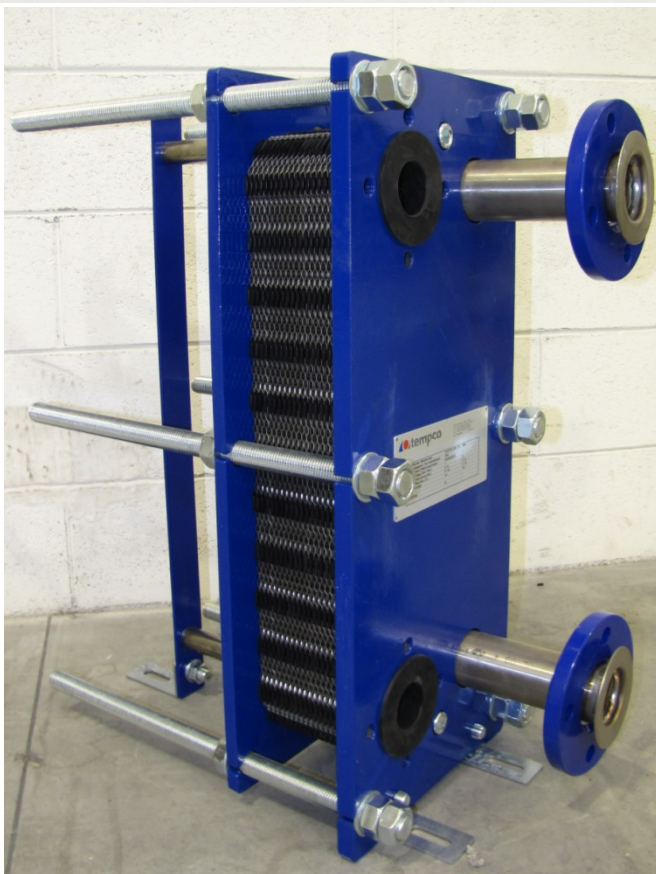
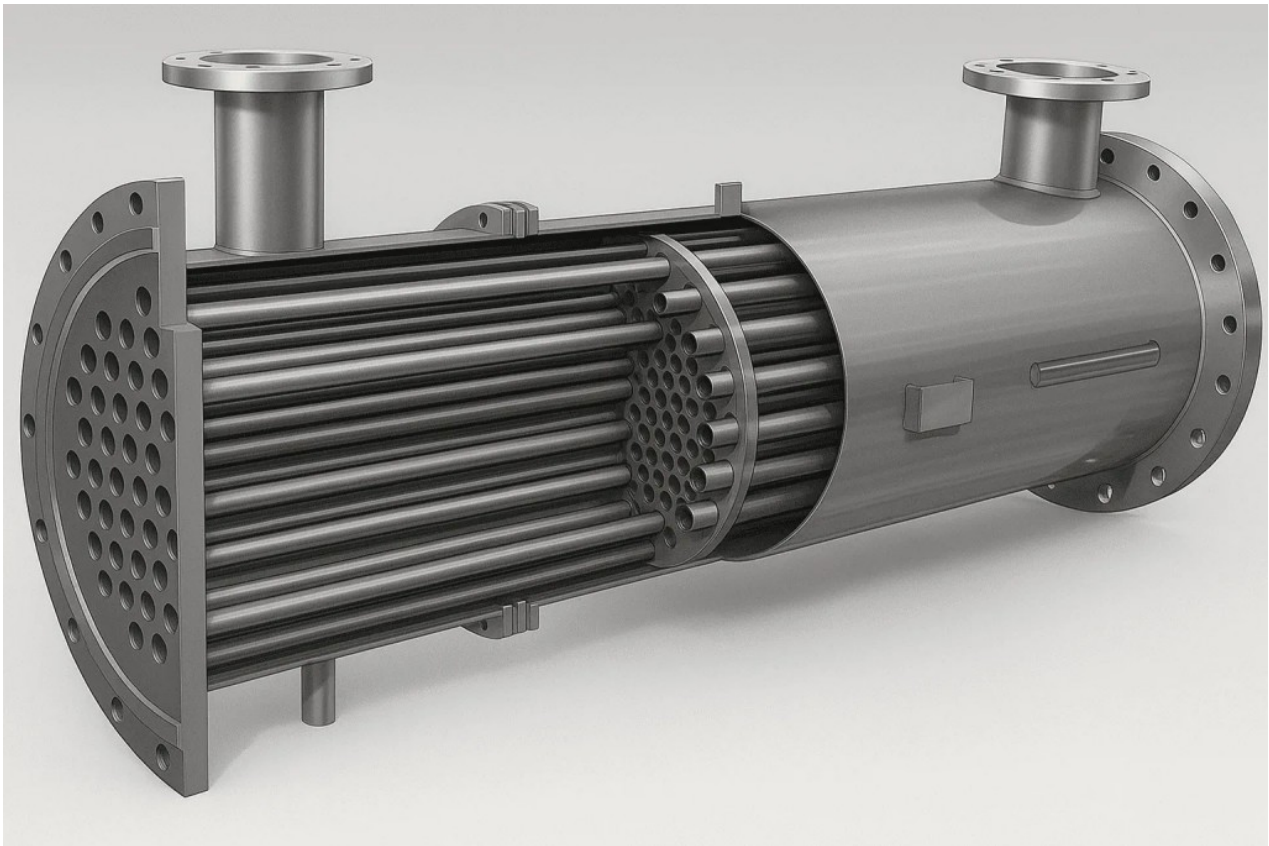
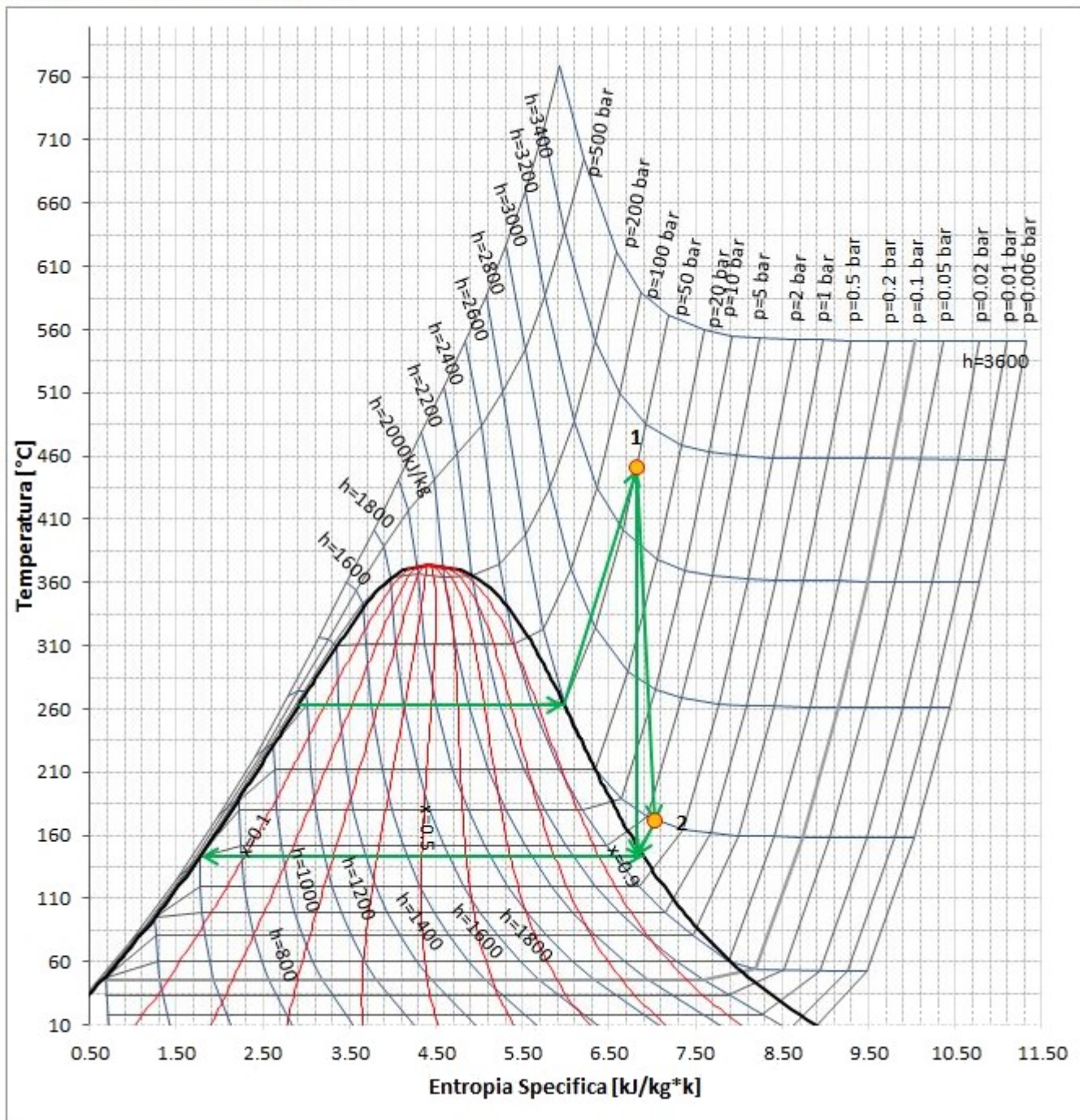


