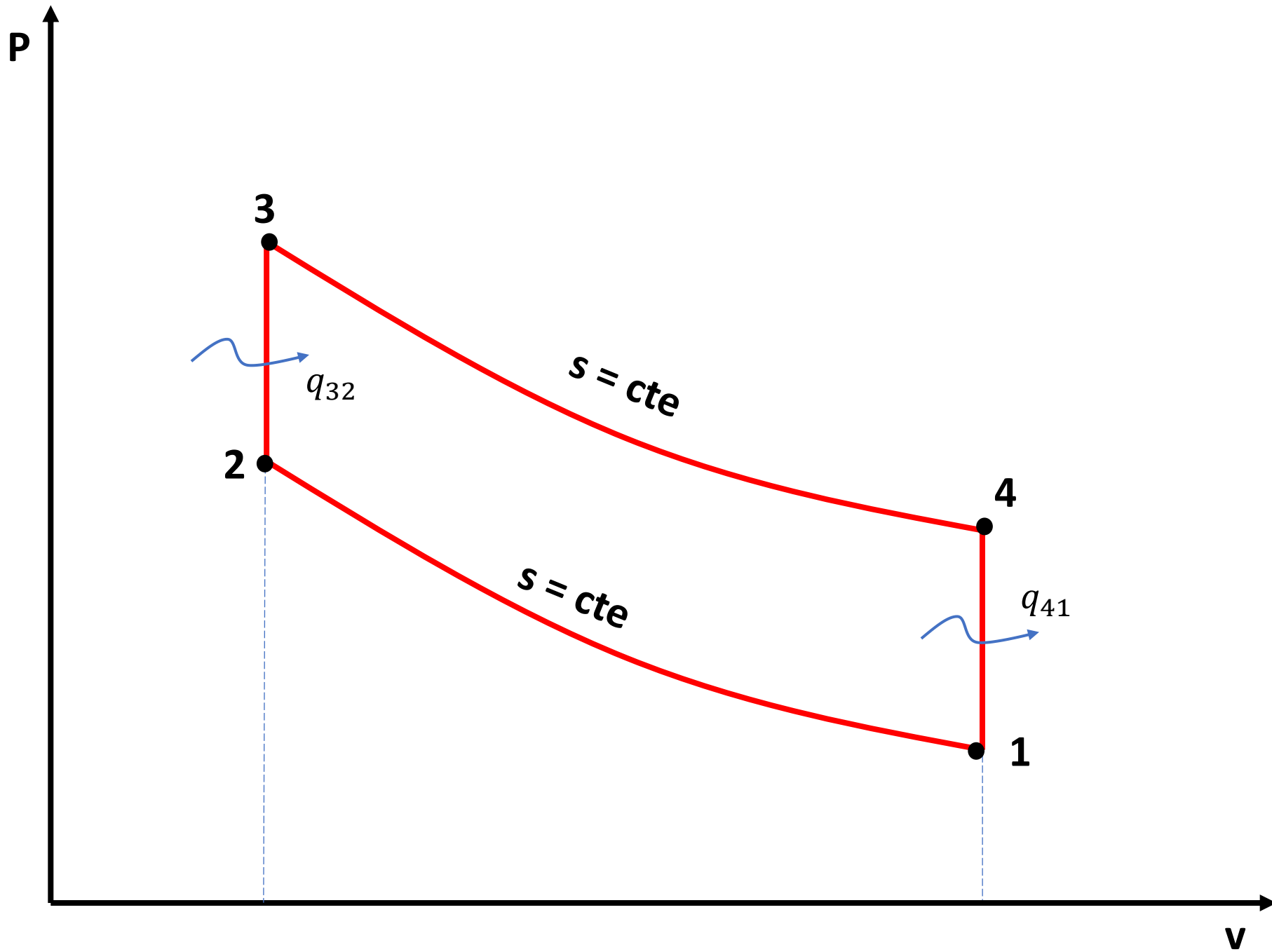


Termodinâmica I

Exercícios

Ciclos de potência - Gás

1) Um ciclo Otto ideal tem uma relação de compressão de 8. No começo do processo de compressão o ar está a 100 kPa e 17 °C. São transferidos 800 kJ/kg para o ar durante o processo de transferência de calor a volume constante. Levando em conta a variação dos calores específicos do ar com a temperatura, determine: a) a temperatura e pressão máximas atingidas durante o ciclo; b) o trabalho líquido realizado; c) a eficiência térmica do ciclo; d) a pressão média efetiva para o ciclo.



a)

$$T_1 = 290K \longrightarrow u_1 = 206,91 \text{ kJ/kg}$$
$$v_{r1} = 676,1$$

$$1 \rightarrow 2: s = cte$$

$$\frac{v_{r2}}{v_{r1}} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{r} \rightarrow v_{r2} = 84,51 \rightarrow T_2 = 652 \text{ K} \quad e \quad u_2 = 475,11 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{P_2 v_2}{T_2} = \frac{P_1 v_1}{T_1} \rightarrow P_2 = P_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \left(\frac{v_1}{v_2} \right) \rightarrow P_2 = 1799,7 \text{ kPa}$$

$$2 \rightarrow 3: v = cte$$

$$q_{23} - \cancel{w_{23}} = u_3 - u_2 \quad u_3 = 1275,11 \text{ kJ/kg} \quad T_3 = 1575,1K \quad v_{r3} = 6,108$$

$$\frac{P_2 v_2}{T_2} = \frac{P_3 v_3}{T_3} \rightarrow P_3 = 4,347 \text{ MPa}$$

b)

