

FMRGroup @ DMA-URLS

Impianti per la co-generazione

Alessandro Corsini

Gruppo di Sistemi per l'Energia e l'Ambiente

Università di Roma "La Sapienza"

e.mail: alessandro.corsini@uniroma1.it

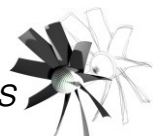
CHP o cogenerazione, definizioni

La cogenerazione è definita come una produzione combinata di potenza termica W_{th} ed elettrica W_{el} , entrambe considerate quali effetti utili ovv. capaci di soddisfare requisiti di utenze finali

in ogni motore termico, in accordo con il postulato di Kelvin del II principio della termodinamica, esiste sempre una quantità di calore refluo ovv. la frazione del calore entrante degradata fino alla temperatura delle sorgenti termiche inferiori o fredde

Storicamente, nella cogenerazione industriale, è stata la domanda di potenza termica a determinare il dimensionamento del sistema termo-elettrico ed i settori nei quali la cogenerazione ha trovato massima diffusione sono stati quelli della chimica di base, del tessile e della carta

domanda termica di solito espressa dal fabbisogno di vapore d'acqua in condizioni di media pressione



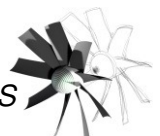
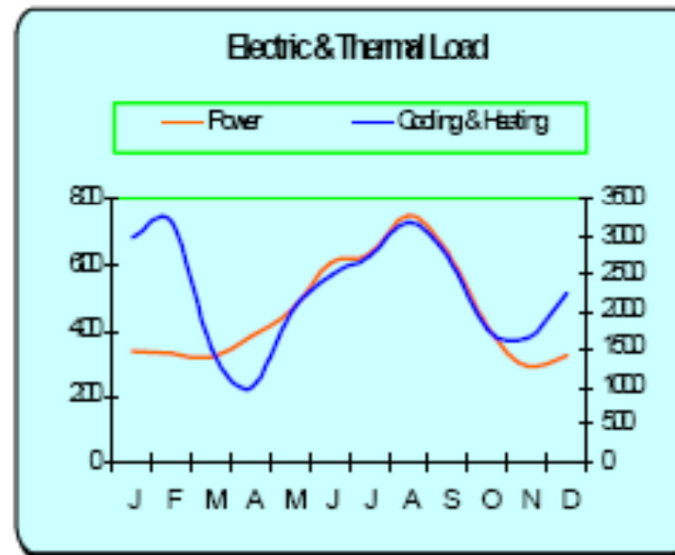
CHP o cogenerazione, Utenze

Utenze termiche tipiche del settore industriale

- Produzione di vapore/acqua calda di processo
- Produzione di vapore/acqua calda per assorbitori – produzione di freddo
- Produzione di vapore/acqua calda per reti di teleriscaldamento

Building Energy Types

- Electrical:
 - 60 Hz, A/C Electricity
- Thermal:
 - Chilled Water
 - Low-Temp Solution
 - Hot Water 140 F to 200 F
 - Low Pressure Steam
 - High Pressure Steam
 - Dehumidification
 - Combination of Types



Il ruolo degli *impianti cogenerativi* in Italia (1)

| PRODUTTORE | Produzione totale di energia elettrica | | Produzione di energia elettrica mediante sistemi di cogenerazione | |
|----------------------------|--|-----|---|-----|
| | TWh | % | TWh | % |
| ENEL | 170,2 | 84 | - | - |
| Aziende Municipali | 7,4 | 4 | 0,5 | 4 |
| Autoproduttori industriali | 24,9 | 12 | 13,2 | 96 |
| Altre imprese minori | 1,0 | - | - | - |
| TOTALE | 203,5 | 100 | 13,7 | 100 |

Gli impianti CHP giocano un ruolo significativo nel panorama energetico nazionale e *coprono circa il 30% della domanda di generazione elettrica*

Il 60% del calore generato è prodotto da tradizionali impianti a vapore

Il 40% del calore è generato da MCI a ciclo aperto

| Tipo di motore primo | energia elettrica netta | rendimento elettrico netto | energia termica netta | rendimento termico netto | rendimento totale | potenza nominale netta | numero di impianti | potenza media nominale | fattore di utilizzazione |
|---|-------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|------------------------|--------------------|------------------------|--------------------------|
| | GWh/y | % | GWh/y | % | % | MW _{el} | n | MW _{el} | h/y |
| cicli combinati | 49646 | 44,0 | 12701 | 11,2 | 55,2 | 7210 | 96 | 75,1 | 6788 |
| motori a combustione interna | 1702 | 35,1 | 1867 | 38,5 | 73,6 | 502 | 400 | 1,3 | 3326 |
| impianti a vapore a condensazione e spillamento | 10186 | 24,6 | 14113 | 34,1 | 58,7 | 2323 | 108 | 21,5 | 4161 |
| impianti a vapore a contropressione | 5454 | 18,3 | 20523 | 69,0 | 87,3 | 1858 | 280 | 6,6 | 2785 |
| turbine a gas | 4895 | 28,1 | 8672 | 49,8 | 77,9 | 865 | 148 | 5,8 | 5576 |
| Totale | 71883 | 34,8 | 57877 | 28,0 | 62,8 | 12758 | 1327 | 9,6 | 5635 |

Gli impianti più moderni sono basati sull'impiego di TG in ciclo combinato (CC)

generano il 70% della potenza elettrica

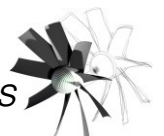
ma solo il 22% della potenza termica con basso rendimento cogenerativo

Nota status quo causato dal quadro normativo che ha favorito tecnologie con alti rapporti elettrico/termico

Macchi E. & al., La micro-cogenerazione a gas naturale



FMRGroup @ DMA-URLS



Il ruolo degli *impianti cogenerativi* in Italia, la taglia (2)

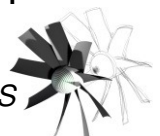
Dal punto di vista della taglia la potenza media degli impianti CHP è 10 MWel

Composizione del parco centrali CHP

| Taglia | Tipo di motore | Ore di utilizzazione |
|---------------|---|-----------------------------|
| 1MWel | <i>alcune centinaia di MaCl</i> | 3000 ore/anno |
| 5 – 10 MWel | <i>impianti TG a recupero semplice</i> | 6000 ore/anno |
| | <i>cicli a vapore a contro-pressione</i> | 3000 ore/anno |
| | <i>cicli a vapore a spillamento</i> | 4000 ore/anno |
| > 10 MWel | <i>cicli combinati gas-vapore (100MWel)</i> | 7000 ore/anno |

È praticamente assente il contributo degli impianti di piccola taglia, ovv. *micro-generativi*, con potenza elettrica inferiore o uguale a 500 kWel

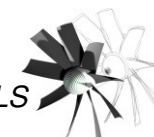
L'opportunità per le tecnologie micro-generative è legata agli scenari di crescita dei bio-combustibili oltre che di necessario incremento dell'efficienza di conversione nelle tecnologie alimentate a CH4 nei settori residenziale e terziario



Il ruolo degli *impianti cogenerativi* in Italia, *settori industriali* (3)

| INDUSTRIE | GWh | % |
|------------------|--------------|------------|
| Chimiche | 7812 | 59,2 |
| Petrolifere | 1448 | 11,0 |
| Cartarie | 1514 | 11,5 |
| Siderurgiche | 646 | 4,9 |
| Tessili | 567 | 4,3 |
| Alimentari | 561 | 4,3 |
| Altre | 643 | 4,8 |
| TOTALE | 13191 | 100 |

Produzione di energia elettrica in Italia da impianti di cogenerazione in un anno di riferimento

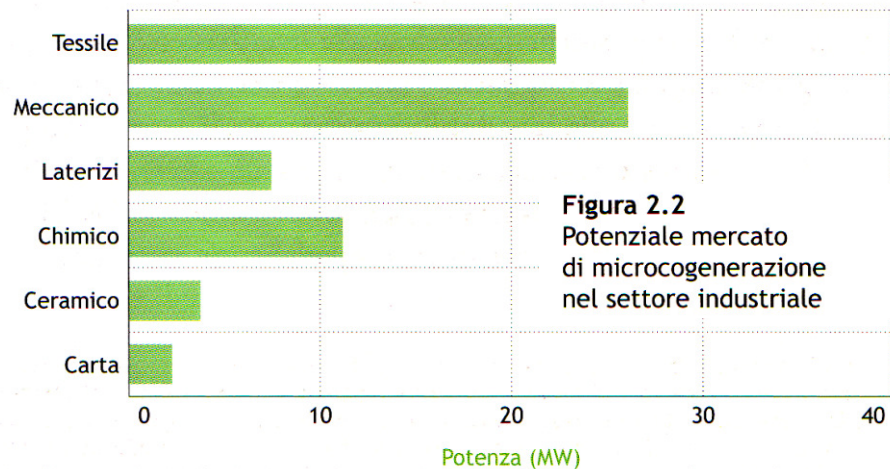
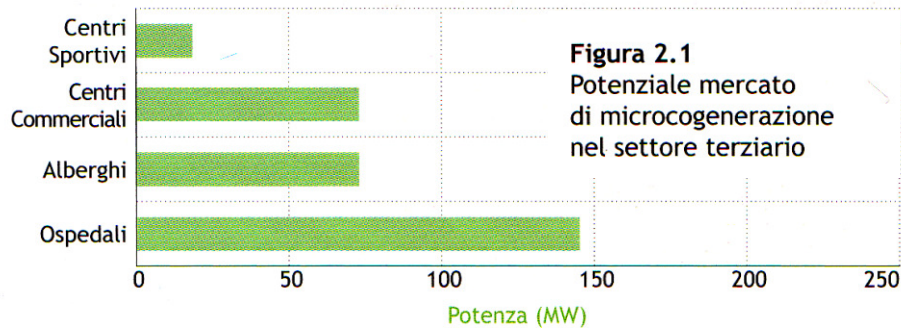
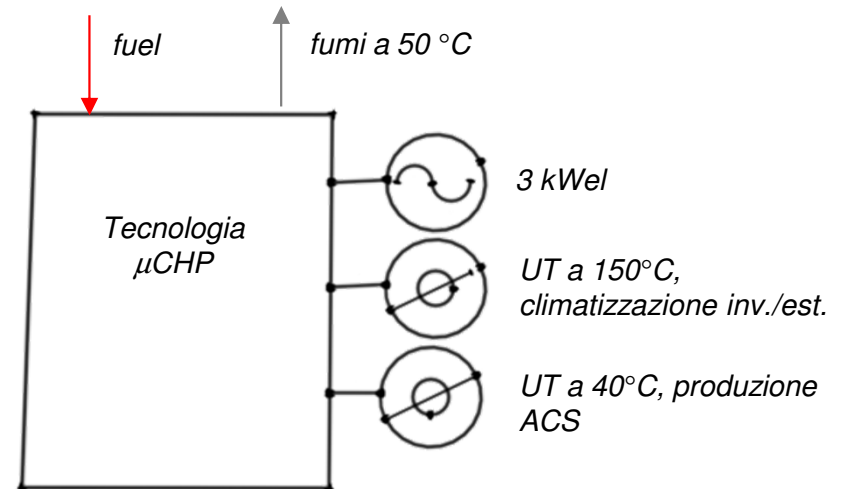


Il mercato della micro-cogenerazione (1)

Potenziale (dati SNAM 2001) della piccola *CHP* pari a circa 400 MWel ben lontano dai 13 GW già in esercizio

Prospettivamente il mercato di interesse è quello delle applicazioni di taglia micro per utenze del *settore residenziale e terziario* per la **domanda di elettrica-termica-frigorifera**

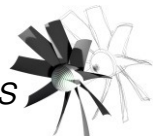
Limite di questa tendenza il mercato di tecnologie *CHP* per applicazione *mono-familiare domestica*



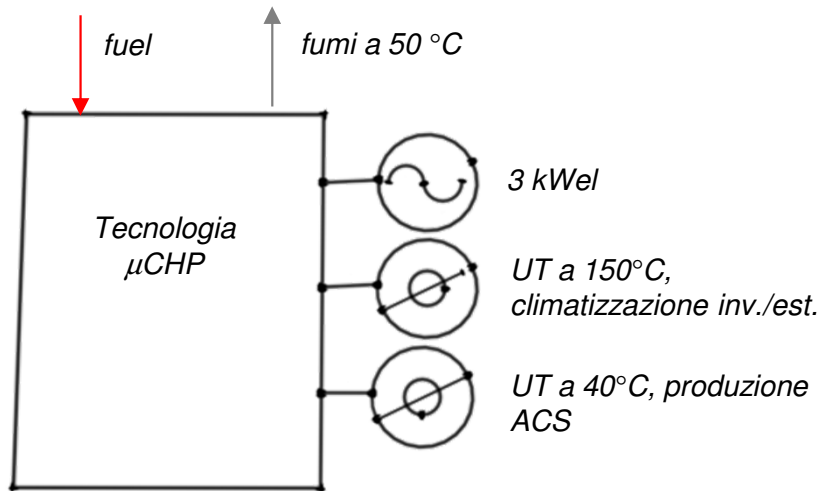
Macchi E. & al., La micro-cogenerazione a gas naturale, 2005



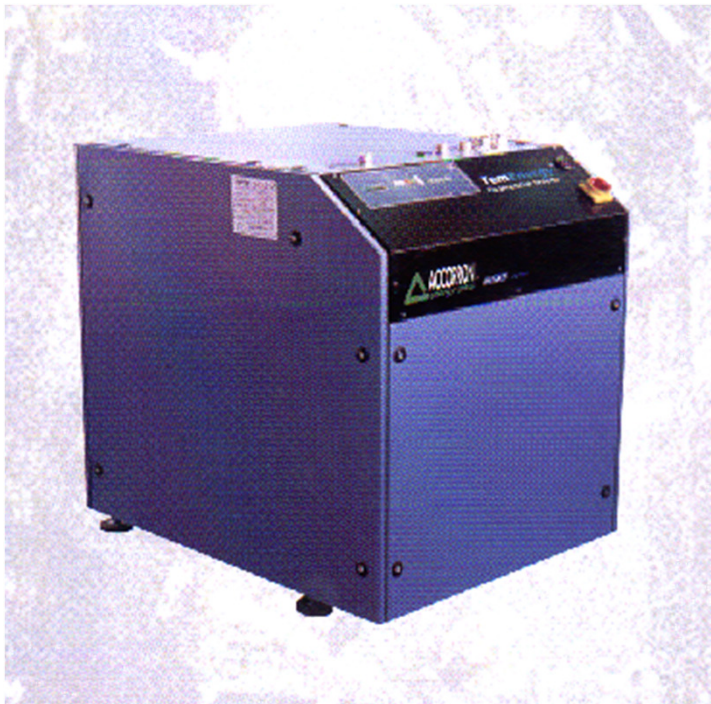
FMRGroup @ DMA-URLS



Il mercato della micro-cogenerazione (2), *le barriere*



Il caso del *TotEM*, FIAT 1976



Interfaccia di rete

soluzioni per interfacciare il μ CHP e la rete elettrica in BT

Valorizzazione del surplus di energia elettrica

ipotesi è quella di valorizzare l'energia elettrica ceduta alla rete utilizzando il valore istantaneo di mercato del COE

Controllo di prestazione e delle emissioni

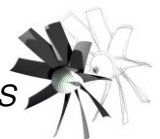
Problema comune a tutti i sistema di generazione distribuita che necessita di un sistema ad-hoc di controlli periodici e certificazioni sul motore primo

Procedure autorizzative

Semplificazione dell'iter

Distributori di servizi energetici

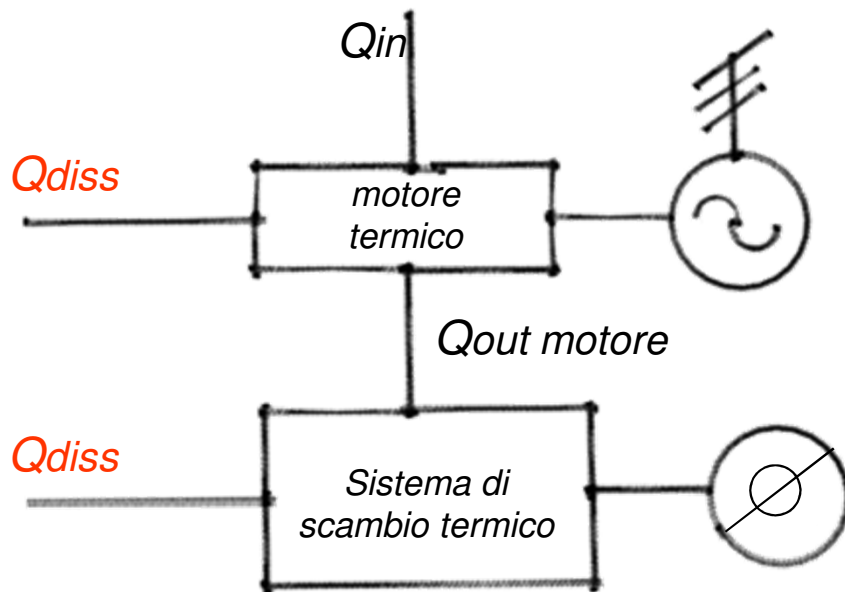
Passaggio da rete passiva a rete attiva



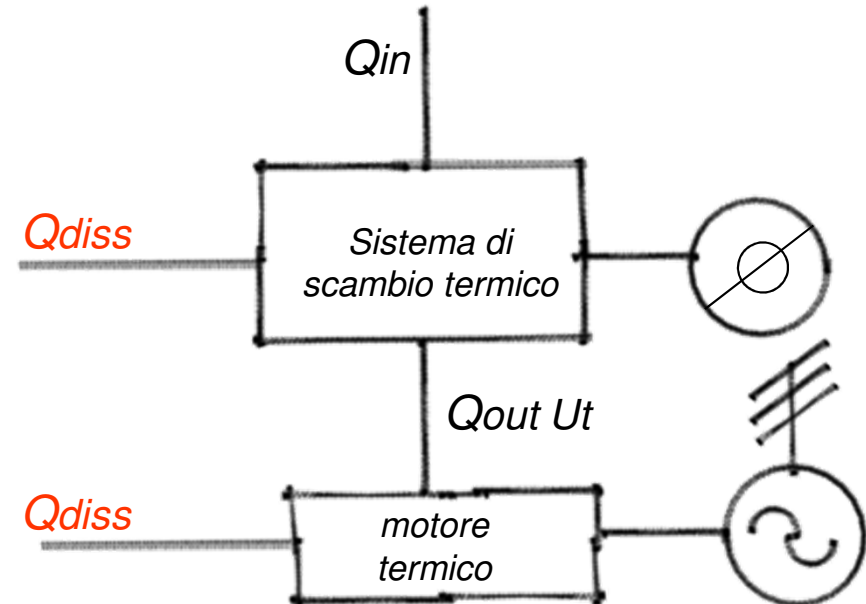
Schemi di impianto *cogenerativo*

In ragione della posizione relativa o *entalpica* delle utenze termica ed elettrica si distinguono due configurazioni di impianto *CHP*

