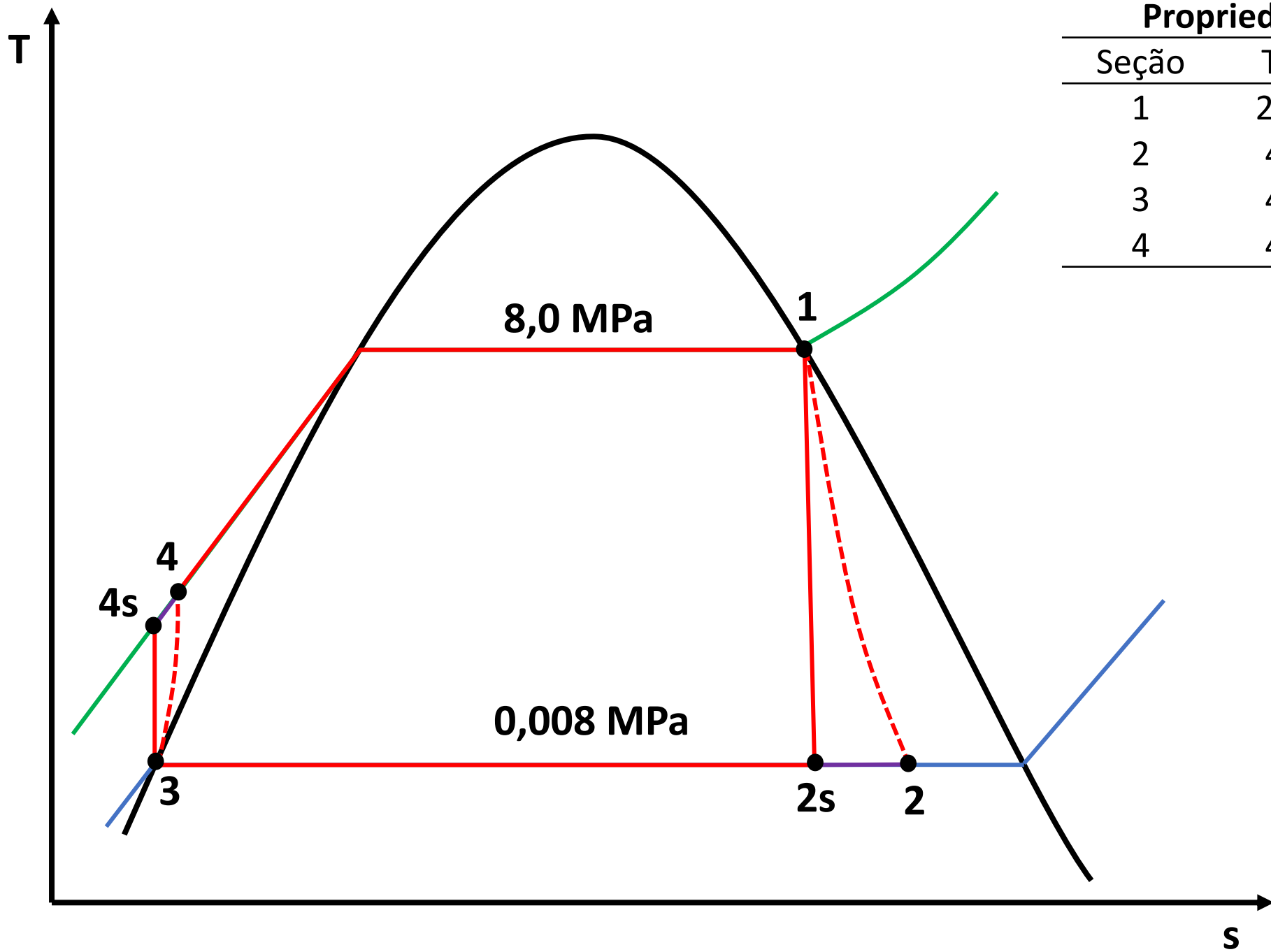


Termodinâmica I

Exercícios

Ciclos de potência - Rankine

1) Considere o ciclo Rankine operando com água, com pressão de vaporização de 8,0 MPa e de condensação de 0,008 MPa, no qual o vapor gerado é saturado e o líquido sai saturado do condensador. Nesse ciclo a bomba e a turbina têm rendimento isentrópico de 85 %. Determine: a) o rendimento térmico do ciclo; b) a vazão mássica de vapor para uma potência útil de 100 MW; c) a taxa de transferência de calor no gerador de vapor; d) a taxa de transferência de calor no condensador; e) a vazão mássica de água de resfriamento no condensador, admitindo que $T_e = 15\text{ }^\circ\text{C}$ e $T_s = 35\text{ }^\circ\text{C}$.