3 → 4: $s = cte$

$$\frac{v_{r4}}{v_{r3}} = \frac{v_4}{v_3} = r \rightarrow v_4 = 48,864 \rightarrow T_4 = 795,6K \quad e \quad u_4 = 488,74 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{P_2 v_2}{T_2} = \frac{P_1 v_1}{T_1} \rightarrow P_2 = P_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \left(\frac{v_1}{v_2} \right) \rightarrow P_2 = 1799,7 \text{ kPa}$$

4 → 1: $v = cte$

$$q_{41} - \cancel{w_{41}}^0 = u_1 - u_4 \quad q_{41} = -381,38 \text{ kJ/kg}$$

assim:

$$w_{liquido} = q_{32} - |q_{41}| = 418,17 \text{ kJ/kg}$$

c)

3 → 4: $s = cte$

$$\eta = \frac{w_{liquido}}{q_{32}} = \frac{418,17 \text{ kJ/kg}}{800 \text{ kJ/kg}} = 0,523$$

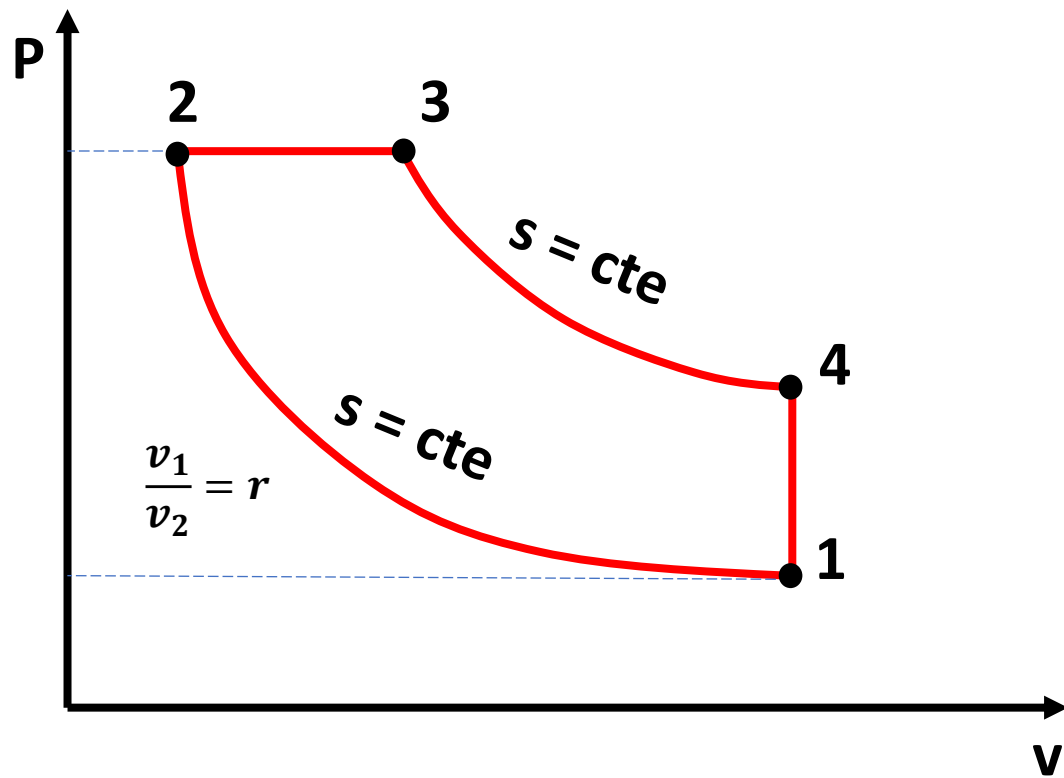
d)

$$p_{me} = \frac{w_{liquido}}{v_1 - v_2} = \frac{w_{liquido}}{v_1 \left(1 - \frac{1}{r}\right)}$$

