

Ciclo motore
irreversibile

$$\eta_{II} = 0,5 \quad \dot{W} = ?$$

RENDIMENTO di II° Principio

REND. DELLA MACCHINA REALE

DEF. GENERALE DEL
RENDIMENTO

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{REALE}}{\dot{W}_{REVERSIBILE}} = \frac{\dot{Q}_S \eta_{I,REALE}}{\dot{Q}_S \eta_{I,REV}} = \frac{\eta_{I,REALE}}{\eta_{I,REV}} \quad * \quad \eta_{II} = \frac{W}{Q_S} \quad n^*$$

REND. DELLA MACCHINA REVERSIBILE

$$\eta_{I,REV} = 1 - \frac{T_i}{T_s} = 1 - \frac{20 + 273,15}{1200 + 273,15} = 0,80$$

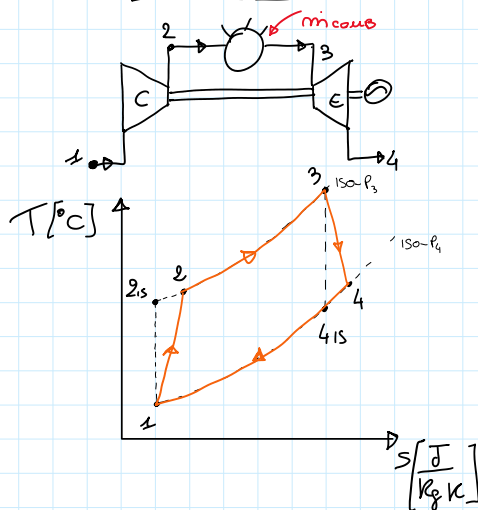
RENDIMENTO DEL CICLO REVERSIBILE

↓ T in [K] !!!

RENDIMENTO DEL CICLO REVERSIBILE
(DIPENDE TRA LE SORGENTI T_i E T_s)
↓
 η_{CARNOT}

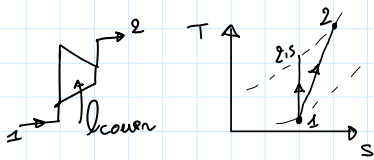
$$\eta_{I,REALE} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_{in}} = \eta_{I,REV} \cdot \eta_{II} = 0,4 \implies \dot{W} = \dot{Q}_{in} \cdot \eta_{I,REALE} = 40 \text{ kW}$$

* TURBINA A GAS * → Ciclo JB APERTO

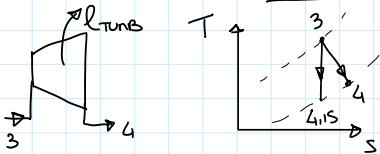


* DATI *

$\beta_{\text{comp}} = 6$ FLUIDO LAVORO ARIA (GAS IDEALE BISTOMICO $M = 28 \text{ kg/kmol}$)
 (TRASCURARE VARIE COMPOSIZIONE E MISCELAZIONE)
 $T_1 = 280 \text{ K}; T_3 = 1250 \text{ K}$ $2 \rightarrow 3$ (ISO-P); $4 \rightarrow 1$ (ISO-P)
 $\gamma_{\text{is, comp}} = 0,9$; $\gamma_{\text{is, exp}} = 0,92$ $T_2 = ?$ $T_4 = ?$ $\frac{l_{\text{EXP}}}{l_{\text{comp}}} = ?$ $\eta = ?$

① TEUR. REALE DI FINE COMPRESSIONE T_2 

$\frac{T_{2,15}}{T_1} = \beta_{\text{comp}} = 280 \cdot 6 = 467,4 \text{ K}$ $\gamma = \frac{\gamma-1}{\gamma} = \frac{7/2}{5/2} = \frac{7}{5}$ (GAS IDEALE BISTOMICO)
 $\eta_{\text{is, comp}} = \frac{\Delta h_{\text{is}}}{\Delta h_{\text{reale}}} = \frac{c_p(T_{2,15} - T_1)}{c_p(T_2 - T_1)} \Rightarrow T_2 = T_1 + \frac{(T_{2,15} - T_1)}{\eta_{\text{is, comp}}} = 488 \text{ K}$
 definizione generale \downarrow TEURISTICA REALE DI FINE COMPRESSIONE
 \times GAS PERFETTO