Propriedades Termodinâmicas			
Seção	T(°C)	P(MPa)	h (kJ/kg)
1	295,1	8,0	2758,0
2	41,5	0,008	1939,3
3	41,5	0,008	173,9
4	42,1	8,0	183,4

Caracterização dos estados:

$$h_1 = 2758 \text{ kJ/kg} \quad s_1 = 5,7432 \text{ kJ/kgK}$$

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad h_2 = h_1 - \eta_t(h_1 - h_{2s})$$

$$h_2 = 2758 - 0,85(2758 - 1794,8) \quad h_2 = 1939,3 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = 173,9 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = h_3 + \dot{W}_B/\dot{m} \quad \text{com} \quad \eta_B = \frac{(\dot{W}_B/\dot{m})_s}{\dot{W}_B/\dot{m}}$$

$$(\dot{W}_B)_s = \dot{m}[v_3(P_4 - P_3)]$$

$$(\dot{W}_B/\dot{m})_s = 8,06 \text{ kJ/kg} \longrightarrow \left(\frac{\dot{W}_B}{\dot{m}}\right) = \frac{8,06}{\eta_B} = 9,48 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = 183,36 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{a) } \dot{W}_{ciclo} = \dot{W}_t - \dot{W}_B = \dot{m}[(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)]$$

$$\eta = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_4)} = 0,314 \text{ (31,4\%)}$$

$$\text{b) } \dot{m}_v = \frac{W_{ciclo}}{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)} = 4,449 \cdot 10^5 \text{ kg/h}$$

$$\text{c) } \dot{Q}_{cald} = \dot{m}_v(h_1 - h_4) = 318,2 \text{ MW}$$

$$\text{d) } \dot{Q}_{cond} = \dot{m}_v(h_2 - h_3) = 218,2 \text{ MW}$$

$$\text{e) } \dot{m}_{\acute{a}gua} = \frac{\dot{Q}_{cond}}{(h_{as} - h_{ae})} = 9,39 \cdot 10^6 \text{ kg/h}$$