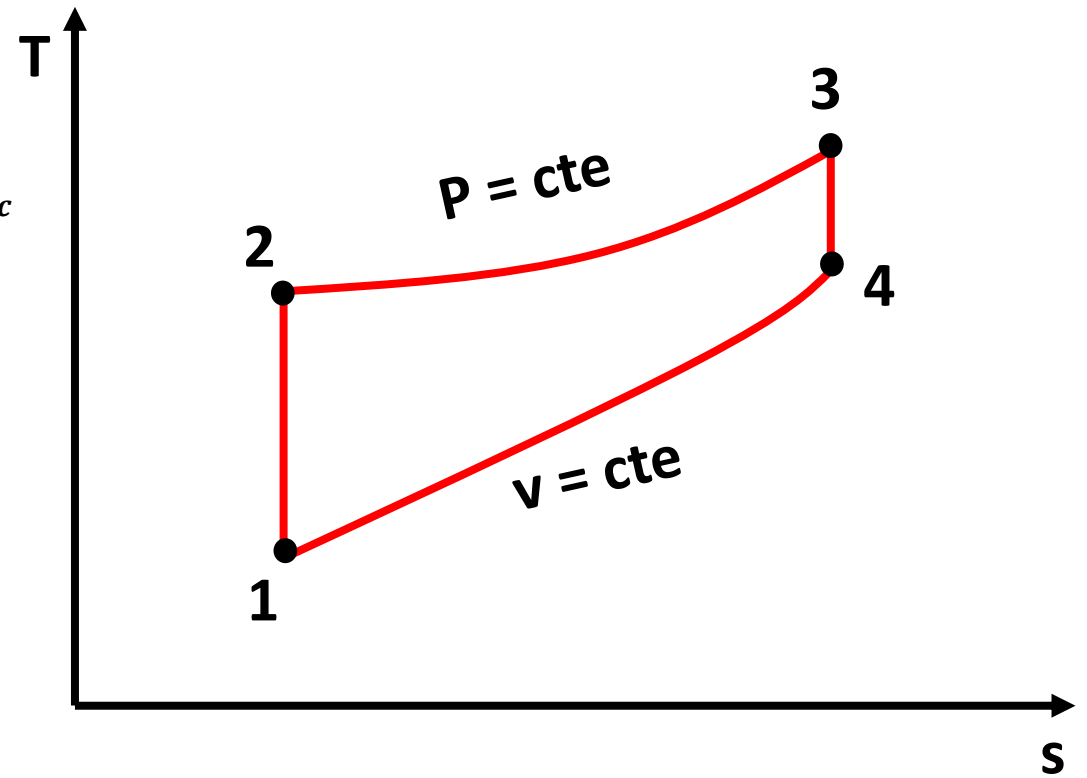
$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{0,287 \text{ kPa} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kgK}} \cdot 290 \text{ K}}{100 \text{ kPa}} = 0,832 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$p_{me} = 574,4 \text{ kPa}$$

- 3) No começo do processo de compressão de um ciclo Diesel padrão a ar, operando com uma relação de compressão de 18, a temperatura é de 300 K e a pressão é 0,1 MPa. A relação r_c é igual a 2. Determine: a) a temperatura e pressão no final de cada processo do ciclo; b) o rendimento térmico; c) a pressão média efetiva.



$$\frac{v_3}{v_2} = r_c$$



a)

$$T_1 = 300K \longrightarrow u_1 = 214,07 \text{ kJ/kg}$$
$$v_{r1} = 621,2$$

$$1 \rightarrow 2: s = cte$$

$$v_{r2} = \frac{v_2}{v_1} v_{r1} = \frac{v_{r1}}{r} = \frac{621,2}{18} = 34,51$$

$$T_2 = 898,3K \quad h_2 = 930,98 \text{ kJ/kg}$$

$$P_2 = P_1 \frac{T_2 v_1}{T_1 v_2} = 5,39 \text{ MPa} \quad \text{ou} \quad P_2 = P_1 \left(\frac{P_{r2}}{P_{r1}} \right)$$

Como o processo 2 \rightarrow 3 é isobárico:

$$T_3 = \frac{v_3}{v_2} T_2 = r_c T_2 = 1796,6K \quad h_3 = 1999,1 \text{ kJ/kg} \quad \mathbf{e} \quad v_3 = 3,97$$

Para a expansão isentrópica: 3 → 4

$$v_{r4} = \frac{V_4}{V_3} v_{r3} = \frac{V_4 V_2}{V_2 V_3} v_{r3} = 34,51$$

Como: $V_4 = V_1$

$$v_{r4} = \frac{r}{r_c} v_{r3} = 35,73$$

Assim:

$$u_4 = 664,3 \text{ kJ/kg}$$

$$T_4 = 887,7 \text{ K}$$

$$P_4 = \frac{P_1 T_4}{T_1} = 0,3 \text{ MPa}$$

b)

$$\eta = 1 - \frac{q_{41}}{q_{23}} = 1 - \frac{(u_4 - u_1)}{(h_3 - h_2)} = 0,578$$

c)

$$pme = \frac{W_{ciclo}}{v_1 - v_2} = \frac{W_{ciclo}}{v_1 \left(1 - \frac{1}{r}\right)}$$

