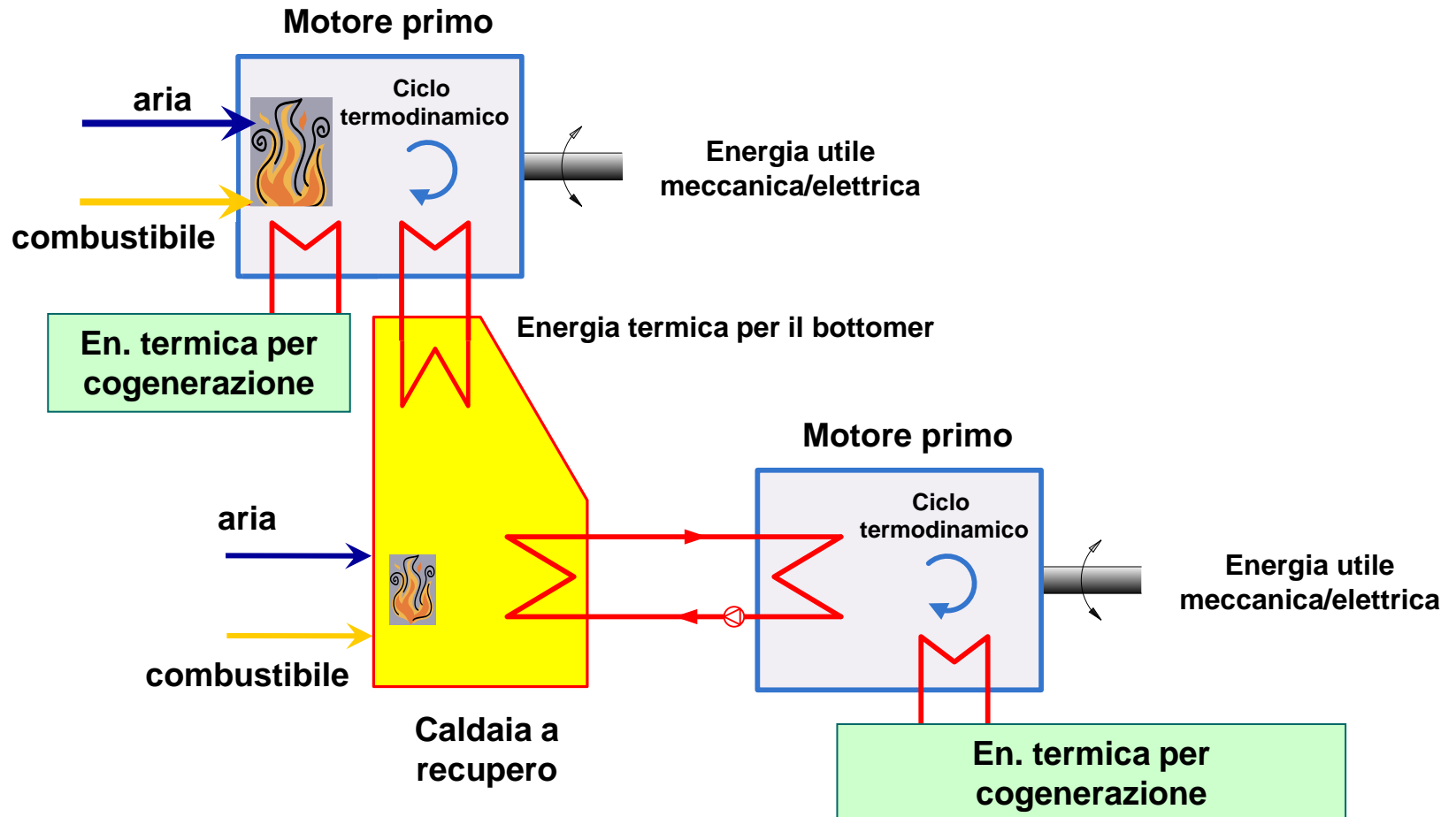
La combustione esterna

- ✓ 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

- ✓ Motori alternativi a combustione interna (MCI)
- ✓ Turbine a Gas (TG) e Micro Turbine a Gas (MTG)
- ✓ Celle a combustibile - Fuel Cell (FC)

Consolidate

In fase di consolidamento

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

- ✓ Sistemi termofotovoltaici (TPV)

Tecnologie CHP a combustione esterna

Prototipali

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

Tecnologie CHP a combustione interna/esterna

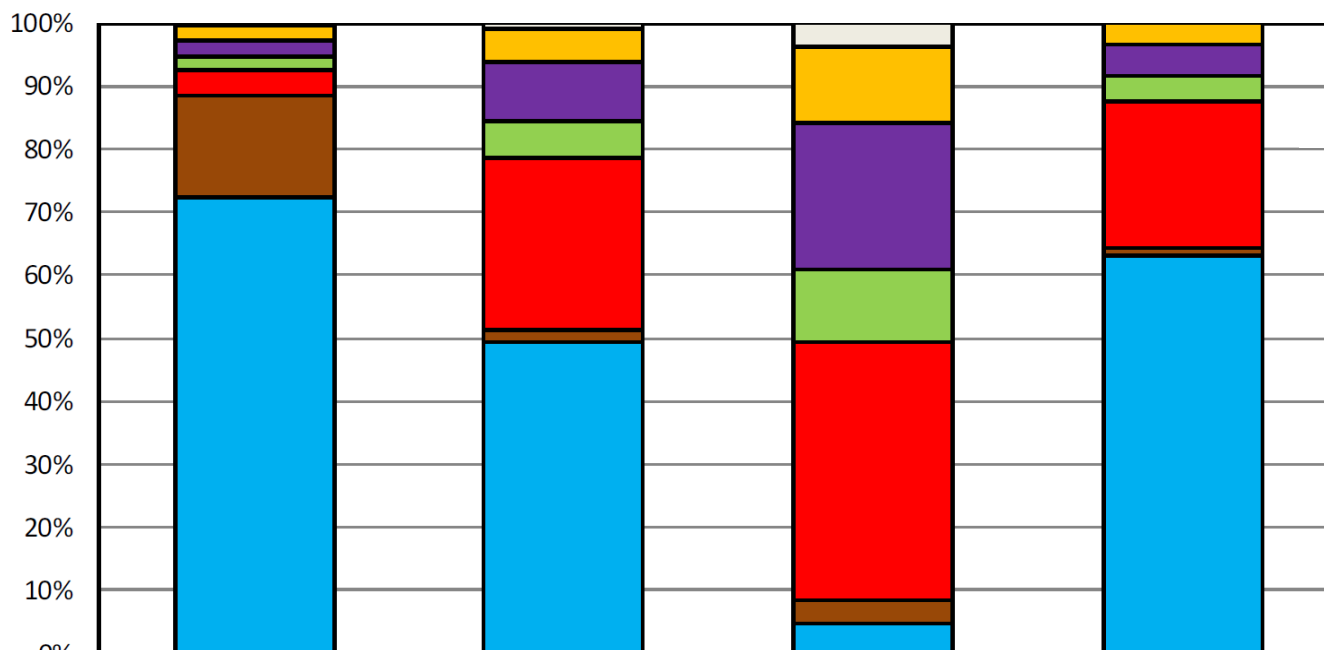
- ✓ Ciclo combinato gas-vapore
- ✓ Ciclo combinato MCI-ORC
- ✓ Ciclo combinato MTG-ORC

Consolidate

In fase di
consolidamento

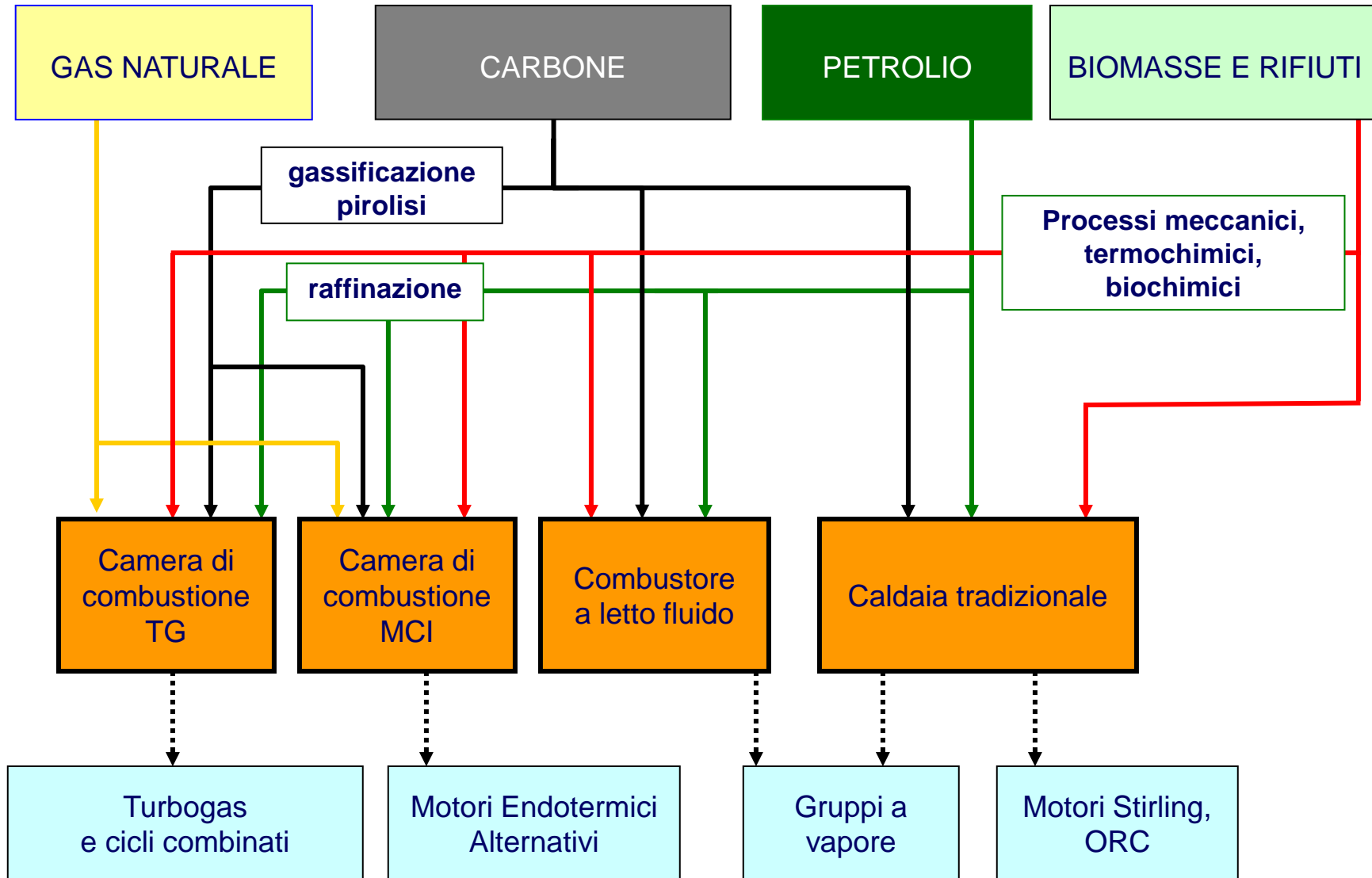
Produzione termoelettrica lorda dalle diverse fonti (Anno 2019 - Delibera ARERA 356/2021/I/EEL)

Totale: 195,73 TWh Totale: 29,70 TWh Totale: 6,97 TWh Totale: 22,73 TWh

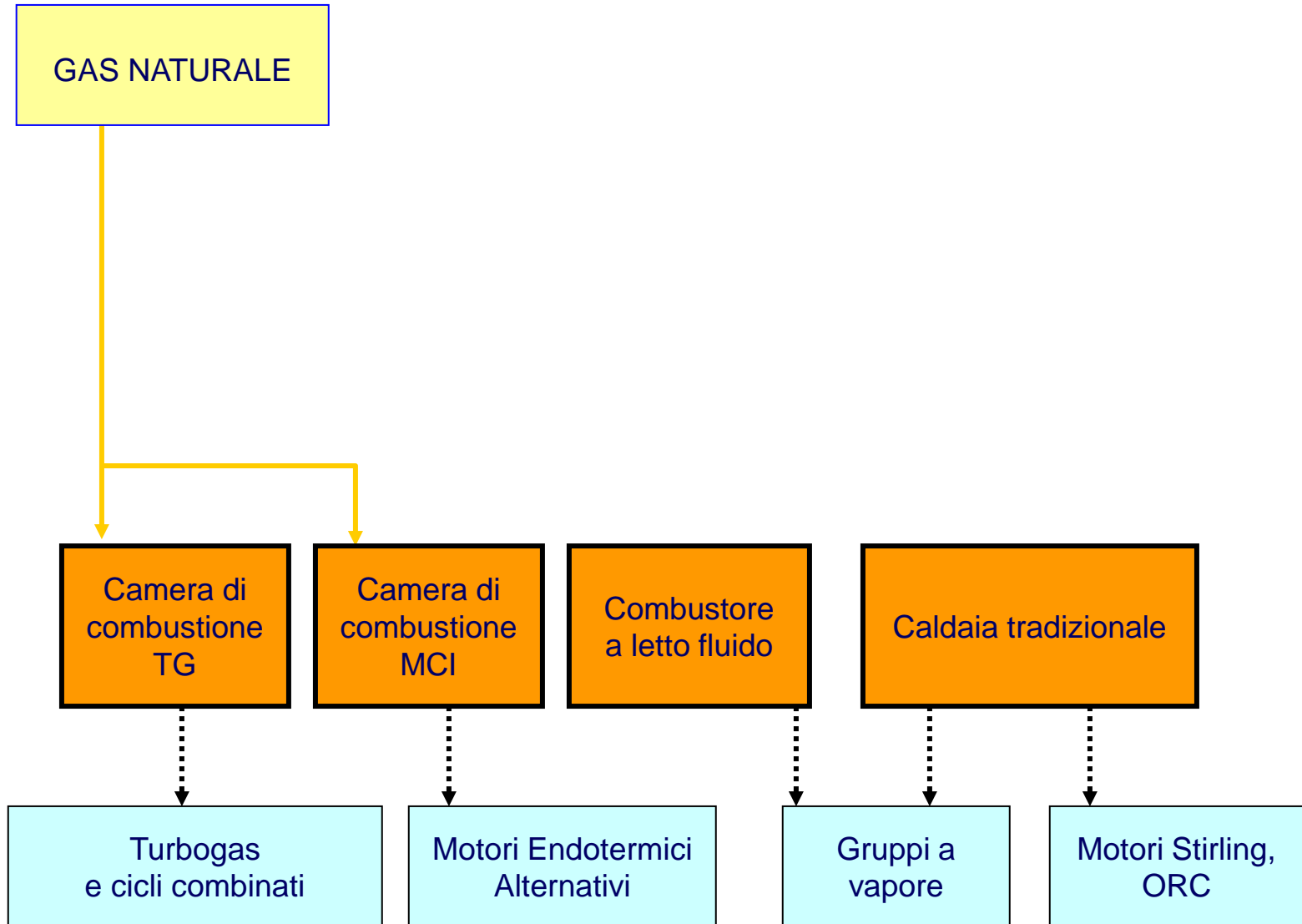


	ITALIA	GD termoelettrica	GD termoelettrica solo produzione di energia elettrica	GD termoelettrica produzione combinata di energia elettrica e calore
■ Altre fonti di energia	0,3%	0,9%	3,8%	0,0%
■ Rifiuti solidi urbani	2,5%	5,4%	11,9%	3,4%
■ Bioliquidi	2,4%	9,3%	23,5%	4,9%
■ Biomasse	2,1%	5,8%	11,5%	4,0%
■ Biogas	4,2%	27,4%	40,9%	23,3%
■ Altri combustibili fossili	16,1%	1,8%	3,7%	1,3%
■ Gas naturale	72,4%	49,4%	4,7%	63,1%