ESERCIZI IMPIANTI E SCAMBIATORI DI CALORE

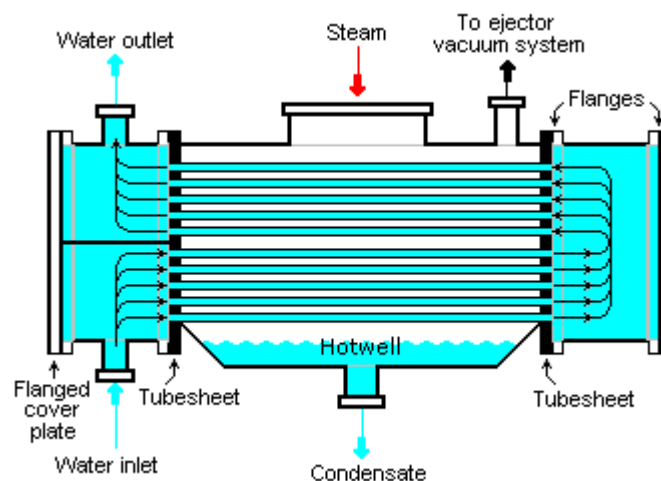


CICLO A VAPORE

Sono noti i dati di un ciclo a vapore ideale con surriscaldamento che ha una potenza utile di 500Mw.
Dimensionare il condensatore nell'ipotesi di utilizzare acqua di fiume a 15°C per il raffreddamento.

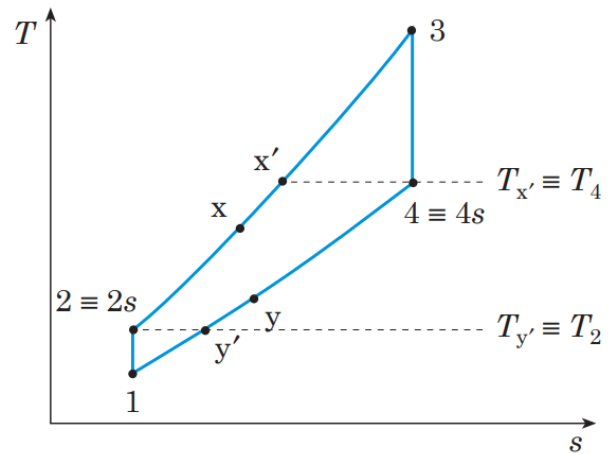
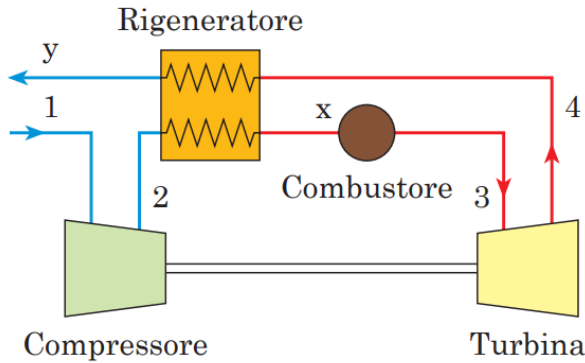


