



POLITECNICO
MILANO 1863

Esercitazione 06 - Cicli a gas

Esercizio 02 ([link registrazione](#))

Corso di Fisica Tecnica
a.a. 2019-2020

Prof. Gaël R. Guédon
Dipartimento di Energia, Politecnico di Milano

6.2. [intermedio] Per la realizzazione di un sistema di conversione termoelettrica si utilizza una soluzione con impianto a ciclo Joule-Brayton. Le sorgenti di temperatura della macchina termodinamica motrice sono a $T_C = 1150$ K e $T_F = 300$ K. Come fluido di lavoro viene utilizzato un gas ideale biatomico con $M_m = 29$ kg/kmol. La temperatura e la pressione minima del ciclo sono rispettivamente $T_1 = T_F$ e $P_1 = 101$ kPa mentre la temperatura massima è $T_3 = T_C$ e il rapporto di compressione r_p del ciclo è pari a 5. Determinare:

- ✕ ▪ Il rendimento massimo teorico della macchina termodinamica motrice.
- ✕ ▪ Il rendimento del ciclo Joule-Brayton ideale.
- ✕ ▪ Il lavoro assorbito dal compressore e quello prodotto dalla turbina.
- ✕ ▪ La portata di gas necessaria per avere una potenza utile di 100 MW.
- ✕ ▪ L'entropia prodotta per irreversibilità nella macchina termodinamica motrice con ciclo ideale.

$$[\eta_{rev} = 0.739; \eta_{I,id} = 0.369; l_{C,id}^- = 175.74 \text{ kJ/kg}; l_{T,id}^+ = 425.35 \text{ kJ/kg}; \\ \dot{m}_{id} = 400.6 \text{ kg/s}; \dot{S}_{irr,id} = 334 \text{ kW/K}]$$

Si ipotizzi ora di realizzare un ciclo Joule-Brayton reale con le medesime condizioni di temperatura e pressione di ingresso nel compressore e nella turbina ma con rendimento isoentropico di espansione e di compressione rispettivamente pari a 0,85 e 0,80. Determinare:

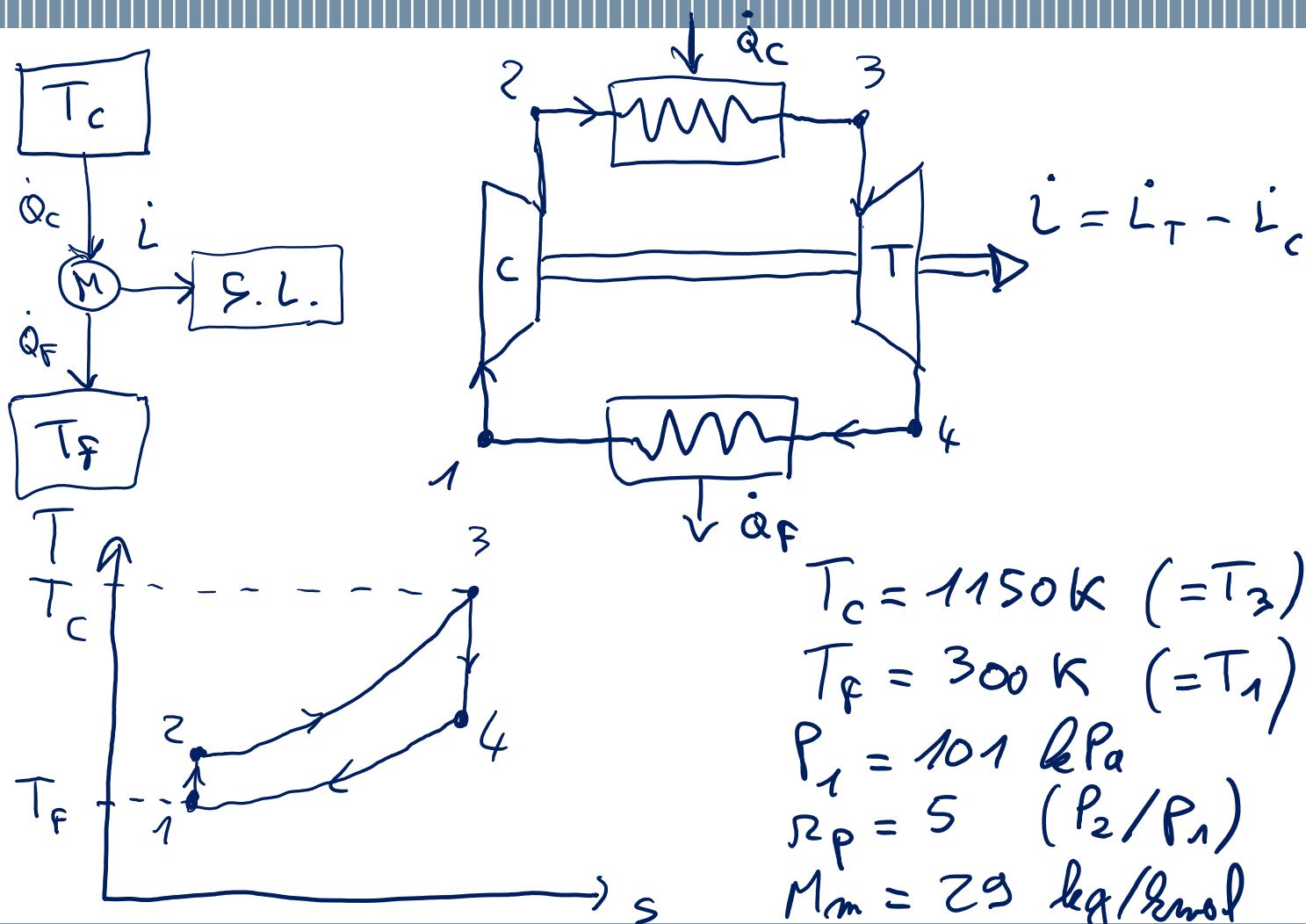
- Il rendimento del ciclo Joule-Brayton reale.
- Il rendimento di secondo principio.
- Il lavoro assorbito dal compressore e quello prodotto dalla turbina.
- La portata di gas necessaria per avere una potenza utile di 100 MW.
- L'entropia prodotta per irreversibilità nella macchina termodinamica motrice con ciclo reale.

$$[\eta_{I,r} = 0.224; l_{C,r}^- = 219.7 \text{ kJ/kg}; l_{T,r}^+ = 361.5 \text{ kJ/kg}; \dot{m}_r = 704.9 \text{ kg/s}; \dot{S}_{irr,r} = 766.3 \text{ kW/K}]$$

E06: Cicli a gas

Esercizio 02

4



Esercizio 02

DETERMINARE GLI STATI DEL CICLO

STATO	T (K)	P (Pa)	...
1	300	101000	
2	? 475	505000	
3	1150	505000	
4	? 726	101000	

$$P_3 = r_p P_1 = 505000 \text{ Pa}$$

ANDIAMO A CONSIDERARE LE TRASFORMAZIONI

$$\Delta S = S_Q^E + S_{IRR}$$

$$\Delta S = 0$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{se } S_Q^E = 0 \\ \text{e } S_{IRR} = 0 \end{array} \right\}$$

$$0 \text{ se } S_Q^E = -S_{IRR}$$

$$S_{IRR} \geq 0$$

STATO 2: 1 → 2 isentropica (compressione)

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1-k}{k}} \rightarrow T_2 = 475 \text{ K}$$

STATO 4: 3 → 4 isentropica (espansione)

$$T_4 = T_3 \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{1-k}{k}} \rightarrow T_4 = 726 \text{ K}$$

$$\eta_{\text{MAX}} = \eta_{\text{REV}} = 1 - \frac{T_F}{T_C} = 1 - \frac{300}{1150} = 0,739$$

$$\eta_{\text{SB, IDEALE}} = \frac{\dot{L}}{\dot{Q}_C} = \frac{\dot{L}_T - \dot{L}_C}{\dot{Q}_C} = \frac{\dot{Q}_C - \dot{Q}_F}{\dot{Q}_C} = 1 - \frac{\dot{Q}_F}{\dot{Q}_C} = 1 - \frac{q_F}{q_C}$$