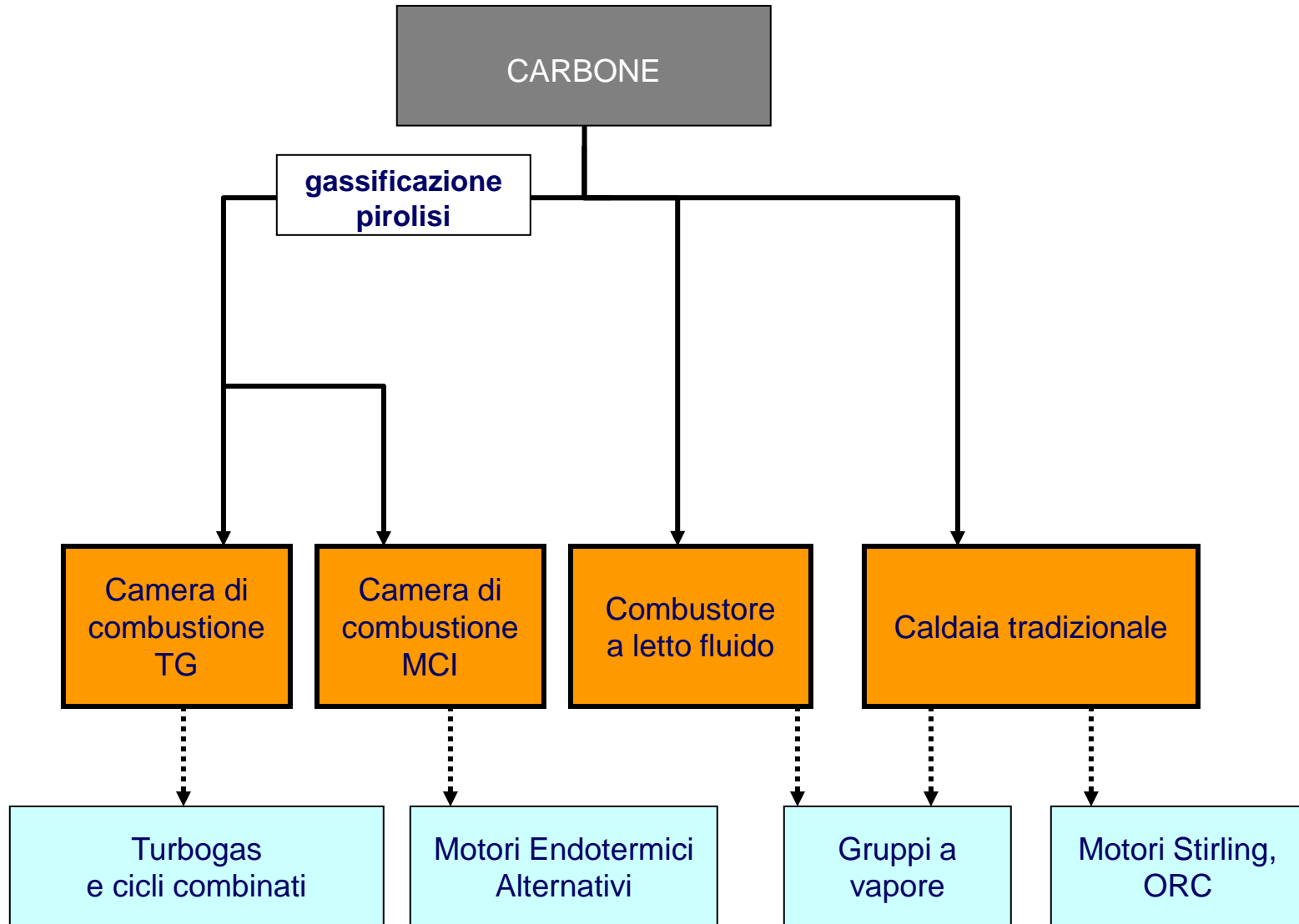
Conversione mediante combustione



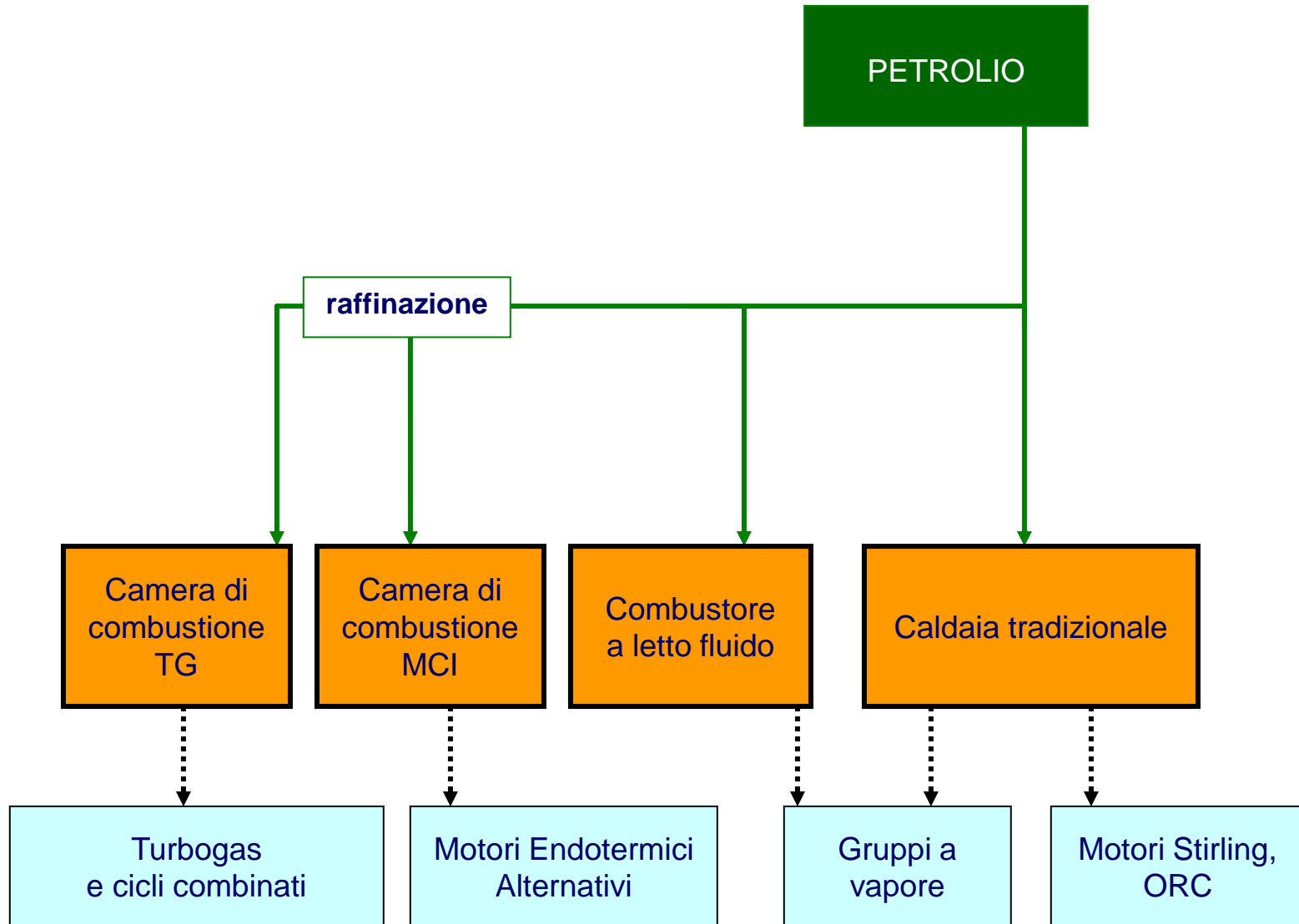
Conversione mediante combustione



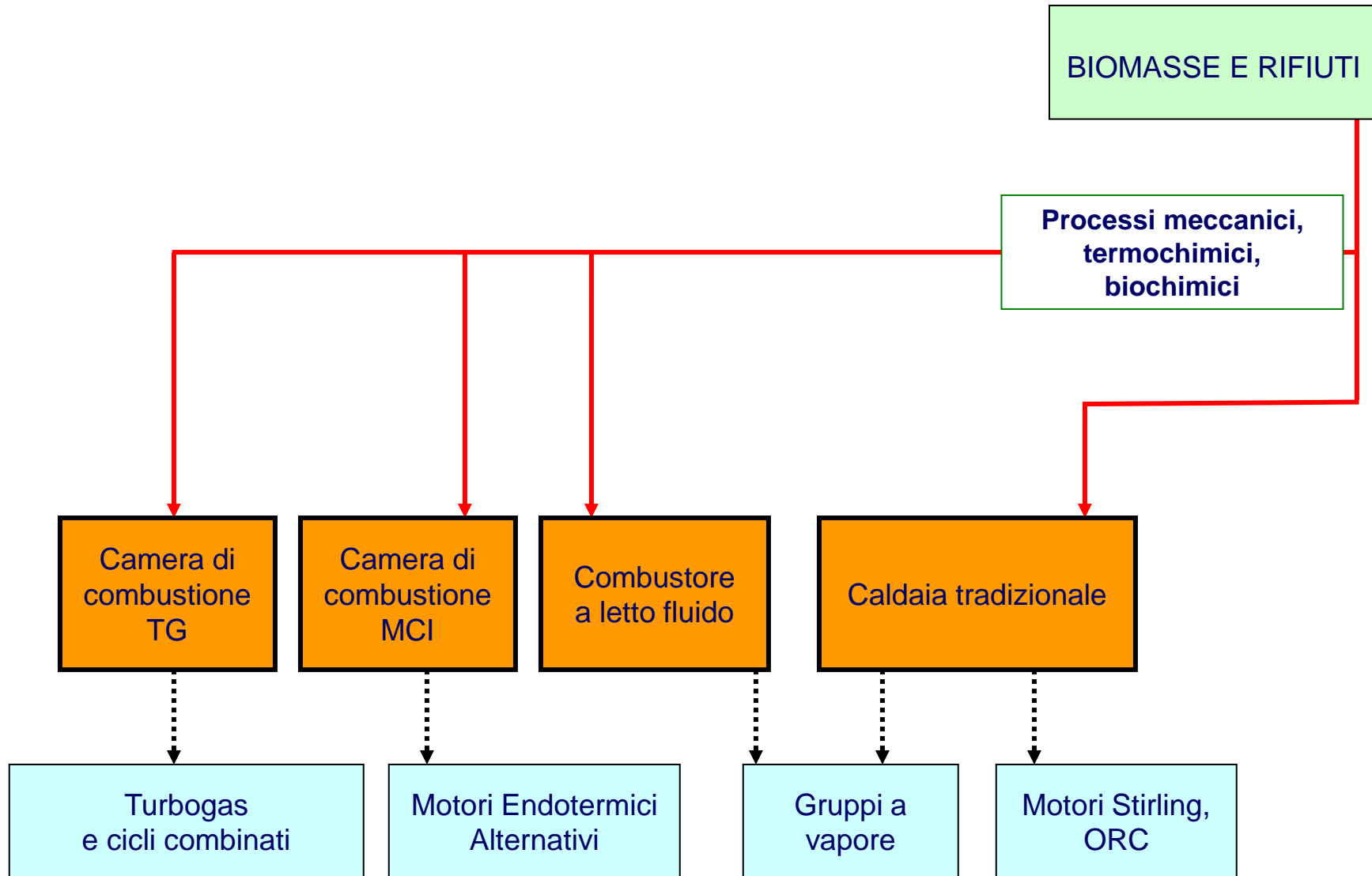
Conversione mediante combustione



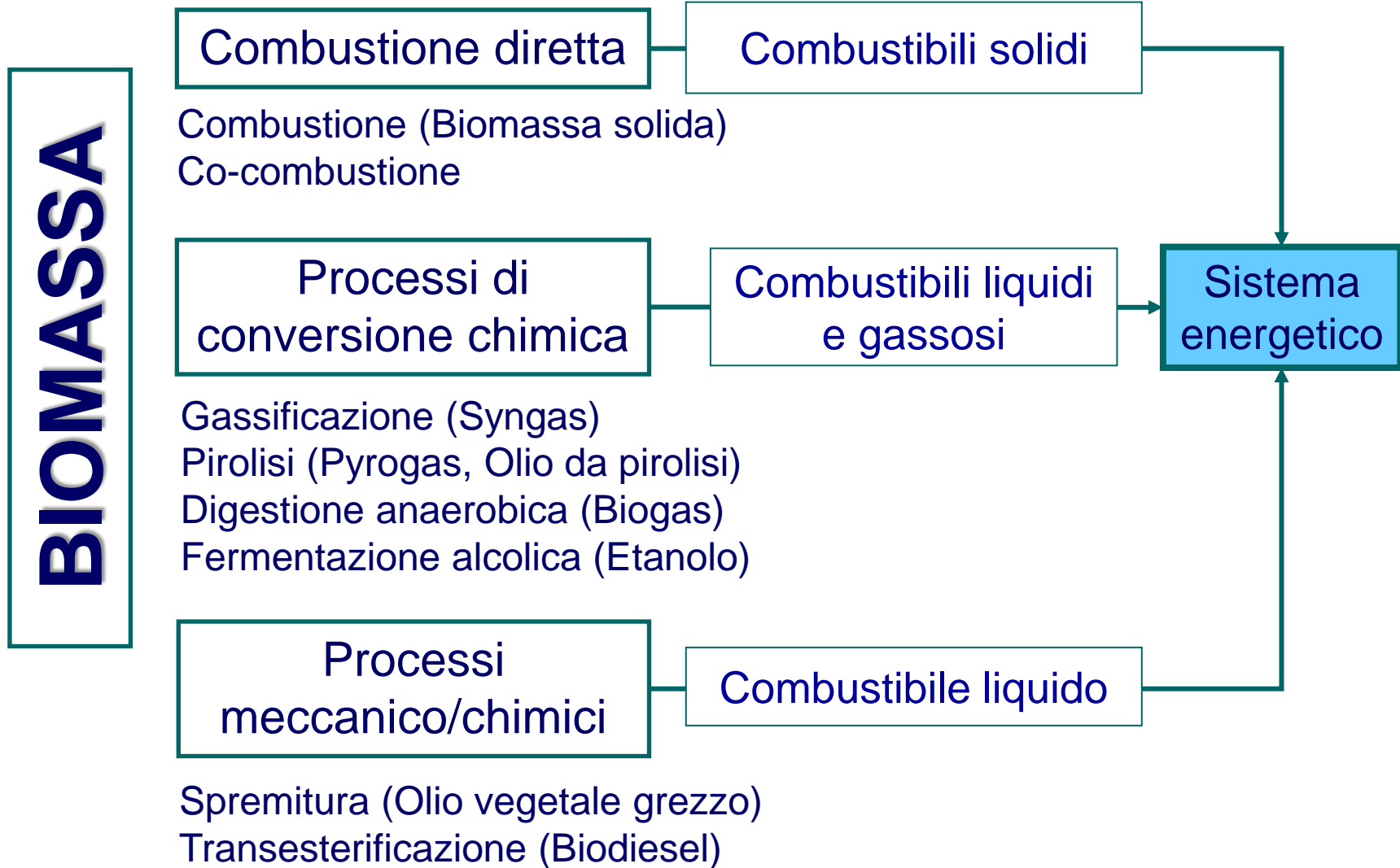
Conversione mediante combustione



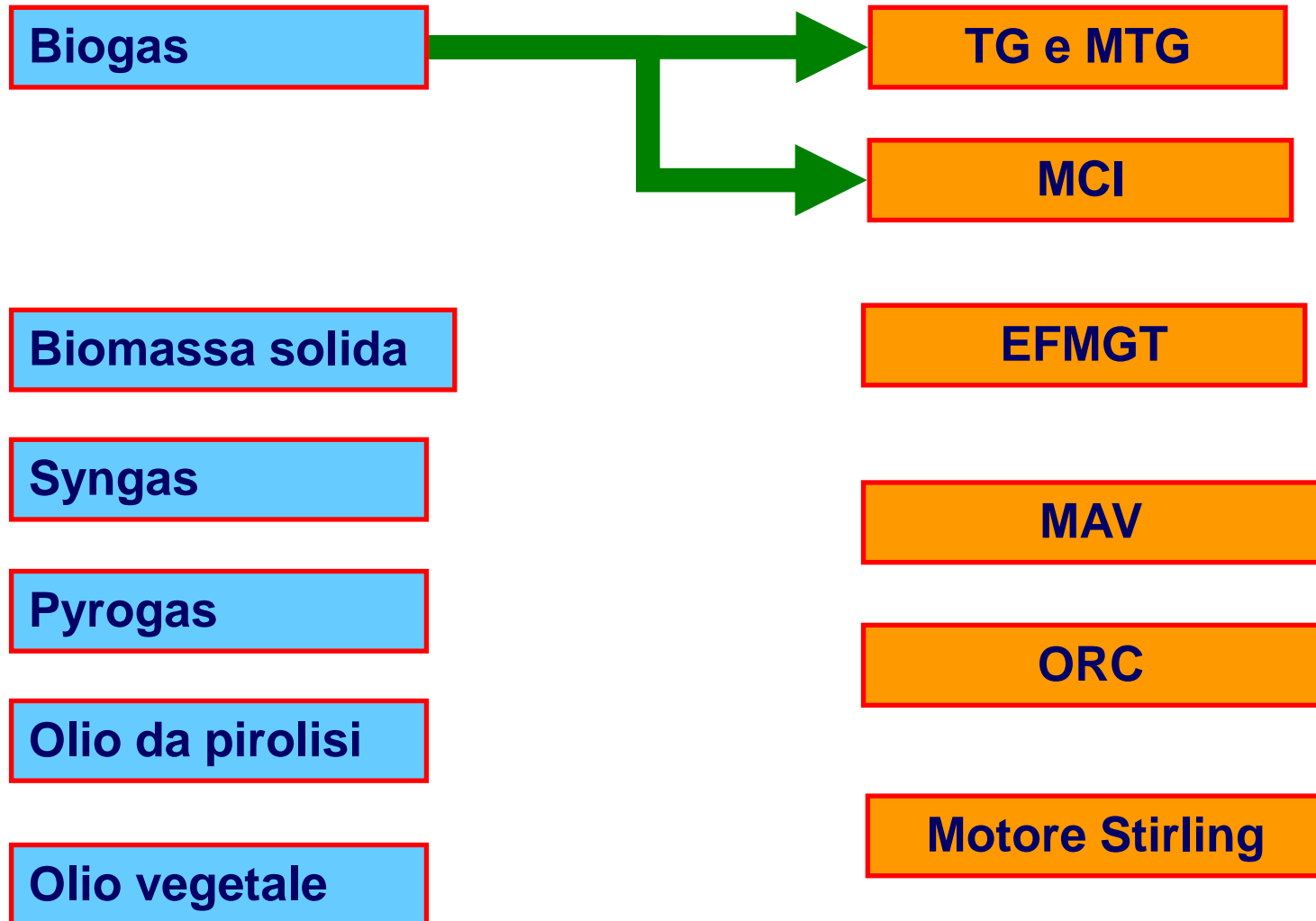
Conversione mediante combustione



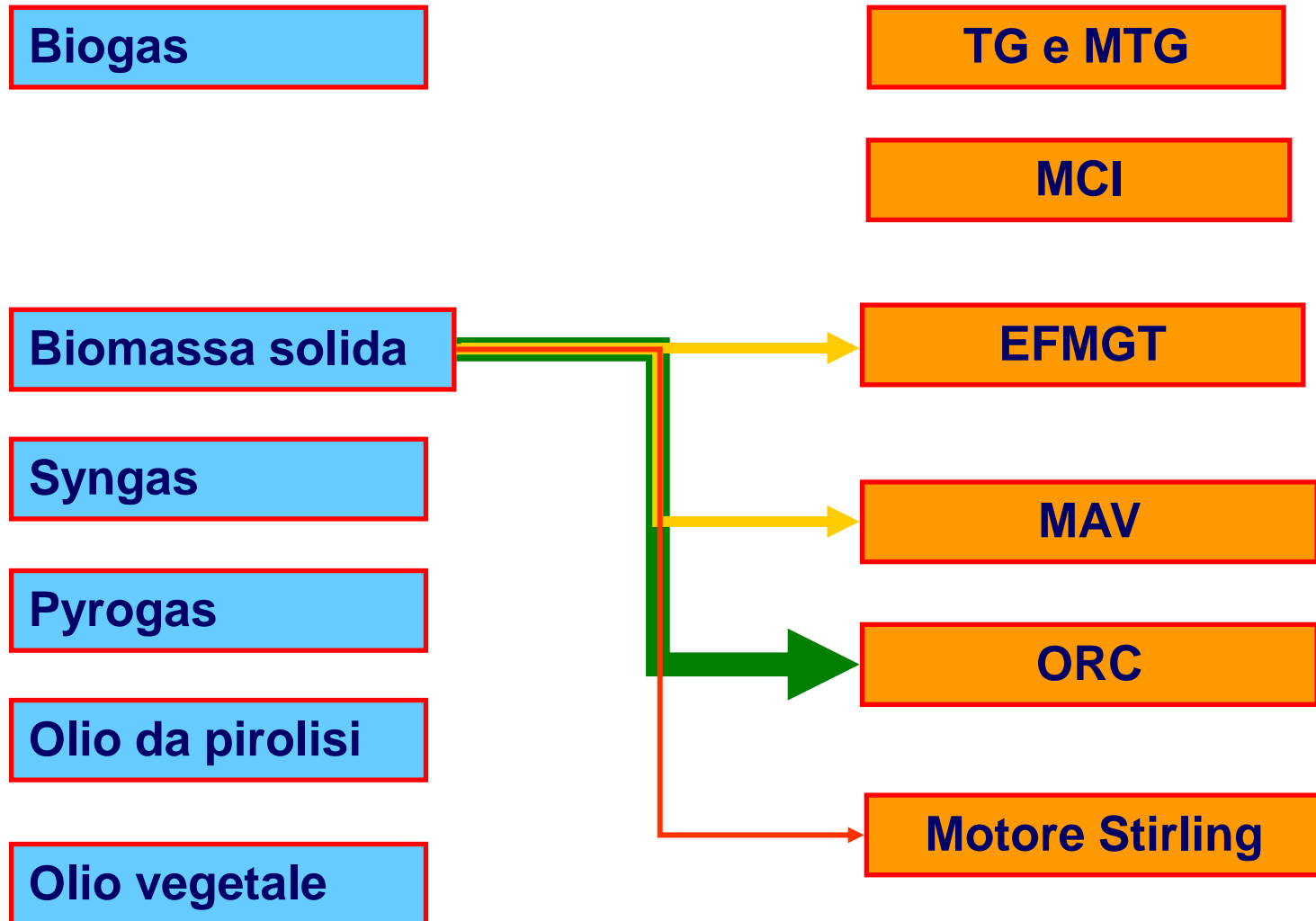
I biocombustibili



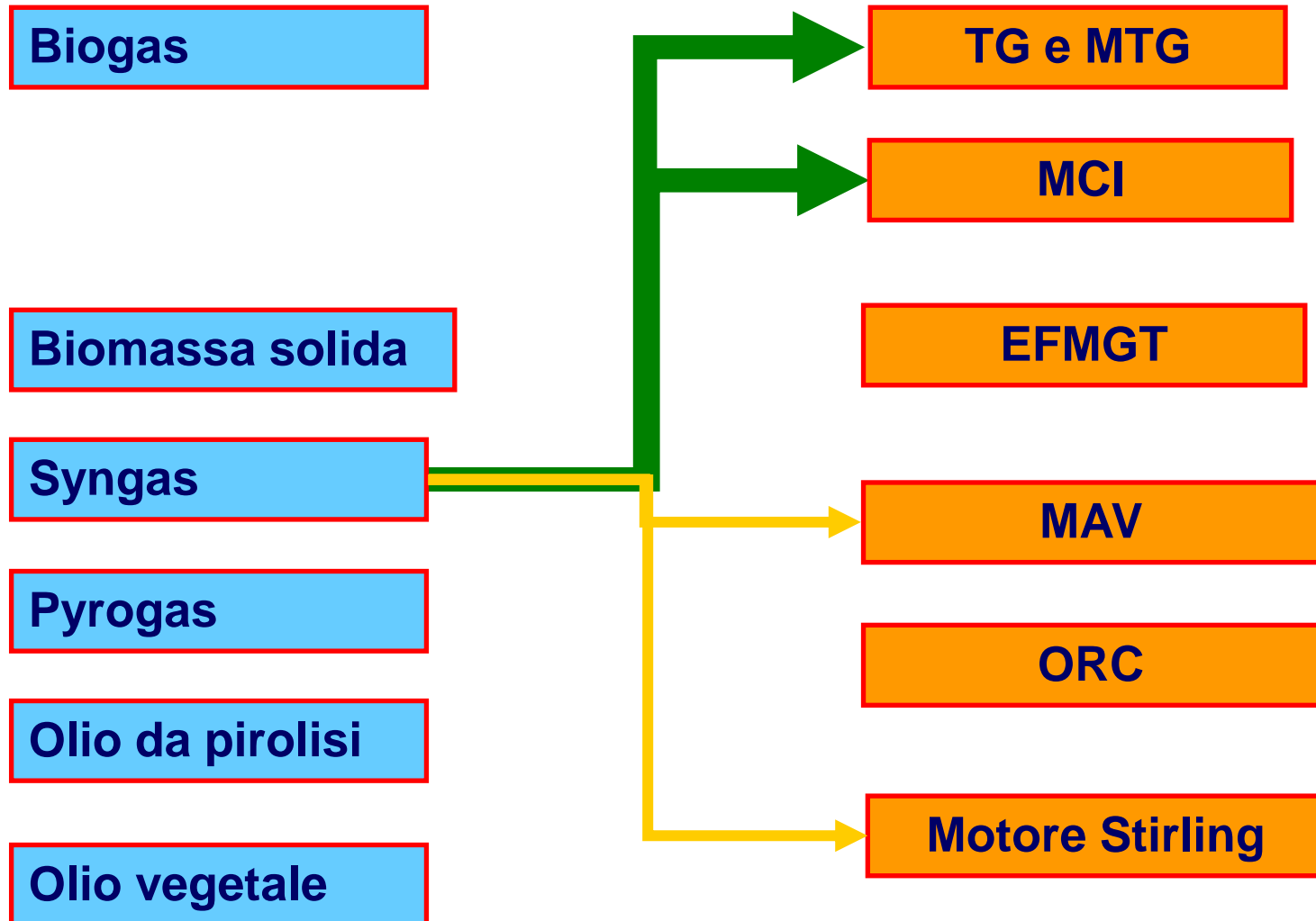
Biocombustibile/Sistema energetico



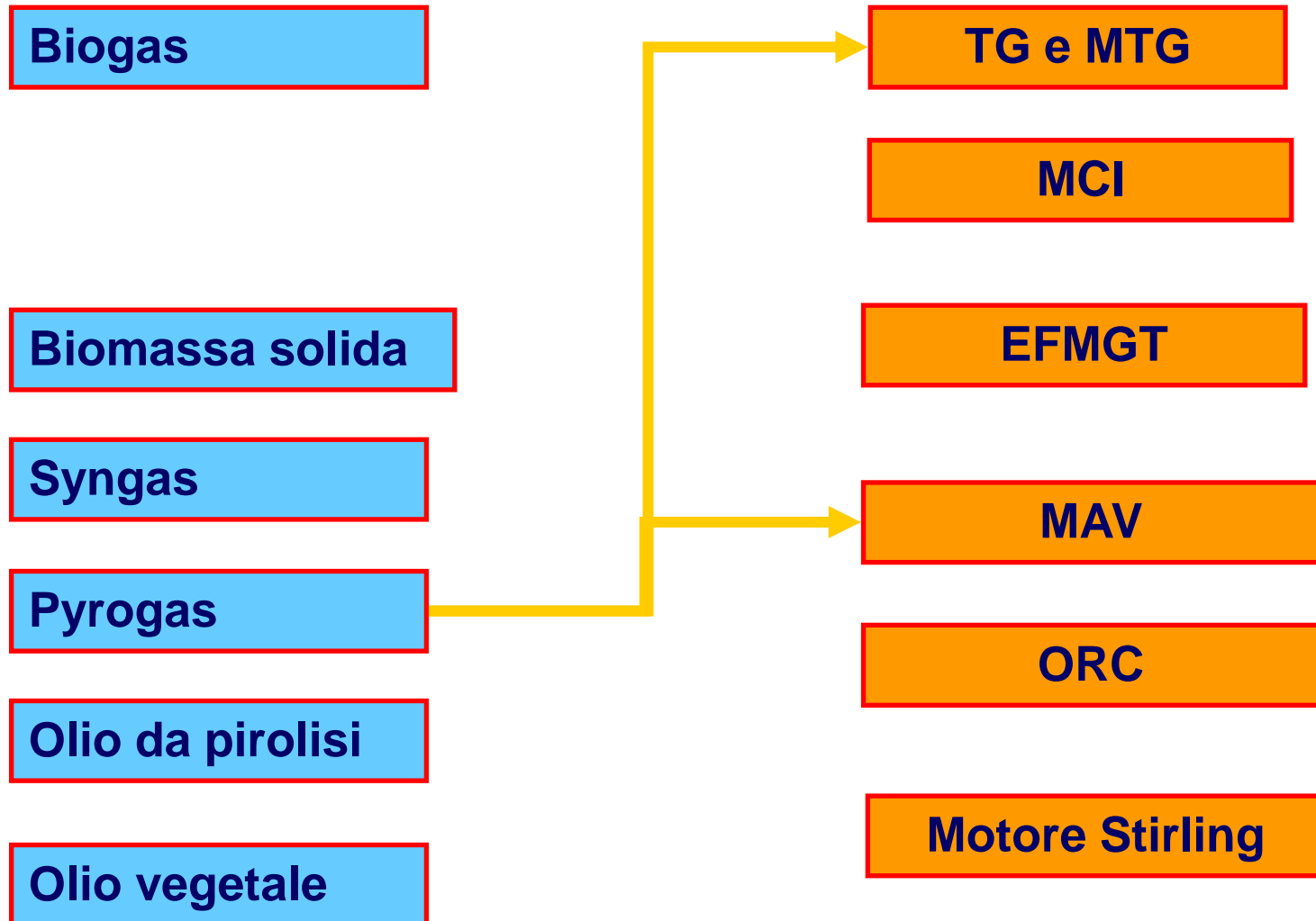
Biocombustibile/Sistema energetico



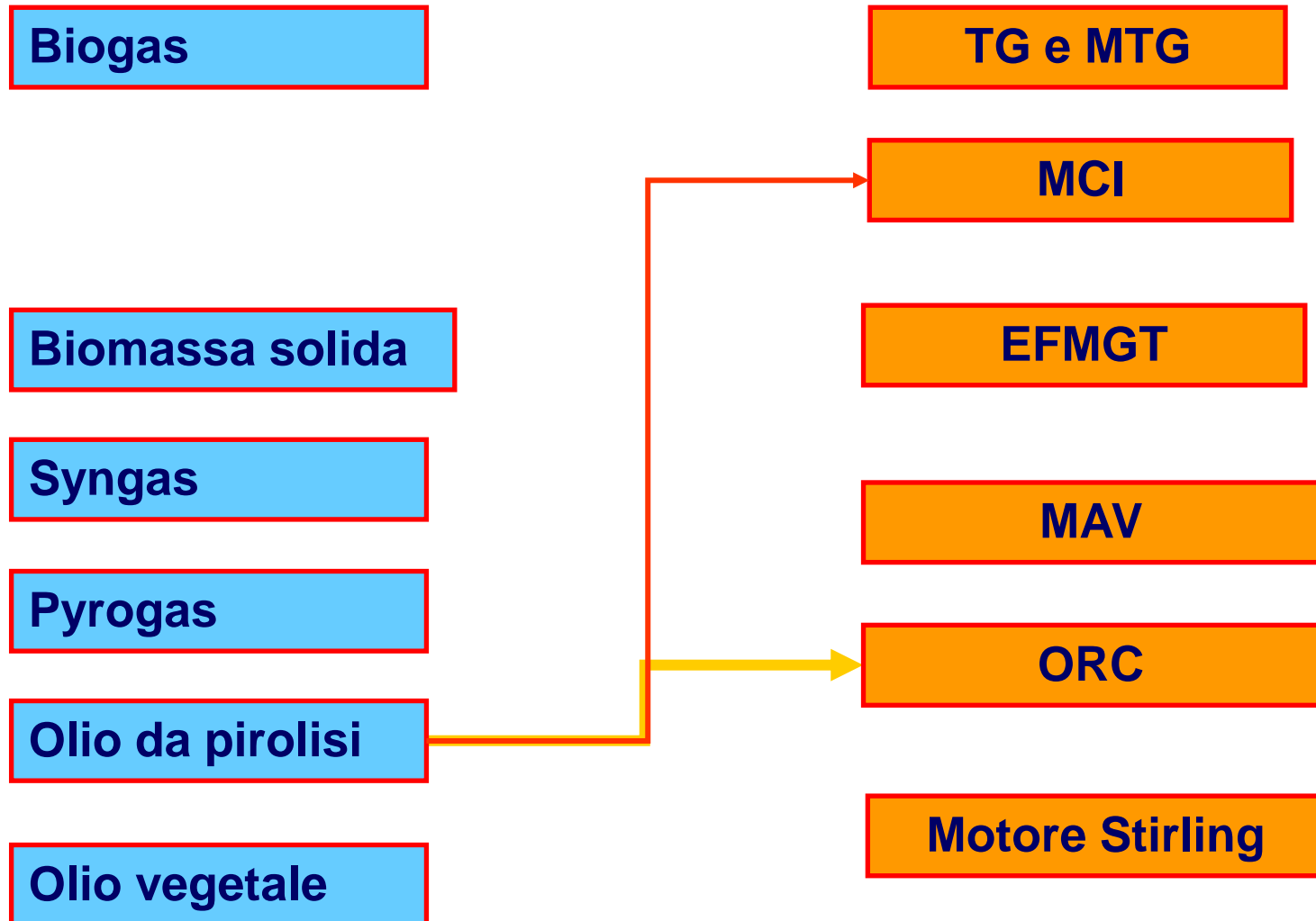
Biocombustibile/Sistema energetico



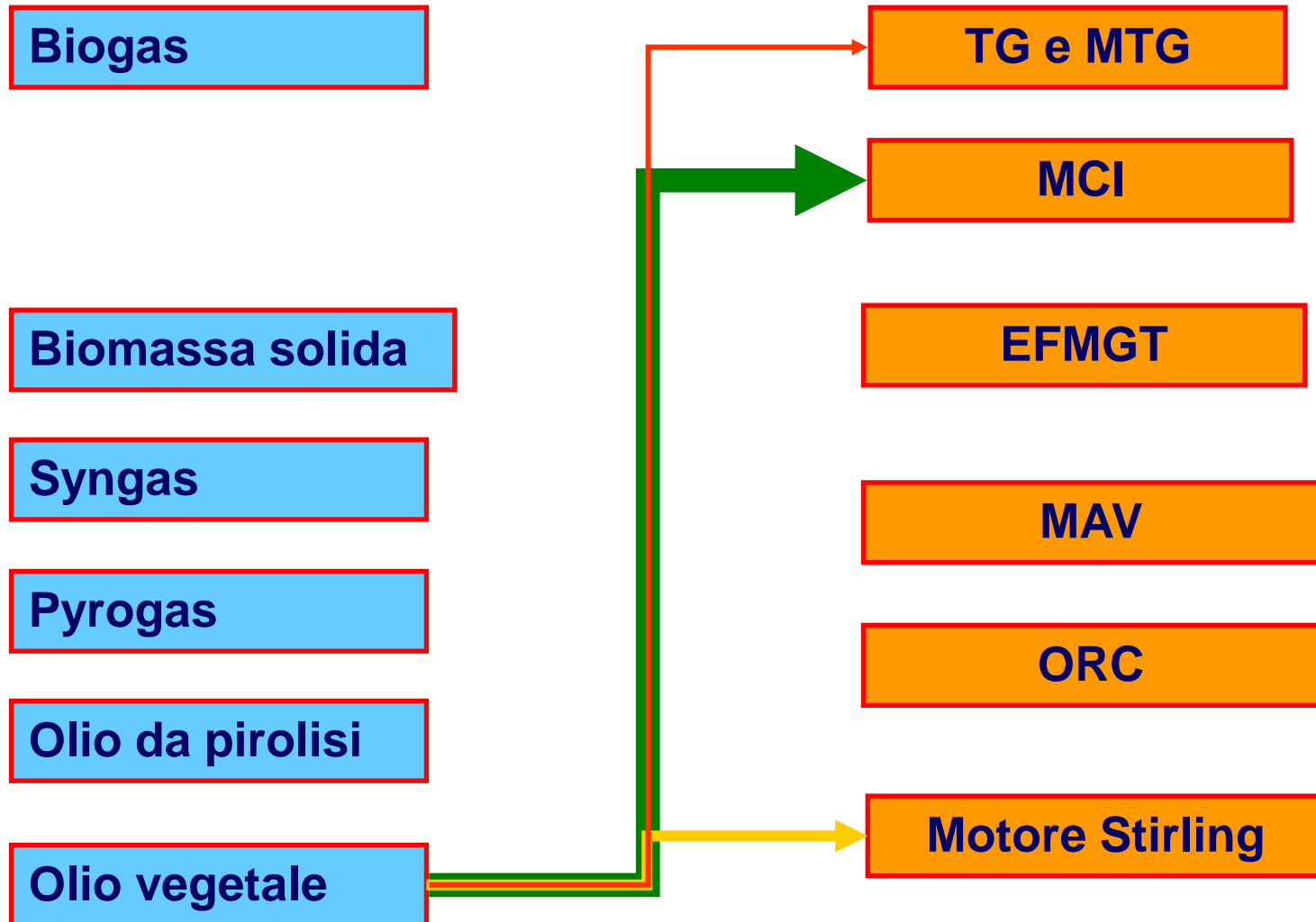
Biocombustibile/Sistema energetico



Biocombustibile/Sistema energetico



Biocombustibile/Sistema energetico



Le tecnologie

Tecnologie CHP a combustione interna

✓ **Motori alternativi a combustione interna (MCI)**

Consolidate

✓ Turbine a Gas (TG) e Micro Turbine a Gas (MTG)

✓ Celle a combustibile - Fuel Cell (FC)

In fase di consolidamento

Tecnologie CHP a combustione esterna

✓ Turbine a Vapore (TV)

Consolidate

✓ Motori Alternativi a Vapore (MAV)

✓ Cicli Rankine a fluido Organico (ORC)

✓ MTG a combustione esterna (EFMGT)

✓ Motori Stirling

In fase di consolidamento

Motori alternativi a Combustione Interna (MCI)

VANTAGGI

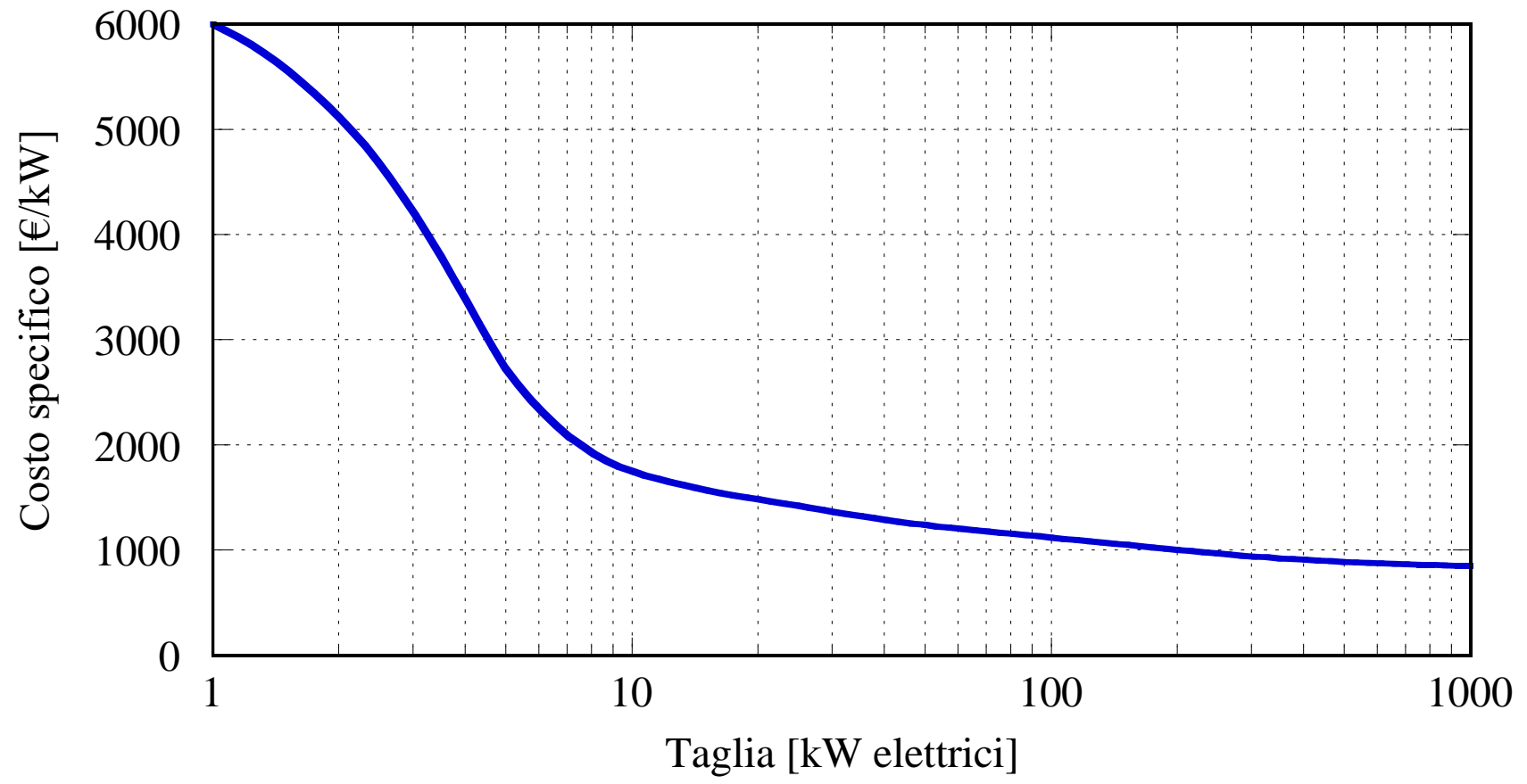
- ✓ taglie da 1 kW_e a circa 5 MW_e
- ✓ tecnologia matura impiegata in diversi campi
- ✓ elevata affidabilità
- ✓ buoni rendimenti di conversione
- ✓ costi di investimento contenuti
- ✓ elevata flessibilità di esercizio



SVANTAGGI

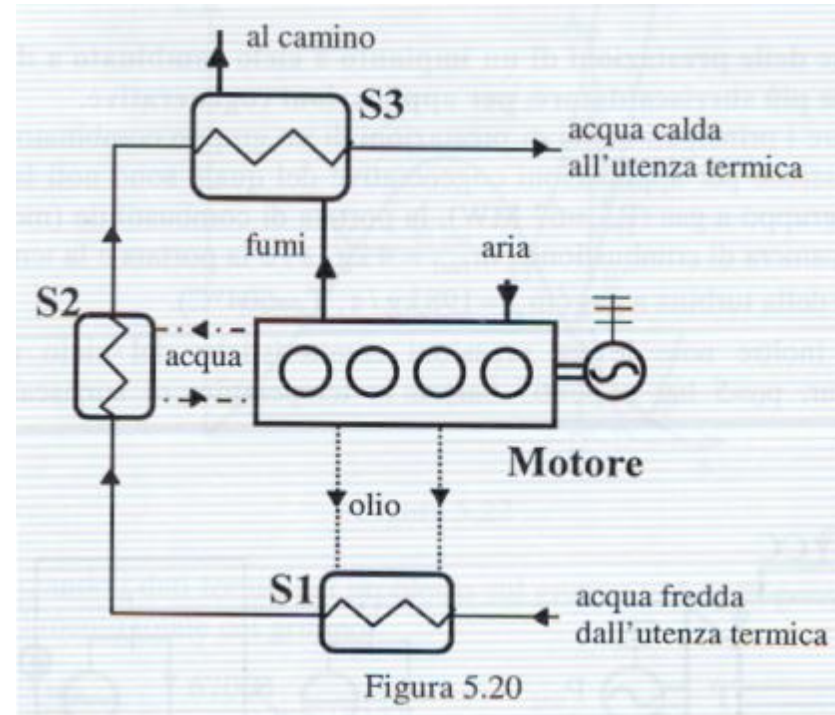
- ✓ elevati costi di manutenzione (8÷25 €/MWh)
- ✓ rumorosità e vibrazioni
- ✓ elevati valori delle emissioni (NO_x e CO)

I costi specifici dei MCI

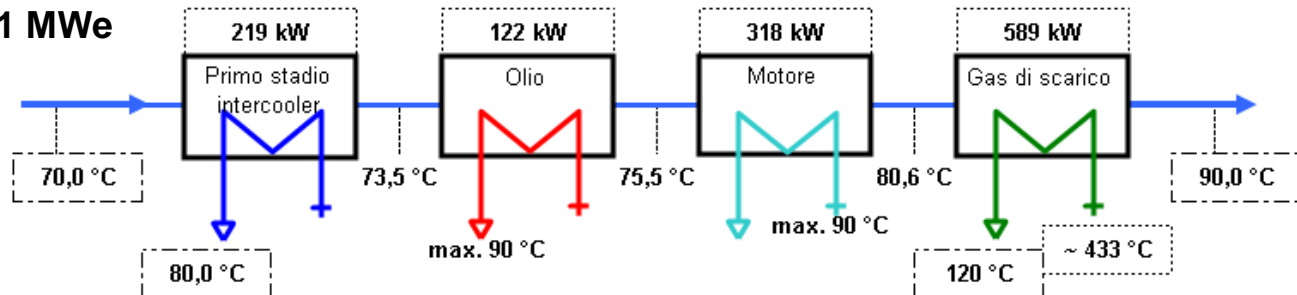


Cogenerazione con MCI

- ✓ 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”



MCI da 1 MWe



Bilancio energetico di un MCI da 1 MWe

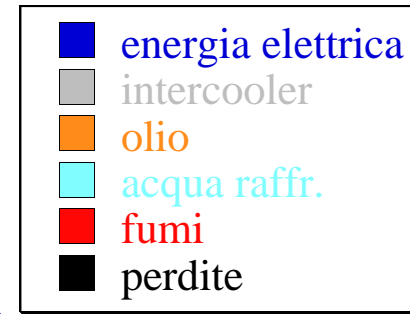
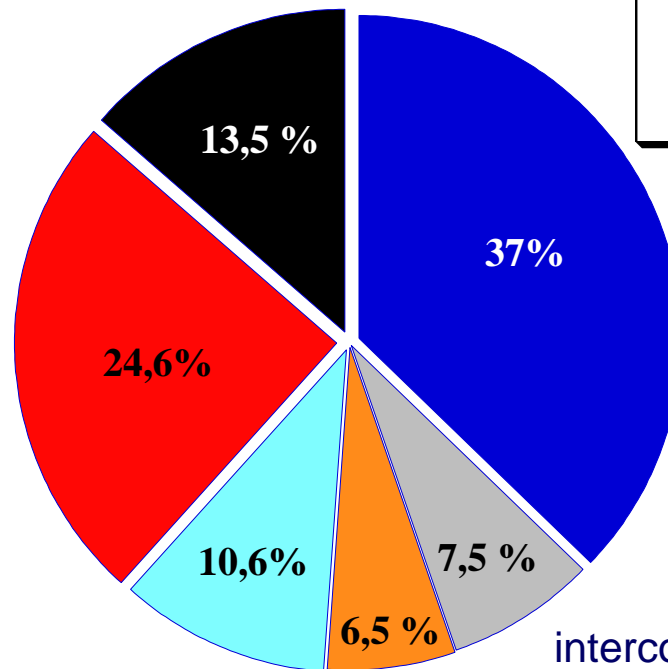
- ✓ Oltre alla potenza termica disponibile è importante valutare:
 - ♦ le ore di funzionamento annuali in cogenerazione (energia!)
 - ♦ la temperatura alla quale è disponibile



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

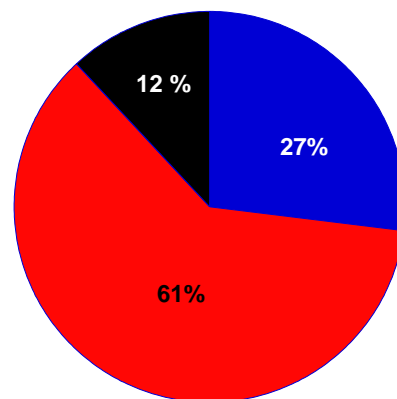
Acqua di raffr. - $T \approx 90\text{-}95 \text{ }^{\circ}\text{C}$

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

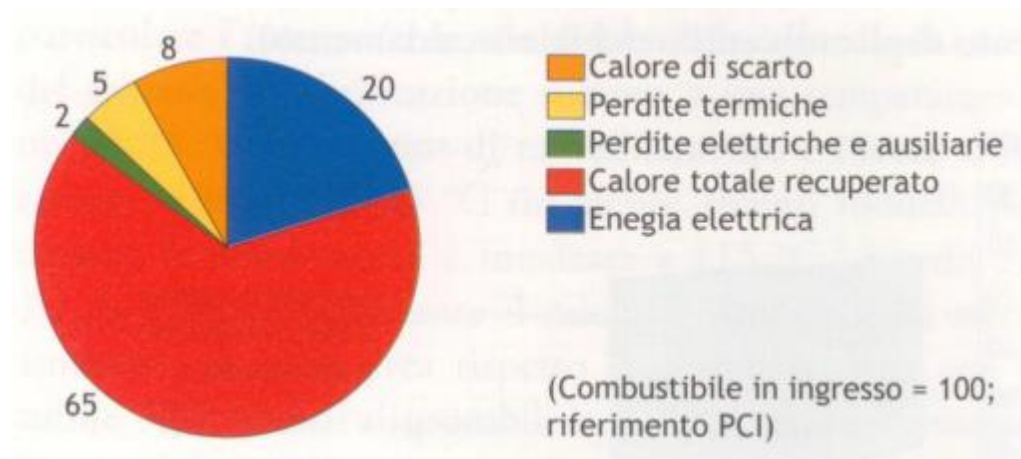


intercooler - $T \approx 30/40 \text{ }^{\circ}\text{C}$

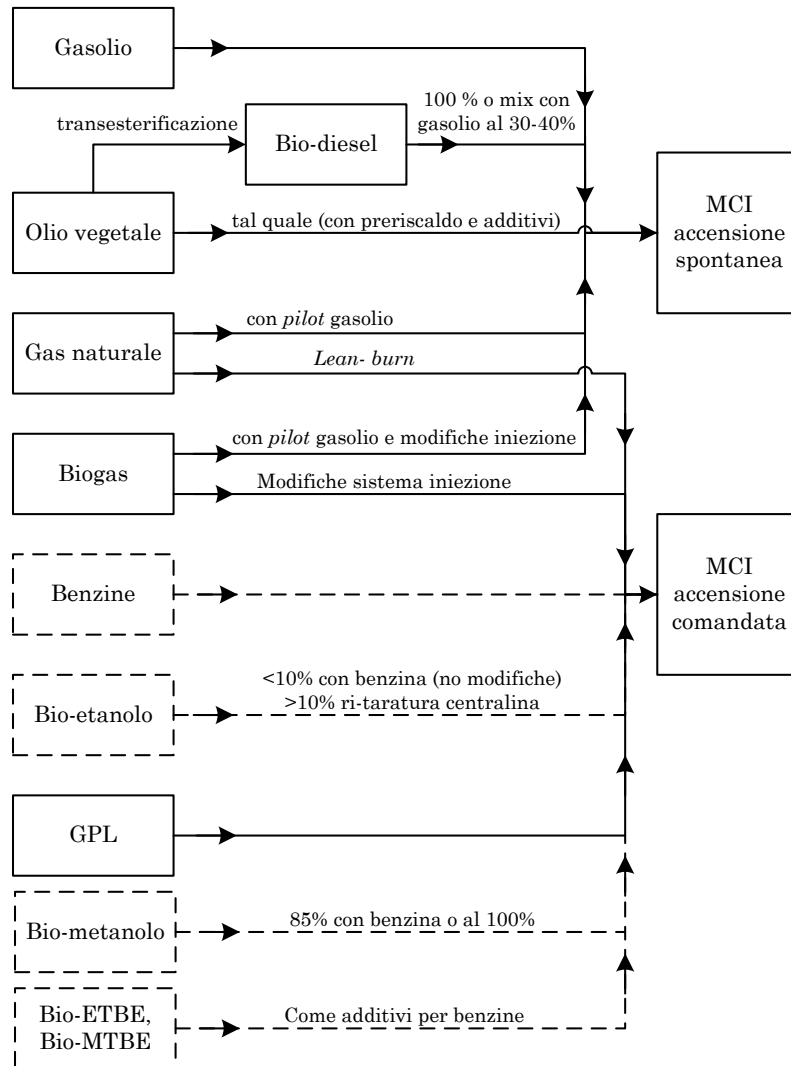
Bilancio energetico di un MCI da 5 e 1 kWe



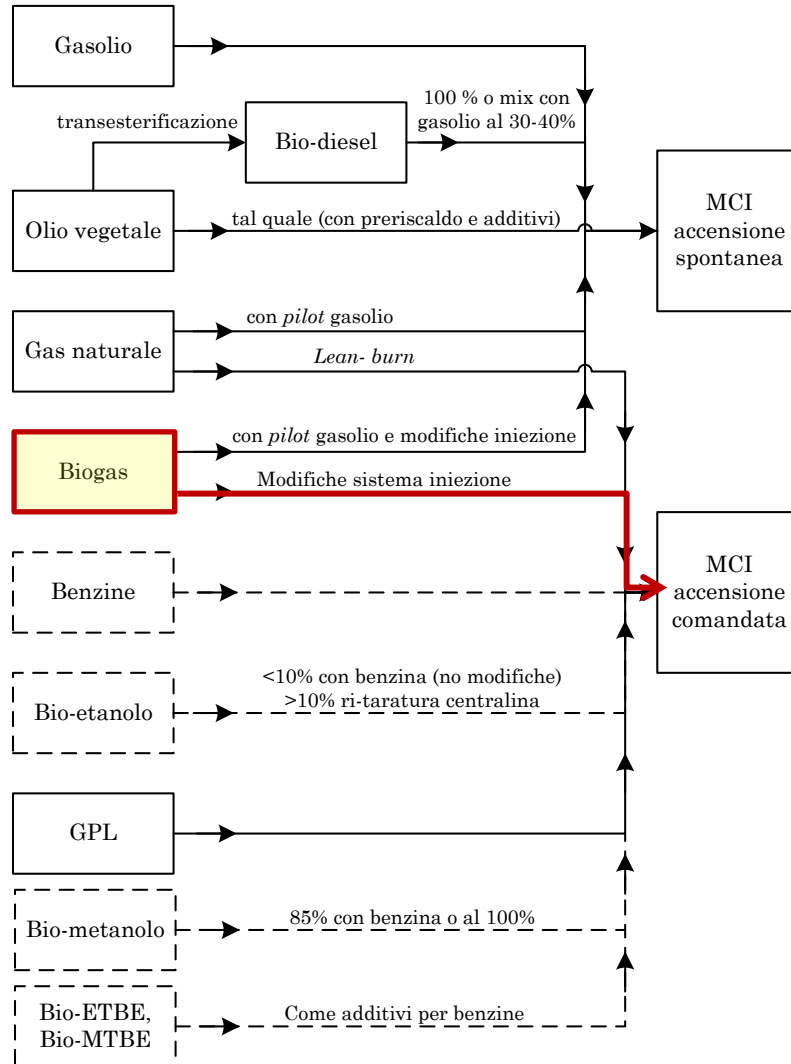
- Energia elettrica
- Energia termica
- Perdite



Combustibili nei MCI



Combustibili nei MCI

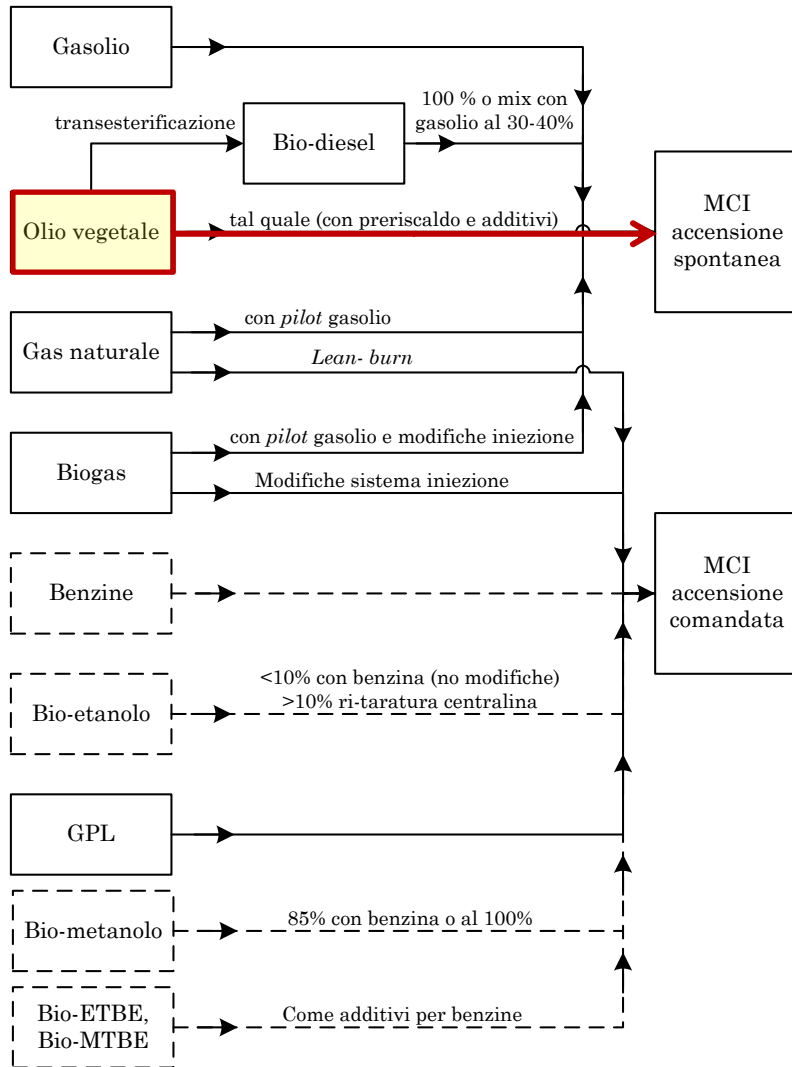


- **Motori ad accensione comandata (a ciclo “Otto”)**

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

Le tecnologie

Tecnologie CHP a combustione interna

✓ Motori alternativi a combustione interna (MCI)

Consolidate

✓ **Turbine a Gas (TG) e Micro Turbine a Gas (MTG)**

✓ Celle a combustibile - Fuel Cell (FC)

In fase di consolidamento

Tecnologie CHP a combustione esterna

✓ Turbine a Vapore (TV)

Consolidate

✓ Motori Alternativi a Vapore (MAV)

✓ Cicli Rankine a fluido Organico (ORC)

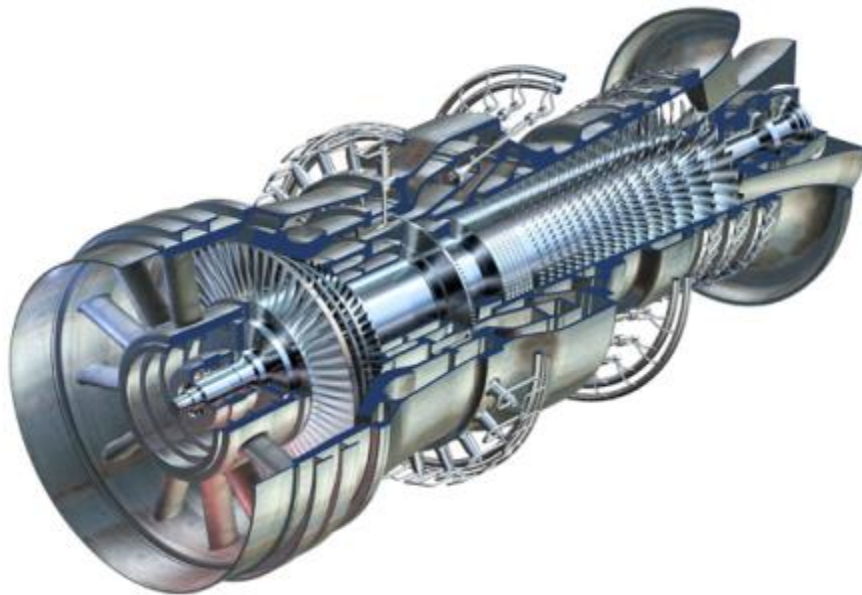
✓ MTG a combustione esterna (EFMGT)

✓ Motori Stirling

In fase di consolidamento

Turbine a Gas (TG)

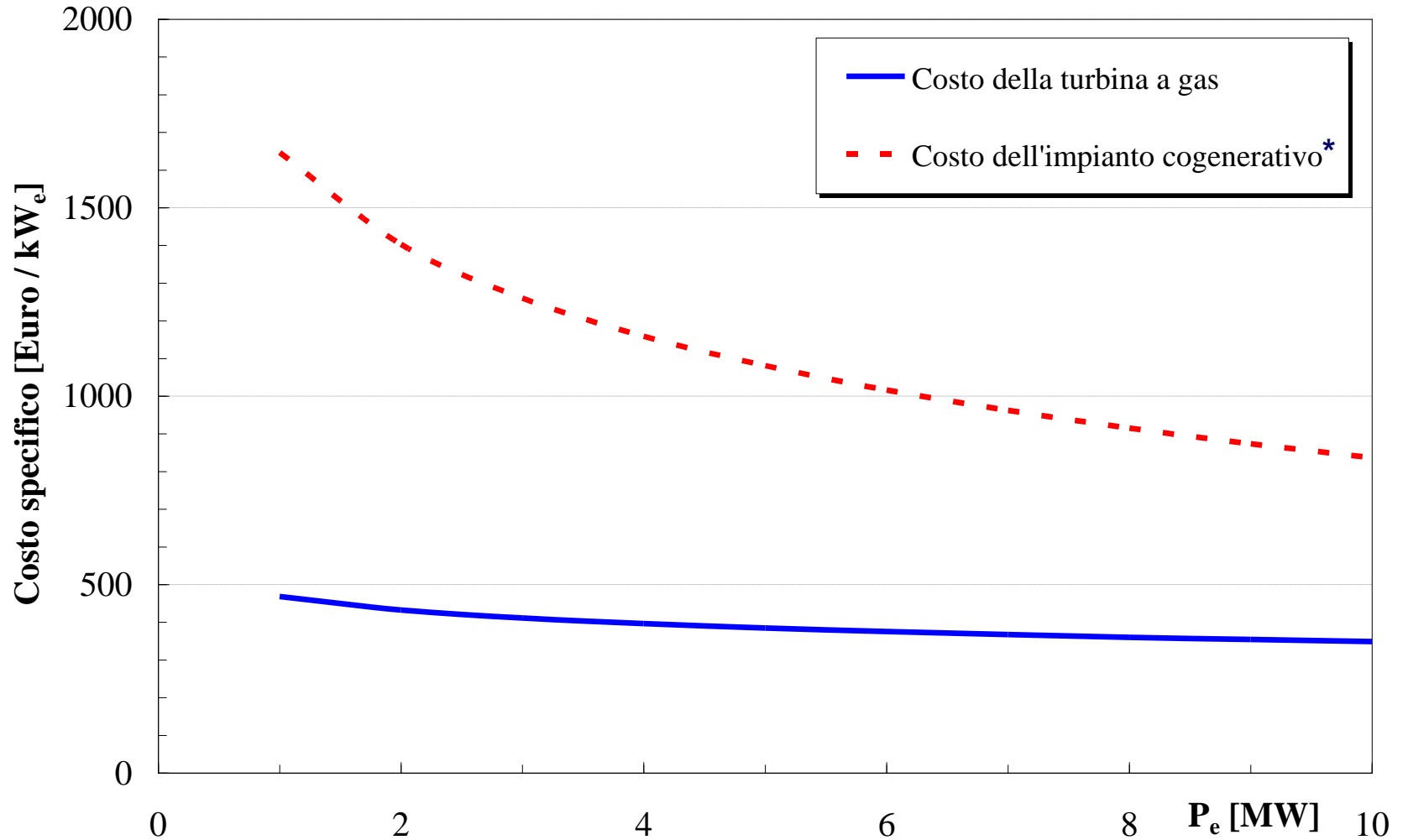
- **Tecnologia consolidata**
- **Disponibilità in taglie che vanno da 30 kW a 250 MW**



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**

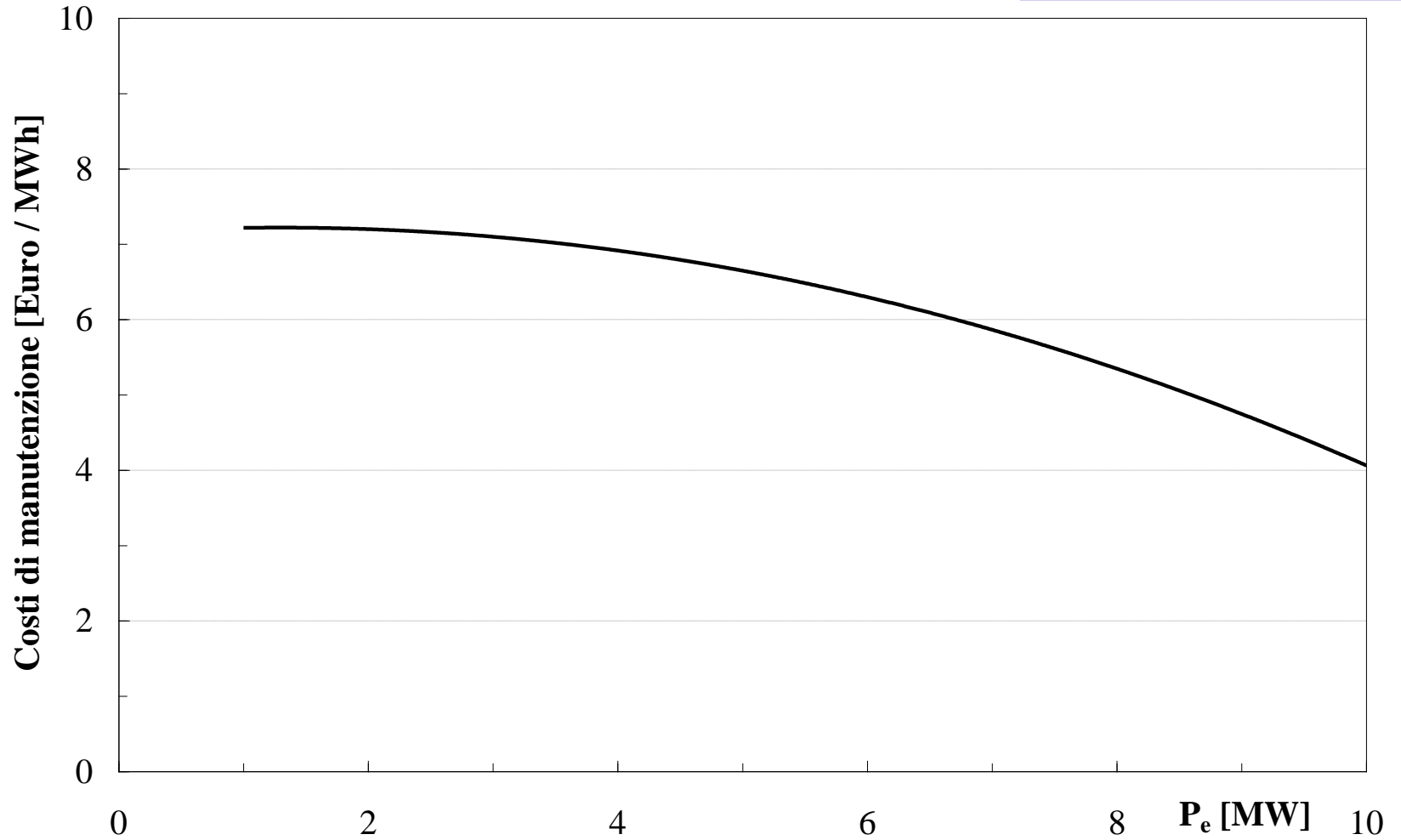
Turbine a Gas (TG)



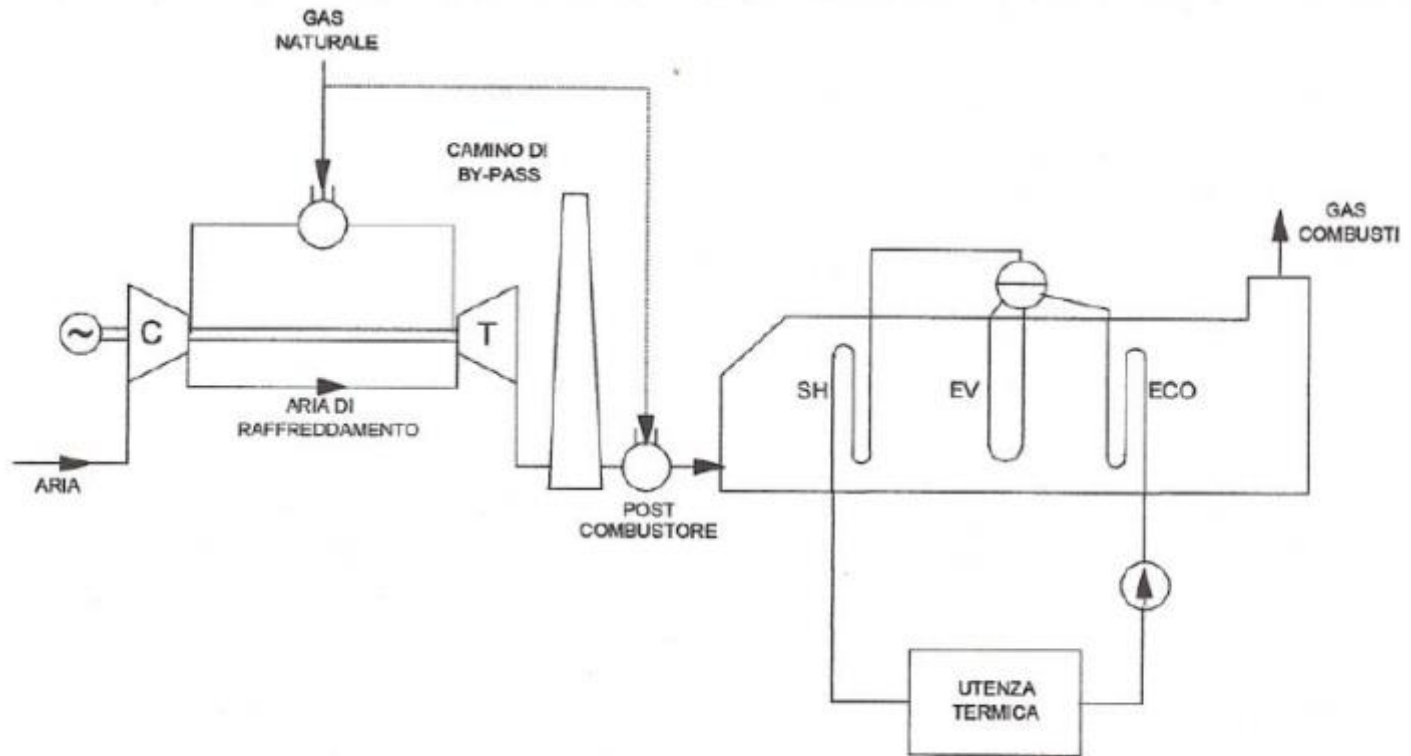
*tiene conto di: HRSG, compressore NG, impianto elettrico, cantiere

Turbine a Gas (TG)

MCI = 8÷25 €/MWh



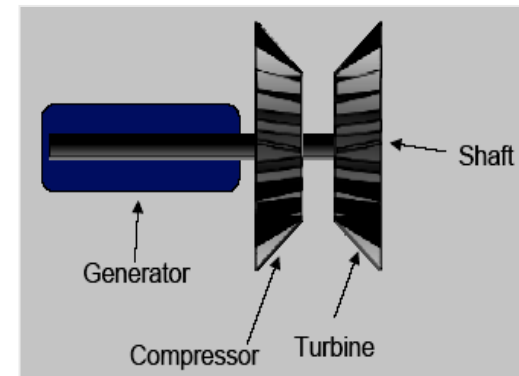
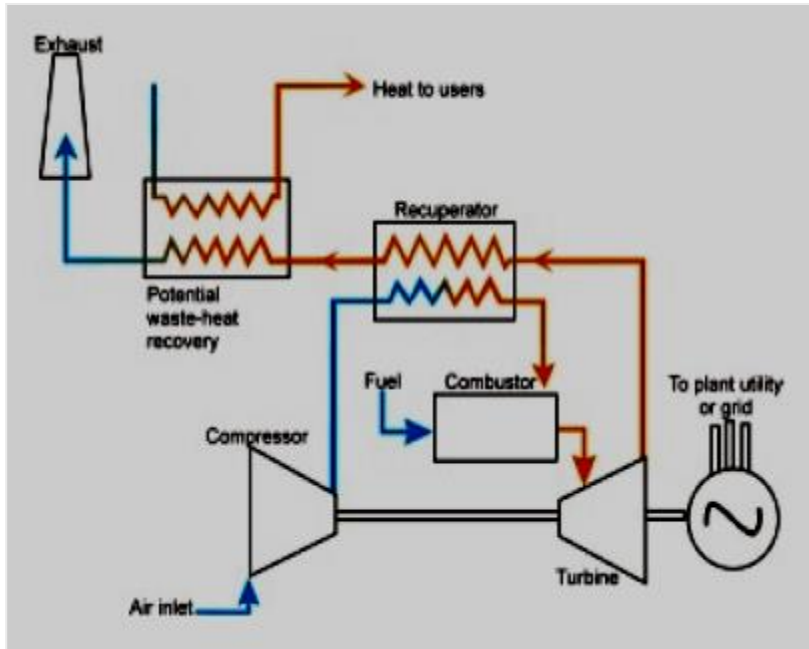
Cogenerazione con TG



- ✓ 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)

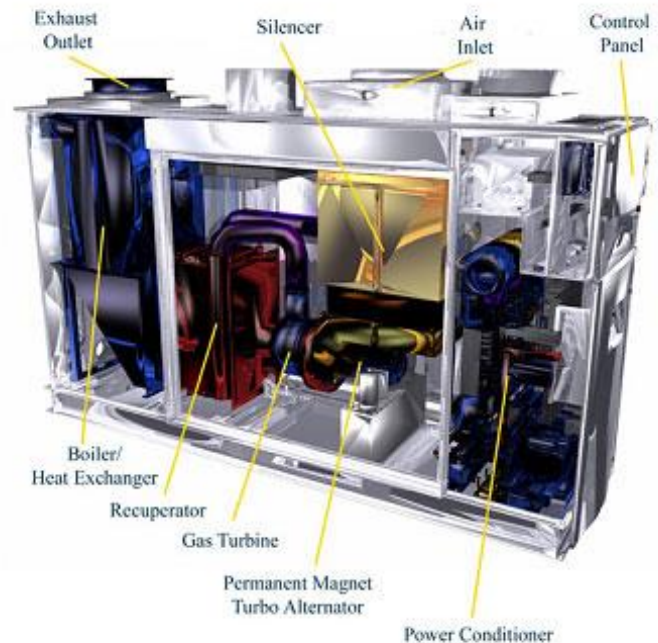
- Con MicroTurbina a Gas si identificano le turbina a gas di piccola/piccolissima taglia ($P_{el} = 30 \text{ kW} \div 300 \text{ kW}$)
- Costituita essenzialmente da *compressore centrifugo (monostadio)*
camera di combustione (continua)
turbina centripeta (monostadio)
recuperatore



Micro Turbine a Gas ($P_e < 250 \text{ kW}$)