$p_1 =$	50	bar(a)
$t_1 =$	450	°C
$p_2 =$	4	bar(a)
$\eta_s =$	0.85	-



CICLO A GAS CON RIGENERAZIONE

Per aumentare il rendimento globale degli impianti motori con turbina a gas uno dei metodi più usati è la rigenerazione. Tramite uno scambiatore di calore si riscalda l'aria proveniente dal compressore sfruttando parte dell'energia termica posseduta dai gas combusti che verrebbe dispersa con i fumi nell'atmosfera. Con la rigenerazione si ha un non trascurabile risparmio nel consumo di combustibile.



La temperatura dei gas combusti, che, uscendo dalla turbina, attraversano il rigeneratore, scende da T_4 a T_y , rendendo possibile l'aumento di temperatura dell'aria, che esce dal compressore, da T_2 a T_x ; viene così ridotta la quantità di combustibile, iniettato nel combustore, per raggiungere la stessa temperatura T_3 .

L'efficacia del rigeneratore (regenerator effectiveness) ϵ (di solito compresa tra 0,75 e 0,85) è definita da:

$$\epsilon = \frac{T_x - T_2}{T_4 - T_2}$$

ESERCIZIO

L'aria entra nel compressore alla pressione atmosferica $p_1 \approx 0,1$ MPa e alla temperatura $T_1 = 300$ K.

Il rapporto tra le pressioni del ciclo è $\beta = p_2 \cdot p_1 = 6$, mentre la temperatura massima è $T_3 = 1200$ K.

Pressioni e temperature, rilevate nei vari punti del ciclo Brayton ideale senza rigenerazione (rendimento 0,4):

Punto	Pressione [MPa]	Temperatura [K]
1	0,1	300
2 ≡ 2s	0,6	500,8
3	0,6	1200
4 ≡ 4s	0,1	718,8

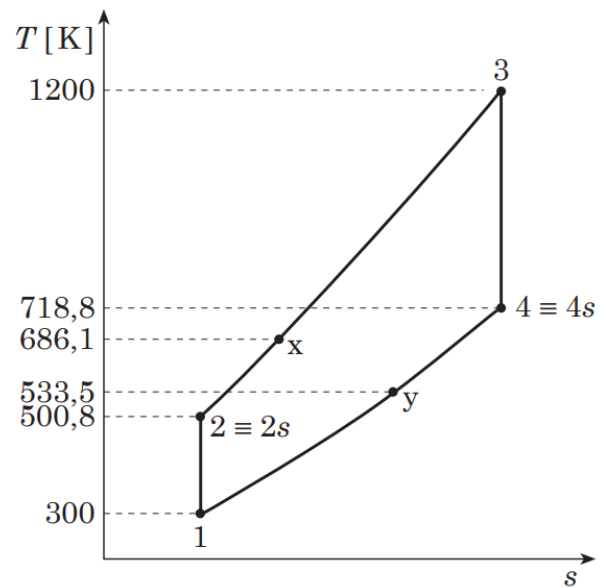
Il rigeneratore ha una efficacia $\epsilon = 0,85$,

$$\epsilon = \frac{T_x - T_2}{T_4 - T_2} \Rightarrow T_x - T_2 = \epsilon(T_4 - T_2) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T_x = \epsilon(T_4 - T_2) + T_2 = 0,85(718,8 \text{ K} - 500,8 \text{ K}) + 500,8 \text{ K} = 686,1 \text{ K}$$

$$q_H = c_p(T_3 - T_x) = 1,0035 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}(1200 \text{ K} - 686,1 \text{ K}) = 515,7 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta = \frac{w}{q_H} = \frac{281,4 \text{ kJ/kg}}{515,7 \text{ kJ/kg}} = 0,54$$



Dimensionare il rigeneratore con una portata gas di 35,54 kg/s.

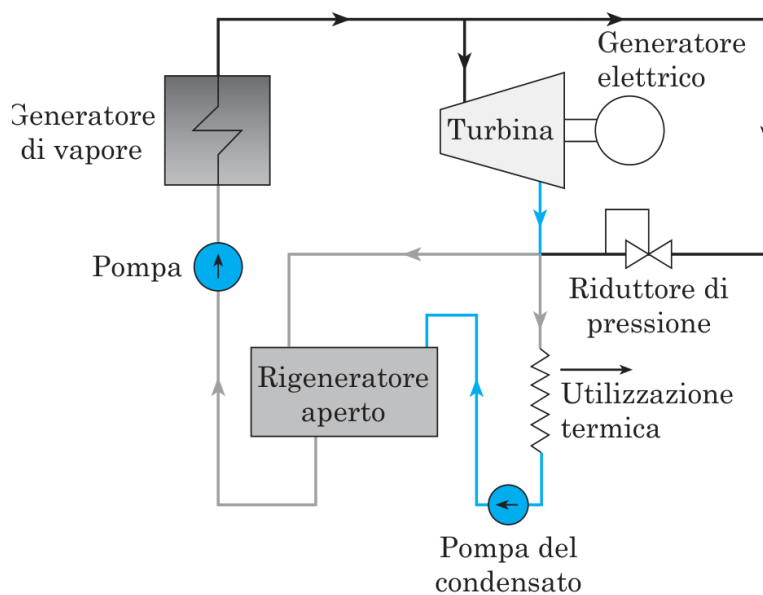
COGENERAZIONE CON TURBINA A CONTROPRESSIONE

Gli impianti di cogenerazione sono impianti destinati alla produzione di energia termica, sotto forma di vapore o di acqua compressa, da utilizzare nelle lavorazioni industriali o in centri di riscaldamento di grosse aree urbane (teleriscaldamento), con produzione congiunta (da qui il termine di cogenerazione) di energia elettrica quale risultato del lavoro prodotto dalla turbina.