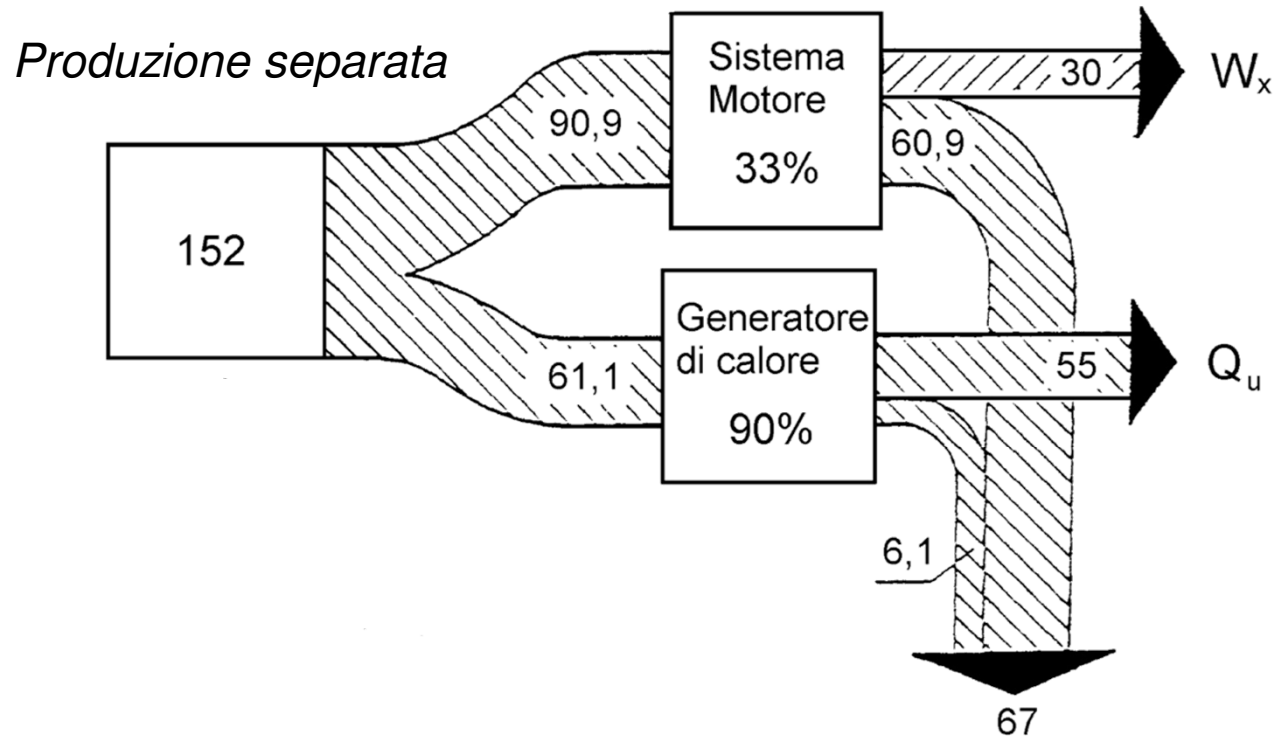
Configurazione *topping*



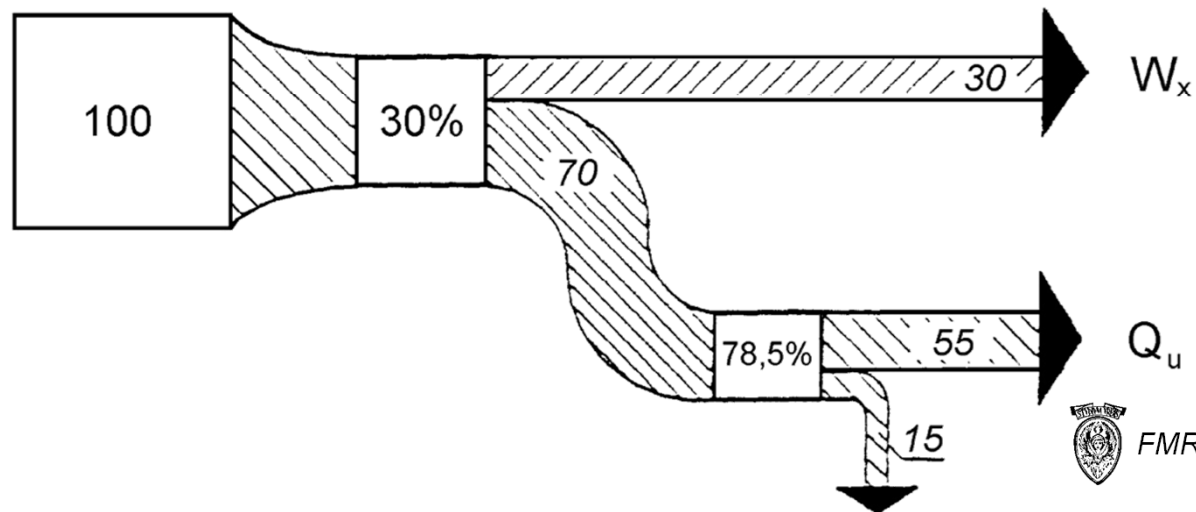
Configurazione *bottoming*



CHP o cogenerazione, schema di conversione



Produzione cogenerativa



Indici di prestazione per *impianti cogenerativi (1)*

La definizione degli indici di prestazione nei sistemi CHP si presta a diverse interpretazioni, basate sul diverso valore *termodinamico* dei due prodotti elettrico-termico, ovvero del diverso valore *economico*

Particolari indici di prestazione sono, inoltre, introdotti in ragione del quadro normativo di incentivazione di tali tecnologie

Rendimento elettrico netto $\eta_{el} = \frac{W_{el}}{Q_{in}}$ dove: $Q_{in} = m_f \times PCI_{f,in}$

W_{el} è la potenza elettrica al netto degli auto-consumi per ausiliari di impianto

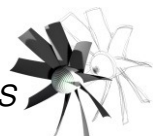
Rendimento termico netto $\eta_{th} = \frac{W_{th}}{Q_{in}}$ dove: $Q_{in} = m_f \times PCI_{f,in}$

W_{th} è la potenza termica al netto degli auto-consumi per ausiliari di impianto

Nota: a rigore tutti gli indici di efficienza energetica sono definiti a partire da grandezze energetiche integrate su base annua ed al netto dei consumi ausiliari di sistema

Indice elettrico $I_e = \frac{W_{el}}{W_{th}}$

| | |
|--------|------|
| CC | 4 |
| MaCl | 0.9 |
| IMV cp | 0.25 |
| IMV sp | 0.7 |
| TG | 0.6 |



Indici di prestazione per *impianti cogenerativi* (2)

rendimento di primo principio

$$\eta_I = \frac{W_{el} + W_{th}}{Q_{in}}$$

Questo rendimento, sicuramente utile in termini quantitativi, ha però il difetto di attribuire lo stesso valore termodinamico alla produzione elettrica e termica.

Il rendimento η_I è anche indicato come **fattore di utilizzo del combustibile** o **rendimento totale**

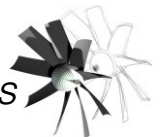
Nei sistemi CHP il rendimento η_I si discosta dall'unità a causa delle perdite termiche i.e. calore sensibile dei gas di scarico

rendimento di secondo principio

$$\eta_{II} = \frac{W_{el} + W_{th} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_x}\right)}{Q_{in}}$$

in cui il calore è pesato con il suo *equivalente meccanico*, intendendo come T_0 la temperatura dello stato morto termodinamico (i.e. la temperatura ambiente 15 °C) e con T_x la temperatura media a cui è reso disponibile il calore

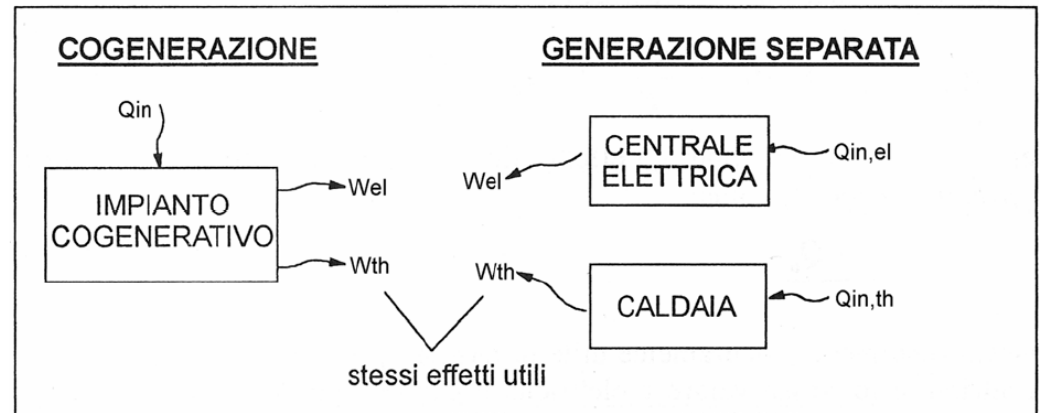
Il rendimento η_{II} , seppur valido dal punto di vista termodinamico, ha in genere il difetto opposto a η_I , cioè di attribuire un valore in genere troppo basso al calore utile (soprattutto per T_x medio-basse).



Indici di prestazione per *impianti cogenerativi* (3)

La definizione più efficace di indice della qualità termodinamica di un impianto di cogenerazione, adotta il punto di vista dell'utenza, *per questo motivo determina l'indicatore di prestazione riconosciuto dalla normativa*

A parità di servizio reso, W_{el} e W_{th} , è basata sul confronto tra la domanda di energia primaria (i.e. combustibile) del sistema CHP rispetto a quella di sistemi di produzione separata



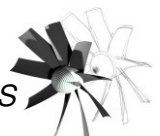
IRE (Indice di risparmio energetico)

$$IRE = \frac{Q_{in,s} - Q_{in}}{Q_{in,s}} = 1 - \frac{Q_{in}}{Q_{in,el} + Q_{in,th}} = 1 - \frac{Q_{in}}{\frac{W_{el}}{\eta_{el}} + \frac{W_{th}}{\eta_{th}}} \quad \text{con} \quad \eta_{el} = \frac{W_{el}}{Q_{in,el}}, \quad \eta_{th} = \frac{W_{th}}{Q_{in,th}}$$

I rendimenti η_{el} e η_{th} sono valori di riferimento che fotografano lo stato dell'arte delle tecnologie di generazione elettrica e termica convenzionali

i.e. il rendimento del mix elettrico nazionale ed il rendimento di una caldaia.

$$PER \text{ (Primary Energy Ratio)} = 1/(1-IRE)$$



Indici di prestazione per *impianti cogenerativi* (4)

fuel ↓

taglia →

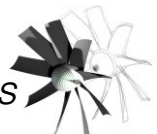
| Rendimento elettrico per il calcolo dell'IRE | | | | |
|--|--------------------|---------------------------|-----------------------------|--|
| Potenza nominale, MW _{el} | Gas naturale o LNG | Olio combustibile gasolio | Combustibili fossili solidi | Combustibili solidi da rifiuti (organici ed inorganici)* |
| ≤ 1 MW _{el} | 0,38 | 0,35 | 0,33 | 0,23 |
| 1-10 MW _{el} | 0,40 | 0,36 | 0,34 | 0,25 |
| 10-25 MW _{el} | 0,43 | 0,38 | 0,36 | 0,27 |
| 25-50 MW _{el} | 0,46 | 0,39 | 0,37 | 0,27 |
| 50-100 MW _{el} | 0,49 | 0,39 | 0,37 | 0,27 |
| 100-200 MW _{el} | 0,51 | 0,39 | 0,37 | 0,27 |
| 200-300 MW _{el} | 0,53 | 0,39 | 0,37 | 0,27 |
| 300-500 MW _{el} | 0,55 | 0,41 | 0,39 | 0,27 |
| >500 MW _{el} | 0,55 | 0,43 | 0,41 | 0,27 |

IRE (Indice di risparmio energetico)

$$IRE = \frac{Q_{in,s} - Q_{in}}{Q_{in,s}} = 1 - \frac{Q_{in}}{Q_{in,el} + Q_{in,th}} = 1 - \frac{Q_{in}}{\frac{W_{el}}{\eta_{el}} + \frac{W_{th}}{\eta_{th}}} \quad \text{con} \quad \eta_{el} = \frac{W_{el}}{Q_{in,el}}, \quad \eta_{th} = \frac{W_{th}}{Q_{in,th}}$$

Il rendimento η_{th} è assunto pari a:

- 0,8 nel settore civile (terziario e residenziale)
- 0,9 nel settore industriale



Tecnologie per la *cogenerazione*, *classificazione per settore di impiego*

| | Chimica | Carta | Petrochimica | Alimentare | Tessile | Ceramica | Mattoni | Motoristica | Legname | Cemento | Riscaldamento | Servizi |
|---|---------|-------|--------------|------------|---------|----------|---------|-------------|---------|---------|---------------|---------|
| TG | • | • | • | • | • | | | • | • | • | • | • |
| TG (1) | | | | | | • | • | | • | | | |
| TV contropressione | • | • | | • | | | | | | | | |
| Sistemi Combinati Gas/Vapore | • | • | | | | | | • | | | • | |
| MCI | • | | | • | • | | | | | | • | • |
| MCI (1) | | | | | | • | • | | | | | |
| (1) Utilizzazione diretta dei prodotti della combustione | | | | | | | | | | | | |
| Sistemi cogenerativi impiegati nelle diverse industrie manifatturiere e dei servizi | | | | | | | | | | | | |

Altre tecnologie CHP per applicazioni di piccola taglia, principalmente, nei settori dei *servizi e residenziale*

- *celle a combustibile (FC)*
- *μ TG*
- *sistemi ibridi FC- μ TG*



Tecnologie per la *cogenerazione (1)*, *MaCl*

L'uso dei motori *alternativi* a combustione interna è una delle prime, e più diffuse, tecnologie CHP

i.e. il sistema TotEM FIAT 1974

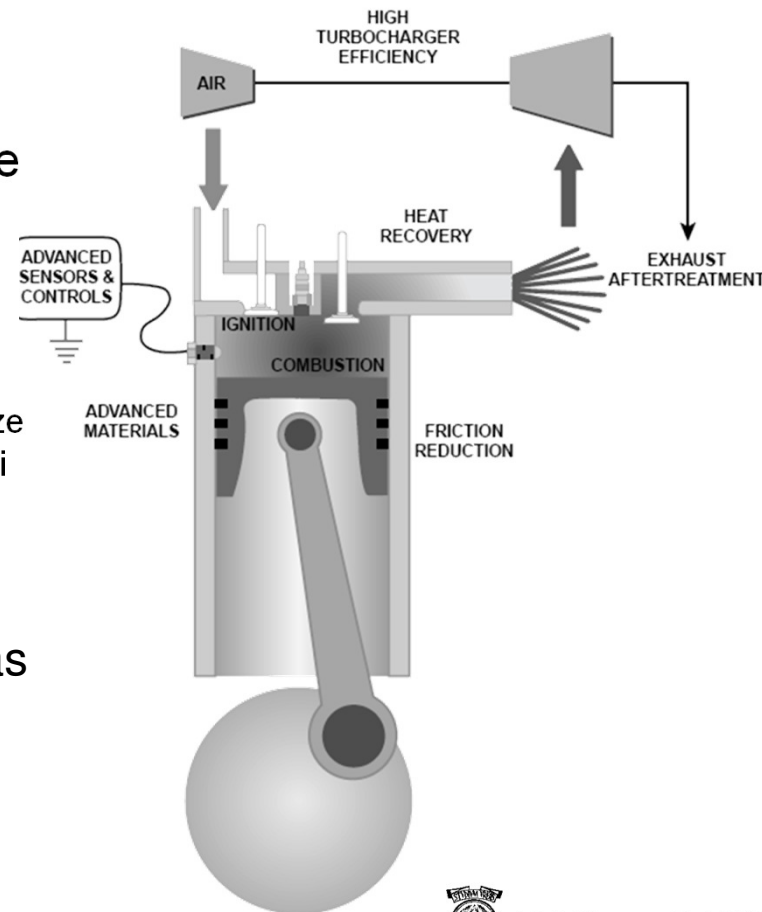
Il *generator set* produce potenza elettrica e recupera (non integralmente) il calore refluo che deriva i) dai gas di scarico, ii) dal calore sensibile dell'acqua di raffreddamento e iii) dall'olio di lubrificazione