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

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

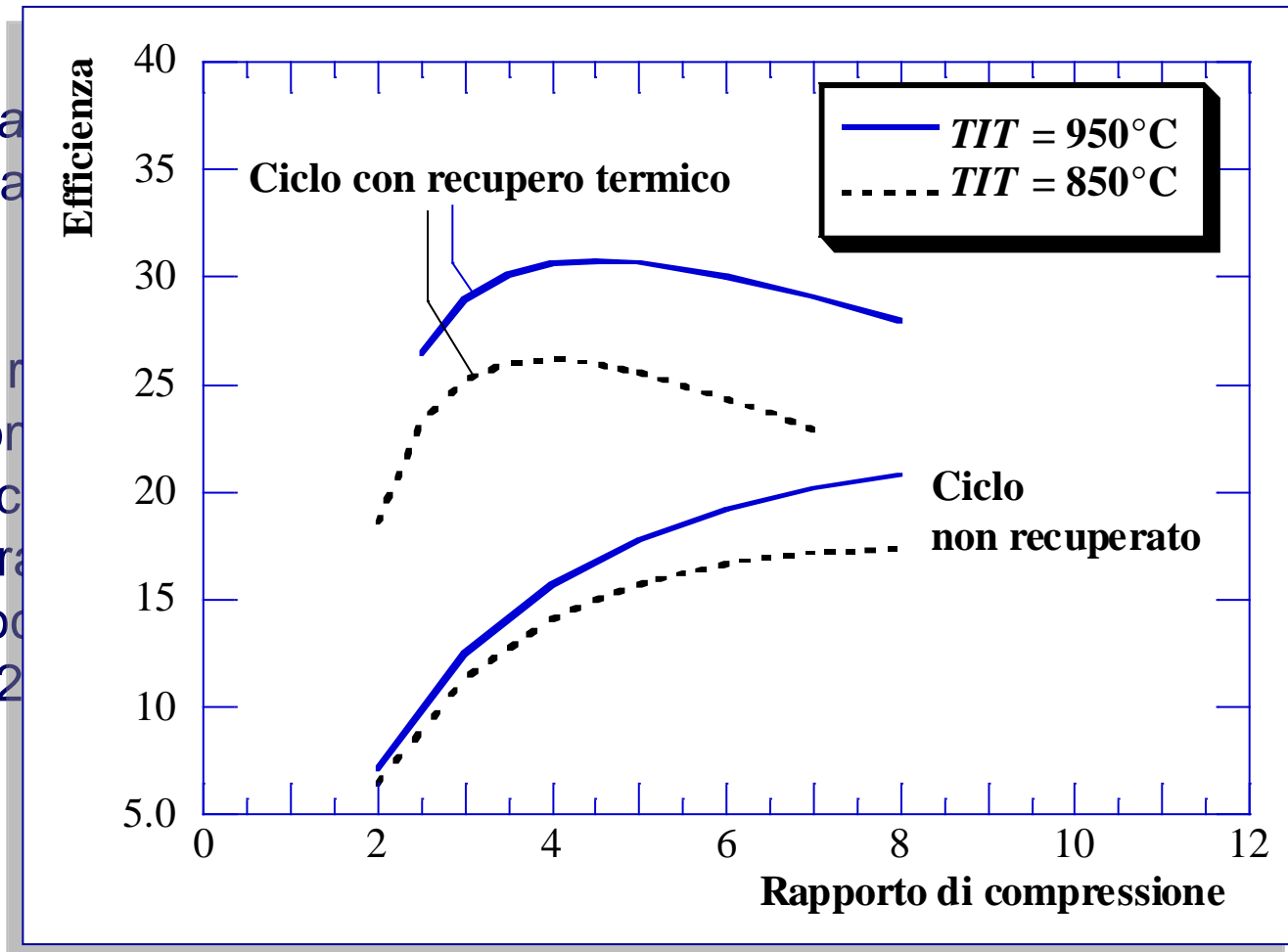


Typical microturbine package

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

Non sono uno scafo
gas industriali, ma
progettazione:

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



MTG sul mercato

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

MTG sul mercato

Capstone (30-200 kW)

Ansaldo Turbec (100 kW)



Costruttore

Pe [kWe] ηe [%] ηt [%]

Capstone

30 26 -

Capstone

60 28 53.7

Capstone

65

Ingersoll Rand

70

Bowman

80

Elliot (100 kW)

Elliott

80

Elliott

100

Ansaldo Tu

100

Capstone

190

Ingersoll R

250

30

44.6

Ingersoll Rand (250 kW)

68000 278

- 230

- 23

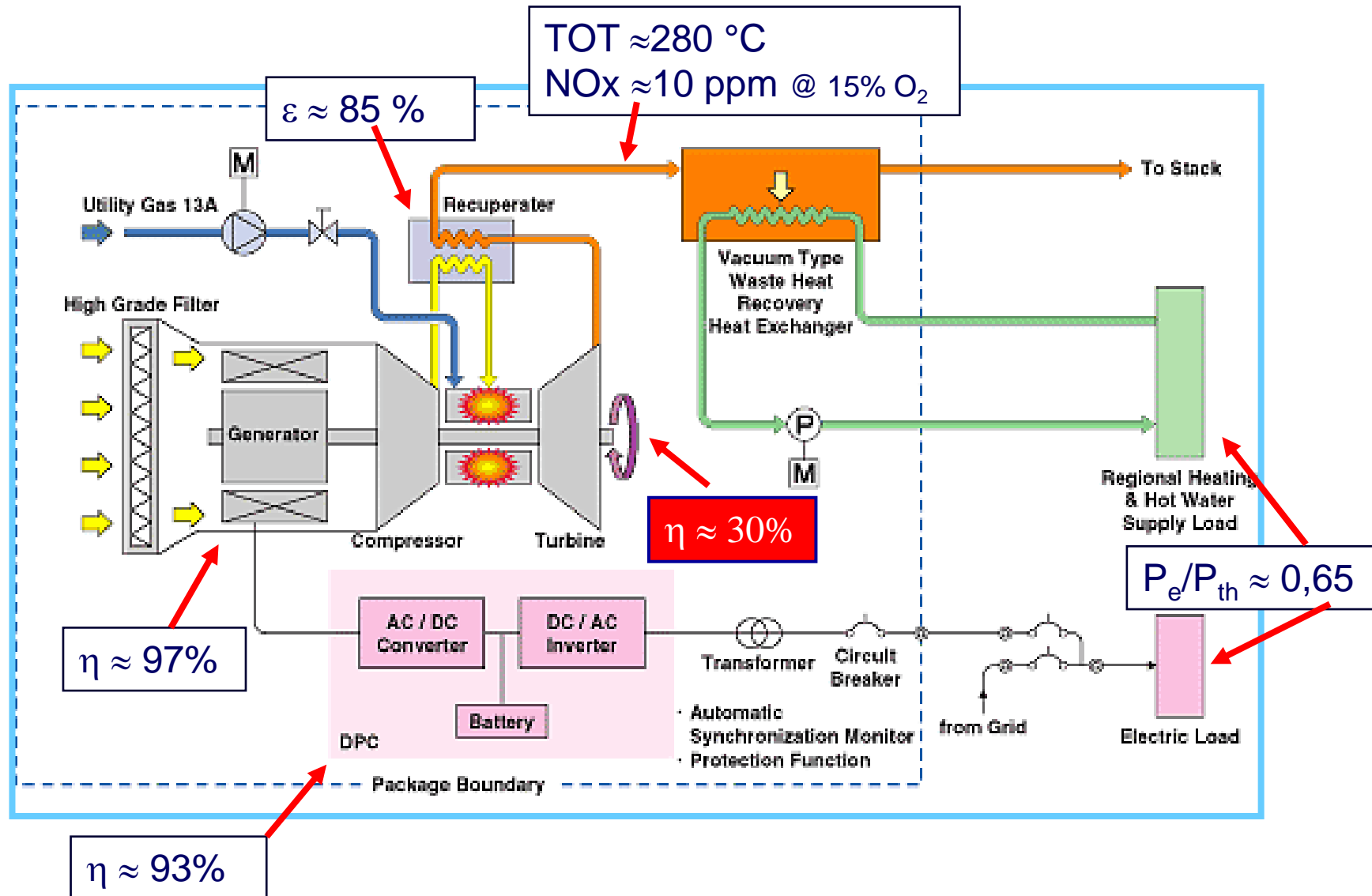
70000 70

65000 30

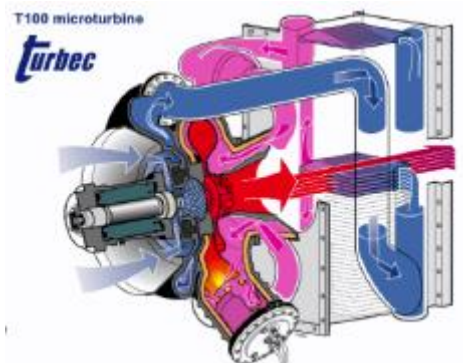
45000 19



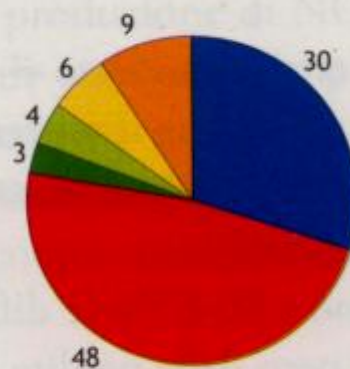
Cogenerazione con MTG



Bilancio energetico di una MGT

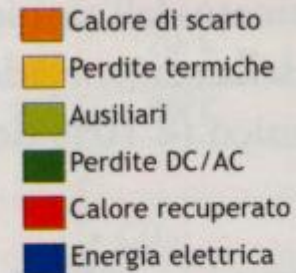
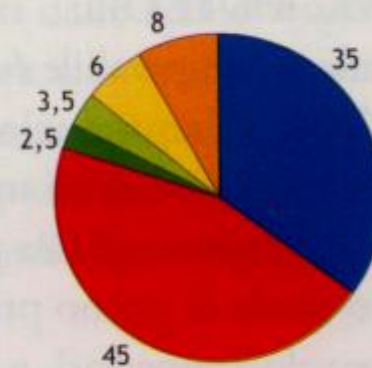


Bilancio energetico MTG
taglia 100 kWe



(Combustibile in ingresso = 100;
riferimento PCI)

Bilancio energetico MTG
taglia 200-400 kWe



(Combustibile in ingresso = 100;
riferimento PCI)

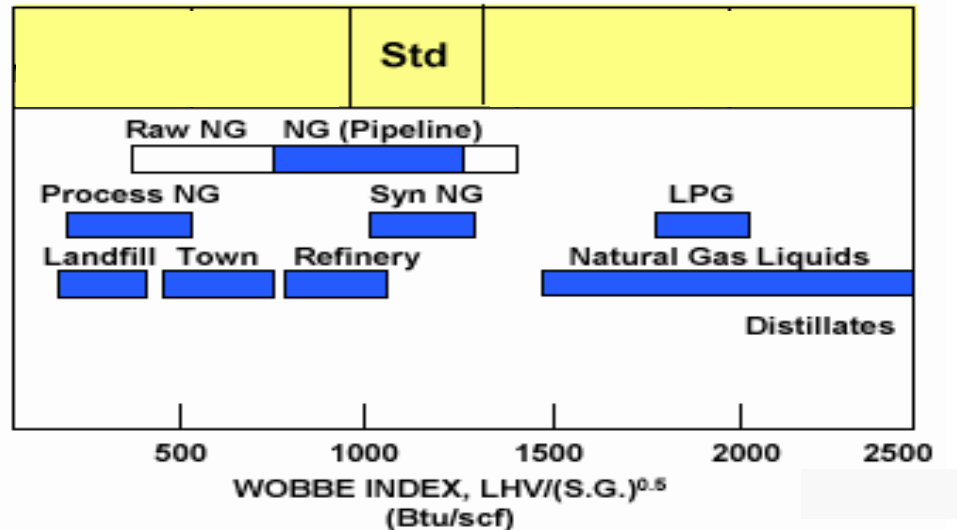
Applicazioni MTG



Cogenerazione in
applicazioni
residenziali

Biogas e syngas nelle TG

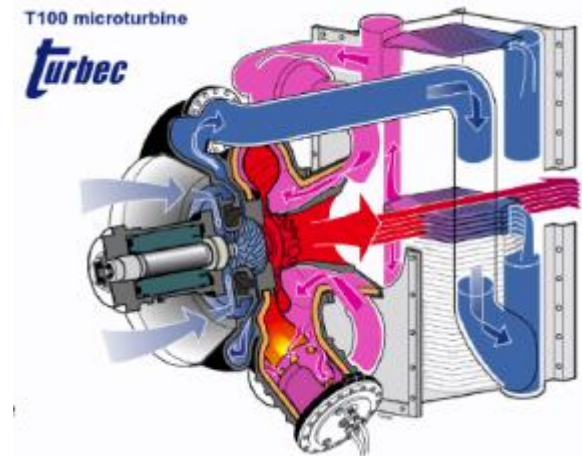
- ✓ Gas Naturale → 32000÷38000 kJ/Nm³
- ✓ Negli ultimi anni opportunità di alimentazione con **combustibili alternativi**
 - Gas da gassificazione di biomassa → 3500÷7000 kJ/Nm³
 - Biogas da digestione o da discarica → ≈ 20000 kJ/Nm³
- ✓ A causa del diverso PCI e della diversa composizione possono essere necessari adeguamenti



Biogas nelle TG

- ✓ Con biogas di composizione tipica (CH_4 - 60 %, 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 %_{vol} di gas naturale e 75 %_{vol} 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 CH_4
- ✓ Buona tollerabilità al contenuto di H_2S nel combustibile

Tollerabilità all' H_2S

Microturbina → 3000÷7000 ppm

Motore a c.i. → < 250 ppm

- ✗ Presenza di tracce di H_2S nei gas di combustione → altamente corrosivo
- ✗ Difficoltà di combustione ai bassi regimi
- ✗ Vapore acqueo nel combustibile



Biogas e MTG (Ingersoll Rand – Ansaldo Turbec)

CONDIZIONI BIOGAS		
	IR MT250	AT AE-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 ₂ S	300 ppm	3000 ppmv
Limite siloxani	0,06 mg/m ³	100 mg/m ³

MANUTENZIONE		
	IR MT250	AT AE-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)

		C30	C65-ICHP	C200	C600
Potere calorifico gas	kJ/Nm³	12000-32000	20500-32500	20500-32500	20500-32500
Potenza netta	kW	30	65	200	600
Potenza termica fumi	kW	-		394	1183
Potenza termica acqua*	kW	-	74	-	-
Rendimento elettrico	%	23	29	33	33
Rendimento termico	%	-	62	-	-
Portata fumi	kg/h	1116	1764	4680	14400
Temperatura fumi	°C	275	309	280	280
Limite H₂S	ppmv	7'000	5'000	5'000	5'000
NOx	mg/Nm³	18	18	18	18

*T_{in} = 38 ° C, Q_{H2O} = 2.5 kg/s



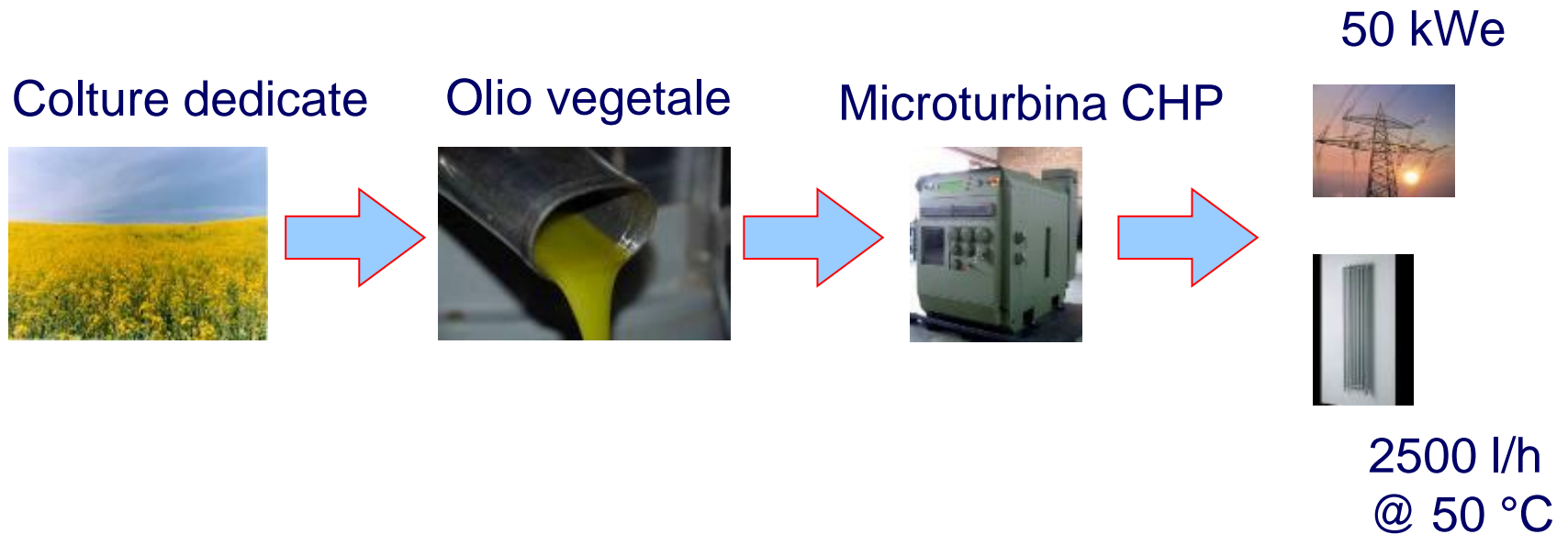
MTG ad olio vegetale

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)

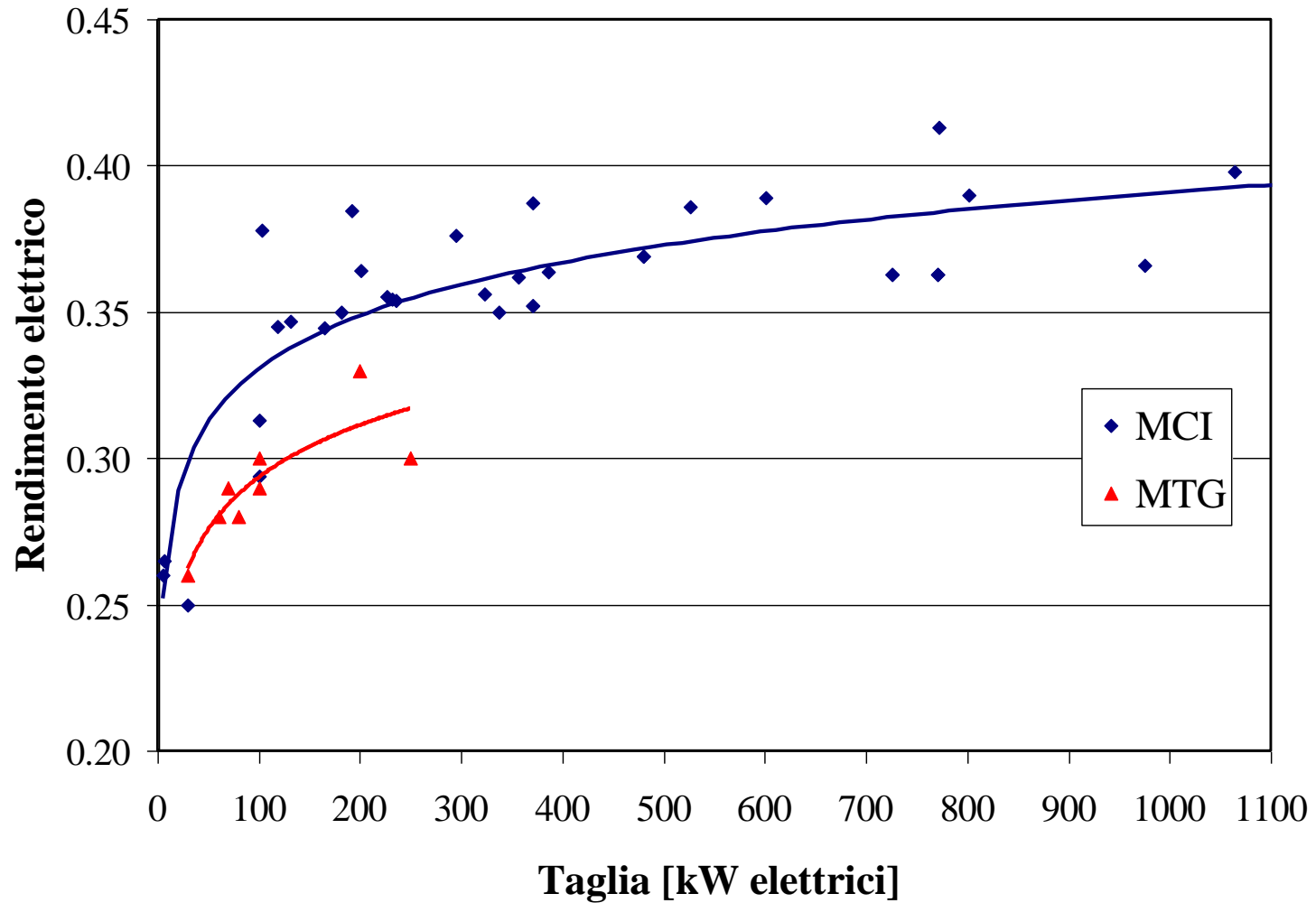
- ✓ Rumore
- ✓ Intervallo di manutenzione
- ✓ Costi di manutenzione

SVANTAGGI MTG

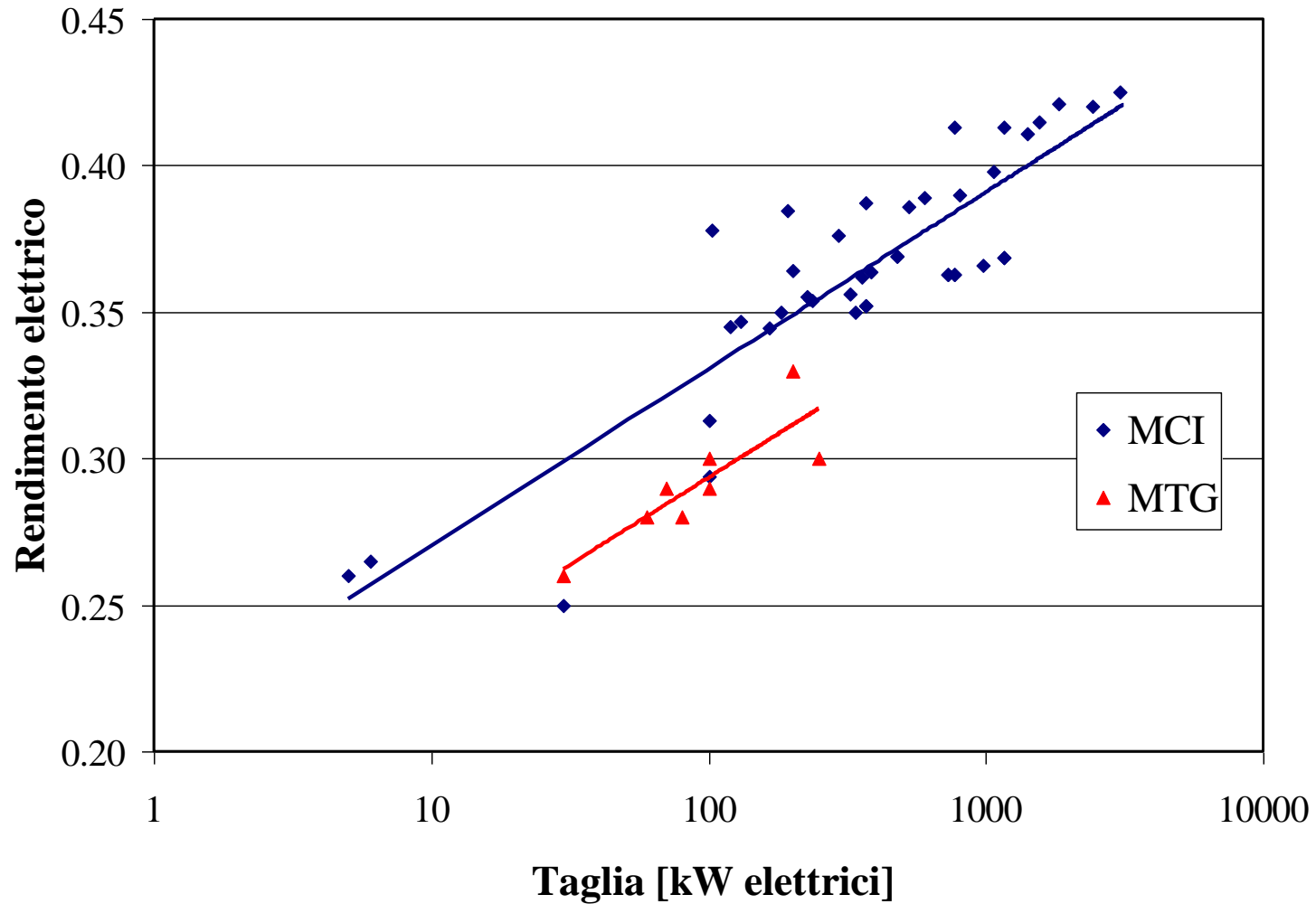
- ✗ tecnologia emergente
- ✗ costo specifico elevato
- ✗ rendimenti elettrici inferiori
- ✗ bassa temperatura fumi (280 °C)

70-80 dB(A)@1m
Attuale → 8 000 h
Target → 11 000 h
10 €/MWh

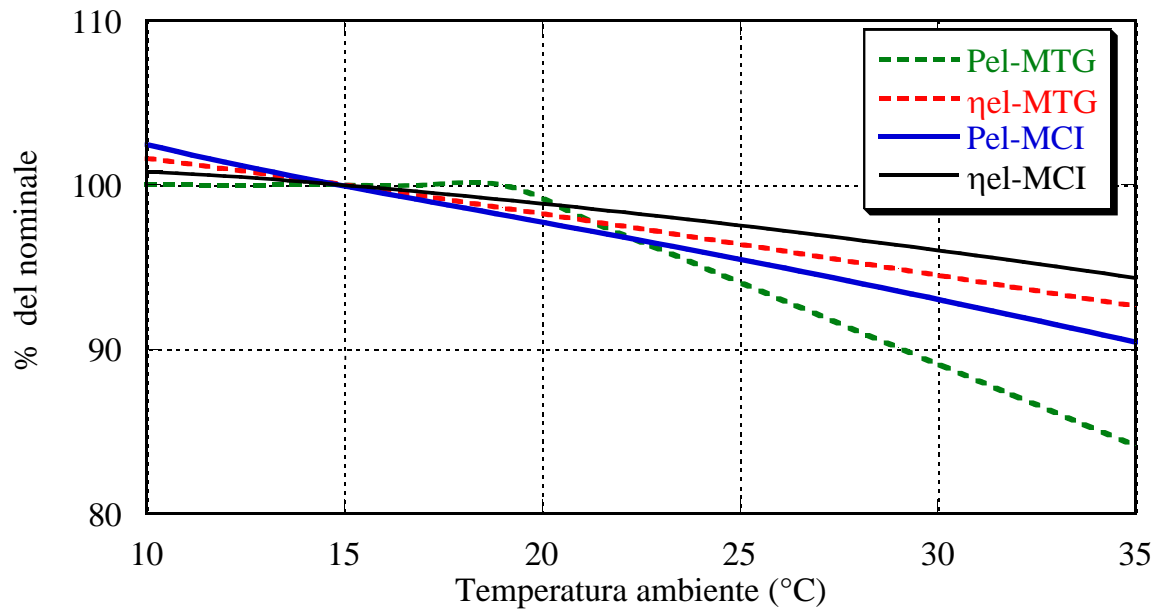
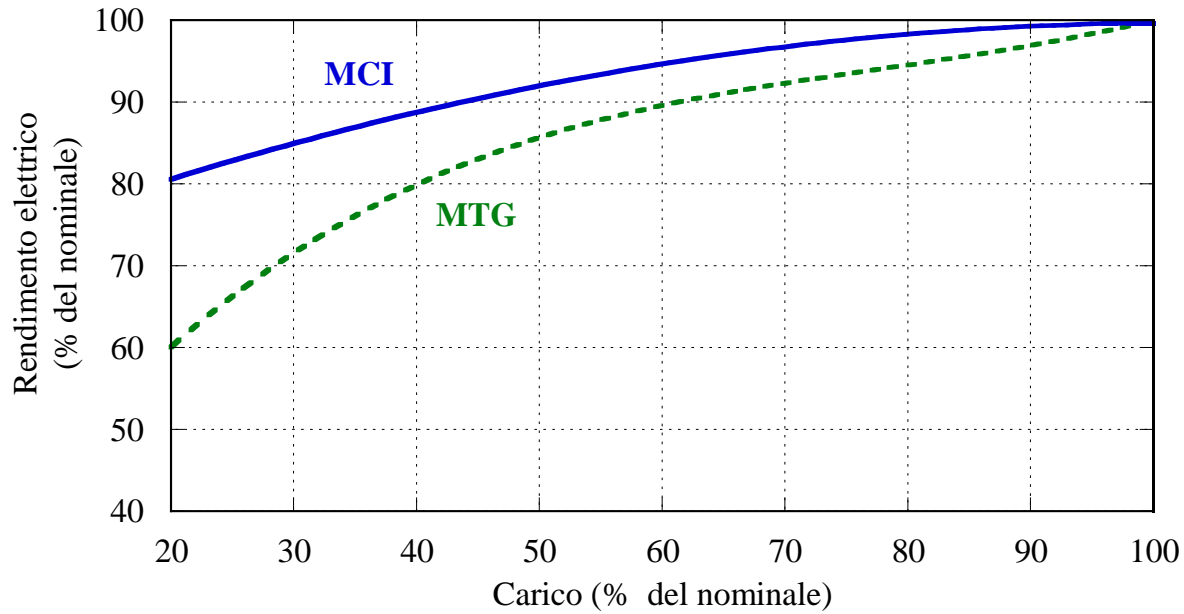
MTG vs MCI



MTG vs MCI



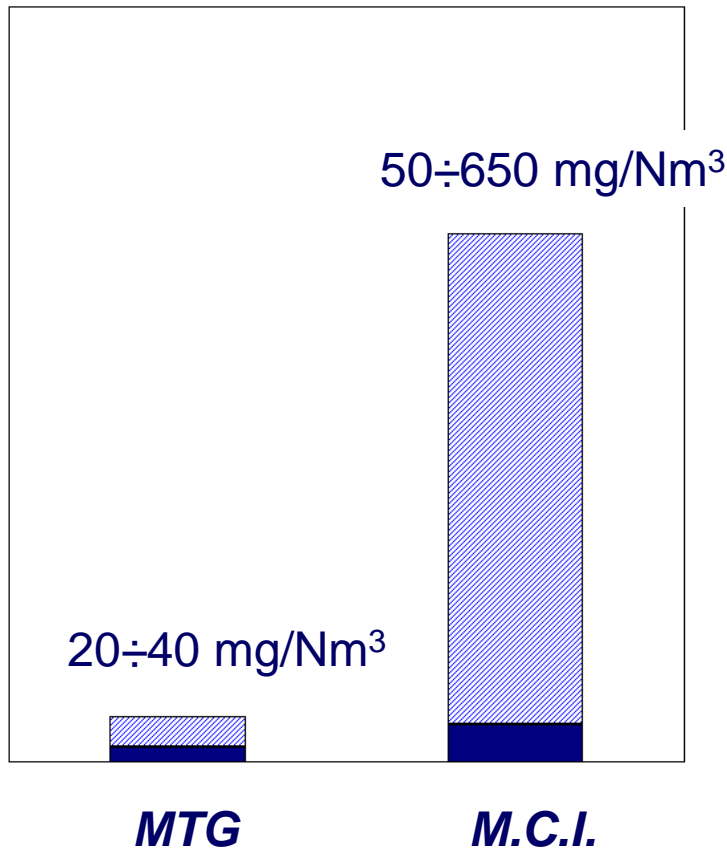
MTG vs MCI



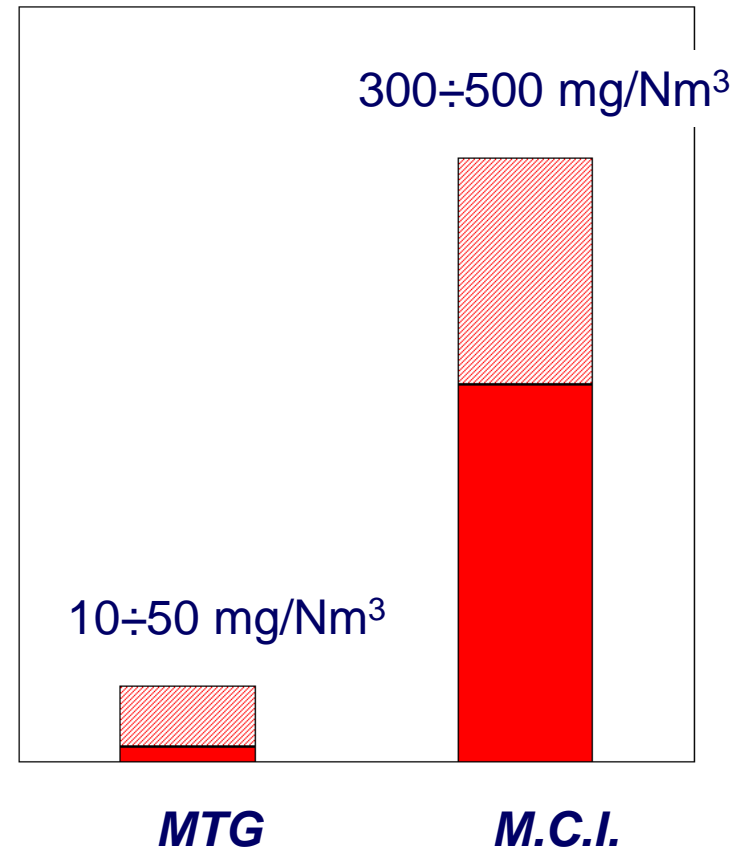
MTG vs MCI

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

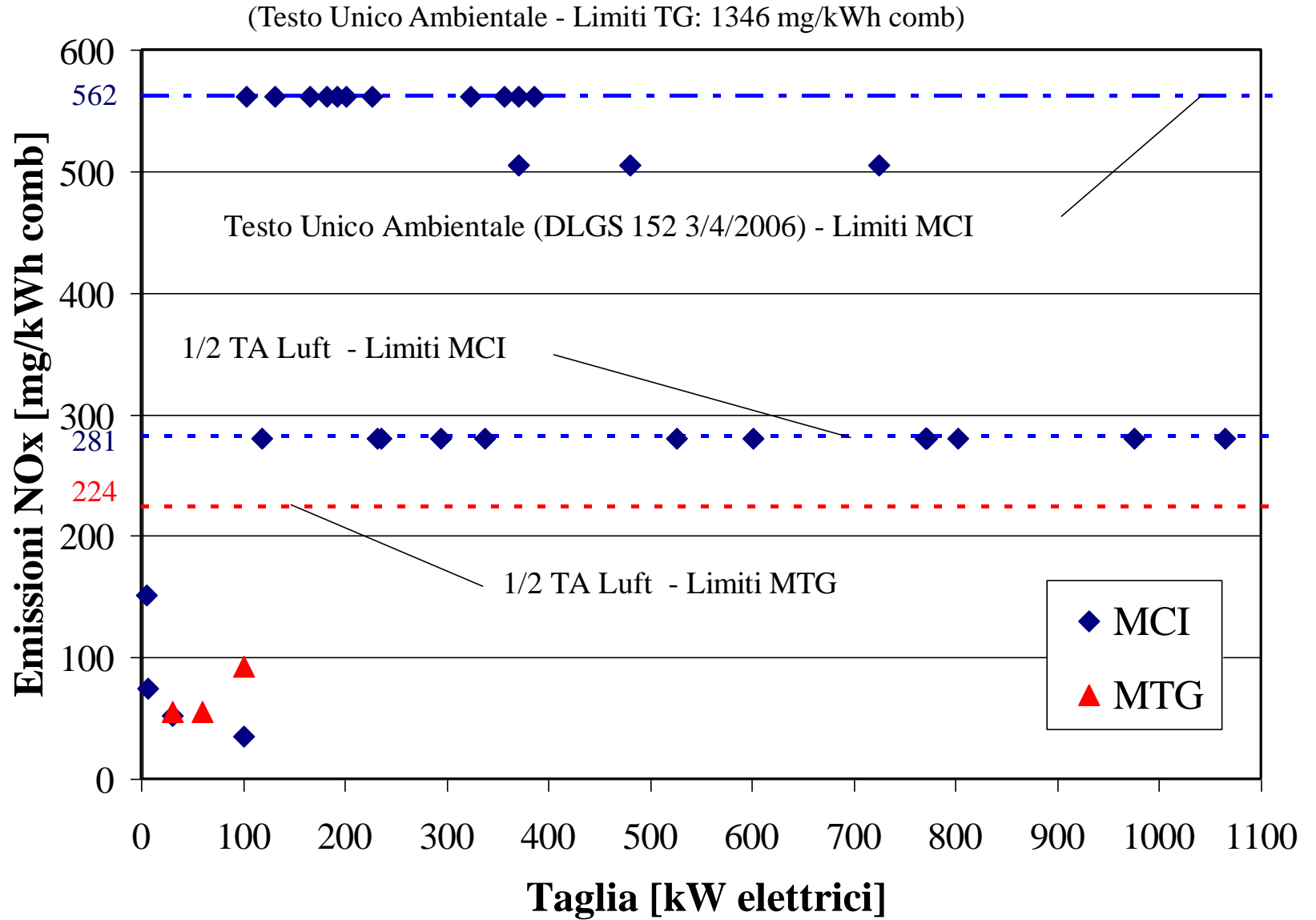
$\text{NO}_x @ 15\% \text{O}_2$



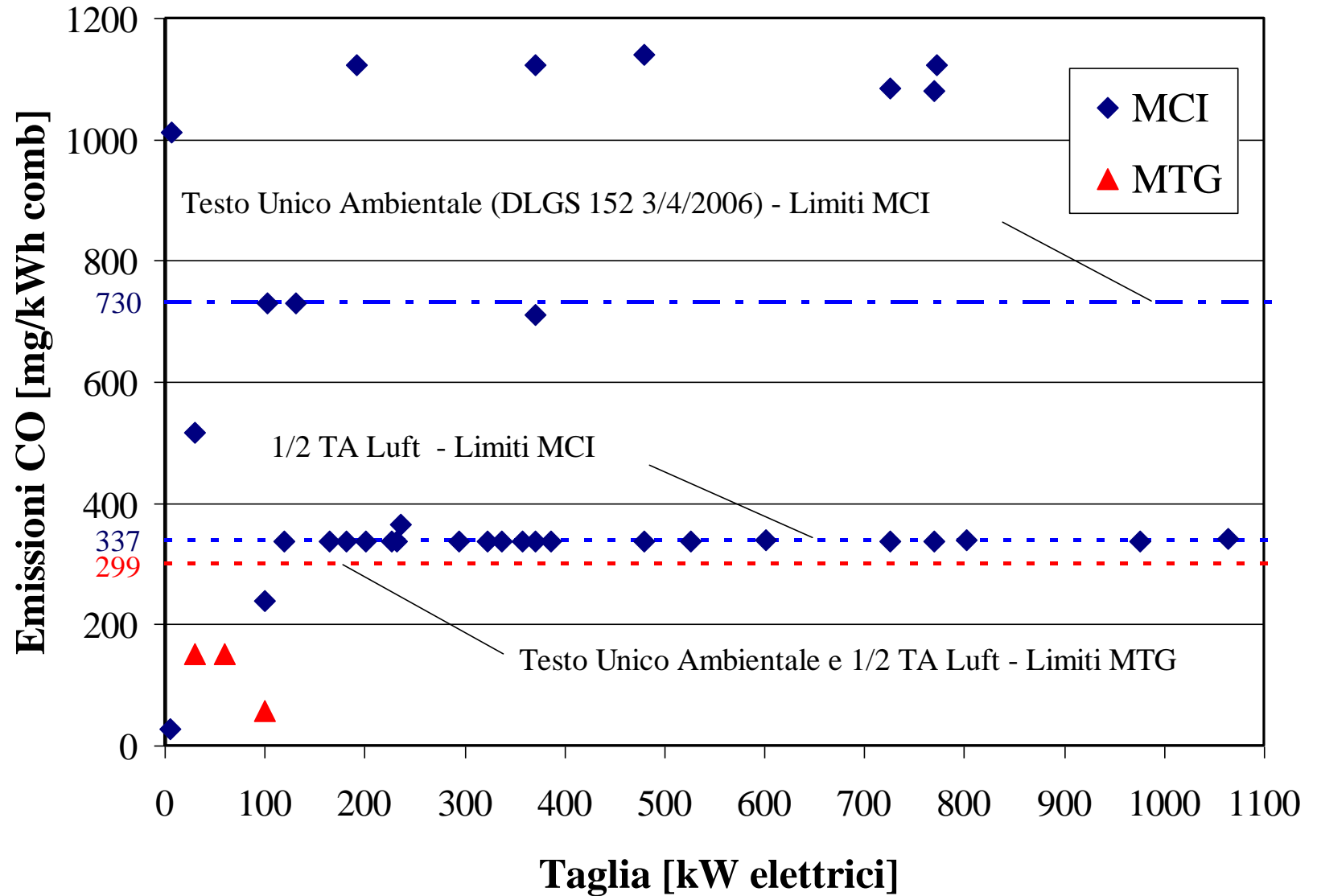
$\text{CO} @ 15\% \text{O}_2$



MTG vs MCI



MTG vs MCI



Le tecnologie

Tecnologie CHP a combustione interna

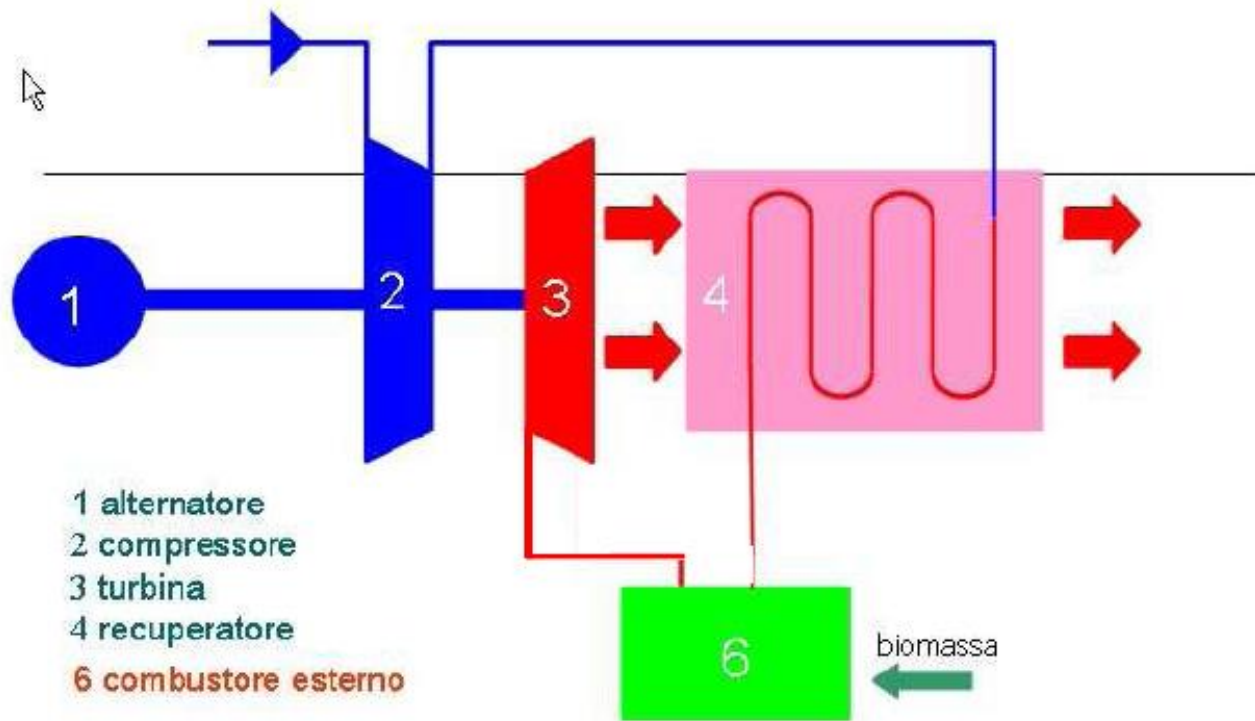
- ✓ Motori alternativi a combustione interna (MCI) Consolidate
- ✓ Turbine a Gas (TG) e Micro Turbine a Gas (MTG)
- ✓ Celle a combustibile - Fuel Cell (FC) In fase di consolidamento

Tecnologie CHP a combustione esterna

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

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 una ANSALDO TURBEC AE-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)



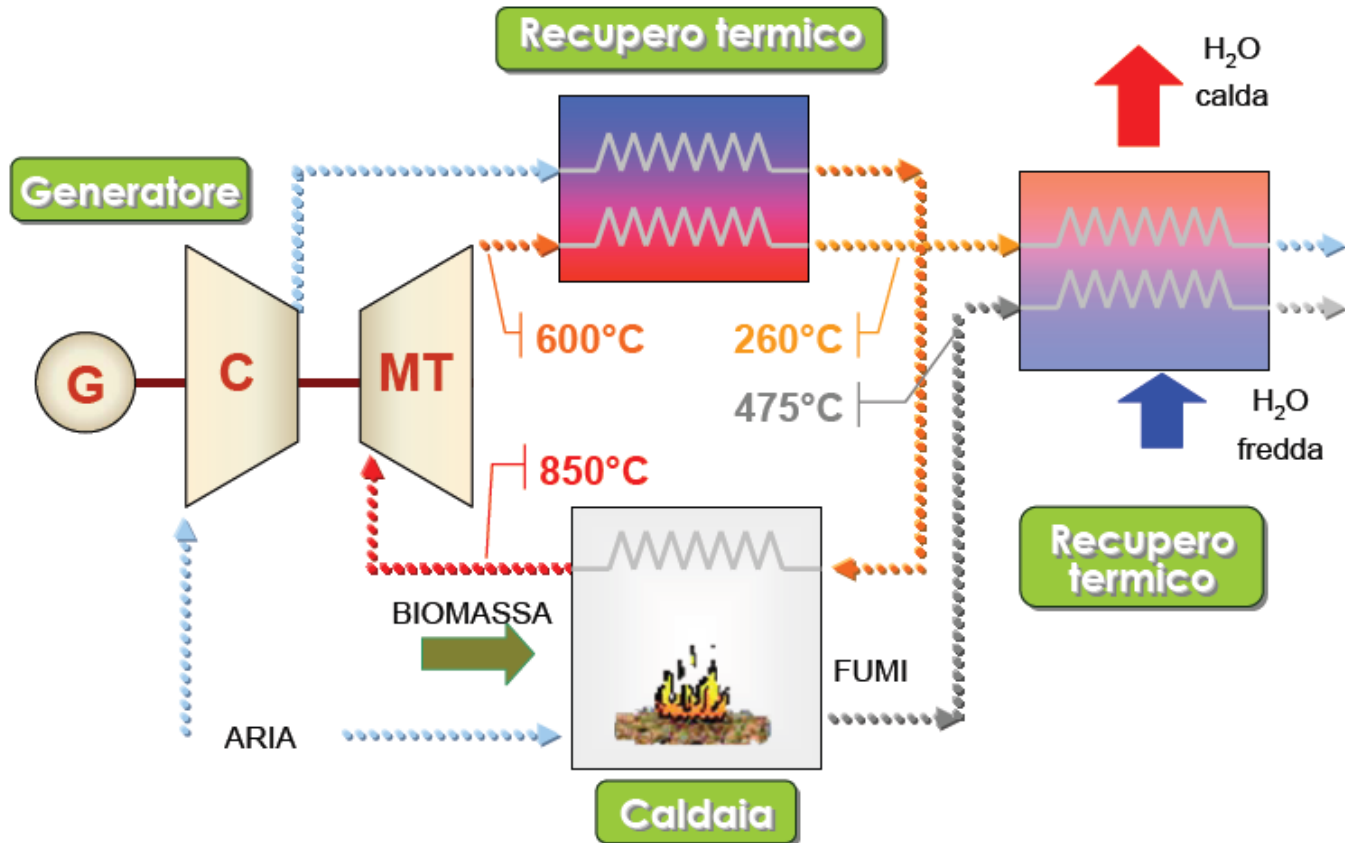
Sistema Power Tep - EPS

- ✓ 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 kW_e
- ✓ Potenza termica caldaia: 500 kW_t
- ✓ Potenza termica scaricata: 300 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 kW_e
 - ✓ Potenza termica caldaia: 450 kW_t
 - ✓ Potenza termica scaricata: 155 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.