② TEUR. REALE DI FINE ESPANSIONE T_4 

$\frac{T_3}{T_{4,15}} = \beta_{\text{exp}} \Rightarrow T_{4,15} = T_3 \beta_{\text{exp}}^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}} = 749 \text{ K}$ ($\beta_{\text{comp}} = \beta_{\text{exp}}$)
 $\eta_{\text{is, turb}} = \frac{\Delta h_{\text{reale}}}{\Delta h_{\text{is}}} = \frac{c_p(T_3 - T_4)}{c_p(T_3 - T_{4,15})} \Rightarrow T_4 = T_3 - \eta_{\text{is, turb}}(T_3 - T_{4,15}) = 789 \text{ K}$

③ RAPPORTO TRA LAVORO ESPANSIONE E LAVORO COMPRESSIONE

$|l_c| = c_p(T_2 - T_1) = \frac{7}{2} R^* (T_2 - T_1) = 209,4 \text{ kJ/kg}$
 $|l_T| = c_p(T_3 - T_4) = \frac{7}{2} R^* (T_3 - T_4) = 464,2 \text{ kJ/kg}$
 $\frac{|l_T|}{|l_c|} = 2,217$
 $R^* = \frac{R}{M_{\text{aria}}} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right]$

④ RENDIMENTO CICLO

$\eta_I = \frac{l_{\text{NETTO}}}{q_{\text{in}}} = \frac{|l_T| - |l_c|}{c_p(T_3 - T_2)} = 33,21\%$

* Compressione Iso-S * \rightarrow Come T, P but $m = \gamma$

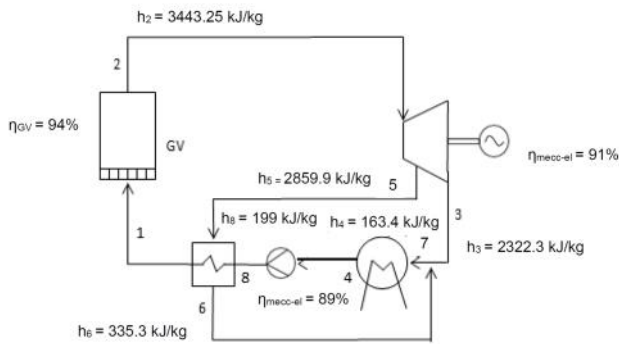
$$1 \rightarrow 2_{is} \quad \Delta S_{1 \rightarrow 2_{is}} = 0 = c_p \ln \frac{T_{2is}}{T_1} - R^* \ln \frac{P_2}{P_1}$$
$$\Downarrow$$
$$\frac{T_{2is}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{R^*}{c_p}} = \beta_{comp}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \beta^{\theta}$$

x Expansione Iso-S (Procedimento Analogo)

$$\frac{T_3}{T_{4is}} = \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{R^*}{c_p}} = \beta_{exp}^{\theta}$$

* CICLO RANKINE RIGENERATIVO *

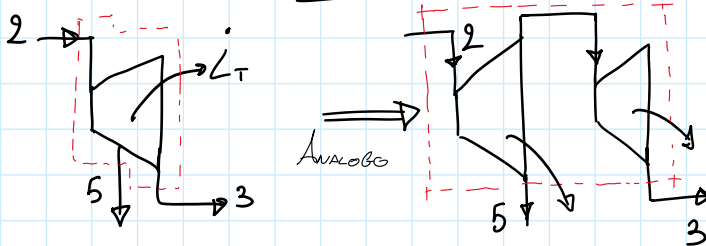
→ RIGENERAZIONE A SUPERFICIE



- POTENZA ELETTRICA PRODOTTA DALLA TURBINA $L_{EL,T} = ?$
- " " ASSORBITA DALLA POMPA $L_{EL,P} = ?$
- POTENZA TERMICA SCAMBIATA NEL RIGENERATORE $\dot{Q}_{RIG} = ?$
- RENDIMENTO ELETTRICO NETTO DELLA CENTRALE $\eta_{EL,NET} = ?$

