



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI "PARTHENOPE"**  
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA GESTIONALE**

## **Impianti di cogenerazione**

**(a.a. 2022/2023)**

**Prof. Ing. Elio Jannelli**

*Ordinario di Sistemi per l'Energia e l'ambiente*

Dipartimento di Ingegneria

[elio.jannelli@uniparthenope.it](mailto:elio.jannelli@uniparthenope.it)



# Risparmio energetico

- Minor consumo a parità di prodotti (beni e servizi)
  - Non mera compressione dei consumi
  - Ma uso razionale delle risorse energetiche
- Contenimento dei costi di produzione
- Minore dipendenza energetica
- Minore uso delle fonti fossili
- Riduzione delle emissioni inquinanti



## Tecnologie per il risparmio energetico

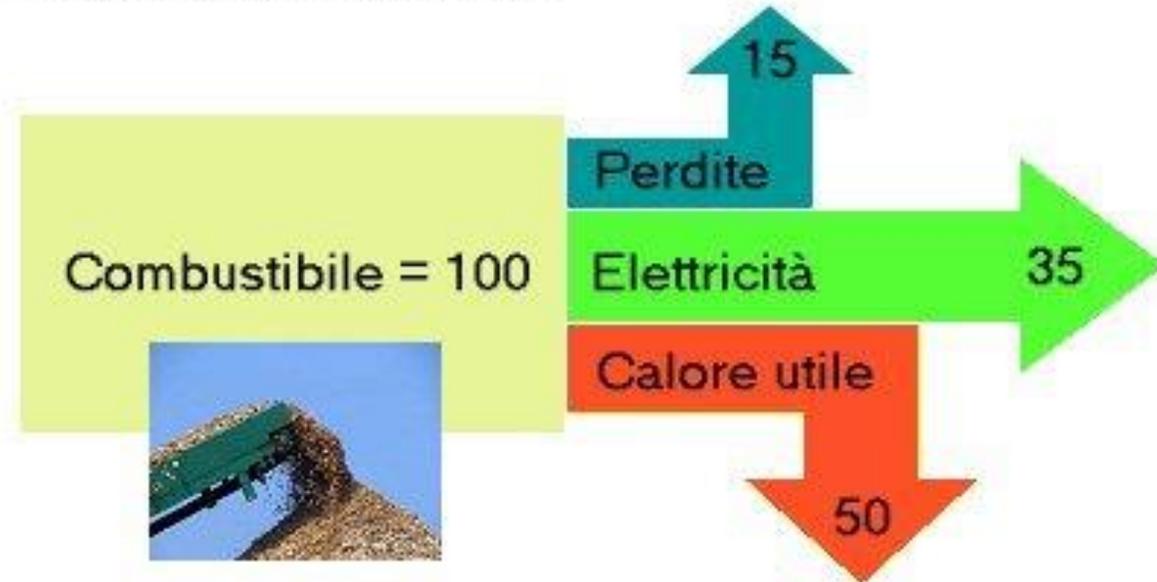
- Produzione combinata di energia elettrica e termica:
  - Cogenerazione industriale;
  - Teleriscaldamento civile;
- Impianti di conversione ad alto rendimento:
  - Celle a combustibile;
  - Impianti a ciclo combinato gas-vapore;
- Recupero dei reflui industriali e civili
- Altre tecnologie disponibili e/o interventi possibili:
  - Nuovi motori e mezzi propulsivi;
  - Pompe di calore;
  - Tecnologie delle fonti rinnovabili;
  - Edilizia bioclimatica;
  - Ottimizzazione dei processi produttivi
  - Razionalizzazione dei consumi civili (elettrodomestici, illuminazione, produzione di acqua calda, etc.)



## Produzione combinata di energia elettrica e termica

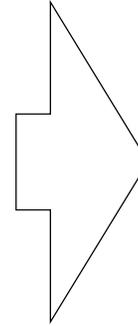
Cogenerazione ↔ Produzione di elettricità e di calore come effetti utili del medesimo processo di conversione di energia primaria

### LA COGENERAZIONE



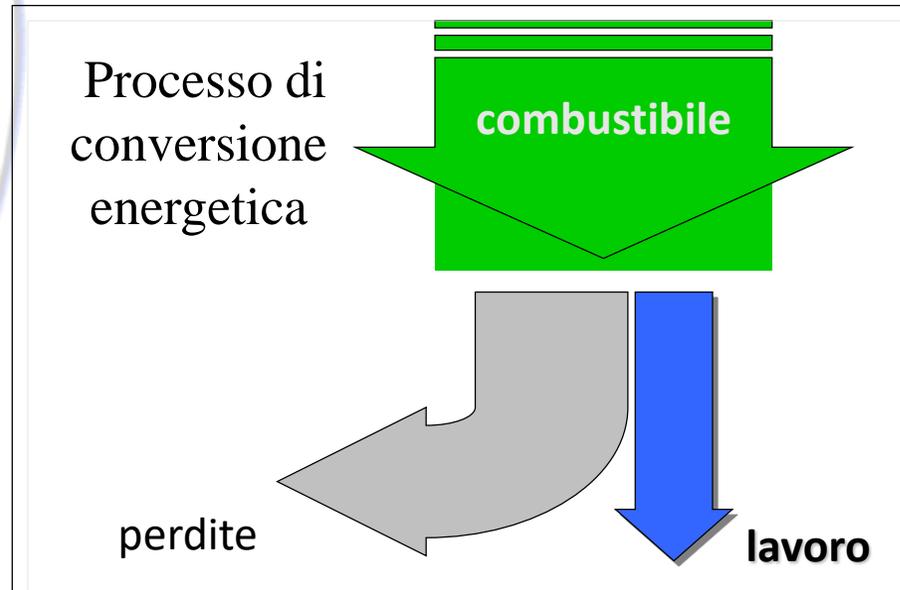
# Confronto cogenerazione e produzione separata

**Cogenerazione**

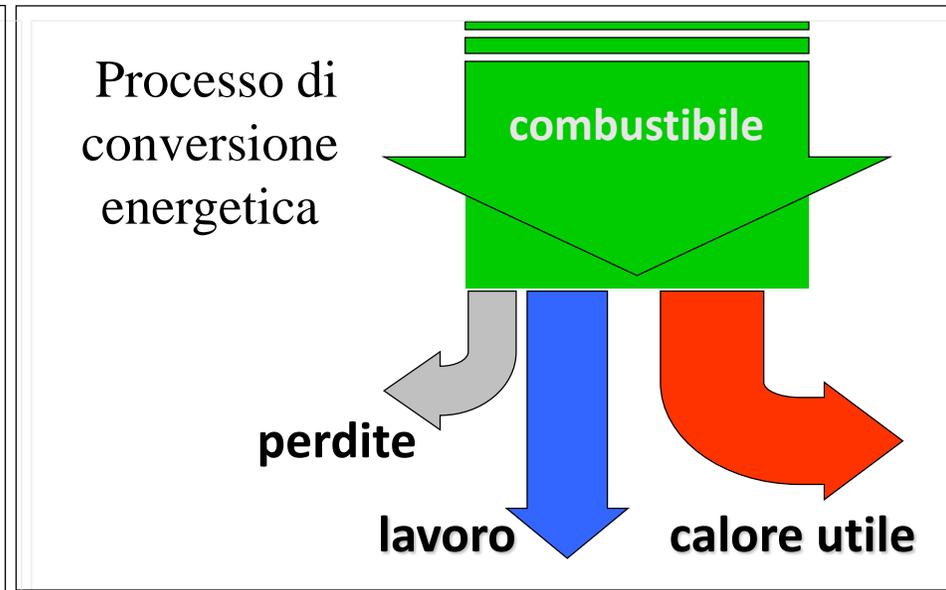


Produzione combinata di  
energia (elettrica)  
ed energia **termica**

SISTEMA TRADIZIONALE



SISTEMA COGENERATIVO



# Convenienza della cogenerazione Confronto con generazione separata

- La convenienza della cogenerazione non è scontata;  
La riduzione dei consumi di energia primaria dipende:
- dalla tecnologia di conversione utilizzata .
  - dalle condizioni di utilizzazione dell'impianto.

PRODUZIONE IN COGENERAZIONE



ENERGIA PRIMARIA UTILIZZATA  
100

PRODUZIONE SEPARATA



ENERGIA PRIMARIA UTILIZZATA  
 $53+95=148$



## Tecnologie disponibili per la cogenerazione

- Turbina a gas con post-combustore
- Turbina a gas ad iniezione di vapore
- Impianto combinato turbina a gas – Turbina a vapore
- Turbina a vapore a contropressione
- Turbina a vapore a condensazione con spillamenti di vapore per cogenerazione
- Motore a combustione interna con recupero parziale o totale del calore
- Celle a combustibile ad alta temperatura



## Scelta della tecnologia

Sono disponibili tecnologie differenti per produrre energia elettrica e calore insieme.

### **Criteri:**

- **Gli utenti devono utilizzare il calore vicino all'impianto per evitare dispersioni nella trasmissione.**
- **La tecnologia dell'impianto deve essere scelta in funzione al fabbisogno di calore specifico dell'utenza.**
- **Le unità di cogenerazione devono essere dimensionate sulla taglia dell'utenza.**
- **Fonte di energia disponibile.**



## Scelta della tecnologia

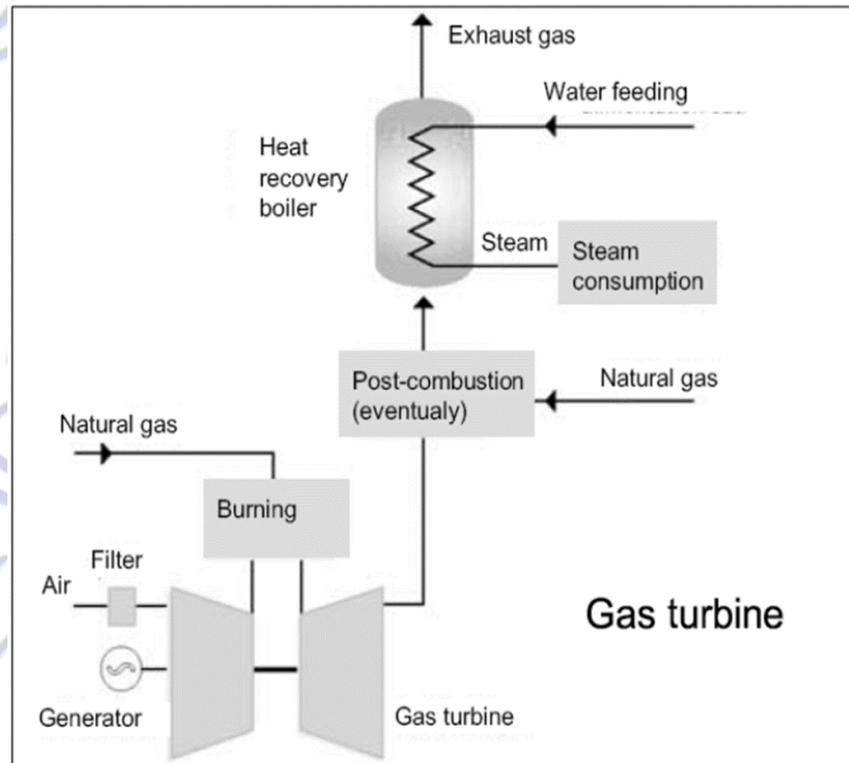
Cogeneration technologies	Fuels (not exhaustive)	You need hot water?	You need steam?	You need hot air?
Gas turbine	Natural gas, biogas, heating oil	++	++	++
Gas Engine	Natural gas, biogas, heating oil, vegetable oil, wood	++	+	+
Heating oil Engine	Natural gas, biogas, heating oil, vegetable oil, wood	++	+	+
Steam turbine	Natural gas, biogas, heating oil, vegetable oil, wood, etc.	++	++	+
Stirling engine	Natural gas, biogas, heating oil, wood	++		
Fuel cell	Hydrogen or, via reforming, all others fuels	++		

"++" significa che la tecnologia è molto adatta

"+" significa meno adatta

nessuna indicazione significa che non è adatta per produrre il tipo di energia termica indicata

# Turbina a gas



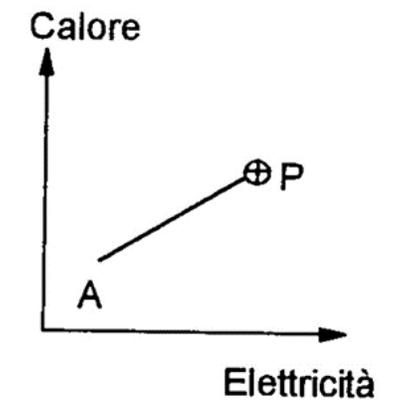
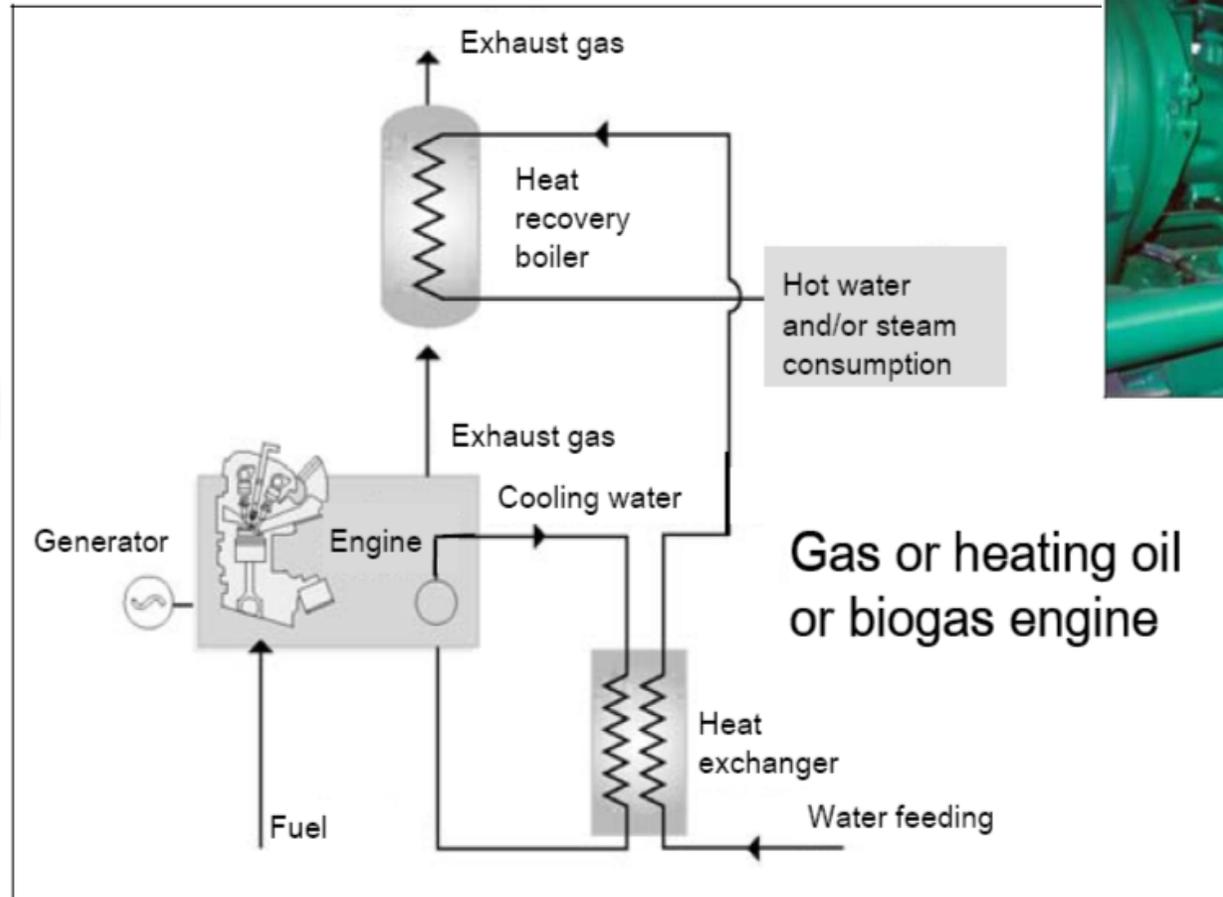
- **Tecnologia molto importante per cogenerazione su larga scala.**
- **Ampia scala di unità disponibili: a partire dalle microturbine con ~30 kW<sub>e</sub>.**
- **Emissioni ridotte di ossidi di azoto e zolfo rispetto al gasolio.**

