

**Esercizio (ciclo Rankine)**

Adattato da: M.C. Potter & C.W. Somerton, *Termodinamica per ingegneri*, McGraw-Hill Italia (1998).

Si consideri il ciclo Rankine a vapore d'acqua con surriscaldamento mostrato in figura (diagramma T-s non in scala).

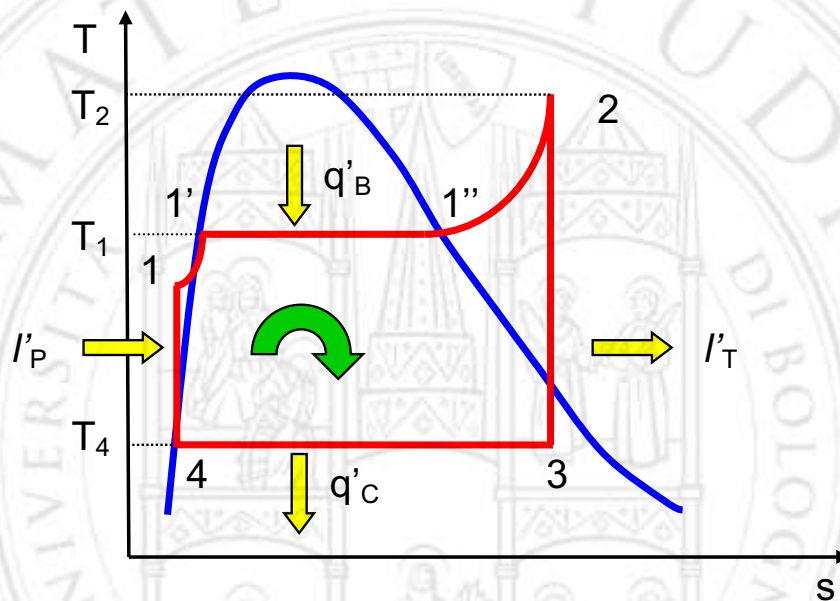
Si conoscono i seguenti dati:

$$p_1 = 2 \text{ MPa};$$

$$T_2 = 400 \text{ }^\circ\text{C}, h_2 = 3248 \text{ kJ/kg}, s_2 = 7,1279 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)};$$

$$p_4 = 10 \text{ kPa}, h_4 = h_{1,4} = 191,8 \text{ kJ/kg}.$$

Determinare il rendimento di primo principio del ciclo indicato.

**Soluzione**

Il lavoro specifico fornito dalla pompa si ricava semplificando l'espressione del primo principio per sistemi aperti in forma meccanica tra i punti 4 e 1:

$$l'_p = \frac{p_1 - p_4}{\rho} \approx \frac{2000 - 10}{1000} = 1,99 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (1)$$

L'entalpia specifica nel punto 1 si ricava semplificando l'espressione del primo principio per sistemi aperti in forma termica tra i punti 4 e 1:

$$l'_p = h_1 - h_4 \Rightarrow h_1 = h_4 + l'_p \approx 191,8 + 1,99 \approx 194 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (2)$$

Nota  $h_1$ , la quantità di calore per unità di massa fornita in caldaia si ricava semplificando l'espressione del primo principio per sistemi aperti in forma termica tra i punti 1 e 2:

$$q'_B = h_2 - h_1 \approx 3'248 - 194 = 3'054 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (3)$$

Per localizzare lo stato 3, si riconosce che, considerando la trasformazione dallo stato 2 allo stato 3 come isotropica, vale:

$$s_2 = s_3 = s_{l,3} + x_3 \Delta_{lv} s_3 \quad (4)$$

Da cui, nota  $s_2$ , e trovando l'entropia del liquido saturo,  $s_{l,3}$ , e la variazione di entropia,  $\Delta_{lv} s_3$ , nelle tabelle termodinamiche per l'acqua alla pressione  $p_3 = p_4 = 10 \text{ kPa}$ , si ricava il titolo  $x_3$ :

$$x_3 = \frac{s_2 - s_{l,3}}{\Delta_{lv} s_3} \approx \frac{7,1279 - 0,6491}{7,5019} \approx 0,8636 \quad (5)$$

Noto il titolo nel punto 3, si ricava l'entalpia specifica dalla:

$$h_3 = h_{l,3} + x_3 r_3 = 191,8 + 0,8636 \cdot 2'393 \approx 2'259 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (6)$$

conoscendo il valore dell'entalpia specifica del liquido saturo,  $h_{l,3} = h_{l,4}$ , ed avendo letto quello del calore latente di vaporizzazione alla pressione  $p_3$ ,  $r_3$ , sulle tabelle termodinamiche per l'acqua. Allora si può finalmente calcolare il lavoro specifico in uscita dalla turbina:

$$l'_T = h_2 - h_3 \approx 3'248 - 2'259 \approx 989 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (7)$$

Quindi il rendimento di primo principio del ciclo è:

$$\eta_1 = \frac{l'_T - l'_P}{q'_B} \approx \frac{989 - 1,99}{3'054} \approx 0,3232 \quad (32,32\%) \quad (8)$$

Si noti che il lavoro specifico richiesto nel processo di pompaggio è trascurabile rispetto al lavoro ottenuto dalla turbina.

Si noti anche che il titolo ottenuto alla fine del processo di espansione in turbina è significativamente minore di 1 ( $x_3 = 0,8636$ ) e ciò provoca la formazione di goccioline, che causano il rapido deterioramento della turbina. Si dovrebbe perciò modificare il ciclo, per esempio aumentando la temperatura nel punto 2 o ricorrendo ad un riscaldamento intermedio del fluido tra gli stati 2 e 3 (si veda in proposito il capitolo 8 del testo indicato).