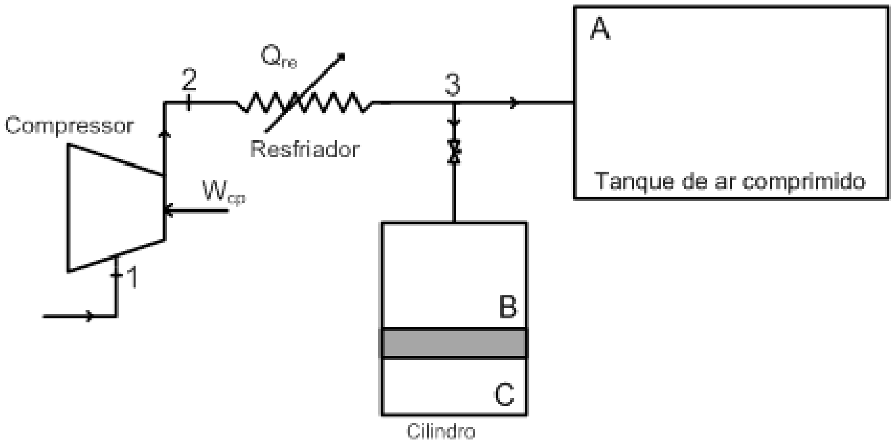
PME2398 – Termodinâmica e suas Aplicações
1º semestre / 2015 – Profs. Bruno Souza Carmo e Antonio Luiz Pacífico

Gabarito da Prova 1

Questão 1: Considere a instalação esquematizada abaixo destinada a comprimir e armazenar ar, composta por um compressor bem isolado, um resfriador, um tanque de ar comprimido (A) e um cilindro isolado termicamente. Este cilindro é composto por dois compartimentos, B e C, e um pistão bem isolado e com massa desprezível. O volume do cilindro é de 0,12 m^3. No compartimento C há 0,3 kg de N_2 a 227 °C e, inicialmente, não há ar em B (a válvula está fechada). Abre-se a válvula e deixa-se que o ar entre no compartimento B até que sua temperatura atinja 287 °C. Nesse estado, a massa de ar no compartimento B é de 0,15 kg. Sabe-se que $T_1 = 27\,°\text{C}$; $p_1 = 100\,\text{kPa}$; $T_2 = 407\,°\text{C}$; $p_2 = 1100\,\text{kPa}$; $T_3 = 247\,°\text{C}$; e $p_3 = 1100\,\text{kPa}$. Admitindo que o ar e o N_2 comportem-se como gases ideais, determine:.

- **(a)** O trabalho requerido pelo compressor por unidade de massa de ar que escoa através dele **(0,5 ponto)**;
- **(b)** O calor rejeitado entre as seções 2 e 3, por unidade de massa de ar que escoa entre elas **(0,5 ponto)**;
- **(c)** O trabalho realizado para comprimir o N_2 **(1 ponto)**;
- **(d)** A temperatura final do N_2 **(1 ponto)**;
- **(e)** A pressão final do N_2 **(1 ponto)**;
- **(f)** Os volumes ocupados pelo N_2 e ar no estado final **(1 ponto)**.



Solução: Esta questão trata de 1ª Lei da Termodinâmica para Volumes de Controle em regime permanente para os itens (a) e (b); 1ª Lei da Termodinâmica para Volumes de Controle em regime uniforme para o item (c); 1ª Lei da Termodinâmica para Sistemas para o item (d); e Equação de Estado para gases ideiais nos itens (e) e (f).

Os valores de propriedades na solução a seguir foram retirados das tabelas A.7 (Ar) e A.8 (N_2).

a) Para um $\cancel{V}C$ envolvendo apenas o compressor isolado ($\dot{Q}_{\cancel{V}C} = q_{\cancel{V}C} = 0$), com $\Delta E_c = 0$ e $\Delta E_p = 0$ ($\cancel{V}C$ em repouso):

$$w_{cp} = h_1 - h_2 = h_{ar}(T_1) - h_{ar}(T_2) = h_{ar}(27 + 273) - h_{ar}(407 + 273)$$

$$w_{cp} = h_{ar}(300) - h_{ar}(680) = 300{,}47 - 692{,}12 = -391{,}65\,\text{kJ/kg} \qquad \boxed{\textbf{0,5 pt}}$$

b) Para um $\not{V}C$ envolvendo apenas o resfriador ($\dot{W}_{\not{V}C} = w_{\not{V}C} = 0$), com $\Delta E_c = 0$ e $\Delta E_p = 0$ ($\not{V}C$ em repouso):

$$q_{re} = h_3 - h_2 = h_{ar}(T_3) - h_{ar}(T_2) = h_{ar}(247 + 273) - h_{ar}(407 + 273)$$

$$q_{re} = h_{ar}(520) - h_{ar}(680) = 523{,}98 - 692{,}12 = -168{,}14\,\text{kJ/kg} \qquad \boxed{\textbf{0,5 pt}}$$

c) Para um $\not{V}C$ envolvendo apenas o cilindro isolado ($Q_{\not{V}C} = 0$), com $\Delta E_c = 0$ e $\Delta E_p = 0$ ($\not{V}C$ em repouso):

$$u_{f,ar}.m_{f,ar} - u_{i,ar}.m_{i,ar} = -W_{\not{V}C} + m_e.h_e$$

onde $u_{i,ar} = 0$ pois inicialmente há vácuo no compartimento B ($m_{i,ar} = 0$); $h_e = h_3 = 523{,}98\,\text{kJ/kg}$; $m_{f,ar} = m_e = 0{,}15\,\text{kg}$; e $u_{f,ar} = u_{ar}(T_f) = u_{ar}(287 + 273) = u_{ar}(560) = 404{,}74\,\text{kJ/kg}$. Substituindo os valores:

$$W_{\not{V}C} = m_e.(h_e - u_{f,ar}) = 0{,}15.(523{,}98 - 404{,}74) = 17{,}889\,\text{kJ}$$