MaCl rappresentano il segmento in maggiore crescita nell'ambito delle tecnologie CHP di piccola taglia (1 to 10 MW)
fonte DOE

Il rapporto tra numero di unità MaCl e TG è 18:1 per potenze 1 - 5 MW principalmente in virtù della maggiore efficienza di generazione elettrica dei motori volumetrici in questo intervallo di potenze

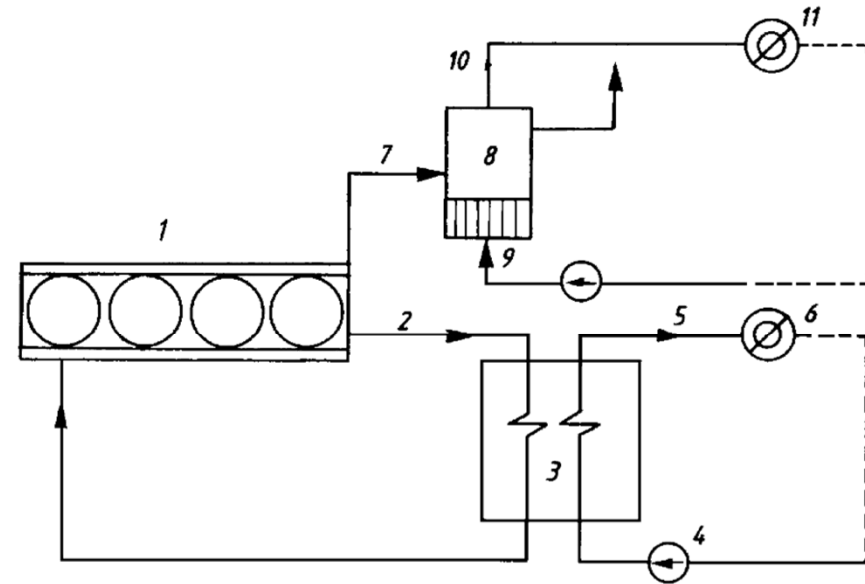
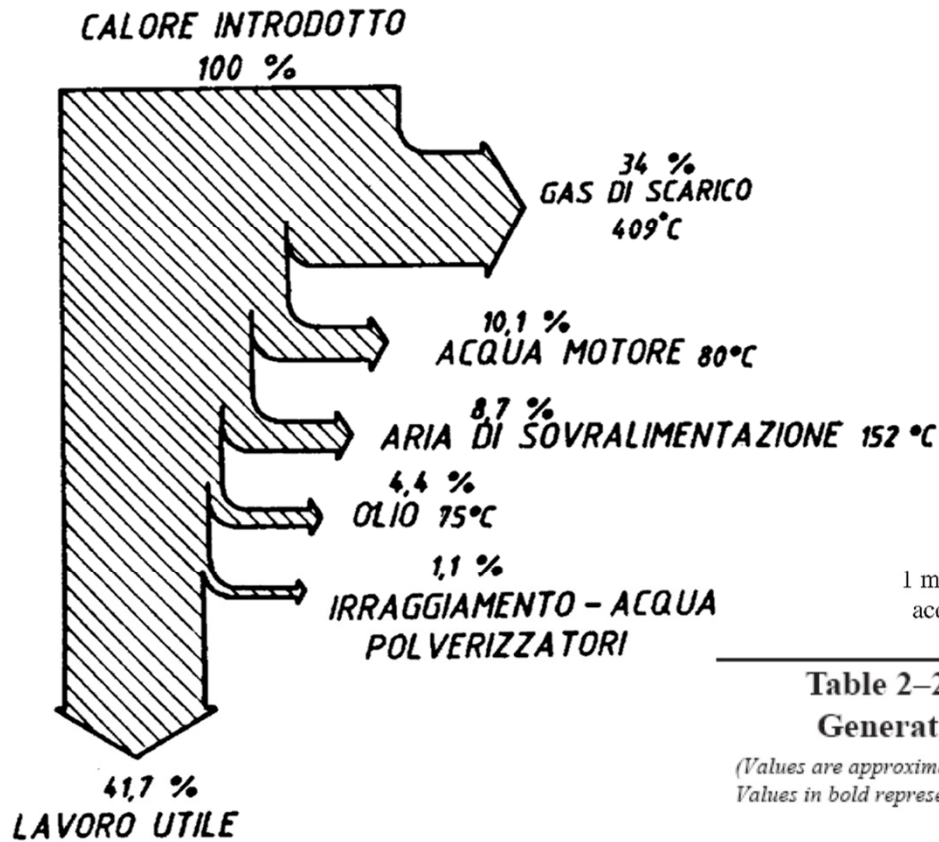
Le unità per appl. CHP sono alimentate a gas naturale

fino a taglie di 25 kW (Aspen Systems Coop, 2000)



Tecnologie per la cogenerazione (1), MaCI

Bilancio energetico e recupero del calore



Sistema cogenerativo con motore alternativo a combustione interna
 1 motore; 2 liquido refrigerazione motore; 3 scambiatore di calore; 4 ingresso acqua fredda; 5 uscita acqua calda; 6 utilizzatore acqua calda; 7 gas combusti; 8 caldaia a recupero; 9 ingresso acqua; 10 uscita vapore; 11 utilizzatore vapore

**Table 2-2. IC Engine
 Generation Process**

(Values are approximated. Figures total 100%.
 Values in bold represent useful energy.)

| | Without Heat Recovery | With Heat Recovery |
|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Engine output at flywheel ~ | 35% | 35% |
| Un-Recoverable heat | 65% | 21% |
| Recoverable heat ~ | 0% | 44% |
| Total useful energy | 35% | 79% |

Tecnologie per la *cogenerazione (1)*, *MaCI*



Source: BluePoint Energy



Source: Stewart & Stevenson

MaCI realizzati in package sono caratterizzati dai seguenti elementi di pregio

- costi di installazione e start-up bassi
- elevata affidabilità di esercizio
3% ore fuori servizio
- costi di manutenzione bassi
- semplicità di manutenzione
- buon controllo di qualità delle emissioni (SCR)

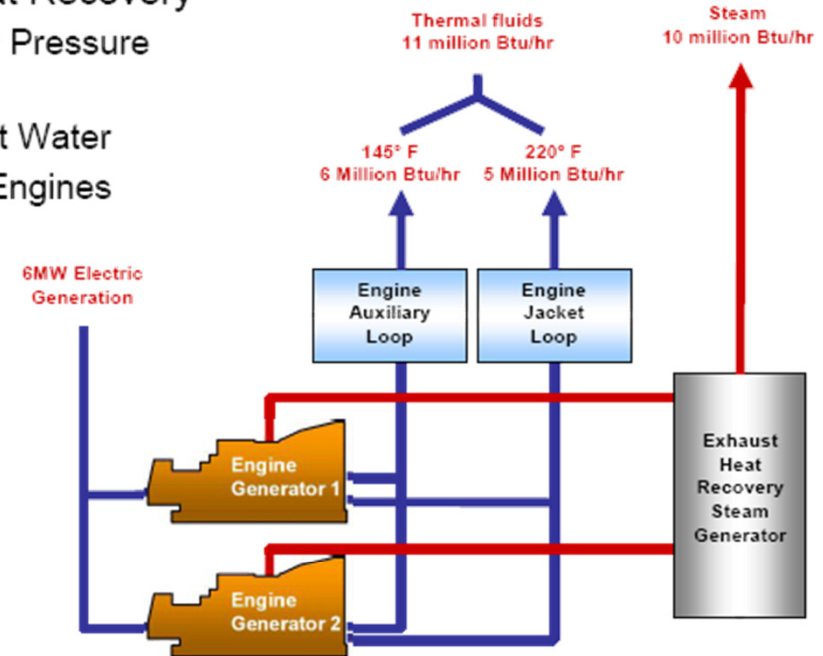
Il costo di installazione di MaCI per applicazioni CHP è di €1000-€1800/kW



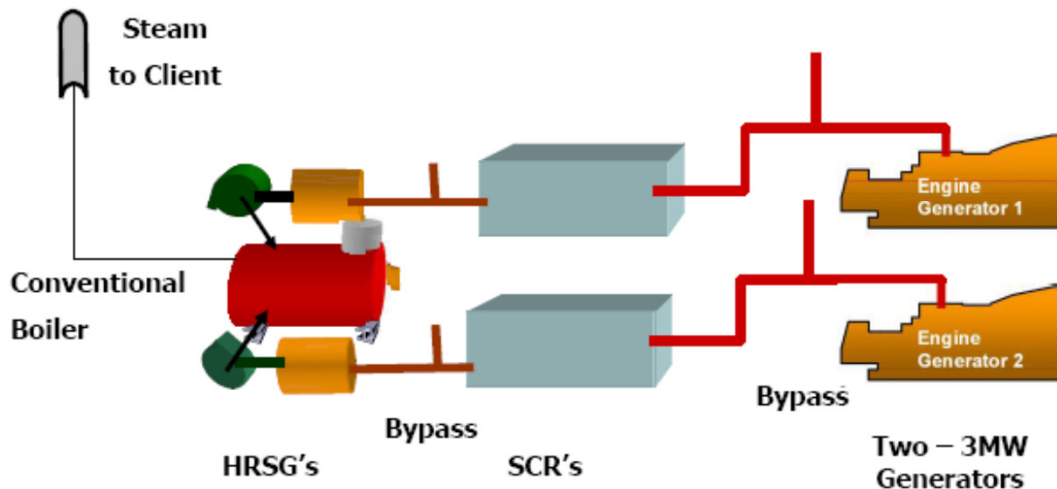
Tecnologie per la *cogenerazione* (1), *MaCI*

Integrated CHP Systems Corp, 2005

- Separate Jacket and Exhaust Heat Recovery
 - Low/High Pressure Steam
 - 220 F Hot Water
 - 1 + MW Engines



- Exhaust Heat Recovery after SCR.
- With Back-up/Peaking Boiler



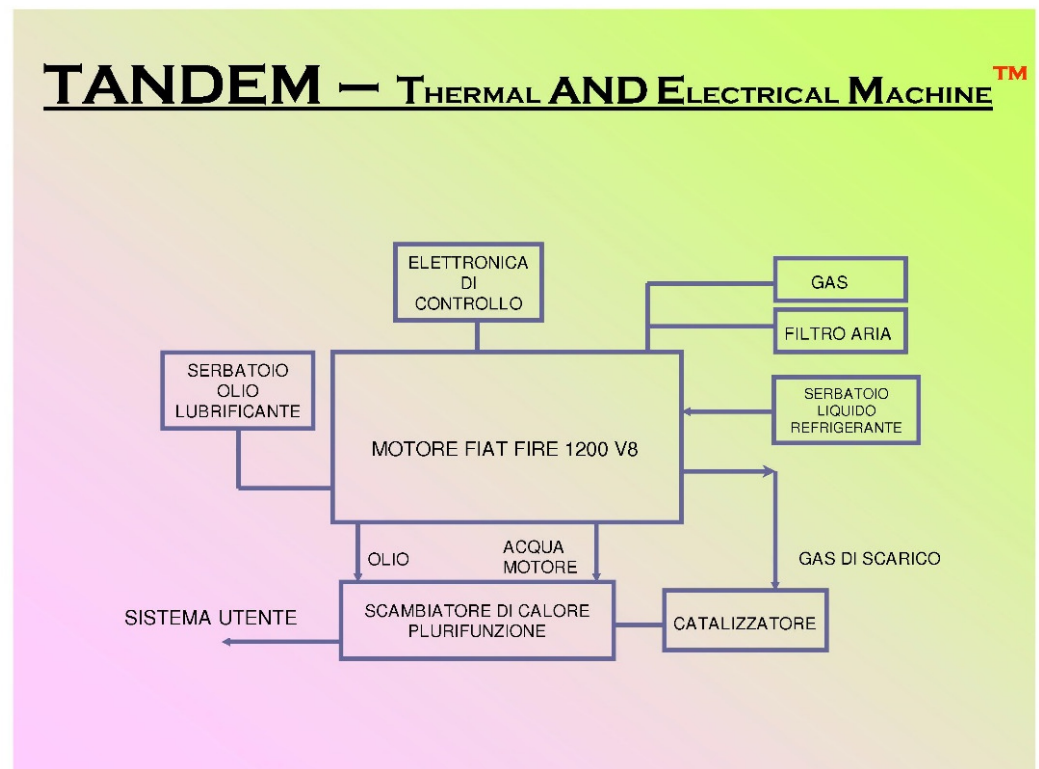
Tecnologie per la cogenerazione (1), MaCl

Dal TotEM al TANDEM

20 kWel, 44 kWth

IRE =31% - 35% (industriale-civile)

| Modelli TANDEM | T.20.A | T.20.S | T.20.AS |
|------------------------|--------------------------------|--|--|
| Campo di servizio | In parallelo con rete pubblica | In isola | In emergenza / isola In parallelo con rete pubblica |
| Potenza elettrica max. | | 20 kW | |
| Potenza termica max. | | 44 kW | |
| Alimentazione | | Gas (metano / GPL / biogas) | |
| Motore endotermico | | FIAT FIRE 1200 cc 8 valvole | |
| Regime di rotazione | | 3000 giri / minuto nominali | |
| Generatore | Asincrono trifase | Sincrono trifase | Sincrono + asincrono trifase |
| Tensione / frequenza | | 400 V / 50 Hz | |
| Emissioni acustiche | | < 70 dB(A) ad 1 metro in area libera (versione standard) | |
| Dimensioni | 1800 x 750 x h 1350 mm | | 2200 x 750 x h 1350 mm |
| Massa | 500 kg | 600 kg | 750 kg |



brevetto Energia Nova Srl, 2005

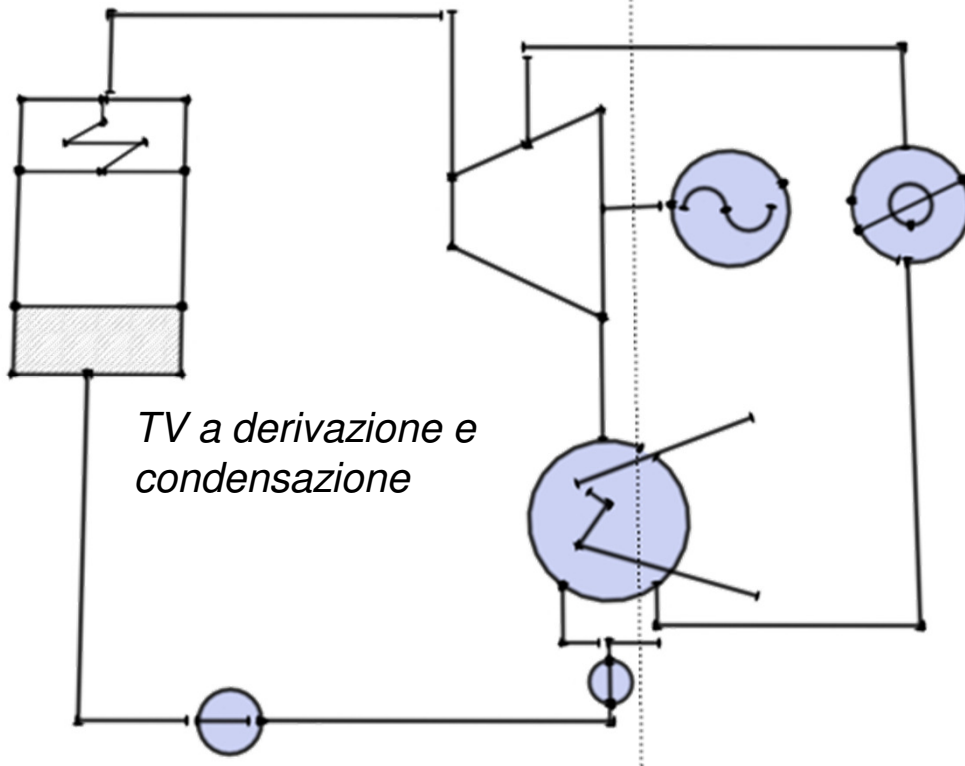
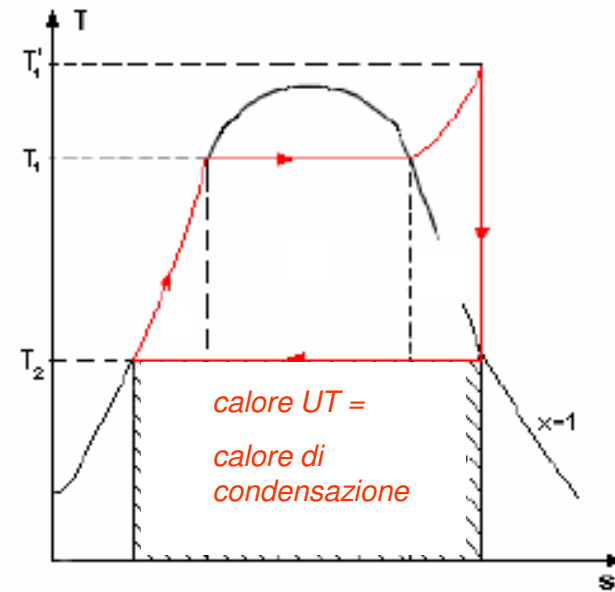
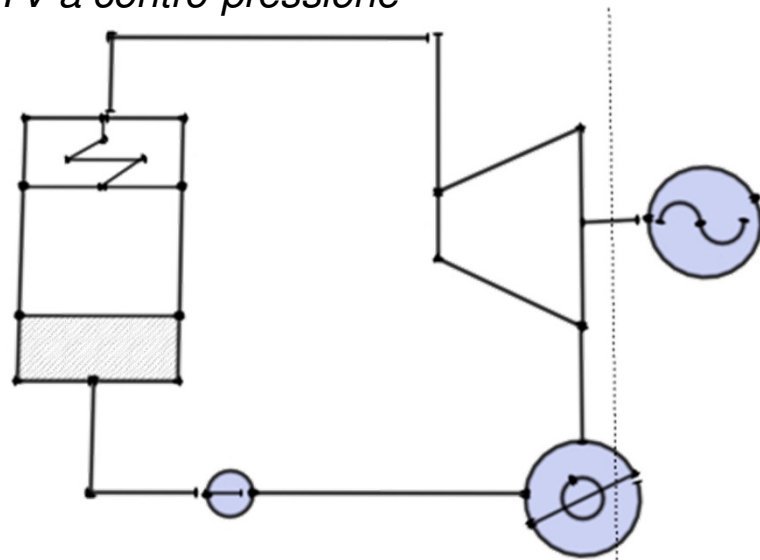


