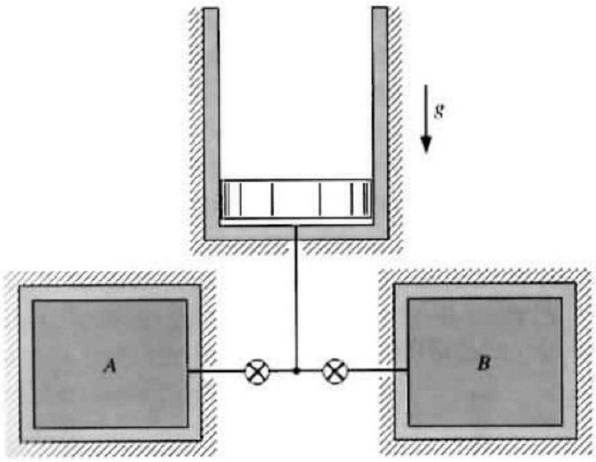
PME3398 – Fundamentos de Termodinâmica e Transferência de Calor
Professores Bruno Carmo e Antonio Pacífico

Lista de exercícios resolvidos 03 – 1ª Lei para Sistemas

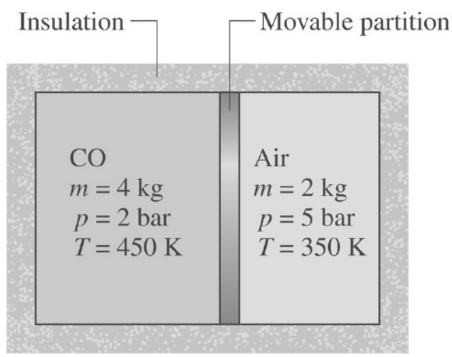
1- Em uma pia com 5 L de água a 70 °C são colocadas panelas de alumínio com massa de 1 kg, 1 kg de talheres (aço) e 1 kg de copos de vidro, todos a 20 °C. Qual é a temperatura final, desprezando-se qualquer troca de calor e trabalho com o ambiente?

2- Um tanque rígido isolado contém, inicialmente, 1,4 kg de uma mistura saturada de líquido e vapor d'água a 200 °C. Nesse estado, 25% do volume é ocupado pelo líquido e o resto pelo vapor. Um resistor elétrico é então colocado no tanque e ligado. Observa-se que depois de 20 minutos o tanque contém apenas vapor d'água saturado. Determine:
   (a) O volume do tanque;
   (b) A temperatura final;
   (c) A potência elétrica do resistor.

3- O tanque rígido A tem volume igual a 0,6 m³ e contém 3 kg de água a 120 °C, e o tanque rígido B tem volume igual a 0,4 m³ e contém água a 600 kPa e 200 °C. Os tanques estão conectados ao conjunto cilindro-pistão inicialmente vazio com as válvulas fechados como mostrado na figura. O pistão do conjunto inicia seu movimento quando a pressão interna se torna igual a 800 kPa. As válvulas são abertas vagarosamente e calor é transferido para a água até que se atina um estado uniforme com temperatura igual a 250 °C. Determine:
   (a) O volume total no estado final;
   (b) O trabalho realizado;
   (c) O calor transferido no processo.



4- Dois quilogramas de ar, inicialmente a 5 bar e 350 K, e 4 kg de monóxido de carbono (CO), inicialmente a 2 bar e 450 K, estão confinados em lados opostos de um reservatório rígido e perfeitamente isolado por meio de uma divisória, como ilustrado na figura abaixo. A divisória é livre para se mover e permite transferência de calor de um gás para o outro sem o acúmulo de energia na própria divisória. O ar e o CO se comportam como gases ideais com a razão de calores específicos constante, dada por k = 1,395. Determine, no equilíbrio:
   (a) A temperatura, em K;
   (b) A pressão, em bar;
   (c) O volume ocupado por cada gás, em m³.



PME3398 – Fundamentos de Termodinâmica e Transferência de Calor
Professores Bruno Carmo e Antonio Pacífico

Soluções da Lista de Exercícios 03

1) No equilíbrio, toda a matéria dentro da pia (água, talheres, panelas e copos) devem ter a mesma temperatura. Como vamos desprezar a troca de calor com o ambiente, então o calor retirado da água, que está a uma temperatura mais alta, deve ser recebido pelos outros materiais.

$$Q_{\text{água}} = -Q_{\text{materiais}} \quad \Rightarrow \quad m_a c_a (T_f - T_{ia}) = -[m_t c_t (T_f - T_{it}) + m_p c_p (T_f - T_{ip}) + m_c c_c (T_f - T_{ic})]$$

$$\therefore \quad T_f = \frac{m_a c_a T_{ia} + m_t c_t T_{it} + m_p c_p T_{ip} + m_c c_c T_{ic}}{m_a c_a + m_t c_t + m_p c_p + m_c c_c}$$

