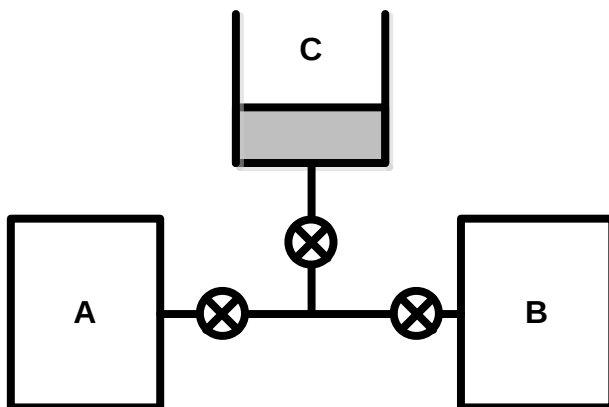


Questão 1 (5,0 pontos). Um tanque rígido A com volume de $0,6 \text{ m}^3$ contém 3 kg de água a 120°C e um tanque rígido B contém $0,4 \text{ m}^3$ com água a 600 kPa e 200°C . Os dois tanques estão conectados ao conjunto pistão-cilindro C, que se encontra vazio inicialmente e com as válvulas fechadas (vide Figura). A pressão para que o pistão seja elevado é de 800 kPa. As válvulas são então abertas vagarosamente e calor é transferido até que a água nos tanques A, B e C atinja o seu estado final a 250°C . Para este processo, calcule:

- 1) A massa total da água [kg] (0,5 ponto)
- 2) A energia interna total da água no seu estado inicial [kJ] (1,0 ponto)
- 3) O volume final ocupado pela água no conjunto pistão-cilindro C [m^3] (1,0 ponto);
- 4) A massa final de água no conjunto pistão-cilindro C [kg] (0,5 ponto)
- 5) O trabalho realizado no processo em [kJ] (1,0 ponto);
- 6) O calor transferido no processo [kJ] (1,0 ponto);



GABARITO:

Aplicando a conservação de massa no sistema tanques A+B+C:

$$m_2 = m_{1A} + m_{1B}; m_{1A} = 3 \text{ kg}$$

Para o estado inicial no tanque B: $p_{1B}=600 \text{ kPa}$ e $T_{1B}=200^\circ\text{C} \rightarrow$ vapor superaquecido. Logo: $v_{1B}=0,35202 \text{ m}^3/\text{kg}$ e $u_{1B}=2638,91 \text{ kJ/kg}$ e, portanto:

$$v_{1B} = \frac{V_B}{m_{1B}} \Rightarrow m_{1B} = \frac{V_B}{v_{1B}} = 0,4/0,35202 = 1,1363 \text{ kg}$$

Logo:

$$m_2 = 3 + 1,1363 = 4,1363 \text{ kg}$$

O estado final dos tanques A+B+C é: $p_2=800 \text{ kPa}$ e $T_2=250^\circ\text{C} \rightarrow$ vapor superaquecido. Logo $v_2=0,29314 \text{ kg/m}^3$ e $u_2= 2715,46 \text{ kJ/kg}$ e, portanto:

$$v_2 = \frac{V_2}{m_2} \Rightarrow V_2 = v_2 * m_2 = 0,29314 \times 4,1363 = 1,2125 \text{ m}^3$$

$$\text{Como } V_2=V_A+V_B+V_C=1+V_C \rightarrow V_C=V_2-1=1,2125-1=0,2125 \text{ m}^3$$

$$v_{2,C} = \frac{V_C}{m_C} \Rightarrow m_C = \frac{V_C}{v_{2,C}} = \frac{0,2125}{0,29314} = 0,73 \text{ kg}$$

Sendo o processo no tanque C a pressão constante, temos:

$$W_{1-2} = \int_1^2 p dV = p * (V_{2C} - V_{1C}) = 800 \times (0,2125) = 170 \text{ kJ}$$

Aplicando a 1ª Lei para o sistema dos tanques A+B+C:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = m_2 u_2 - (m_{1A} u_{1A} + m_{1B} u_{1B}) = Q_{1-2} - W_{1-2}$$

O estado 1 no tanque A é:

$$v_{1A} = \frac{V_A}{m_{1A}} = \frac{0,6}{3} = 0,2 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ e } T_{1A} = 120^\circ\text{C}$$