	Smallest unit	Typical small-scale unit
Electrical power:	28 kW <sub>e</sub>	250 kW <sub>e</sub>
Electrical efficiency:	26%	30%
Thermal power:	52 kW <sub>th</sub>	330 kW <sub>th</sub>
Thermal efficiency:	47%	40%
NO <sub>x</sub> emission:	< 9 ppmV	< 9 ppmV
CO emission:	< 10 ppmV	< 9 ppmV
Size (L x W x H):	1.3 x 0.7 x 1.9 m	4 x 2.2 x 2.3 m
Weight:	0.5 tons	235 tons
Investment:	2 500 € /kW <sub>e</sub>	1 500 € /kW <sub>e</sub>



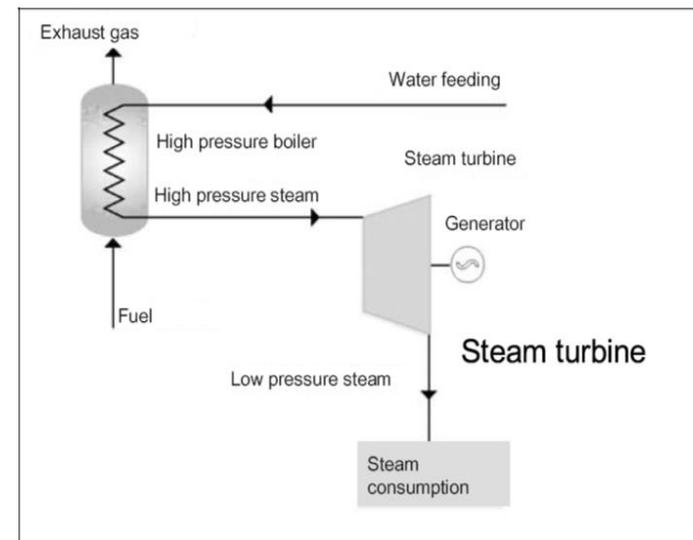


# Motore a gas



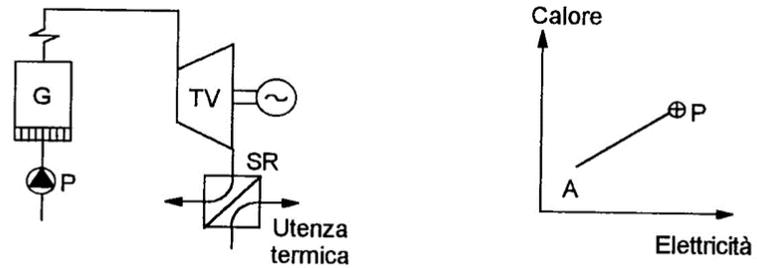
# Turbina a vapore

- **Tecnologia utilizzata per cogenerazione su larga scala da molti anni.**
- **Range di unità disponibili: a partire da ~200 kWe.**
- **Efficienza complessiva generalmente alta, raggiungendo perfino l'84%.**
- **Funziona con: combustibili solidi, liquidi o gassosi (anche rinnovabili).**

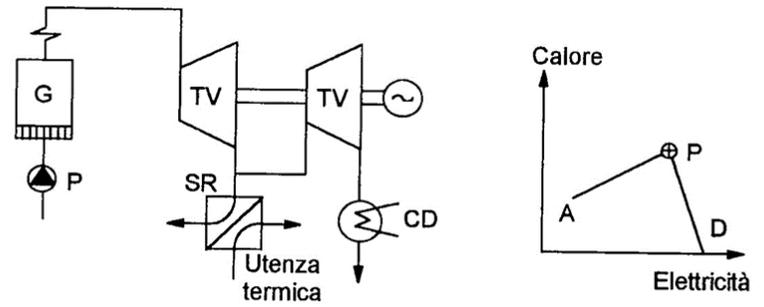




# Turbina a vapore



**Turbina a vapore a contropressione**



**Turbina a vapore a condensazione e spillamento**

	Typical small-scale unit
Electrical power:	500 kW <sub>e</sub>
Electrical efficiency:	10%
Thermal power:	3,000 kW <sub>th</sub>
Thermal efficiency:	70%
NOx emission:	
CO emission:	
Size (L x W x H):	depending on the boiler
Weight:	
Investment:	

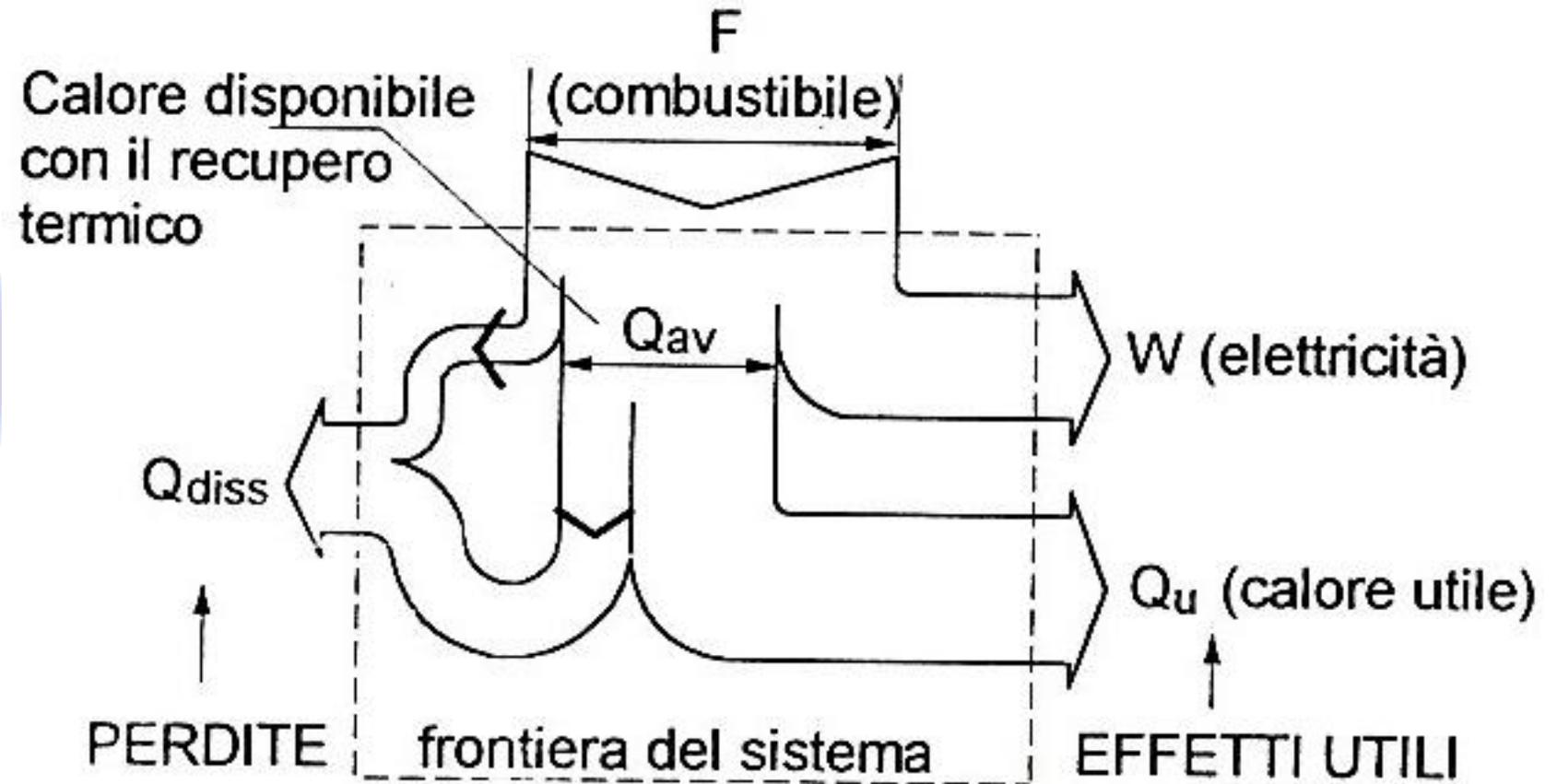




## Analisi termodinamica degli impianti di potenza e di cogenerazione

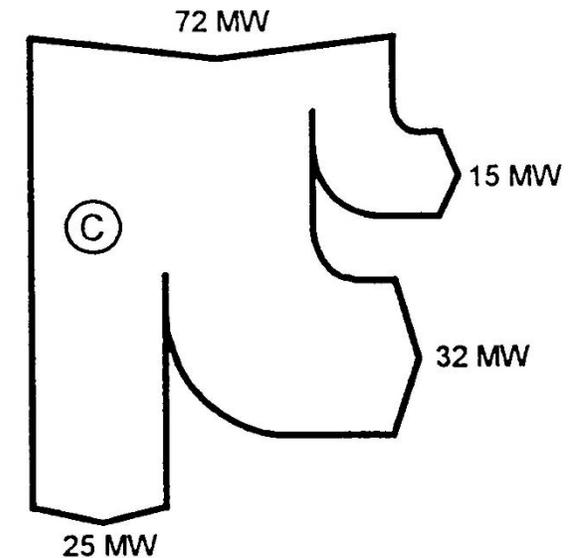
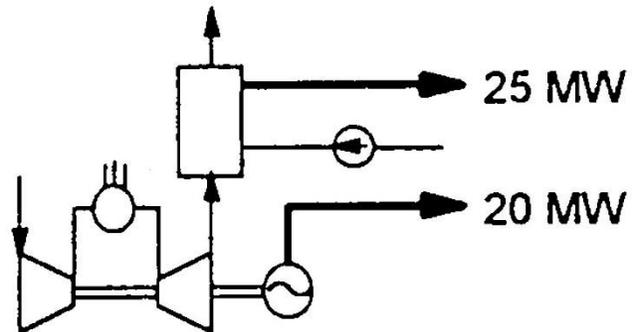
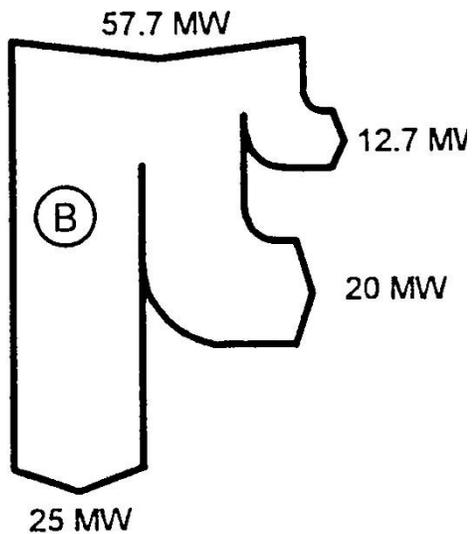
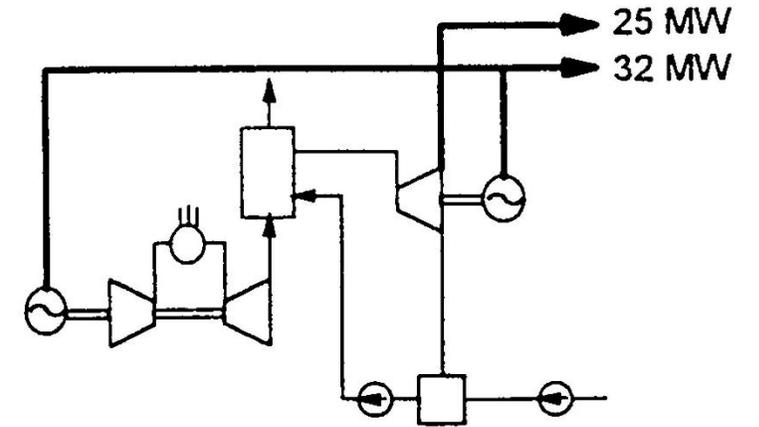
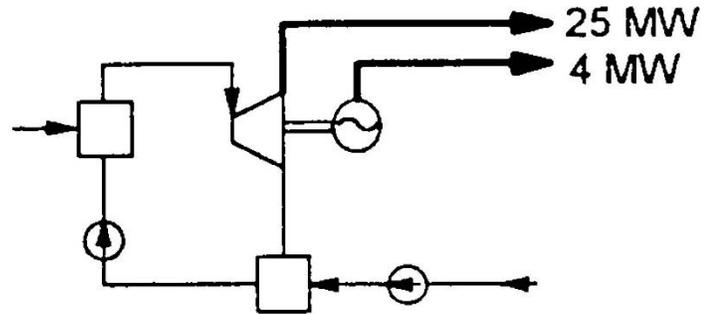
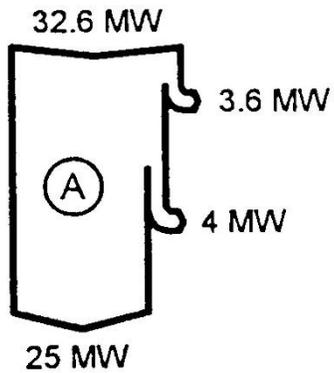
- Bilanci di energia di impianti e componenti
- Definizione dei rendimenti e degli indici di prestazione caratteristici
- Analisi del processo termodinamico, dello schema di impianto e dei componenti
- Prestazioni off-design
- Piano di regolazione (Energia termica/elettrica)

# Bilancio di energia di un generico impianto di cogenerazione



# Bilanci di energia

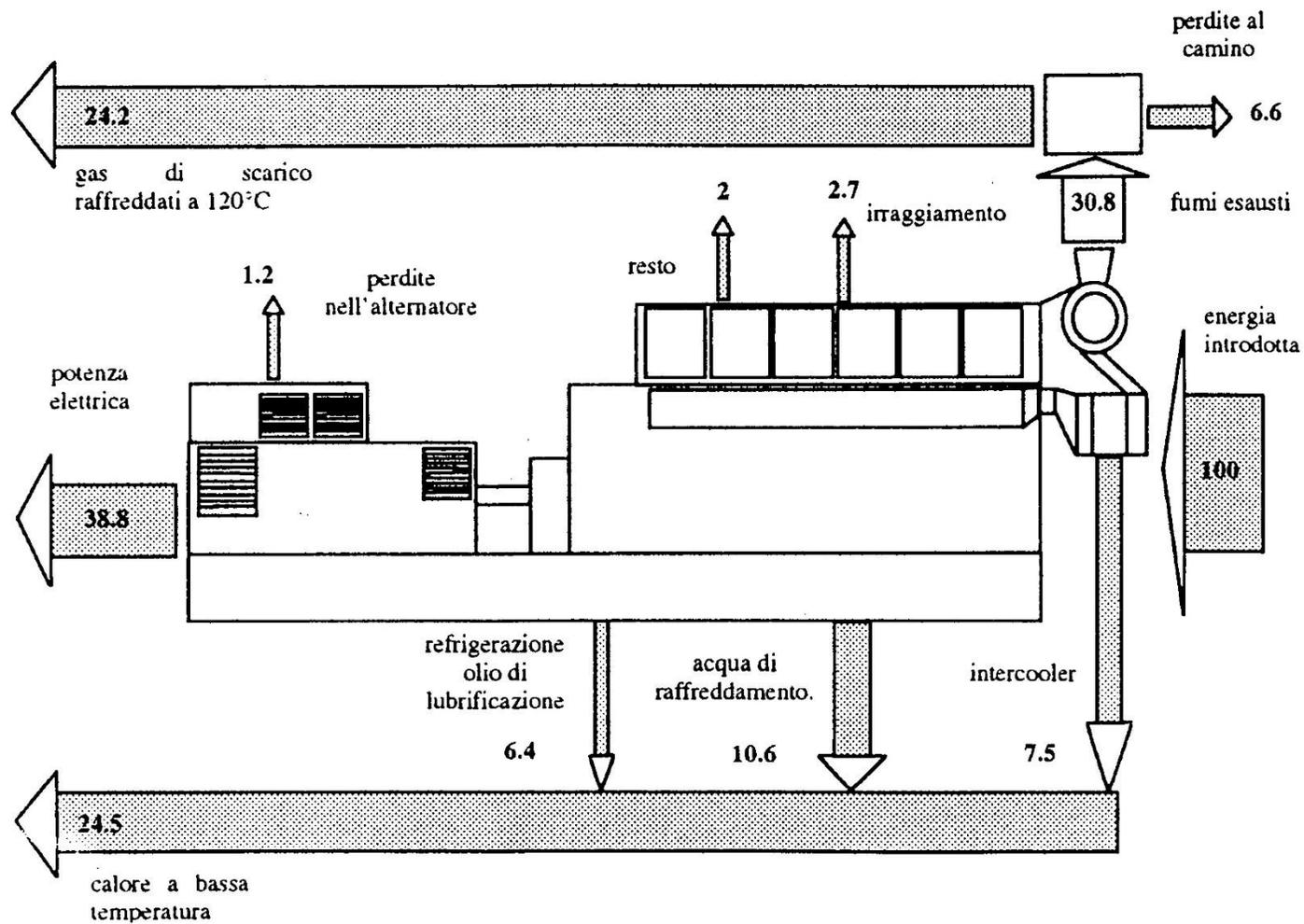
per una stessa utenza termica  
al variare della tecnologia di cogenerazione