In molte industrie (chimiche, tessilopure alimentari) che richiedono elevate quantità di vapore o in centri di riscaldamento conviene produrre vapore a temperature e pressioni più elevate, di quelle che sarebbero necessarie per l'utilizzazione termica, in modo da sfruttarne il lavoro di espansione in una turbine e ottenere così la produzione di energia elettrica che viene impiegata a coprire il fabbisogno dello stabilimento o dell'area urbana.

Il caso più semplice di cogenerazione è quando tutto il vapore prodotto viene fatto espandere nella turbine fino a raggiungere le condizioni richieste dall'utilizzazione termica. È proprio questa utilizzazione che assume la funzione di condensatore dell'impianto: la condensa, ove possibile, viene poi inviata nuovamente al generatore.

Questo tipo di impianto viene detto a recupero totale o anche a controcompressione, dal momento che la pressione di scarico della turbina, imposta dalle esigenze dell'utilizzazione termica, è, in genere, superiore o, al limite, uguale alla pressione atmosferica.



ESERCIZIO

Un impianto di cogenerazione è basato su un ciclo Rankine a controcompressione con i seguenti dati di progetto:

- Portata di vapore m : 5 kg/s
- Condizioni all'ingresso della turbina: $p_1 = 60$ bar, $T_1 = 450$ C
- Pressione di scarico (controcompressione): $p_2 = 3$ bar
- Rendimento isoentropico della turbine: 0.85
- Scambiatore di calore (Utenza):
Il vapore condensa completamente e ne esce come liquido saturo alla p_2 .
- Circuito secondario (Acqua calda):
L'acqua dell'utenza entra a $T_{in} = 60$ C e deve uscire a $T_{out} = 90$ °C
- Coefficiente di scambio termico globale U : 1800 W/m² K

Dimensionare la superficie di scambio A dello scambiatore di calore dell'utenza.

Risultati: $P_{el} = 2,91$ MW; $P_t = 10,8$ MW; $A = 105$ m²

1. TESTO DEL PROBLEMA

Un impianto di cogenerazione utilizza una turbina a vapore a contropressione per produrre energia elettrica e calore per un'utenza industriale. I dati di progetto sono i seguenti:

- Dati del Ciclo a Vapore:
- Portata di vapore (\dot{m}): 6,0 kg/s
- Condizioni ingresso turbina: Pressione $P_1 = 50$ bar, Temperatura $T_1 = 450$ °C
- Pressione di scarico (contropressione): $P_2 = 4$ bar
- Rendimento isoentropico della turbina (η_{iso}): 0,86
- Rendimento meccanico-elettrico (η_{me}): 0,96
- Dati dello Scambiatore dell'Utenza:
- Nello scambiatore il vapore condensa completamente, uscendo come liquido saturo a pressione P_2 .
- Circuito utenza (acqua calda): Temperatura ingresso $T_i = 70$ °C, Temperatura uscita $T_u = 95$ °C.
- Coefficiente di scambio termico globale (U): $2000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Richieste:

- Calcolare la potenza elettrica netta prodotta (P_{el}).
- Calcolare la potenza termica ceduta all'utenza (Q_{th}).
- Determinare la superficie di scambio (A) dello scambiatore di calore.

2. SOLUZIONE PASSO DOPO PASSO*FASE A: Analisi della Turbina e Potenza Elettrica*

Dalle tabelle del vapor d'acqua si ricavano le proprietà nei punti principali:

Stato 1 (Ingresso Turbina): Per $P_1 = 50$ bar e $T_1 = 450$ °C:

Entalpia $h_1 = 3316,2$ kJ/kg

Entropia $s_1 = 6,819$ kJ/(kg * K)

Stato 2s (Scarico Ideale a 4 bar): Per espansione isoentropica ($s_{2s} = s_1 = 6,819$ kJ/kgK) a $P_2 = 4$ bar:

$s_{liquido} = 1,776$ kJ/kgK

$s_{vapore} = 6,896$ kJ/kgK

Titolo $x_{2s} = (s_{2s} - s_{liquido}) / (s_{vapore} - s_{liquido}) = (6,819 - 1,776) / (6,896 - 1,776) = 0,985$

$h_{liquido} = 604,7$ kJ/kg

$h_{vapore} = 2738,6$ kJ/kg

$h_{2s} = h_{liquido} + x_{2s} * (h_{vapore} - h_{liquido}) = 604,7 + 0,985 * (2738,6 - 604,7) = 2701,5$ kJ/kg

Stato 2 reale (Scarico Reale):

Lavoro reale (L_{reale}) = $\eta_{iso} * (h_1 - h_{2s}) = 0,86 * (3316,2 - 2701,5) = 528,6$ kJ/kg

Entalpia reale $h_2 = h_1 - L_{reale} = 3316,2 - 528,6 = 2787,6$ kJ/kg (Nota: $h_2 > h_{vapore}$ a 4 bar, quindi allo scarico il vapore è leggermente surriscaldato)

Potenza Elettrica:

$P_{el} = \dot{m} * L_{reale} * \eta_{me}$

$P_{el} = 6,0 \text{ kg/s} * 528,6 \text{ kJ/kg} * 0,96 = 3044,8 \text{ kW} = 3,04 \text{ MW}$

FASE B: Potenza Termica Ceduta

Il vapore entra nello scambiatore a h_2 e ne esce come liquido saturo a 4 bar (Stato 3).

h_3 (liquido saturo a 4 bar) = $604,7$ kJ/kg

Temperatura di saturazione a 4 bar (T_{sat}) = $143,6$ °C

Potenza Termica (Qth):

$$Q_{th} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3)$$

$$Q_{th} = 6,0 \text{ kg/s} \cdot (2787,6 - 604,7) = 13097,4 \text{ kW} = 13,10 \text{ MW}$$

FASE C: Dimensionamento dello Scambiatore

Si utilizza il metodo della Differenza Media Logaritmica di Temperatura (DMLT).