FMRGroup @ DMA-URLS

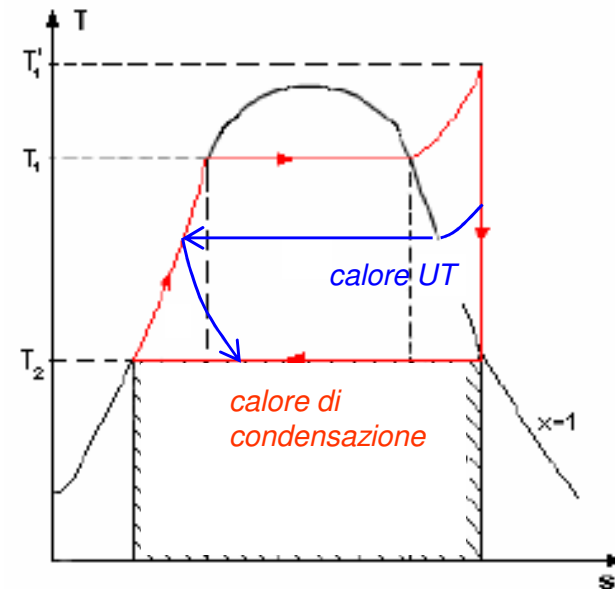


Tecnologie per la *cogenerazione* (2), TV

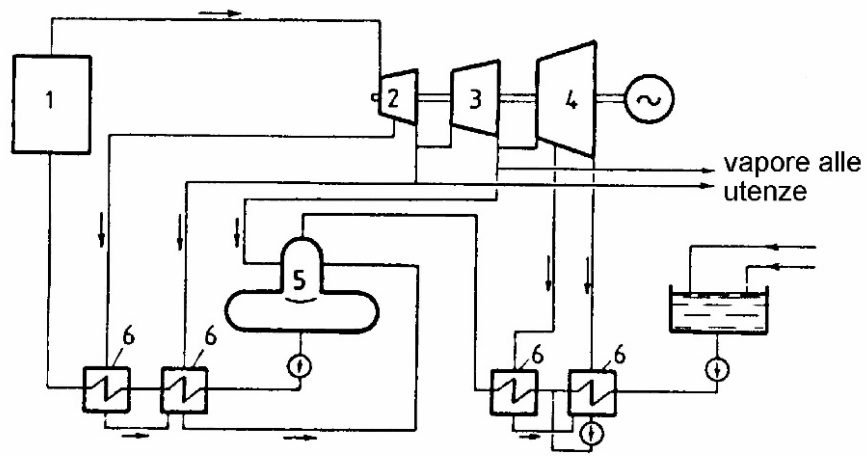
TV a contro-pressione



TV a derivazione e condensazione

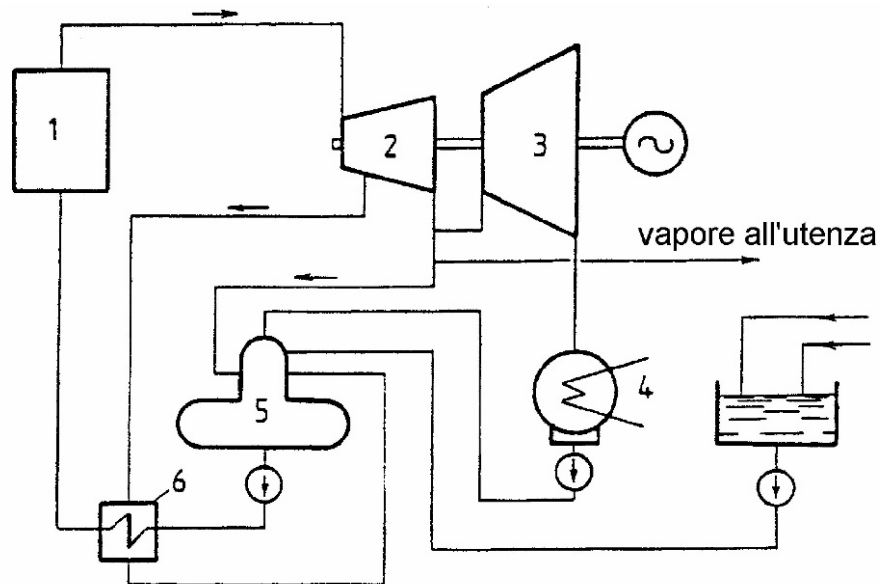


Tecnologie per la *cogenerazione* (2), *TV*



Sistema cogenerativo con
turbina a vapore a
derivazione e
contropressione

1 generatore di vapore; 2
turbina a vapore alta
pressione; 3 turbina a
vapore media pressione; 4
turbina a vapore bassa
pressione; 5 degasatore; 6
rigeneratore



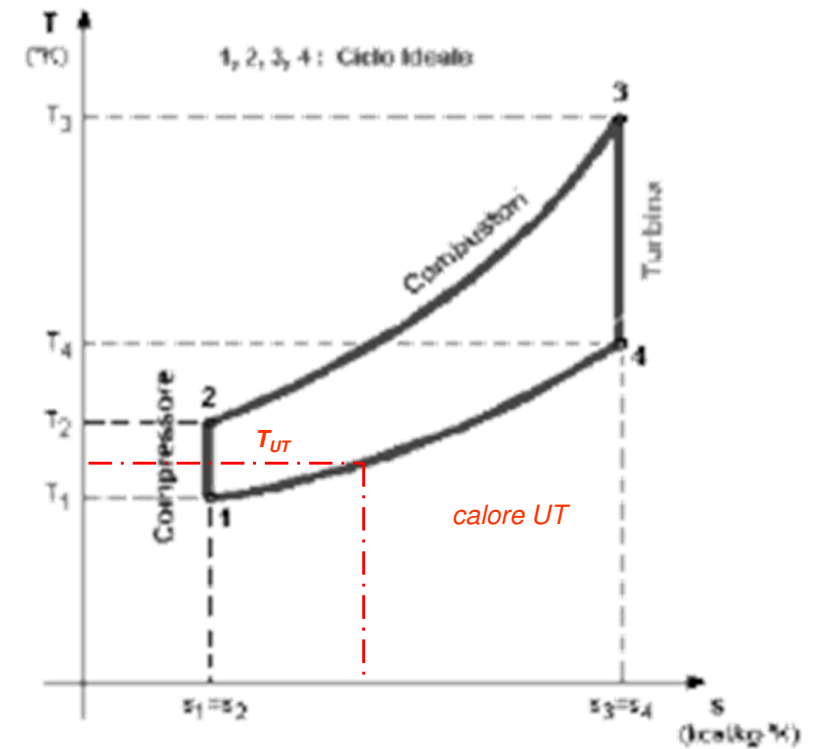
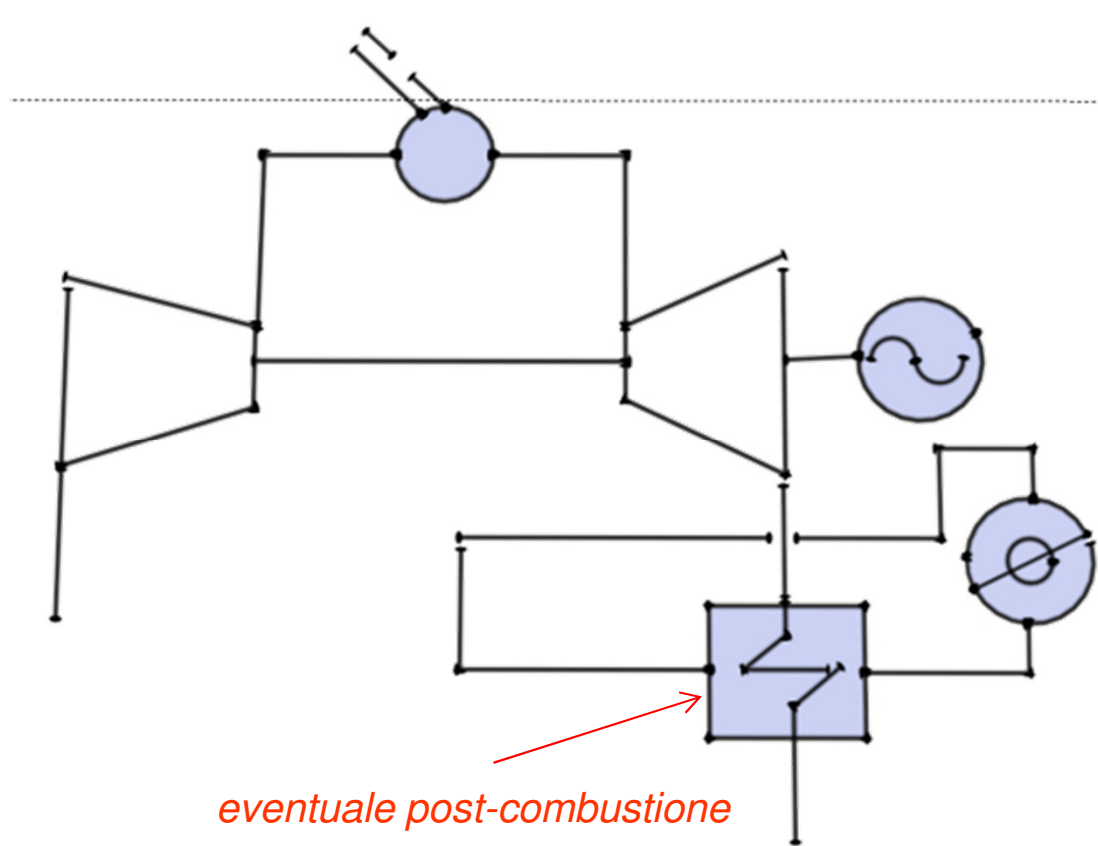
Sistema cogenerativo con
turbina a vapore a
derivazione e
condensazione

1 generatore di vapore; 2
turbina a vapore alta
pressione; 3 turbina a
vapore bassa pressione; 4
condensatore; 5 degasatore;
6 rigeneratore



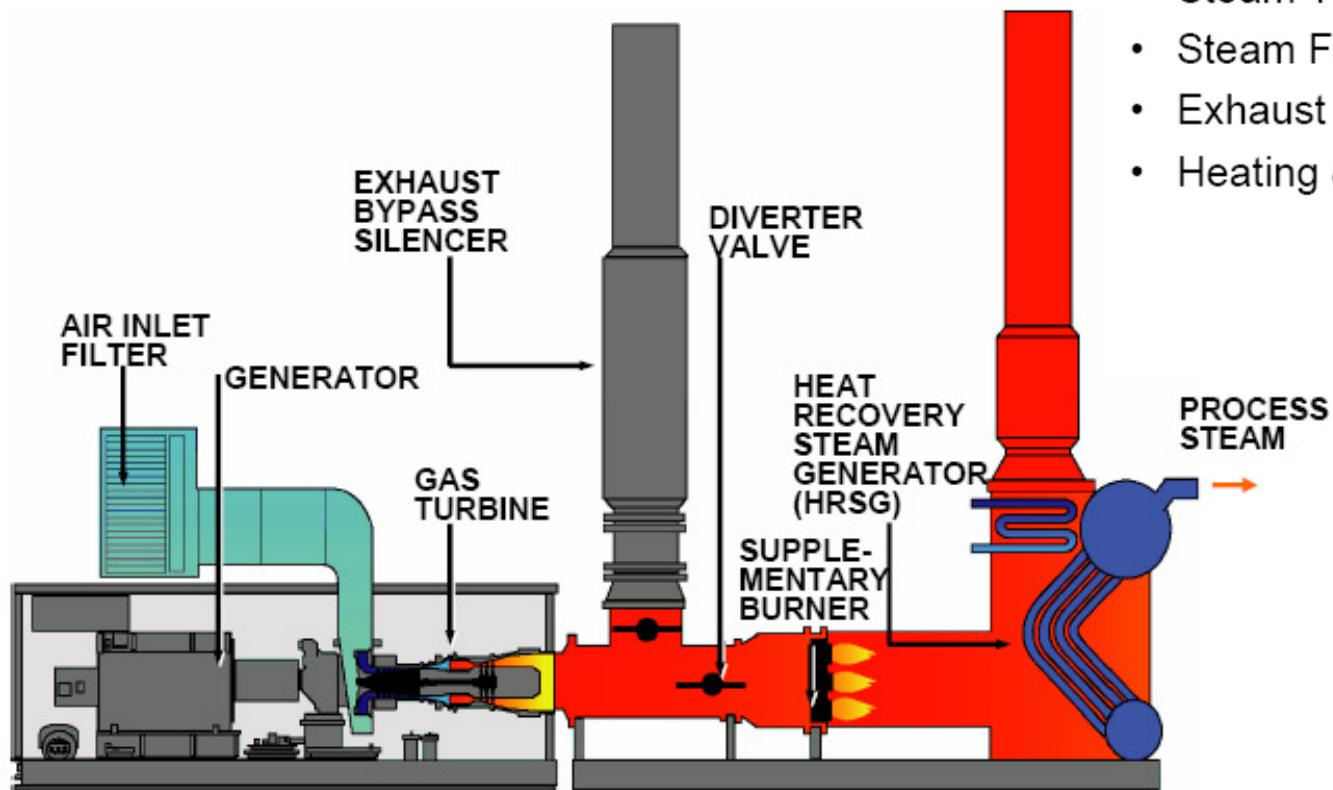
Tecnologie per la *cogenerazione* (3), TG

