

Cicli diretti a gas

Ciclo Joule semplice

Ciclo Joule semplice. Aria: gas ideale ($k=1.4$, $M=28.87$)

$$p_1=1 \text{ bar}$$

$$t_1=27^\circ\text{C}$$

$$p_2=5 \text{ bar}$$

$$t_3=830^\circ\text{C}$$

$$\eta_{ic}=0.80$$

$$\eta_{ie}=0.85$$

Valutare i lavori specifici di compressione ed espansione, ed il rendimento di Primo Principio.

Nel caso in cui si considerino trasformazioni (internamente) reversibili, dalla teoria si ha:

$$\frac{L_c^-}{c_p T_1} \Big|_{rev} = 1 - r_p^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\frac{L_e^+}{c_p T_1} \Big|_{rev} = \frac{T_3}{T_1} \left(1 - \frac{1}{r_p^{\frac{k-1}{k}}} \right)$$

Introducendo i rendimenti isoentropici, per tener conto delle irreversibilità nelle fasi di compressione ed espansione, si ha:

$$\frac{L_c^-}{c_p T_1} = \frac{1 - r_p^{\frac{k-1}{k}}}{h_{ic}}$$

$$\frac{L_e^+}{c_p T_1} = h_{ie} \frac{T_3}{T_1} \left(1 - \frac{1}{r_p^{\frac{k-1}{k}}} \right)$$

Il rendimento di Primo Principio può essere espresso come:

$$h = \frac{L_c^- + L_e^+}{Q_{23}^+}$$

$$\text{Inoltre: } Q_{23}^+ = h_3 - h_2 = c_p (T_3 - T_2)$$

Per trovare T_2 si procede come segue:

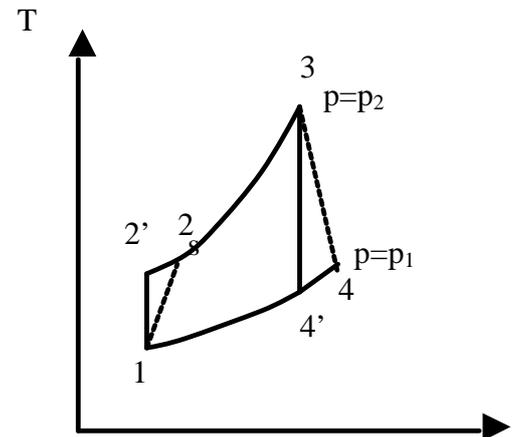
$$T_2 = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{h_{ic}}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = r_p^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\text{Ne segue: } T_2 = T_1 \left[1 + \frac{1}{h_{ic}} \left(r_p^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right]$$

Teniamo inoltre presente che:

$$c_p = \frac{k(R/M)}{k-1}$$



Utilizzando le formule sopra ricavate, si ottiene:

$$r_p = 5$$

$$\frac{L_c^-}{c_p T_1} = -0.73$$

$$L_c^- = -220.84 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{L_e^+}{c_p T_1} = 1.15$$

$$L_e^+ = 347.90 \text{ kJ/kg}$$

$$T_2 = 264.04^\circ\text{C}$$

$$Q_{23}^+ = 588.57 \text{ kJ/kg}$$

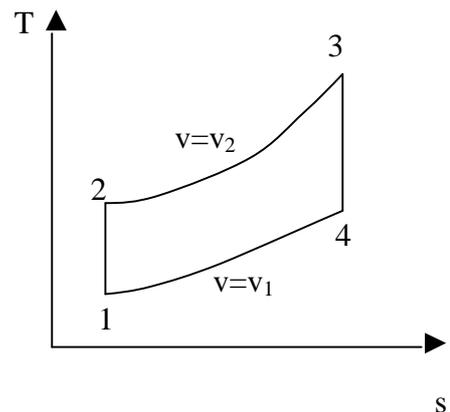
$$h = 0.216$$

Ciclo Otto

Considerare un ciclo Otto, percorso da aria. Siano noti i seguenti dati:

- $r_v = v_1/v_2 = 8$
- $T_1 = 300 \text{ K}$
- $T_3 = 2200 \text{ K}$
- $p_1 = 1 \text{ bar}$

Si consideri inizialmente l'aria come gas ideale, con $k=1.4$ ed $R=286.7 \text{ J/kg K}$. Si calcolino il lavoro netto del ciclo ed il suo rendimento di Primo Principio. Si calcolino quindi le stesse grandezze, nell'ipotesi di aria gas perfetto ma non ideale, usando le tabelle 1 – 3 allegate.