BILANCI ENERGETICI

$$1-2 \text{ compressore : } \dot{m}(h_1 - h_2) + \cancel{\dot{Q}_{12}^{\leftarrow}} + \dot{I}_{12}^{\leftarrow} = 0$$

$$\Rightarrow \dot{I}_{12}^{\leftarrow} = \dot{I}_c = \dot{m}(h_2 - h_1) \stackrel{\text{G.P.}}{=} \dot{m} c_p (T_2 - T_1)$$

$$2-3 \text{ SCAMBIATORE : } \dot{m}(h_2 - h_3) + \dot{Q}_{23}^{\leftarrow} + \cancel{\dot{I}_{23}^{\leftarrow}} = 0$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{23}^{\leftarrow} = \dot{Q}_c = \dot{m}(h_3 - h_2) \stackrel{\text{G.P.}}{=} \dot{m} c_p (T_3 - T_2)$$

$$3-4 \text{ TURBINA : } \dot{m}(h_3 - h_4) + \cancel{\dot{Q}_{34}^{\leftarrow}} + \dot{I}_{34}^{\leftarrow} = 0$$

$$\Rightarrow -\dot{I}_{34}^{\leftarrow} = \dot{I}_{34}^{\rightarrow} = \dot{I}_T = \dot{m}(h_3 - h_4) \stackrel{\text{G.P.}}{=} \dot{m} c_p (T_3 - T_4)$$

$$4-1 \text{ SCAMBIATORE : } \dot{m}(h_4 - h_1) + \dot{Q}_{41}^{\leftarrow} + \dot{I}_{41}^{\leftarrow} = 0$$

$$\Rightarrow -\dot{Q}_{41}^{\leftarrow} = \dot{Q}_{41}^{\rightarrow} = \dot{Q}_F = \dot{m}(h_4 - h_1) \stackrel{\text{G.P.}}{=} \dot{m} c_p (T_4 - T_1)$$

Esercizio 02

$$\eta_{JB, IDEALE} = 1 - \frac{q_F}{q_C} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \left(\frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \right)$$

$$\eta_{JB, IDEALE} = 1 - \frac{(726 - 300)}{(1150 - 475)} = 0,369$$

$$\eta_{REV} = 0,739$$

$$\left. \begin{array}{l} \eta_{JB, IDEALE} = 0,369 \\ \eta_{REV} = 0,739 \end{array} \right\} \eta_{II} = \frac{\eta_{JB}}{\eta_{REV}} = 0,499$$

$$l_c = \frac{\dot{L}_c}{\dot{m}} = c_p(T_2 - T_1) = \frac{7}{2} R^*(T_2 - T_1) = \frac{7}{2} \frac{8314}{29} (475 - 300)$$

$$l_c = 175,74 \text{ kJ/kg}$$

$$l_T = \frac{\dot{L}_T}{\dot{m}} = c_p(T_3 - T_4) = \frac{7}{2} R^*(T_3 - T_4) = \frac{7}{2} \frac{8314}{29} (1150 - 726)$$

$$l_T = 425,35 \text{ kJ/kg}$$

Esercizio 02

$$\dot{I} = \dot{I}_T - \dot{I}_c = 425,35 - 175,74 = \underline{249,61 \text{ kJ/kg}}$$

$$\dot{I} = 100 \text{ MW}$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{I}}{\dot{I}} = \frac{100\,000 \text{ [kW]}}{249,61 \text{ [kJ/kg]}} = 400,6 \text{ kg/s}$$