$$W_{ciclo} = q_{23} - q_{41} = (h_3 - h_2) - (u_4 - u_1)$$

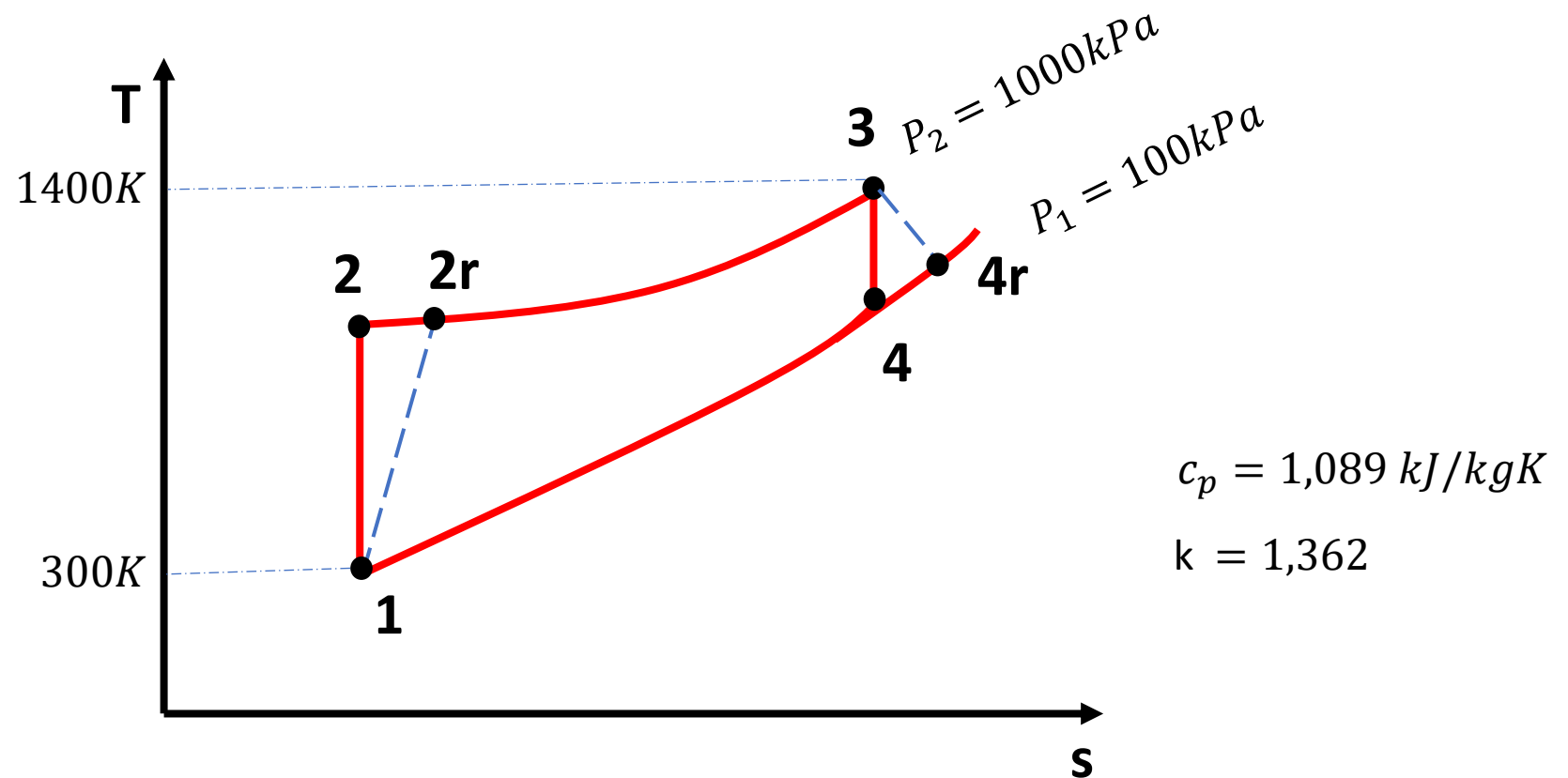
$$W_{ciclo} = 617,9 \text{ kJ/kg}$$

$$v_1 = \frac{\left(\frac{\bar{R}}{\bar{M}}\right) T_1}{P_1} = 0,861 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Assim:

$$pme = 0,76 \text{ MPa}$$

- 4) Considere um ciclo ideal de Brayton operando com ar que entra no compressor a 100 kPa e 300 K, com uma vazão de $5 \text{ m}^3/\text{s}$. a relação de pressões do compressor é 10. A temperatura de entrada na turbina é 1400 K. Determine: a) a eficiência térmica do ciclo; b) a relação entre o trabalho produzido pela turbina e consumido pelo compressor; c) a potência líquida gerada pelo ciclo em kW.



Determinação dos estados termodinâmicos

$$\mathbf{1} \quad T_1 = 300K \quad P_1 = 100 \text{ kPa}$$

$$\mathbf{2} \quad P_2 = 1000 \text{ kPa} \quad s_1 = s_2$$

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

$$T_2 = 553,2K$$

$$\mathbf{3} \quad T_3 = 1400K \quad P_3 = 1000 \text{ kPa}$$

$$\mathbf{4} \quad P_4 = 100 \text{ kPa} \quad s_4 = s_3$$

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

$$T_4 = 759,2K$$

a)

$$\eta = \frac{\left(\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} \right) - \left(\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} \right)}{\frac{\dot{Q}}{\dot{m}}} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)}$$

$$\eta = \frac{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)}{(T_3 - T_2)} = 0,458 \text{ (45,8\%)}$$

b)

$$r_w = \frac{\left(\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}}\right)}{\left(\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}}\right)} = \frac{(h_3 - h_4)}{(h_2 - h_1)} = \frac{(T_3 - T_4)}{(T_2 - T_1)} = 2,53$$

$$\dot{W}_c = 0,395\dot{W}_t$$

c)

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{ar}(h_3 - h_4) = \rho_1 \dot{V}_1 c_p (T_3 - T_4)$$