SCAMBIATORE LATO ARIA MICROTURBINA		
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 Colleferro (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_{el}
- ✓ Potenza termica caldaia: 450 kW_t
- ✓ Potenza termica utile: 300 kW_t
- ✓ Potenza frigorifera utile: 100 kW_t
- ✓ Rendimento elettrico: 16 %

Le tecnologie

Tecnologie CHP a combustione interna

- ✓ Motori alternativi a combustione interna (MCI) Consolidate
- ✓ Turbine a Gas (TG) e Micro Turbine a Gas (MTG)
- ✓ Celle a combustibile - Fuel Cell (FC) In fase di consolidamento

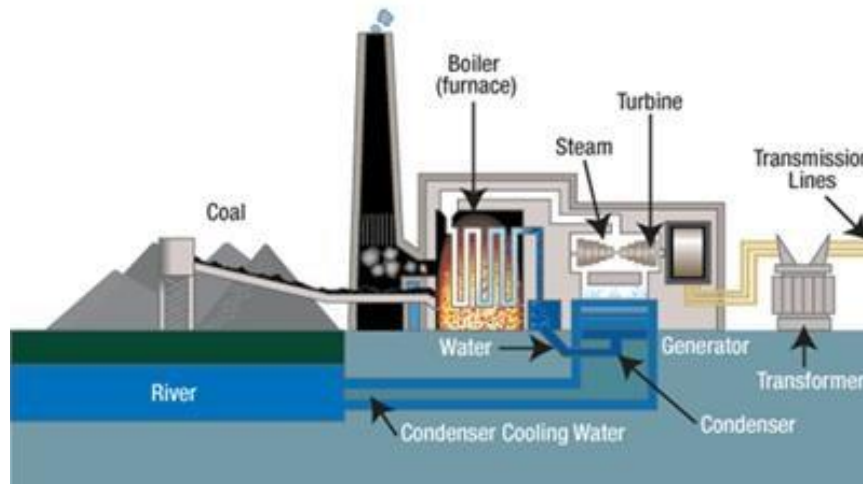
Tecnologie CHP a combustione esterna

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

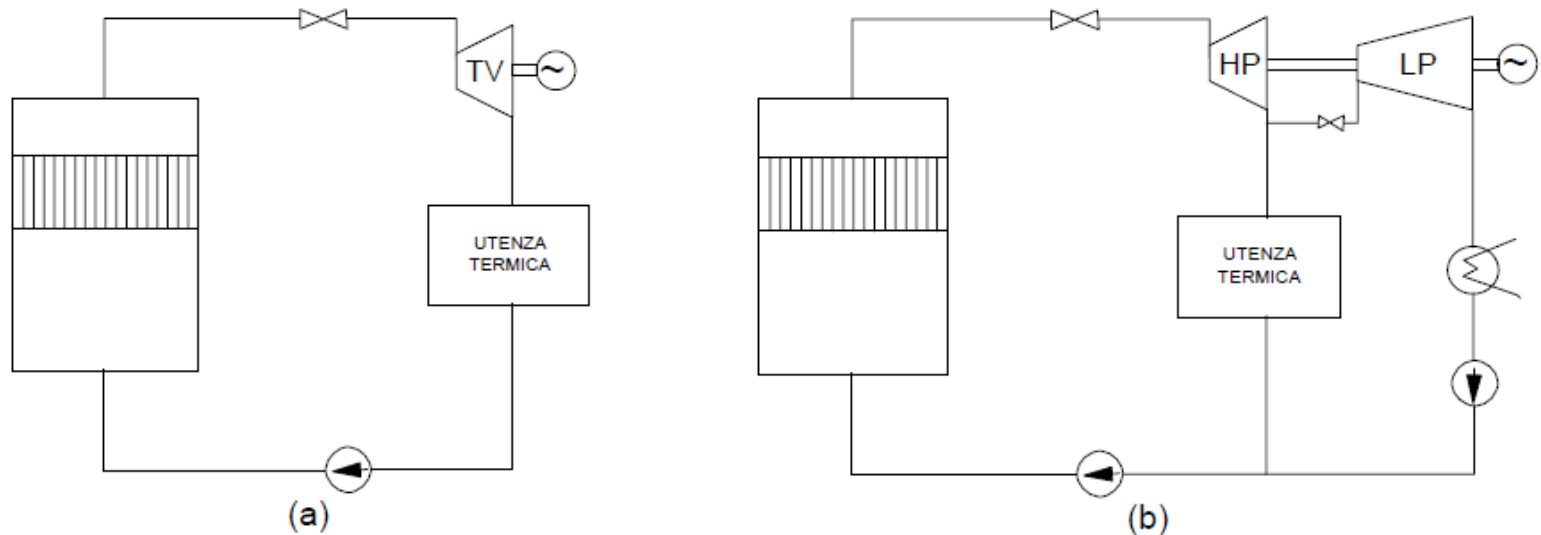
Il ciclo a vapore è molto flessibile riguardo alle fonti utilizzabili per produrre energia in quanto le diverse tipologie di caldaie (a griglia, letto fluido, a polverino, ecc.) permettono l'impiego di gas naturale, olii, carbone, biomasse, rifiuti solidi urbani (termovalorizzatori), etc.



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

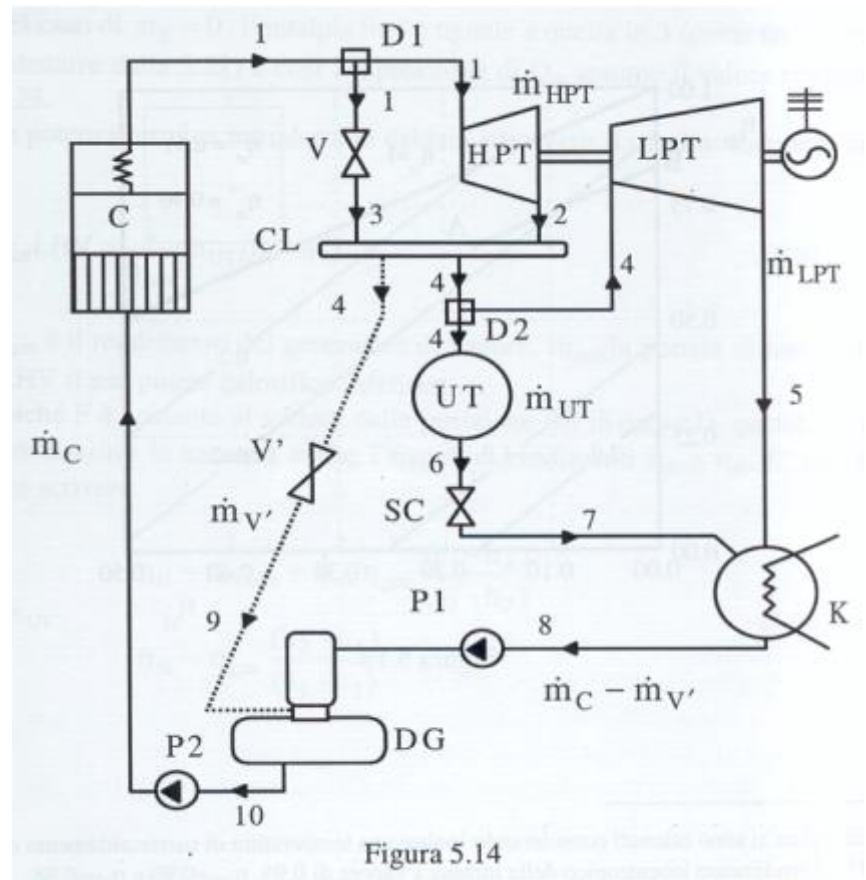
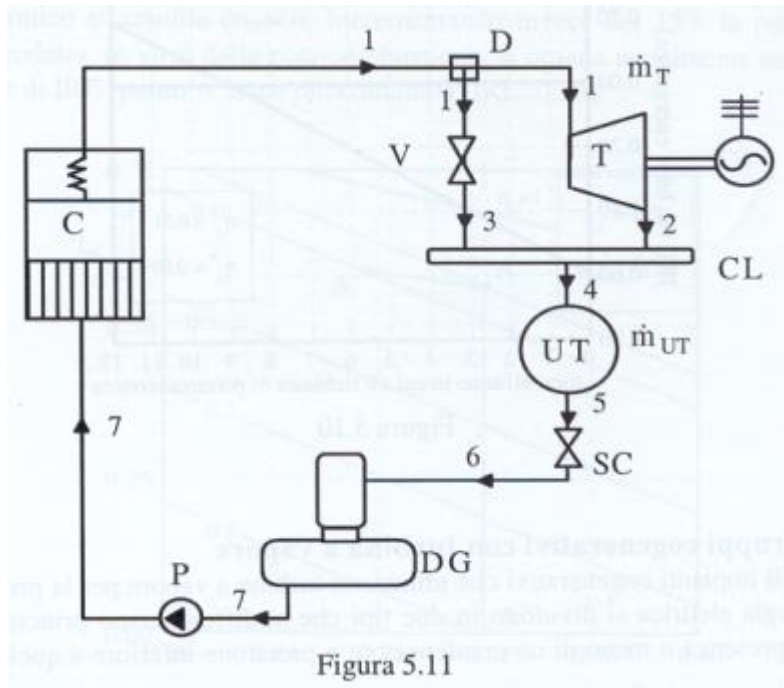
- ✓ Un ciclo a vapore cogenerativo può essere a contropressione o a spillamento



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

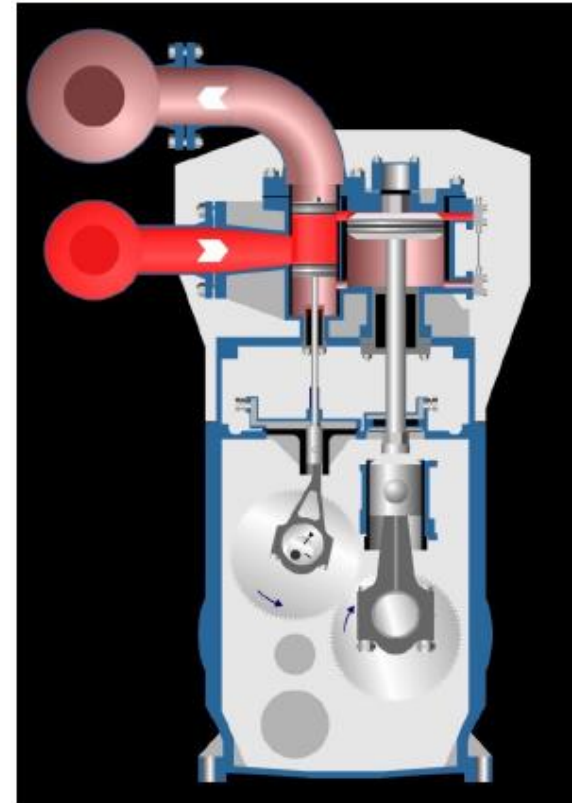


Impianti a vapore d'acqua

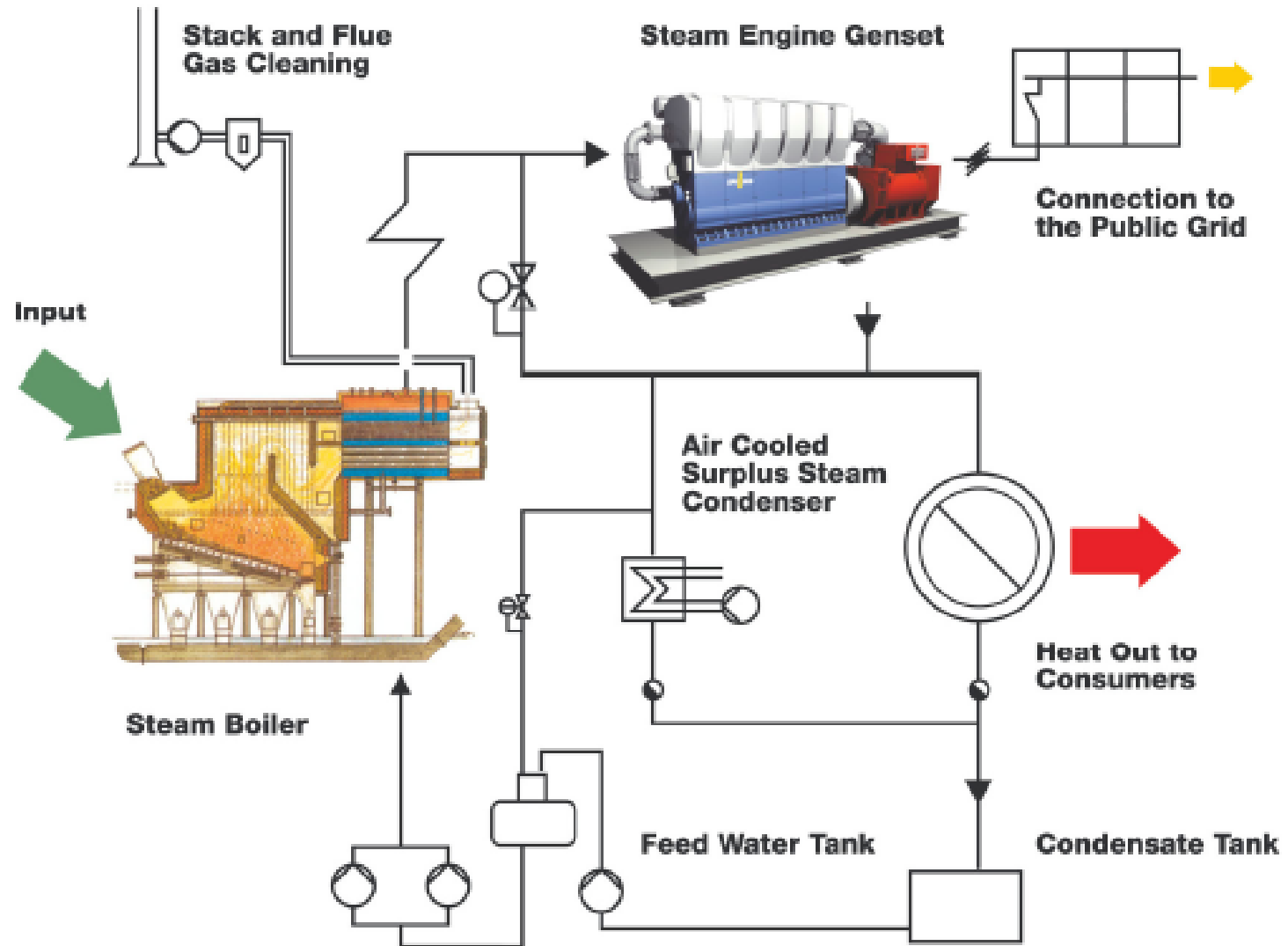
- ✓ Gli impianti a vapore hanno un rendimento elettrico in assetto cogenerativo che si attesta nel range 15-30 % e un rendimento termico che può arrivare al 60 %.
- ✓ L'energia termica è messa a disposizione sotto forma di vapore a pressioni dell'ordine di decine di bar.
- ✓ E' possibile impiegare qualsiasi 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

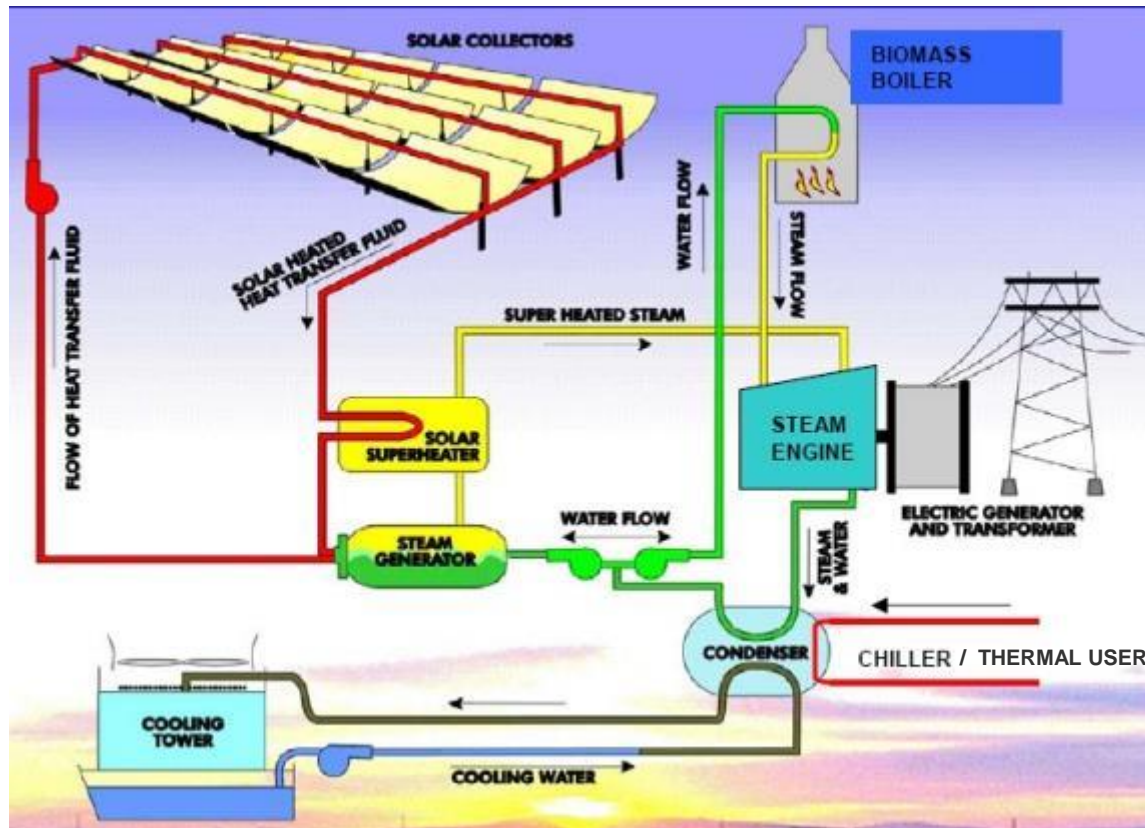
Bio Sludge Incineration
Plant

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 m²**

Potenza caldaia: **1 MW**

Potenza motore: **200 kW**

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

Producibilità dei collettori per m²: **470 kWh/m²**

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

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

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

Emissioni evitate (solare): **750 t CO₂ /anno**

Le tecnologie

Tecnologie CHP a combustione interna

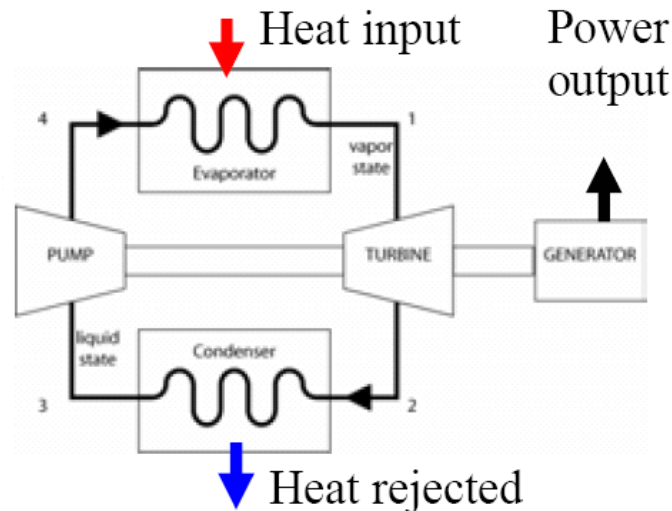
- ✓ Motori alternativi a combustione interna (MCI) Consolidate
- ✓ Turbine a Gas (TG) e Micro Turbine a Gas (MTG)
- ✓ Celle a combustibile - Fuel Cell (FC) In fase di consolidamento

Tecnologie CHP a combustione esterna

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

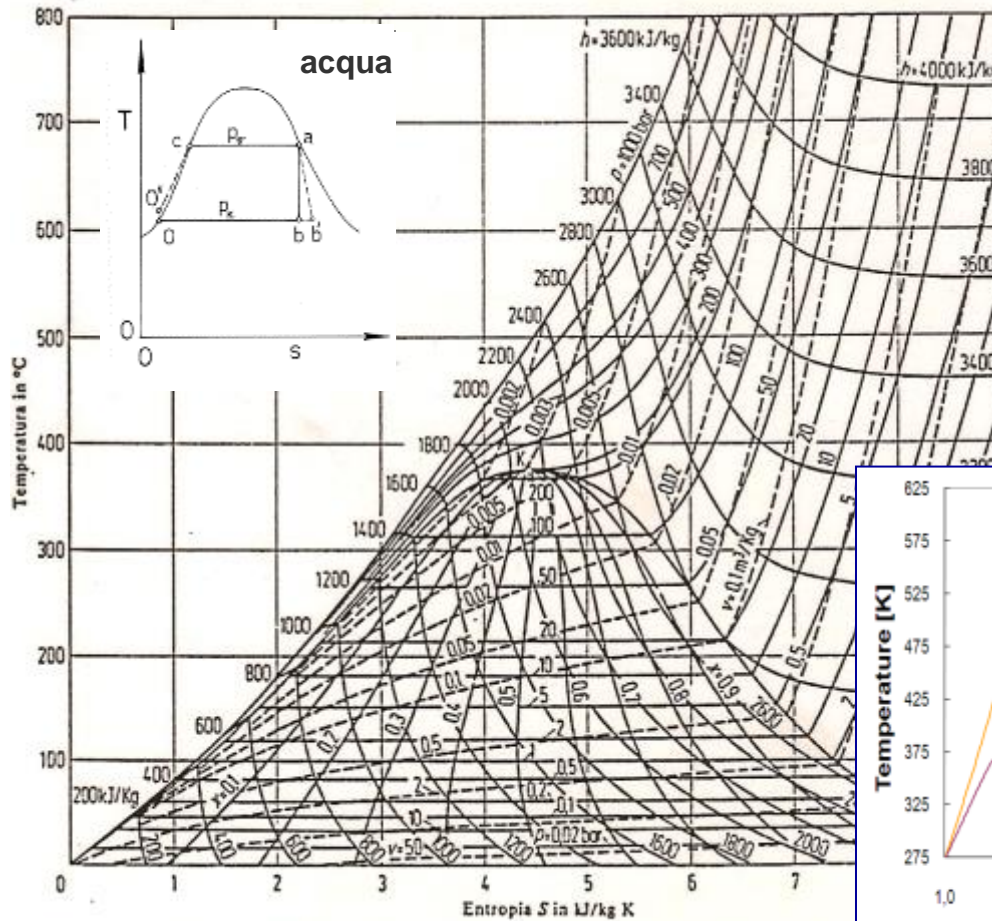
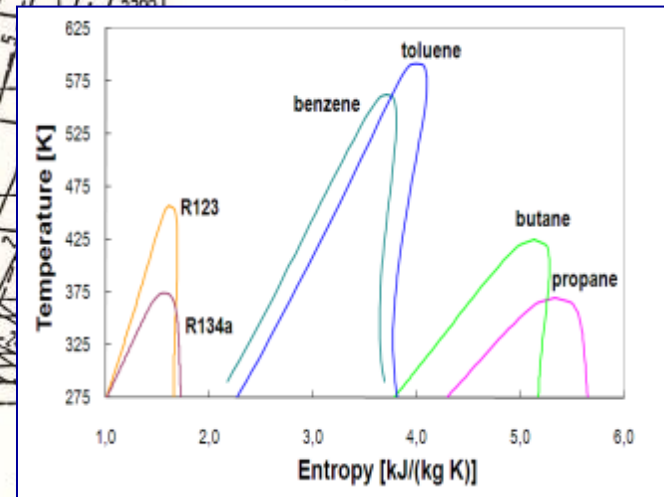
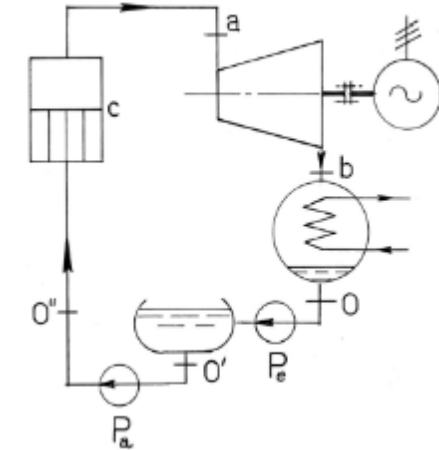
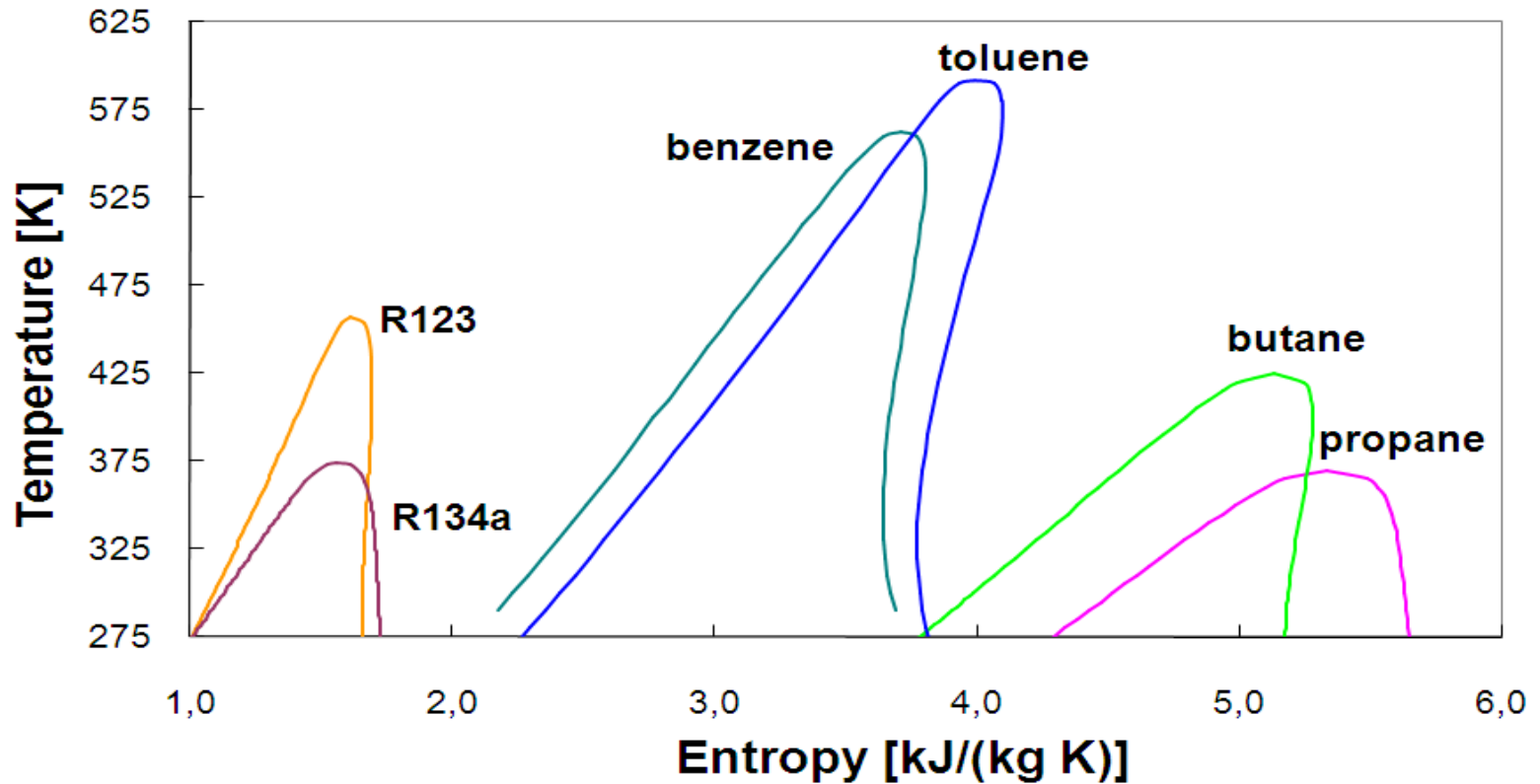


Diagramma T, s per il vapore d'acqua (Editori Springer e R. Oldenbourg)



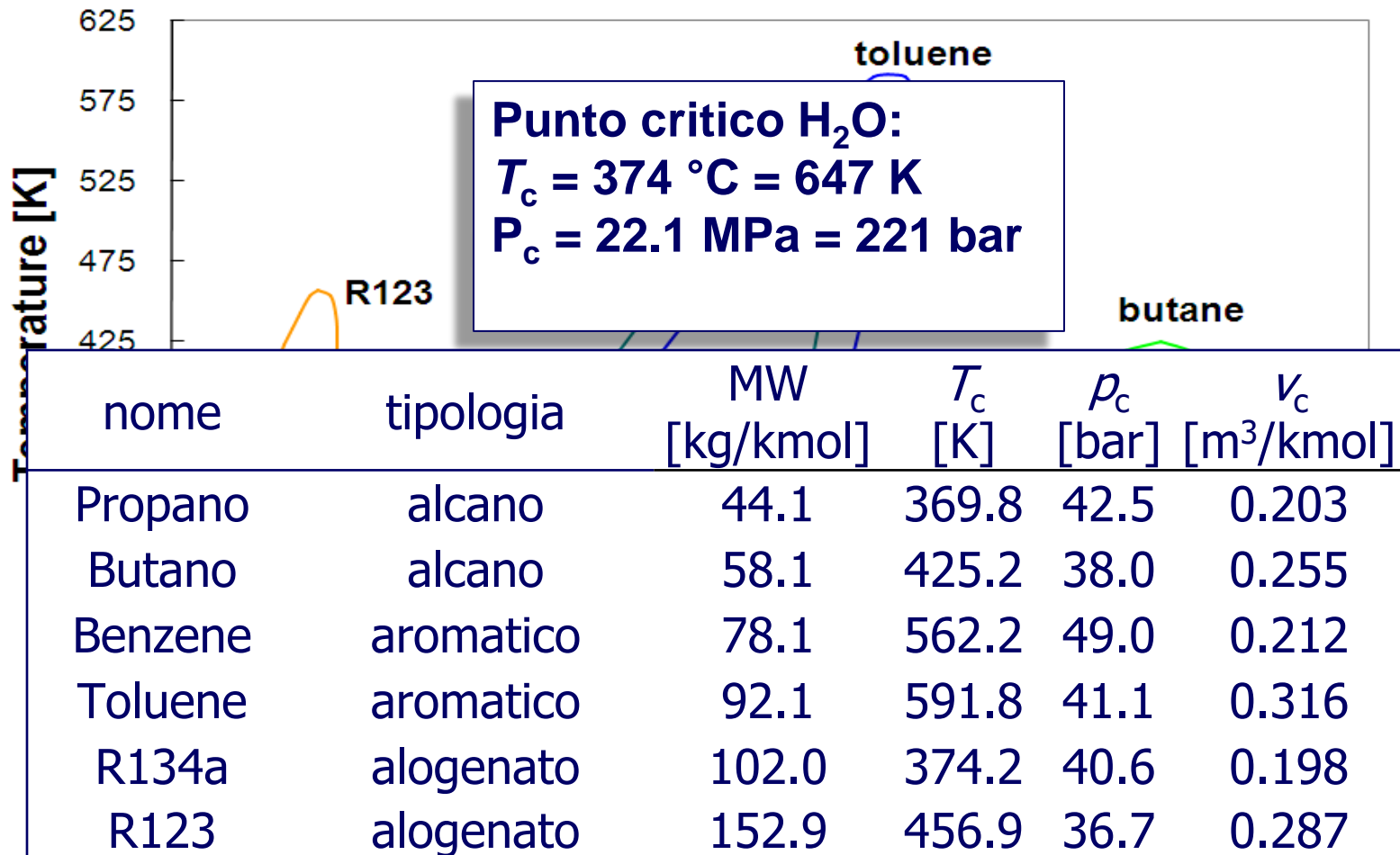
Organic Rankine Cycle (ORC)

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

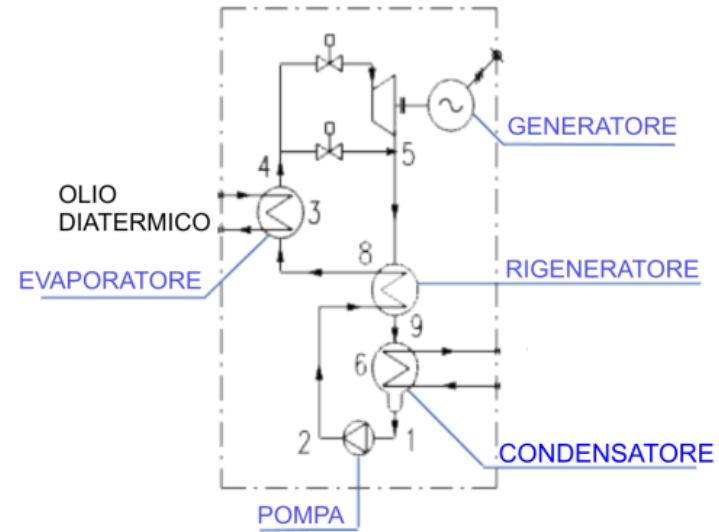
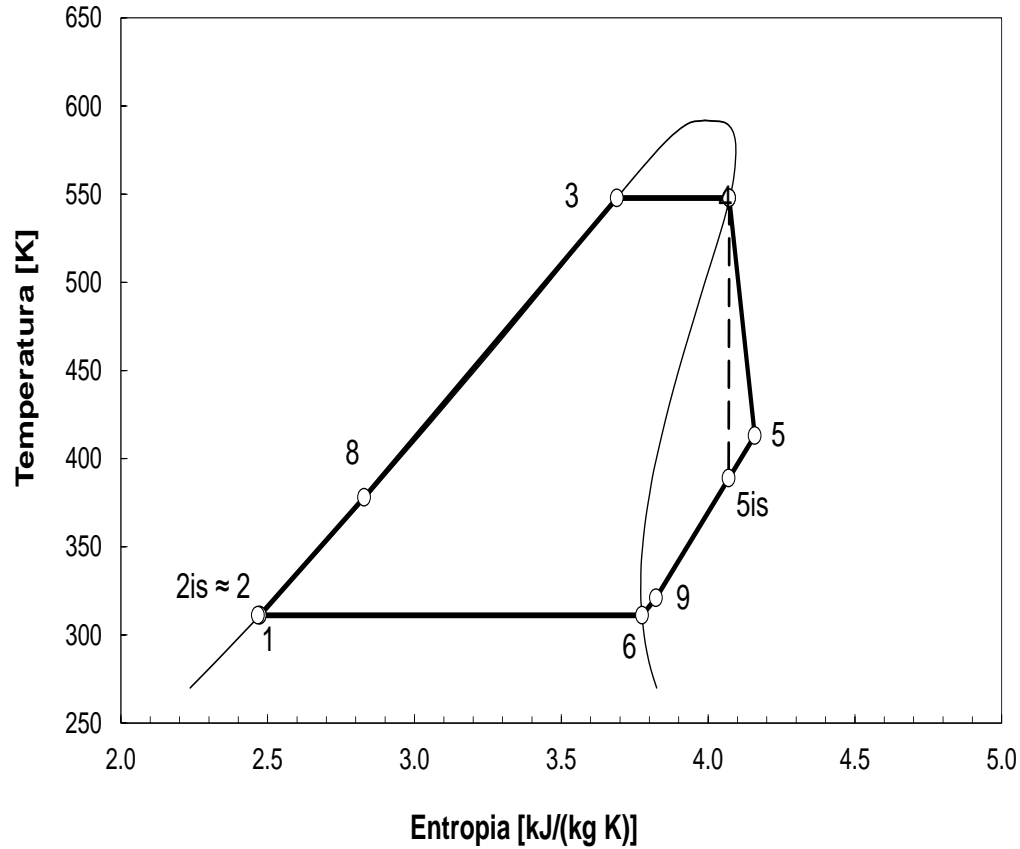


Organic Rankine Cycle (ORC)

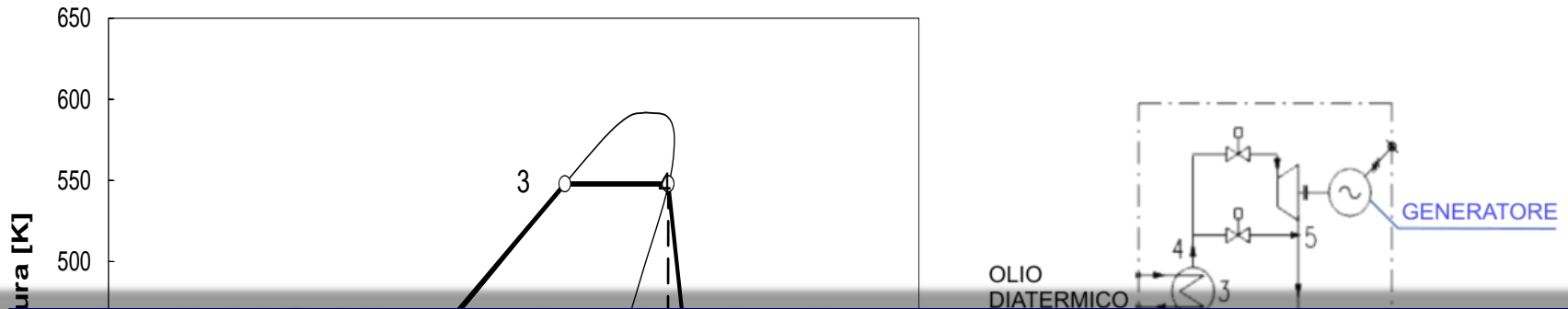
- ✓ I cicli a **fluido organico (ORC)** consentono di superare alcuni limiti imposti dall'utilizzo del vapore d'acqua.



Organic Rankine Cycle (ORC)



Organic Rankine Cycle (ORC)

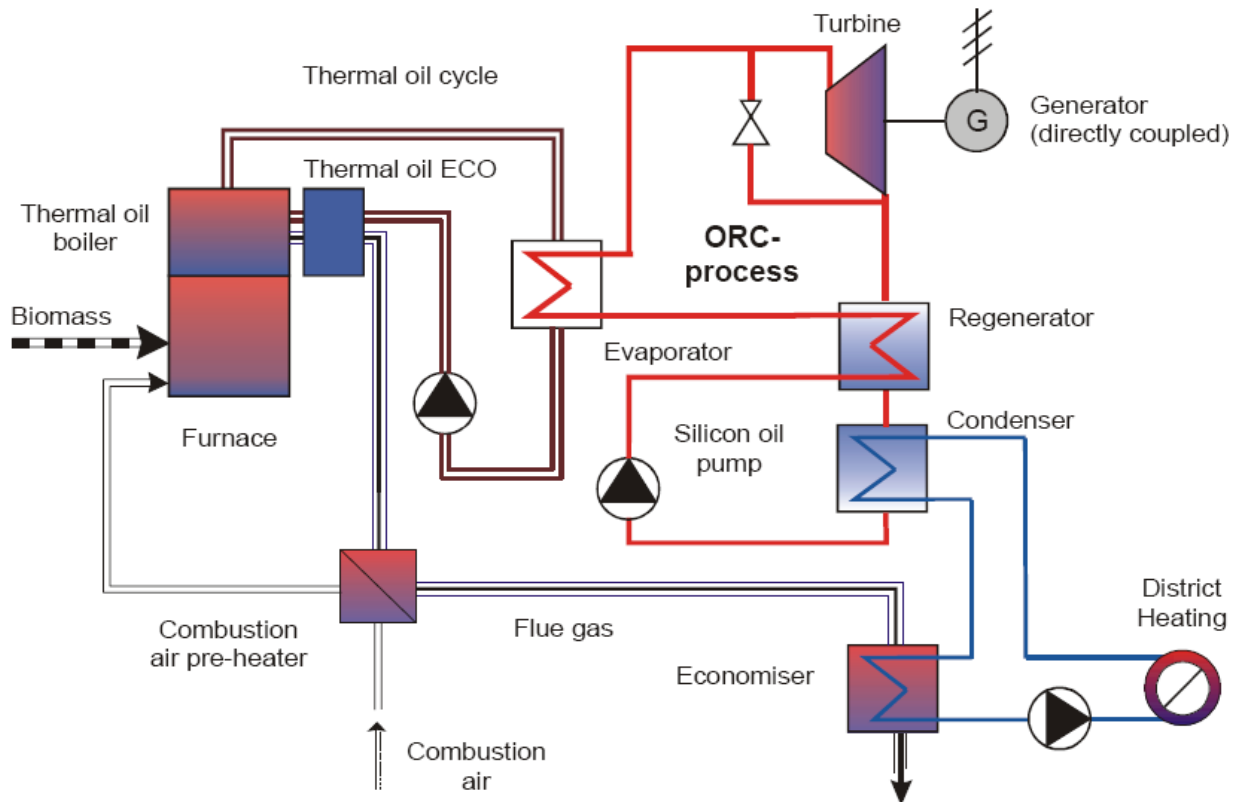


Vantaggi del fluido organico rispetto al vapor d'acqua

- ✓ 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)

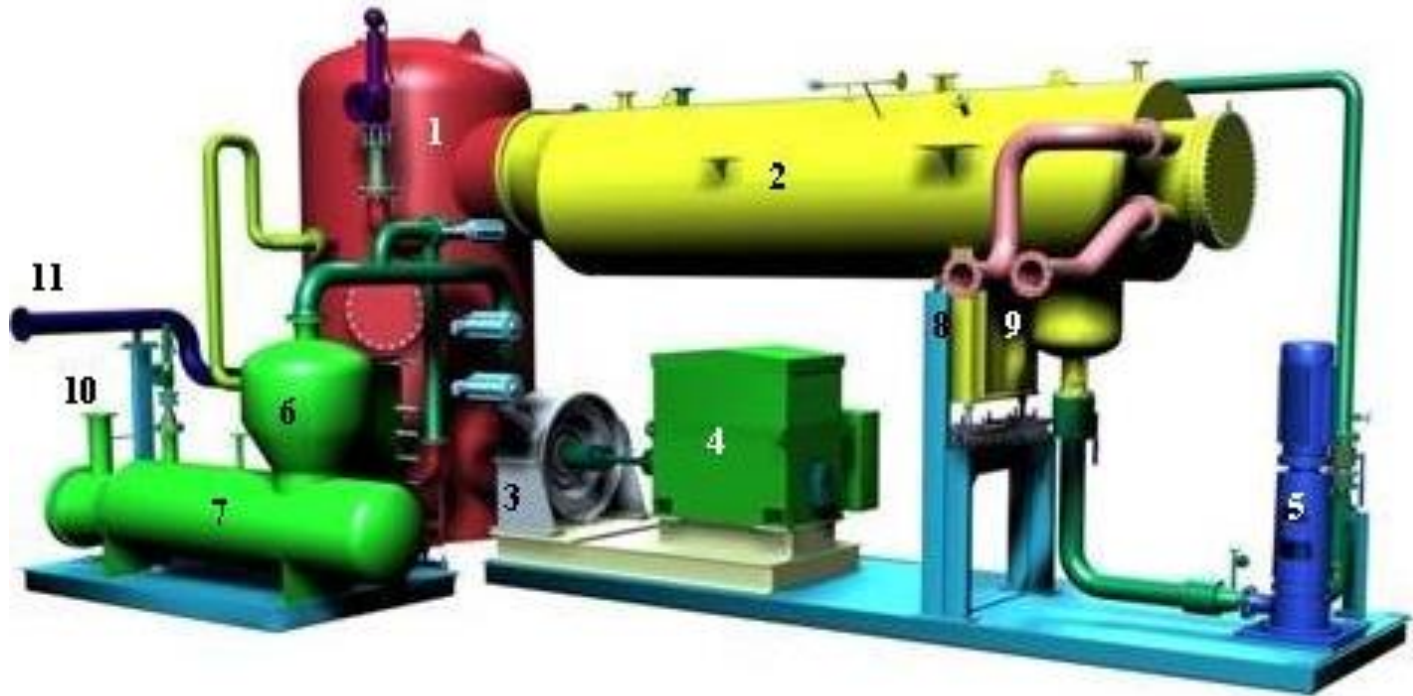
- ✓ Fluido vettore: olio diatermico a 250-300°C
- ✓ Rigeneratore per recuperare parte del contenuto entalpico non sfruttato in turbina



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. 400V	asincrono trifase B.T. 400V	asincrono trifase B.T. 400V	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

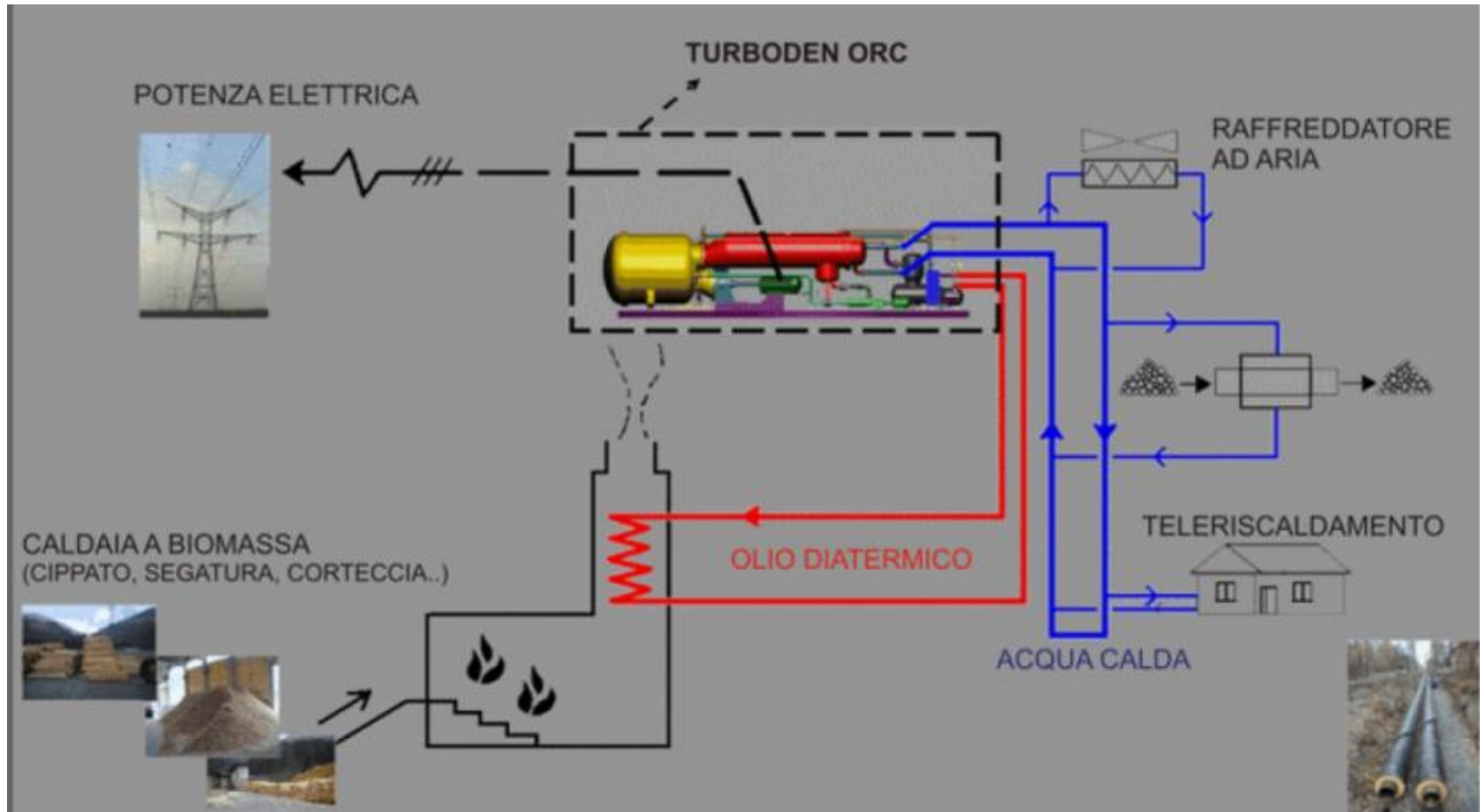
* Il sistema split Turboden permette di massimizzare la produzione elettrica a pari consumo biomassa.