① * BILANCIO SULLA TURBINA A VAPORE *

→ ATTENZIONE ALLO SPIUNTO RIGENERATIVO



* BILANCIO MASSA *

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_5 + \dot{m}_3 \Rightarrow \dot{m}_3 = \frac{45 \text{ kg}}{\text{s}} - \frac{5 \text{ kg}}{\text{s}} = \frac{40 \text{ kg}}{\text{s}}$$

* BILANCIO ENERGIA *

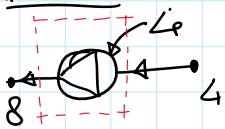
$$\dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_3 h_3 + \dot{L}_T \Rightarrow \dot{L}_T = 47755 \text{ kW}$$

DATO (VEDI SCHEMA IMPIANTO)

$$\dot{L}_{T,EL} = \dot{L}_T \cdot \eta_{MECC,EL} = 43457 \text{ kW}_{el}$$

→ DATO

② * POMPA *



$$\dot{m}_4 = \dot{m}_8 = \dot{m}_1 = 50 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_4 h_4 + \dot{L}_P = \dot{m}_8 h_8 \Rightarrow \dot{L}_P = \dot{m}_4 (h_8 - h_4) = 1602 \text{ kW}_{el}$$

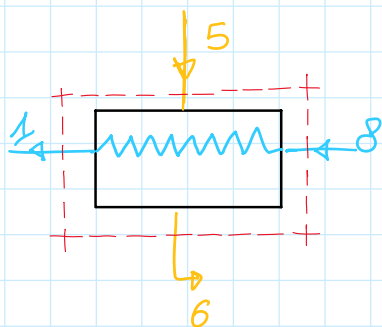
DATO (VEDI SCHEMA IMPIANTO)

$$\dot{L}_{EL,P} = \frac{\dot{L}_P}{\eta_{MECC-EL}} = 1880 \text{ kW}_{el}$$

③ * RIGENERAZIONE A SUPERFICIE *



$$\left. \begin{array}{l} \dot{m}_5 = \dot{m}_6 \\ \dot{m}_7 = \dot{m}_1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \times \text{RIG. A SUPERFICIE LA PORTATA DI VAPORE SRIUTA (5)} \\ \text{MA SI MISCELA CON L'ACQUA DI ALIMENTAZIONE (1)} \end{array}$$



$$\begin{cases} \dot{m}_5 = \dot{m}_6 \\ \dot{m}_8 = \dot{m}_1 \end{cases} \left\{ \begin{array}{l} \times \text{ Rig. a Superficie la Potenza di Vapore Satura (5)} \\ \text{Non si miscela con l'acqua di Alimentazione (8)} \end{array} \right.$$

$$\dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_1 h_1 \rightarrow \text{Bilancio di Energia}$$

$$\dot{m}_5 (h_5 - h_6) = \dot{m}_8 (h_1 - h_8)$$

\dot{Q}_{rig} \dot{Q}_{rig}

LA POTENZA TERMICA CEDUTA DAL VAPORE È UGUALE ALLA POT. TERMICA ASSORBITA DALL'ACQUA DI ALIMENTAZIONE

$$\dot{Q}_{rig} = \dot{m}_5 (h_5 - h_6) = 12623 \text{ kW}_t$$

④ *RENDIMENTO NETTO IURIZIATO*

$$\eta_{EL, NETTO} = \frac{L_{NETTO}}{\text{SPESA ENERGETICA}} = \frac{(\dot{L}_{EL, T} - \dot{L}_{EL, R} - \dot{L}_{AUX}) \cdot \eta_{TRASF}}{\frac{\dot{Q}_{IN}}{\eta_{GV}}}$$