$$h_{as} = 146,68 \text{ kJ/kg}$$

com

$$h_{ae} = 62,99 \text{ kJ/kg}$$

Ciclo Ideal

$$\eta = 0,371$$

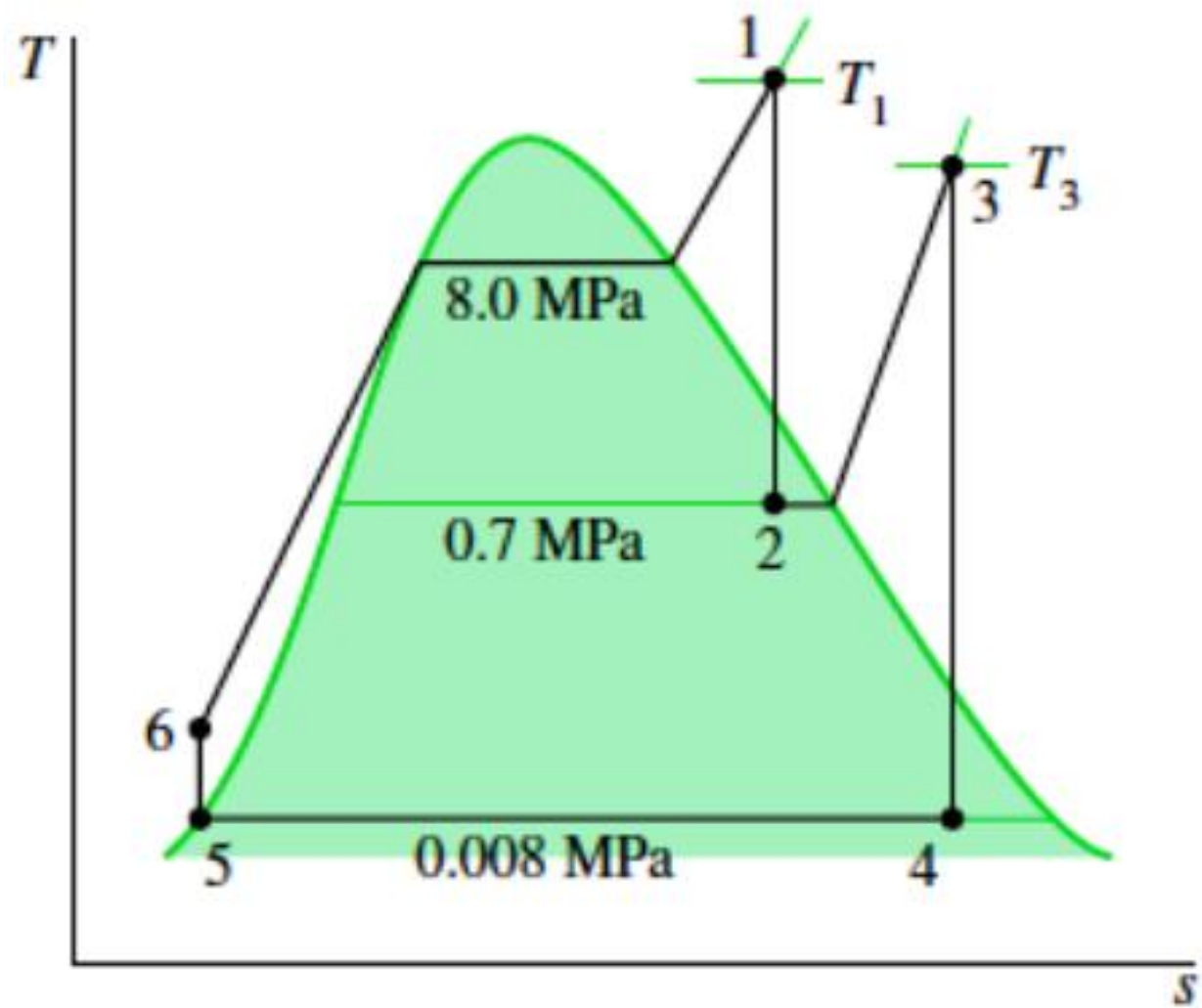
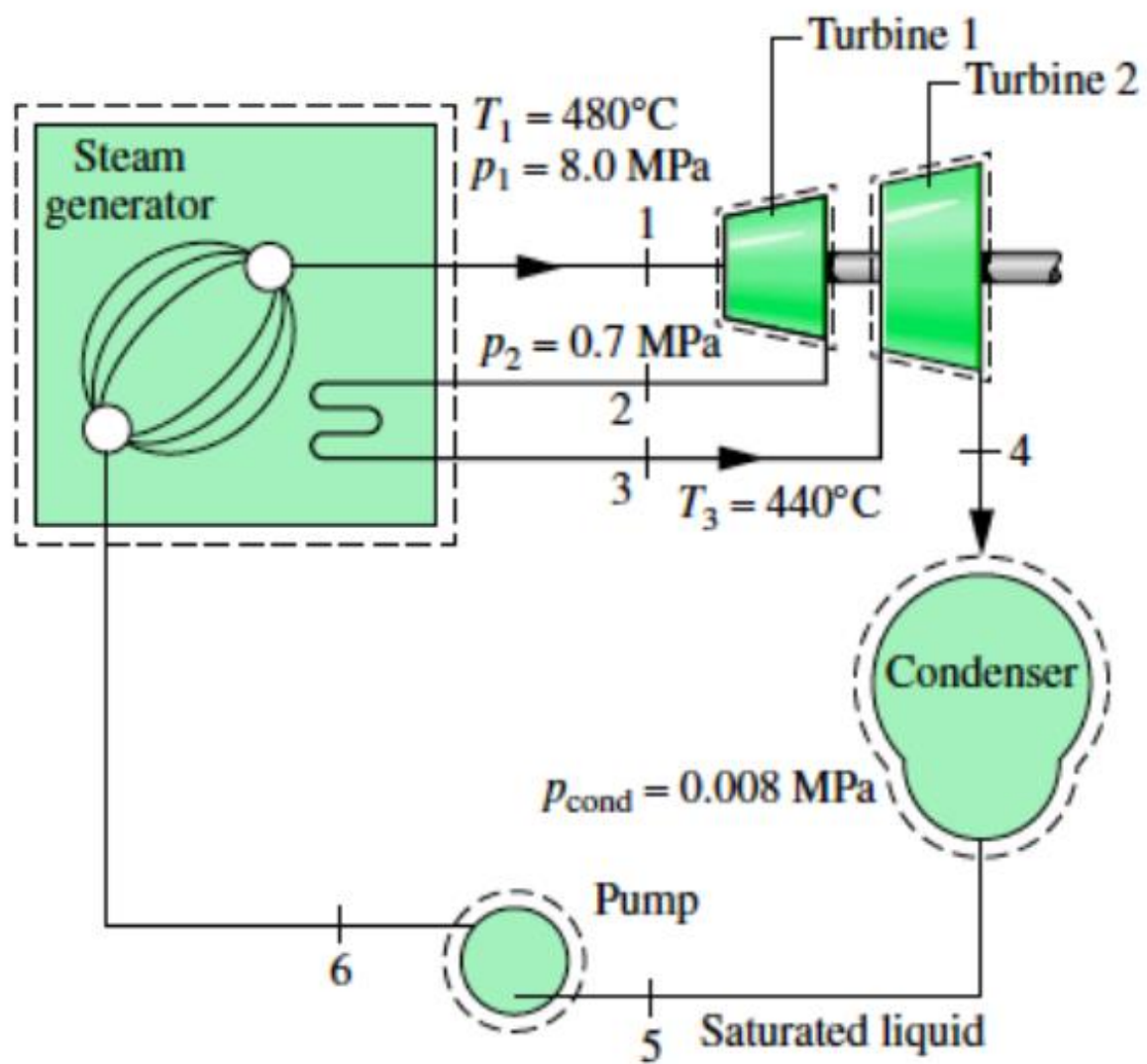
$$\dot{m}_v = 3,77 \cdot 10^5 \text{ kg/h}$$