Turbogruppo a gas a semplice recupero



Tecnologie per la *cogenerazione* (3), TG

Turbogruppo a gas a semplice recupero *Configurazione*



Source: Solar Turbines

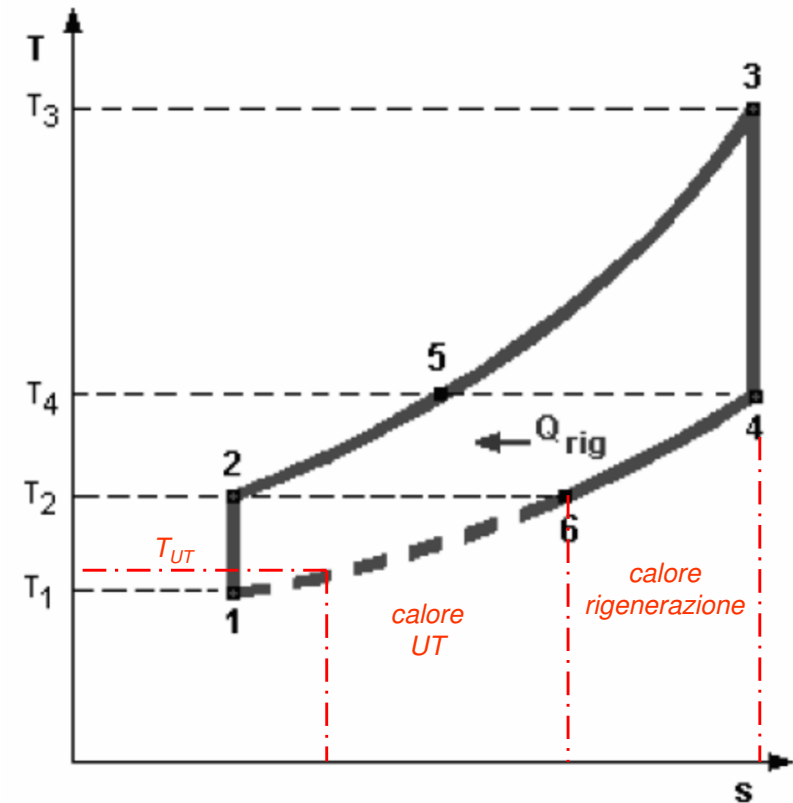
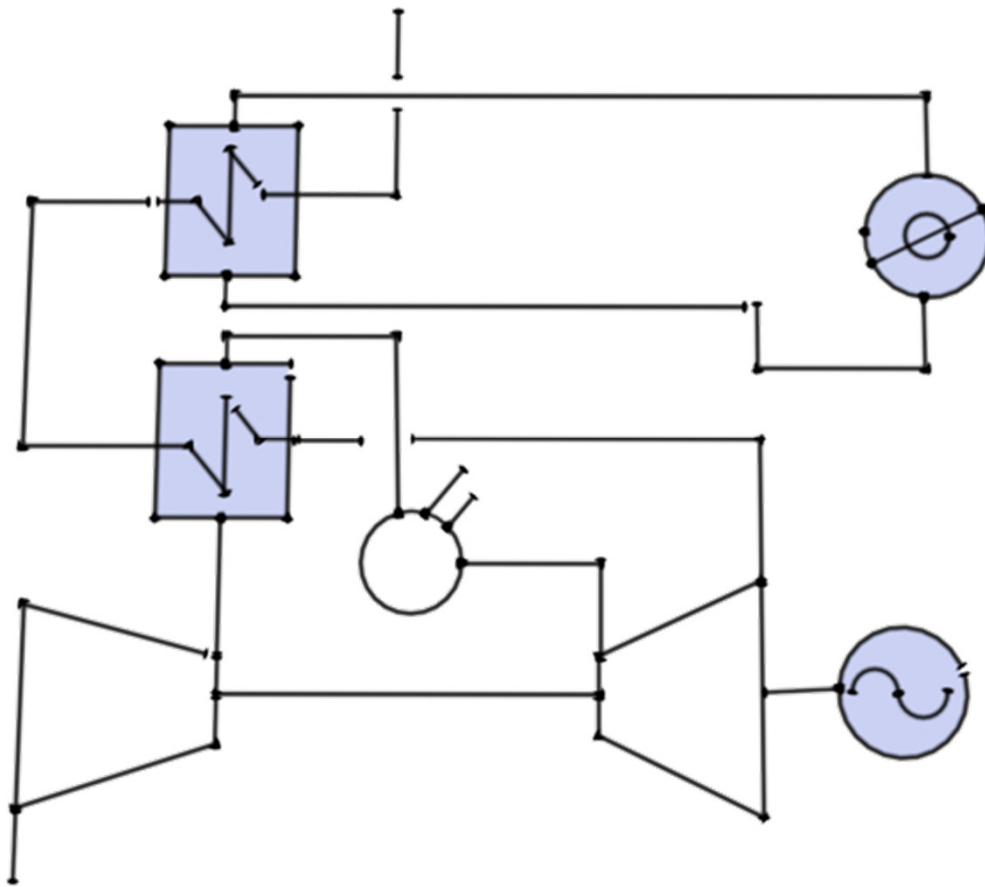
- High temperature/High volume Flue Gas
- Heat Recovery Steam Generators
- High Pressure Steam
- Co-Firing
- Steam Turbine Chillers
- Steam Fired Absorbers
- Exhaust Fired Absorbers
- Heating & Cooling



Tecnologie per la *cogenerazione* (4), μ TG

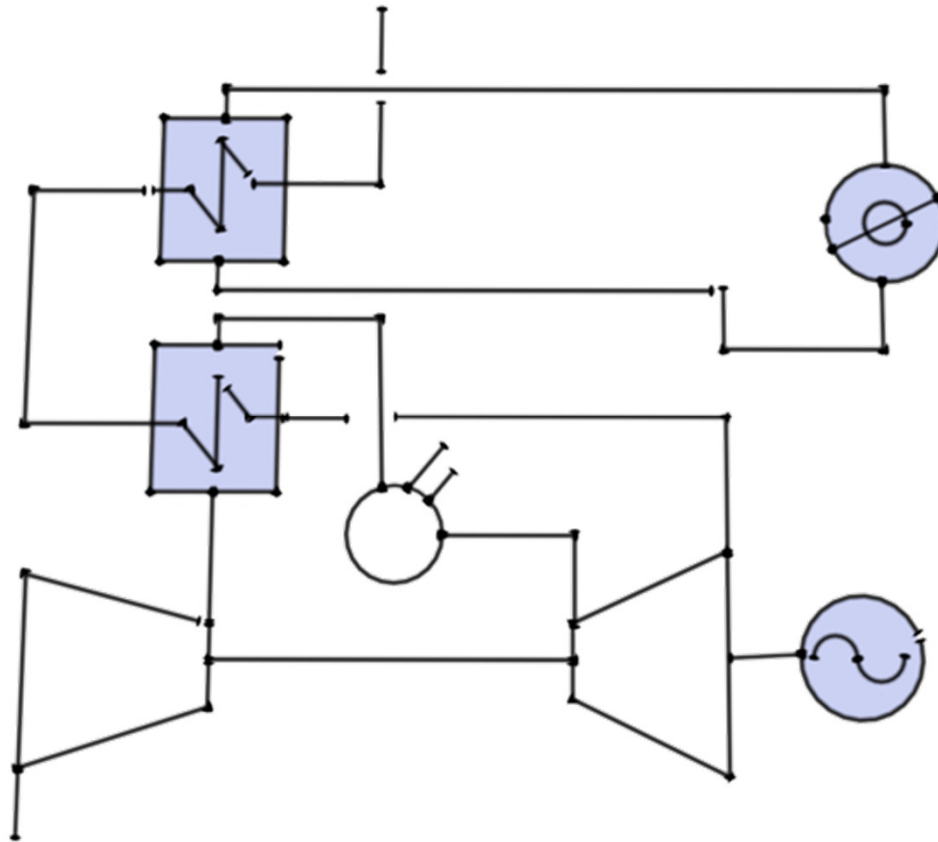
Micro-turbine generators are small, single-staged combustion turbines with outputs ranging in size from 30 to 100 kilowatts.

μ TG in configurazione rigenerativa



Tecnologie per la *cogenerazione* (4), μ TG

μ TG in configurazione rigenerativa



Caratteristiche del sistema di recupero termico delle microturbine:

- Gas di scarico con ampio eccesso d'aria;
- Produzione d'acqua calda fino a circa 90°C;
- Scarsa capacità di produrre vapore;
- Temperatura massima 115°C;
- Rendimento di recupero termico 50%;
- Rendimento globale di primo principio 80 - 85%;



Tecnologie per la *cogenerazione* (4), μ TG

Esempi realizzativi e schemi d'impianto cogenerativi

I primi modelli commerciali e già disponibili sul mercato sono stati presentati dall'americana Capstone, dall'IR PowerWorks (Ingersoll Rand), dalla Elliot società del gruppo Ebara, dal consorzio Turbec, oltre a General Electric, Honeywell, Siemens.

Le macchine commercializzate hanno potenze comprese tra i 30 e i 250 kW, rendimento elettrico netto tra il 24 e il 30%, e temperature massime del ciclo sotto i 1000°C, valori concorrenziali con gli MCI della stessa classe di potenza.

Quadro riassuntivo prestazioni microturbine

| Costruttore e modello | Potenza Elettrica (kW) | Potenza Termica (kW) | η_e % | η_t % | η_g % | Connessione |
|-----------------------|------------------------|----------------------|------------|------------|------------|-------------|
| Capstone C30 | 30 | 55 | 24 | 50 | 74 | Rete |
| Capstone C60 | 60 | 115 | 28 | 54 | 82 | Rete |
| Turbec T100 | 100* | 167 | 30 | 48 | 78 | Isola/rete |
| IngersollRand MT70 | 70 | 112 | 29 | 46 | 75 | Rete |
| IngersollRand MT250 | 250* | 383 | 30 | 46 | 76 | Isola/rete |
| Elliott TA80 | 80* | 135 | 28 | 47 | 75 | Rete |
| Elliott TA 100 | 100* | 165 | 29 | 46 | 75 | Rete |

Queste macchine hanno ormai raggiunto un buon livello di affidabilità anche durante l'esercizio prolungato.

Costo specifico di circa 1000 € per kW elettrico installato, mentre si prevede che in un mercato consolidato tali costi scendono a circa 600 €/kW elettrico.

La maggior parte di queste turbine (si escludono la Turbec T100 e la IR MT250) dimostrano, per quel che riguarda la commercializzazione, un difetto ovvero l'incapacità di funzionamento ad isola (stand alone) e necessitano una connessione in parallelo alla rete elettrica (grid connect).

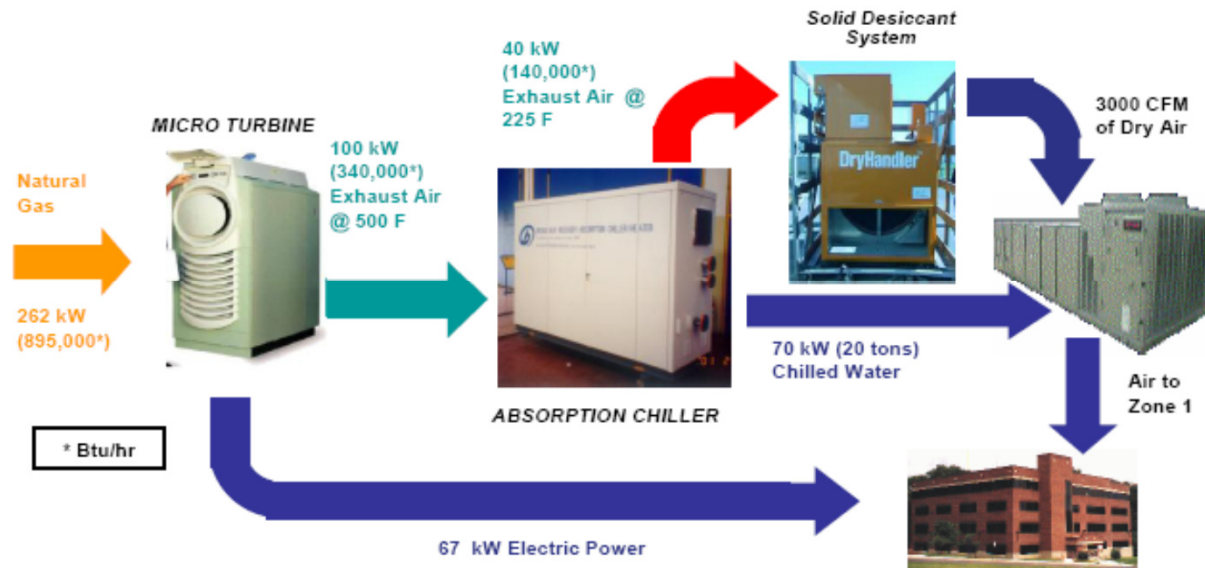


Tecnologie per la cogenerazione (4), μ TG

Micro-turbine generators are small, single-staged combustion turbines with outputs ranging in size from 30 to 100 kilowatts.

UMD CHP System Microturbine/Absorber/Desiccant

Integrated CHP Systems Corp, 2005



| | | |
|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Efficiency: | | |
| 25% generator only | 64% with chiller | 79% with desiccant |



FMRGroup @ DMA-URLS



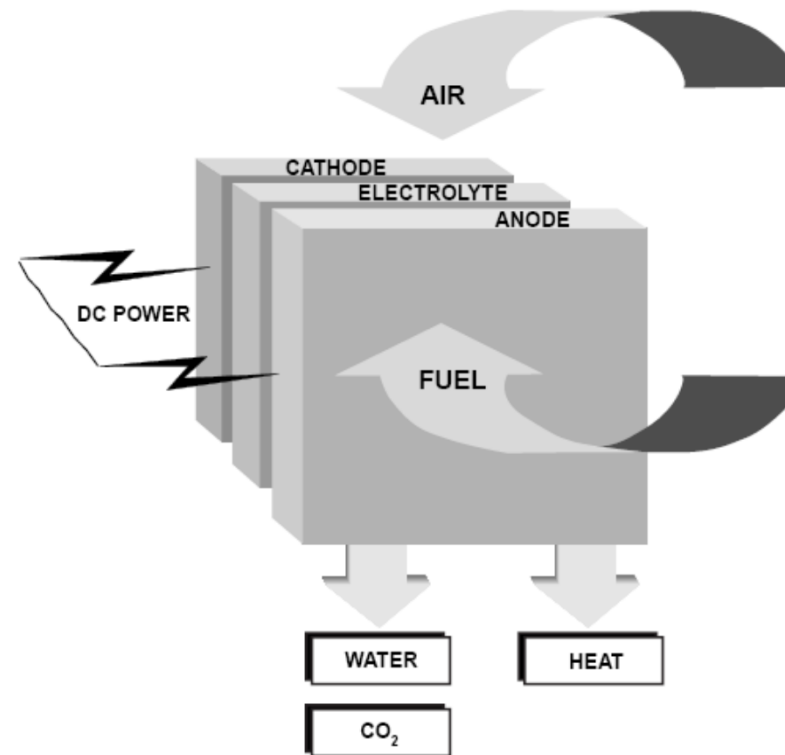
Tecnologie per la *cogenerazione* (5), FC

Fuel Cells convert hydrogen-rich fuels, such as natural gas, into electricity and heat

Fuel cells generate electricity through an electrochemical process in which the energy stored in the fuel is converted directly to electricity (catalytic reaction).

Componenti FC

1. **Hydrogen Reformer**, fuel processor that extracts hydrogen from a fuel source (such as natural gas, biomass, or propane)
2. **Fuel Cell Stacks**, electrolyte materials situated between oppositely charged electrodes, where the hydrogen fuel generates DC power in an electrochemical reaction
3. **Inverter**, converts DC outputs to AC power



Source: DOD



FMRGroup @ DMA-URLS



Tecnologie per la *cogenerazione* (5), FC

Several fuel cell technologies are operating and under development today:

Celle a combustibile ad elettrolita polimerico

La sigla che contraddistingue questa tecnologia è PEM o PEFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)

L'elettrolita è una membrana polimerica solida che agisce come conduttore protonico (ioni H⁺)

Le temperature di funzionamento sono prossime agli 80°C; il combustibile deve essere ricco in idrogeno e praticamente privo di CO, mentre l'ossidante può essere aria.

| | Nuvera "Avanti" | GE-PlugPower "HomeGen 7000" |
|------------------------------|------------------|-----------------------------|
| Rendimento elettrico netto | >33% | 29%@7kW40%@2kW |
| Potenza AC | 2.3-4.6 kW | 2-7 kW |
| Potenza nominale AC | 4.6 kW | 7 kW |
| Potenza termica recuperabile | 6.9 kW | n.d. |
| Temperatura recupero termico | 65°C | n.d. |
| Rendimento totale | >80% LHV | >75% LHV |
| Dimensioni | 1200x560x1400 mm | 1900x900x1400 mm |
| Peso | 400 kg | n.d. |
| Rumore | 70 dBA | < 65 dBA |
| Installazione | Indoor/outdoor | Outdoor |

prestazioni a confronto di celle PEM.



FMRGroup @ DMA-URLS



Tecnologie per la *cogenerazione (5)*, FC

Celle a combustibile ad acido fosforico

La sigla che contraddistingue questa filiera è PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell). Sviluppata a partire dagli anni '60 ed è l'unica che abbia già raggiunto un ragguardevole grado di maturità tecnologica.

L'elettrolita impiegato è una soluzione concentrata di acido fosforico che agisce da conduttore ionico tramite ioni H^+ (provenienti dalla dissociazione $H_2O \rightleftharpoons H^+ / OH^-$ promossa dall'acido)

Le temperature di funzionamento prossime a $200^\circ C$, la PAFC è sufficientemente stabile dal punto di vista termico

Celle a combustibile a carbonati fusi

La sigla che contraddistingue questa filiera è MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell).

L'elettrolita è usualmente una miscela di carbonati alcalini (Li, Na, K) trattenuta da una matrice ceramica di $LiAlO_2$.

La cella opera a $600-700^\circ C$, temperatura alla quale i carbonati formano un sale fuso altamente conduttivo, con ioni carbonato CO_3^{2-} che permettono la conduzione ionica.



Tecnologie per la *cogenerazione (5)*, FC

Celle a combustibile ad ossidi solidi

La sigla che contraddistingue questa tecnologia è SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)

L'elettrolita è un ossido solido metallico non poroso, generalmente un ossido di zirconio (ZrO_2) drogato con ittrio.