Dessa forma, o estado 1 no tanque A está na região de saturação, logo:

$$x_{1A} = \frac{v_{1A} - v_{l,1A}}{v_{v,1A} - v_{l,1A}} = \frac{0,2 - 0,001060}{0,89186 - 0,001060} = 0,2233 (22,33\%)$$

$$u_{1A} = x_{1A}u_{v,1A} + (1 - x_{1A})u_{l,1A} = (0,2233 \times 2529,24) + (1 - 0,2233) \times 503,48 \\ = 955,83 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{1-2} = m_2u_2 - (m_{1A}u_{1A} + m_{1B}u_{1B}) + W_{1-2}$$

$$Q_{1-2} = (4,1363 \times 2715,46) - [(3 \times 959,90) + (1,1363 \times 2638,91)] + 170 \\ = 5523,66 \text{ kJ}$$

$$U_1 = (m_{1A}u_{1A} + m_{1B}u_{1B}) = [(3 \times 959,90) + (1,1363 \times 2638,91)] = 5.878,29 \text{ kJ}$$

Questão 2 (5,0 pontos). A planta de potência da figura combina um Ciclo Brayton e um Ciclo Rankine. Ar entra no compressor a 25°C (T_1) e 100 kPa (p_1) com uma razão de compressão igual a 14 (p_2/p_1 e p_3/p_4) e um rendimento isentrópico de 85% (η_c). A energia transferida pela câmara de combustão é de 60 MW ($\dot{Q}_H$) sendo que a temperatura na entrada da turbina é de 1250°C (T_3) e a pressão na saída é de 100 kPa (p_4) com uma eficiência isoentrópica de 87% (η_{T1}). A temperatura de saída no trocador de calor é de 200°C (T_5). Considere: as seguintes propriedades do ar como constantes: $C_p = 1,0 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$, $R=0,287 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$, $C_v=0,713 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ e $k=C_p/C_v=1,4$.

Para o ciclo motor a vapor temos que a condição de entrada na bomba é líquido saturado a 10 kPa ($p_8 = p_9$), a pressão na saída da bomba é de 12,5 MPa ($p_6=p_7$) e a eficiência isoentrópica da bomba é de 85% (η_B). A temperatura de entrada da turbina é de 500°C (T_7) a eficiência isoentrópica da turbina é de 87% (η_{T2}). Nestas condições e considerando que não há perda de pressão no trocador de calor, calcule:

- A temperatura na saída do compressor (T_2) [K] (0,5 ponto)
- A vazão mássica do ar no Ciclo Brayton $\dot{m}_{ar}$ [kg/s] (0,5 ponto)
- A temperatura na saída da turbina a gás (T_4) [K] (0,5 ponto)
- A potência líquida do Ciclo Brayton $\dot{W}_{líquido}$ [kW] (0,5 ponto)
- A vazão mássica da água no Ciclo Rankine $\dot{m}_{água}$ [kg/s] (1,0 ponto)
- A potência da bomba $\dot{W}_{bomba}$ [kW] (0,5 ponto)
- A potência da turbina a vapor $\dot{W}_{turbina}$ [kW] (0,5 ponto)
- A eficiência total do ciclo combinado $\eta_{ciclo\ combinado}$ [%] (1,0 pontos)

$$\dot{w}_{compressor,real} = \frac{\dot{w}_{compressor,ideal}}{\eta_c} = \frac{-335,57}{0,85} = -394,79 \text{ kJ/kg}$$

Logo:

$$\dot{w}_{compressor,real} = \frac{\dot{W}_{compressor,real}}{\dot{m}_{ar}} = h_1 - h_2 = C_p(T_1 - T_2)$$

$$\dot{w}_{compressor,real} = C_p(T_1 - T_2) \Rightarrow T_2 = T_1 - \frac{\dot{w}_{compressor,real}}{C_p}$$

$$T_2 = 298,15 - \frac{-394,79}{1,0} = 692,94K$$

Para o estado 3: $T_3=1250^{\circ}C=1523,15 K$

Aplicando a 1ª Lei para a câmara de combustão:

$$\dot{Q}_{câmara} = \dot{m}_{ar}(h_3 - h_2) = \dot{m}_{ar}C_p(T_3 - T_2) \Rightarrow \dot{m}_{ar} = \frac{\dot{Q}_{câmara}}{C_p(T_3 - T_2)}$$

$$\dot{m}_{ar} = \frac{\dot{Q}_{câmara}}{C_p(T_3 - T_2)} = \frac{60.000}{1,0 \times (1523,15 - 692,94)} = 72,27 \text{ kg/s}$$

Para o estado 4 no processo ideal na turbina 1(isoentrópico; $s_4=s_3$).

$$\frac{T_{4s}}{T_3} = \left(\frac{p_{4s}}{p_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} \Rightarrow T_{4s} = T_3 \left(\frac{p_{4s}}{p_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 1523,15 \times \left(\frac{1}{14}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 716,60 K$$

Aplicando a 1ª Lei para a turbina 1:

$$\begin{aligned}\dot{w}_{turbina1,ideal} &= \frac{\dot{W}_{turbina1,ideal}}{\dot{m}_{ar}} = C_p(T_3 - T_{4s}) = 1,0 \times (1523,15 - 716,60) \\ &= 806,55 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

$$\dot{w}_{turbina1,real} = \dot{w}_{turbina1,ideal} * \eta_{T1} = 806,55 \times 0,87 = 701,70 \text{ kJ/kg}$$