** 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_e

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 77-122 °C	kW	1600
Potenza elettrica netta	kW	110

Potenza termica ingresso acqua 77-116 °C	kW	860
Potenza elettrica netta	kW	65

Potenza termica ingresso acqua 77-116 °C	kW	650
Potenza elettrica netta	kW	35

ORC di piccola potenza

- ✓ Recentemente proposti ORC di taglie inferiori a 200 kW

Rank.[®]
Organic Rankine Cycle (ORC) Equipment



Rank.[®]

LT1	MT1	HT1	HTC1
LT2	MT2	HT2	HTC2
LT3	MT3	HT3	HTC3
LT4	MT4	HT4	

90°C

120°C

150°C

180°C

210°C

ORC di piccola potenza

Technical Data

LT1

LT2

LT3

LT4



Heat source

Heat transfer fluid *	Water	Water	Water	Water
Inlet temperature (°C)	90-120	90-120	90-120	90-120
Outlet temperature (°C)	80-110	80-110	80-110	80-110
Volumetric flow rate (m³/h)	17	37	78	165
Thermal power (kWt)	125-250	250-500	500-1 000	1 000-2 000
Connections diameter (PN16)	DN80	DN100	DN150	DN200
Pressure drop (kPa)	125	125	125	125
Heat transfer fluid inner volume (L)	20	50	120	250



Useful heat

Heat transfer fluid	Water	Water	Water	Water
Inlet temperature (°C)	20-40	20-40	20-40	20-40
Outlet temperature (°C)	30-50	30-50	30-50	30-50
Volumetric flow rate (m³/h)	14	30	63	125
Thermal power (kWt)	100-200	200-400	400-800	800-1 600
Connections diameter	DN65	DN100	DN150	DN200
Pressure drop (kPa)	125	125	125	125
Heat transfer fluid inner volume (L)	15	50	120	250



Electricity

Gross power (kWe)	8-22	20-45	45-85	80-175
Net power (kWe)	8-20	15-40	30-80	60-160
Voltage (V)	3 x 400	3 x 400	3 x 400	3 x 400
Frequency (Hz)	50/60	50/60	50/60	50/60
Intensity (A)	31.5	64	127	250

Data Connection	RJ45	RJ45	RJ45	RJ45
-----------------	------	------	------	------

Dimensions	A – Length (mm)	3 350	4 850	5 800	7 000
	B – Wide (mm)	1 550	2 050	2 250	2 250
	C – High (mm)	2 200	2 500	2 500	2 500

Weight	kg	5 500	6 500	8 000	10 500
--------	----	-------	-------	-------	--------

Container transport (optional)		DC 20'	HC 20'	HC 20'	HC 40'
--------------------------------	--	--------	--------	--------	--------




* The heat transfer fluid can be water, steam or thermal oil

DC (dry container), HC (high cube)

ORC di piccola potenza

Technical Data

HT1 HT2 HT3 HT4

	Heat source	Heat transfer fluid *	Thermal Oil	Thermal Oil	Thermal Oil	Thermal Oil
		Inlet temperature (°C)	150-180	150-180	150-180	150-180
		Outlet temperature (°C)	110-140	110-140	110-140	110-140
		Volumetric flow rate (m³/h)	13	26	56	112
		Thermal power (kWt)	200-300	400-600	850-1 350	1 700-2 700
		Connections diameter (PN16)	DN65	DN80	DN100	DN150
		Pressure drop (kPa)	100	100	100	125
		Heat transfer fluid inner volume (L)	20	45	100	160
	Useful heat	Heat transfer fluid	Water	Water	Water	Water
		Inlet temperature (°C)	20-40	20-40	20-40	20-40
		Outlet temperature (°C)	30-50	30-50	30-50	30-50
		Volumetric flow rate (m³/h)	17	36	77	154
		Thermal power (kWt)	150-200	300-450	600-950	1 200-1 900
		Connections diameter	DN65	DN100	DN150	DN150
		Pressure drop (kPa)	125	125	125	125
Heat transfer fluid inner volume (L)	15	45	100	160		
	Electricity	Gross power (kWe)	20-30	40-65	90-140	180-280
		Net power (kWe)	18-25	35-55	80-120	160-240
		Voltage (V)	3 x 400	3 x 400	3 x 400	3 x 400
		Frequency (Hz)	50/60	50/60	50/60	50/60
		Intensity (A)	54	122	220	440
	Data Connection	RJ45	RJ45	RJ45	RJ45	
Dimensions	A – Length (mm)	3 350	4 850	5 500	6 000	
	B – Wide (mm)	1 550	2 050	2 250	2 250	
	C – High (mm)	2 200	2 500	2 500	2 500	
Weight	kg	5 500	6 500	8 000	10 000	
	Container transport (optional)	DC 20'	HC 20'	HC 20'	HC 20'	

* The heat transfer fluid can be water, steam or thermal oil

DC (dry container), HC (high cube)

Micro Cicli Rankine

Rank.[®] MICRO

Technical data



Heat source

Heat transfer fluid	Water	-
Inlet temperature	90-120	°C
Outlet temperature	80-110	°C
Volumetric flow rate	3	m ³ /h
Thermal power	20-45	kWt
Connections diameter	DN25 PN16	-
Pressure drop	50	kPa
Heat transfer fluid inner volume	3	L



Useful heat

Heat transfer fluid	Water	-
Inlet temperature	20-40	°C
Outlet temperature	30-50	°C
Volumetric flow rate	2	m ³ /h
Thermal power	15-40	kWt
Connections diameter	DN25 PN16	-
Pressure drop	100	kPa
Heat transfer fluid inner volume	4	L



Electricity

Gross power	1.5-3	kWe
Net power	1-2.5	kWe
Voltage	3 x 400	V
Frequency	50/60	Hz
Intensity	5	A

Data Connection	RJ45	-
-----------------	------	---

Dimensions	A - Length	1 200	mm
	B - Wide	800	mm
	C - High	1 500	mm

Weight	750	kg
--------	-----	----

Micro Cicli Rankine



KAYMACOR (Italia) - KC-morgen2

- $P_i @ 145 \text{ }^\circ\text{C} = 20 \text{ kW}_{th}$
- $P_{th} @ 40 \text{ }^\circ\text{C} = 17 \text{ kW}_{th}$
- $P_e = 1.5 \text{ kW}_e$

KAYMACOR (Italia) - KC-morgen4

- $P_i @ 145 \text{ }^\circ\text{C} = 40 \text{ kW}_{th}$
- $P_{th} @ 40 \text{ }^\circ\text{C} = 36 \text{ kW}_{th}$
- $P_e = 3 \text{ kW}_e$



Newcomen (Italia) - Piglet PG3-46S

- $P_i @ 90 \text{ }^\circ\text{C} = 33 \text{ kW}_{th}$
- $P_e = 3 \text{ kW}_e$

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)

- H_2O
- espansore tipo scroll
- $P_e = 2.5 - 10 \text{ kW}_e$
- $P_{th} = 11 - 44 \text{ kW}_{th}$

Otag (Germania)

- H_2O
- espansore alternativo
- $P_e = 2.1 \text{ kW}_e$, $P_{th} = 16 \text{ kW}_{th}$



Le tecnologie

Tecnologie CHP a combustione interna

Prototipali

- ✓ 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

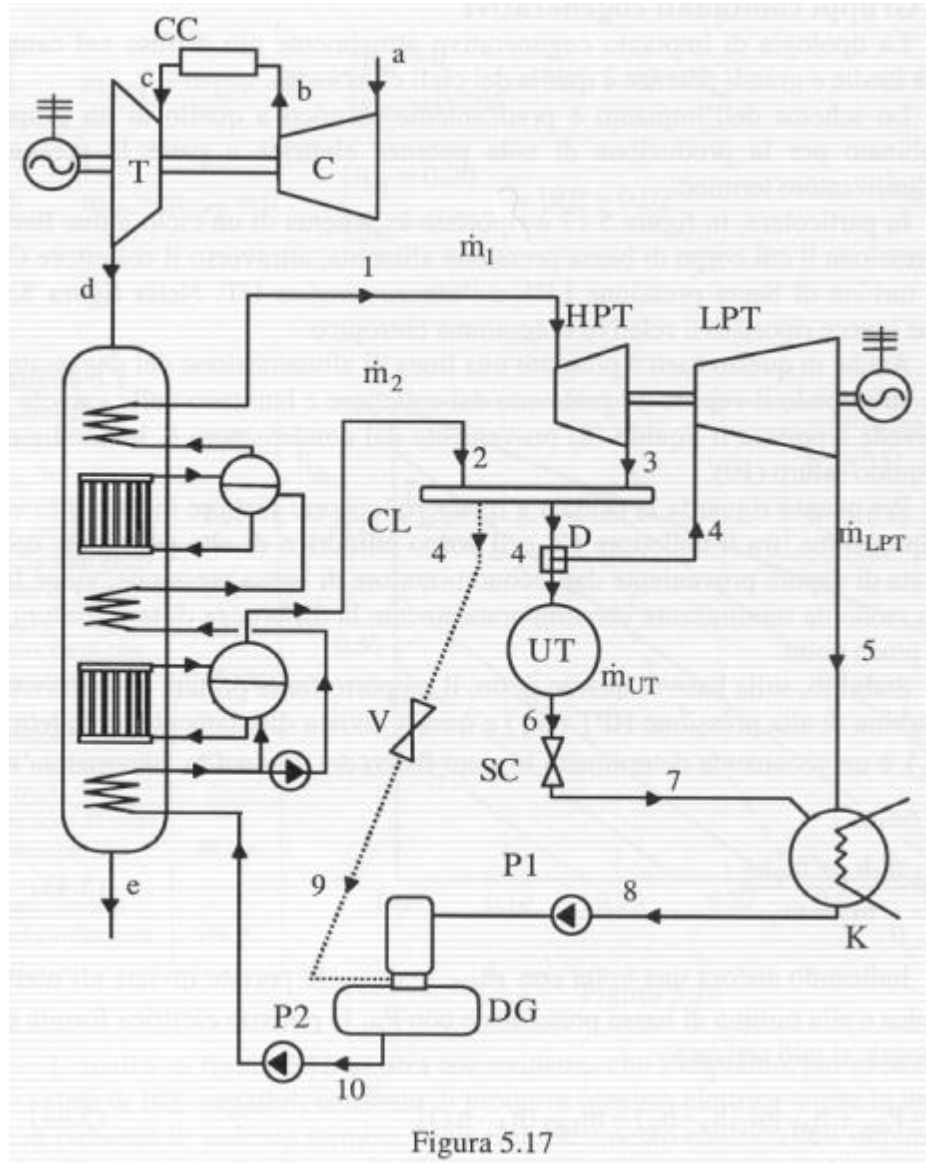
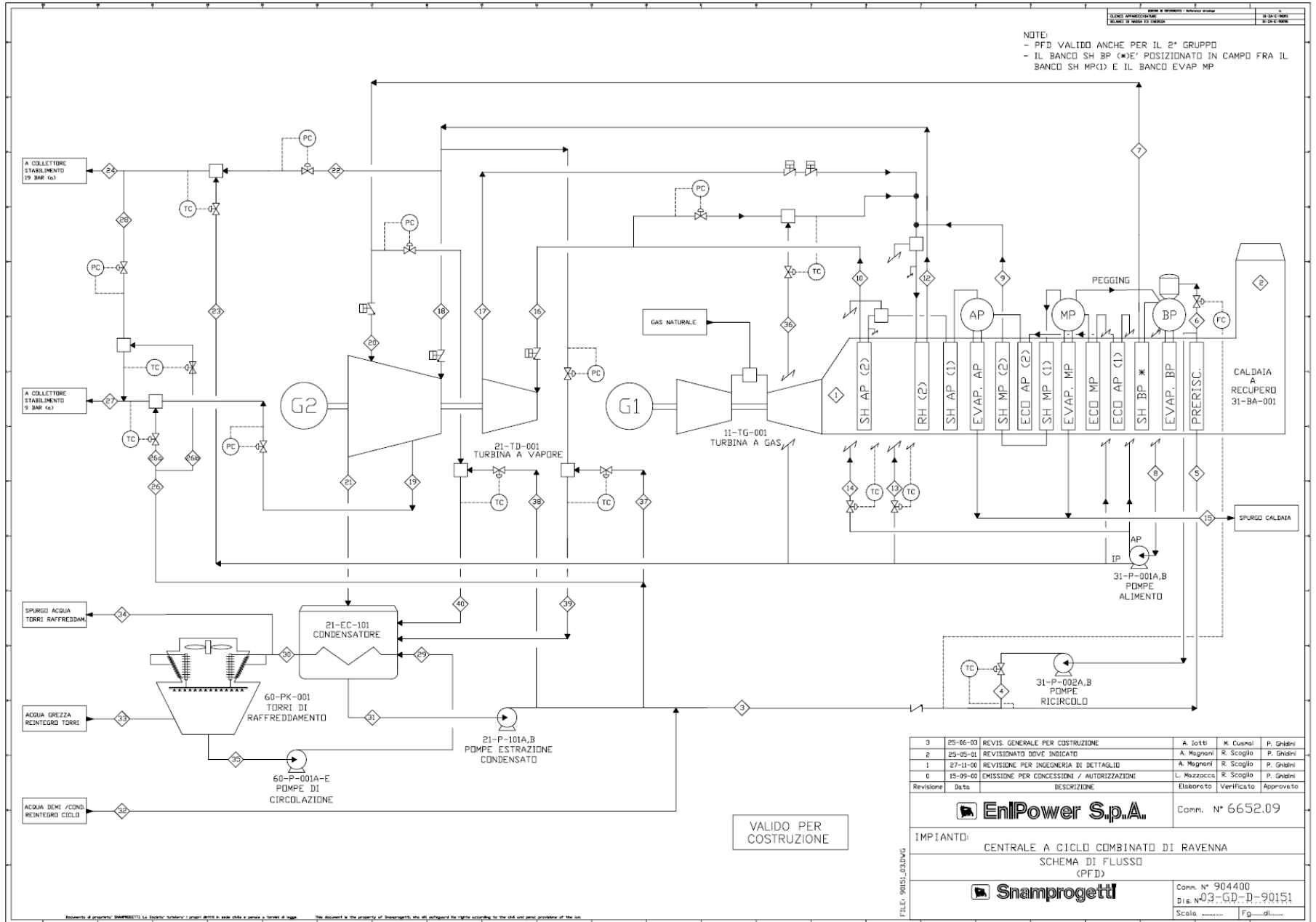
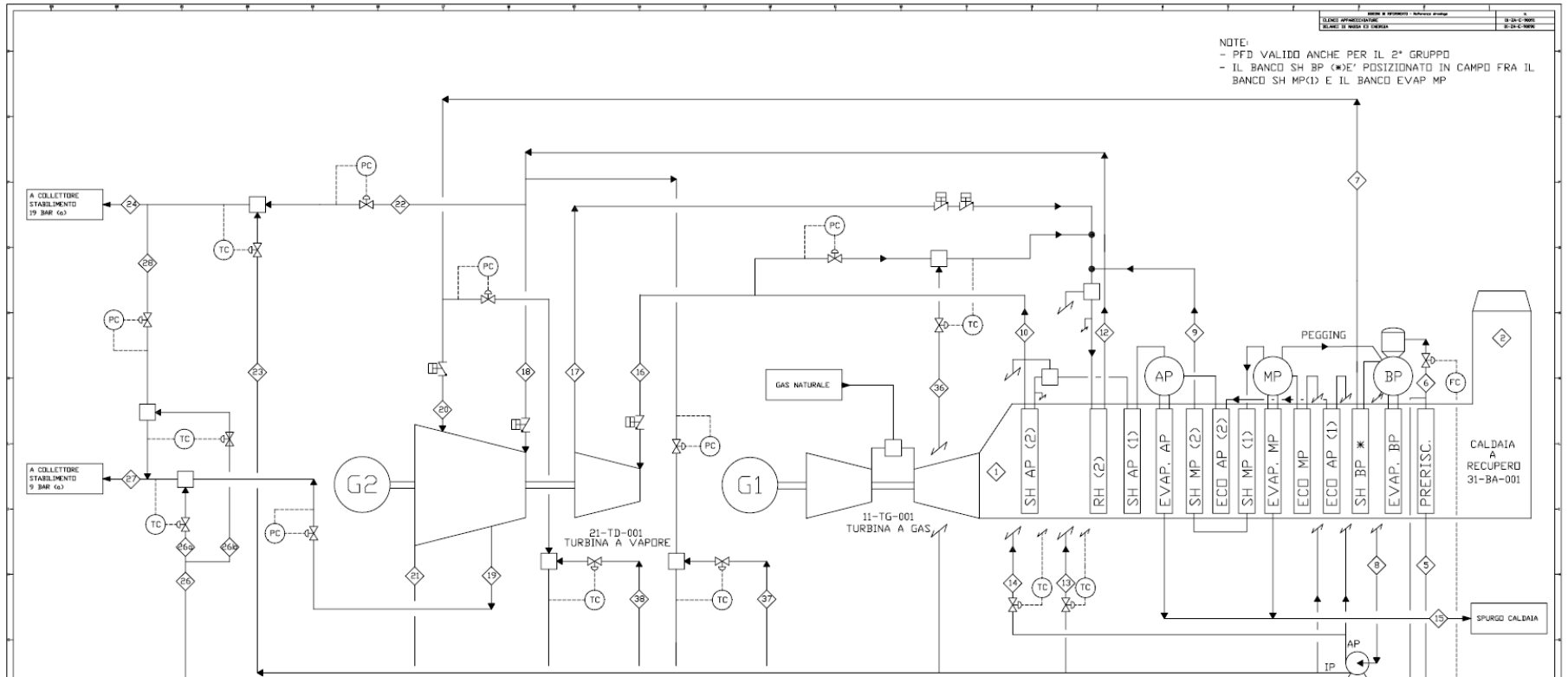


Figura 5.17

Il ciclo combinato gas-vapore



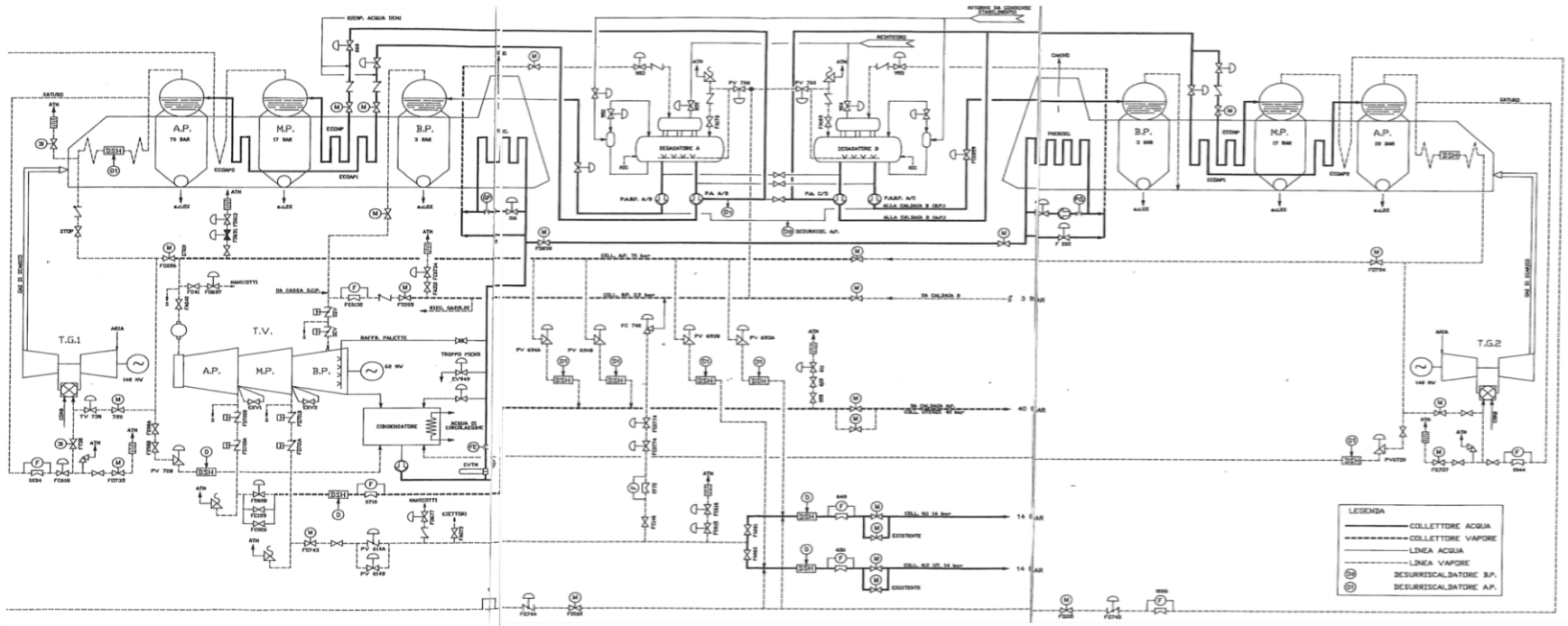
Il ciclo combinato gas-vapore



- **Nr. 1 TG ANSALDO-SIEMENS V94.3A2, $P_e = 258$ MW**
- **Nr. 1 TV a condensazione e spillamenti, $P_e = 135$ MW**
 I ammissione: $p = 115$ bar, $T = 538$ °C
 II ammissione: $p = 29$ bar, $T = 540$ °C
 III ammissione: $p = 7$ bar, $T = 261$ °C
 Spillamento : $p = 11$ bar
 scarico : $p = 0.06$ bar
- **Nr. 1 GVR a tre livelli di pressione (AP 117 bar, MP 31 bar, BP 7 bar)**

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

- ✓ Sistemi termofotovoltaici (TPV)

Tecnologie CHP a combustione esterna

Prototipali

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

Tecnologie CHP a combustione interna/esterna

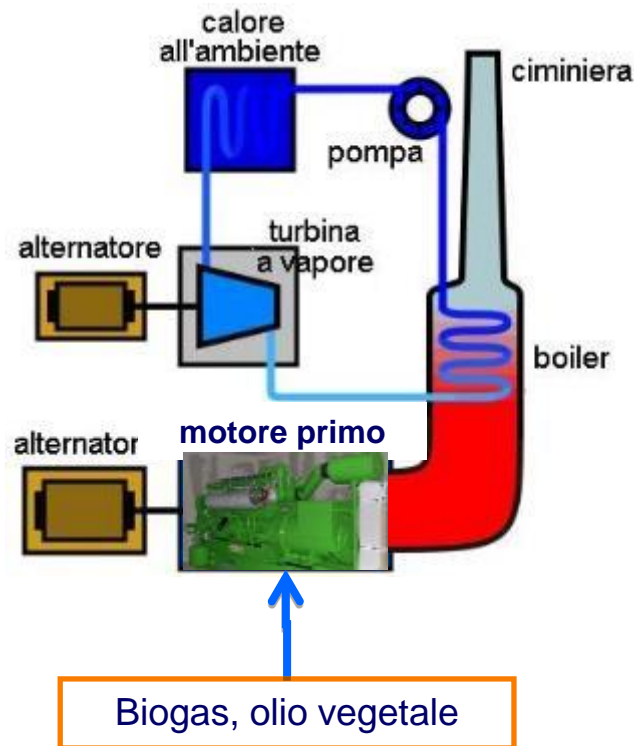
- ✓ Ciclo combinato gas-vapore
- ✓ **Ciclo combinato MCI-ORC**
- ✓ **Ciclo combinato MTG-ORC**

Consolidate

In fase di
consolidamento

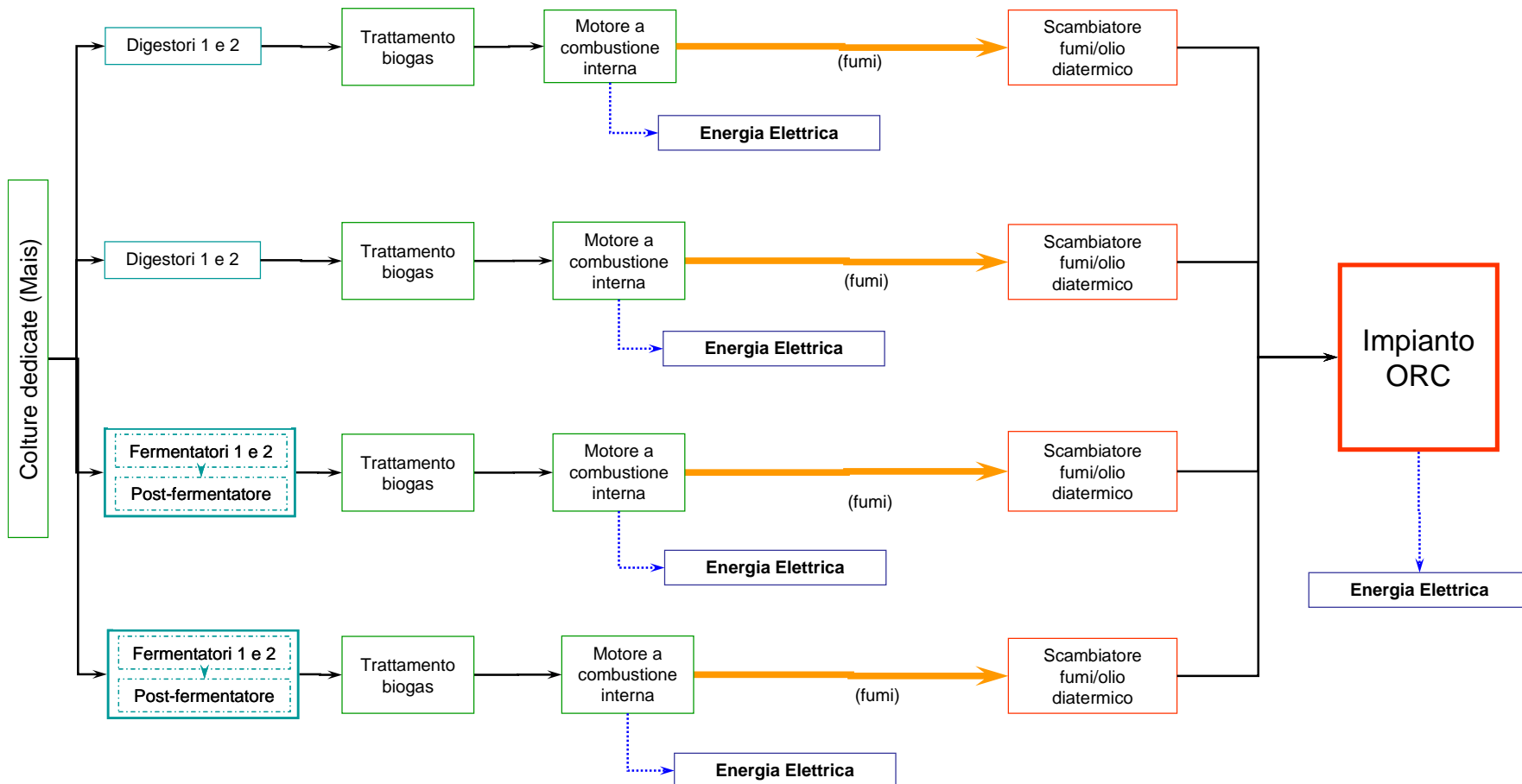
Il ciclo combinato MCI/TG-ORC

- ✓ 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

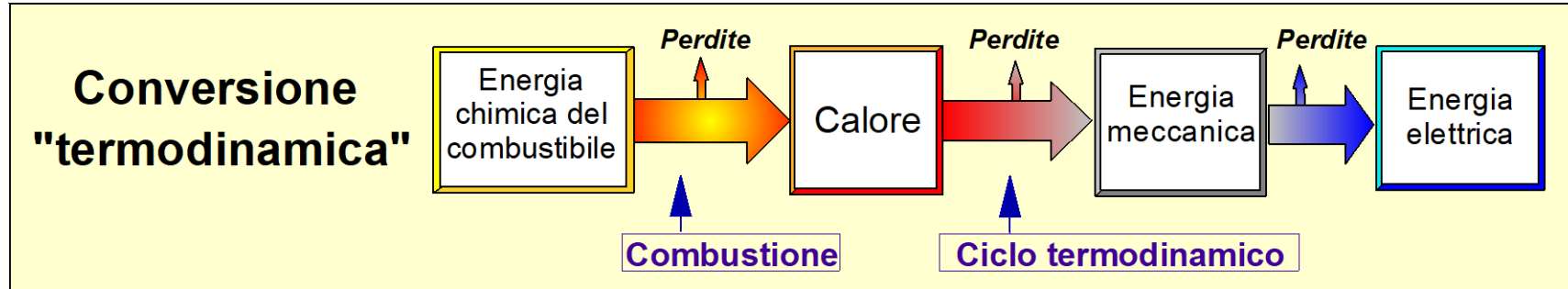
Tecnologie CHP a combustione interna

- ✓ Motori alternativi a combustione interna (MCI) Consolidate
- ✓ Turbine a Gas (TG) e Micro Turbine a Gas (MTG)
- ✓ **Celle a combustibile - Fuel Cell (FC)** In fase di consolidamento

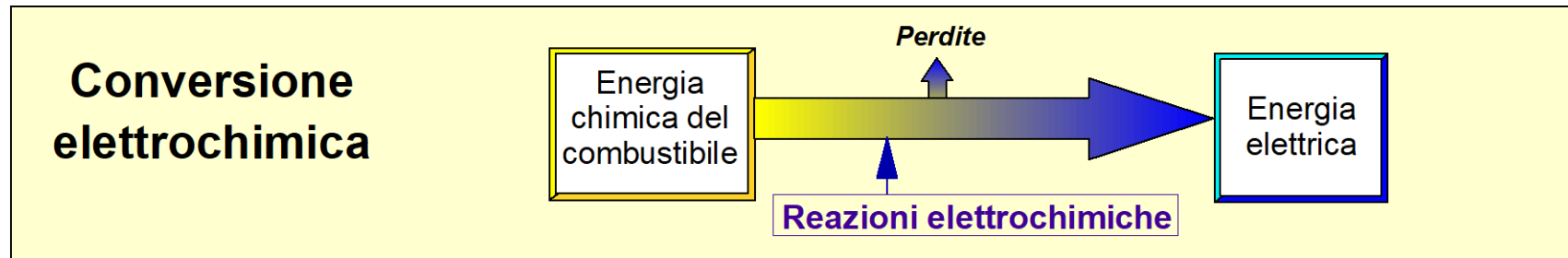
Tecnologie CHP a combustione esterna

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

Celle a combustibile



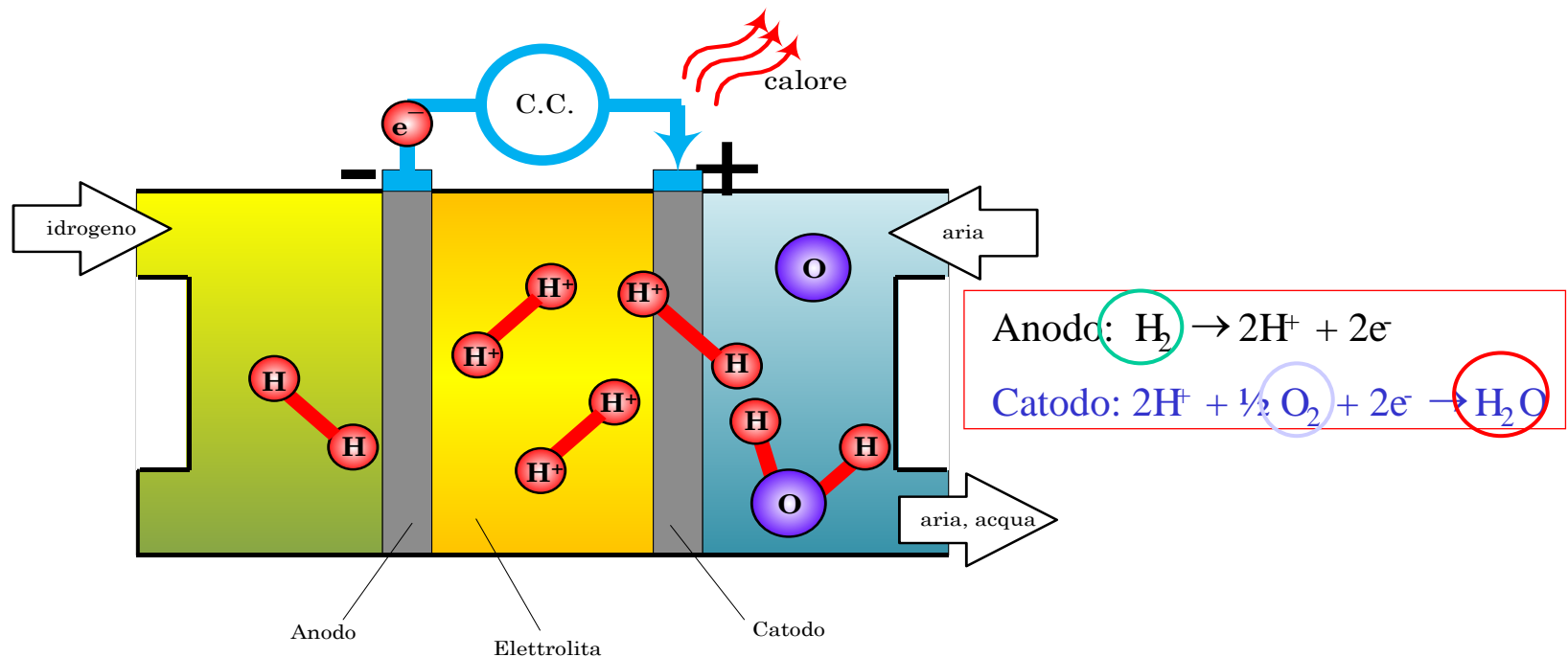
- ✓ In alternativa alla classica conversione “termodinamica”, la trasformazione dell’energia chimica di un combustibile in energia elettrica può avvenire direttamente mediante reazioni elettrochimiche all’interno delle celle a combustibile (*Fuel Cell - FC*)



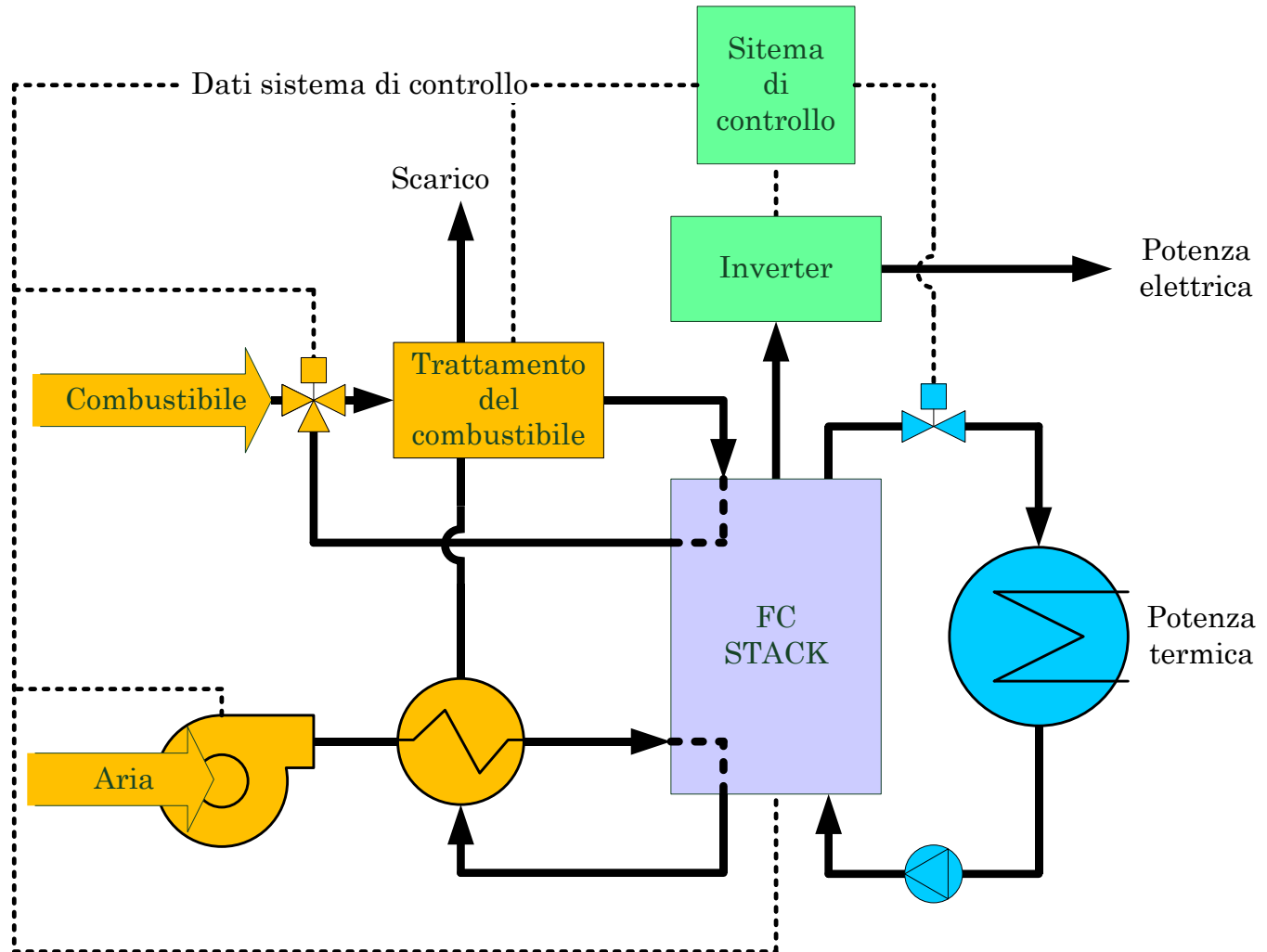
- ✓ La trasformazione elettrochimica può essere estremamente efficiente in quanto non deve sottostare alle limitazioni di rendimento imposte dal rendimento di Carnot
- ✓ La potenziale assenza di processi di combustione riduce le emissioni

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

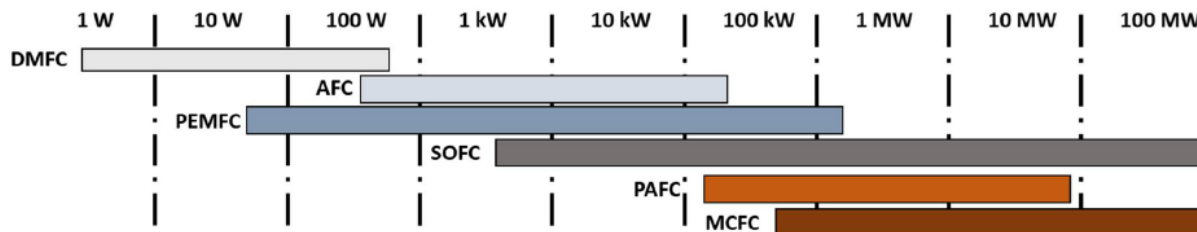
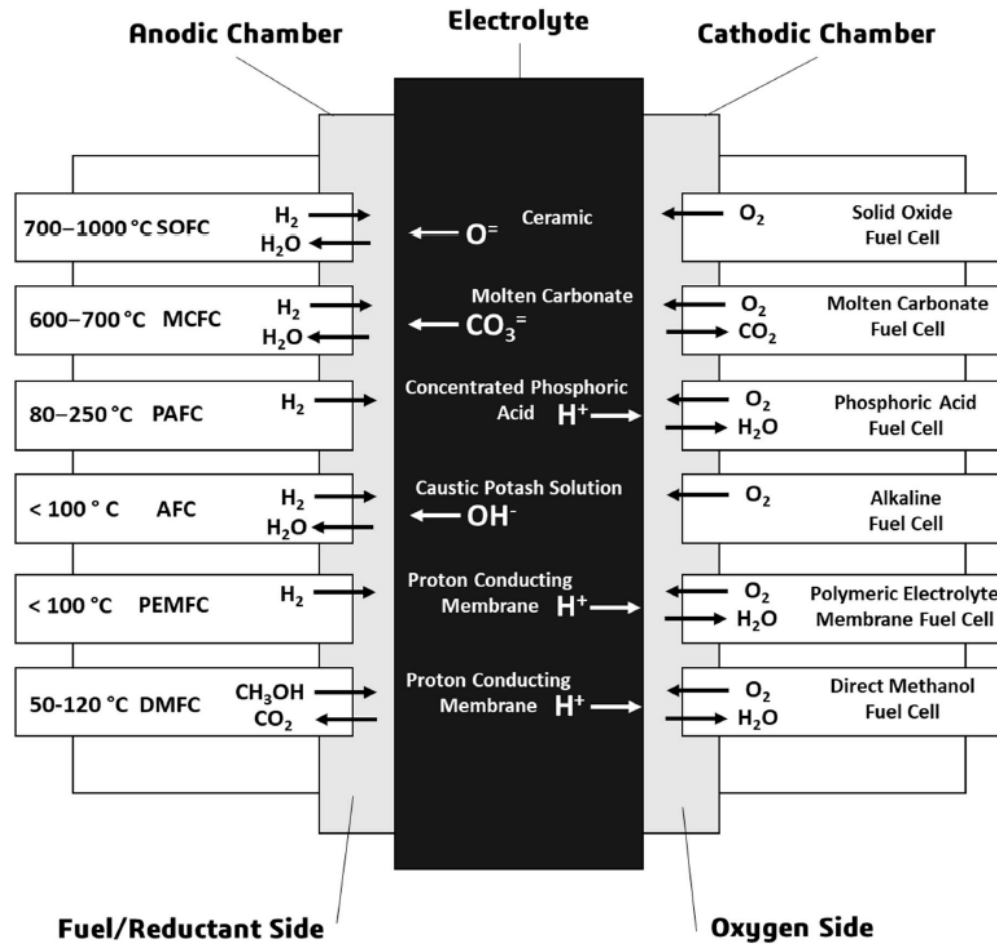
	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Elettrolita	Membrana polimerica (ioni H ⁺)	Soluzione alcalina (ioni OH ⁻)	Acido fosforico (ioni H ⁺)	Carbonati di litio fusi (ioni CO ₃ ²⁻)	Ossido di zirconio (ioni O ²⁻)
Reforming interno	No	No	No	Si	Si
Ossidante	Aria	O ₂	Aria	Aria	Aria
Temperatura di funzionamento	60-110°C	90-250°C	150-210°C	600-700°C	700-1000°C
Rendimento del sistema ⁽¹⁾	32-50%	32-50%	30-40%	> 60%	50-70%
Sostanze nocive	CO, Zolfo	CO, CO ₂ , 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	$H_2 \rightarrow 2e^- + 2H^+$	$H^+ \longrightarrow$	$2H^+ + 1/2 O_2 + 2e^- \rightarrow H_2O$	< 100
	AFC	$2e^- + 2H_2O \leftarrow H_2 + 2(OH)^-$	$\longleftarrow OH^-$	$2(OH)^- \leftarrow H_2O + 1/2 O_2 + 2e^-$	< 100
	PAFC	$H_2 \rightarrow 2e^- + 2H^+$	$H^+ \longrightarrow$	$2H^+ + 1/2 O_2 + 2e^- \rightarrow H_2O$	80 - 250
AT	MCFC	$2e^- + H_2O + CO_2 \leftarrow H_2 + CO_3^-$	$\longleftarrow CO_3^-$	$CO_3^- \leftarrow 1/2 O_2 + CO_2 + 2e^-$	600 - 700
	SOFC	$2e^- + H_2O \leftarrow H_2 + O^-$	$\longleftarrow O^-$	$O^- \leftarrow 1/2 O_2 + 2e^-$	700 - 1000

Celle a combustibile



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
- ✓ possibile funzionamento reversibile come elettrolizzatore (principalmente SOFC/SOE, ancora allo stadio prototipale)

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 CH_4 , H_2 , CO , CO_2 , H_2O)

E' inoltre necessario ridurre la concentrazione di impurezze o di elementi dannosi (es. lo zolfo in tutti i suoi composti: H_2S , 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

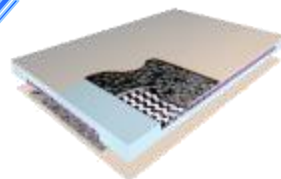


Modulo



Impianto

Stack



Fuel Cell

Esempio di moduli MCFC FuelCell Energy

Celle a combustibile

Table 1. PEMFC and SOFC, micro-CHP installation.