La cella opera a temperature comprese tra 650 e 1.000 °C, alte abbastanza da permettere una sufficiente conduzione ionica tramite ioni ossigeno $O=$.

tabella comparativa per tre modelli di celle SOFC.

| | Siemens- Westinghouse CHP100 | FCT 5kW | Sulzer Galileo |
|------------------------------|------------------------------------|-----------------|----------------|
| Rendimento elettrico netto | >46% | 42%@3kW | >30% |
| Potenza nominale AC | 100 kW | 3 kW (picco5kW) | 1 kW |
| Potenza termica recuperabile | 75 kW | 3.1 kW | 2.5 kW |
| Rendimento totale | >80% | >80% | >85% |
| Dimensioni | n.d. | 120x80x210cm | 55x55x160cm |
| Peso | n.d. | 1100 kg | 170 kg |



Tecnologie CHP, analisi comparativa (1)

| Technical and Economical Parameters Distinguishing CHP Technologies | | | | | | |
|--|---|----------------------------------|--|--------------------------------------|---------------------------------|-----------|
| Parameter (approximations) | Natural Gas Engine | Steam Turbine | Gas Turbine | Fuel Cell | Micro- Turbine | “Hybrid” |
| Capacity | 25 kW- 5 MW | Any | 500 kW- 25 MW | 200 kW-2 MW (testing down to 1kW) | 25 kW- 100 kW | 250 kW |
| Electric Efficiency | 25-45% | 30-42% | 25-40%(simple) 40-60% (combined) | 35-55% | 25-30% | 60% |
| Footprint (sqft/kW) | 0.22-0.31 | <0.1 | 0.02-0.61 | 0.6-4.0 | 0.15-1.5 | – |
| CHP installed Cost \$/kW (typical) | 800-1500 | 800-1000 | 700-900 | >3,000 | 700-1300 | 1000-1500 |
| O&M Cost (\$/kWh) (typical) | 0.007-0.015 | 0.004 | 0.002-0.008 | 0.003-0.015 | 0.002-0.01 | – |
| Availability | 92%-97% | Near 100% | 90%-98% | >95% | 90%-98% | – |
| NOx Emissions (lbs/MWh) | 2.2-28 | 1.8 | 0.4-4.0 | <0.02 | 0.4-2.2 | – |
| Uses for Heat Recovery | Hot water, LP steam, district heating | LP-HP steam, district heating | Heat, hot water, LP-HP steam, district heating | Hot water, LP-HP steam | Heat, hot water, LP steam | – |
| CHP Output (Btu/kWh) | 3,400 | N/A | 3,400-12,000 | 500-3,700 | 4,000-15,000 | – |
| Usable Temp For CHP (F) | 180-900 | N/A | 500-1,100 | 140-700 | 400-650 | – |

Source: ONSITE SYCOM Energy Corporation, 1999 (except for Hybrid data)

Tecnologie CHP, analisi comparativa (2)

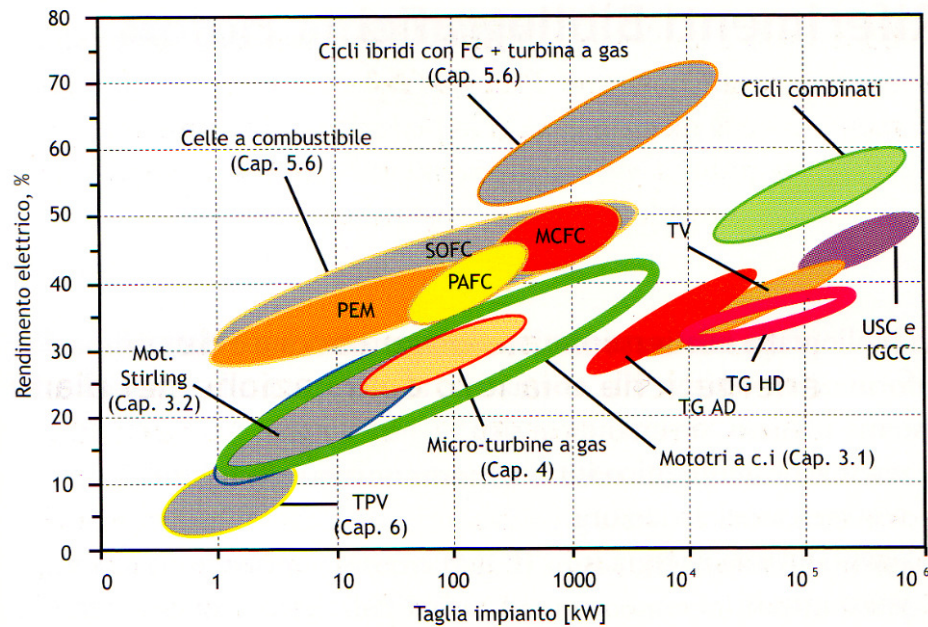


Figura 2.3
Rappresentazione sintetica nel piano rendimento elettrico-potenza unitaria dei sistemi di generazione dell'energia. Le tecnologie presentate in questo libro sono a diversi stadi di evoluzione tecnologica (alcune a livello di prototipi da laboratorio, altre a livello di impianti dimostrativi, altre infine sono disponibili commercialmente)

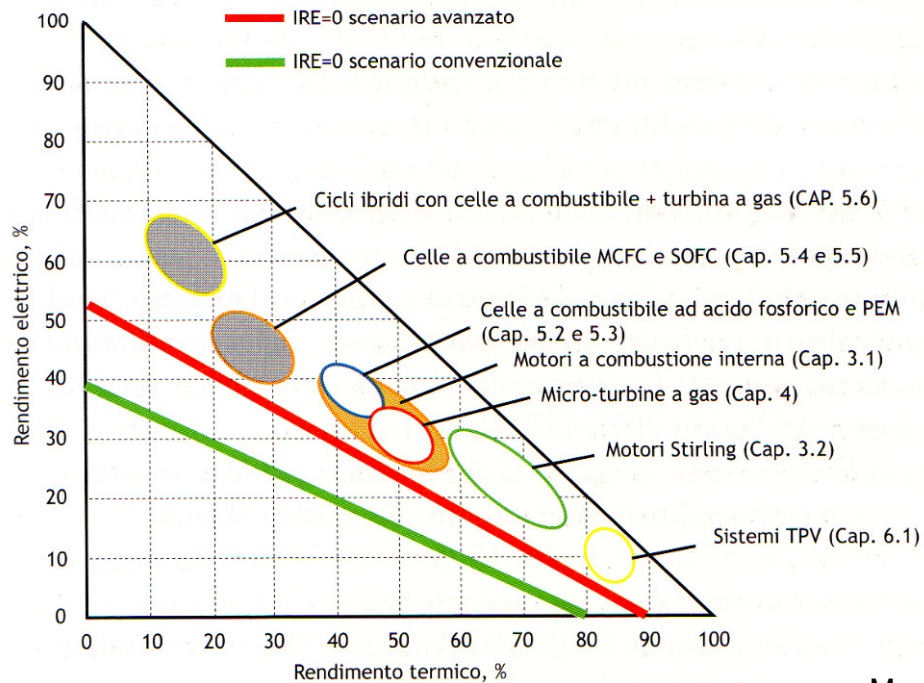
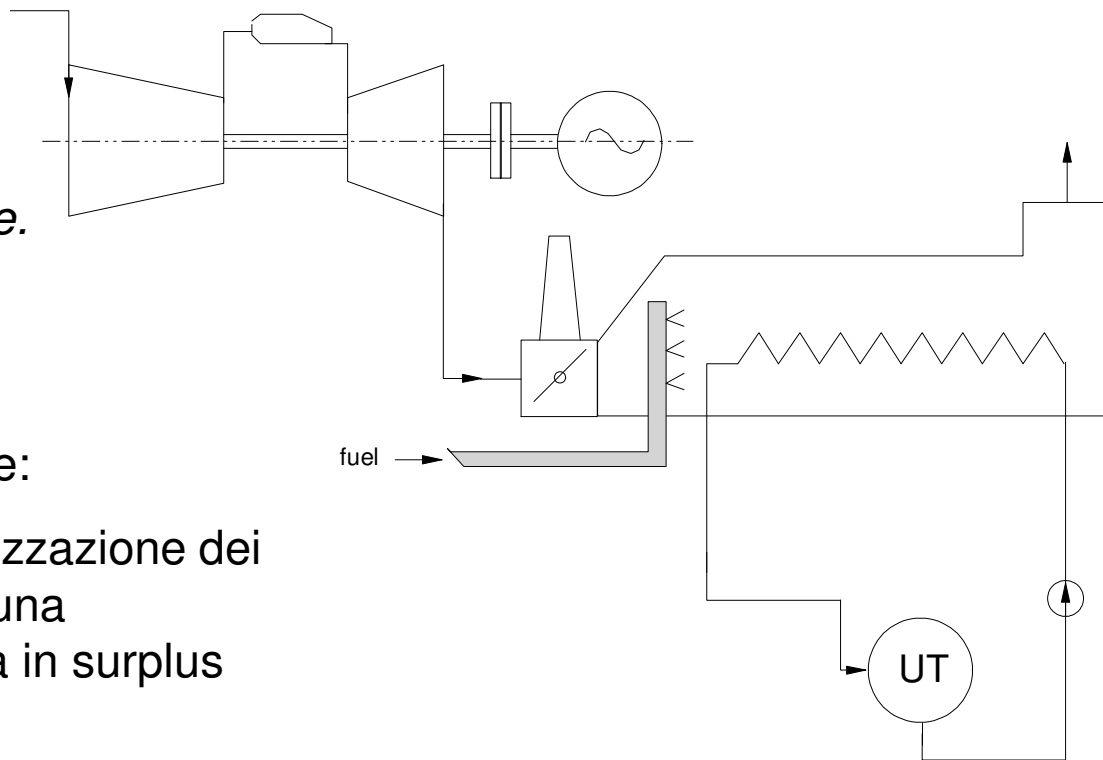


Figura 2.4
Rappresentazione nel piano rendimento elettrico-rendimento termico delle prestazioni delle varie tecnologie di microgenerazione descritte nel volume

CHP con turbogruppo a gas, *regolazione di potenza (1)*

TG a recupero semplice

Gli organi di regolazione vengono utilizzati nelle applicazioni CHP per garantire una maggiore flessibilità, *i.e.* *variazione dell'indice elettrico*



Due tipologie di organi di regolazione:

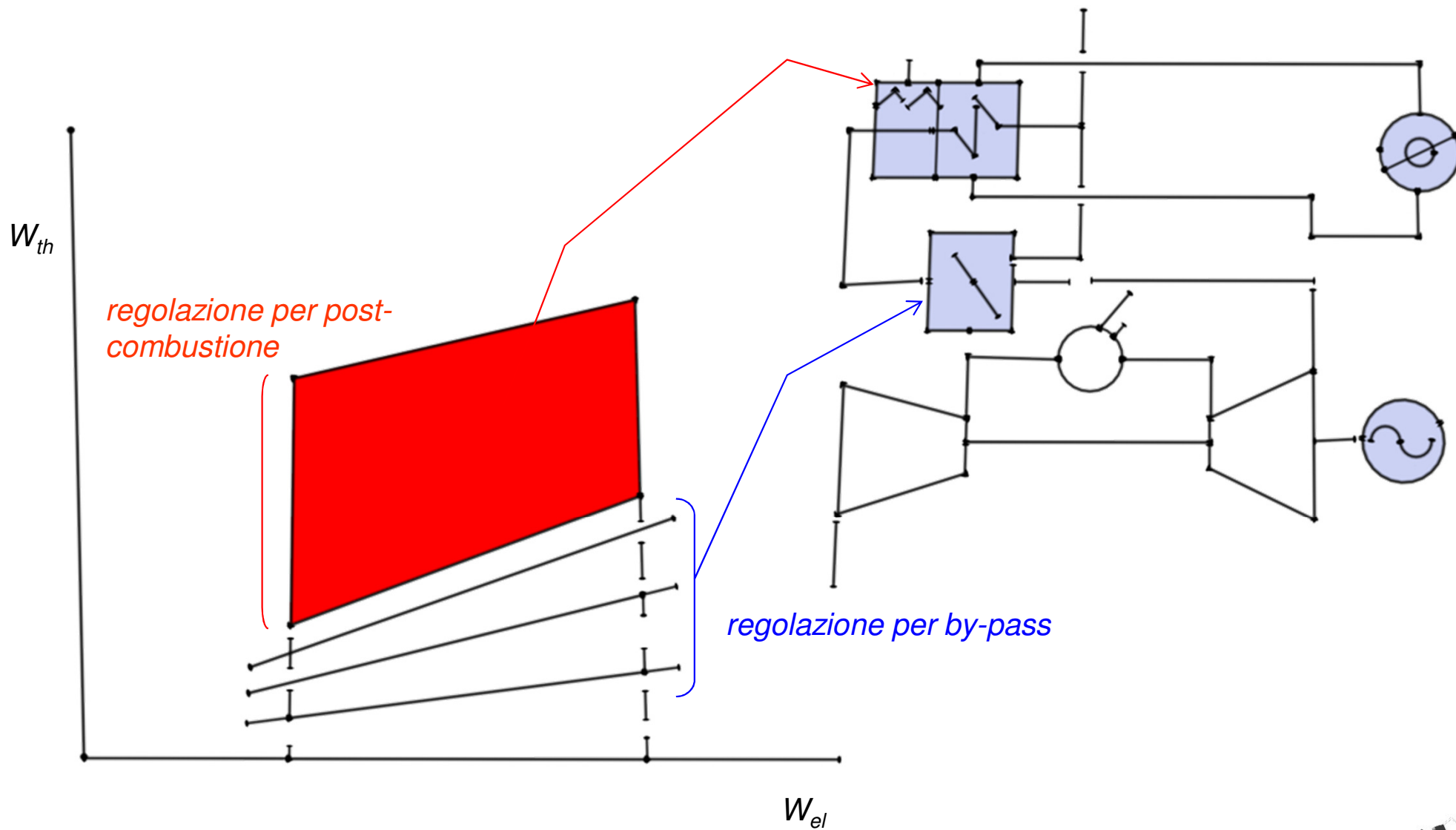
- i. Valvola di by-pass per la parzializzazione dei gas di scarico, *i.e.* per ottenere una dissipazione dell'energia termica in surplus rispetto alla domanda UT
- ii. Post-combustore all'interno del sistema di recupero termico

soluzione economica ad alto rendimento, limitata dal tenore di O₂ nei gas di scarico e dalla massima T sopportabile nei GVR, *i.e.* solitamente più bassa rispetto ai GV convenzionali