$$\dot{Q}_{cald} = 269,8 \text{ MW}$$

$$\dot{Q}_{cond} = 169,8 \text{ MW}$$

$$\dot{m}_{\acute{a}gua} = 7,3 \cdot 10^6 \text{ kg/h}$$

2) Considere o ciclo ideal de Rankine com superaquecimento e reaquecimento. Nele vapor entra no primeiro estágio da turbina a 8,0 MPa e 480 °C, expandindo até 0,7 MPa. Nessa pressão o vapor é extraído da turbina, enviado para o gerador de vapor e reaquecido até 440 °C. A seguir é enviado para o segundo estágio da turbina onde expande até a pressão de 0,008 MPa. A potência líquida fornecida pelo ciclo é de 100 MW. Determine: a) o rendimento térmico do ciclo; b) a vazão mássica de vapor; c) a taxa de transferência de calor no condensador.



Determinação dos estados termodinâmicos.

$$\begin{array}{l} \boxed{1} \left\{ \begin{array}{l} h_1 = 3348,4 \text{ kJ/kg} \\ s_1 = 6,6586 \text{ kJ/kgK} \end{array} \right. \\ \\ \boxed{2} \left\{ \begin{array}{l} P_2 = 0,7 \text{ MPa} \quad e \quad s_1 = s_2 \\ x_2 = \frac{s_2 - s_l}{s_v - s_l} \\ x_2 = \frac{6,6586 - 1,9922}{6,7080 - 1,9922} = 0,9895 \\ h_2 = h_l + x_2(h_v - h_l) \\ h_2 = 697,22 + 0,9895 \cdot 2066,3 \\ h_2 = 2741,8 \text{ kJ/kg} \end{array} \right. \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \boxed{3} \left\{ \begin{array}{l} P_3 = 0,7 \text{ MPa} \quad e \quad T_3 = 440^\circ\text{C} \\ h_3 = 3353,3 \text{ kJ/kg} \\ s_3 = 7,7571 \text{ kJ/kgK} \end{array} \right. \\ \\ \boxed{4} \left\{ \begin{array}{l} P_4 = 0,008 \text{ MPa} \quad e \quad s_4 = s_3 \\ x_4 = \frac{s_4 - s_l}{s_v - s_l} \\ x_4 = \frac{7,7571 - 0,5926}{8,2287 - 0,5926} = 0,9382 \\ h_4 = h_l + x_4(h_v - h_l) \\ h_4 = 2428,5 \text{ kJ/kg} \end{array} \right. \end{array}$$