Country/State	Technology	Cumulated Installed Capacity [MW] *	Installations [Thousands of Units]	Price per Sale
Europe	PEMFC/SOFC	7.5	~10	10 kEuro/kW
Japan	PEMFC/SOFC	270	~360	7–8.8 kUSD/Unit

* Calculated by considering an average installation size of 0.75 kW_{el}.

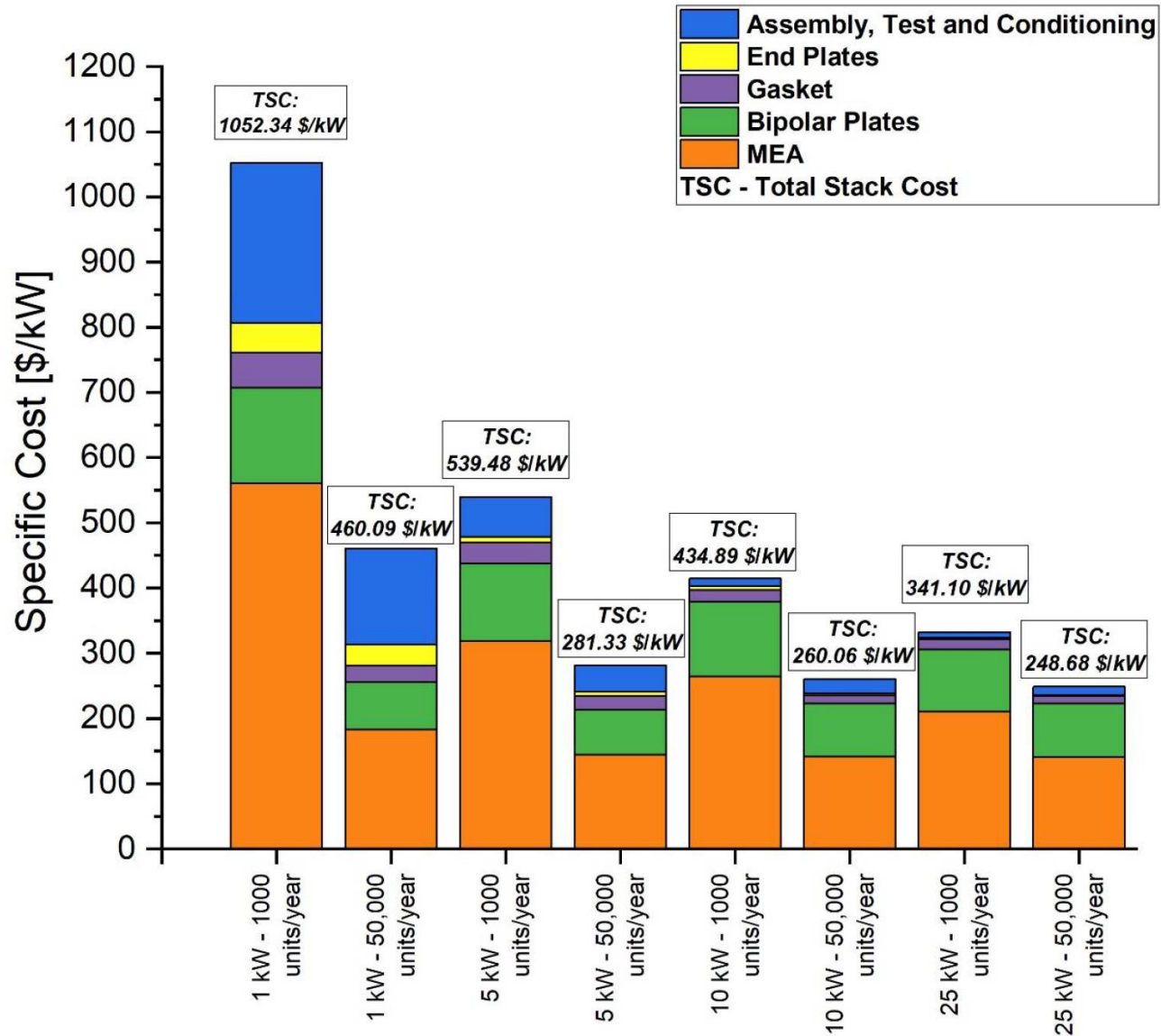
Table 2. PEMFC and SOFC, micro-CHP Performance.

Country/State	Manufacturer	Technology	Electrical Output [kW]	Electric Efficiency [%]	Total Efficiency [%]
Europe	SenerTec [81]	PEMFC	0.75	38	92
	Remeha [82]	PEMFC	0.75	38	92
	Bosch [83]	SOFC	1.5	60	Up to 88
	SOLIDpower [84]	SOFC	1.5	Up to 57	Up to 90
	Sunfire [85]	SOFC	0.75	38	88
	Viessmann [86]	PEMFC	0.75	37	92
Japan	Panasonic [87]	PEMFC	0.7	40	97
	AISIN [88]	SOFC	0.7	55	87
	Kyocera [89]	SOFC	0.4	47	80

Table 3. MCFC and PAFC, Large-scale Installations.

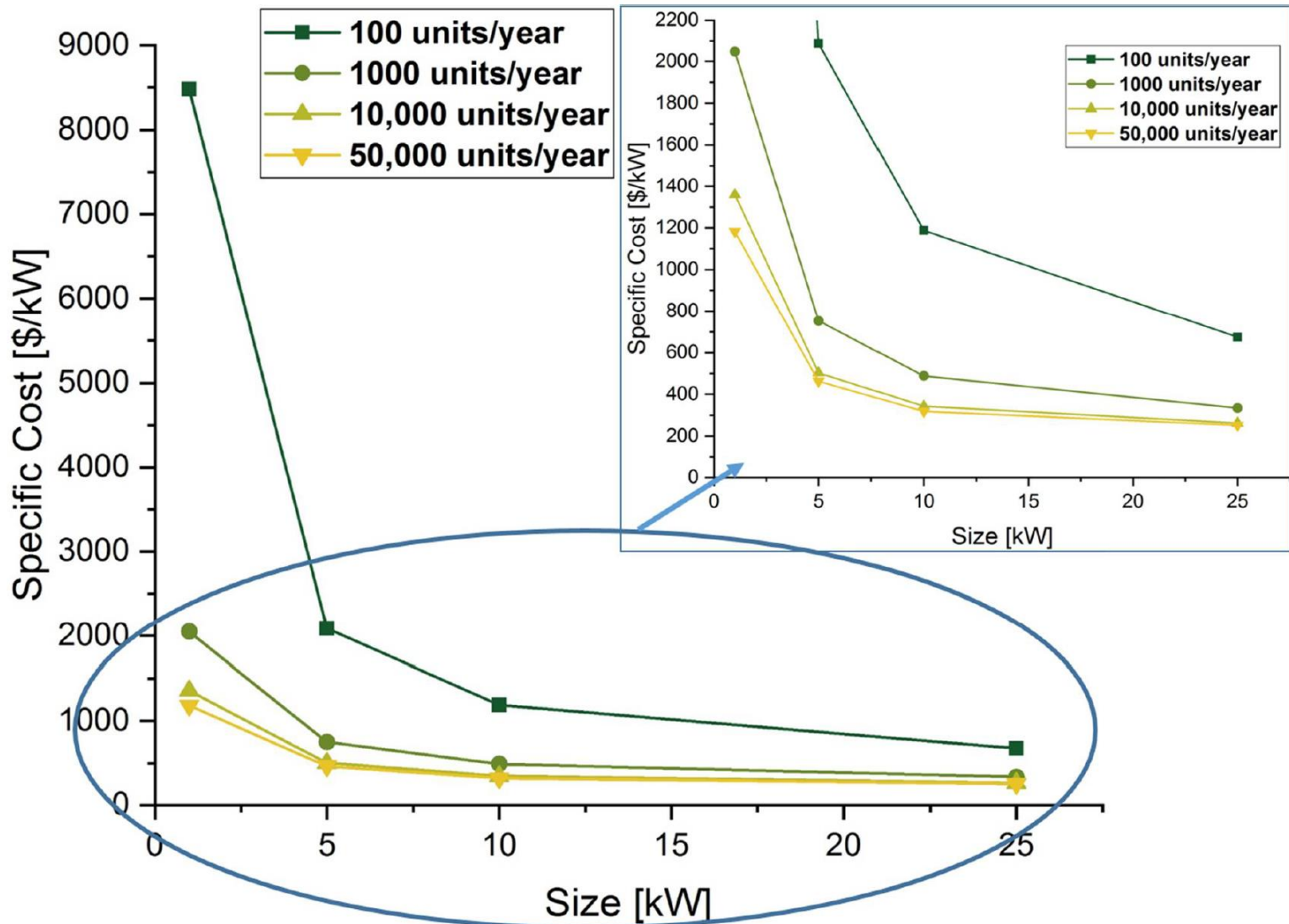
Country/State	Technology	Cumulated Installed Capacity [MW]	Subsidies	Price per Sale
USA	MCFC	150	600–1200 EUR/kW (NG or Biogas)	8000–9000 USD/kW
Europe	MCFC	13	34 M Euro, Horizon 2020 for Stationary FC	NA
Korea	MCFC	150	NA	NA
Japan	MCFC	6	300–400 M USD for R&D on Stationary FC	NA
RoW	MCFC	NA	NA	NA
USA	PAFC	50	NA	NA
Europe	PAFC	1	34 M Euro, Horizon 2020 for Stationary FC	NA
Korea	PAFC	130	up to 80% of the costs for demonstration projects	NA
Japan	PAFC	8	300–400 M USD for R&D on Stationary FC	NA
RoW	PAFC	NA	NA	NA

Celle a combustibile



PEM Fuel Cell Stack Potential Cost Breakdown.

Celle a combustibile



SOFC Ceramic Cell Potential Cost Breakdown.

Celle a combustibile

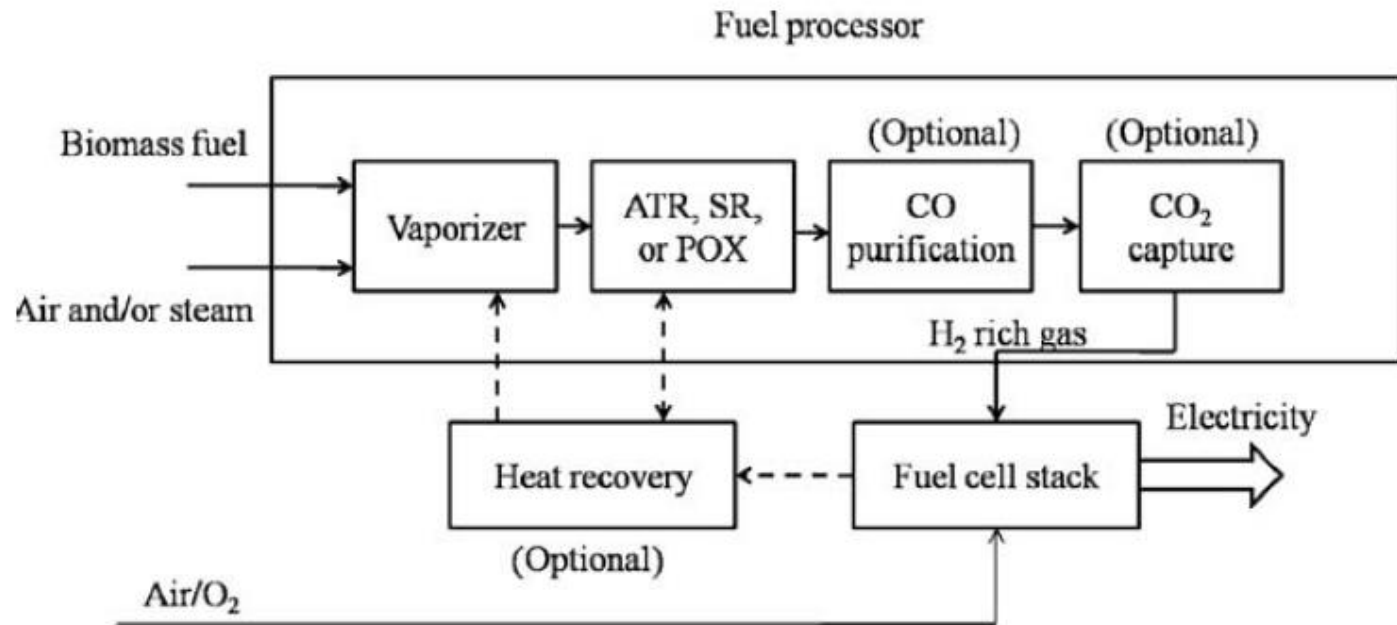
Tipologia	η_e	η_{tot}	Impiego	Costi sistema cogenerativo a Gas Naturale
PEMFC	< 0.40	0.80-0.95	Riscaldamento acqua sanitaria (50-60 °C)	4000 €/kW_{el} Target: <600
SOFC	< 0.60	0.80-0.95	Vapore ad uso industriale (~800 °C)	3500 €/kW_{el} Target: < 600
MCFC	< 0.5	0.75-0.90	Vapore ad uso industriale (~500 °C)	3500 €/kW _{el} 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

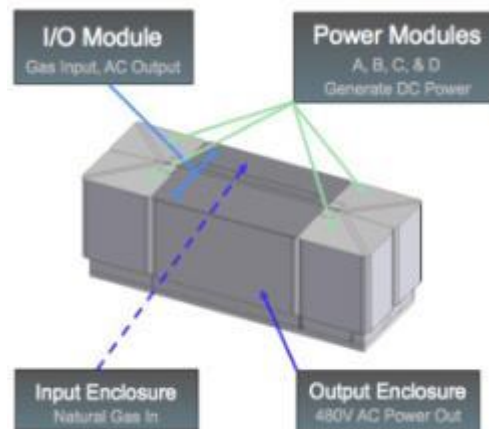
- ✓ Componente essenziale è il reformer dove il generico combustibile viene convertito in un gas ricco di idrogeno



- ✓ 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

Potenza combustibile	kW	194
Potenza elettrica netta	kW	100
Rendimento elettrico netto	%	52

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

Le tecnologie

Tecnologie CHP a combustione interna

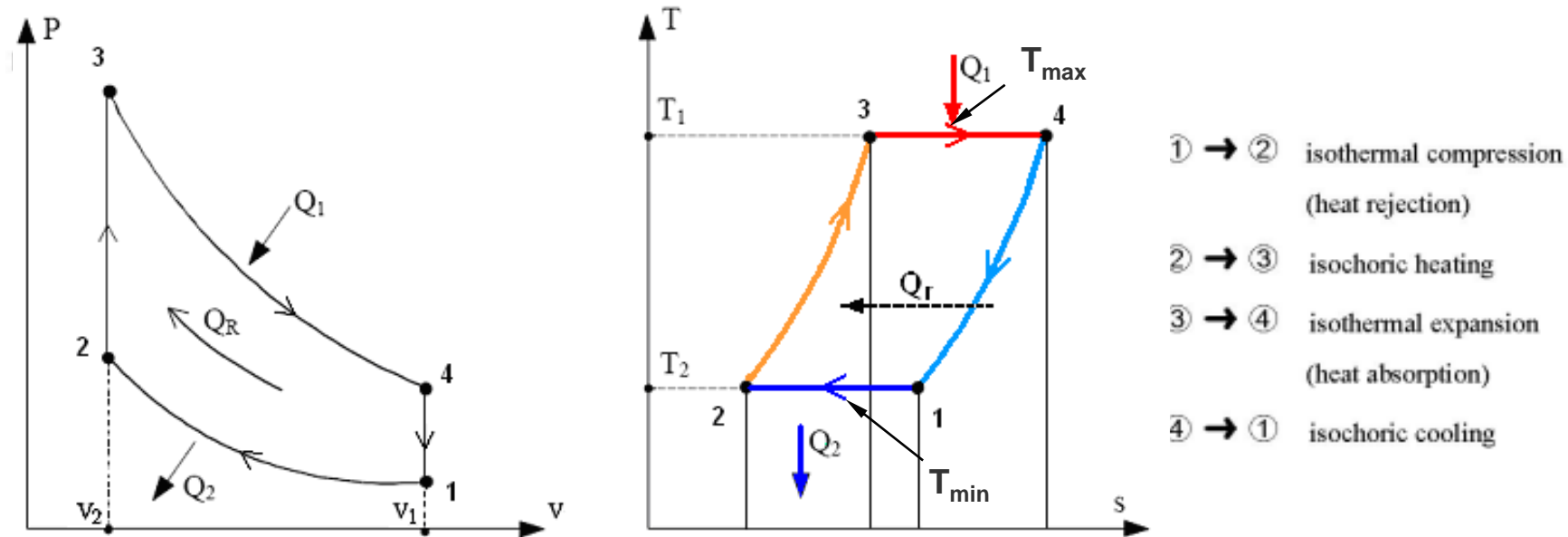
- ✓ Motori alternativi a combustione interna (MCI) Consolidate
- ✓ Turbine a Gas (TG) e Micro Turbine a Gas (MTG)
- ✓ Celle a combustibile - Fuel Cell (FC) In fase di consolidamento

Tecnologie CHP a combustione esterna

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

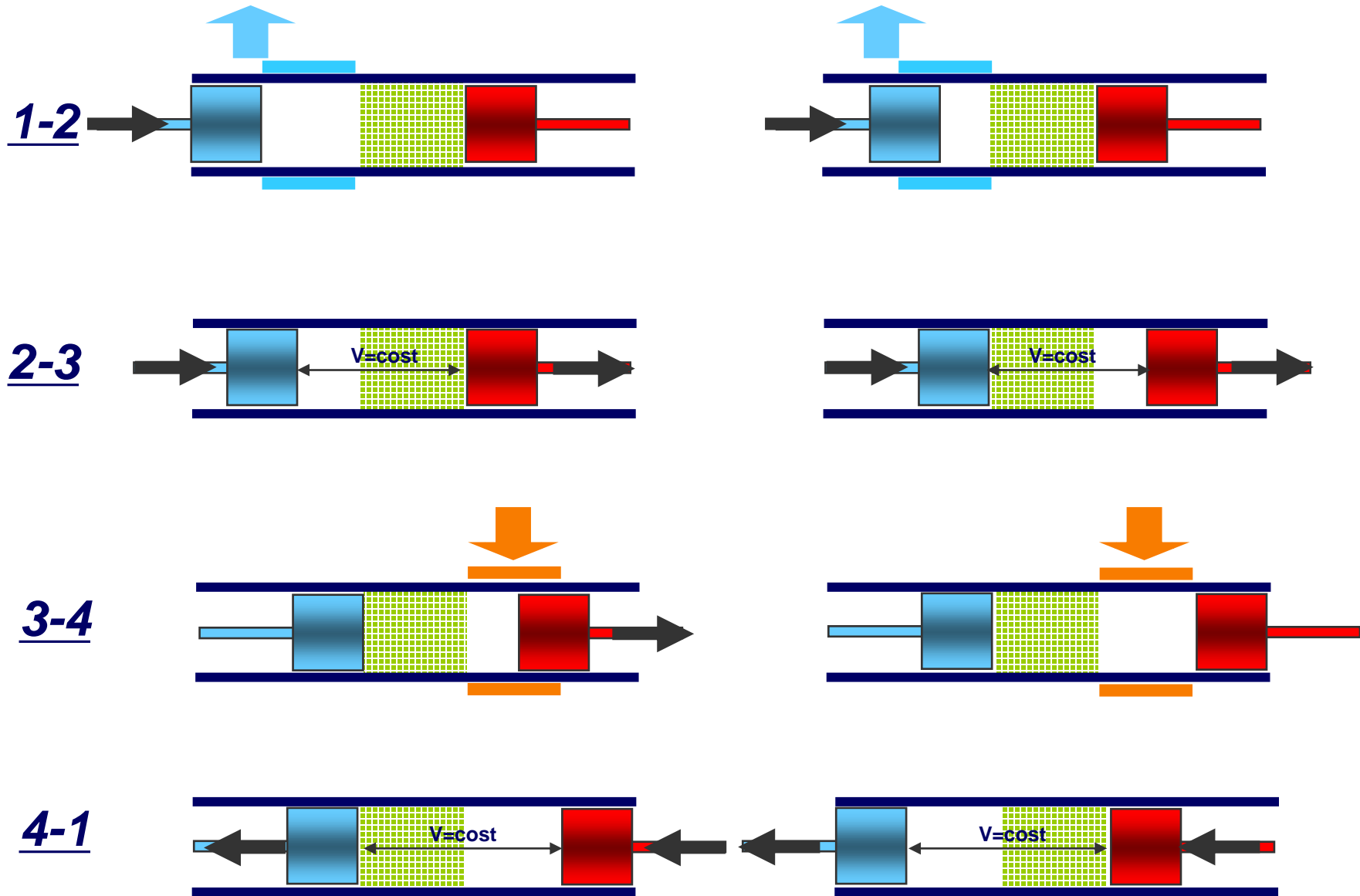
Motori Stirling

- ✓ 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



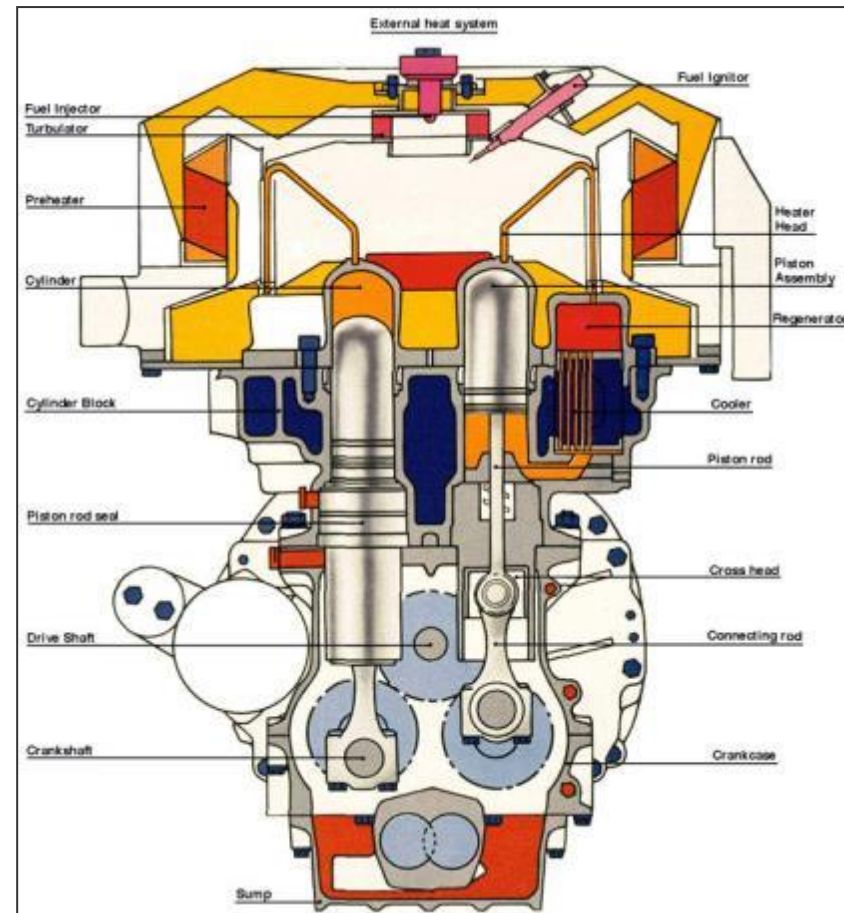
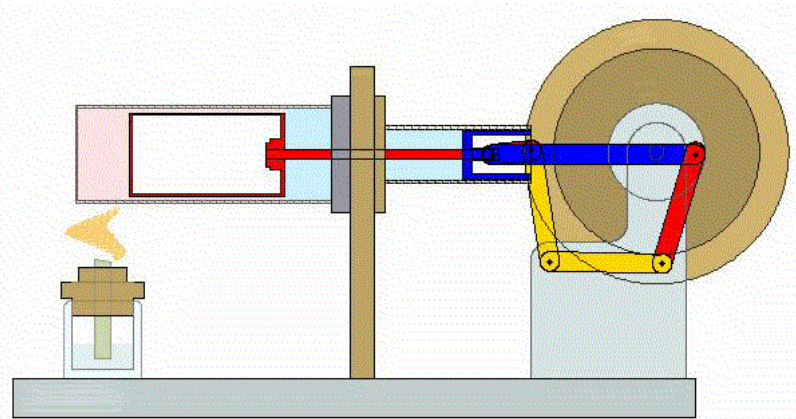
$$\eta_t = 1 - (T_{\min}/T_{\max}) \text{ rendimento del ciclo termodinamico ideale}$$

Motori Stirling



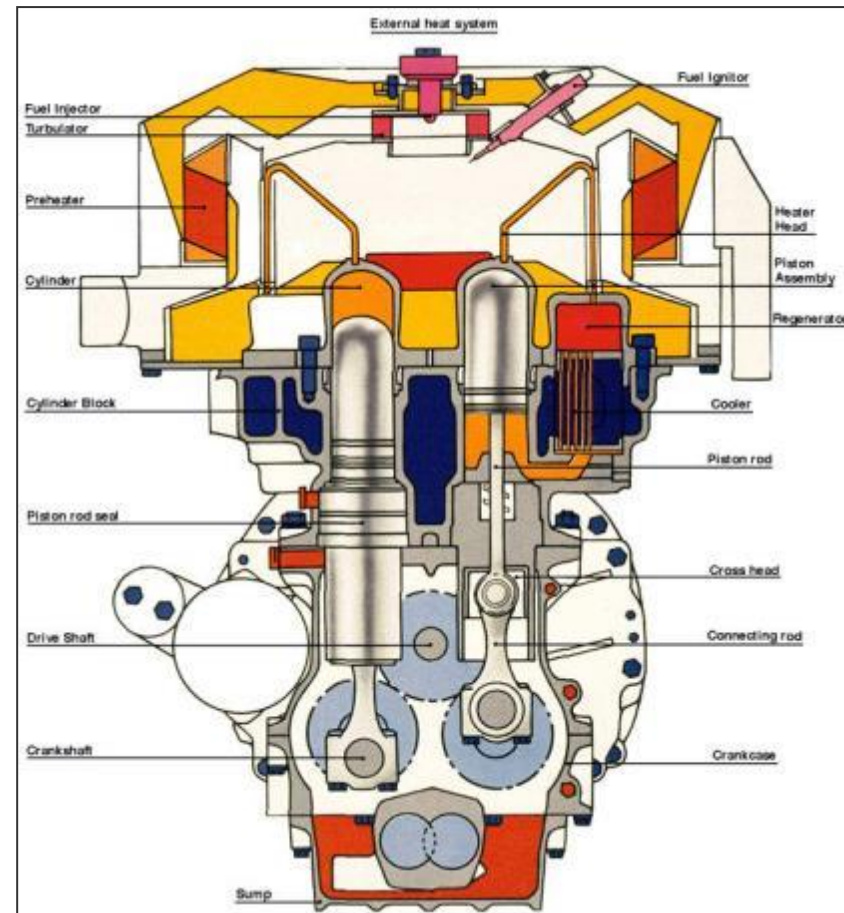
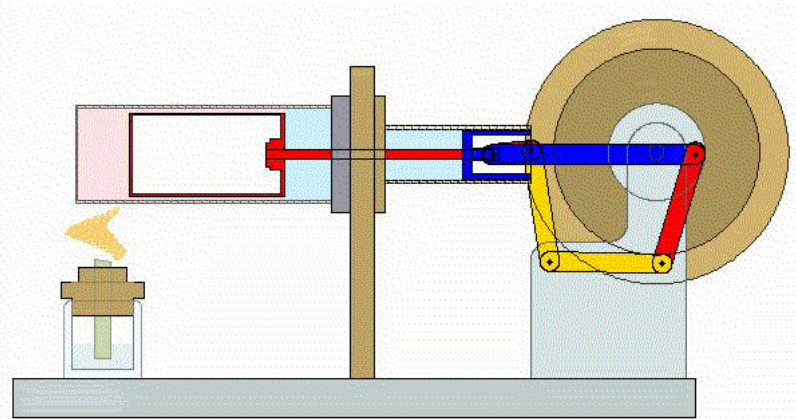
Motori Stirling

- ✓ possibile recupero di flussi termici a bassa temperatura (250 °C)
- ✓ taglie fino a qualche decina di kW_e
- ✓ $\eta_e = 10-35\%$



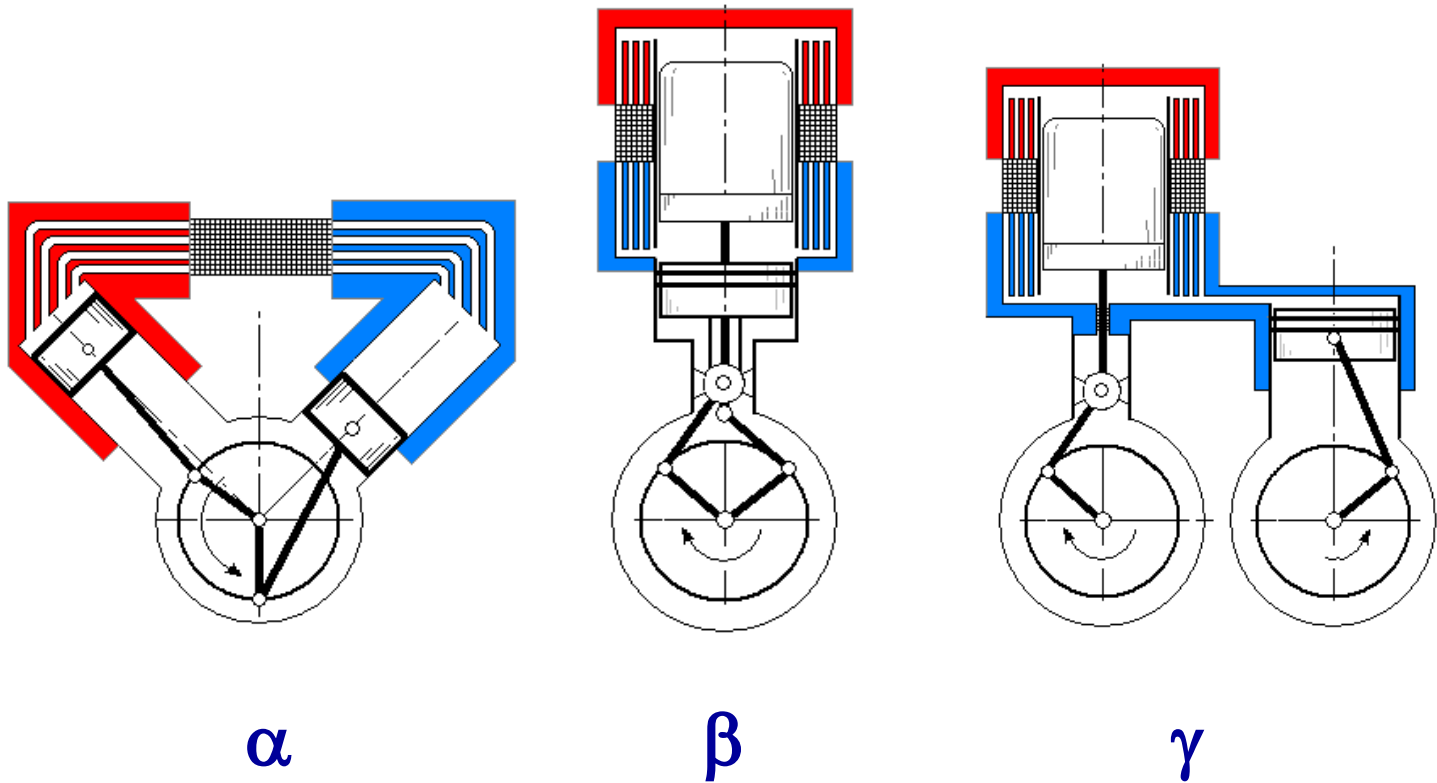
Motori Stirling

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



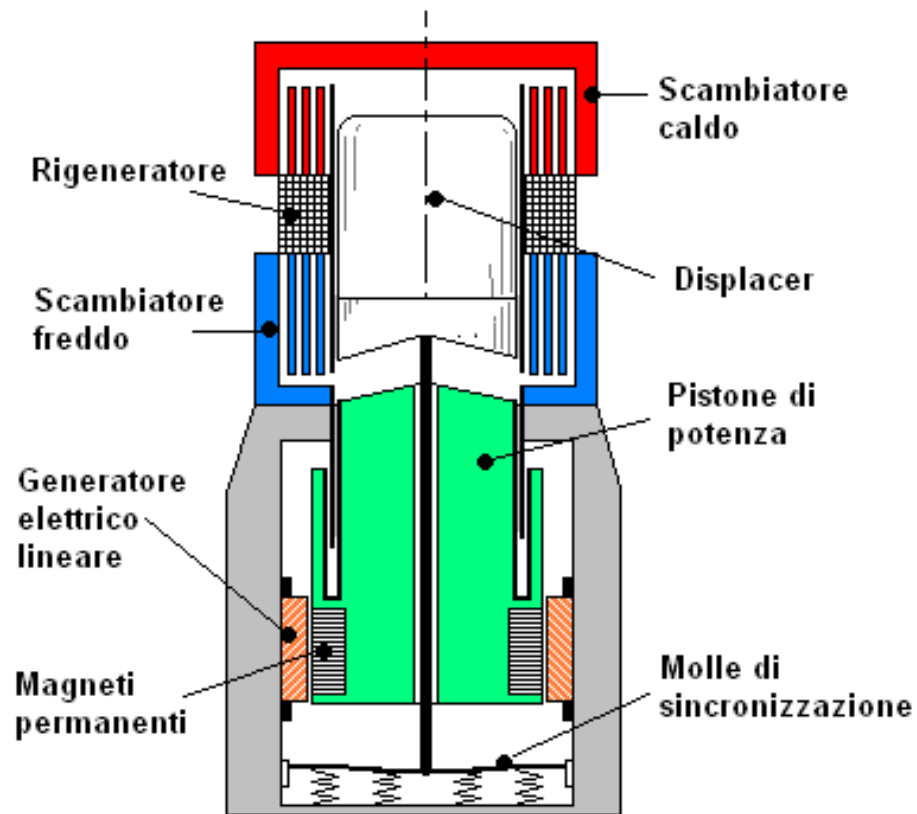
Motori Stirling

a guida cinematica



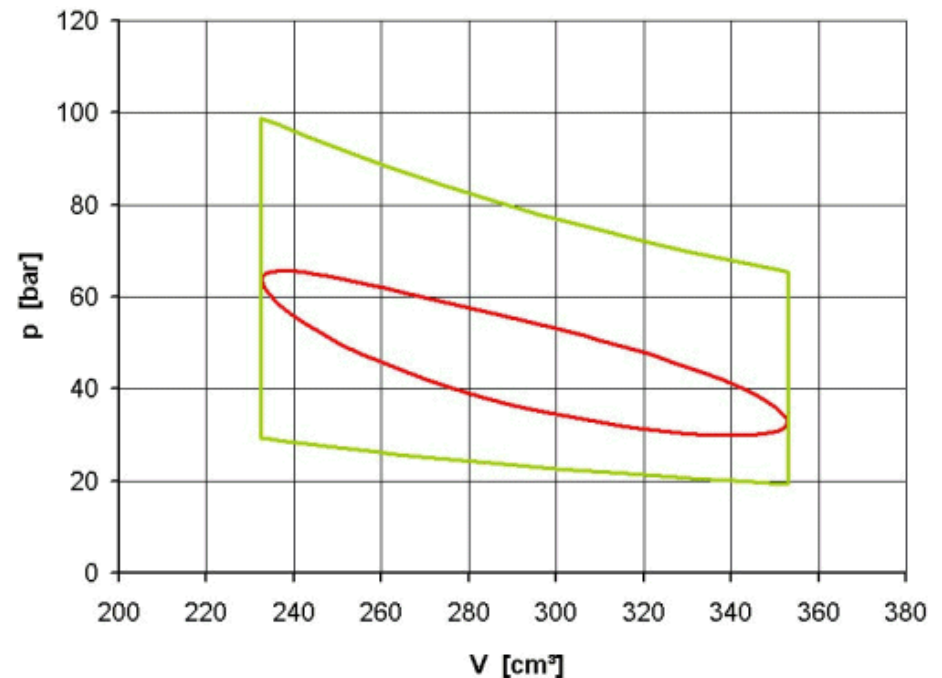
Motori Stirling

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

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

η_b = 0.85-0.92 rendimento del bruciatore

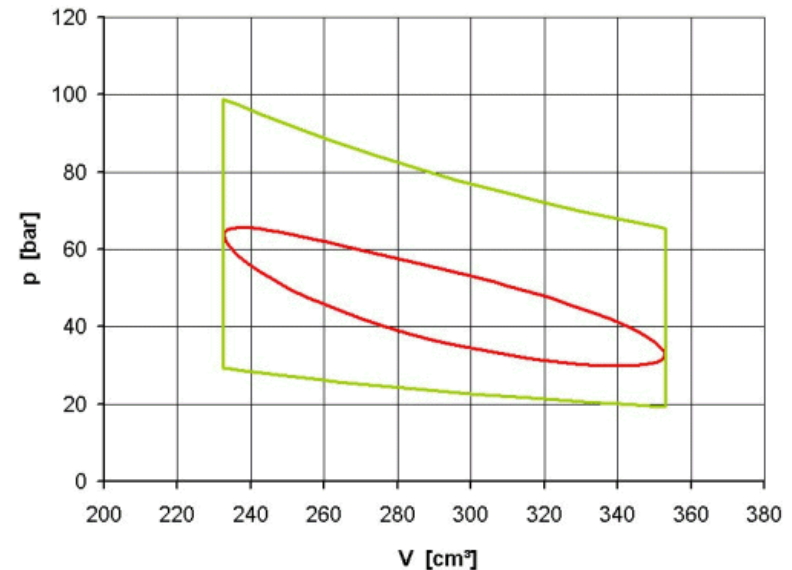
η_t = 0.65-0.72 rendimento del ciclo termodinamico ideale

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

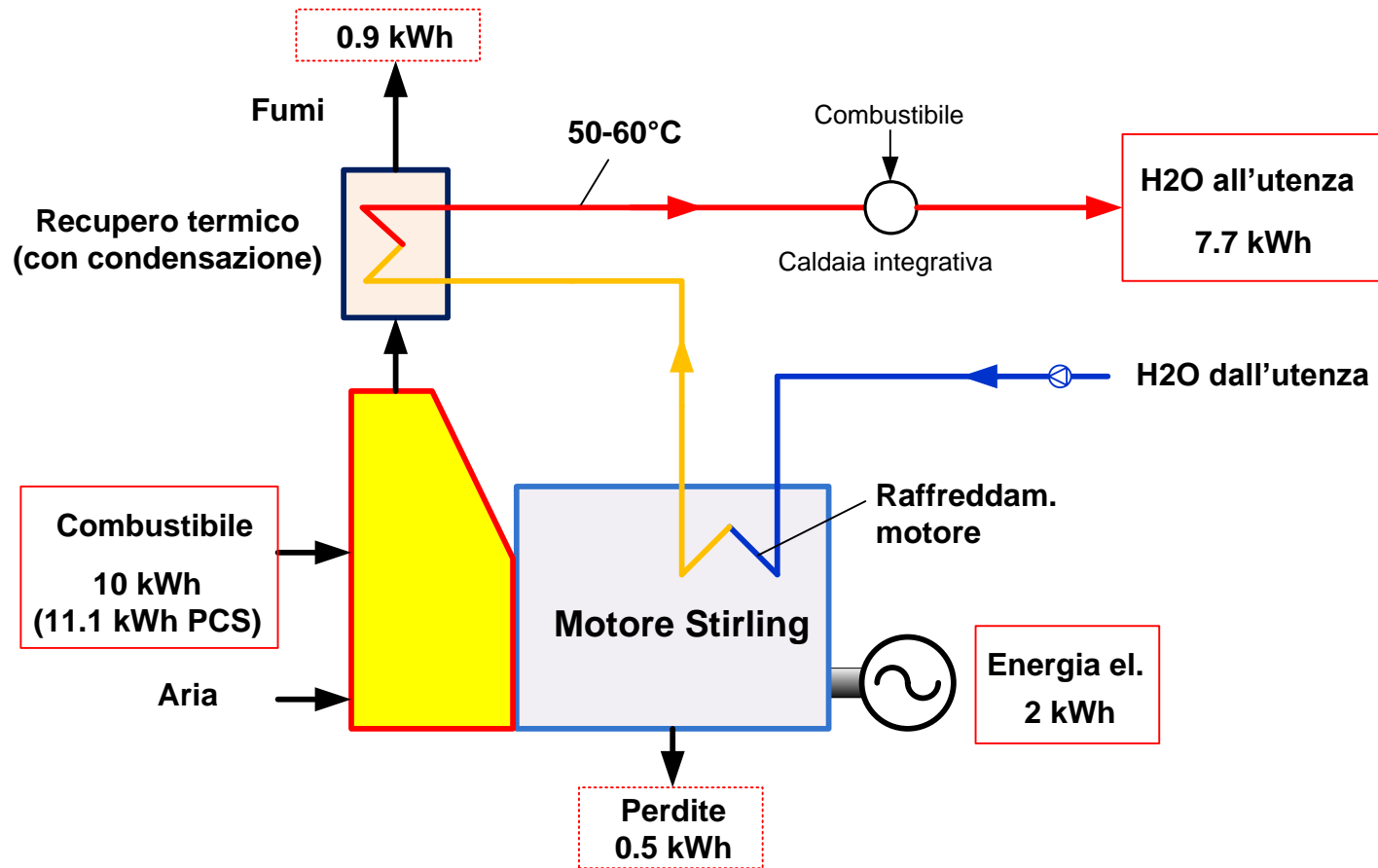
η_m = 0.75-0.95 rendimento meccanico

η_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

Existing gas μ CHP prototypes.

	Manufacturer	Apparatus	Power		LHV efficiency	
			Electric, kW _{el}	Thermal, kW _{th}	Electric, %	Thermal, %
Gas Stirling engine (gas SE)						
	Enatec	Infinia	1	6.4	12.5	80
	SOLO	Stirling 161	2–9.5	8–26	22–24.5	65–75
	Disenco	Inspirit	3	15	16	76
	Baxi	Ecogen	0.3–1	3.7–25.3	16	83
	Viessmann	Witowin 300-W	1	3.6–20	15	82
	WhisperGen	EU1	1	7.5–14.5	11	84
	De Dietrich Remeha	Hybris Power	1	3–23.7	17	85
	Senertech	Stirling SE	1	3–23.8	14	77
	Sunmachine	Gas	1.5–3	8–15	25	65

 : available.

 : introducing phase.