Gestione dei Sistemi Energetici -  
Prof.E.Jannelli



## Bilancio di energia di un motore alternativo in cogenerazione





## Rendimenti ed indici di prestazione

- Rendimento elettrico

$$\eta_{el} = \frac{W}{F}$$

- Rendimento termico

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{F}$$

- Indice elettrico (o rapporto di cogenerazione)

$$I_e = \frac{W}{Q_u} = \frac{\eta_{el}}{\eta_{th}}$$

- Nota

$$\eta_{el} + \eta_{th} < 1$$

## Rendimenti ed indici di prestazione

Rendimento di I principio

Rendimento di II principio

$$\eta_I = \frac{W + Q_u}{F} = \eta_{elI} + \eta_{th}$$

$$\eta_{II} = \frac{W + Q_u (1 - T_0/T_x)}{F}$$

- PES (Primary Energy Saving)

$$IRE = \frac{F_c - F}{F_c} = 1 - \frac{F}{F_c} = 1 - \frac{F}{W / \eta_{elC} + Q_u / \eta_{thC}} = 1 - \frac{1}{\eta_{el} / \eta_{elC} + \eta_{th} / \eta_{thC}}$$

- Rendimento di produzione elettrica

$$\eta_{pe} = \frac{W}{F - F_{QC}} = \frac{W}{F - Q_u / \eta_{thC}} = \frac{1}{\frac{1}{\eta_{el}} - \frac{1}{I_e \eta_{thC}}} = \frac{1}{1 - \frac{\eta_{th}}{\eta_{thC}}}$$



## Assegnazione valori di riferimento agli indici comparativi

Prestazioni del sistema convenzionale

- Valori medi delle prestazioni delle caldaie e delle centrali elettriche convenzionali in esercizio

$$\eta_{elC} = 0,375$$

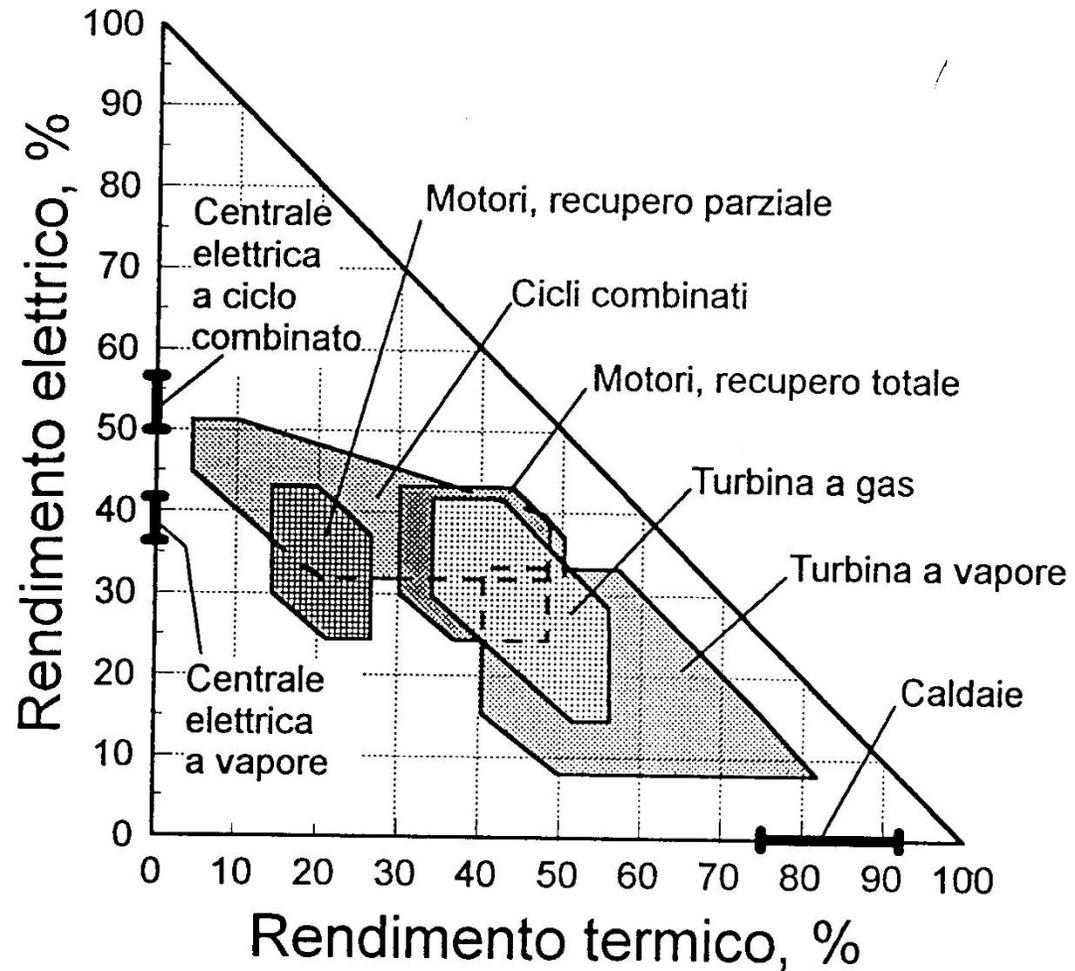
$$\eta_{thC} = 0,90$$

- Valori massimi ottenibili dalle migliori tecnologie disponibili

$$\eta_{elC} = 0,51$$

$$\eta_{thC} = 0,90$$

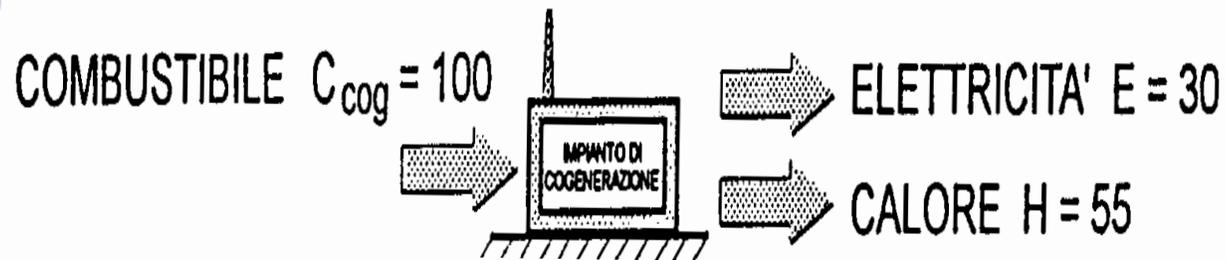
# Rendimenti delle principali Tecnologie di cogenerazione



# Potenzialità della cogenerazione

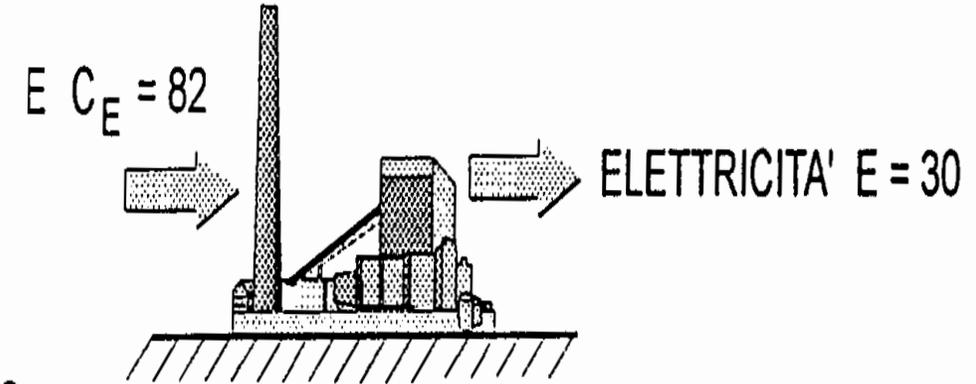
## SISTEMA COGENERATIVO

IMPIANTO DI  
COGENERAZIONE



## SISTEMA CONVENZIONALE

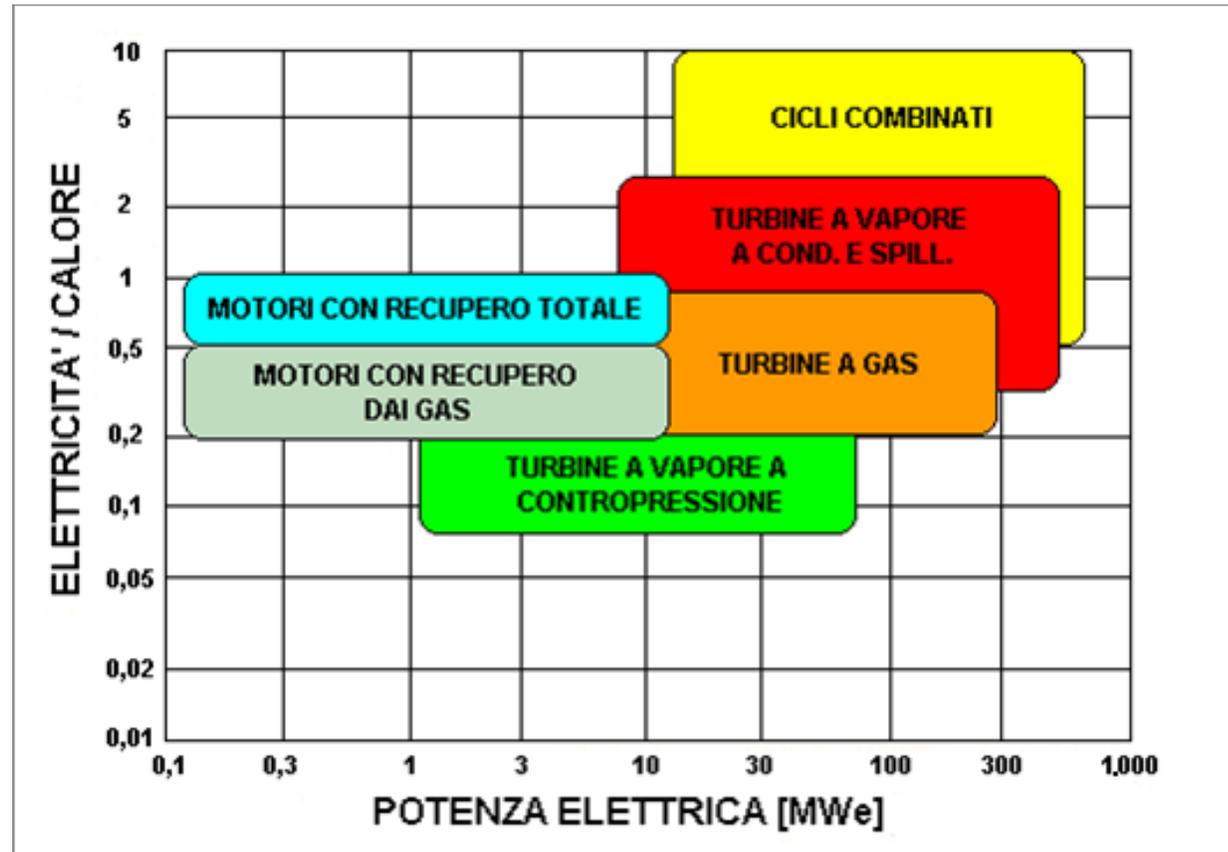
CENTRALE ELETTRICA



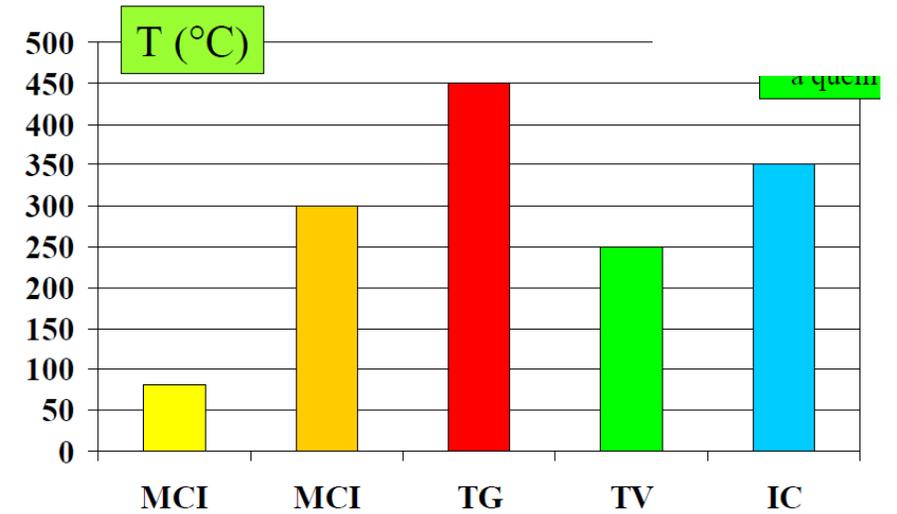
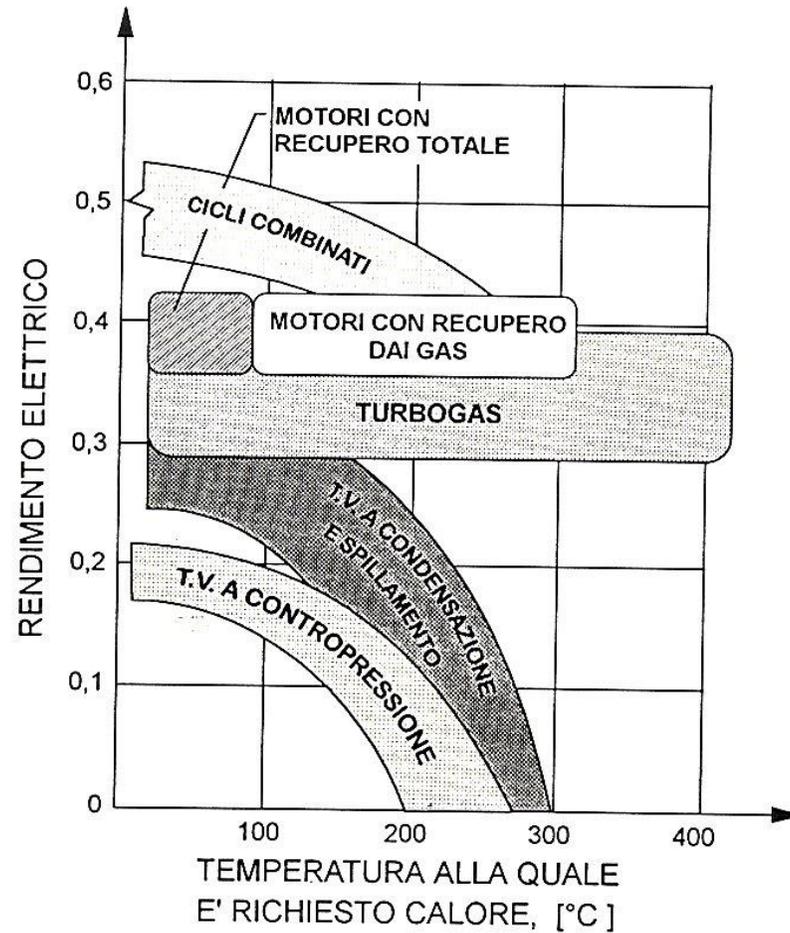
CENTRALE TERMICA

$$\text{INDICE RISPARMIO COMBUSTIBILE} = \frac{[C_E + C_H] - C_{cog}}{[C_E + C_H]} = \frac{144 - 100}{144} = 30.6 \%$$