dato 400 kW_e

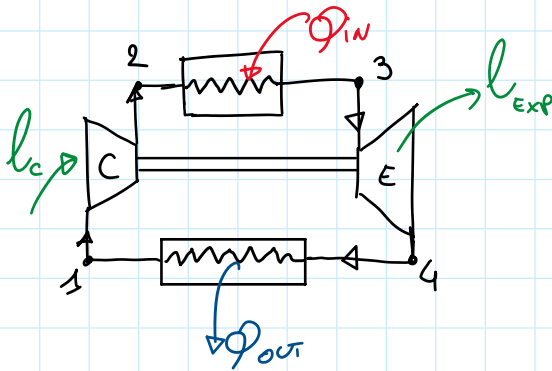
TRASFORMAZIONE INTERFACCIA L'INIZIATO CON LA RETE ELETTRICA

↳ 0,94 (NO. NON TUTTA LA POTENZA TERMICA LIBERATA DALLA COMBUSTIONE VIENE TRASFERITA AL FLUIDO DI LAVORO)
RENDITE TERMICHE

$$\dot{Q}_{IN} = \dot{m}_1 (h_2 - h_1) = 133368 \text{ kW}_t$$

$$h_1 = h_8 + \frac{\dot{Q}_{rig}}{\dot{m}_1} = 479,51 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \quad (\text{vedi Bilancio RIGENERAZIONE})$$

$$\eta_{EL, NETTO} \approx 0,29$$

* Ciclo JB CHIUSO ** DATI *

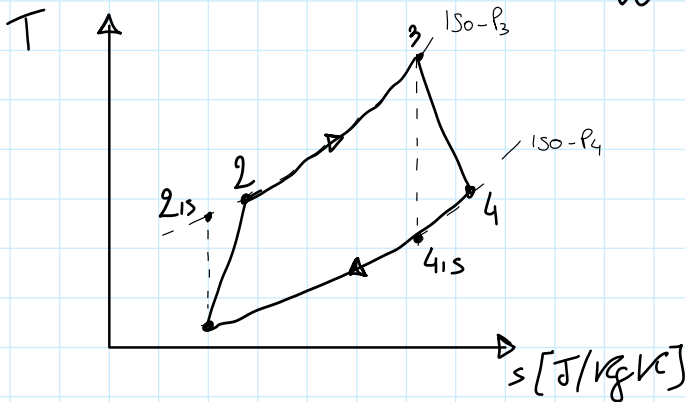
FLUIDO LAVORO \rightarrow He (GAS PERFETTO MONOATOMICO)
 $MM_{He} = 4 \text{ kg/kmol}$

$$T_1 = 45^\circ\text{C}; P_1 = 40 \text{ bar}; T_3 = 1000^\circ\text{C}; P_3 = 100 \text{ bar}$$

$$\dot{m}_{He} = 50 \text{ kg/s} \quad \eta_{IS,COMP} = \eta_{IS,EXP} = 0,85$$

$$T_2 = ? \quad T_4 = ? \quad \dot{W}_{COMP} = ? \quad \dot{W}_{EXP} = ? \quad \dot{Q}_{IN} = ?$$

$$\dot{W}_{NET} = ? \quad \eta = ?$$



He \rightarrow GAS PERFETTO MONOATOMICO

$$\gamma = \frac{5}{3} \quad \gamma - 1 = \frac{5/3 - 1}{5/3} = \frac{2}{5}$$

① $1 \rightarrow 2_{1s}$ (ISO-s) $T_{2,1s} = T_1 \quad P_{COMP} = 458,8 \text{ K} \quad (185,8^\circ\text{C})$

$$\eta_{IS,COMP} = \frac{h_{2,1s} - h_1}{h_2 - h_1} \Rightarrow \frac{c_p(T_{2,1s} - T_1)}{c_p(T_2 - T_1)} \Rightarrow T_2 = T_1 + \frac{T_{2,1s} - T_1}{\eta_{IS,COMP}} = 210,65^\circ\text{C}$$

$$\dot{W}_{COMP} = \dot{m} l_{COMP} = \dot{m} c_p (T_2 - T_1) = 43038 \text{ kW}$$

$$\frac{5}{2} R^* = \frac{5}{2} \frac{R}{MM} = 5196,25 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