Determinação dos estados termodinâmicos.

$$\boxed{5} \left\{ \begin{array}{l} h_5 = 173,88 \frac{kJ}{kg} \text{ (líquido saturado)} \end{array} \right.$$

$$\boxed{6} \left\{ \begin{array}{l} h_6 = h_5 + v_5(P_6 - P_5) \\ h_6 = 181,94 \text{ kJ/kg} \end{array} \right.$$

Solução

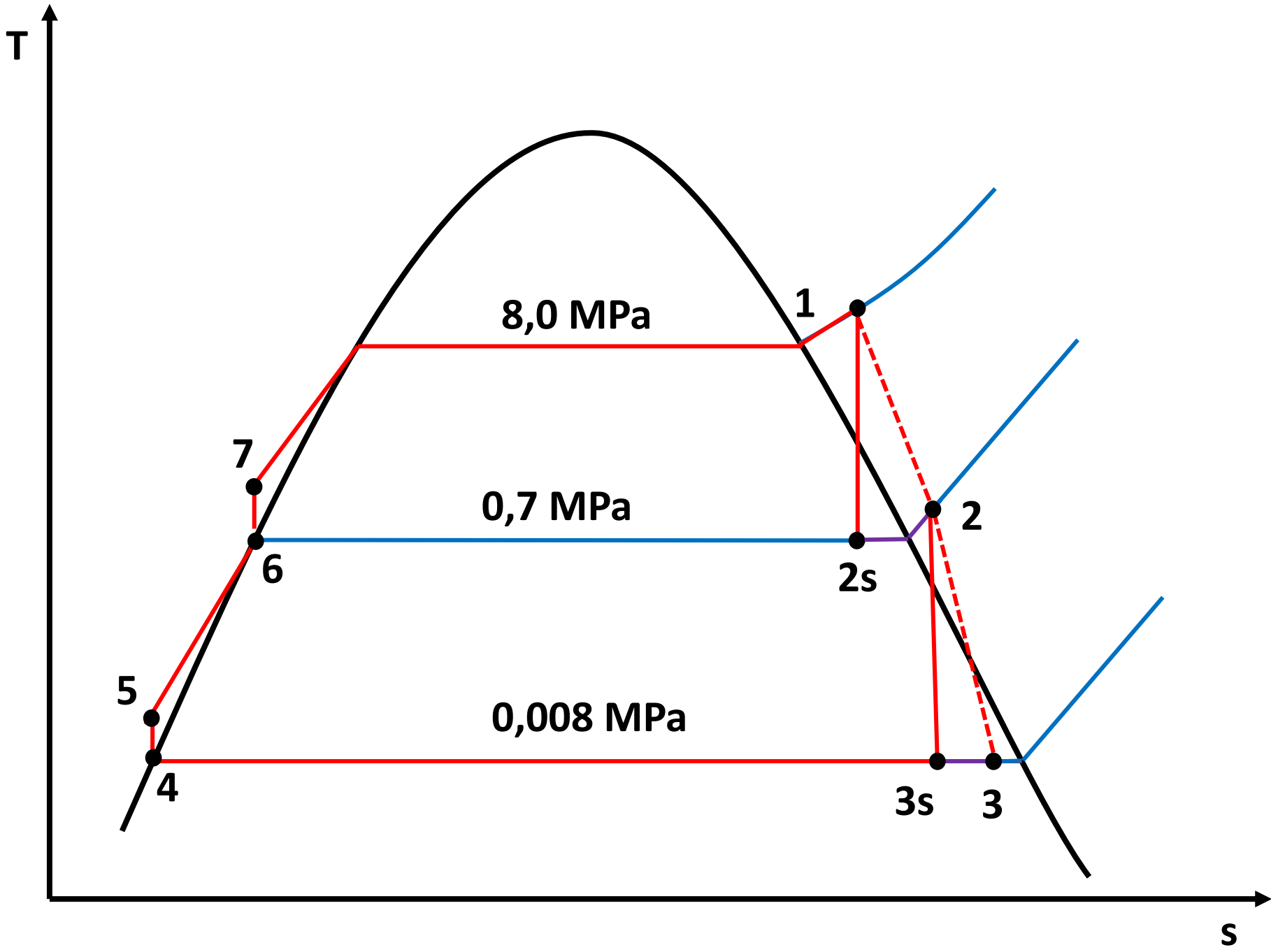
$$\text{a) } \dot{W}_{liq} = \dot{W}_{1 \rightarrow 2} + \dot{W}_{3 \rightarrow 4} - \dot{W}_{5 \rightarrow 6}$$