Aria, considerata gas ideale:

$$Q_{23}^+ = c_v (T_3 - T_2) \quad Q_{41}^- = c_v (T_1 - T_4)$$

$$T_2 = T_1 r_v^{k-1} = 689.2 \text{ K} \quad T_4 = T_3 / r_v^{k-1} = 957.6 \text{ K}$$

$$c_p = \frac{kR}{k-1} \quad c_v = \frac{R}{k-1}$$

$$Q_{23}^+ = 1082.87 \text{ kJ/kg} \quad Q_{41}^- = -471.34 \text{ kJ/kg}$$

$$h = 1 + \frac{Q_{41}^-}{Q_{23}^+} = 0.565$$

$$L_n = h Q_{23}^+ = 611.82 \text{ kJ/kg}$$

Esercizio - gruppi turbogas

Si consideri il gruppo turbogas rappresentato in figura:

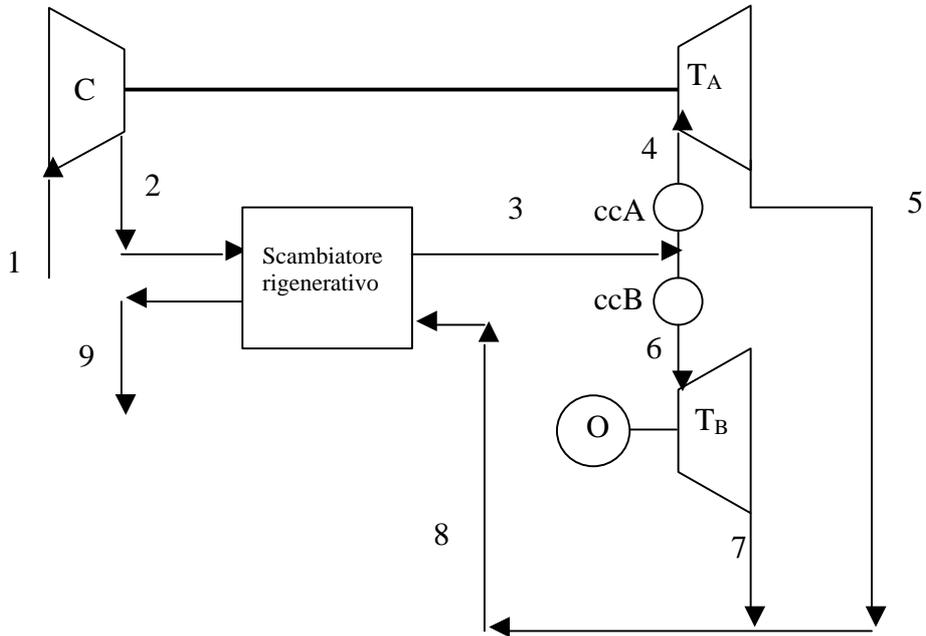


Figura 1

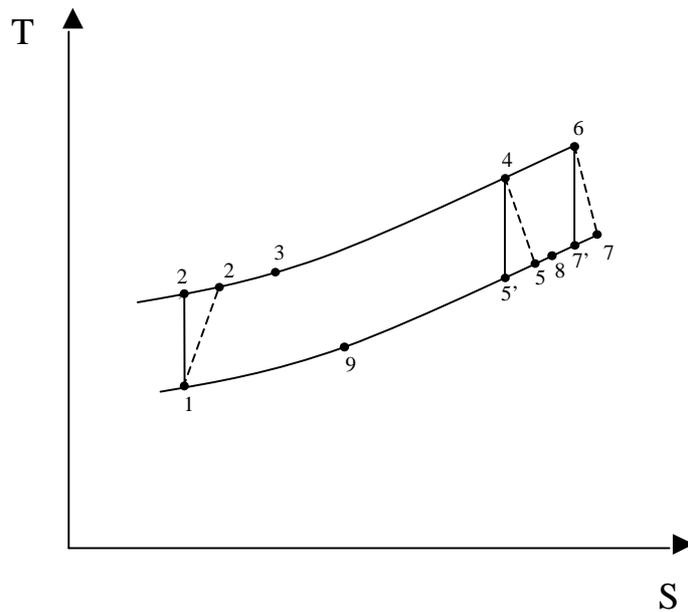


Figura 2

Nello schema si distinguono:

- C: compressore
- T_A : turbina che guida il compressore
- T_B : turbina che guida la macchina operatrice (es. alternatore)
- O: macchina operatrice
- ccA, ccB: camere di combustione, collegate alle turbine A e B, rispettivamente
- Scambiatore rigenerativo: è uno scambiatore a superficie, dove i gas caldi, usciti dalle turbine, cedono calore all'aria uscente dal compressore.