Das tabelas A.3 e A.4 obtemos os valores dos calores específicos: $c_a = 4{,}184\,\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$, $c_p = 0{,}9\,\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$, $c_t = 0{,}46\,\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$ e $c_c = 0{,}8\,\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$. Substituindo os valores numéricos,

$$T_f = \frac{5 \times 4{,}184 \times 70 + 1 \times 0{,}46 \times 20 + 1 \times 0{,}9 \times 20 + 1 \times 0{,}8 \times 20}{5 \times 4{,}184 + 1 \times 0{,}46 + 1 \times 0{,}9 + 1 \times 0{,}8} = 65{,}3\,^\circ\mathrm{C}$$

2) Água a $T_1 = 200\ ^\circ\mathrm{C}$, da Tab. B.1.1: $v_{l1} = 0{,}001156\,\mathrm{m^3/kg}$; $v_{v1} = 0{,}12736\,\mathrm{m^3/kg}$; $u_{l1} = 850{,}64\,\mathrm{kJ/kg}$; e $u_{lv1} = 1744{,}66\,\mathrm{kJ/kg}$.

(a) A massa total do tanque, m, pode ser calculada em função dos volumes ocupados pelas fases líquida ($\cancel{V}_l$) e vapor ($\cancel{V}_v$) no tanque no estado 1 (inicial):

$$m = \frac{\cancel{V}_{l1}}{v_{l1}} + \frac{\cancel{V} v1}{v_{v1}}$$

Por sua vez, os volumes das fases podem ser expressos em função das suas respectivas frações volumétricas (f_l para fase líquida e f_v para a fase vapor) e do volume total do tanque, $\cancel{V}$, constante, pois o tanque é rígido. Assim,

$$m = \frac{f_{l1}.\cancel{V}}{v_{l1}} + \frac{f_{v1}.\cancel{V}}{v_{v1}} \therefore \cancel{V} = \frac{m}{\left(\dfrac{f_{l1}}{v_{l1}} + \dfrac{f_{v1}}{v_{v1}}\right)}$$

Substituindo os valores numéricos:

$$\cancel{V} = \frac{1{,}4}{\left(\dfrac{0{,}25}{0{,}001156} + \dfrac{0{,}75}{0{,}12736}\right)} = 0{,}006302\,\mathrm{m^3} \cong 6{,}3\,\mathrm{L}$$

(b) Uma vez que processo é isocórico:

$$v_2 = v_1 = \frac{\cancel{V}}{m} = \frac{0{,}006302}{1{,}4} = 0{,}004501\,\mathrm{m^3/kg}$$

Como o estado 2 é de vapor saturado ($x_2 = 1$), basta procurar (por interpolação) na Tab. B.1.1 por $v_v = v_2$ e achar o valor de T_2. Procedendo desta maneira encontra-se:

$$T_2 = 370{,}9881 \text{ °C} \cong 371 \text{ °C}$$

(c) A 1^a Lei da Termodinâmica para o sistema constituído de água, com variações de energias cinética e potencial, neste caso, nulas, pois o sistema é estacionário, fica:

$$\Delta U = Q - W$$

Como o sistema é isolado, qualquer processo pelo qual ele passe será adiabático ($Q = 0$). Assim,

$$\Delta U = -W \Rightarrow W = m.(u_1 - u_2)$$

Para determinar u_1 precisamos primeiro encontrar x_1:

$$x_1 = \frac{v_1 - v_{l1}}{v_{v1} - v_{l1}} = \frac{0{,}004501 - 0{,}001156}{0{,}12736 - 0{,}001156} = 0{,}026505$$

Logo,

$$u_1 = u_{l1} + x_1.u_{lv1} = 850{,}64 + 0{,}026505.1744{,}66 = 896{,}8822 \, \text{kJ/kg}$$

A energia interna no estado 2, u_2, será a energia interna do vapor saturado à T_2. Deste modo, por interpolação, da Tab. B.1.1, obtém-se $u_2 = 2180{,}5831 \, \text{kJ/kg}$

Voltando à equação da A 1^a Lei:

$$W = 1{,}4.(896{,}8822 - 2180{,}5831) = -1797{,}1813 \, \text{kJ}$$

O valor de W acima calculado foi a energia que o sistema (água) recebeu na forma (ou modo) de trabalho. Assim, o trabalho realizado pelo resistor terá sinal inverso: $W_{resistor} = -W = 1797{,}1813 \, \text{kJ}$

Logo, a potência dissipada pelo resistor será:

$$\dot{W}_{resistor} = \frac{W_{resistor}}{\Delta t} = \frac{1797{,}1813}{20.60} = 1{,}4977 \, \text{kW} \cong 1{,}5 \, \text{kW}$$

3) Sistema. Substância: água (tabelas termodinâmicas).