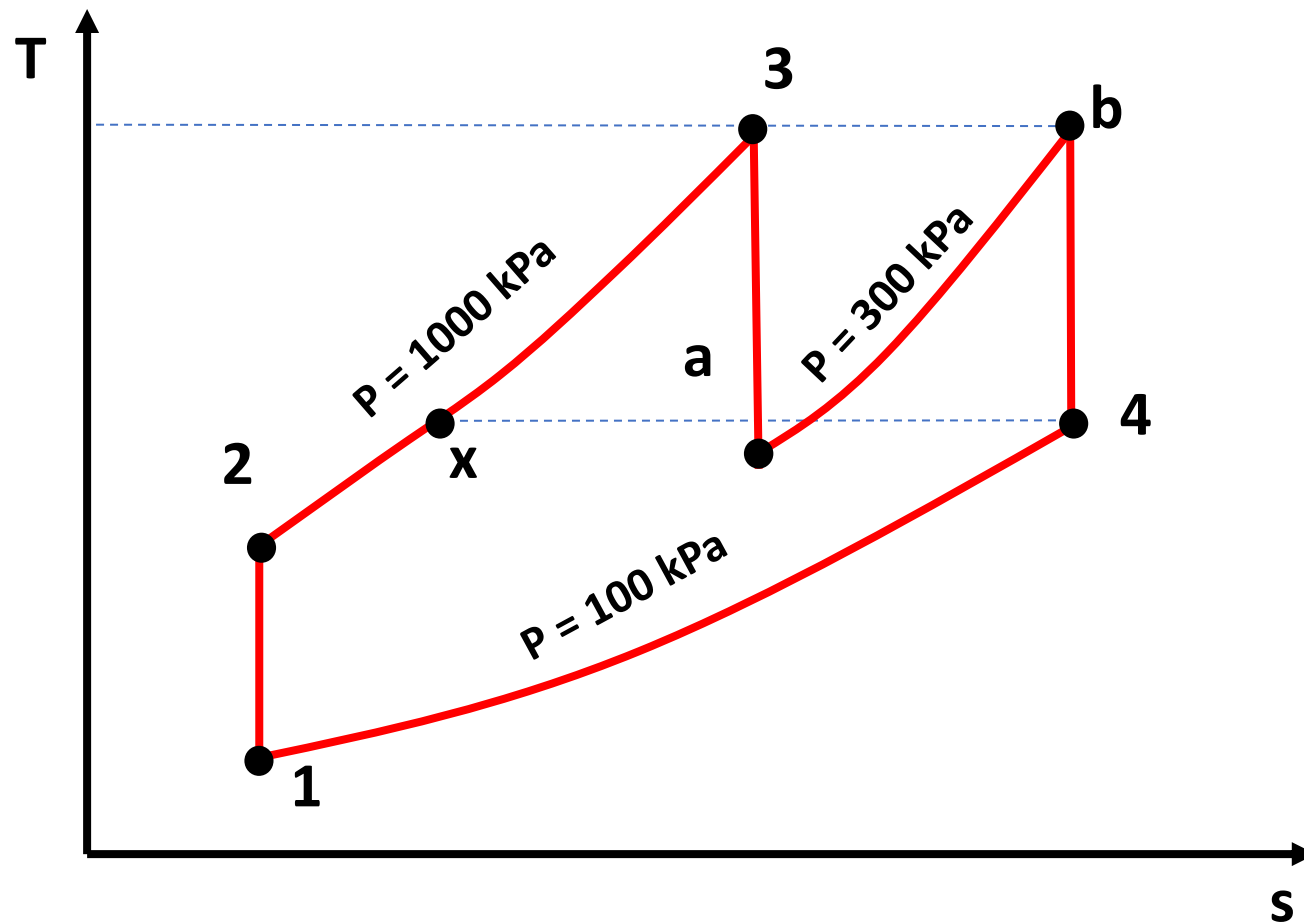
$$\rho_1 = \frac{P_1}{R_{ar} T_1} = \frac{100 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}}{\left(\frac{8314 \text{ N} \cdot \text{m}}{28,97 \text{ kg} \cdot \text{K}}\right) (300 \text{ K})} = 1,16 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_{ar} = \rho_1 \dot{V}_1 = 1,16 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 5,807 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{W}_t = 5,807 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,089 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot (1400 - 759,2)$$

$$\left. \begin{array}{l} \dot{W}_t = 4052,6 \text{ kW} \\ \dot{W}_c = 1601,2 \text{ kW} \end{array} \right\} \dot{W}_u = 2451,4 \text{ kW}$$

7) Retome o Exercício 4 e considere que o ar entra no compressor, a 100 kPa e 300K, e seja comprimido até 1000 kPa. A temperatura na entrada do primeiro estágio da turbina é 1400 K, sendo a expansão isentrópica nos dois estágios, com reaquecimento isobárico a 300 kPa. Determine a eficiência térmica do ciclo, admitindo a incorporação de um regenerador com efetividade 100 %.



Obtenção das entalpias em a, b e 4

$$s_3 = s_a \rightarrow P_{ra} = P_{r3} \frac{P_a}{P_3} = 450,5 \frac{300 \text{ kPa}}{1000 \text{ kPa}} = 135,15$$
$$h_a = 1095,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