$$\eta = \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) - (h_6 - h_5)}{(h_1 - h_6) + (h_3 - h_2)} = 0,403$$

$$\text{b) } \dot{m} = \frac{\dot{W}_{liq}}{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) - (h_6 - h_5)} = 65,64 \frac{kg}{s} = 2,363 \cdot 10^5 \frac{kg}{h}$$

$$\text{c) } \dot{Q}_{cond} = \dot{m}(h_4 - h_5) = 148 \text{ MW}$$

3) Em um ciclo vapor com regeneração com um pré-aquecedor do tipo de mistura, vapor é gerado a 8,0 MPa e 480 °C. O vapor enviado para o pré-aquecedor é extraído da turbina a 0,7 MPa. A vazão restante de vapor é expandida até a pressão do condensador, que é de 0,008 MPa. Líquido saturado a 0,7 MPa deixa o pré-aquecedor. A eficiência isentrópica de cada estágio da turbina é de 85 %. Admitindo que a potência líquida gerada pelo ciclo seja 100 MW, pede-se: a) o rendimento térmico do ciclo; b) a vazão total de vapor.



Determinação dos estados termodinâmicos.

$$h_1 = 3348,4 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = 2832,8 \text{ kJ/kg} \quad s_2 = 6,8606 \text{ kJ/kgK}$$

$$h_4 = 173,9 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = h_2 - \eta_t(h_2 - h_{3s}) \quad \text{com} \quad s_{3s} = s_2$$

$$h_{3s} = 2146,3 \text{ kJ/kg} \quad h_3 = 2249,3 \text{ kJ/kg}$$

$$h_6 = 697,2 \text{ kJ/kg}$$

$$h_5 = h_4 + v_4(P_5 - P_4) = 174,6 \text{ kJ/kg}$$

$$h_7 = h_6 + v_6(P_7 - P_6) = 705,3 \text{ kJ/kg}$$

*** Fração de vapor extraída.**

$$y = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_5} = 0,1966$$

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}_1} = (h_1 - h_2) + (1 - y)(h_2 - h_3) = 948,4 \text{ kJ/kg}$$

a)
$$\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}_1} = (h_7 - h_6) + (1 - y)(h_5 - h_4) = 8,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{"Valor em módulo"}$$