Inoltre, sono stati indicati i punti 1 – 9, corrispondenti alle condizioni seguenti:

1. aspirazione aria al compressore
2. mandata aria dal compressore
3. aria, il riscaldamento nel rigeneratore
4. gas caldi, uscenti dalla camera di combustione ccA ed in ingresso alla turbina T_A
5. gas uscenti dalla turbina T_A
6. gas caldi, uscenti dalla camera di combustione ccB ed in ingresso alla turbina T_B
7. gas uscenti dalla turbina T_B
8. gas uscenti da entrambe le turbine, dopo la miscelazione, supposta isobara ed adiabatica
9. scarico dei gas, dopo il raffreddamento nello scambiatore rigenerativo

Vengono inoltre forniti i seguenti dati:

- potenza assorbita dall'alternatore: $P=3\text{MW}$
- pressione atmosferica: 1 bar
- temperatura atmosferica: 293.15 K
- pressione di mandata dal compressore: 3.5 bar
- temperatura di ingresso nella turbina T_A : 1013.15 K (740°C)
- temperatura di ingresso nella turbina T_B : 1053.15 K (780°C)
- Temperatura di scarico dei gas: 711K (438°C)
- Rendimenti isoentropici:
 - i. Compressore: $h_{ic} = 0.72$
 - ii. Turbina T_A : $h_{iA} = 0.82$
 - iii. Turbina T_B : $h_{iA} = 0.80$
- Scambiatore rigenerativo adiabatico verso l'esterno
- Miscelazione dei gas uscenti dalle turbine: isobara, ed adiabatica verso l'esterno
- Si trascurino le variazioni di portata dovute all'introduzione del combustibile
- Si consideri gas operante aria, a comportamento ideale, con:

$$\begin{aligned}k &= 1.4 \\ R &= 286.7\text{ J/kg K} \\ c_p &= 1003.45\text{ J/kg K}\end{aligned}$$

Determinare:

1. le portate di fluido che attraversano i vari componenti della macchina
2. rendimento di Primo Principio
3. Generazione di entropia allo scambiatore rigenerativo

Soluzione

Nel piano termodinamico TS, le trasformazioni che collegano i vari punti indicati in figura 1 appaiono come in figura 2.

Si procede come segue:

$$T_2' = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 419.3\text{K}$$

$$T_2 = T_1 + \frac{T_2' - T_1}{h_{ic}} = 468.4\text{K}$$

$$T_5 = T_4 \left\{ 1 - \mathbf{h}_{iA} \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right\} = 763.2K \quad T_7 = T_6 \left\{ 1 - \mathbf{h}_{iB} \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right\} = 799.7K$$

$$P = \dot{m}_b c_p (T_6 - T_7) \Rightarrow \dot{m}_b = 11.79 \text{ kg/s}$$

$$|P_c| = (\dot{m}_a + \dot{m}_b) c_p (T_2 - T_1)$$

$$P_A = \dot{m}_a c_p (T_4 - T_5)$$

$$P_A = |P_c| \Rightarrow \dot{m}_a = 27.64 \text{ kg/s}$$

Miscelazione: si usa il Primo Principio per sistemi aperti:

$$(\dot{m}_a + \dot{m}_b) h_8 = \dot{m}_a h_5 + \dot{m}_b h_7$$

$$\text{o, equivalentemente:} \quad (\dot{m}_a + \dot{m}_b) T_8 = \dot{m}_a T_5 + \dot{m}_b T_7$$

$$\text{da cui:} \quad T_8 = 774.1K$$

Bilancio energetico al rigeneratore: di nuovo, uso il Primo Principio per sistemi aperti:

$$(\dot{m}_a + \dot{m}_b)(h_3 - h_2) = (\dot{m}_a + \dot{m}_b)(h_8 - h_9) \Rightarrow T_3 = T_2 + T_8 - T_9 = 531.5K$$

Rendimento di Primo Principio:

$$\mathbf{h}_I = \frac{P}{\dot{m}_a (h_4 - h_3) + \dot{m}_b (h_6 - h_3)} = 0.154$$

Bilancio entropico al rigeneratore: si usa il Secondo Principio per sistemi aperti:

$$0 = \dot{m}_{in} s_{in} - \dot{m}_{out} s_{out} + \sum_k \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \dot{S}_{irr}$$

Nel nostro caso:

$$(\dot{m}_a + \dot{m}_b)[s_2 + s_8 - (s_3 + s_9)] + \dot{S}_{irr} = 0$$

Per gas ideali, si ha:

$$s - s_{rif} = c_p \ln \left(\frac{T}{T_{rif}} \right) - R \ln \left(\frac{p}{p_{rif}} \right)$$

Dalle ultime due equazioni, ricordando che $p_9 = p_8$ e che $p_3 = p_2$, si ottiene:

$$s_9 + s_3 - s_2 - s_8 = c_p \ln \left(\frac{T_9 T_3}{T_2 T_8} \right) = 41.5 \text{ J/kg K}$$

$$\text{da cui:} \quad \dot{S}_{irr} = 1636.4 \text{ J/sK}$$