Logo:

$$\dot{w}_{turbina1,real} = h_3 - h_4 = C_p(T_3 - T_4) \Rightarrow T_4 = T_3 - \frac{\dot{w}_{turbina1,real}}{C_p}$$

$$T_4 = 1523,15 - \frac{701,70}{1,0} = 821,45 \text{ K}$$

Para a bomba no ciclo motor a vapor, o trabalho ideal fornecido a bomba pode ser aproximado por:

$$\dot{w}_{bomba,ideal} = h_9 - h_6 = v_9(p_9 - p_6)$$

Para o estado: $p_9 = 10 \text{ kPa}$ e líquido saturado $\rightarrow v_9 = 0,001010 \text{ m}^3/\text{kg}$ e $h_9 = 191,81 \text{ kJ/kg}$

Logo:

$$\dot{w}_{bomba,ideal} = 0,001010 \times (10 - 12.500) = -12,62 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{w}_{bomba,real} = \frac{\dot{w}_{bomba,ideal}}{\eta_B} = \frac{-12,62}{0,85} = -14,85 \text{ kJ/kg}$$

Portanto:

$$\begin{aligned} \dot{w}_{bomba,real} = h_9 - h_6 \Rightarrow h_6 &= h_9 - \dot{w}_{bomba,real} = 191,81 - (-14,85) \\ &= 206,66 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Para o estado 7: $p_7 = 12,5 \text{ Mpa}$ e $T_7 = 500^\circ\text{C} \rightarrow$ vapor superaquecido $\rightarrow h_7 = 3341,08 \text{ kJ/kg}$; $s_7 = 6,4704 \text{ kJ/kg.K}$.

Para o estado 5: $T_5 = 200^\circ\text{C} = 498,15 \text{ K}$.

Aplicando a 1ª Lei no trocador de calor:

$$\dot{m}_{vapor} = \dot{m}_{ar} \frac{(h_4 - h_5)}{(h_7 - h_6)} = \dot{m}_{ar} \frac{C_p(T_4 - T_5)}{(h_7 - h_6)}$$

$$\dot{m}_{vapor} = \dot{m}_{ar} \frac{C_p(T_4 - T_5)}{(h_7 - h_6)} = 72,27 \times \frac{1,0 \times (821,45 - 498,15)}{(3341,08 - 206,66)} = 7,454 \text{ kg/s}$$

$$\dot{W}_{bomba,real} = \dot{m}_{vapor} * \dot{w}_{bomba,real} = 7,454 \times -14,85 = -110,69 \text{ kJ/kg}$$

No processo ideal na turbina 2 (isoentrópico): $s_8 = s_7 = 6,4704 \text{ kJ/kg.K}$ e $p_8 = 10 \text{ kPa}$
 → região de saturação

Logo:

$$x_8 = \frac{(s_8 - s_{l,8})}{(s_{v,8} - s_{l,8})} = \frac{(6,4704 - 0,6492)}{(8,1501 - 0,6492)} = 0,7761 (77,61\%)$$

$$h_{8s} = h_{v,8} * x_8 + (1 - x_8)h_{l,8} = 2584,63 \times 0,7761 + (1 - 0,7761) \times 191,81 \\ = 2048,88 \text{ kJ/kg}$$

Aplicando a 1ª Lei para a turbina 2:

$$\dot{w}_{turbina\ 2,ideal} = h_7 - h_{8s} = 3341,08 - 2048,88 = 1292,20 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{w}_{turbina2,real} = \dot{w}_{turbina2,ideal} * \eta_{T2} = 1292,20 \times 0,87 = 1124,21 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{W}_{turbina2,real} = \dot{m}_{vapor} * \dot{w}_{turbina2,real} = 7,454 \times 1124,21 = 8359,84 \text{ kJ/s}$$

O trabalho líquido do ciclo combinado é dado por:

$$\dot{W}_{líquido} = \dot{m}_{ar} [\dot{w}_{turbina1,real} + \dot{w}_{compressor,real}] \\ + \dot{m}_{vapor} [\dot{w}_{turbina2,real} + \dot{w}_{bomba,real}]$$

$$\begin{aligned}\dot{W}_{\text{líquido}} &= 72,27 \times [701,70 - 394,79] + 8,248 \times [1124,21 - 14,85] \\ &= 22.129,80 + 9150,00 = 31.279,80 \text{ kW}\end{aligned}$$

Portanto:

$$\eta_{\text{ciclo combinado}} = \frac{\dot{W}_{\text{líquido}}}{\dot{Q}_{\text{câmara}}} = \frac{31.279,80}{60.000} = 0,529 \text{ (52,9\%)}$$