CHP con turbogruppo a gas, *regolazione di potenza (1)*

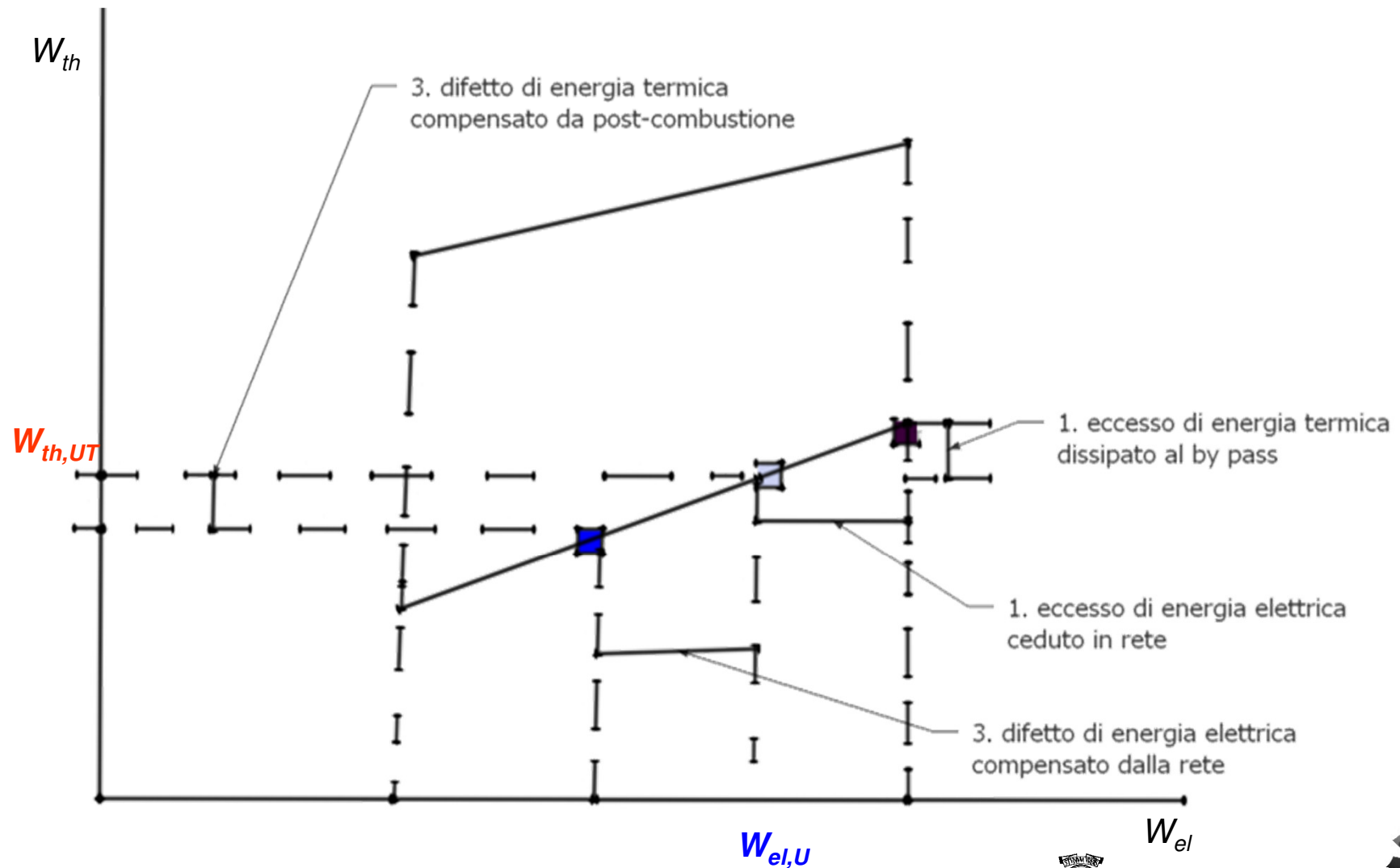
TG a recupero semplice



CHP con turbogruppo a gas, *regolazione di potenza (1)*

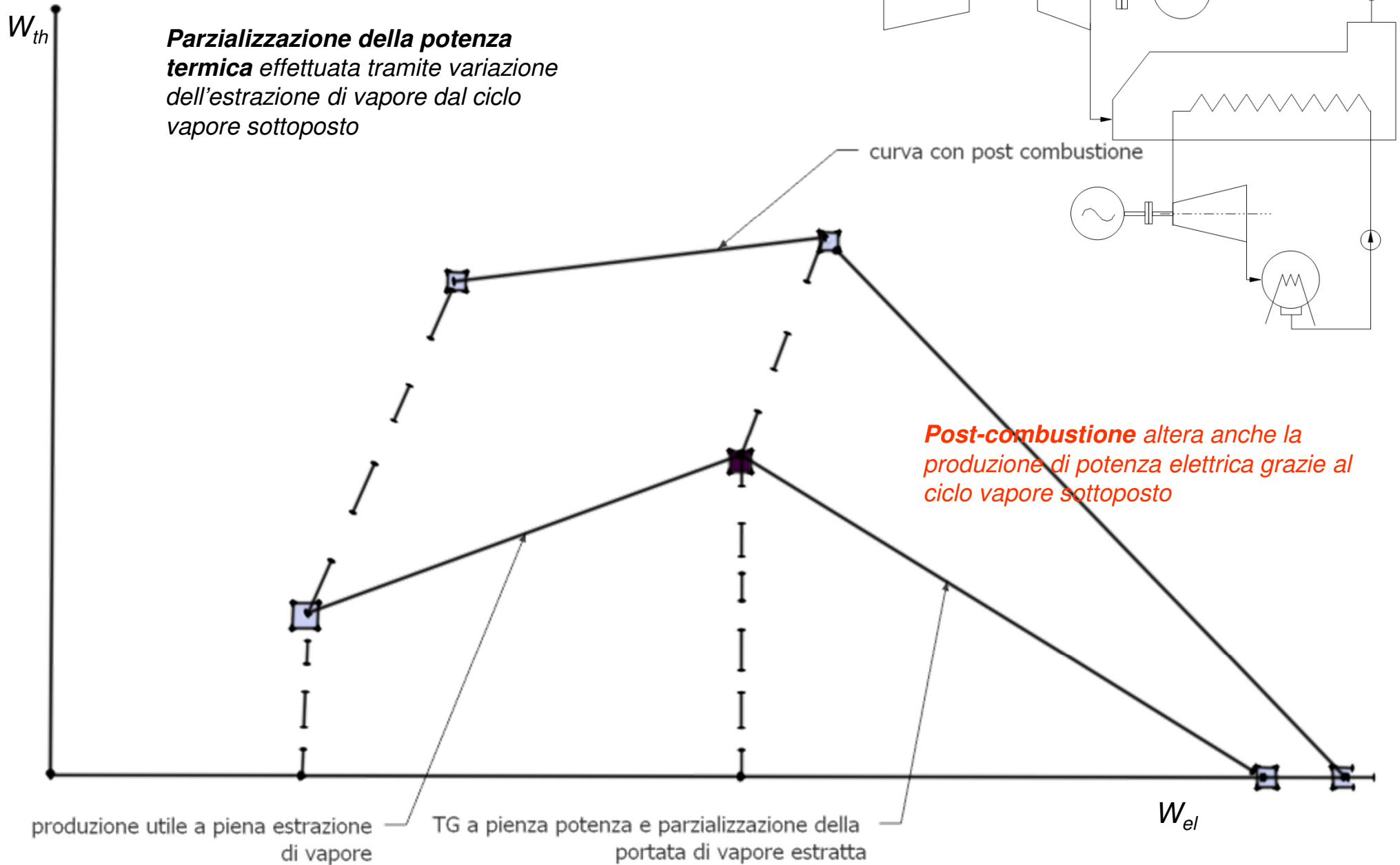
TG a recupero semplice

Ipotesi di parallelo con la rete elettrica



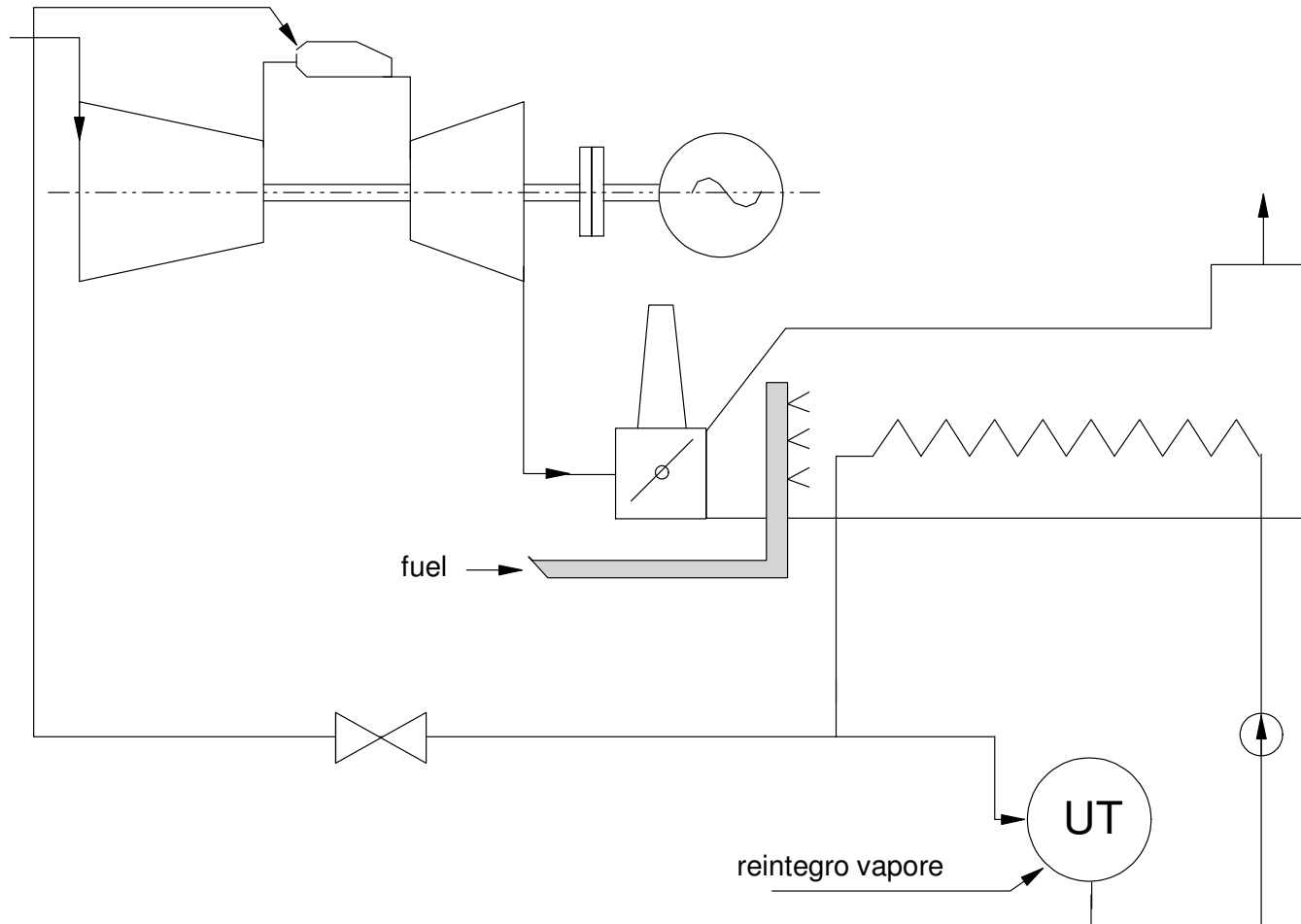
CHP con turbograppo a gas, *regolazione di potenza (2)*

TG in Ciclo Combinato



CHP con turbogruppo a gas, *regolazione di potenza (2)*

TG a recupero ed iniezione di vapore STIG



Progetto μ -BIOCSP

Sistema di potenza ibrido biomassa-solare

Obiettivo

Studio e realizzazione di un impianto ibrido solare a concentrazione-biomassa legnosa per micro-cogenerazione

Aspetti innovativi

Impiego di tecnologie a concentrazione solare CSP

Impiego di un espansore volumetrico a vapore, *rotativo*

Dati dimensionali μ -BIOCSP

1283 kWp, CSP 2500 m²

930 kWth, caldaia a biomassa

Sistema di accumulo termico TES

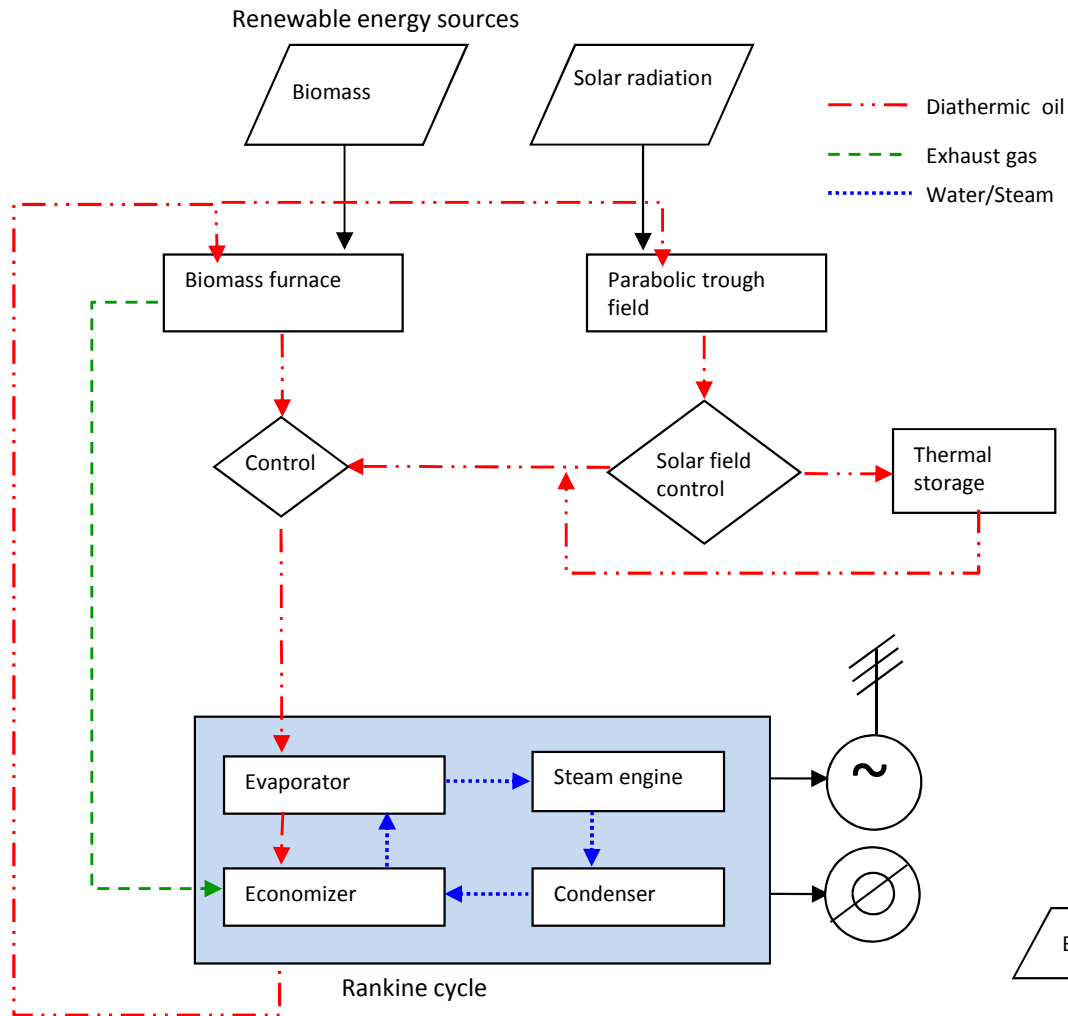
Dati prestazionali μ -BIOCSP

150 kW, output potenza elettrica

1000 kW, output potenza termica a 140°C



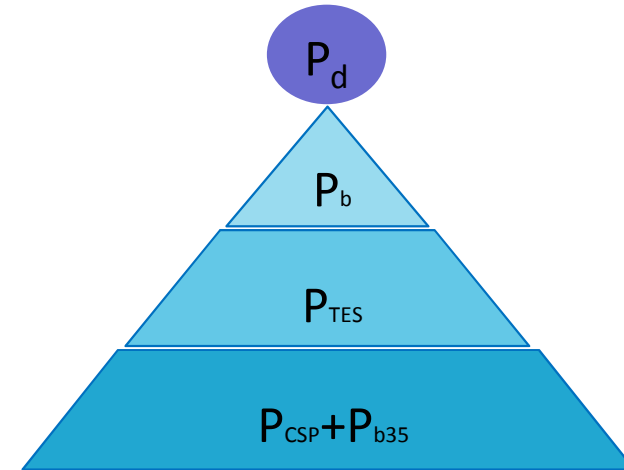
Combined CSP plant flow chart



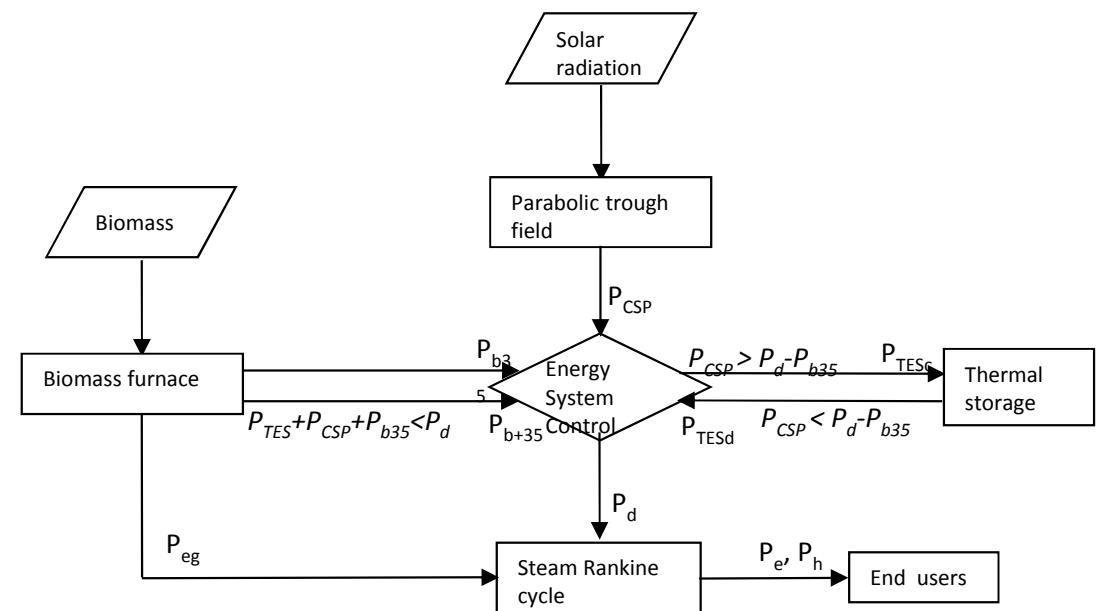
Low enthalpy saturated steam at 230 °C and 2'800 kPa
 Condensed at 134 °C and 300 kPa