# Campi di applicazione delle principali Tecnologie di cogenerazione

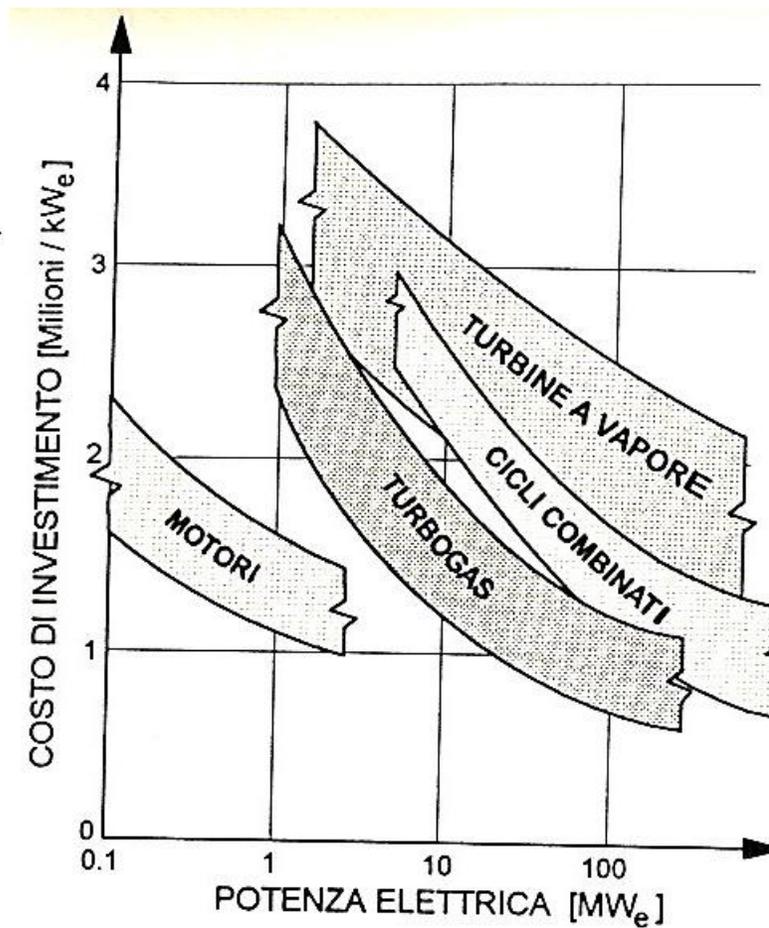
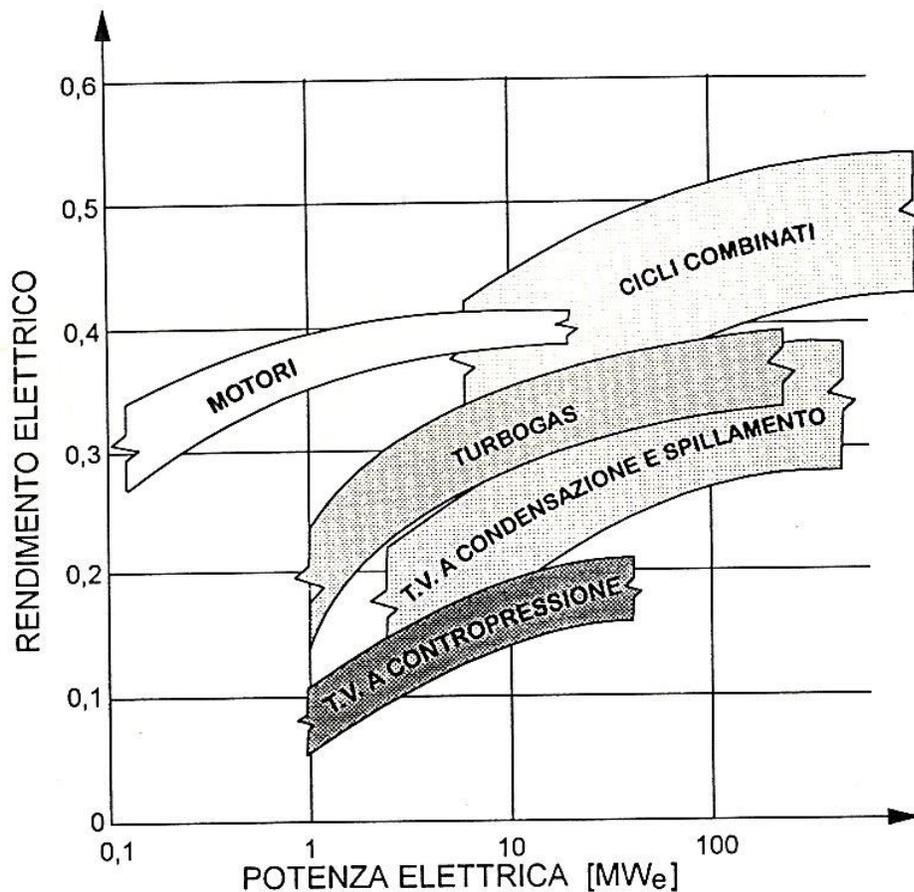


# Rendimento elettrico al variare della temperatura di utilizzazione del calore per ciascuna tecnologia di cogenerazione

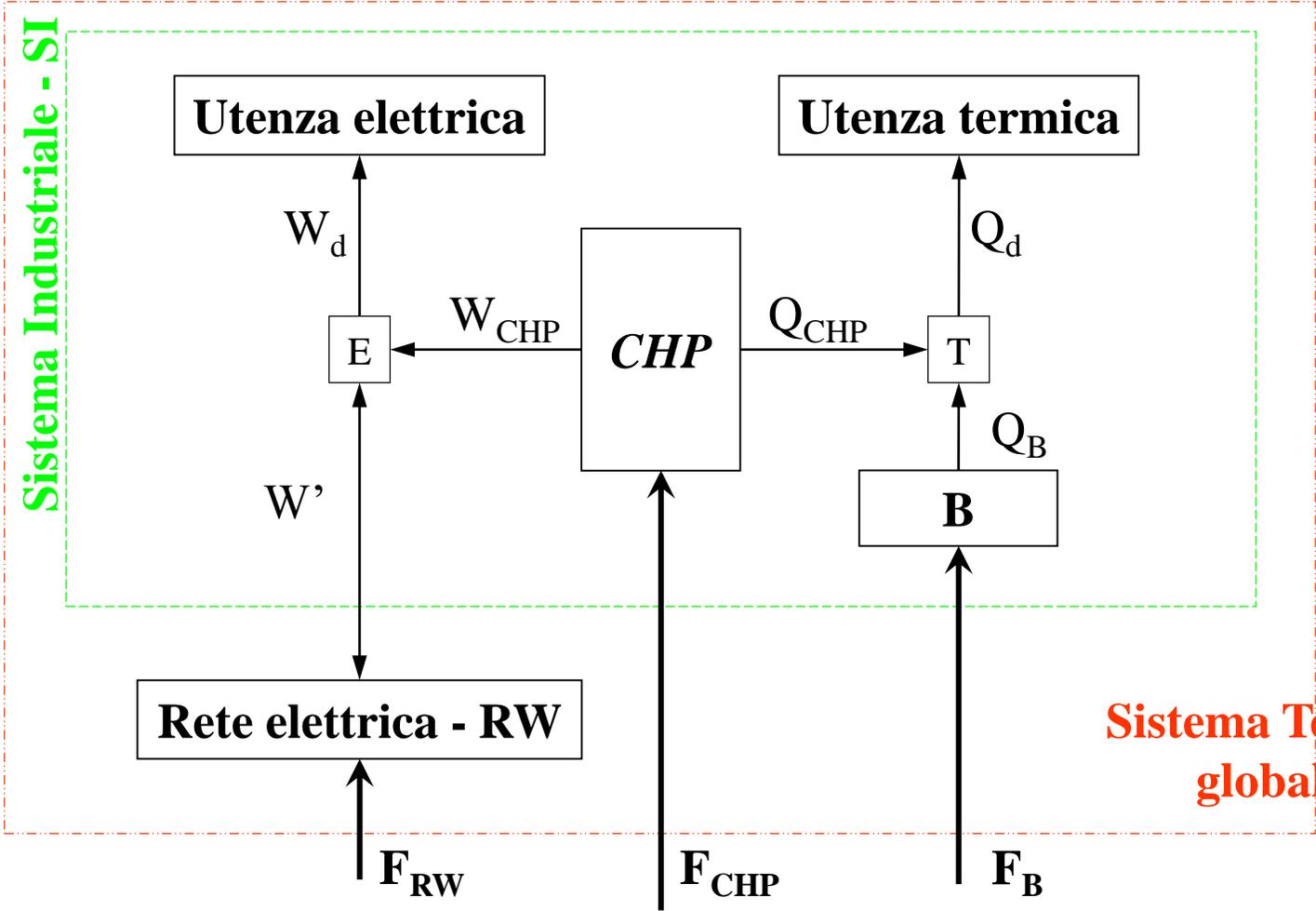




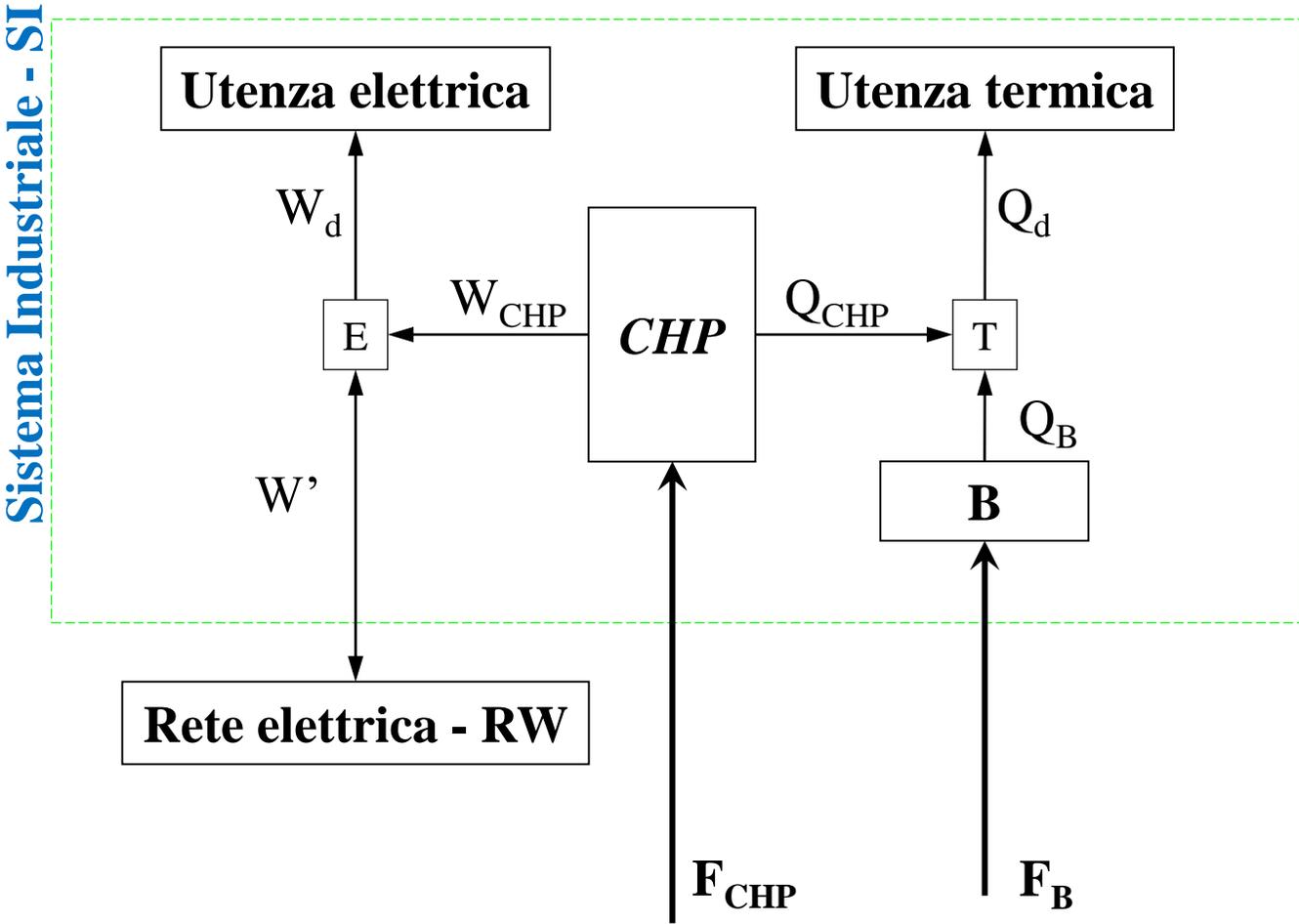
# RENDIMENTO ELETTRICO E COSTO AL VARIARE DELLA TAGLIA DELLA TECNOLOGIA DI COGENERAZIONE



# Caratterizzazione dei sistemi energetici



# Caratterizzazione dei sistemi energetici



$W_{cg} = W_D$   
 $Q_{cg} = Q_D$

**Condizioni operative:**  
❖ richiesta elettrica e termica



## BILANCI ELETTRICI E TERMICI

$$W_d = W_g + W_{cg} + W_{in} + W_{out}$$

$$Q_d = Q_b + Q_{cg} + Q_{in} + Q_{out}$$

Impianto CHP integrato con le reti ed i generatori ausiliari

$$EUF_{cg} = \frac{W_{cg} + Q_{cg}}{F_{cg}}$$

Indice di utilizzazione energetico dell'impianto CHP

$$EUF_{st} = \frac{W_d + Q_d}{F_{st}}$$

$$F_{st} = F_{rw} + F_g + F_{cg} + F_b + F_{rq}$$

Indice di utilizzazione energetico del Sistema di cogenerazione:

- impianto motore termico
- generatori
- reti ausiliari

$$EUF_r = \frac{W_d + Q_d}{F_r}$$

$$F_r = F_{rw} + F_b$$

Indice di utilizzazione energetico del sistema di riferimento



## TEMPERATURA DI UTILIZZAZIONE DEL CALORE

Non è sufficiente che la quantità di calore richiesta sia uguale a quella fornita dall'impianto CHP, è necessario considerare anche il valore di temperatura a cui è disponibile il vapore.

Es.

Un motore diesel non è in grado di produrre in cogenerazione vapore surriscaldato

È necessario considerare:  $T_D \leq T_{cg}$

## STRATEGIA DI REGOLAZIONE DI UN IMPIANTO CHP

- a) Inseguimento del carico elettrico
- b) Inseguimento del carico termico

Impianto isolato (o in isola) → Non ricorre alle reti elettriche e termiche  
Impianto integrato con la rete

$Q_D$  = potenza termica domandata

$W_D$  = potenza elettrica domandata

### Termico a seguire

$$Q_D = Q_{CG}$$

$$W_D = W_{CG} + W$$

### Elettrico a seguire

$$Q_D = Q_{CG} + Q$$

$$W_D = W_{CG}$$

In un impianto in isola la regolazione dell'impianto si basa sul carico elettrico.  
In un impianto collegato alla rete è possibile avere diverse soluzioni:

- inseguire il carico elettrico;
- inseguire il carico termico;
- inseguire la condizione di minimo costo.

## Impianto CHP e Sistema Territoriale

$$t_0 \Rightarrow Q_D = Q_{cg}; W_D = W_{cg}$$

$$t_1 \Rightarrow Q_D' = Q_D + Q' \longrightarrow \text{Aumenta la richiesta di energia termica}$$

**2 possibilità di intervento**

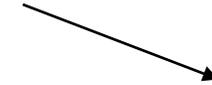


**CASO 1**

Cambio il punto di funzionamento dell'impianto CHP

$$Q_D' = Q_{cg}'$$

$$W_D + W' = W_{cg}'$$



**CASO 2**

Accendo un boiler ausiliario per soddisfare l'incremento di potenza termica richiesta

$$Q_D = Q_{cg}; Q' = Q_B$$

$$W_D = W_{cg}$$



# Confronto regolazione CHP

## CASO 1

Cambio il punto di funzionamento dell'impianto CHP

$$Q_D' = Q_{cg}'$$

$$W_D + W' = W_{cg}'$$

$$\delta F^I = \frac{W'}{\eta_{cg}}$$

$$Q_{cg} = (F_{cg} - W_{cg})\eta_x$$

$$Q_{cg} = (F_{cg} - F_{cg}\eta_{cg})\eta_x = F_{cg}(1 - \eta_{cg})\eta_x$$

$$Q_{cg} = (1 - \eta_{cg})\eta_x \cdot \frac{W_{cg}}{\eta_{cg}}$$

$$\frac{Q_{cg}}{(1 - \eta_{cg})\eta_x} = \frac{W_{cg}}{\eta_{cg}}$$

$$\eta_x \cong 0.7;$$
$$\eta_{cg} \cong 0.3 \div 0.4$$

$$\delta F^I = \frac{W'}{\eta_{cg}} = \frac{Q'}{(1 - \eta_{cg})\eta_x}$$

$$\delta F^I = \frac{Q'}{(0.42 \div 0.49)}$$

## CASO 2

Accendo un boiler ausiliario per soddisfare l'incremento di potenza termica richiesta

$$Q_D = Q_{cg}; Q' = Q_B$$

$$W_D = W_{cg}$$

$$\delta F^{II} = \frac{Q'}{\eta_B}$$

$$\eta_B = 0.8 \div 0.9$$

$$\delta F^I > \delta F^{II}$$

## Impianto CHP e Sistema Territoriale

**Risparmio del consumo di combustibile della rete a seguito dell'esportazione in rete di energia elettrica in eccedenza dell'impianto CHP**

$$\delta F_{rete} = \frac{W'}{\eta_{rete}} \quad \eta_{rete} = 0.37$$

**Incremento del consumo di combustibile del produttore a seguito della modifica del punto di funzionamento dell'impianto al fine di soddisfare il carico termico**