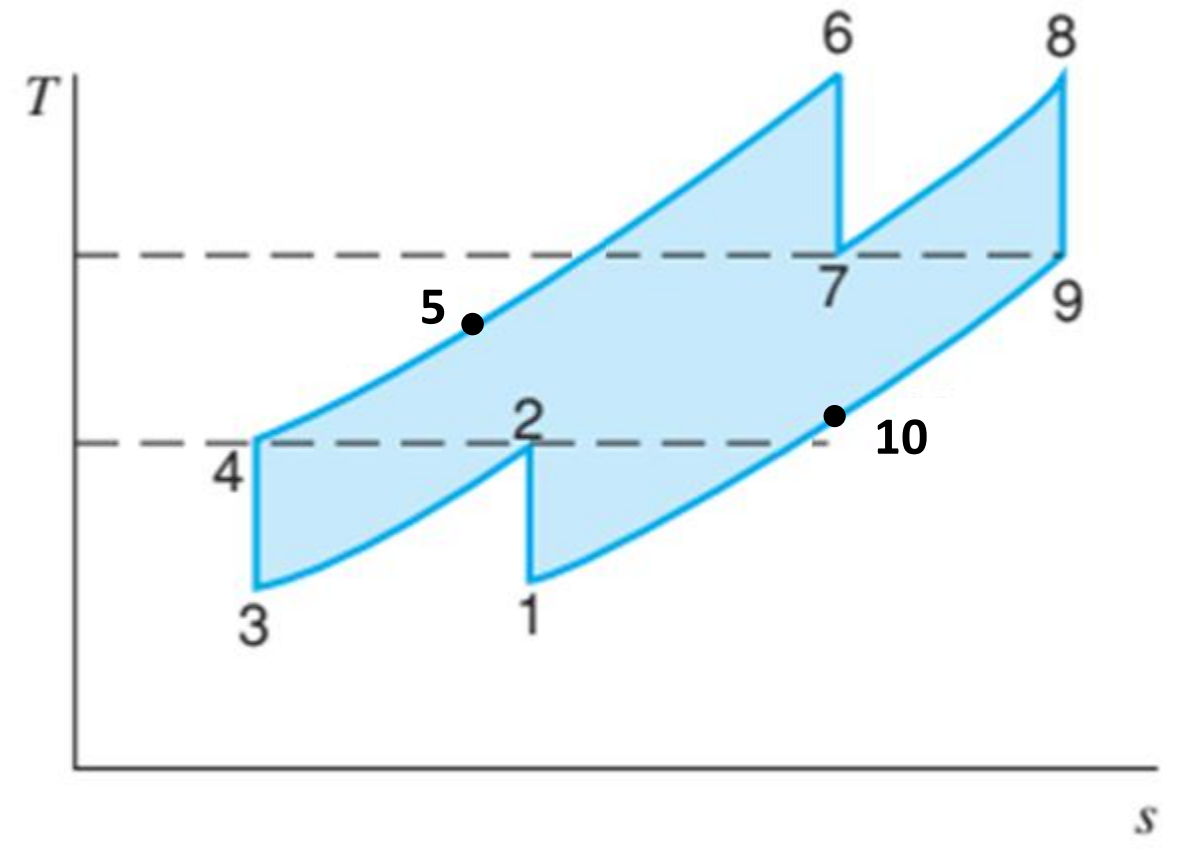
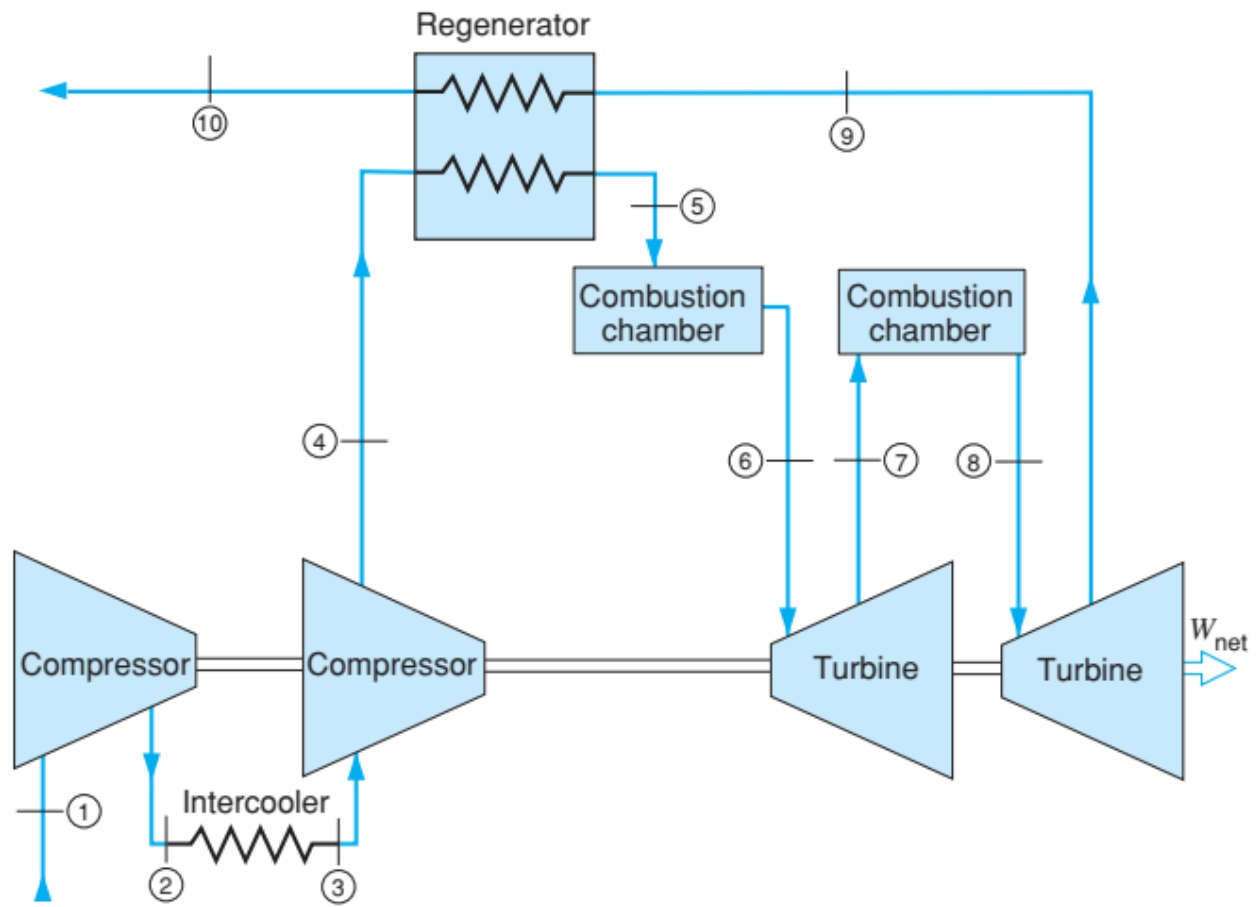
$$h_b = h_3, \text{ pois } T_b = T_3 \text{ (Gás perfeito)}$$