Waste heat available at the condenser at 80°C for district heating

System priorities

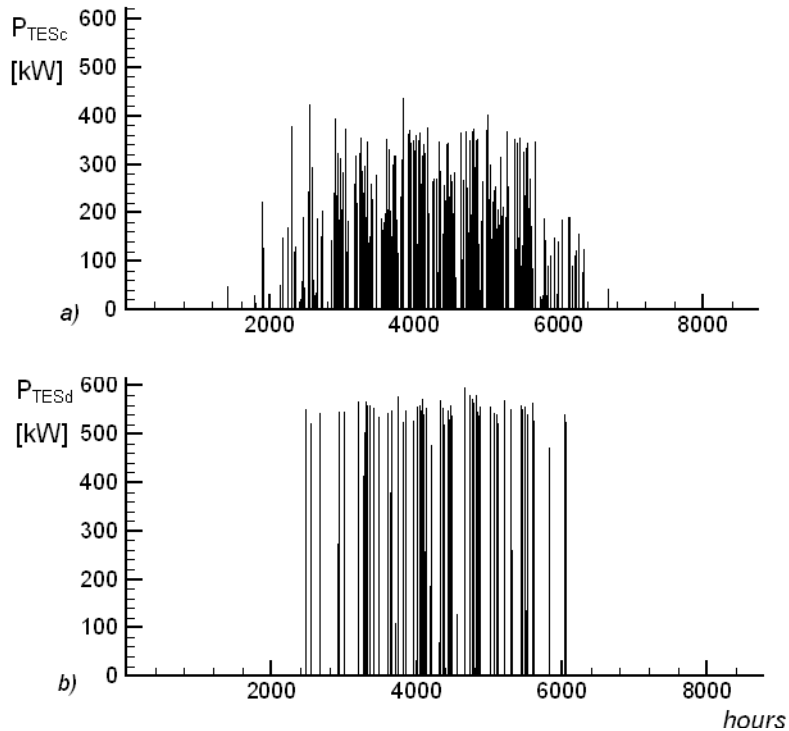


Energy conversion system flow diagram



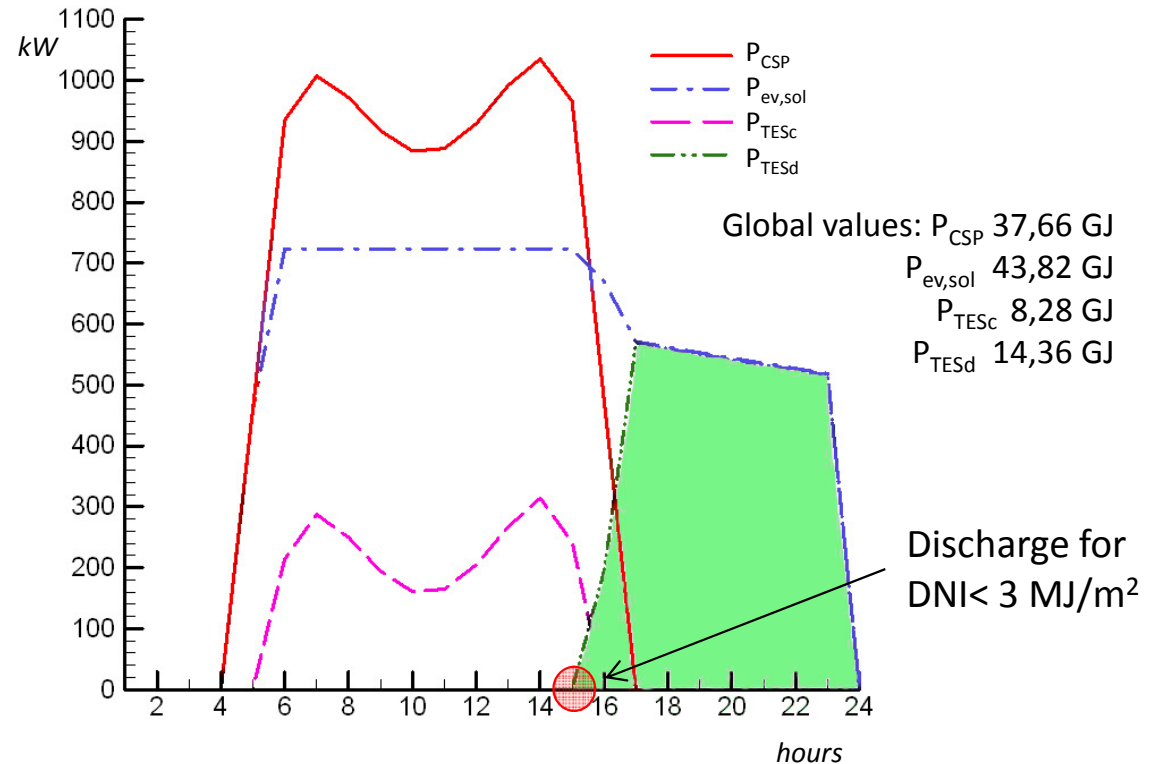
TES behaviour

Storage charge (P_{TESc}) and discharge (P_{TESd}) cycle



Charge concentrated in the spring/summer period and for $DNI > 14,4 \text{ MJ/m}^2$.
 Discharge rates driven by the power output modulation

Storage charge-discharge behaviour on a summer day



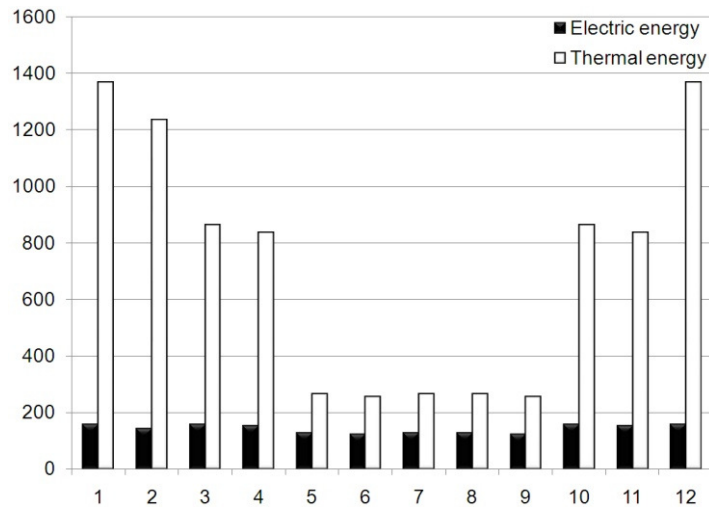
TES effectively permits to extend the time of solar contribution

Solar field cycle: 12 hours
 Charge cycle: 11 hours
 Discharge cycle: 8 hours

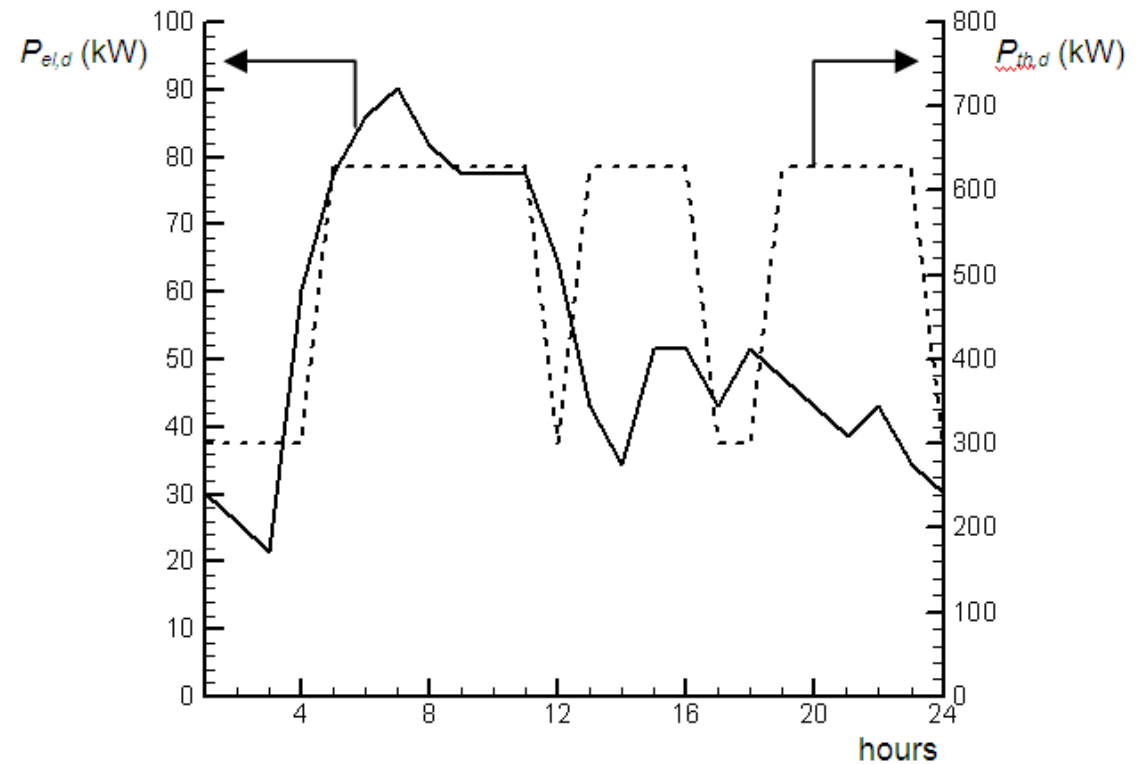
End users characteristics .

| | |
|--|--------|
| Number of sleeping accommodations | 375 |
| Volume m ³ | 43 000 |
| Heat load GJ/y | 8 670 |
| Electric load GJ/y | 1 670 |
| Heat/electric consumption ratio GJ _{th} /GJ _{el} | 5.21 |

Monthly electric and thermal load.



End user electric and thermal load for a typical winter day.



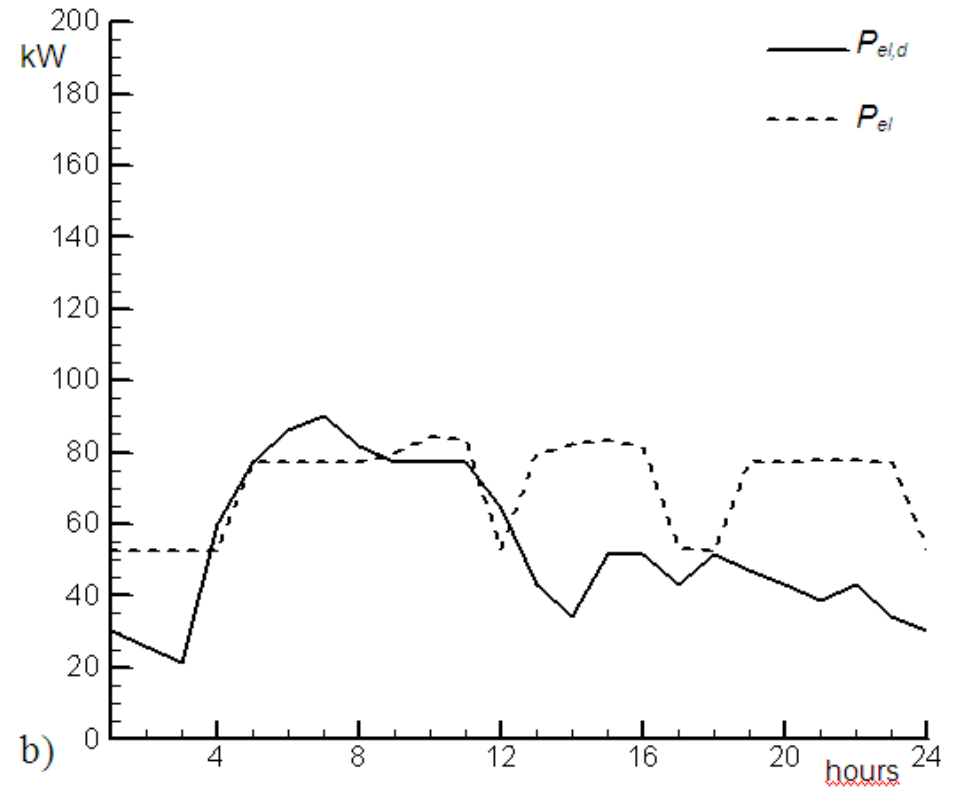
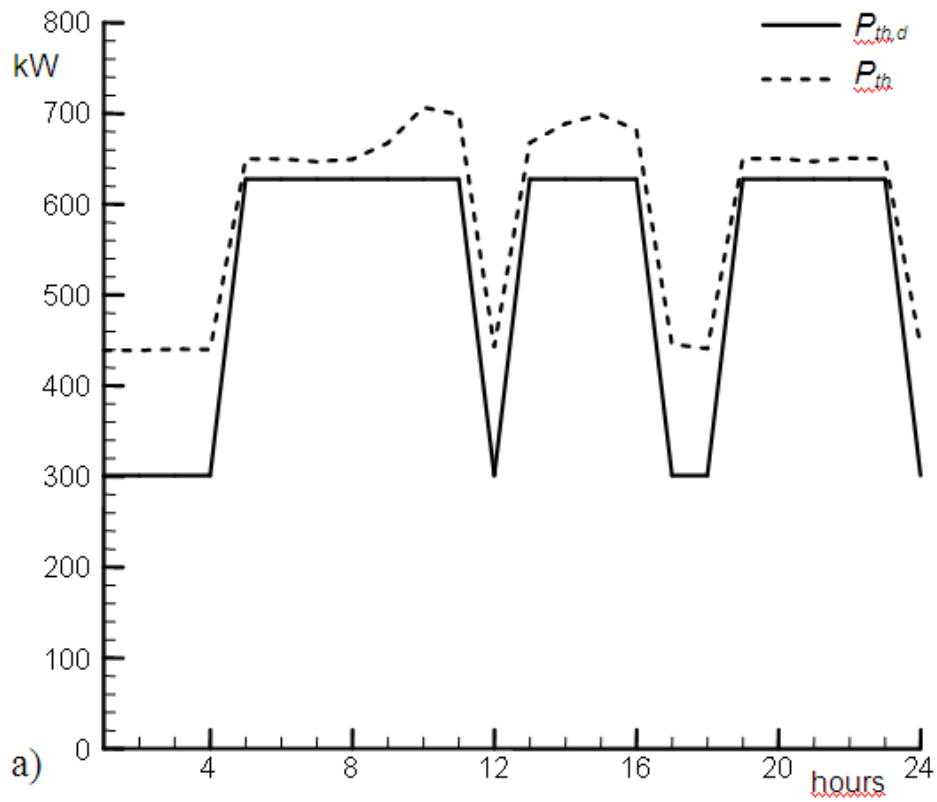


Figure 7. Thermal a) and electric b) behaviour with the thermal load tracking matching.

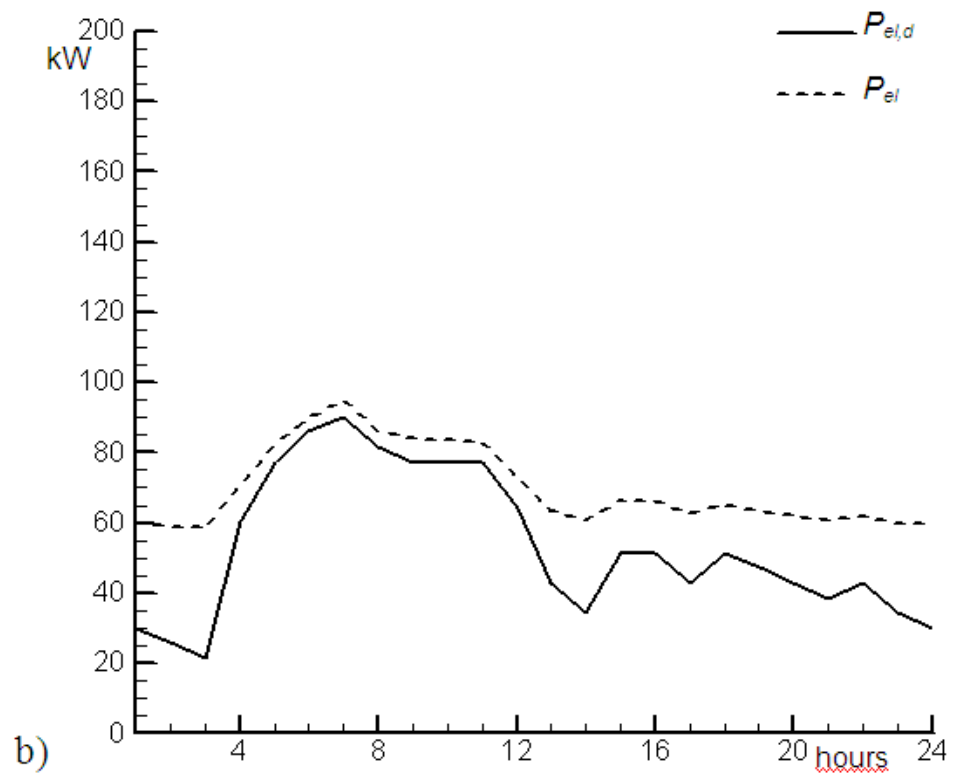
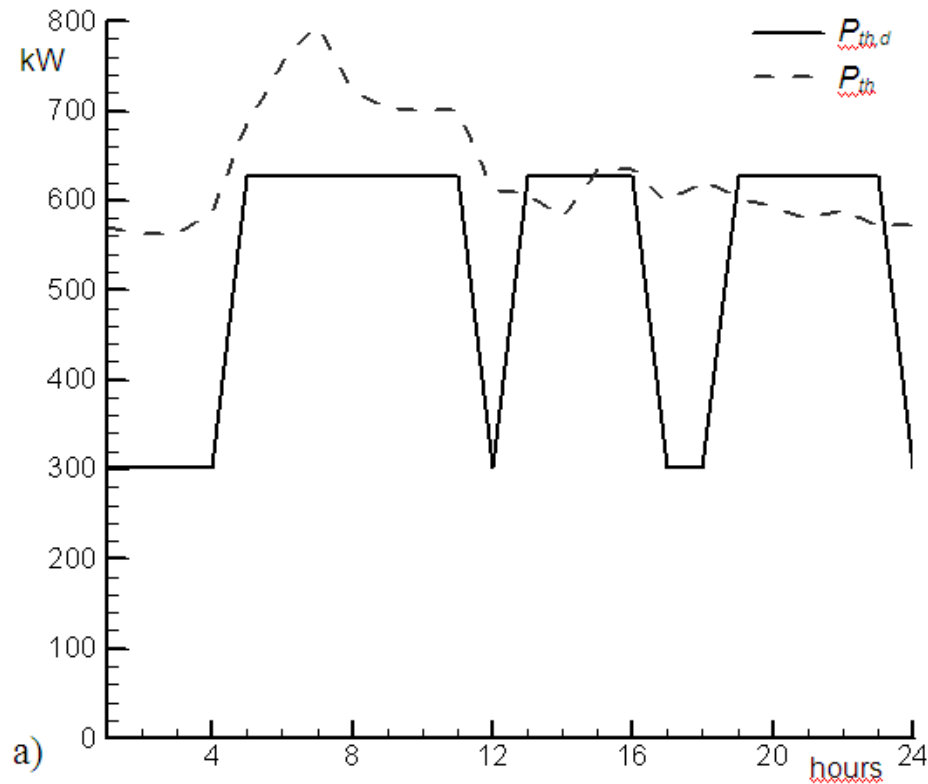


Figure 9. Thermal a) and electric b) behaviour with the electric load tracking matching.