② $3 \rightarrow 4_{1s}$ (ISO-s) $T_{4,1s} = T_3 \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\gamma} = 609,4^\circ\text{C}$

$$\eta_{IS,EXP} = \frac{\Delta h_{REALE}}{\Delta h_{IS}} = \frac{c_p(T_3 - T_4)}{c_p(T_3 - T_{4,1s})} \Rightarrow T_4 = 668^\circ\text{C}$$

$$\dot{W}_{EXP} = \dot{m} l_{EXP} = \dot{m} c_p (T_3 - T_4) = 86257 \text{ kW}$$

③ POTENZA TERMICA IN INGRESSO

$$\dot{Q}_{IN} = \dot{m} c_p (T_3 - T_2) = 205083 \text{ kW}$$

\downarrow \downarrow T_{REALE} ALL'USCITA DEL COMPRESSORE

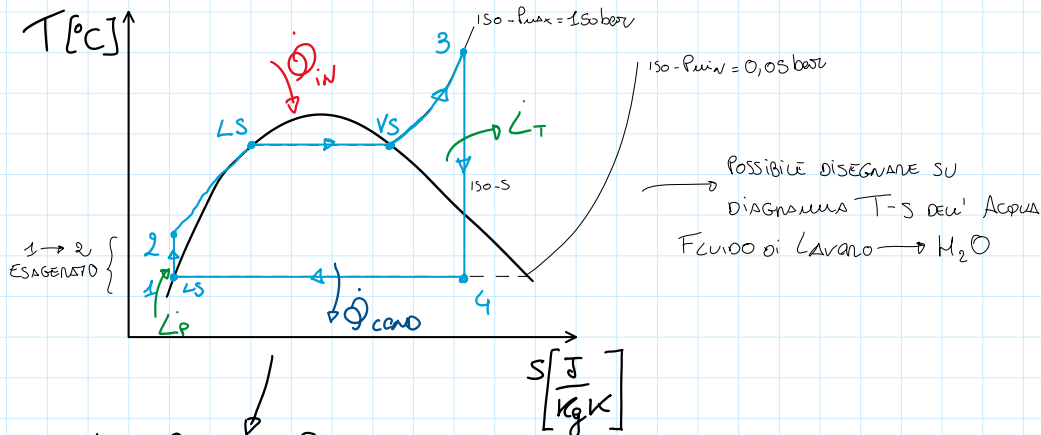
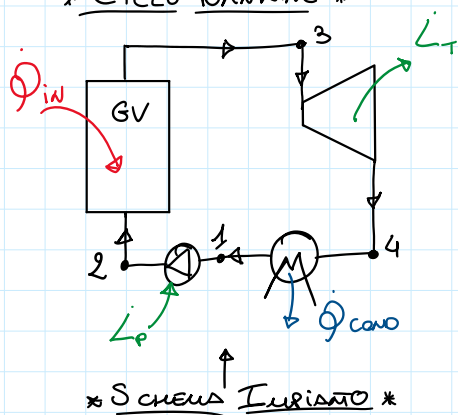
$$\dot{Q}_{in} = m \dot{q} (13 - 12) = 205083 \text{ W}$$

\swarrow \searrow
 data 1000°C T_{IDEALE} ALL'USCITA DEL COMPRESSORE

④ POTENZA NETTA $\dot{W}_{\text{NET}} = \dot{W}_{\text{EXP}} - \dot{W}_{\text{COMP}} = 43219 \text{ kW}$

⑤ $\eta = \frac{\dot{W}_{\text{NET}}}{\dot{Q}_{in}} = 21,07\%$ (SE IL CICLO FOSSE IDEALE $\eta_{\text{JB, ID}} = 1 - \beta^{-\gamma} = 0,3069$)