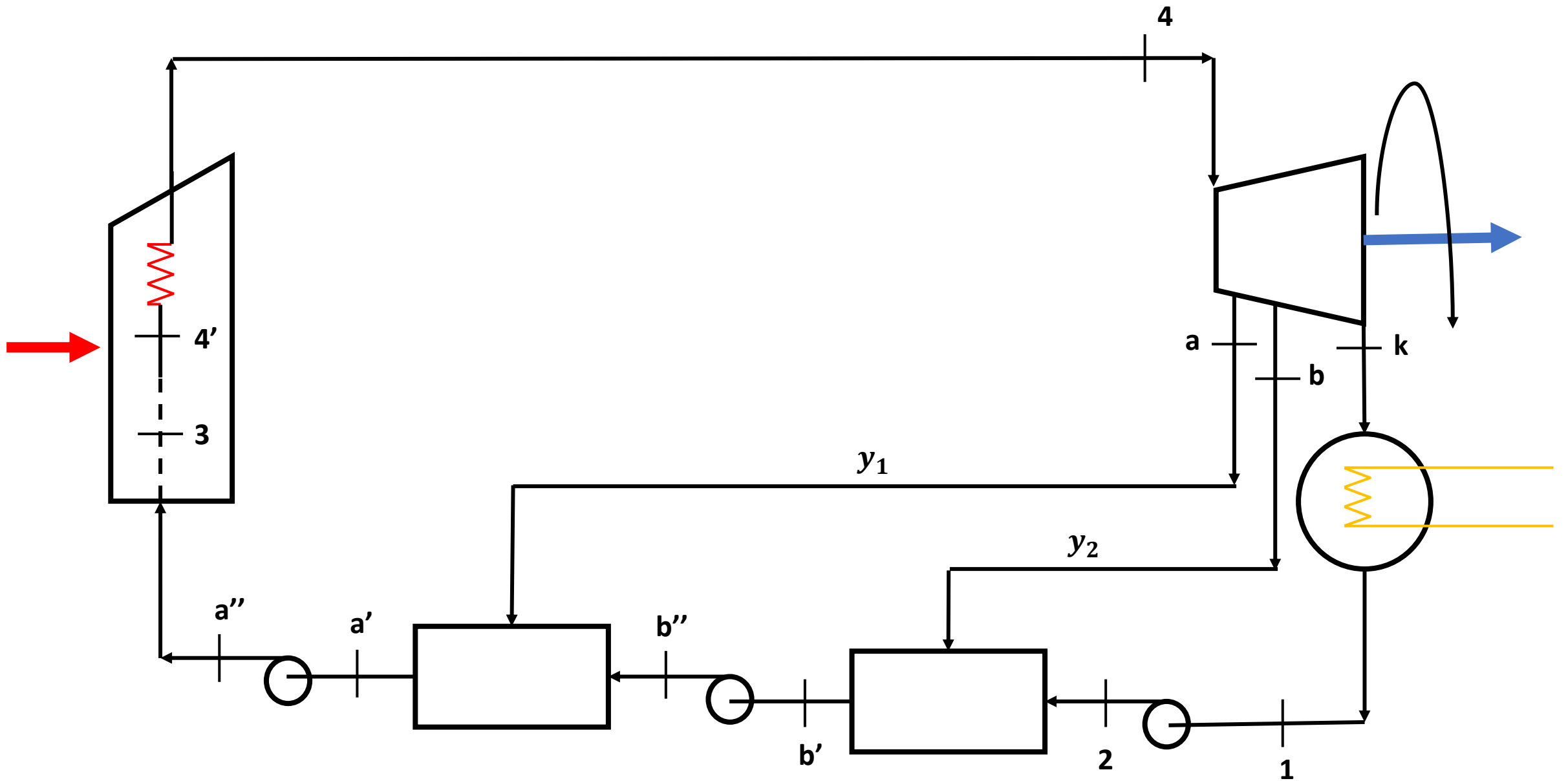
$$\frac{\dot{Q}_{cald}}{\dot{m}_1} = h_1 - h_7 = 2643,1 \text{ kJ/kg}$$

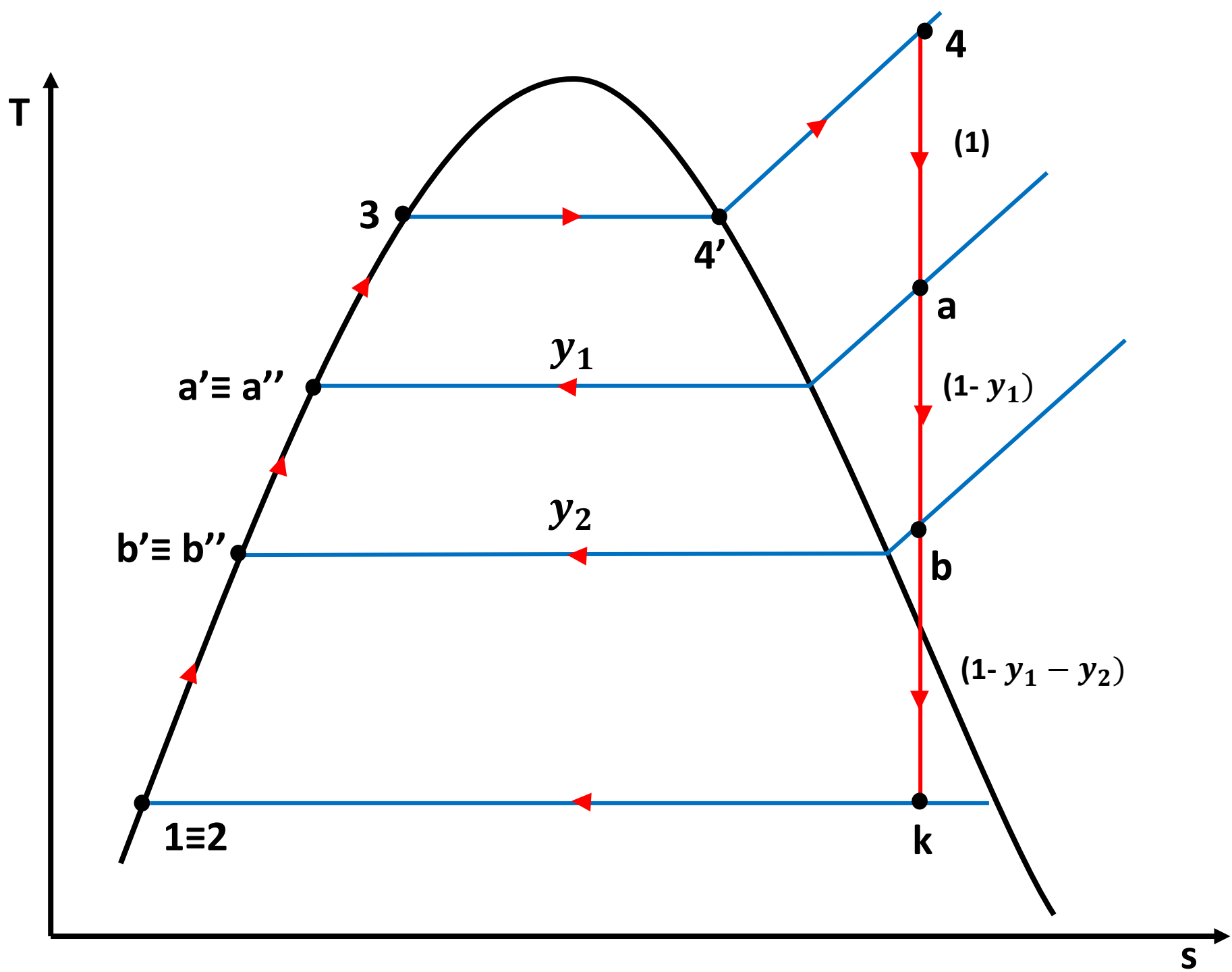
$$\eta = \frac{\left(\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}_1}\right) - \left(\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}_1}\right)}{\frac{\dot{Q}}{\dot{m}_1}} = 0,369$$