Calcolo delle differenze di temperatura agli estremi: nello scambiatore il vapore condensa a $T_{sat} = 143,6 \text{ °C}$ (si trascura la fase di desurriscaldamento iniziale per semplicità nel dimensionamento di massima).

$$\Delta T_{max} \text{ (lato ingresso utenza)} = T_{sat} - T_i = 143,6 - 70 = 73,6 \text{ °C}$$

$$\Delta T_{min} \text{ (lato uscita utenza)} = T_{sat} - T_u = 143,6 - 95 = 48,6 \text{ °C}$$

Differenza Media Logaritmica (DMLT):

$$DMLT = (\Delta T_{max} - \Delta T_{min}) / \ln(\Delta T_{max} / \Delta T_{min})$$

$$DMLT = (73,6 - 48,6) / \ln(73,6 / 48,6) = 25 / \ln(1,514) = 25 / 0,415 = 60,24 \text{ °C}$$

Superficie di Scambio (A): Utilizzando la formula $Q_{th} = U \cdot A \cdot DMLT$ (attenzione: convertire Qth in Watt):

$$Q_{th} = 13.097.400 \text{ W}$$

$$A = Q_{th} / (U \cdot DMLT)$$

$$A = 13.097.400 / (2000 \cdot 60,24) = 13.097.400 / 120.480 = 108,7 \text{ m}^2$$

3. RIEPILOGO RISULTATI

Potenza Elettrica Prodotta: 3,04 MW

Potenza Termica Ceduta: 13,10 MW

Superficie dello Scambiatore: 108,7 m²

Rapporto Energia Termica/Elettrica: 4,3

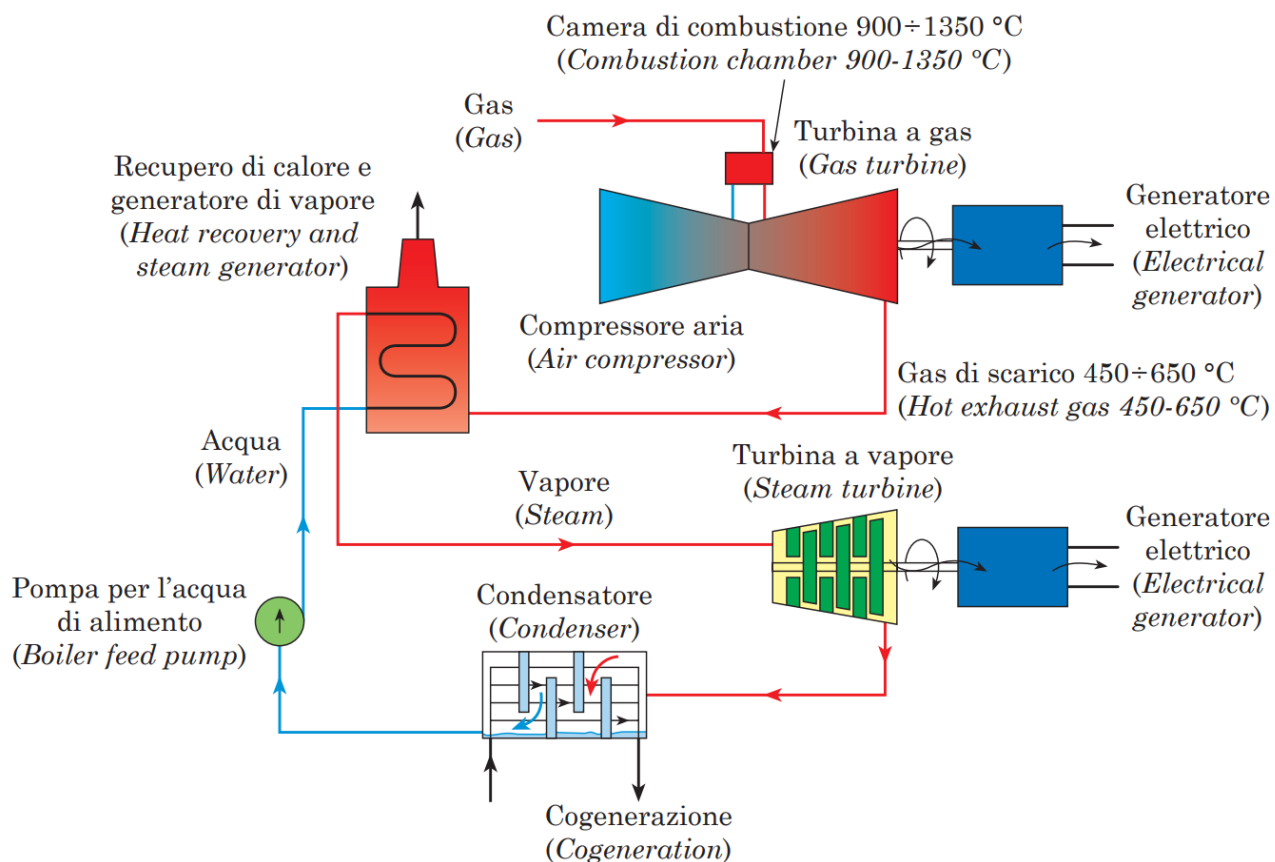
Commento Tecnico:

L'impianto mostra un elevato sfruttamento dell'energia primaria tipico dei sistemi a contropressione, dove tutto lo scarico della turbina viene utilizzato per scopi termici, eliminando le perdite al condensatore tipiche dei cicli a condensazione pura.