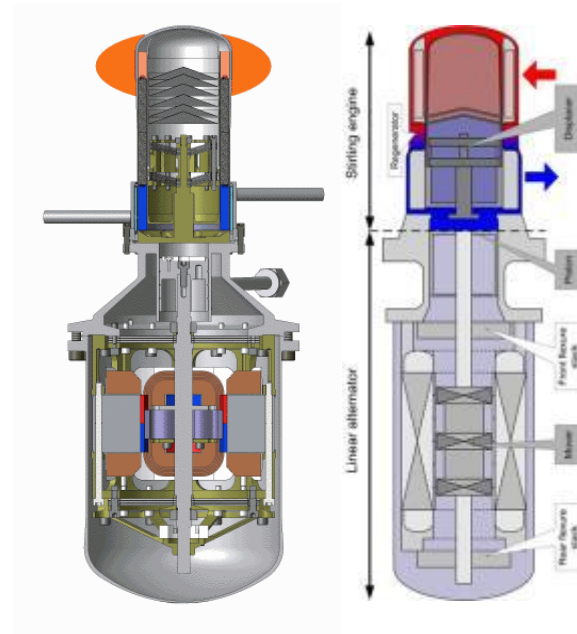
Motori Stirling

- 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



Enatec 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

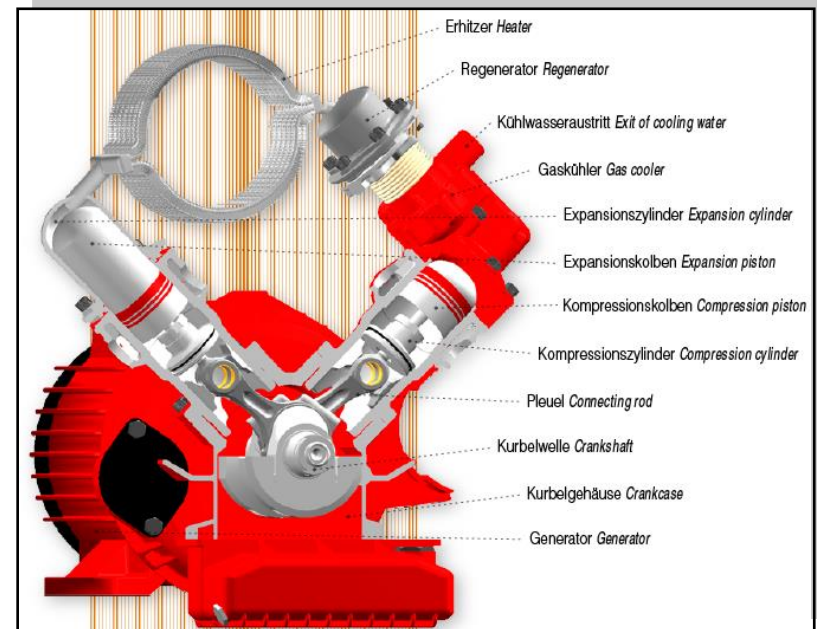
AZELIO (già SOLO Stirling) (Svezia)

Technical Data

STIRLING Engine

Natural gas CHP module

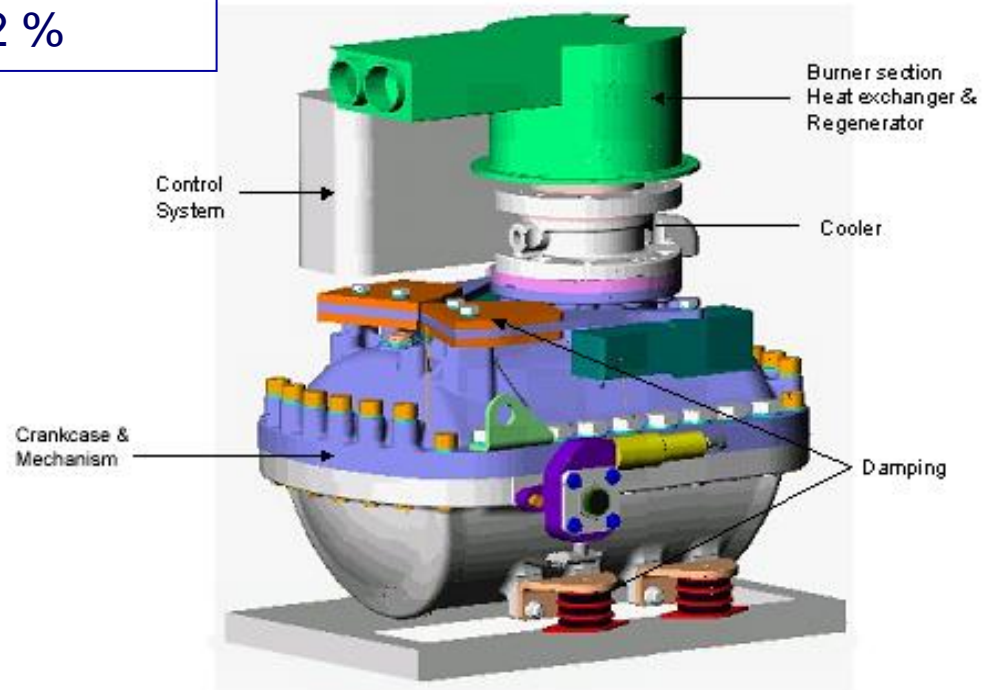
Electrical power	2 - 9 kW ($\pm 5\%$)*
Thermal power	8 - 26 kW
Electrical efficiency	22 - 24,5 % (± 1)*
Total efficiency	92 - 96 %*
Fuel consumption (net calorific value)	1,2 - 3,8 Nm ³ /h
Working gas	Helium
Service interval	4.000 - 6.000 h
Emissions CO (at 5% O ₂)	50 mg/m ³
Emissions NOx (at 5% O ₂)	80 mg/m ³
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

Disenco

- $P_e = 3 \text{ kW}_e$
- $P_{th} = 12-18 \text{ kW}_{th}$
- $\eta_e = 16 \%$
- $\eta_{th} = 76 \%$
- $\eta_U = 92 \%$



Motori Stirling



Baxi Ecogen

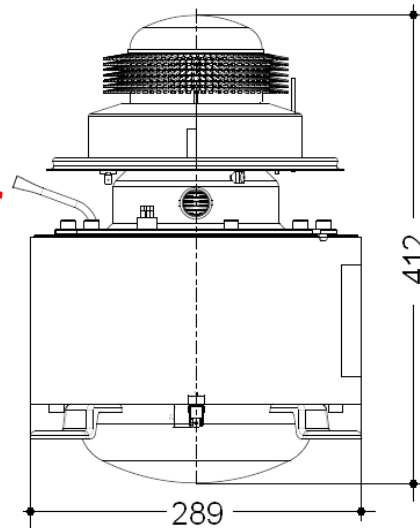
- $P_e = 1 \text{ kW}_e$
- $P_{th} = 6 \text{ kW}_{th}$ (in cond. 6.4 kW_{th})
(con bruciatore di picco: $P_{th} = 24 \text{ kW}_{th}$, in cond. 25.9 kW_{th})
- $\eta_e = 13 \%$
- $\eta_{th} = 78 \%$ (in condensazione 83%)
- $\eta_U = 91 \%$ (in condensazione 96%)

Motori Stirling



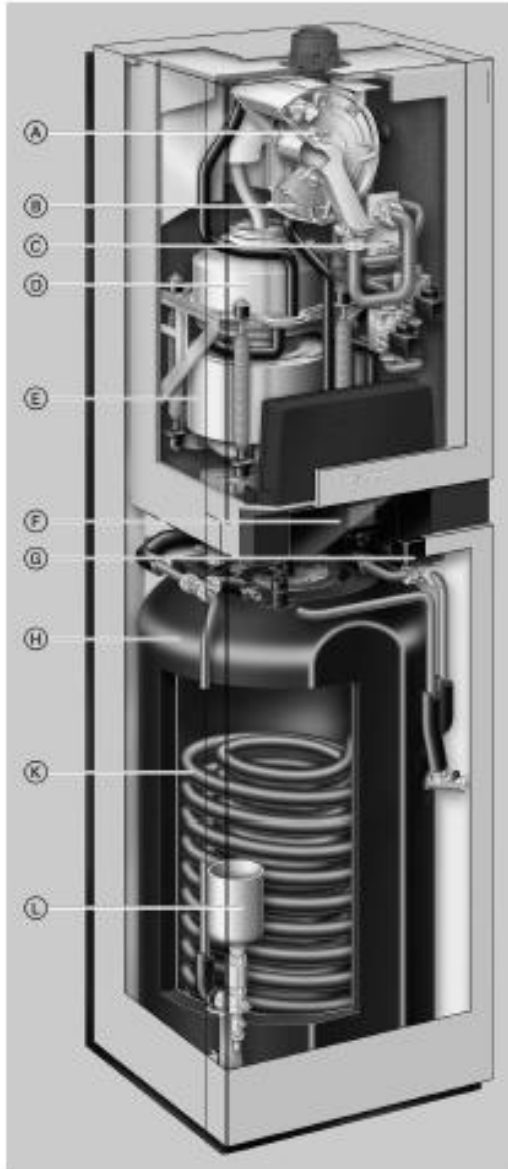
Baxi Ecogen

- $P_e = 1 \text{ kW}_e$
- $P_{th} = 6 \text{ kW}_{th}$ (in cond. 6.4 kW_{th})
(con bruciatore di picco: $P_{th} = 24 \text{ kW}_{th}$, in cond. 25.9 kW_{th})
- $\eta_e = 13 \%$
- $\eta_{th} = 78 \%$ (in condensazione 83%)
- $\eta_U = 91 \%$ (in condensazione 96%)



Motori Stirling

Vitotwin 350-F



- (A) Caldaia per il carico di punta
- (B) Superfici di scambio termico Inox-Radial in acciaio inossidabile
- (C) Valvola di distribuzione dell'aria
- (D) Bruciatore circolare
- (E) Motore Stirling
- (F) Regolazione per esercizio in funzione delle condizioni climatiche esterne
- (G) Valvola deviatrice a 3 vie
- (H) Serbatoio d'accumulo acqua di riscaldamento
- (K) Scambiatore di calore per separazione sistema
- (L) Vaso di espansione a membrana

Viessmann Vitotwin 350-F (Microgen)

- $P_e = 1 \text{ kW}_e$
- $P_{th} = 26 \text{ kW}_{th}$ (in cond. con bruciatore di picco)

Motori Stirling



WhisperGen

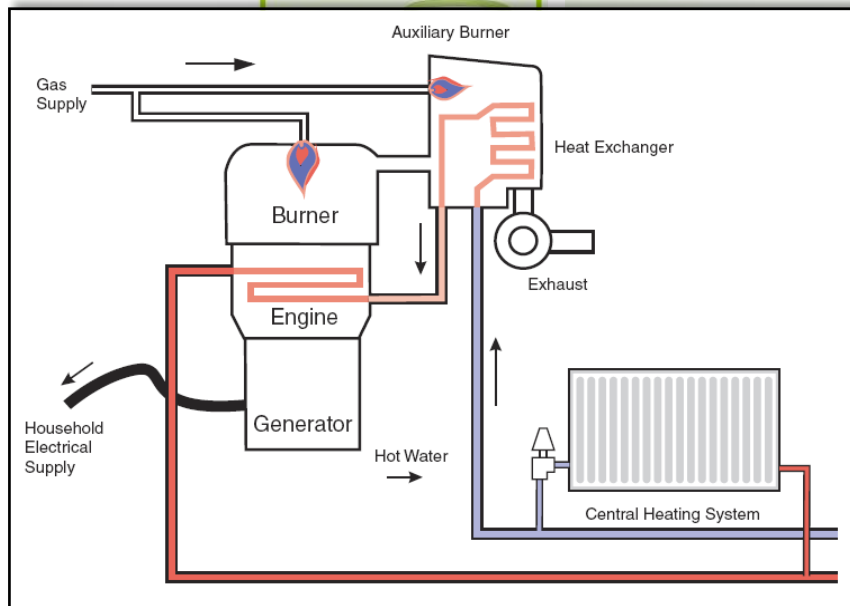
	Caratteristica	Specifiche
Generale	Modello	EU1
	Motore	4 cilindri doppia azione ciclo Stirling
	Generatore	Generatore asincrono
	Caratteristiche elettriche	230V, 50 Hz
	Dimensioni	49.1 x 83.8 x 56.3 cm
	Peso	142 Kg.
	Produzione elettrica	1 kW
Consumo	Consumo nominale	9,5 kW
	Consumo massimo (due bruciatori funzionanti)	16 kW
Produzione termica	Con bruciatore principale Stirling	Da 7,5 a 8,3 kW
	Con due bruciatori funzionanti	Da 13.2 a 14.5 kW
Efficienza	Termica a 30/40°C	> 95%
	Elettrica a 30/40°C	10,0 – 11,0 %
	Totale a 30/40°C	> 105 %
	Termica a 60/80°C	> 85%
	Elettrica °C	10,0 – 11,0 %
	Totale a 60/80°C	> 95%
Consumo elettrico		Stand-by > 11W
		In erogazione < 60 W
Emissione	CO	< 100 mg/kWh
	NOx	< 70 mg /kWh
	Perdita di carico	150 Pa
	Temperatura gas scarico	< 95°C

Motori Stirling



WhisperGen

Generale



Caratteristica

Specifiche

Modello	EU1
Motore	4 cilindri doppia azione ciclo Stirling
Generatore	Generatore asincrono
Caratteristiche elettriche	230V, 50 Hz
Dimensioni	49.1 x 83.8 x 56.3 cm
Peso	142 Kg.
Produzione elettrica	1 kW

Consumo nominale 9,5 kW

Consumo massimo (due bruciatori funzionanti) 16 kW

Con bruciatore principale Stirling Da 7,5 a 8,3 kW

Con due bruciatori funzionanti Da 13,2 a 14,5 kW

Termica a 30/40°C > 95%

Elettrica a 30/40°C 10,0 - 11,0 %

Totale a 30/40°C > 105 %

Termica a 60/80°C > 85%

Elettrica °C 10,0 - 11,0 %

Totale a 60/80°C > 95%

Consumo elettrico

Stand-by > 11W

In erogazione < 60 W

Emissione

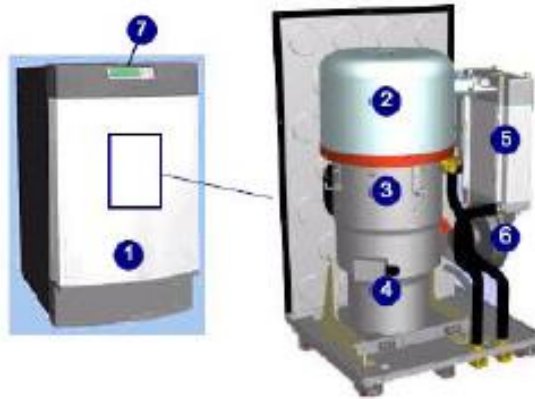
CO < 100 mg/kWh

NOx < 70 mg /kWh

Perdita di carico 150 Pa

Temperatura gas scarico < 95°C

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_{el},
 $\eta_{el}=12\%$ 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_{el} anche per piccole taglie

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

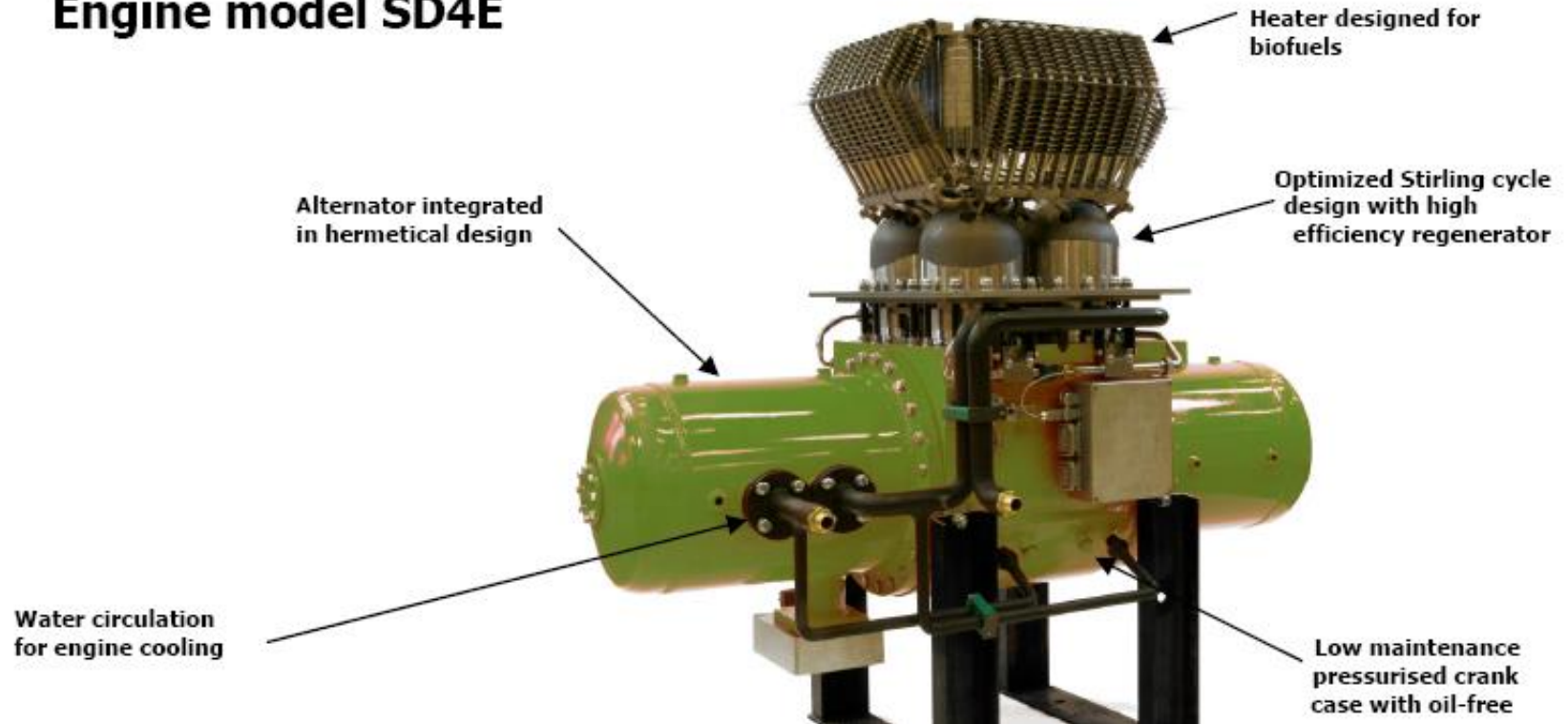


Motori Stirling

Stirling Denmark

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

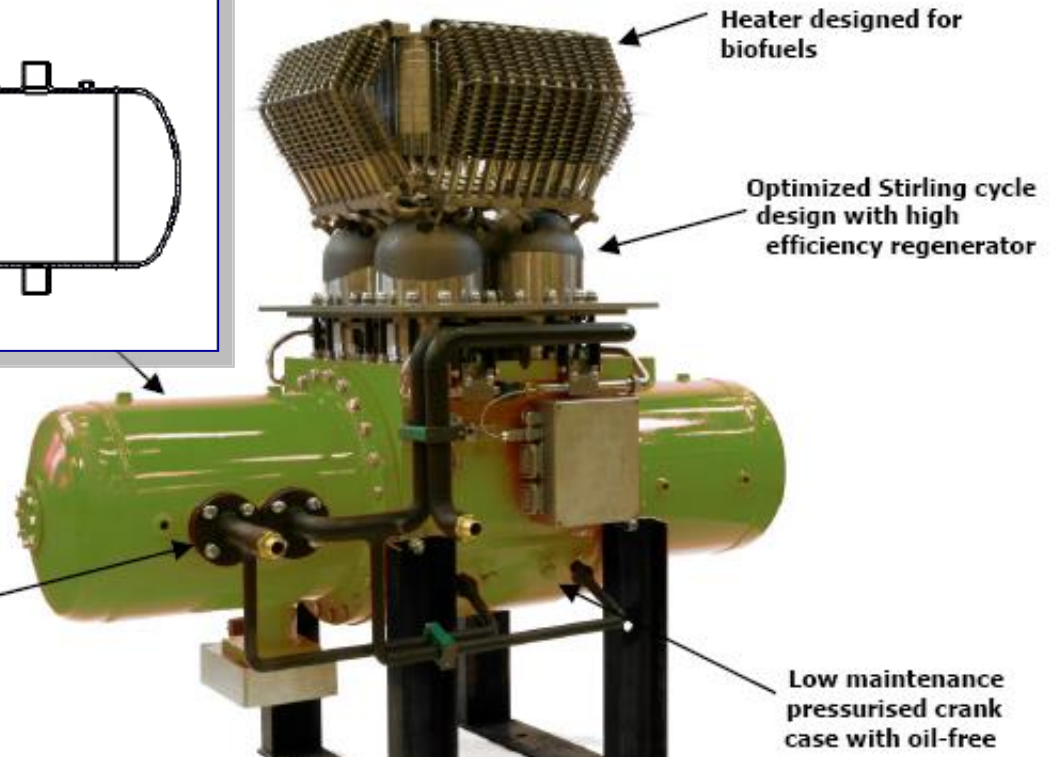
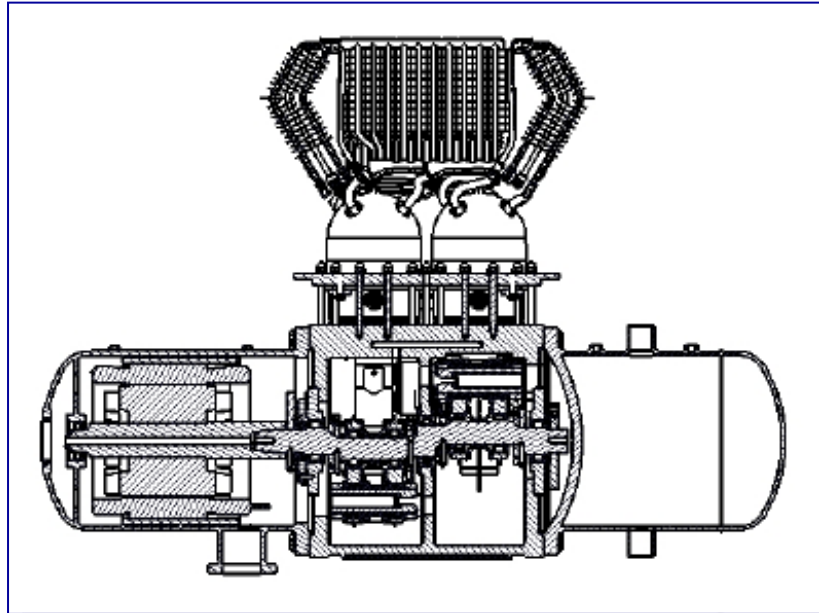
Engine model SD4E



Motori Stirling

Stirling Denmark

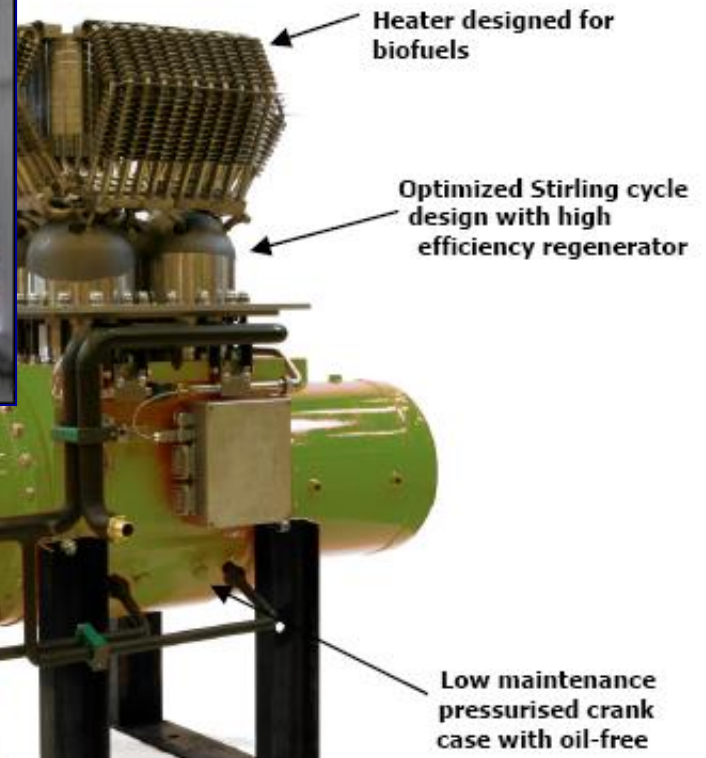
- $P_e = 35 \text{ kW}_e$
- $\eta_e = 28 \%$



Motori Stirling

Stirling Denmark

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

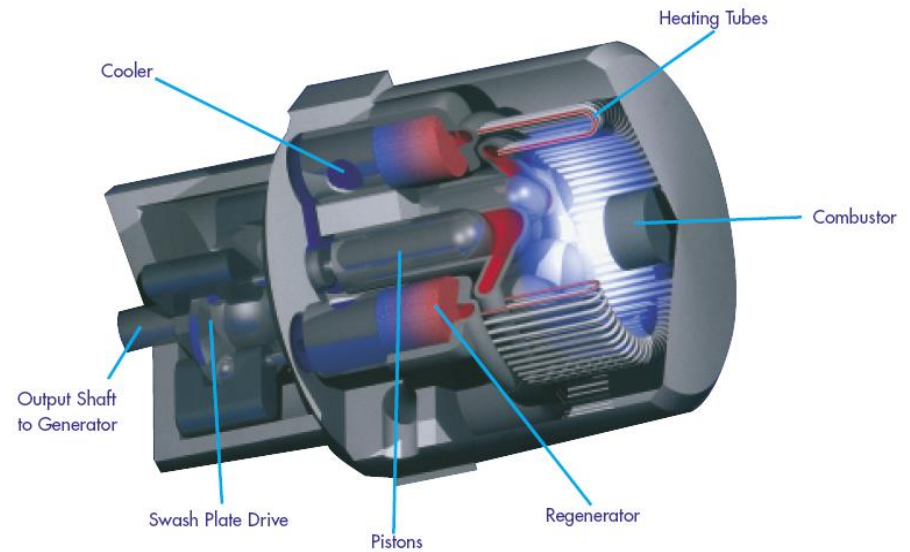


Motori Stirling



STM Corporation

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



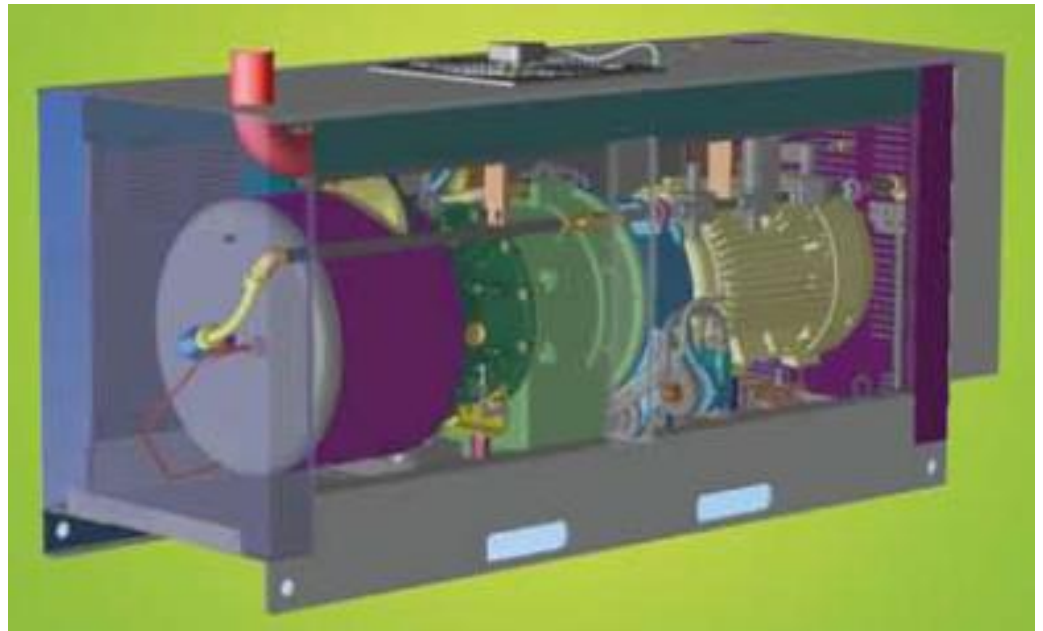
STM 4-Piston Stirling Engine

Motori Stirling



Stirling Biopower

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

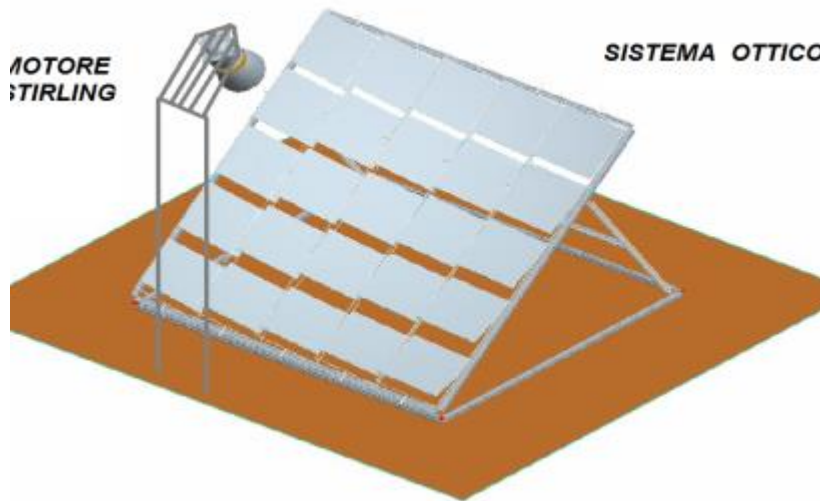


Infinia – applicazione solare

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

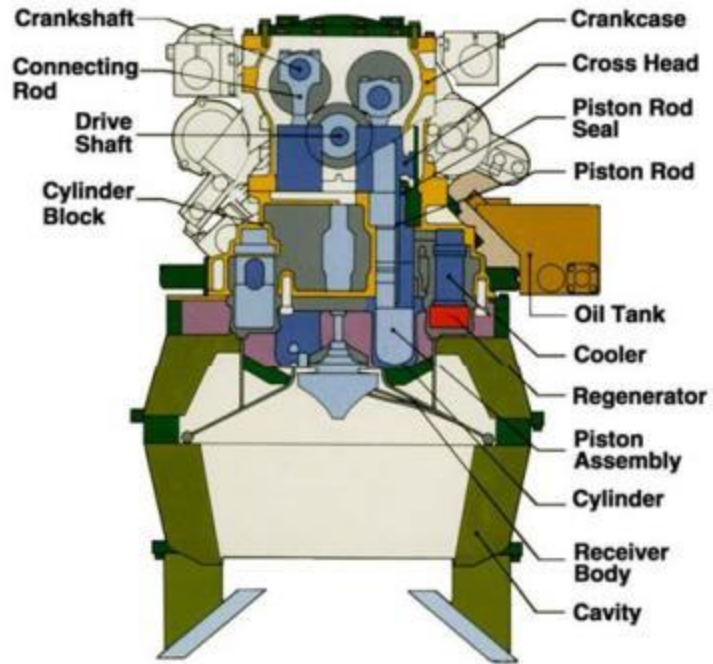


Microgen – applicazione solare



Stirling Energy Systems (SES) (USA)

Motore Stirling ad energia solare



Stirling Energy Systems (SES) (USA)

Motore Stirling ad energia solare



Le tecnologie

Tecnologie CHP a combustione interna

Prototipali

- ✓ Sistemi termofotovoltaici (TPV)

Tecnologie CHP a combustione esterna

Prototipali

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

Tecnologie CHP a combustione interna/esterna

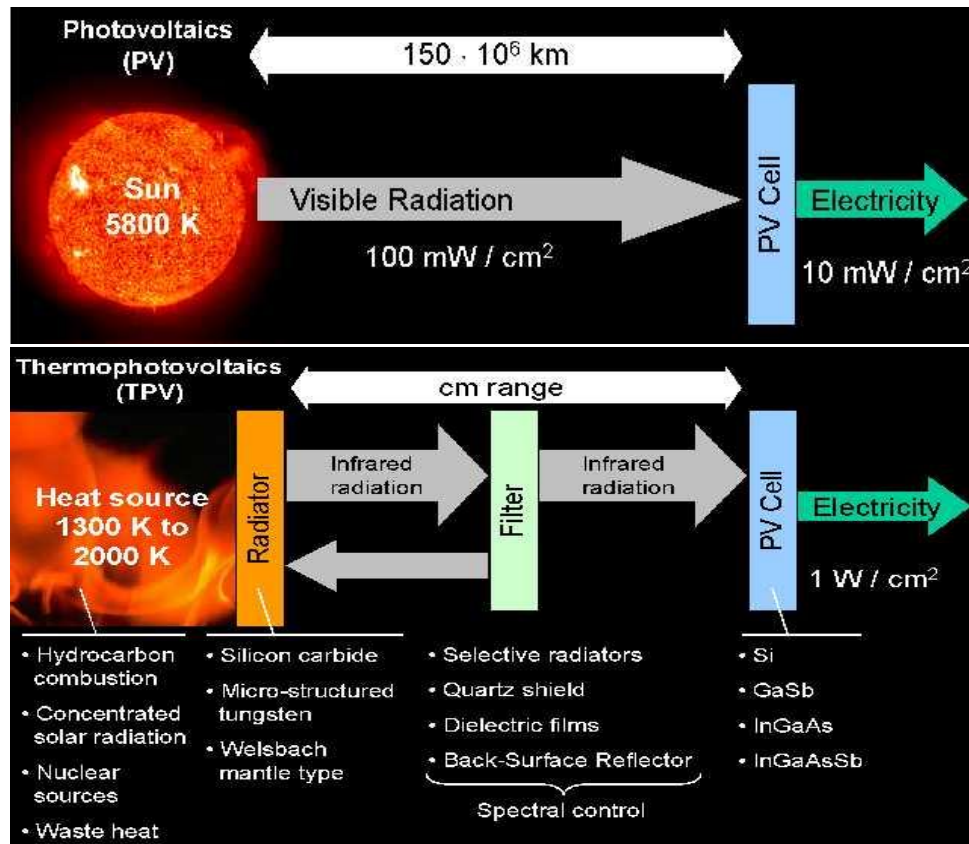
- ✓ Ciclo combinato gas-vapore
- ✓ Ciclo combinato MCI-ORC
- ✓ Ciclo combinato MTG-ORC

Consolidate

In fase di
consolidamento

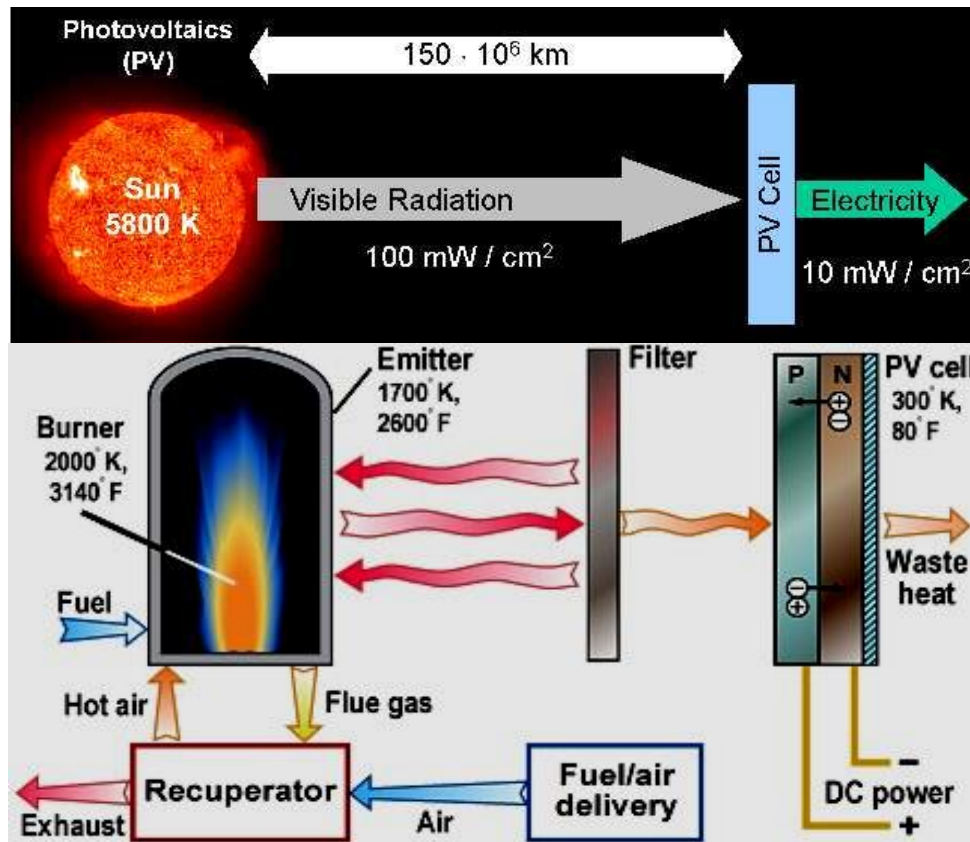
Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

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



Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

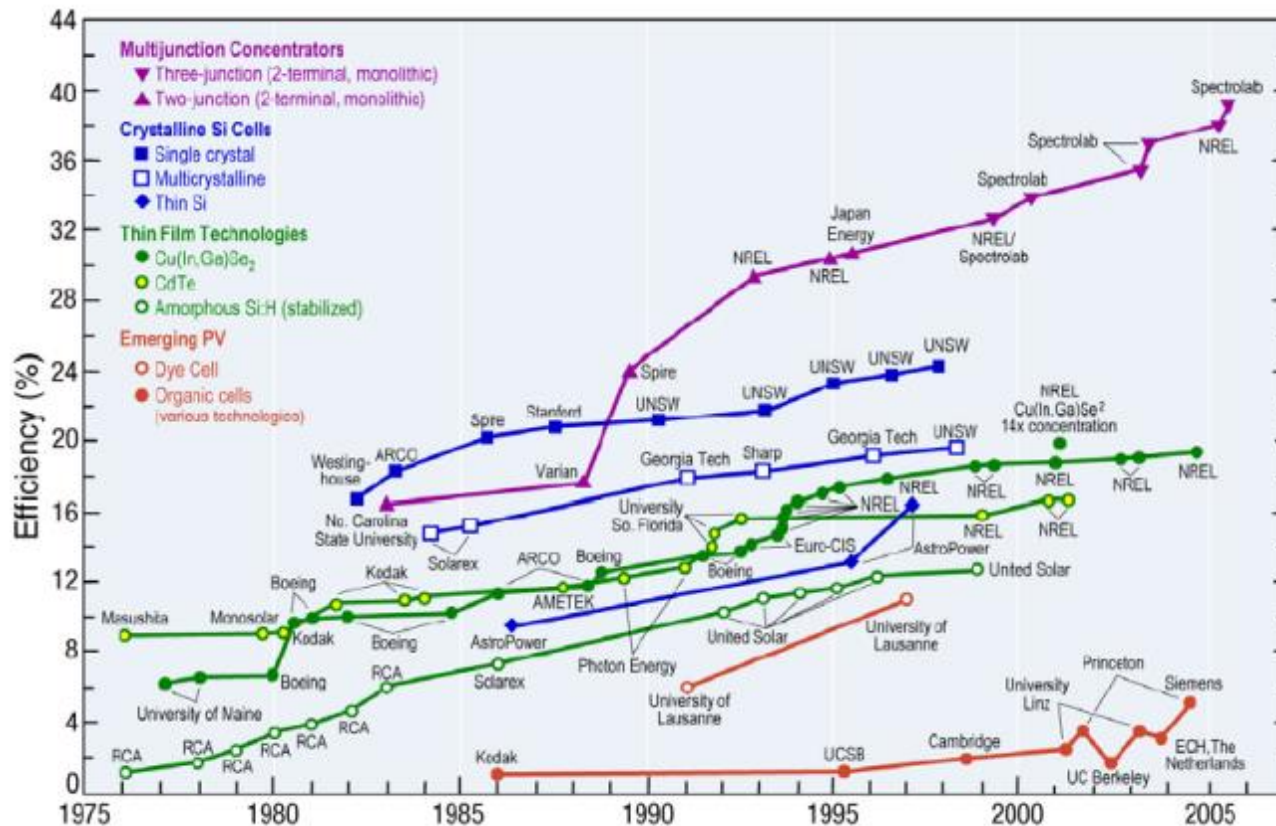
- ✓ La tecnologia termofotovoltaica (TPV) è basata sulla conversione dell'energia irradiata da un emettitore in elettricità attraverso celle fotovoltaiche (PV)



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)

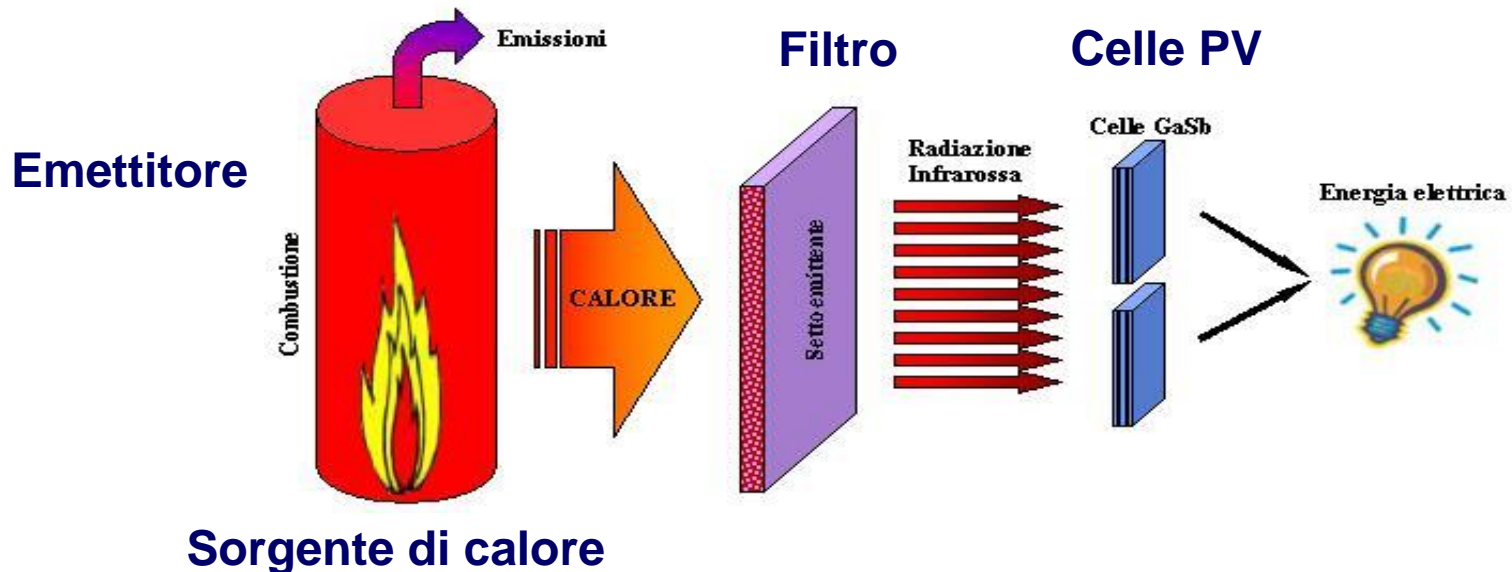
- ✓ Questa tecnologia nasce attorno agli anni '60 al MIT ma solo negli ultimi anni ha ricevuto nuovo impulso grazie
 - ✓ progressi nella tecnologia delle celle fotovoltaiche
 - ✓ particolare adattabilità a numerosi settori di nicchia quali:
 - elettronica (1-2 W)
 - sistemi portatili e batterie (10-50 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

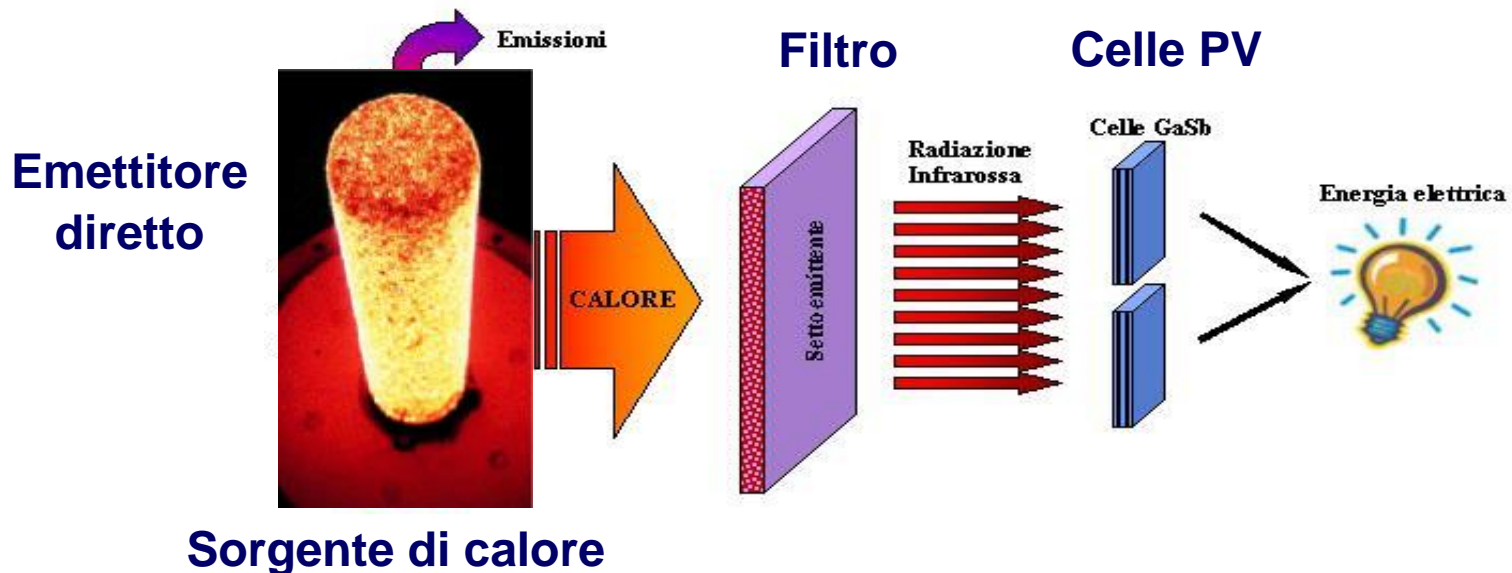
Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

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



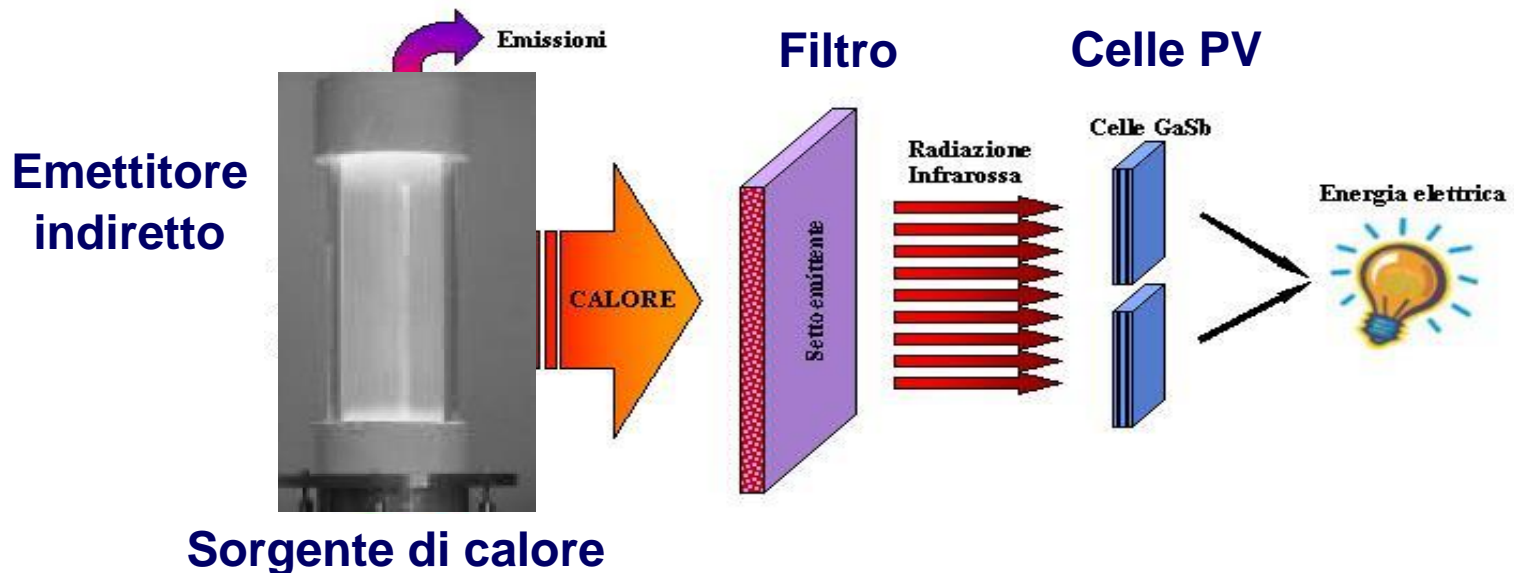
Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