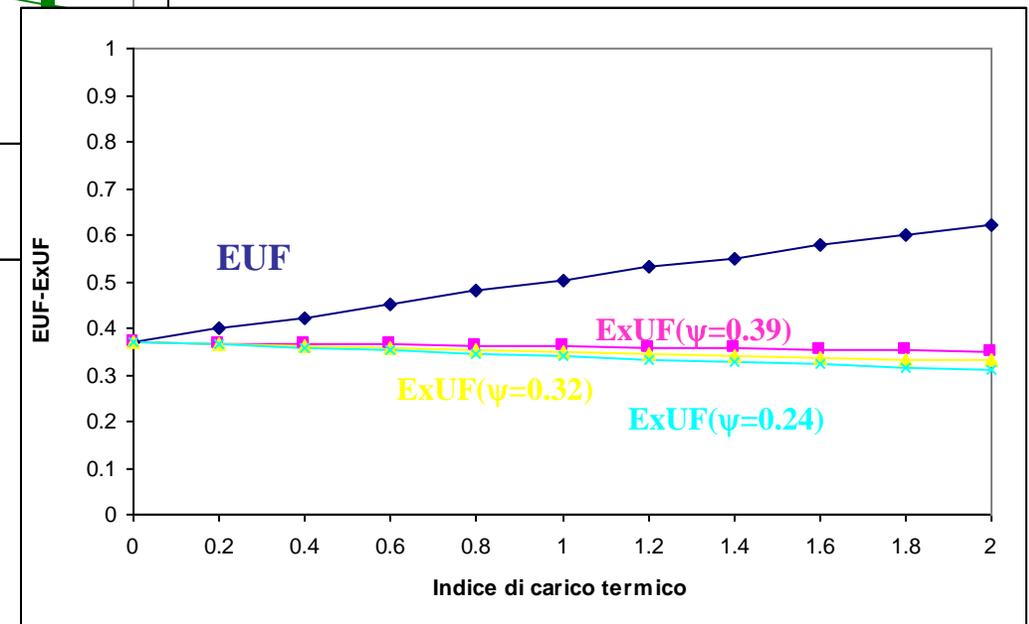
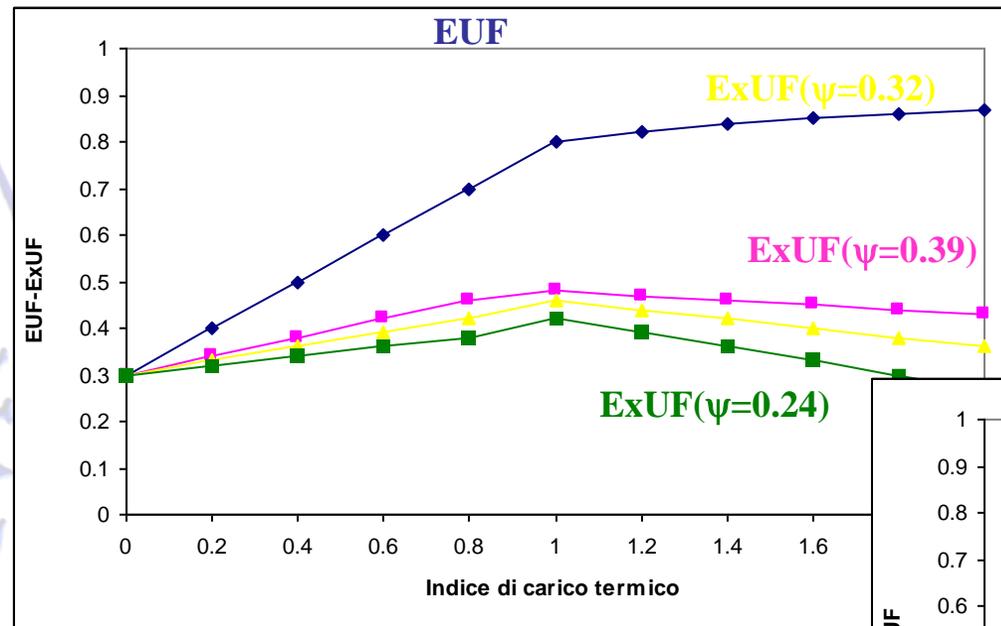
$$\delta F^I = \frac{W'}{\eta_{cg}} \quad \eta_{cg} = 0.3 \div 0.4$$

$$\delta F_{rete} = \frac{W'}{\eta_{rete}} > \delta F^I = \frac{W'}{\eta_{cg}}$$

# Variazione indici termodinamici

## Indici di utilizzazione *Impianto CHP (TG+HRSG)* + *generatore termico*

- EUF cresce (cambia la pendenza)
- ExUF cresce/decrece

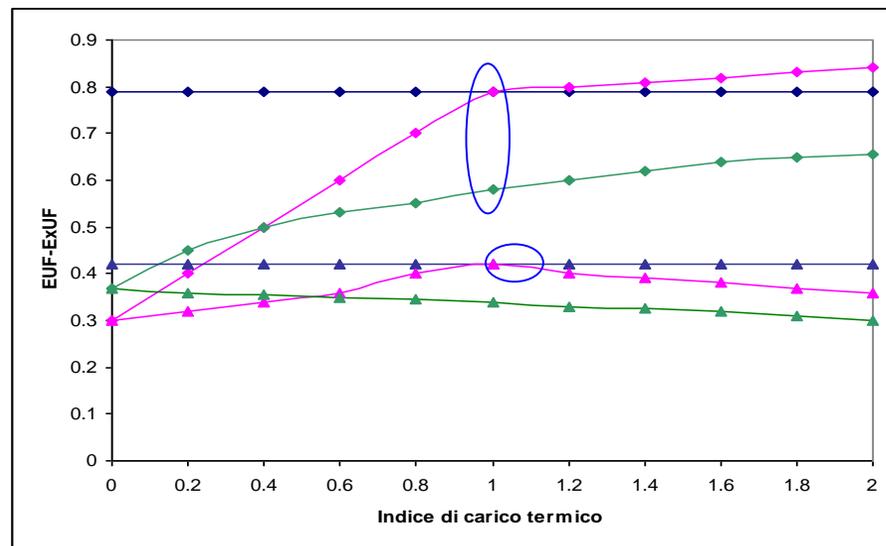
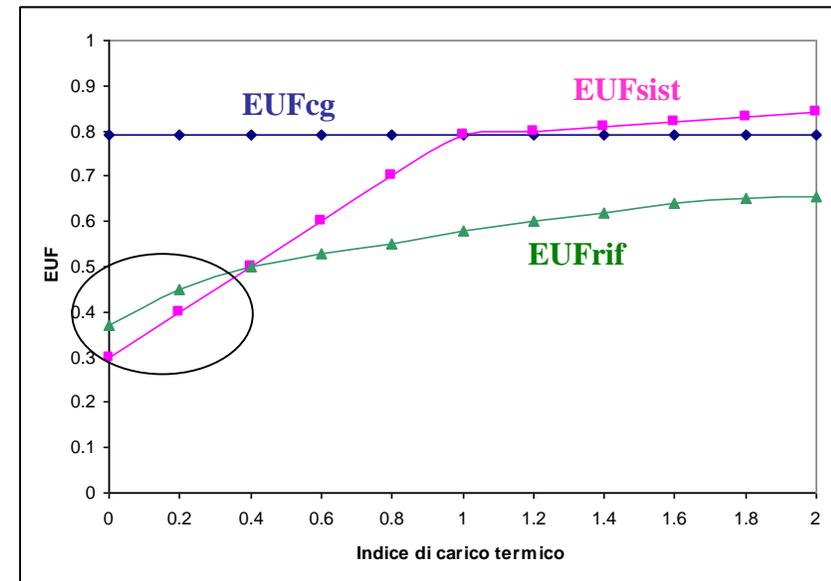
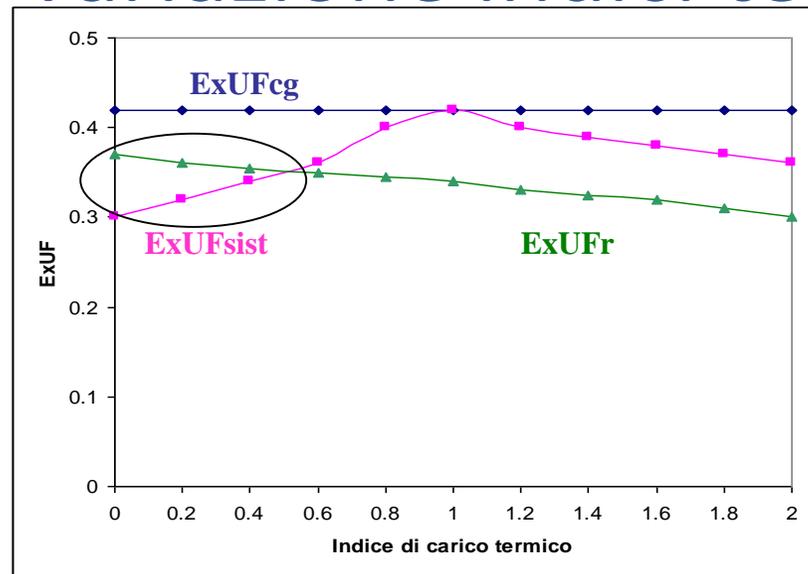


## Indici di utilizzazione *Impianto di riferimento*

- EUF decresce
- ExUF decresce

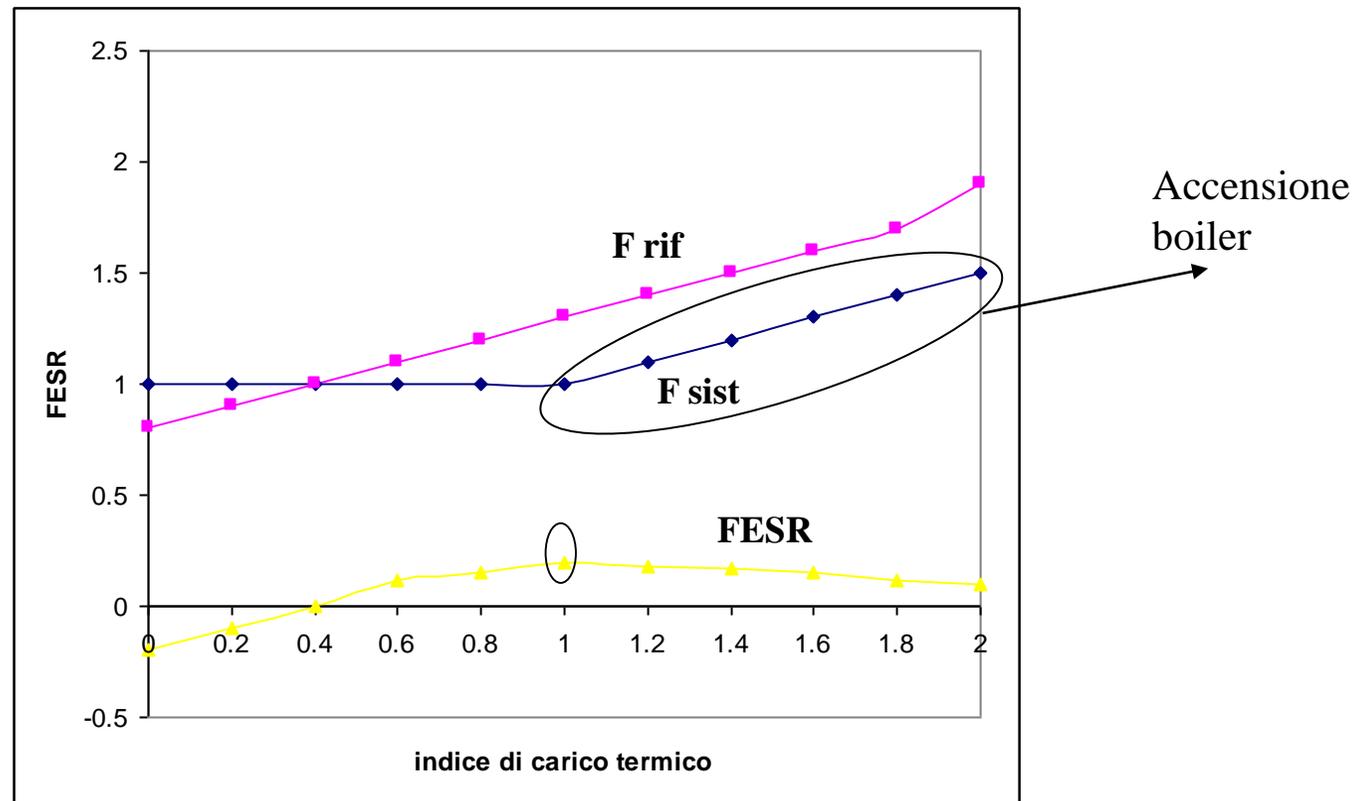


# Variazione indici termodinamici



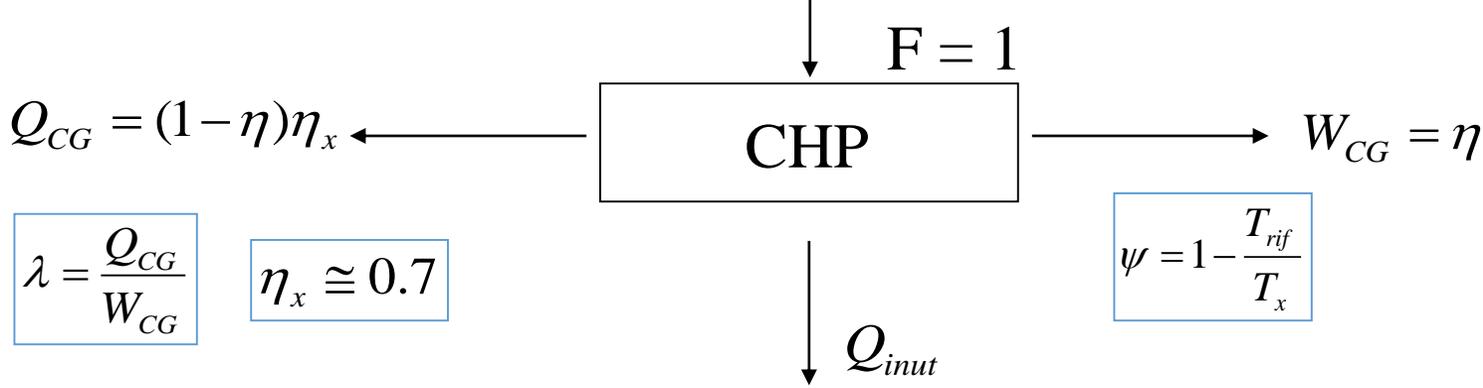


## INDICE DI RISPARMIO DEL COMBUSTIBILE





# SCELTA DI UN IMPIANTO DI COGENERAZIONE



Tipo di impianto								
	Wcg	Qcg	Fcg	T (°C)	λcg	EUFCg	ExUFcg	ψ
TG+WHR	0.3	0.48	1	400	1.6	0.78	0.57	0.56
TV contropressione	0.25	0.65	1	180	2.6	0.9	0.47	0.34
TV cond.+spill.	0.38	0.1	1	300	0.26	0.48	0.43	0.48
MCI+WHR	0.33	0.4	1	85	1.21	0.73	0.4	0.17
Generatore di Vapore	0	0.9	1	550	-	0.9	0.57	0.64
Camera di Combustione	0	0.98	1	1000	-	0.98	0.75	0.77

# La progettazione ottimizzata di sistemi CHP

Obiettivi:

- La possibilità di ottenere grandi efficienze di conversione dell'energia primaria in energia utile;
- Possibilità di superare le limitazioni socio-politiche alla costruzione di nuove grandi centrali;
- Possibilità di diversificazione delle fonti di approvvigionamento di energia primaria;
- Riduzione delle perdite di vettoriamento dell'energia elettrica (produzione distribuita);
- Riduzione delle emissioni (minor consumo di combustibile)

La scelta della tipologia e della taglia dell'impianto deve scaturire da considerazioni di convenienza sia economica che energetica



# La progettazione ottimizzata di sistemi CHP

La scelta della tipologia e della taglia dell'impianto deve scaturire da considerazioni di *convenienza sia economica che energetica*. Tali considerazioni non possono limitarsi solo a valutazioni condotte in riferimento al *punto di progetto*, poiché la necessità di soddisfare le richieste dell'utenza porta l'impianto CHP fuori dalle condizioni nominali. In tali casi la valutazione del vantaggio della soluzione CHP in luogo della tradizionale è più complessa.

Le grandezze che influenzano la scelta della taglia di un impianto sono numerose ad esempio la quantità di energia elettrica e termica e la temperatura a cui si vuole disponibile il calore.