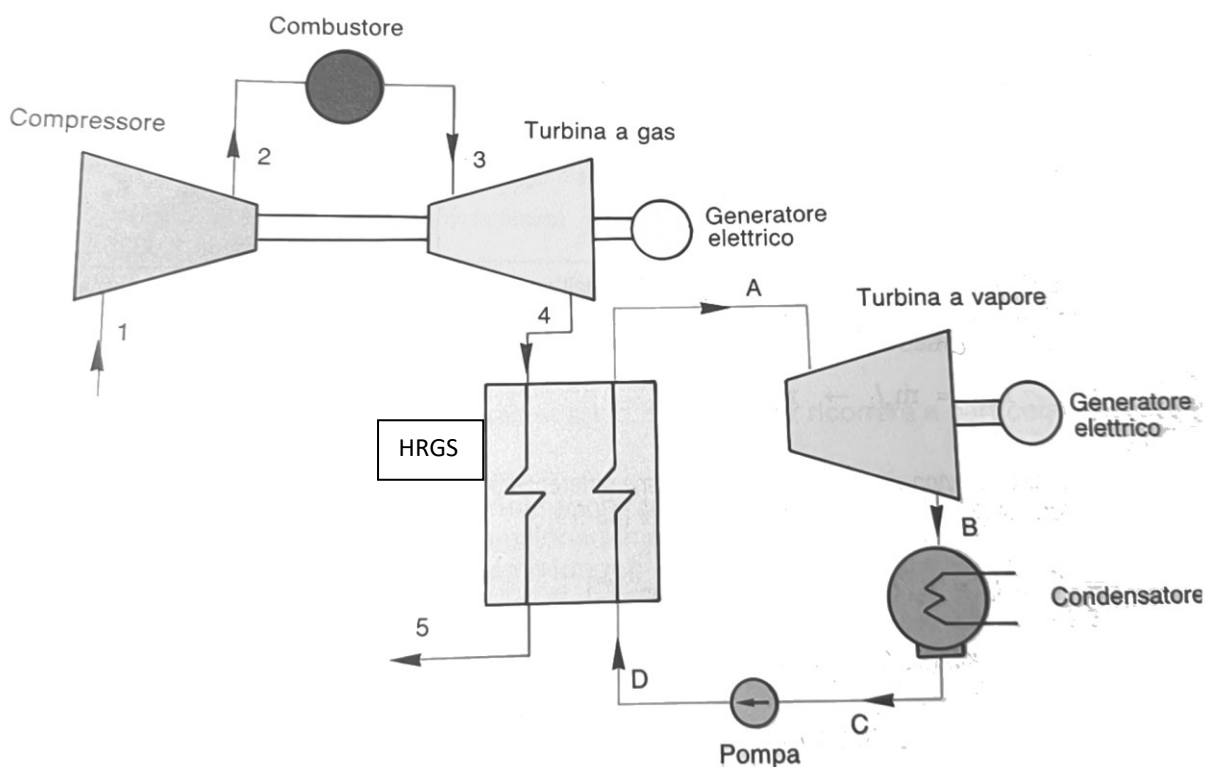
CICLO COMBINATO GAS - VAPORE

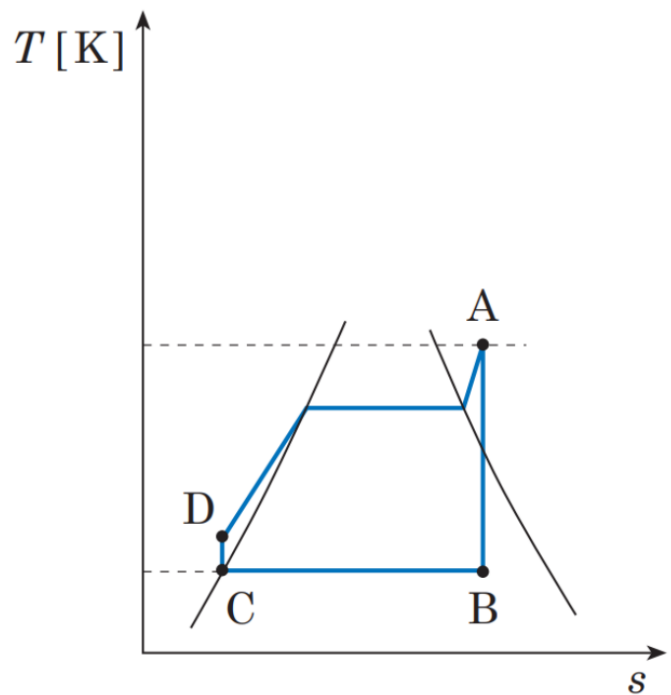
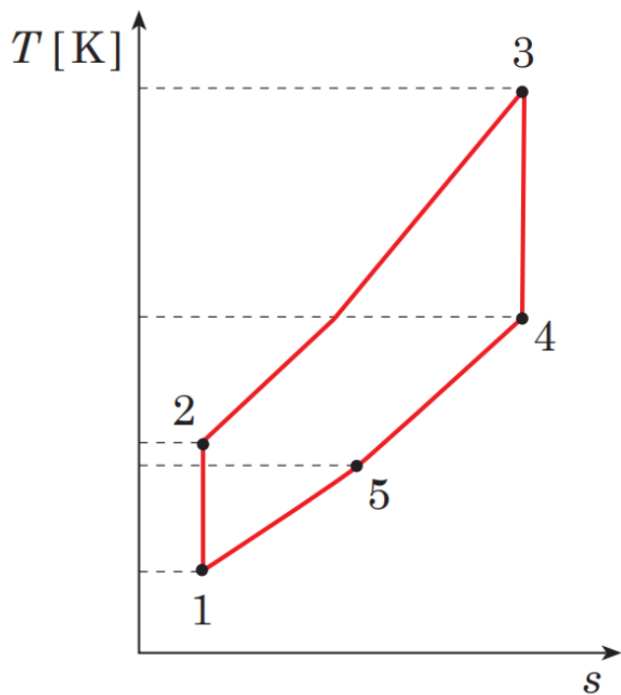
Un ciclo combinato è una delle tecnologie più efficienti per la produzione di energia elettrica, poiché recupera il calore residuo dei gas di scarico di una turbina a gas (Ciclo Brayton-Joule) per alimentare una turbina a vapore (Ciclo Rankine).

Il collegamento tra i due cicli avviene nel GVR (Generatore di Vapore a Recupero) o HRSG (Heat Recovery Steam Generator), che funge da scambiatore di calore.