b)
$$\dot{W}_l = \dot{W}_t - \dot{W}_b \quad \rightarrow \quad \dot{m}_1 = 3,69 \cdot 10^5 \text{ kg/h}$$

4) Em um ciclo de Rankine com regeneração há duas extrações de vapor da turbina para os preaquecedores de mistura: uma a 6,86 bar e outra a 1,17 bar. As propriedades do vapor na entrada da turbina são $p = 88,2$ bar e $T = 535$ °C. A pressão no condensador é 0,0343 bar. Considerando que a água de alimentação na saída de cada preaquecedor atinge a temperatura de saturação do vapor extraído, pede-se: a) as frações da vazão total extraídas; b) o trabalho específico produzido pela turbina; c) o rendimento do ciclo regenerativo (compare-o com o do ciclo ideal de Rankine). Despreze a potência consumida pelas bombas.

Ciclo com regeneração





Determinação das entalpias específicas

$$h_4 = 3479,0 \text{ kJ/kg}$$

$$h_a = 2793,0 \text{ kJ/kg} \quad h_{a'} = 693,3 \text{ kJ/kg}$$

$$h_b = 2487,0 \text{ kJ/kg} \quad h_{b'} = 435,4 \text{ kJ/kg}$$

$$h_k = 2026,0 \text{ kJ/kg} \quad h_1 = 110,5 \text{ kJ/kg}$$

a) Extrações de vapor

$$y_1 = \frac{h_{a'} - h_{b'}}{h_a - h_{b'}} = 0,1093$$

$$y_2 = \frac{(1 - \alpha_1)(h_{b'} - h_1)}{h_b - h_1} = 0,1220$$

b) Trabalho específico da turbina

$$w_t = (h_4 - h_a) + (1 - y_1)(h_a - h_b) + (1 - y_1 - y_2)(h_b - h_k)$$

ou

$$w_t = (h_4 - h_k) - y_1(h_a - h_k) - y_2(h_b - h_k)$$

$$w_t = 1313 \text{ kJ/kg}_{\text{vapor}}$$

c) $\eta_{reg} = \frac{w_t}{h_4 - h_{a'}} = 0,471$ (*desprezando bombas*)

$$\eta = \frac{h_4 - h_k}{h_4 - h_1} = 0,432 \rightarrow \frac{\Delta\eta}{\eta} = 0,09$$

→ Rendimento para o ciclo sem regeneração