* CICLO RANKINE *



Ciclo Rankine Sottosaturato

$$T_{max} = T_3 = 600^\circ\text{C} > T_{SAT}(P_{max} = 150 \text{ bar}) = 342,13^\circ\text{C}$$

* DATI *

$$\dot{L}_{NET} = 600 \text{ MW} \quad (\text{Potenza Netta Turbina}) \quad \text{Fluido Lavoro} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$$

$$h_2 = 160 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Entalpia alla mandata della Pompa}) \quad P_{max} = 150 \text{ bar} \quad T_{max} = 600^\circ\text{C}$$

$$1 \rightarrow 2 \text{ (ISO-S)}; \quad 2 \rightarrow 3 \text{ (ISO-P)}; \quad 3 \rightarrow 4 \text{ (ISO-S)}; \quad 4 \rightarrow 1 \text{ (ISO-P)}$$

$$\eta_{NET} = ? \quad \dot{m} = ?$$

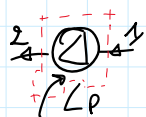
$$\dot{L}_{NET} = \dot{L}_T - \dot{L}_P \quad (\text{Potenza Prodotta dal Ciclo Rankine}) = 600 \text{ MW}$$

$$\begin{matrix} \text{Potenza} \\ \text{Espansione} \end{matrix} \quad 3 \rightarrow 4 \quad \begin{matrix} \text{Potenza} \\ \text{Pompa} \end{matrix} \quad 1 \rightarrow 2$$

$$\dot{L}_{NET} = \dot{m} (l_T - l_P)$$

$$\begin{matrix} \text{Potenza} \\ \text{H}_2\text{O} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \text{Lavoro Specifico Pompa} \\ \text{Lavoro Specifico Turbina} \end{matrix}$$

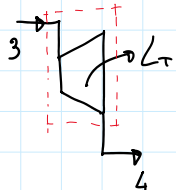
* Pompa *



$$L_P = h_2 - h_1 = 22,23 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{1s} = h_1(P = P_{min} = 0,05 \text{ bar}) = 137,77 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{Tabelle})$$

* Turbina *



$$|L_T| = h_3 - h_4 \rightarrow \text{Bilancio Energetico}$$

$$h_3(P = P_3 = 150 \text{ bar}; T = T_3 = 600^\circ\text{C}) = 3590 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{diagramma T-s H}_2\text{O})$$

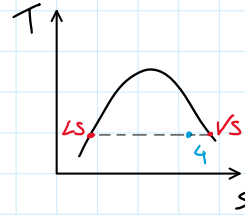
$$s_3 \approx 6,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$s_3 \approx 6,7 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{kgK}} \right]$$

$$h_4? \quad 3 \rightarrow 4 \text{ (iso-s)} \quad s_3 = s_4 = 6,7 \text{ KJ/kgK} \quad (4 \rightarrow \text{MISCELA BIFASE } 0 < x_4 < 1)$$

$$x_4 = \frac{s_4 - s_{LS}}{s_{VS} - s_{LS}} = 0,78585$$

$$8,39596 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \quad (\text{TABELLE}) \quad \rightarrow \quad 0,47626 \frac{\text{KJ}}{\text{kgK}}$$



$$h_4 = x_4 h_{VS}(P_4) + (1-x_4) h_{LS}(P_4) = 2042,54 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

\downarrow $2561,59 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$ \downarrow $137,772 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$ (TABELLE VAPORI SATURATI)

$$|l_{T1}| = h_3 - h_4 = 1547,46 \text{ KJ/kg}$$

$$m = \frac{\dot{L}_{NET}}{|l_{T1} - l_r|} = 333,4 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (\text{PORTATA CIRCOLANTE di } H_2O)$$

* RENDIMENTO NETTO CICLO *

$$\eta_{NET} = \frac{\dot{L}_{NET}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{600 \text{ MW}}{1349 \text{ MW}} = 44,5\%$$

\rightarrow POTENZA TERMICA ENTRANTE $m(h_3 - h_2)$
GENERATORE DI VAPORE