Schema a blocchi





Ciclo Brayton (gas)

- 1 → 2 (compressione): salita verticale ($s \approx$ costante, h aumenta poco)
- 2 → 3 (combustione): forte aumento di entalpia (linea inclinata verso destra)
- 3 → 4 (espansione): espansione dei gas con produzione lavoro L_g
- 4 → 5 (recupero calore): cessione calore all'acqua del ciclo a vapore e scarico gas freddi in atmosfera

Ciclo Rankine (vapore)

- C → D (pompa): aumento di pressione quasi verticale (Δh piccolo → ΔT piccola)
- D → A (caldaia + surriscaldamento): aumento entalpia e produzione vapore surriscaldato
- A → B (turbina): espansione del vapore con produzione lavoro L_r
- B → C (condensatore): ritorno del vapore a liquido saturo

Rendimenti tipici cicli termodinamici

Impianto	Rendimento
Turbina a gas semplice	35–40%
Ciclo a vapore tradizionale	35–42%
Ciclo combinato	55–62%

ESEMPIO IMPIANTO DI ULTIMA GENERAZIONE

Un esempio eccellente di impianto a ciclo combinato (CCGT) in Italia è la centrale Edison di Porto Marghera (VE), inaugurata nel 2023 come una delle più efficienti al mondo.

Dati Tecnici del Ciclo e Potenza

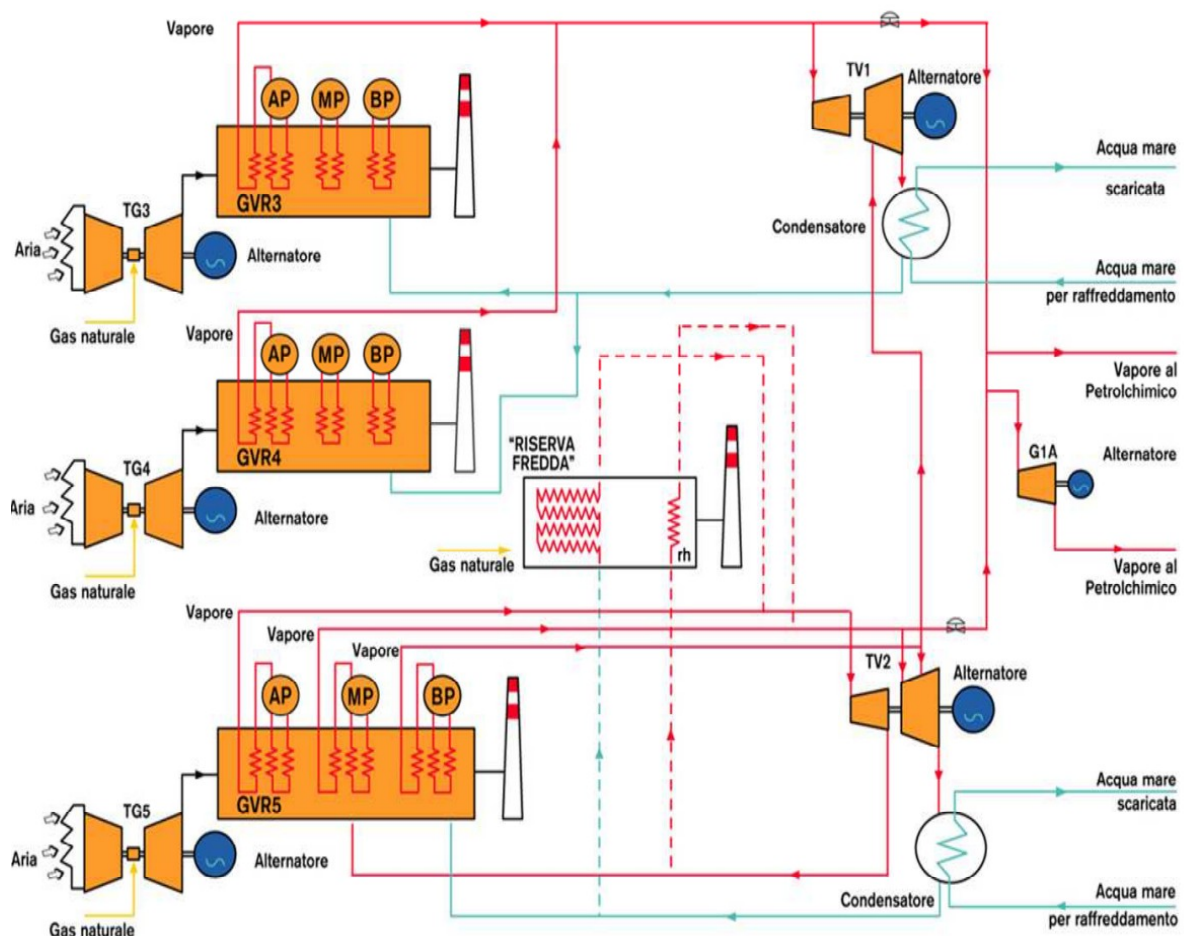
- Il nuovo impianto, spesso citato come esempio di "revamping" tecnologico, si basa su un ciclo combinato alimentato a gas naturale ad altissimo rendimento:
- Potenza Elettrica Installata: Circa 780 MW.
- Configurazione del Ciclo: L'impianto utilizza la tecnologia all'avanguardia di Ansaldo Energia (configurazione single-shaft), composta da:
 - Turbina a gas: Modello GT36 (Classe H) da 515 MW, ad alte prestazioni.
 - Generatore di vapore a recupero (GVR/HRSG): Utilizza il calore dei fumi di scarico della turbina a gas.
 - Turbina a vapore: Da 265 MW, alimentata dal vapore prodotto dal GVR.
 - Prontezza Idrogeno: La turbina GT36 è "hydrogen ready", tecnologicamente pronta a utilizzare miscele di gas naturale e idrogeno fino al 50% in volume.
 - Cogenerazione: L'impianto è progettato per la produzione combinata di energia elettrica e vapore tecnologico per le aziende del Petrochimico limitrofo.