$$s_b = s_4 \rightarrow P_{r4} = P_{rb} \frac{P_4}{P_b} = 450,5 \frac{100 \text{ kPa}}{300 \text{ kPa}} = 150,17$$
$$h_4 = 1127,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Como $\eta_{reg} = 100\% \rightarrow h_x = h_4$

$$\eta = \frac{(h_3 - h_a) + (h_b - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_x) + (h_b - h_a)} = 0,654 \text{ (65,4\%)}$$

8) Ar entra num compressor de um ciclo Brayton a 100 kPa e 300 K, com uma vazão mássica de 5,807 kg/s. A relação de pressão total do compressor de duplo estágio, assim como a relação de pressão total da turbina de duplo estágio é 10. O reaquecedor e o resfriador intermediário operam a 300 kPa. A temperatura na entrada dos dois estágios da turbina é 1400 K, a temperatura na entrada do segundo estágio do compressor é 300 K, e a efetividade do regenerador é 80 %. Determine: a) a eficiência térmica do ciclo; b) a relação entre o trabalho produzido pela turbina e consumido pelo compressor; c) a potência líquida produzida pelo ciclo, em kW.



Definição dos valores das entalpias

$$h_1 = h_3, \quad \text{pois } T_1 = T_3 \quad h_1 = 300,19 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = 411,3 \text{ kJ/kg} \quad (s_1 = s_2)$$

$$h_4 = 423,8 \text{ kJ/kg} \quad (s_4 = s_3)$$

$$h_6 = h_8, \quad \text{pois } T_6 = T_8 \quad h_1 = 300,19 \text{ kJ/kg}$$

$$h_7 = 1095,9 \text{ kJ/kg} \quad (s_7 = s_8)$$

$$h_9 = 1127,6 \text{ kJ/kg} \quad (s_8 = s_9)$$

Para o estado 5

$$\eta_{reg} = \frac{(h_5 - h_4)}{(h_9 - h_4)}$$

$$h_5 = h_4 + \eta_{reg}(h_9 - h_4) = 986,8 \text{ kJ/kg}$$

Rendimento Térmico

$$\text{a) } \left(\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} \right) = (h_6 - h_7) + (h_8 - h_9) = 807,3 \text{ kJ/kg}$$

$$\left(\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} \right) = (h_4 - h_3) + (h_2 - h_1) = 234,7 \text{ kJ/kg}$$

$$\left(\frac{\dot{Q}}{\dot{m}} \right) = (h_6 - h_5) + (h_8 - h_7) = 948,1 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta = \frac{\dot{W}_t - \dot{W}_c}{\dot{Q}} = 0,604$$