1ª Lei: ${}_1Q_2 - {}_1W_2 = U_2 - U_1 + \cancel{\Delta EP} + \cancel{\Delta EC}$

Hipótese: processo quase estático $\rightarrow {}_1W_2 = \int_1^2 p \, \mathrm{d}\cancel{V}$

<u>Estado inicial</u>:

Tanque A: $\cancel{V}_A = 0{,}6 \, \text{m}^3$, $m_A = 3 \, \text{kg}$, $T_A = 120 \, \text{°C}$

$$v_A = \frac{\cancel{V}_A}{m_A} = \frac{0{,}6}{3} = 0{,}2 \, \text{m}^3/\text{kg} \quad \Rightarrow \quad \text{mudança de fase}$$

$$x_A = \frac{v_A - v_l}{v_v - v_l} = \frac{0{,}2 - 0{,}001060}{0{,}89186 - 0{,}001060} = 0{,}223$$

$$u_A = u_l + x_A u_{lv} = 503{,}48 + 0{,}223 \times 2025{,}76 = 955{,}88\,\mathrm{kJ/kg}$$

Tanque B: $\cancel{V}_B = 0{,}4\,\mathrm{m^3}$, $p_B = 600\,\mathrm{kPa}$, $T_B = 200\,°\mathrm{C} \quad \Rightarrow \quad$ vapor superaquecido

$$v_B = 0{,}35202\,\mathrm{m^3/kg} \quad \Rightarrow \quad m_B = \frac{\cancel{V}_B}{v_B} = \frac{0{,}4}{0{,}35202} = 1{,}136\,\mathrm{kg}, \qquad u_B = 2638{,}91\,\mathrm{kJ/kg}$$

Estado final: $T_2 = 250\,°\mathrm{C}$, $m_2 = m_A + m_B = 4{,}136\,\mathrm{kg}$

É preciso verificar se o pistão se movimenta ($p_2 = 800\,\mathrm{kPa}$, $\cancel{V}_2 > \cancel{V}_A + \cancel{V}_B$) ou não ($p_2 < 800\,\mathrm{kPa}$, $\cancel{V}_f = \cancel{V}_A + \cancel{V}_B$).

Admitindo que ele se movimenta: $p_2 = 800\,\mathrm{kPa} \quad \Rightarrow \quad$ vapor superaquecido.

$$v_2 = 0{,}29314\,\mathrm{m^3/kg} \quad \Rightarrow \quad \cancel{V}_2 = m_2 v_2 = 4{,}136 \times 0{,}29314 = 1{,}212\,\mathrm{m^3} > \cancel{V}_A + \cancel{V}_B = 1\,\mathrm{m^3}$$

(a) Portanto o pistão se movimenta e $\cancel{V}_2 = 1{,}212\,\mathrm{m^3}$.

(b) O trabalho realizado vale:

$$_1W_2 = \int_{\cancel{V}_1}^{\cancel{V}_2} p\,\mathrm{d}\cancel{V} = p[\cancel{V}_2 - (\cancel{V}_A + \cancel{V}_B)] = 800 \times (1{,}212 - 1) = 169{,}9\,\mathrm{kJ}$$

(c) O calor transferido é:

$$_1Q_2 = m_2 u_2 - (m_A u_A + m_B u_B) + {}_1W_2$$

$$_1Q_2 = 4{,}136 \times 2715{,}46 - (3 \times 955{,}88 + 1{,}136 \times 2638{,}91) + 169{,}9 = 5535{,}6\,\mathrm{kJ}$$

4) (a) Sistema: reservatório inteiro. Aplicando a primeira lei:

$$_1Q_2 - {}_1W_2 = U_2 - U_1 + \Delta EC + \Delta EP$$

Como $_1Q_2 = {}_1W_2 = \Delta EP = \Delta EC = 0$, decorre que $\Delta U = 0$

Estado inicial: Ar: $\rightarrow p_{1_{\mathrm{ar}}} = 5\,\mathrm{bar}$, $T_{1_{\mathrm{ar}}} = 350\,\mathrm{K}$, $m_{\mathrm{ar}} = 2\,\mathrm{kg}$

CO: $\rightarrow p_{1_{\mathrm{CO}}} = 2\,\mathrm{bar}$, $T_{1_{\mathrm{CO}}} = 450\,\mathrm{K}$, $m_{\mathrm{CO}} = 4\,\mathrm{kg}$

Estado final: $p_{2_{\mathrm{ar}}} = p_{2_{\mathrm{CO}}} = p_2$, $T_{2_{\mathrm{ar}}} = T_{2_{\mathrm{CO}}} = T_2$