*Il fattore che influenza maggiormente una prima scelta è il rapporto di cogenerazione.*

*Un sistema CHP soddisfa convenientemente l'utenza se fornisce prestazioni elevate nelle condizioni di esercizio più frequenti.*



## INDICI DI VALUTAZIONE ECONOMICA

**INDICI SEMPLICI:** non considerano la variabilità dei costi nel tempo

**INDICI COMPLESSI:** utilizzano il concetto di attualizzazione dei costi

### INDICI SEMPLICI

**Periodo di recupero**

$$PR = \frac{C_p - C_{p,r}}{C_{e,r} - C_e}$$

**Redditività percentuale**

$$RP = \frac{C_{e,r} - C_e}{C_p - C_{p,r}}$$

$$C_e = C_{rw} + C_f + C_{rq} + C_m - R_{rw} - R_{rq}$$

$$C_p = CP_g + CP_{cg} + CP_b$$

### INDICI COMPLESSI

**Indice di confronto attualizzato**

$$ACV = (YEW)_{cg} - (YEW)_{rw} + (YEQ)_{cg} - (YEQ)_b$$

$ACV < 0$  **Convenienza economica**

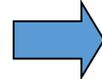
# INDICI DI VALUTAZIONE ECONOMICA

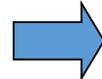
Fattore di attualizzazione

$$\beta = \frac{(1+i)^n i}{(1+i)^n - 1}$$

$i$  tasso di remunerazione del capitale  
 $n$  periodo di ammortamento in anni

Frazione di capitale investito da mettere da parte per recuperare il valore del bene acquistato

$\beta \cdot \Delta C_p > \Delta C_e$   Risparmio sui costi  Può non convenire l'impianto CHP

$\beta \cdot \Delta C_p < \Delta C_e$   RISPARMIO

Costi di manutenzione  
Costo del combustibile  
Costi fissi rete elettrica  
Costi acquisto e.e. (contratti di fornitura)

Costi impianto CHP  
Costi boiler ausiliari  
Costi generatori ausiliari

Ricavi vendita e.e.



## IMPIANTI DI COGENERAZIONE CON TURBINE A VAPORE

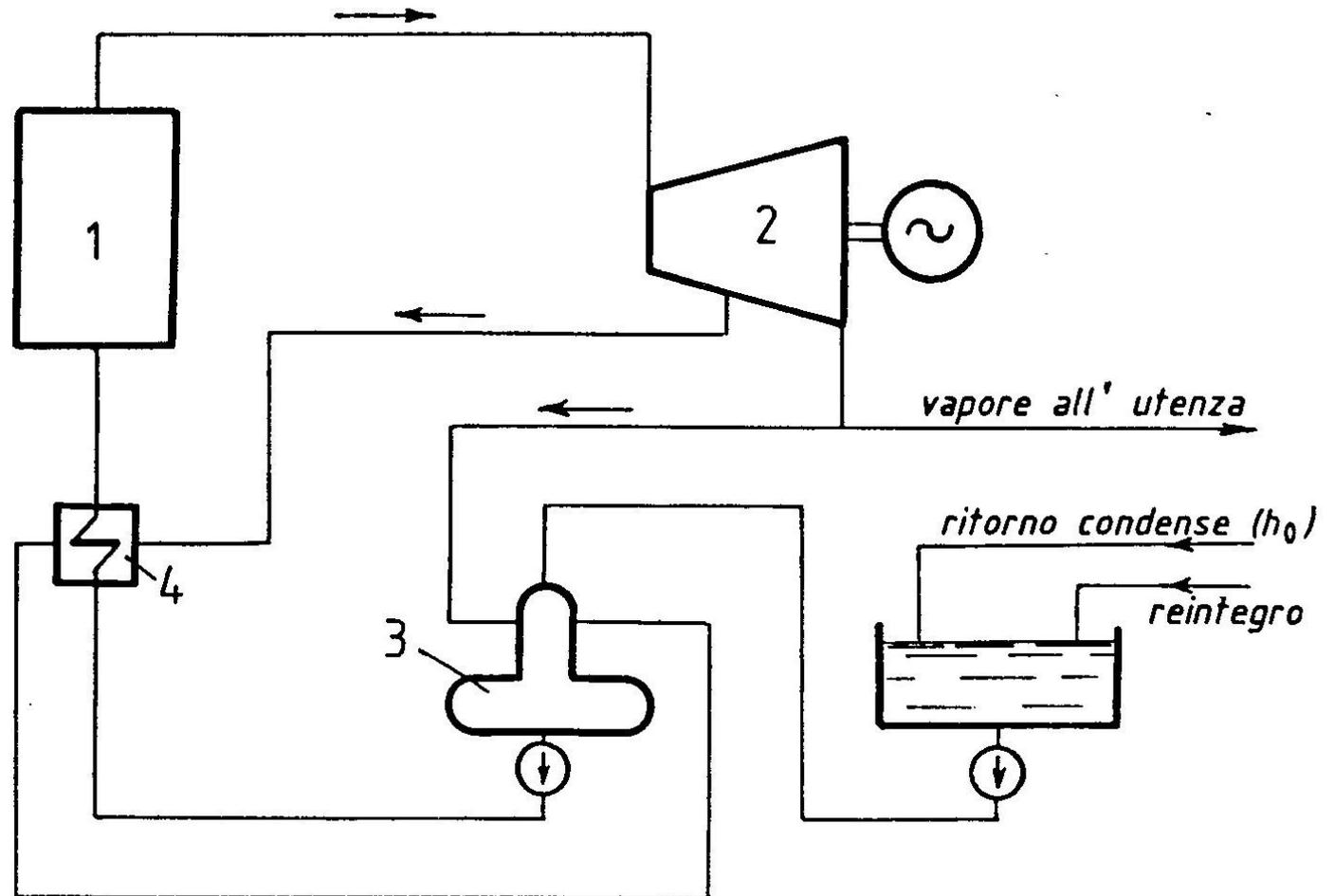
Gli impianti di cogenerazione con turbine a vapore possono ricondursi a tre tipologie fondamentali:

- Impianti con TV a contropressione
- Impianti con TV a deviazione e contropressione
- Impianti con TV a deviazione e condensazione

In ciascun tipo di impianto è possibile bruciare qualunque tipo di combustibile (combustione esterna)



## IMPIANTO A VAPORE A CONTROPRESSIONE

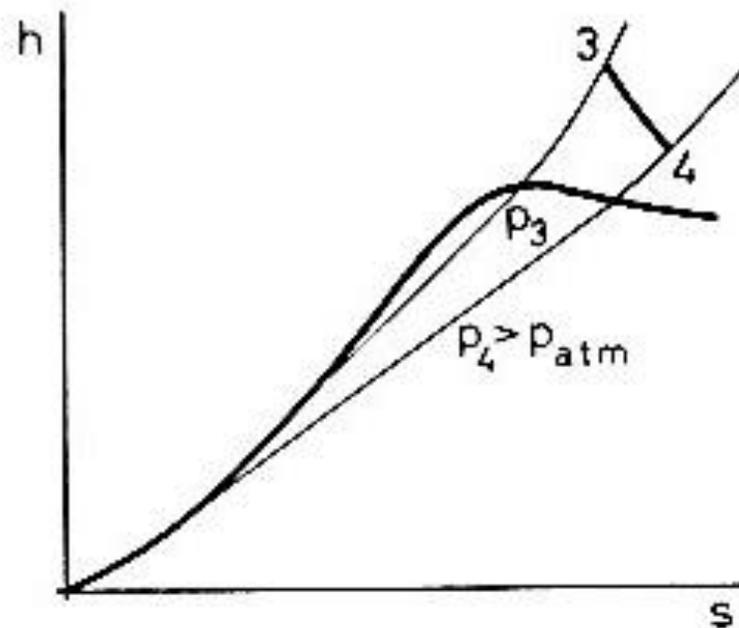




## TRASFORMAZIONI NELL'IMPIANTO A CONTROPRESSIONE

Potenza elettrica e potenza termica sono rigidamente connesse.

Al diminuire del fabbisogno di vapore diminuisce la produzione di energia elettrica.



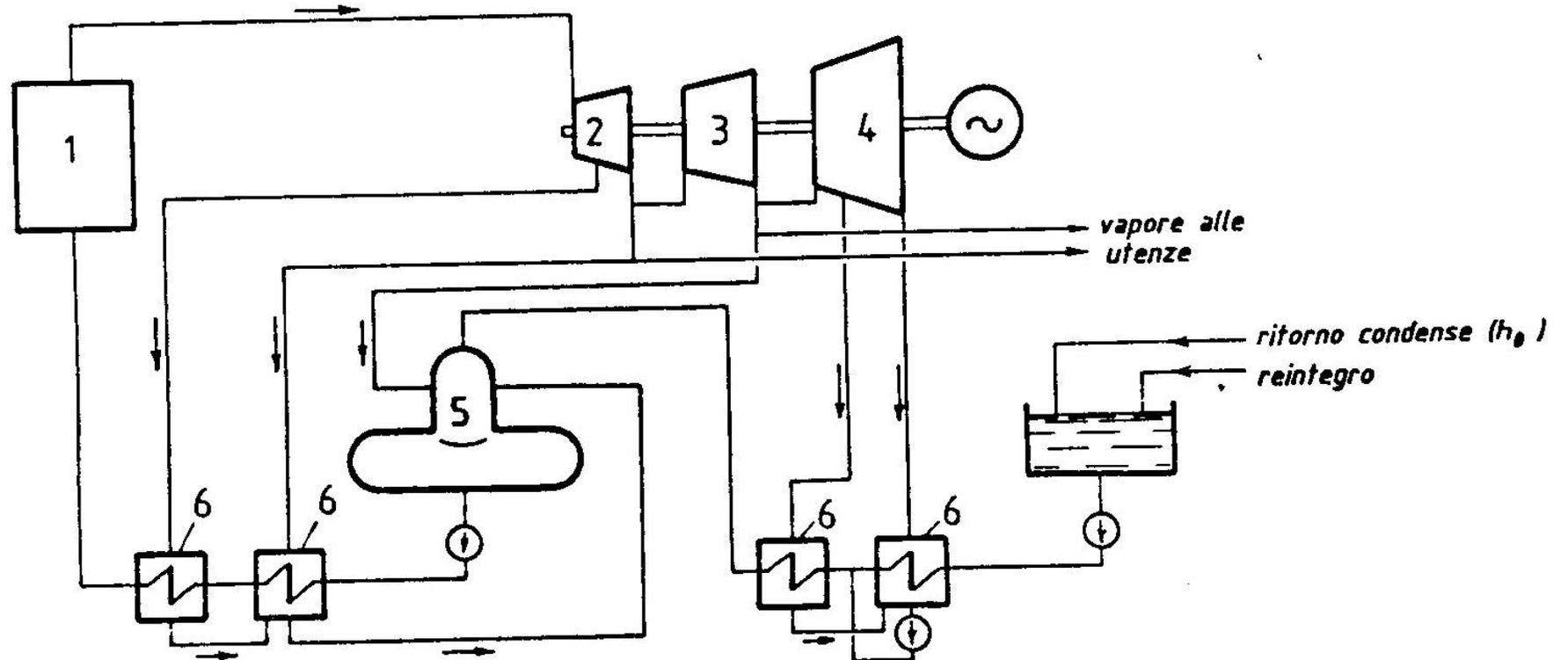
$$E = \dot{m}_v (h_3 - h_4)$$

$$Q_u = \dot{m}_v (h_4 - h_0)$$

Entalpia della condensa di ritorno dall'impianto tecnologico

## IMPIANTI A DEVIAZIONE E CONTROPRESSIONE

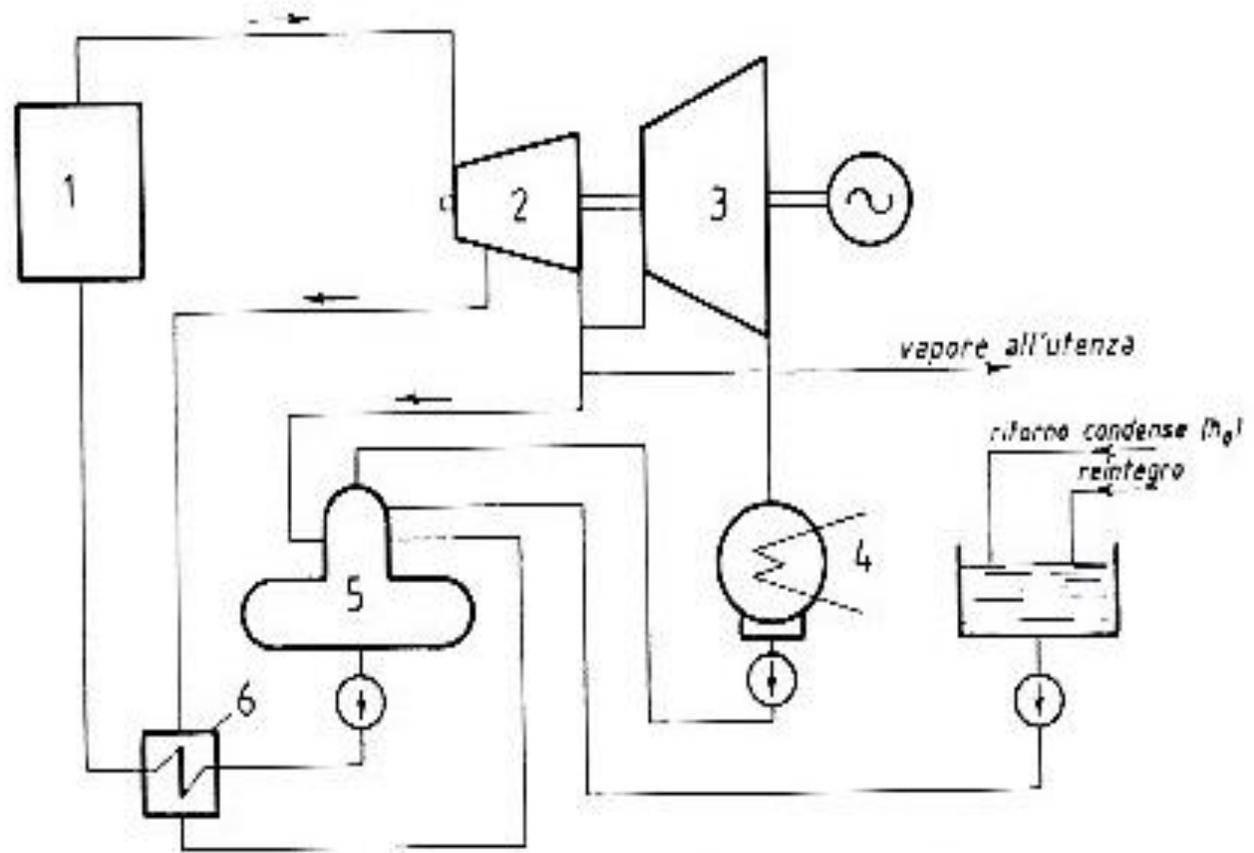
Tipologia di impianto in cui è possibile variare il rapporto tra la quantità di energia elettrica prodotta e la quantità di calore utilizzato





## IMPIANTO A DEVIAZIONE E CONDENSAZIONE

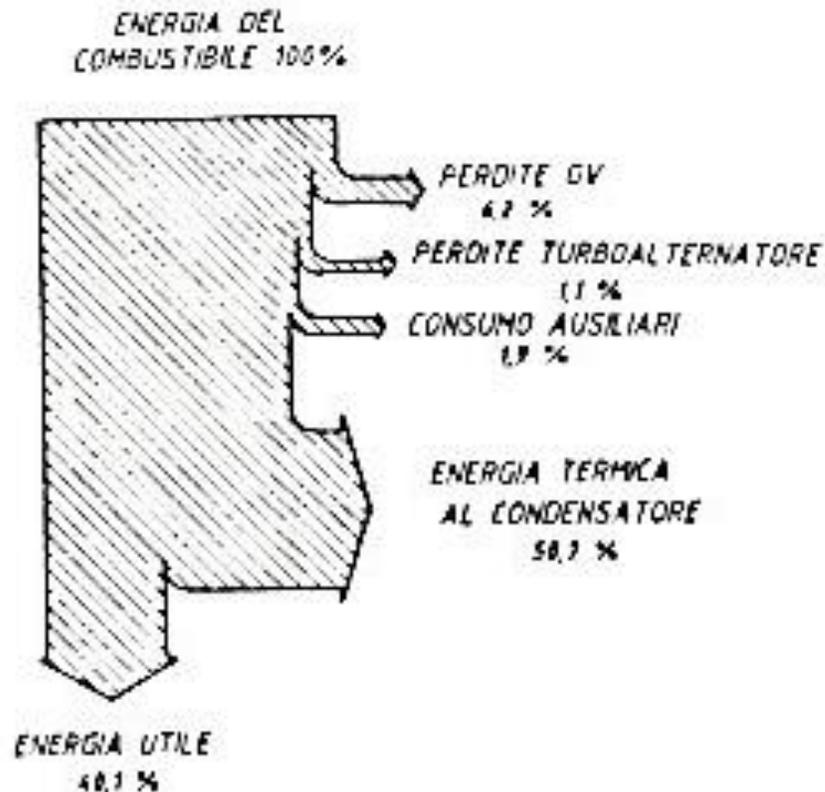
- Presenza di un condensatore allo scarico della turbina
- Deviazione del vapore per usi tecnologici





## Bilancio energetico di un impianto a deviazione e condensazione

Bilancio in impianti preposti alla sola produzione di energia elettrica

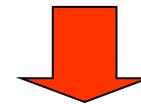


### VANTAGGI

Grande flessibilità

### SVANTAGGI

Valori più contenuti dell'indice di sfruttamento del combustibile per la presenza del condensatore



Energia disponibile ceduta alla sorgente fredda

## TURBINE A GAS CON RECUPERO SEMPLICE

La turbina a gas in ciclo semplice è molto utilizzata in ambito cogenerativo.