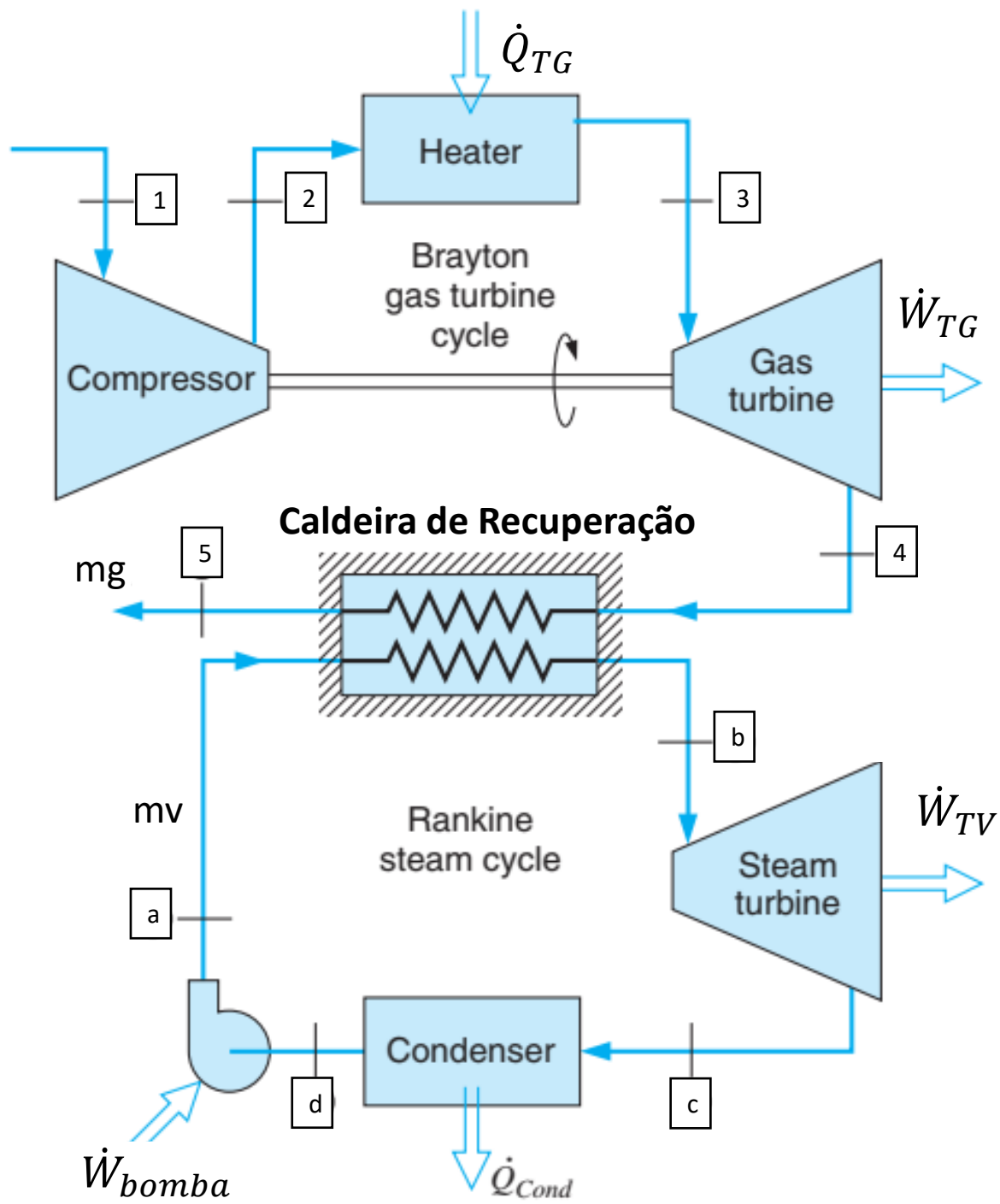
$$\text{b) } r_w = \frac{\dot{W}_t}{\dot{W}_c} = 3,44$$

$$\text{c) } \dot{W}_{\text{líquido}} = \dot{W}_t - \dot{W}_c = 3325 \text{ kW}$$

Exercício: Ciclo Combinado

Uma unidade de potência com ciclo combinado (turbina a gás e a vapor) fornece uma potência líquida de 10 MW. Ar entra no compressor da turbina a gás a 100 kPa e 300 K, sendo comprimido até 1200 kPa. A eficiência isentrópica do compressor é 84 %. As condições na entrada da turbina são 1200 kPa e 1400 K. Ar expande-se na turbina até 100 kPa. O rendimento isentrópico da turbina é 88 %. Após a turbina, o ar passa pelo gerador de vapor do ciclo a vapor, sendo descarregado no ambiente a 480 K. O vapor gerado entra na turbina a vapor a 80 bar e 400°C, expandindo-se até a pressão do condensador que é 0,08 bar. Água na fase líquida entra na bomba a 0,08 bar. A turbina e a bomba têm rendimentos isentrópicos de 90% e 80%, respectivamente. Determine:

- as vazões mássicas de ar e vapor (kg/s);
- a taxa de calor transferida na turbina a gás;
- as potências líquidas nas turbinas a gás e a vapor;
- a eficiência térmica da unidade de potência



Propriedades Termodinâmicas			
seção	T (K)	P(kPa)	h (kJ/kg)
1	300,0	100	300,2
2	661,1	1200	671,7
3	1400,0	1200	1515,4
4	831,8	100	857,4
5	479,9	100	482,5
a	315,4	8000	184,0
b	673,0	8000	3138,3
c	314,6	8	2104,8
d	314,6	8	173,9

a) Balanço na caldeira de recuperação

$$m_g(h_4 - h_5) = m_v(h_b - h_a)$$

Potência total gerada

$$m_g[(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)] + m_v[(h_b - h_c) - (h_a - h_d)] = 10000 \text{ kW}$$

$$m_g = 24,010 \text{ kg/s}$$

$$m_v = 3,042 \text{ kg/s}$$

c) $\dot{W}_{TG} = m_g[(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)] = 6887 \text{ kW}$

$$\dot{W}_{TV} = m_v[(h_b - h_c) - (h_a - h_d)] = 3113 \text{ kW}$$

b) $\dot{Q}_{TG} = m_g(h_3 - h_2) = 20258 \text{ kW}$

d) $\eta = \frac{\dot{W}_{TG} + \dot{W}_{TV}}{\dot{Q}_{TG}} = 0,494$

$$\dot{Q}_R = \dot{m}_g(h_4 - h_5) = 24 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (857,1 - 482,5) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 8994,1 \text{ kW}$$