Como $\Delta U = 0$ temos que: $m_{\mathrm{ar}} c_{v_{\mathrm{ar}}} (T_2 - T_{1_{\mathrm{ar}}}) + m_{\mathrm{CO}} c_{v_{\mathrm{CO}}} (T_2 - T_{1_{\mathrm{CO}}}) = 0$

Calores específicos: $\dfrac{c_{p_{\mathrm{ar}}}}{c_{v_{\mathrm{ar}}}} = \dfrac{c_{p_{\mathrm{CO}}}}{c_{v_{\mathrm{CO}}}} = 1{,}395$

Da Tabela A.5 temos $c_{p_{\mathrm{ar}}} - c_{v_{\mathrm{ar}}} = R_{\mathrm{ar}} = 0{,}287$ e $c_{p_{\mathrm{CO}}} - c_{v_{\mathrm{CO}}} = R_{\mathrm{CO}} = 0{,}2968$

Substituindo uma relação na outra obtemos $c_{v_{\mathrm{ar}}} = 0{,}7266\,\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$ e $c_{v_{\mathrm{CO}}} = 0{,}7514\,\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$

Substituindo valores na expressão da variação de energia interna:

$$T_2 = \frac{m_{\mathrm{ar}} c_{v_{\mathrm{ar}}} T_{1_{\mathrm{ar}}} + m_{\mathrm{CO}} c_{v_{\mathrm{CO}}} T_{1_{\mathrm{CO}}}}{m_{\mathrm{ar}} c_{v_{\mathrm{ar}}} + m_{\mathrm{CO}} c_{v_{\mathrm{CO}}}} = \frac{2 \times 0{,}7266 \times 350 + 4 \times 0{,}7514 \times 450}{2 \times 0{,}7266 + 4 \times 0{,}7514}$$

Logo:

$$T_2 = 417{,}4\,\mathrm{K}$$

(b) Admitindo o modelo de gás ideal, é válida a equação de estado para gases ideais. Sabe-se ainda que $\cancel{V}_t = \cancel{V}_{2_{\mathrm{ar}}} + \cancel{V}_{2_{\mathrm{CO}}}$. O volume total $\cancel{V}_t$ pode ser calculado somando-se os dois volumes iniciais de cada gás que, por sua vez, podem ser calculados com a equação dos gases ideais:

$$\cancel{V}_{1_{\mathrm{ar}}} = \frac{m_{\mathrm{ar}} R_{\mathrm{ar}} T_{1_{\mathrm{ar}}}}{p_{1_{\mathrm{ar}}}} = \frac{2 \times 0{,}287 \times 350}{500} = 0{,}402\,\mathrm{m}^3$$

$$\cancel{V}_{1_{\mathrm{CO}}} = \frac{m_{\mathrm{CO}} R_{\mathrm{CO}} T_{1_{\mathrm{CO}}}}{p_{1_{\mathrm{CO}}}} = \frac{4 \times 0{,}2968 \times 450}{200} = 2{,}671\,\mathrm{m}^3$$

Assim, $\cancel{V}_t = 3{,}073\,\mathrm{m}^3$

Para encontrar a pressão final p_2, faz-se valer de que o volume total é a soma dos volumes finais de cada gás:

$$\frac{m_{\mathrm{ar}} R_{\mathrm{ar}} T_{2_{\mathrm{ar}}}}{p_2} + \frac{m_{\mathrm{CO}} R_{\mathrm{CO}} T_{2_{\mathrm{CO}}}}{p_2} = \cancel{V}_t$$

Assim:

$$p_2 = \frac{T_2}{\cancel{V}_t}(m_{\mathrm{ar}} R_{\mathrm{ar}} + m_{\mathrm{CO}} R_{\mathrm{CO}}) = \frac{417{,}4}{3{,}073}(2 \times 0{,}287 + 4 \times 0{,}2968) = 239{,}2\,\mathrm{kPa}$$

Logo:

$$p_2 = 2{,}392\,\mathrm{bar}$$

(c) Os volumes são calculados da seguinte forma:

$$\cancel{V}_{2_{\mathrm{ar}}} = \frac{m_{\mathrm{ar}} R_{\mathrm{ar}} T_{2_{\mathrm{ar}}}}{p_2} = \frac{2 \times 0{,}287 \times 417{,}4}{239{,}2} = 1{,}002\,\mathrm{m}^3$$

$$\cancel{V}_{2_{\mathrm{CO}}} = \frac{m_{\mathrm{CO}} R_{\mathrm{CO}} T_{2_{\mathrm{CO}}}}{p_2} = \frac{4 \times 0{,}2968 \times 417{,}4}{239{,}2} = 2{,}071\,\mathrm{m}^3$$