Il **recupero energetico** dei gas combusti prevede:

1. la possibilità di produrre vapore mediante impiego di una caldaia a recupero;
2. la possibilità di utilizzare direttamente i gas combusti

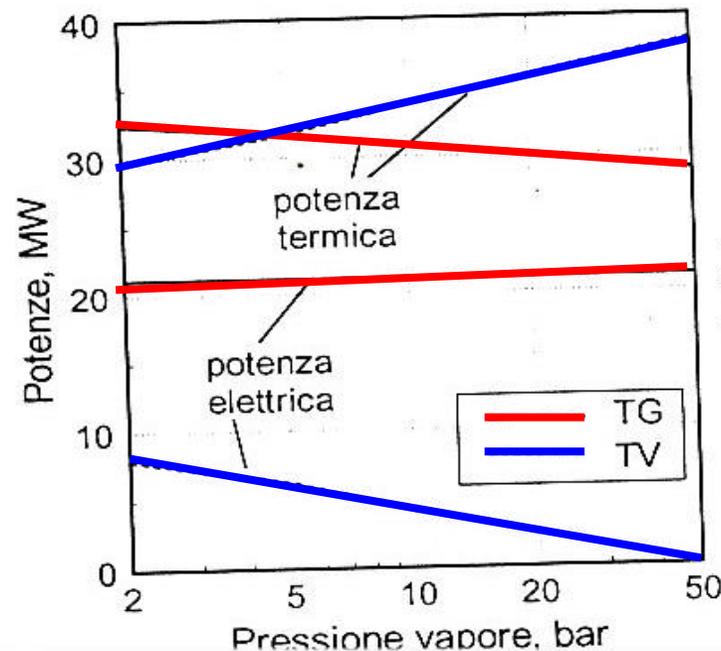
↪ **Il recupero termico non altera le prestazioni della turbina**

↪ In una Turbina a gas con caldaia a recupero impiegata per scopi cogenerativi si parla quindi di **"Indifferenza della produzione elettrica da quella termica"** diversamente da quanto può dirsi per un impianto a vapore a spillamenti

# Confronto TG e TV in cogenerazione

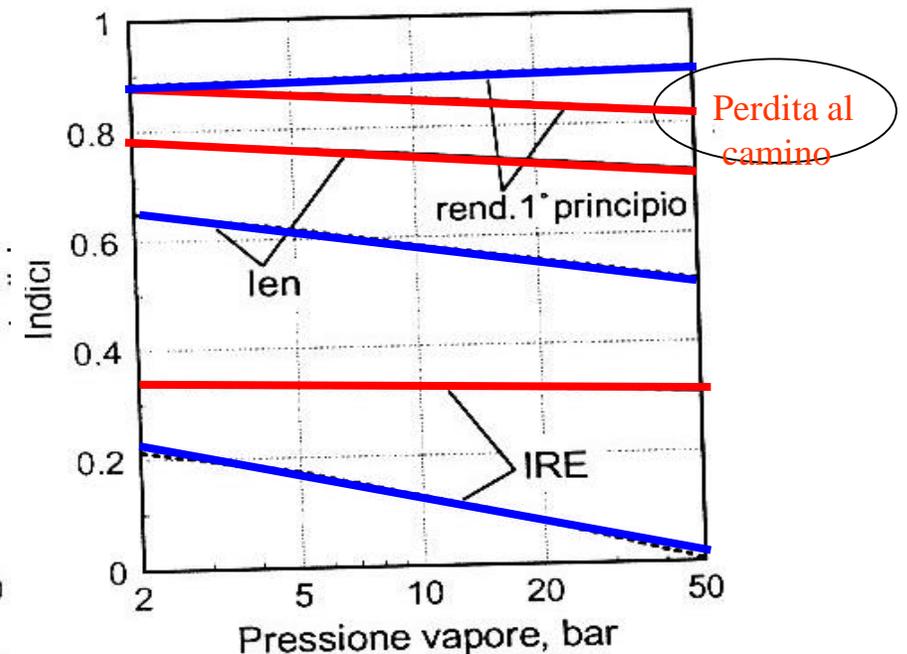
## TG con recupero semplice

- NON RISENTE dal punto di vista elettrico della **PRESSIONE** a cui è prelevato il vapore
- la portata di vapore diminuisce con la P di esercizio della caldaia a recupero (Q diminuisce)



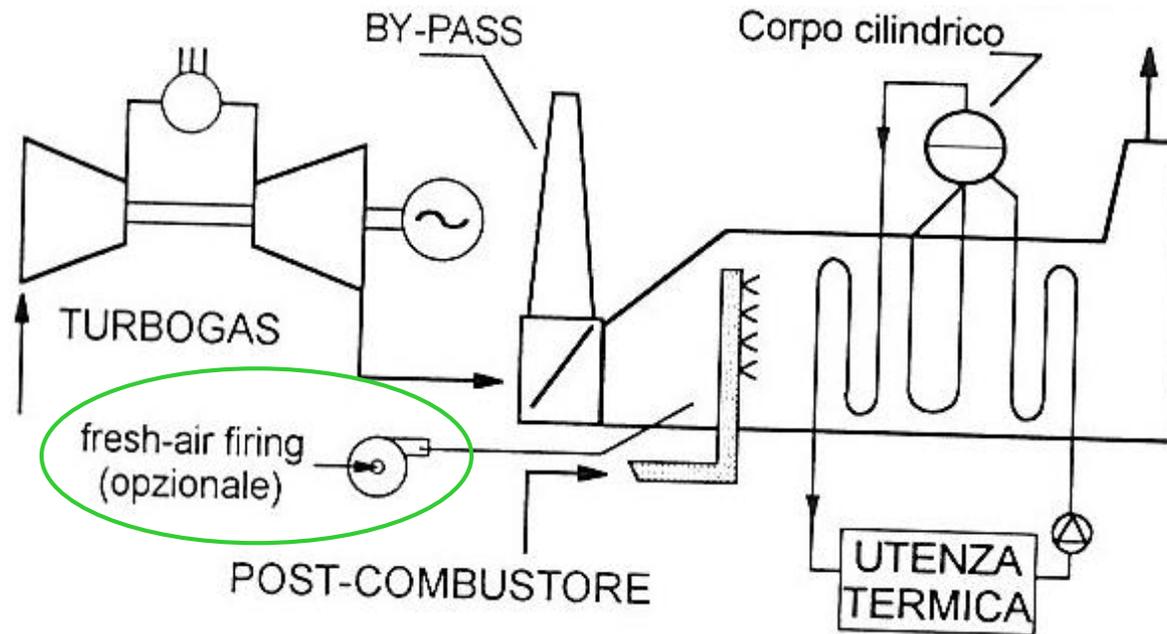
## IMTV a spillamento e condensazione

- La perdita di potenza cresce con la pressione a cui è prelevato il vapore
- maggiore quantità di calore disponibile con l'aumento della **PRESSIONE** a cui è prelevato il vapore



## GESTIONE DI UN IMPIANTO COGENERATIVO CON TG

Un impianto di cogenerazione è chiamato a soddisfare *utenze elettriche e termiche variabili* nel tempo e non coincidenti con il punto nominale di funzionamento



L'impianto, per soddisfare diverse esigenze e quindi per essere **flessibile**, deve disporre di due dispositivi:

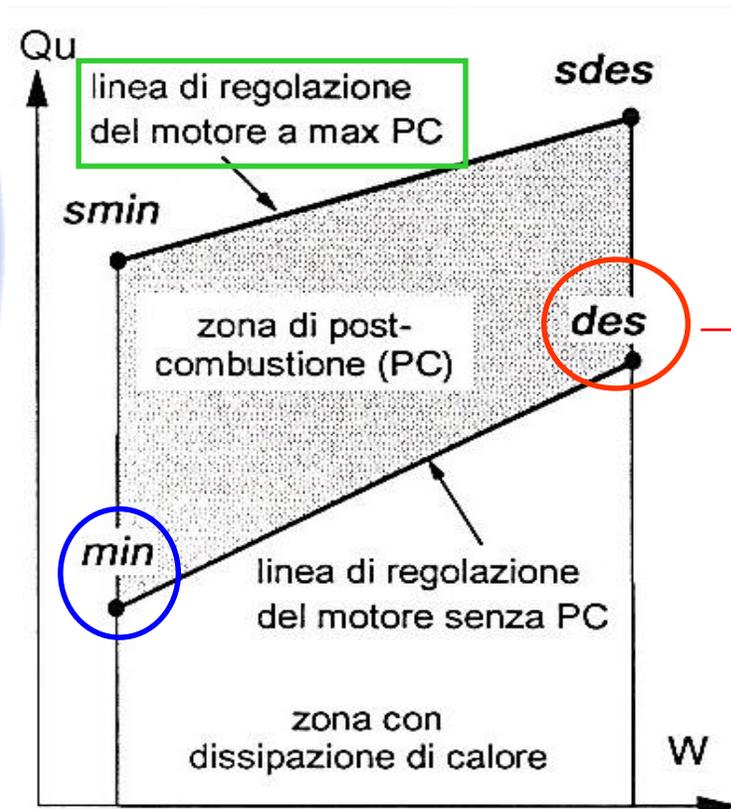
- **Sistema di by-pass**  
(per dissipare calore)
- **Post-combustore**  
(per produrre calore addizionale)

### FRESH-AIR FIRING

In alcuni casi il sistema può essere dotato di un ventilatore che adduce aria primaria agli ugelli di post-combustione

# REGOLAZIONE IMPIANTO DI COGENERAZIONE CON TG

## CAMPO DI FUNZIONAMENTO DI UN IMPIANTO DI COGENERAZIONE CON TG A RECUPERO SEMPLICE



- La regolazione agisce:
- sulla portata d'aria (varia la portata dei gas e quindi il calore recuperabile)
  - sulla portata di combustibile (varia la TIT)

$W_{des}$  e  $Q_{u,des}$  → punto nominale

**Limiti tecnici di funzionamento**

**Limiti della post-combustione:**

- ✓ completa ossidazione dell'ossigeno presente nei gas
- ✓ temperature dei gas troppo elevate

# ANALISI COSTI E RICAVI



<u><b>COSTI RIMANENTI</b></u>	<u><b>RICAVI</b></u>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Quota di energia termica ed elettrica non soddisfatta dal cogeneratore</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Energie elettrica non acquistata dalla rete elettrica</li></ul>
<u><b>COSTI OPERATIVI</b></u>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Energie termica non prodotta da generatore tradizionale (caldaia)</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Investimento iniziale (cogeneratore ed installazione)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Recupero di accise</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Costo del gas metano (alimentazione cogeneratore)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Certificati Bianchi</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Costi operativi (manutenzione)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Eventuale valorizzazione di energie elettrica ceduta alla rete nazionale</li></ul>

# CALCOLO COSTO ENERGIA ELETTRICA PRODOTTA

## Equation 1

$$\text{COE} = \underbrace{\frac{\beta \cdot C}{P \cdot H}}_{\text{Capital}} + \underbrace{\frac{f}{\eta}}_{\text{Fuel}} + \underbrace{\left\{ \frac{\text{OM}_f}{P \cdot H} + \mu \cdot \text{OM}_{v,b} \right\}}_{\text{O\&M}}$$

Usare il rendimento di produzione elettrica per valorizzare il calore prodotto

where

$\beta$  = Levelized carrying charge factor or cost of money

$C$  = Total plant cost (\$)

$H$  = Annual operating hours

$P$  = Net rated output (kW)

$f$  = Levelized fuel cost (\$/kWh [LHV])

$\eta$  = Net rated efficiency of the combined-cycle plant (LHV)

$\text{OM}_f$  = Fixed O&M costs (\$ or \$/kW-yr)

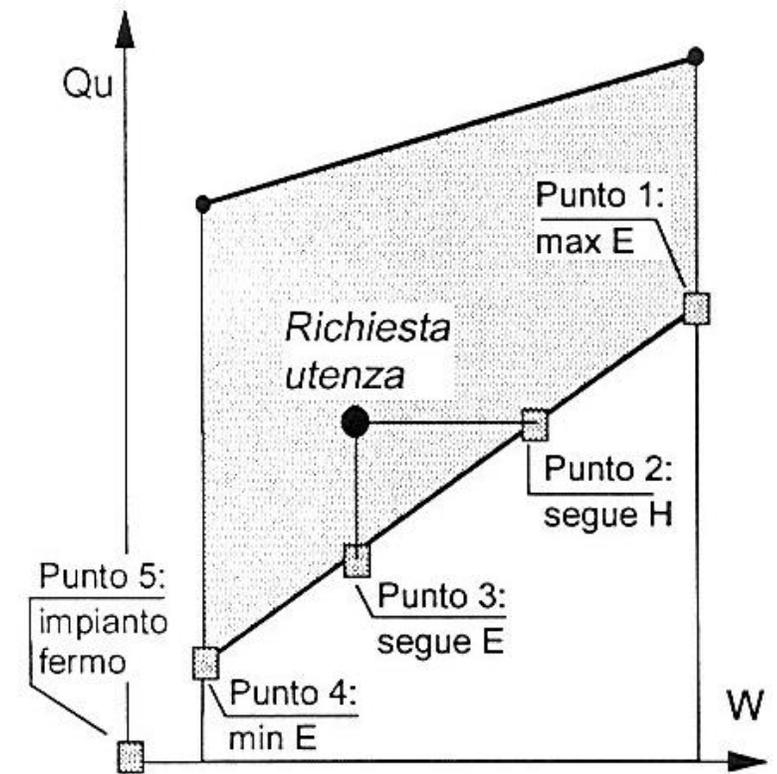
$\text{OM}_{v,b}$  = Variable O&M costs for baseload operation (\$/kWh)

$\mu$  = Maintenance cost escalation factor (1.0 for baseload operation)

# SCELTA CONDIZIONI OPERATIVE CHP CON TG

## POSSIBILI PUNTI DI FUNZIONAMENTO

1. **TG a massima potenza**
  - ✓ Eccedenza elettrica alla rete
  - ✓ Azionamento sistema di by-pass
2. **"Termico a seguire"**
  - ✓ Eccedenza elettrica alla rete
3. **"Elettrico a seguire"**
  - ✓ Post-combustione
4. **TG a minima potenza**
  - ✓ Acquisto di energia dalla rete
  - ✓ Post-combustione
5. **Impianto fermo**
  - ✓ Acquisto energia dalla rete
  - ✓ Fresh-air firing o caldaia ausiliaria