Rendimenti ed Emissioni

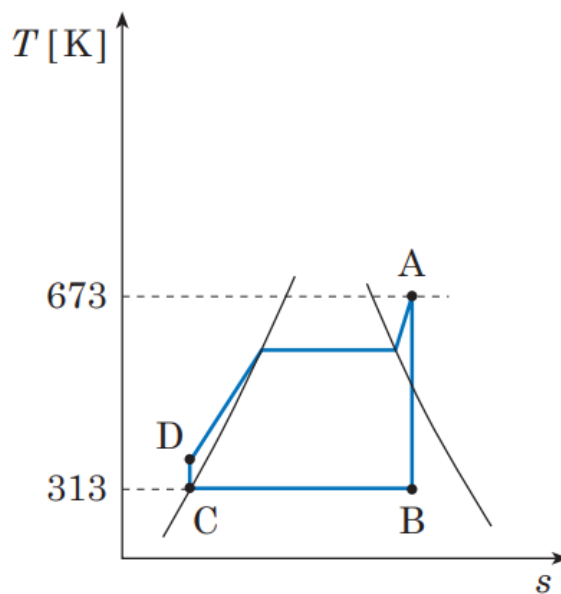
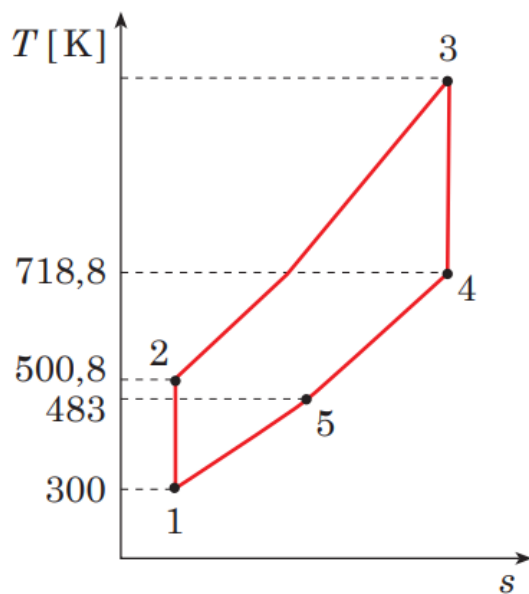
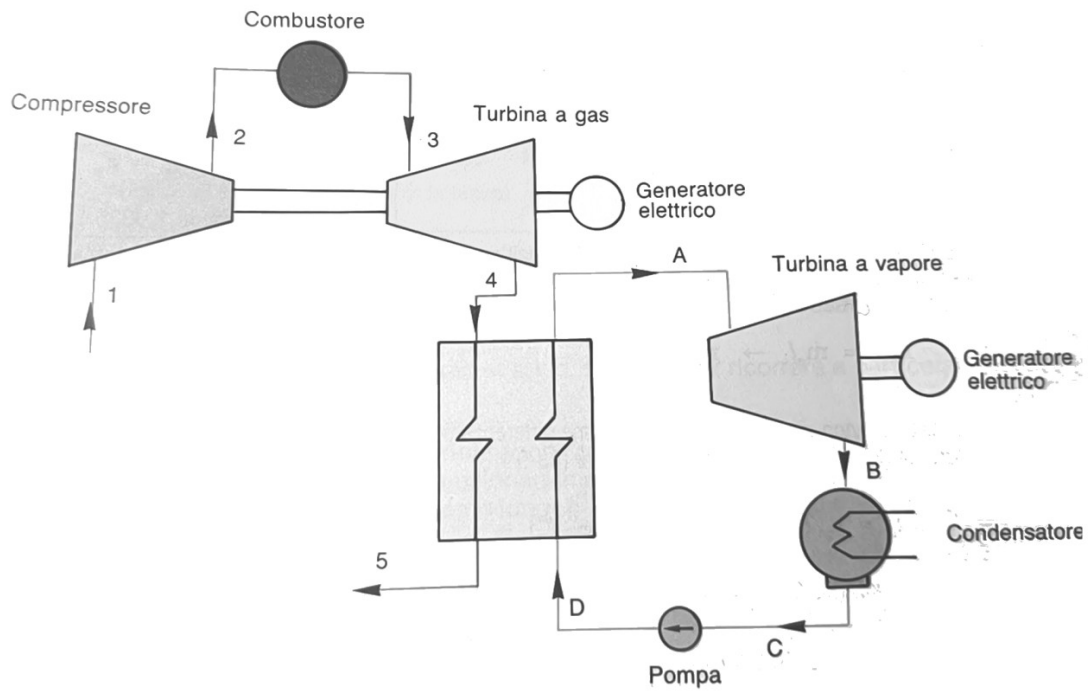
- Rendimento Energetico: L'impianto raggiunge un rendimento energetico del 63%, tra i più alti al mondo, il che significa una produzione maggiore a parità di combustibile consumato.
- Riduzione Emissioni: Rispetto alla media dell'attuale parco termoelettrico italiano, la centrale riduce le emissioni specifiche di anidride carbonica (CO₂) fino al 30-40% e quelle di ossidi di azoto (NO_x) di oltre il 70%.

Contesto Operativo

- Capacità di Risposta: Grazie alla tecnologia Classe H, la centrale è in grado di fornire energia con grande flessibilità, capace di gestire picchi di richiesta per circa 2 milioni di famiglie con soli 4 minuti di preavviso.



ESERCIZIO CICLO COMBINATO



Stati	1	2	3	4	5	A	B	C	D
p [kPa]	100	600	600	100	100	2500	7,5	7,5	2500,0
T [°C]	27	228	927	446	210	400	40,3	40,3	–
T [K]	300	500,8	1200	718,8	483	673	313	313	–
h [kJ/kg]	–	–	–	–	–	3239,3	2190	168,8	168,8

ESERCIZIO

Note $m_{vap}=2,7$ kg/s e $m_{gas}=35,54$ kg/s dimensionare:

- Scambiatore a recupero in controcorrente
- Condensatore a fascio tubiero del ciclo a vapore