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



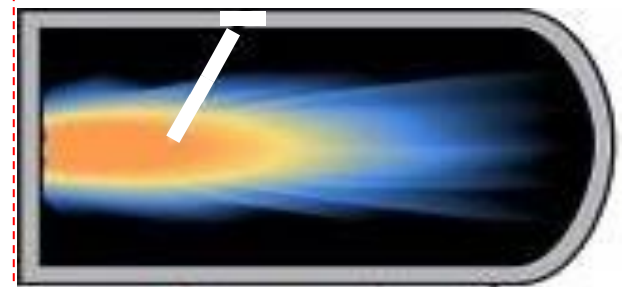
Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

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

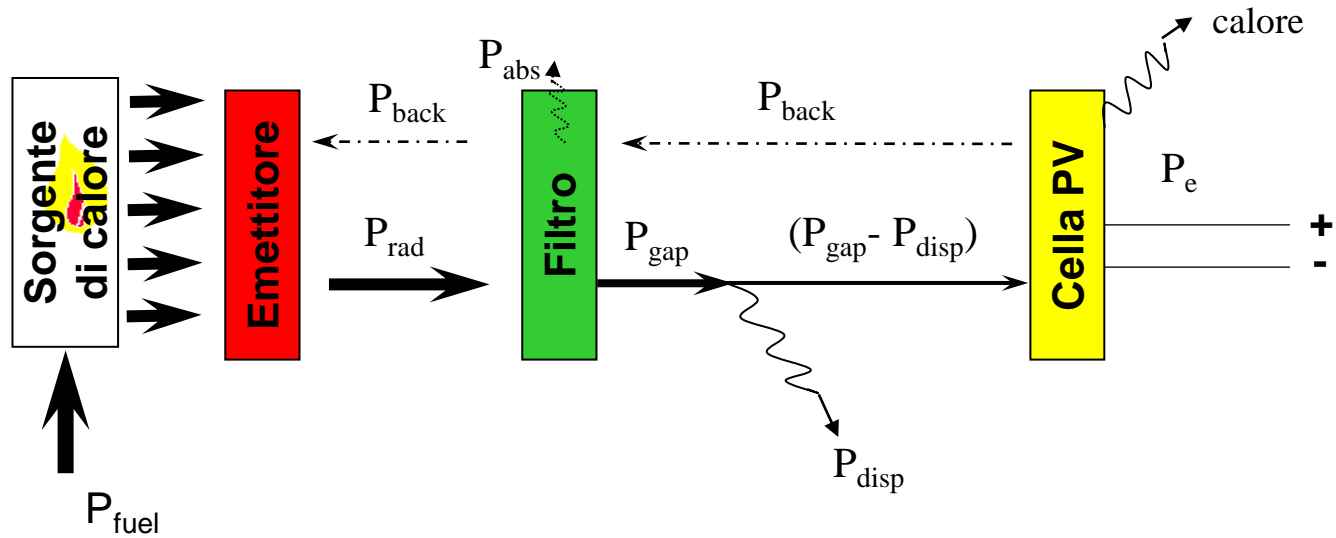


Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

- ✓ 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	$\eta_{PV} = \frac{P_e}{P_{gap} - P_{disp}}$

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

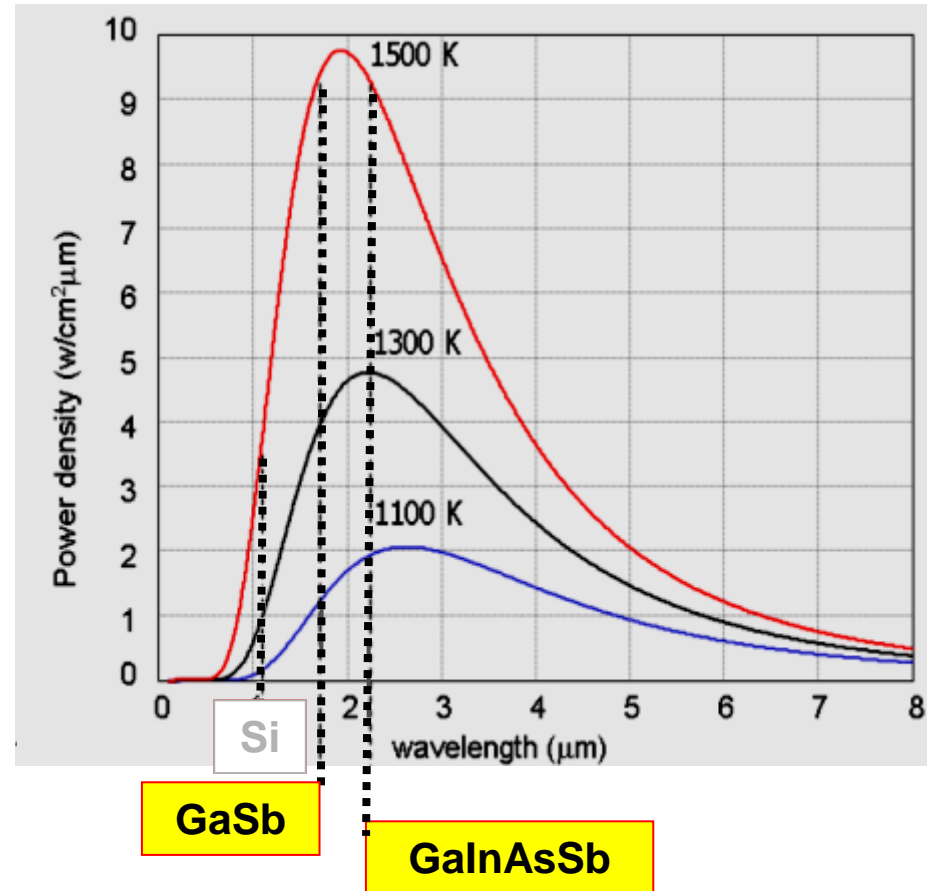
Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

✓ 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)

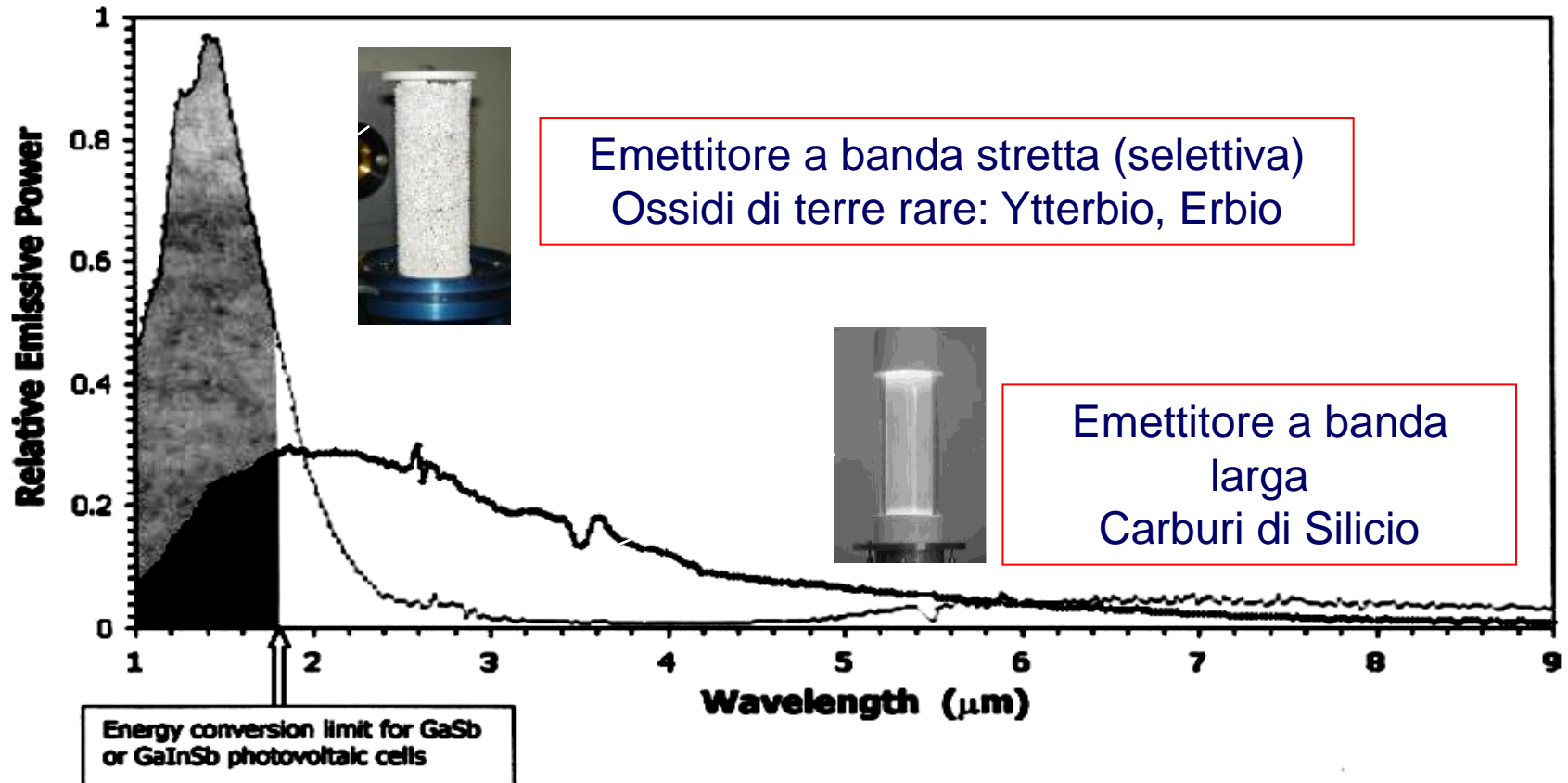
✓ Recentemente vengono sperimentate ed utilizzate celle PV a base di Gallio (Ga), Antimonio (Sb), Indio (In) ed Arsenico (As) (più efficienti ma contengono elementi tossici (Sb, As) e la loro produzione è ancora piuttosto costosa)

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



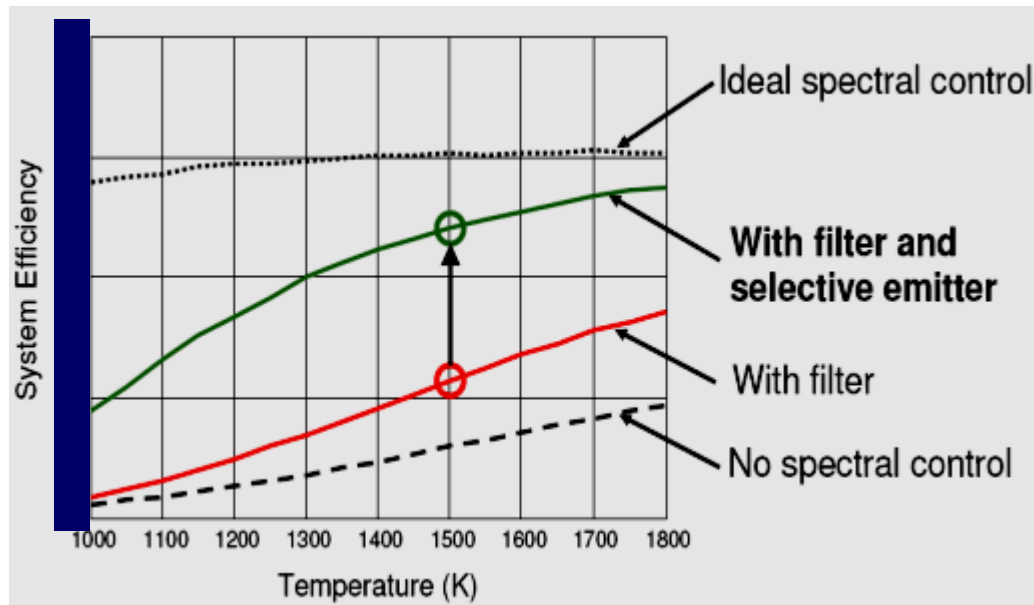
Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

- 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



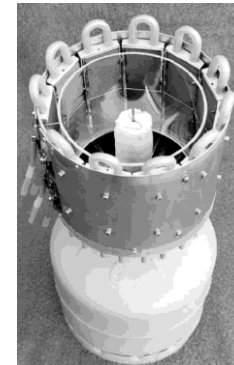
Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

JX Crystal (USA) - Midnight Sun



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

Paul Scherrer Institute (Svizzera)



$$P_e = 48 W_e$$
$$\eta_e = 2.4 \%$$

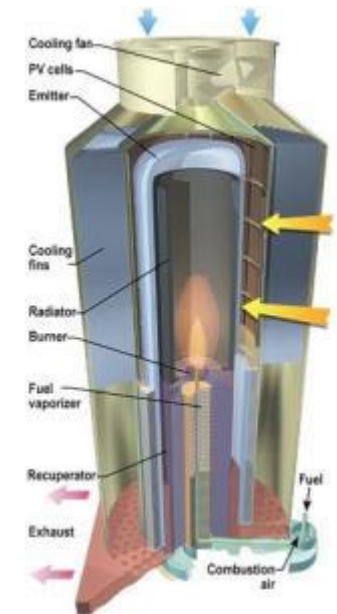
CANMET (Canada)

$$\eta_e = 2.5 \%$$

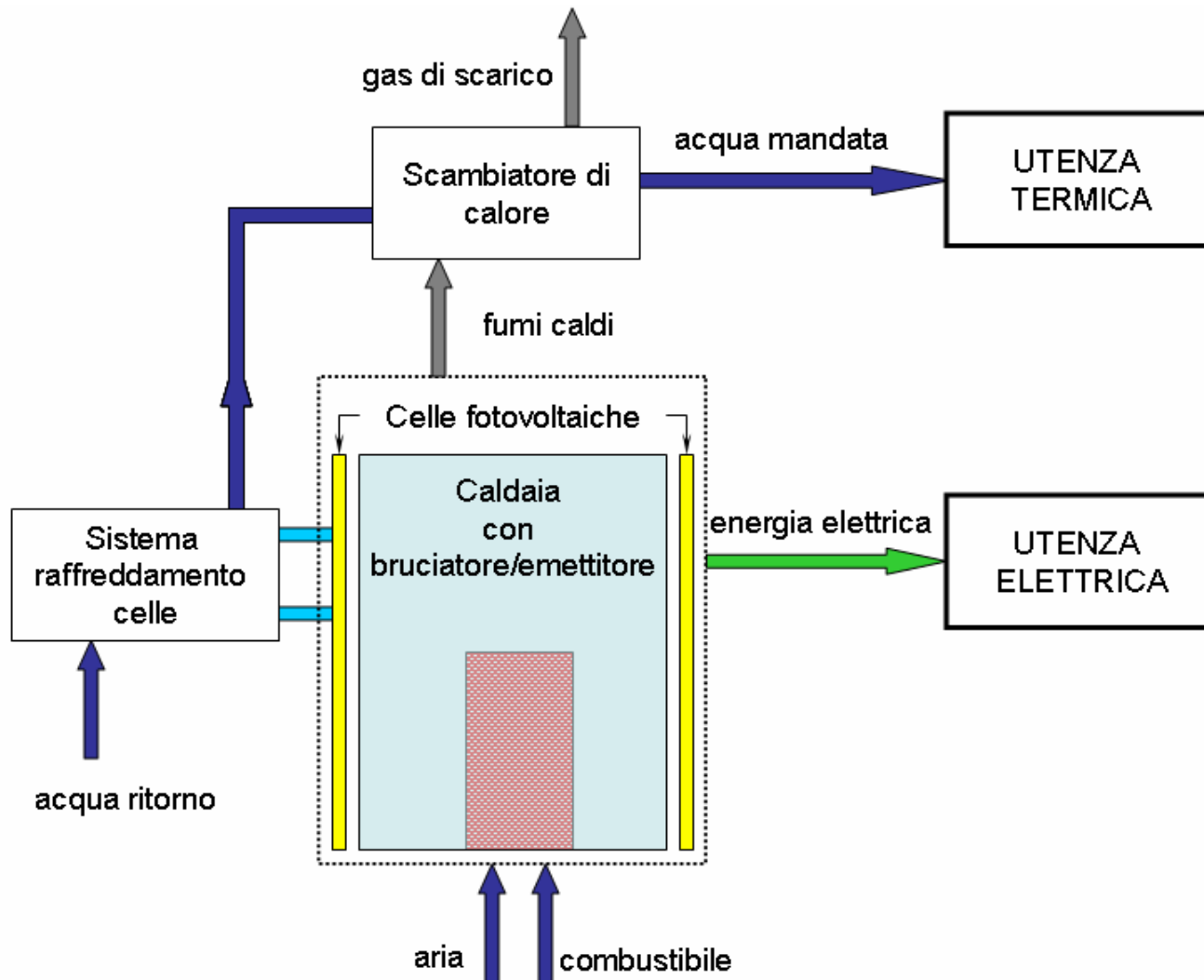


JX Crystal (USA)

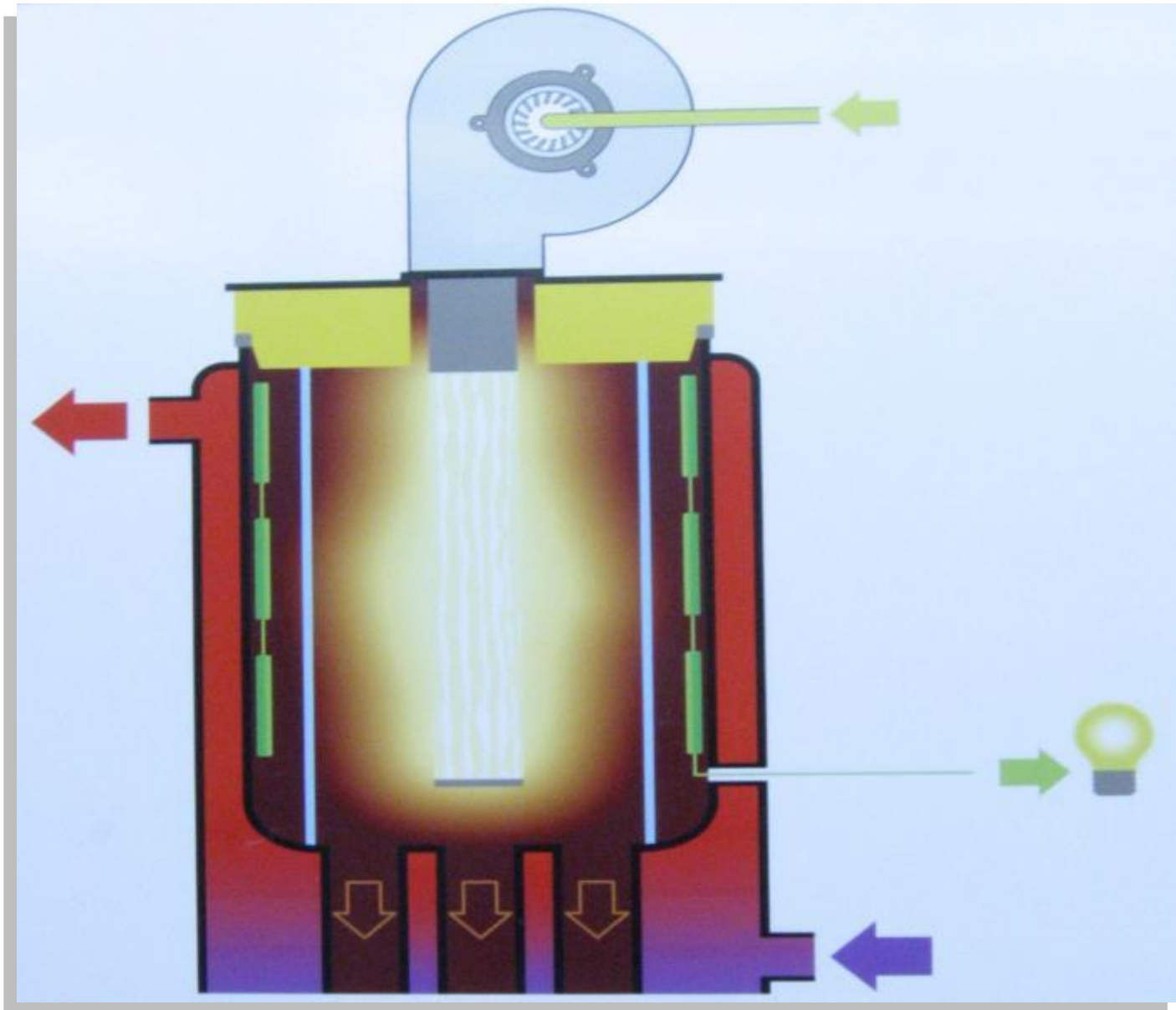
$$P_e = 500 W_e$$
$$\eta_e = 11 \%$$



Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

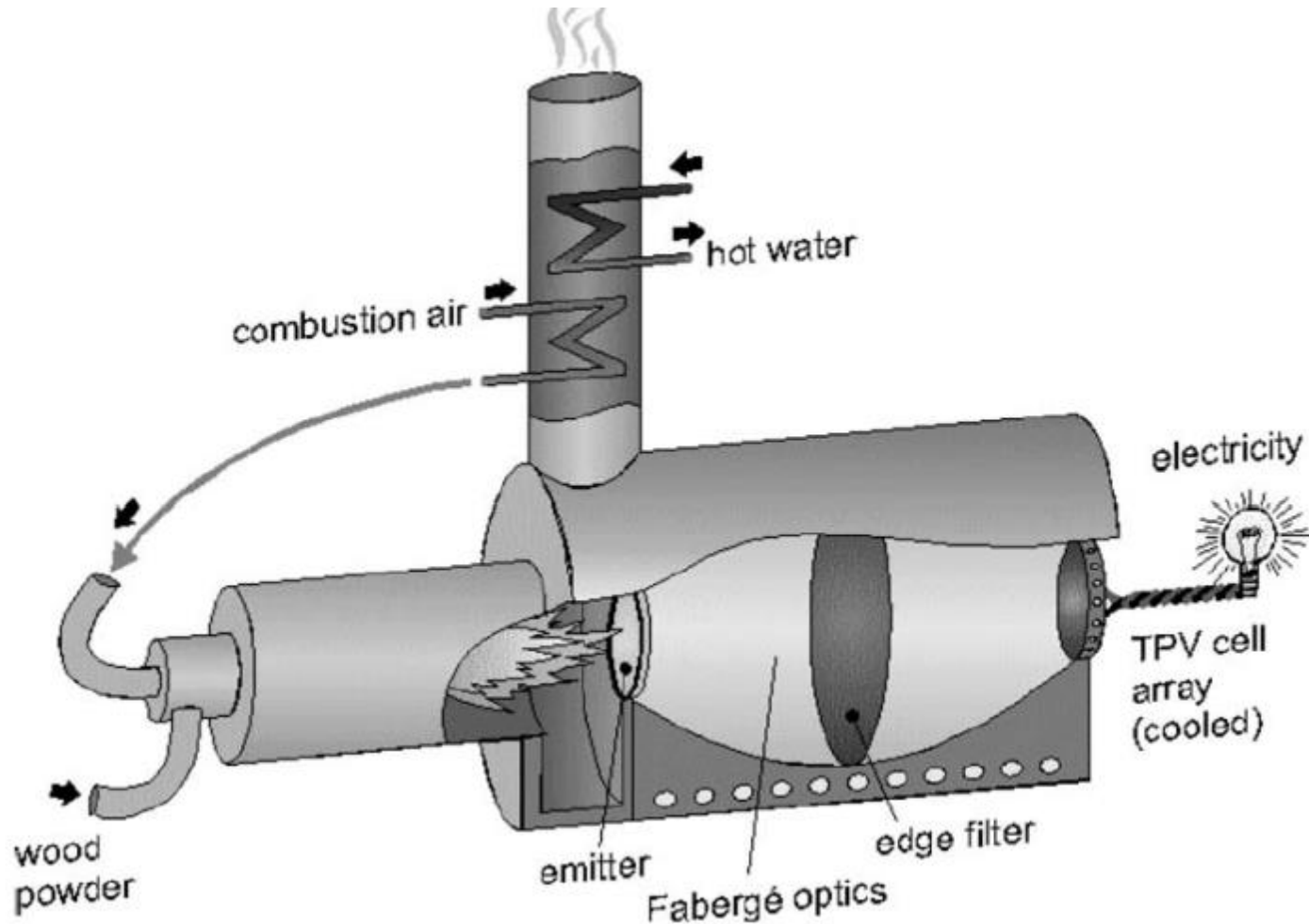


Sistemi Termofotovoltaici (TPV)



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}	η_e	η_{cog}	Costo	
JX Crystal (Midnight Sun)	100 W	7.3 kW	1.4 %	n.d	n.d	n.d.
JX Crystal ¹	1.5 kW	12.2 kW	12.3 %	n.d	5250 €	3500 €/kW
JX Crystal ²	550 W	5.7 kW	9.6 %	75 %	800 €	1800 €/kW
Paul Scherrer Inst. ²	200 W	20 kW	1.0 %	n.d	590 €	2950 €/kW

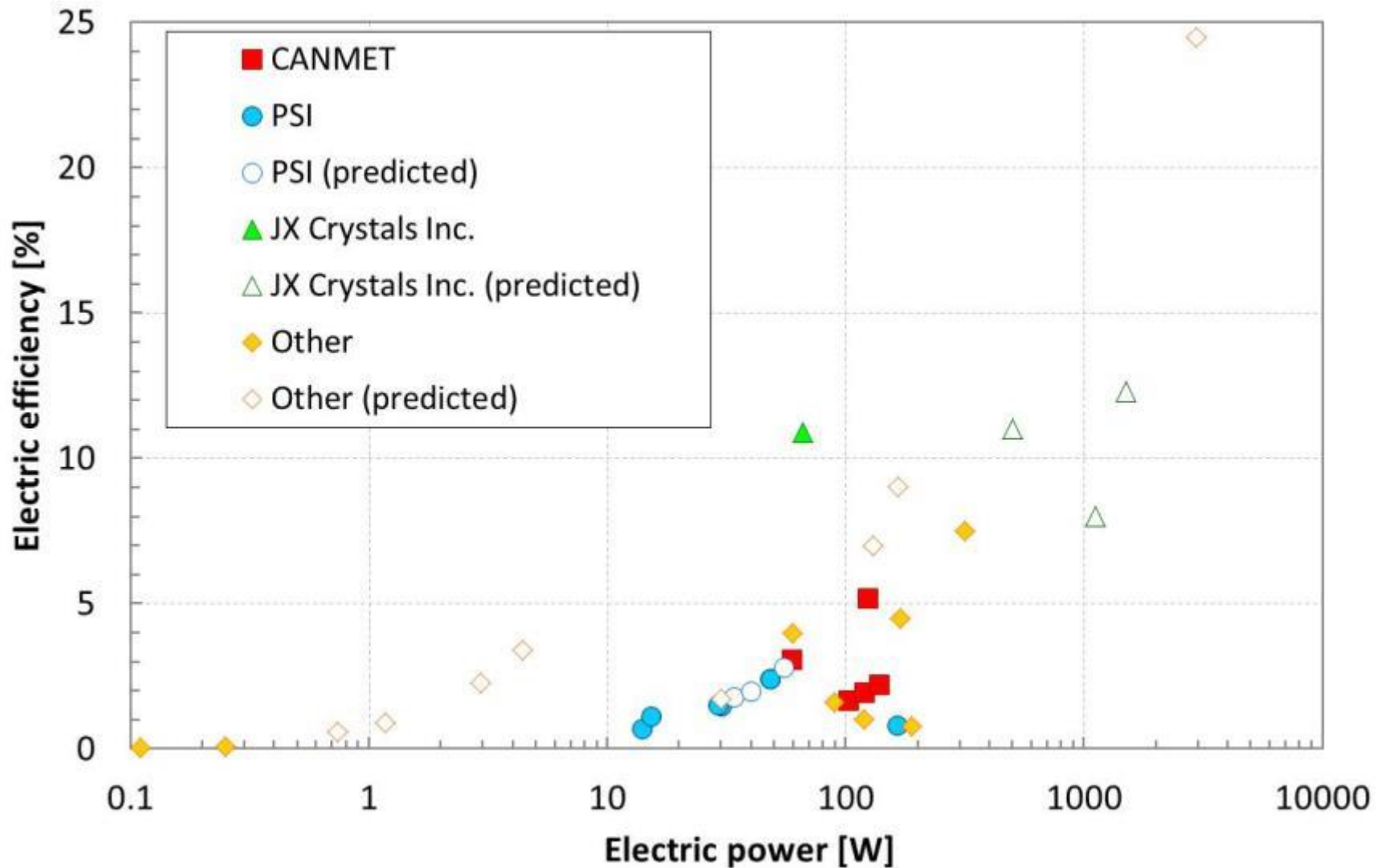
¹ Costo riferito al sistema complessivo caldaia + sistema TPV (senza inverter)

² Costo riferito al solo sistema TPV (senza inverter)

Sistemi Termofotovoltaici (TPV)

Reference	Burner	EMITTER	Type of emitter	Surface emitter temp.	η_{rad}	FILTER	CELLS	STC* efficiency	P_{fuel}	P_{el}	η_{el}	Type of result
				[K]	[%]			[%]	[W]	[W]	[%]	
[2]		Yb ₂ O ₃ -coated on Al ₂ O ₃	foam ceramic				Si		2000	14	0.70	experi.
[2]		Yb ₂ O ₃	fibrous mantle				Si		2000	30	1.50	experi.
[2]		Yb ₂ O ₃	fibrous mantle			TCO	CuInSe2 thin-film		2000	40	2.00	pre.
[14]		SiC	coated fiber mat		20.4		GaSb	20.0	6120	102	1.67	experi.
[14]		SiC	honeycomb plaque		22.9		GaSb	20.0	6120	119	1.94	experi.
[14]		SiC	porous foam		26.7		GaSb	20.0	6120	137	2.24	experi.
[14]		(1) Yb ₂ O ₃ fiber felt; (2) ceramic fiber-coated on SiC	Two emitters arranged in tandem		31.0		Si GaSb	36.0 20.0	1920	60	3.09	experi.
[15]		SiC	porous foam	1558	21.3	coatings of SiO ₂ and TiO ₃ on glass	GaSb		8260	123	5.20	experi.
[16]	butane	Yb ₂ O ₃	spherical emitter				Si		1350	15	1.13	experi.
[17]	methane	Yb ₂ O ₃				quartz tube	Si	16.0	20000	164	0.82	experi.
[18]	butane	Yb ₂ O ₃				glass tube	Si	16.0	1905	29	1.52	experi.
[18]	butane	Yb ₂ O ₃				glass tube	Si	16.0	1905	34	1.80	pre.
[18]	butane	Yb ₂ O ₃				glass tube	Si	21.1	1985	48	2.41	experi.
[18]	butane	Yb ₂ O ₃				glass tube	Si	21.1	1985	55	2.80	pre.
[19]	butane	Yb ₂ O ₃	porous foam	1735		SnO ₂ film on quartz	Si		1980	48	2.42	experi.
[22]	diesel	W-coated on SiC		1600			GaSb		4500	500	11.00	pre.
[24]		SiC				double quartz tube	GaSb		14000	1120	8.00	pre.
[24]		W-coated on SiC		1525			GaSb		12200	1500	12.30	pre.
[25]	regenerative burner	Yb ₂ O ₃ -coated on Al ₂ O ₃				dielectric filters	GaSb		606	66	10.90	experi.
[26]		Yb ₂ O ₃					Si		25000	190	0.76	experi.
[27]	propane	Yb ₂ O ₃				dielectric filters	Si		5625	90	1.60	experi.
[27]	propane	Yb ₂ O ₃		2100		dielectric filters	Si		1830	165	9.00	pre.
[28]				2000					3778	170	4.50	experi.
[28]				2100					4200	315	7.50	experi.
[29]	butane gas	Yb ₂ O ₃	fibrous mantle			no	Si	10.4	305	0.11	0.04	experi.
[29]	butane gas	Er ₂ O ₃	fibrous mantle			no	GaSb		305	0.25	0.08	experi.
[30]	methane	Yb ₂ O ₃		1800	24.0	quartz tube	Si	16.0	12000	120	1.00	experi.
[31]	hydrogen	SiC		1265		no	GaSb		130	0.74	0.57	pre.
[31]	hydrogen	SiC		1265		no	GaInAsSb		130	1.2	0.91	pre.
[31]	hydrogen	Co/Ni-doped MgO				no	GaInAsSb		130	2.9	2.28	pre.
[31]	hydrogen	Co/Ni-doped MgO				no	GaSb		126	4.4	3.48	pre.
[32]	diesel	ErAG-coated on SiC		1523		quartz tube	AlGaAs/ GaAs		12157	2976	24.50	pre.
[33]	methane	W-coated on SiC				glass tube	GaSb		1800	30	1.70	experi.
[33]	methane	W micro structured				glass tube	GaSb		1800	130	7.00	pre.
[34]	methane	Kanthal					GaSb		1460	60	4.00	experi.

Sistemi Termofotovoltaici (TPV)



Le tecnologie

Tecnologie CHP a combustione interna

Prototipali

- ✓ Sistemi termofotovoltaici (TPV)

Tecnologie CHP a combustione esterna

Prototipali

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

Tecnologie CHP a combustione interna/esterna

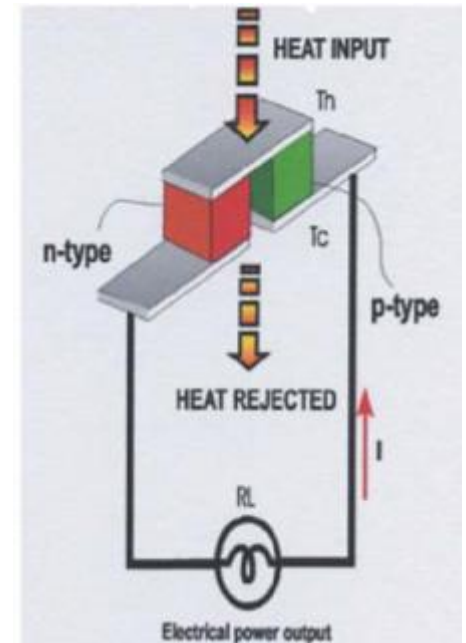
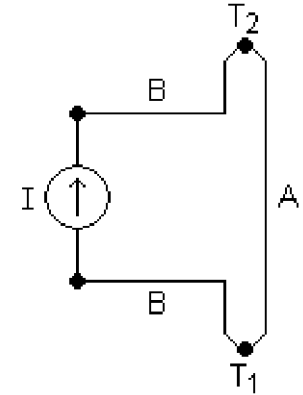
- ✓ Ciclo combinato gas-vapore
- ✓ Ciclo combinato MCI-ORC
- ✓ Ciclo combinato MTG-ORC

Consolidate

In fase di consolidamento

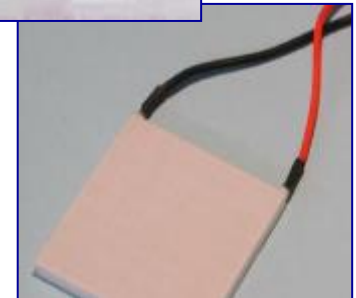
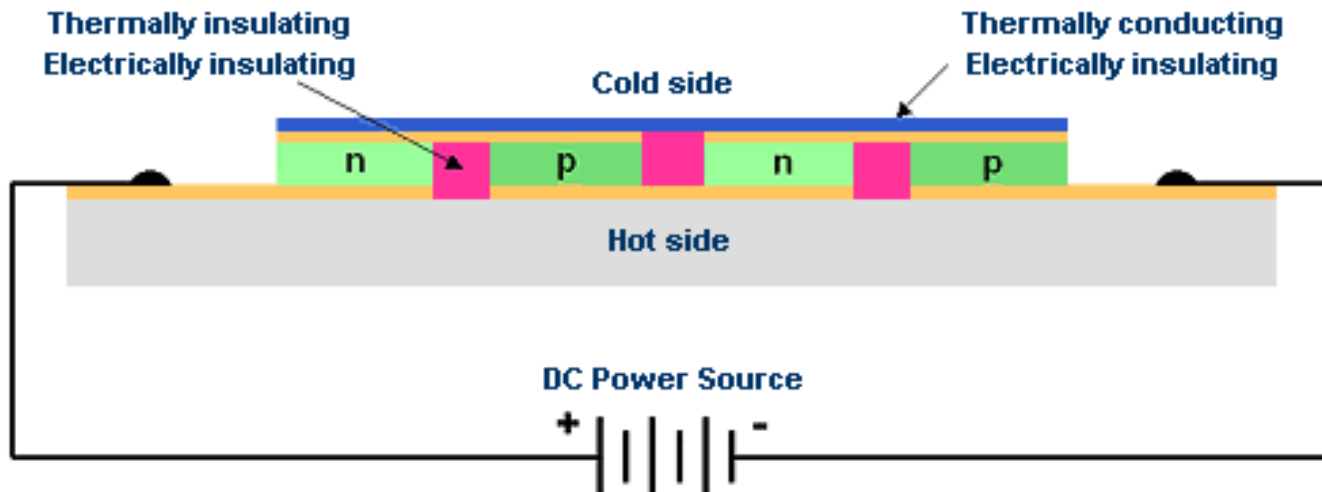
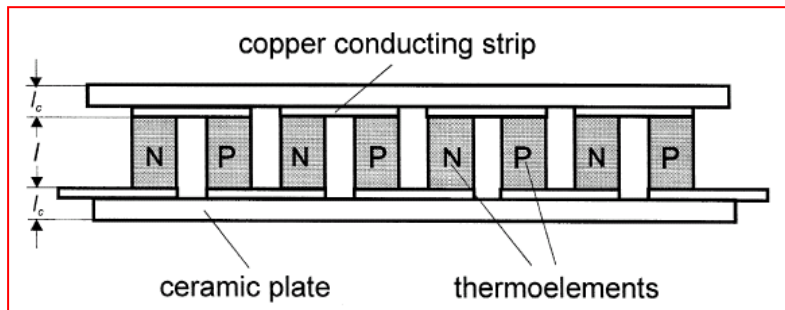
Sistemi Termoelettrici

- ✓ 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:

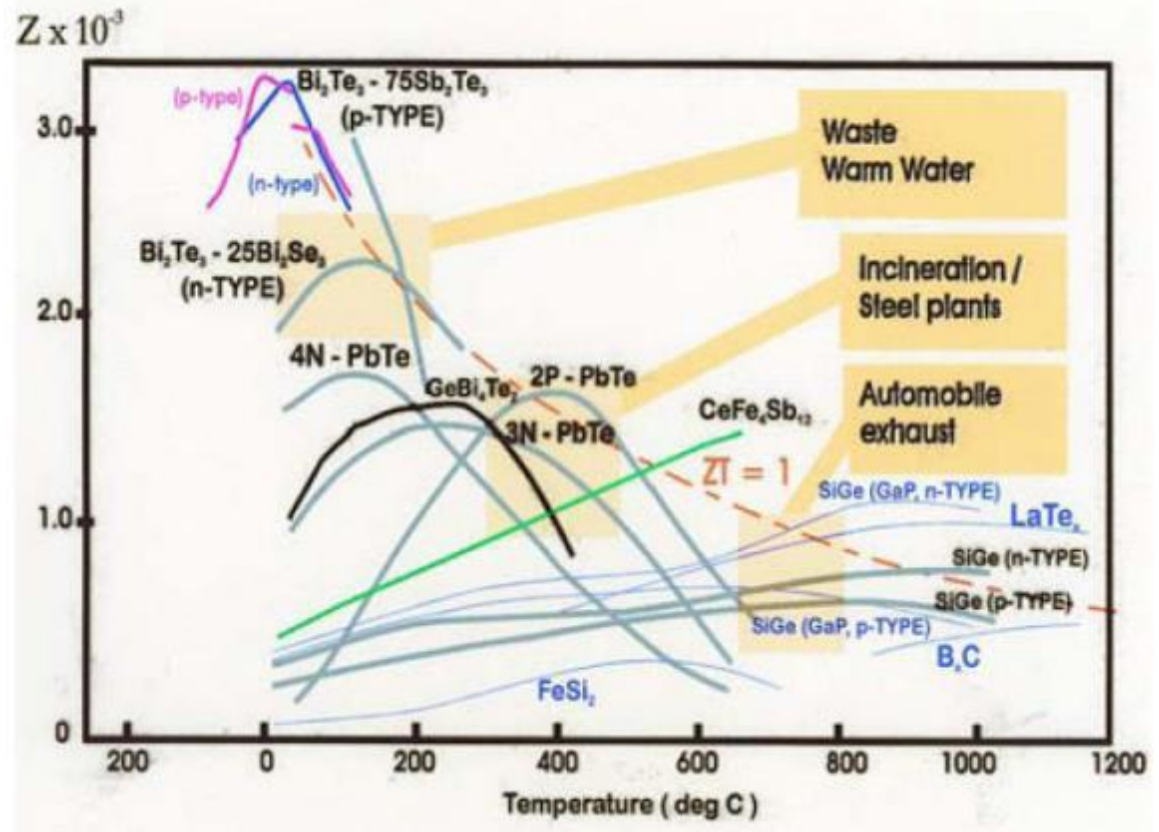
$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \lambda} \left[\frac{1}{\text{K}} \right]$$

α : coeff. di Seebeck [V/K]

ρ : resistività [$\Omega \text{ m}$]

λ : conducibilità termica

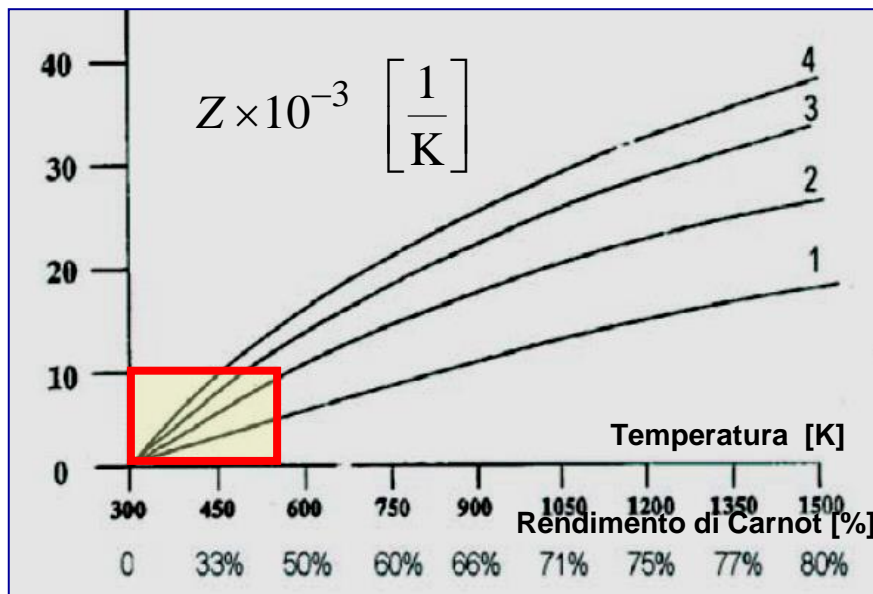
[W/(m K)]



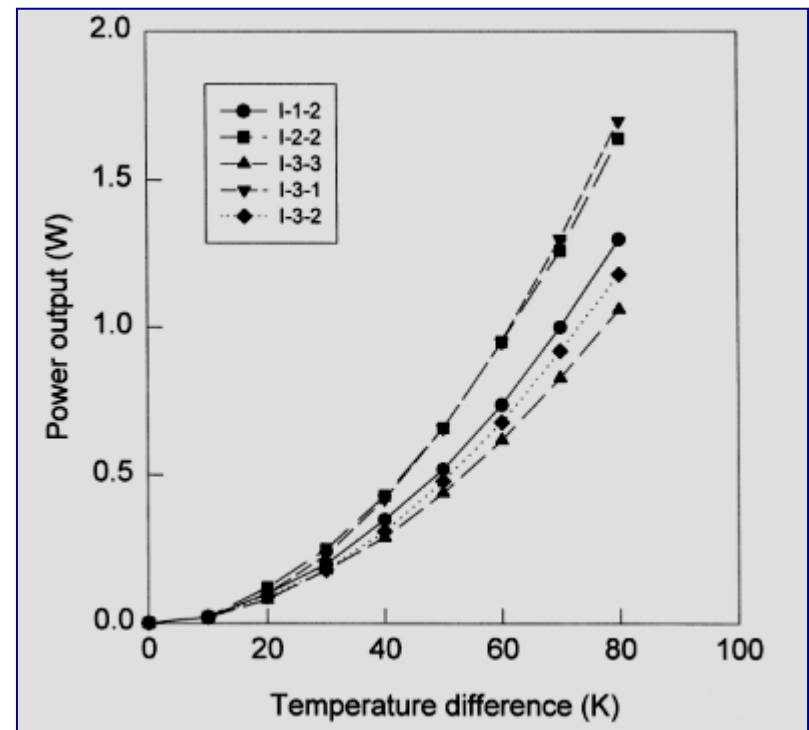
Sistemi Termoelettrici

- ✓ 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

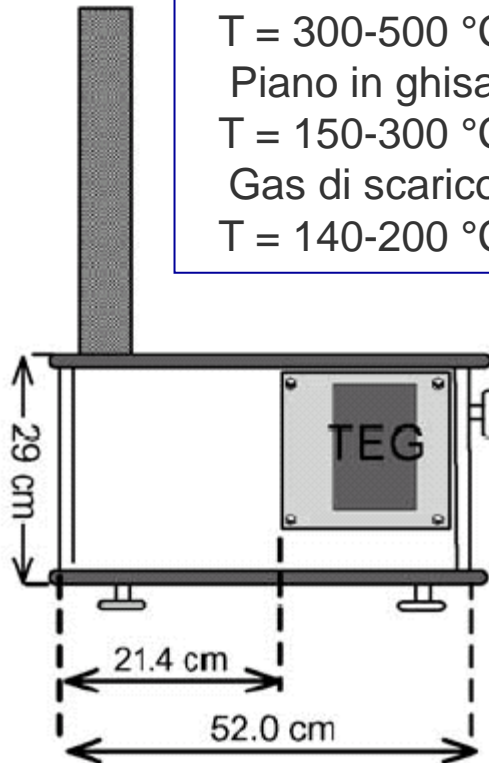
- ✓ I principali vantaggi offerti dai dispositivi termoelettrici sono
 - assenza di vibrazioni e rumore (non ci sono parti in movimento)
 - vita utile molto elevate (100'000 ore)
 - possibilità di utilizzo come dispositivo reversibile (fornendo energia elettrica può essere utilizzato per refrigerare 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
 $T = 140-200\text{ }^{\circ}\text{C}$



$$P_e = 4 W_e$$