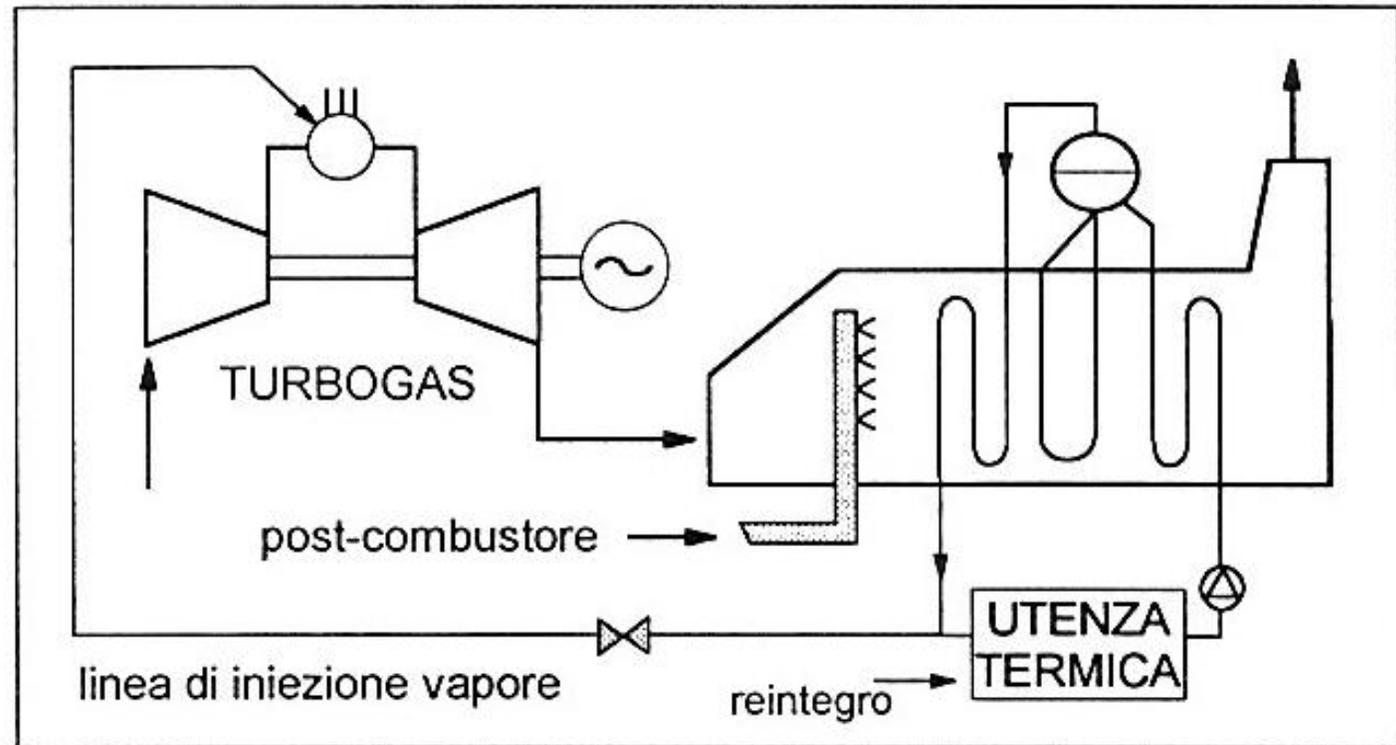
**LA SCELTA DEL PUNTO DI ESERCIZIO DELL'IMPIANTO DIPENDE DA ASPETTI ECONOMICI, DALLA VALUTAZIONE DEI COSTI**

# TURBINA A GAS CON INIEZIONE DI VAPORE

Il vapore prodotto nella caldaia a recupero può essere inviato:

- all'utenza termica
- iniettato in camera di combustione

a seconda che si voglia privilegiare la potenza termica o la potenza elettrica



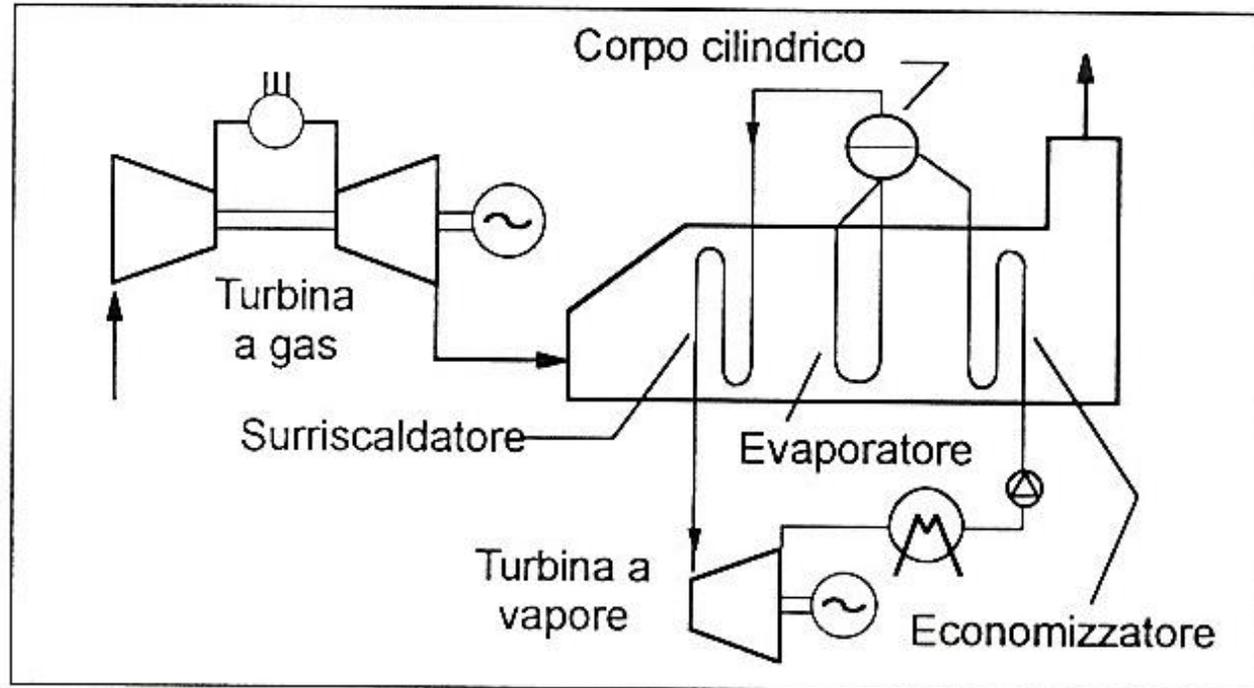




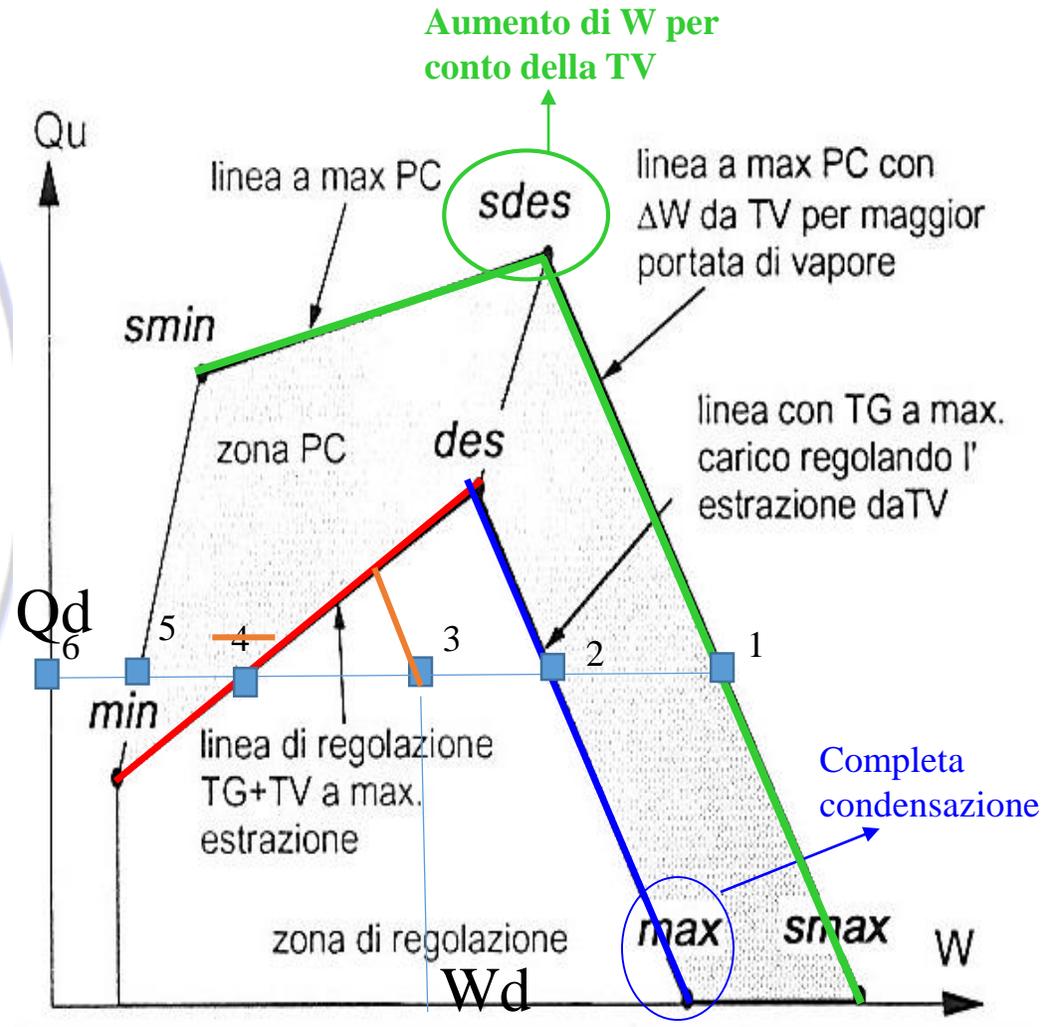
## CHP CON CICLI COMBINATI GAS-VAPORE

Un ciclo combinato gas-vapore può essere esercito come impianto cogenerativo nel caso in cui sia previsto il prelievo di vapore dal corpo cilindrico o dalla turbina a vapore

Il vapore è prelevato dove è disponibile alla pressione richiesta dall'utenza



# REGOLAZIONE CHP CON CICLI COMBINATI



- TG a carico variabile
- TV a piena estrazione di vapore ( $W = TG + TV$ )
- TG a piena potenza
- TV a estrazione di vapore variabile
- Funzionamento con post-combustione (pratica non molto utilizzata)

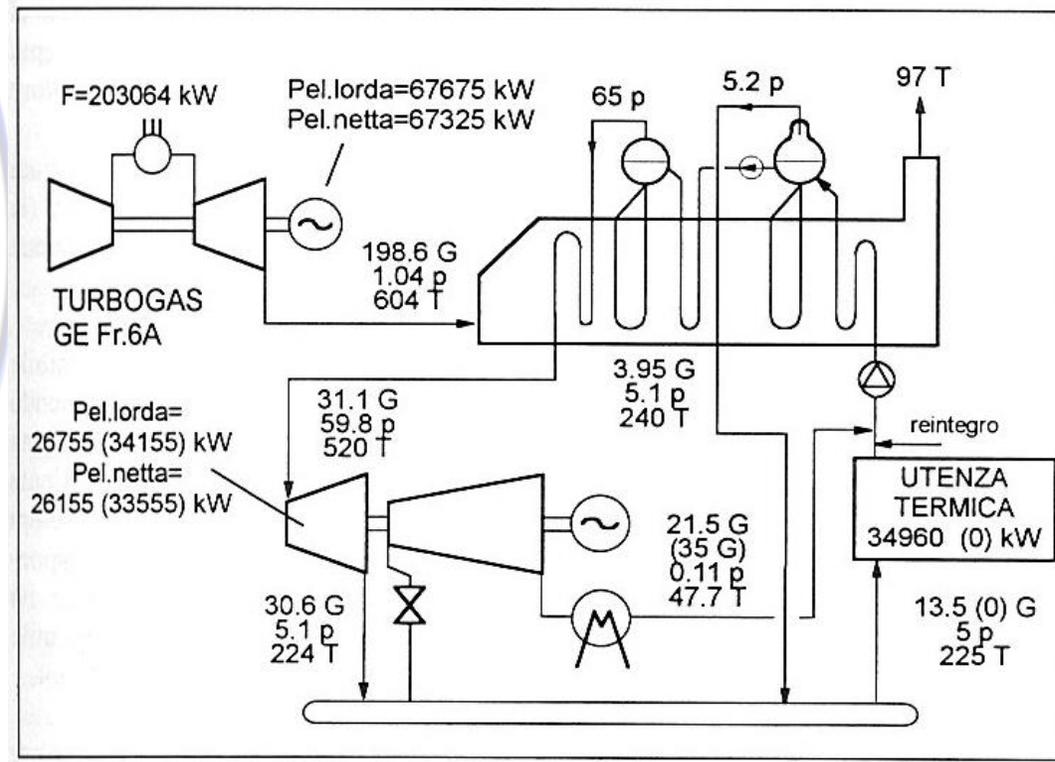
La Pressione a cui è richiesto il vapore influisce sulla potenza elettrica ( $\Delta h$  in TV)

# CICLI COMBINATI IN COGENERAZIONE

Superiorità dei CC rispetto a IMTV, TG, e TG-STIG



elevati rendimenti quando la potenza termica richiesta dall'utenza è nulla



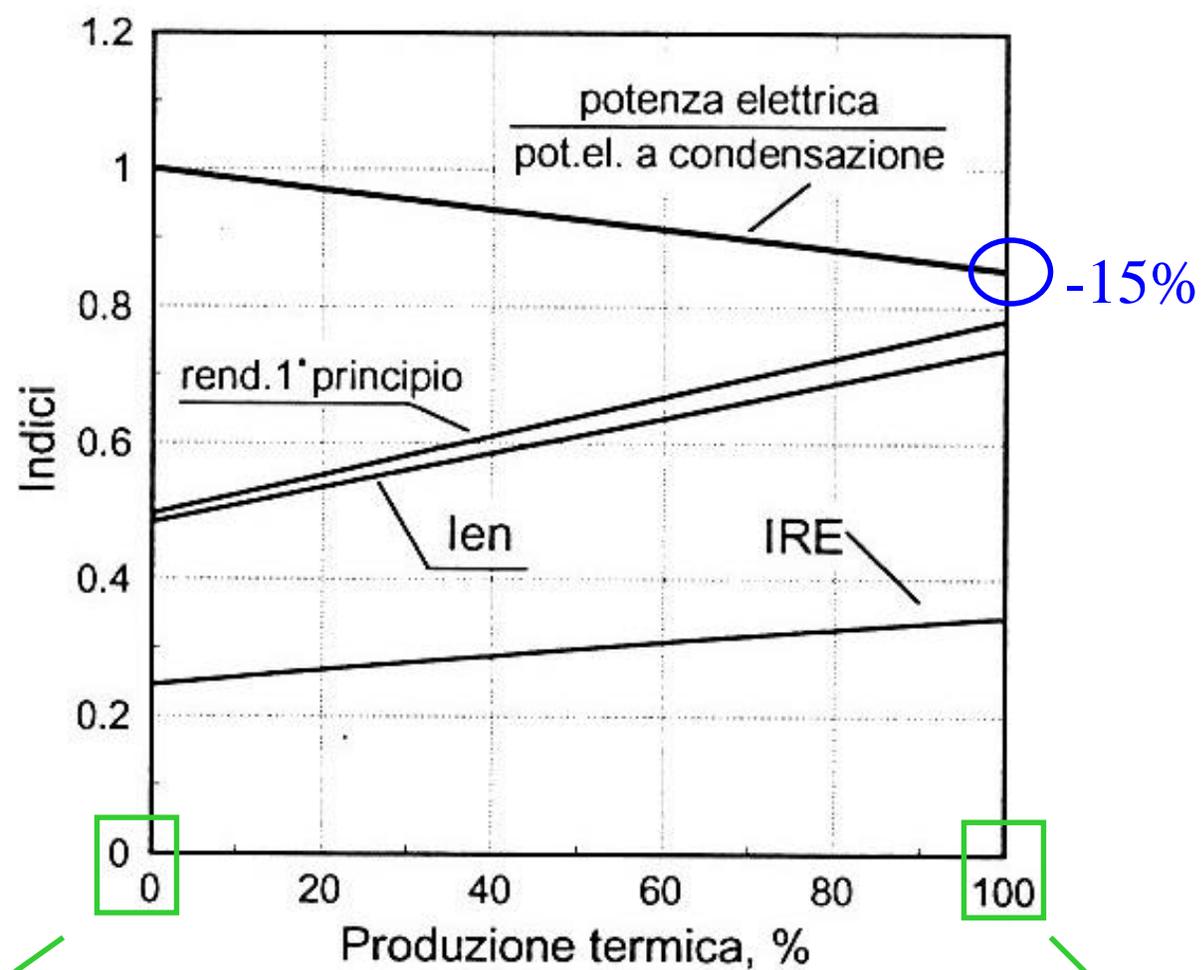
I<sub>en</sub>

IRE

Elevati anche  
per bassi valori  
di Qu

# REGOLAZIONE CICLI COMBINATI

Al diminuire della potenza termica gli indici restano comunque elevati grazie all'entità dell'energia elettrica



**Estrazione di vapore nulla**

**Massima estrazione di vapore**

## CONFRONTO TRA DIVERSE SOLUZIONI IMPIANTISTICHE

TIPO DI MOTORE IMPIEGATO (Q prodotta = 32 MW)	Potenza Elettrica (MW)	len
IMTV a contropressione	6.1	0.62
TG a recupero semplice	21.1	0.77
CC in piena estrazione	38.0	0.74
CC con media estrazione	95.5	0.58

**Elevato** a carico nominale, ma si riduce notevolmente a carico ridotto (by-pass)

Il **mercato della cogenerazione** si sposta verso impianti di grande taglia, ossia impianti combinati con elevate potenze elettriche



## **Bibliografia**

Giovanni Lozza, “Turbine a gas e cicli combinati”,  
Società Editrice Esculapio, ISBN 978-88-7488-934-1.