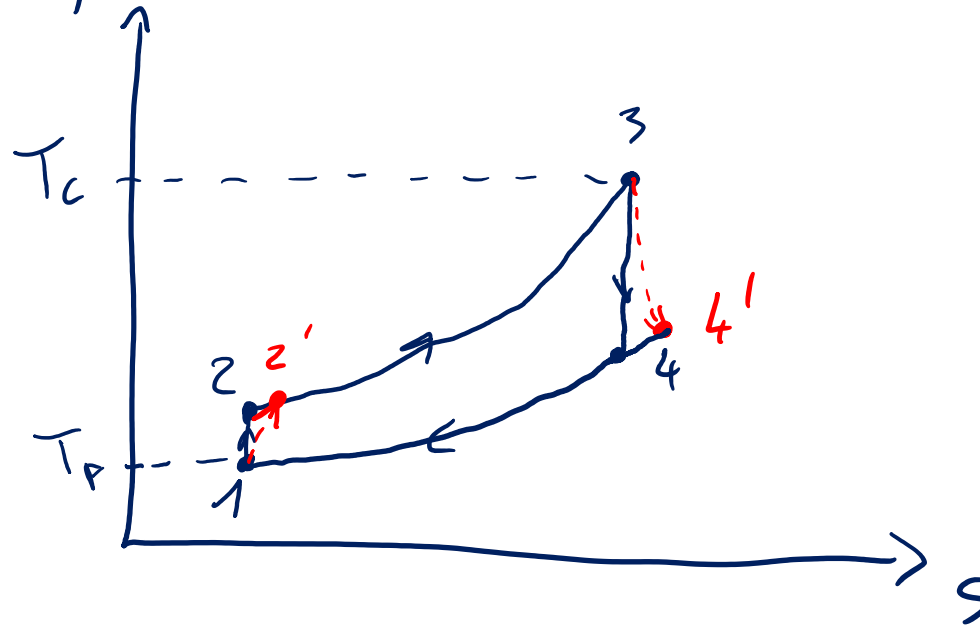
\dot{S}_{irr} ?

II° PRINCIPIO MACCHINA TERMODINAMICA

$$-\frac{\dot{Q}_c}{T_c} + \frac{\dot{Q}_F}{T_F} = \dot{S}_{irr} \Rightarrow \dot{S}_{irr} = -\frac{\dot{m} c_p (T_3 - T_2)}{T_c} + \frac{\dot{m} c_p (T_4 - T_1)}{T_F}$$

$$\dot{S}_{irr} = -\frac{270,36 \times 10^3 \text{ kW}}{1150} + \frac{170,7 \times 10^3 \text{ kW}}{300} = 334 \text{ kW/K}$$

Esercizio 02

CASO REALE: T DETERMINARE $2'$ e $4'$

$$\eta_c = 0,80$$

$$\eta_T = 0,85$$

Esercizio 02

$$\eta_c = \frac{l_{c, ID}}{l_{c, REALE}} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2'} - h_1} \stackrel{G.P.}{=} \frac{T_2 - T_1}{T_{2'} - T_1}$$

$$\Rightarrow T_{2'} = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{\eta_c} = 519 \text{ K } (> T_2)$$

$$\eta_T = \frac{l_{T, REALE}}{l_{T, ID}} = \frac{h_3 - h_{4'}}{h_3 - h_4} \stackrel{G.P.}{=} \frac{T_3 - T_{4'}}{T_3 - T_4}$$

$$\Rightarrow T_{4'} = T_3 - \eta_T (T_3 - T_4) = 790 \text{ K } (> T_4)$$

$$l_{c, REALE} = c_p (T_{2'} - T_1) = 219,7 \text{ kJ/kg}$$

$$l_{T, REALE} = c_p (T_3 - T_{4'}) = 361,5 \text{ kJ/kg}$$

$$l_{REALE} = l_{T, REALE} - l_{c, REALE} = 141,8 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{JB, REALE} = 1 - \frac{q_{F, REALE}}{q_{C, REALE}} = 1 - \frac{T_{4'} - T_1}{T_3 - T_{2'}} = 0,224$$

$$\eta_{REV} = 0,739$$

$$\Rightarrow \eta_{II, REALE} = 0,303$$

$$\dot{S}_{IRR, REALE} = - \frac{\dot{Q}_{C, REALE}}{T_C} + \frac{\dot{Q}_{F, REALE}}{T_F} = 766,3 \text{ kW/K}$$