O trabalho realizado pelo ar será o recebido pelo N_2. Assim,

$$W_{N_2} = -17{,}89\,\text{kJ} \qquad \boxed{\textbf{1,0 pt}}$$

<u>OBS</u>: aceitam-se os dois sinais na resposta (positivo ou negativo), uma vez que no encunciado já é dito que trata-se do trabalho para comprimir o nitrogênio.

d) Para o N_2 como sistema num compartimento isolado ($Q = 0$), com $\Delta E_c = 0$ e $\Delta E_p = 0$ (sistema em repouso):

$$m_{N_2}.(u_{f,N_2} - u_{i,N_2}) = -W_{N_2}$$

$$u_{f,N_2} = u_{i,N_2} - \frac{W_{N_2}}{m_{N_2}}$$

onde $u_{i,N_2} = u_{N_2}(T_i) = u_{N_2}(227 + 273) = u_{N_2}(500) = 372{,}35\,\text{kJ/kg}$. Asssim,

$$u_{f,N_2} = 372{,}35 - \frac{(-17{,}886)}{0{,}3} = 431{,}97\,\text{kJ/kg}$$

Utilizando o valor de u_{f,N_2}, por interpolação, da tabela A.8:

$$T_{f,N_2} = 577{,}7562\,\text{K} = 304{,}8\ ^\circ\text{C} \qquad \boxed{\textbf{1,0 pt}}$$

e) Sendo o volume do cilindro de $0{,}12\,\text{m}^3$, pode-se escrever que:

$$\not{V}_{f,N_2} + \not{V}_{f,ar} = 0{,}12$$

Substituindo as equações de estado do N_2 e do ar no estado final dentro do cilindro, tem-se:

$$\frac{m_{N_2}.R_{N_2}.T_{f,N_2}}{p_{f,N_2}} + \frac{m_{f,ar}.R_{ar}.T_{f,ar}}{p_{f,ar}} = 0{,}12$$

Recordando que na situação final (equlíbrio), $p_{f,N_2} = p_{f,ar} = p_f$:

$$\frac{0{,}3.296{,}8.577{,}7562}{p_f} + \frac{0{,}15.287.560}{p_f}$$

$$\therefore p_f = 629595{,}1\,\mathrm{Pa} = 629{,}6\,\mathrm{kPa} \qquad \boxed{\textbf{1,0 pt}}$$

f) Voltando às equações de estado:

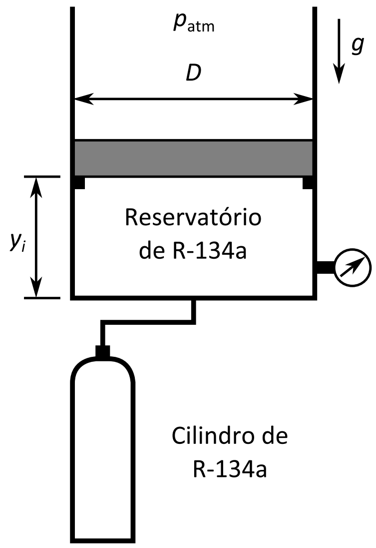
$$\cancel{V}_{f,N_2} = \frac{m_{N_2}.R_{N_2}.T_{f,N_2}}{p_f} = \frac{0{,}3.296{,}8.577{,}7562}{629595{,}1}$$

$$\cancel{V}_{f,N_2} = 0{,}0817\,\mathrm{m}^3 \qquad \boxed{\textbf{0,5 pt}}$$

$$\cancel{V}_{f,ar} = \frac{m_{f,ar}.R_{ar}.T_{f,ar}}{p_f} = \frac{0{,}15.287.560}{629595{,}1}$$

$$\cancel{V}_{f,ar} = 0{,}0383\,\mathrm{m}^3 \qquad \boxed{\textbf{0,5 pt}}$$

Questão 2: Um fabricante de fluido refrigerante R-134a comercializa seu produto em cilindros rígidos de 15 litros. No processo de carga destes cilindros, injeta-se fluido nos mesmos até que a pressão interna atinja 6 MPa. Em seguida estes cilindros são armazenados por alguns dias, de modo que o conteúdo é resfriado até a temperatura ambiente (20 °C), passando neste processo pelo ponto crítico da substância.



Um dos clientes deste fabricante adquire um cilindro e o utiliza para carregar um reservatório do tipo cilindro pistão. O reservatório tem um diâmetro interno de $D = 1{,}0$ m, e tem esbarros inferiores para o pistão de massa $M_p = 577$ kg que o suportam a uma altura $y_i = 0{,}5$ m. Antes da carga, o manômetro do reservatório indica pressão nula, o pistão está apoiado nos esbarros e a temperatura no interior do reservatório é a ambiente (20 °C). O cilindro é então conectado ao reservatório, conforme ilustrado na figura e assim permanece até que o escoamento na conexão cessa. Como o processo é relativamente rápido, admite-se que durante a carga a troca de calor seja desprezível. Sabendo que, no endereço do cliente, a pressão atmosférica vale 100 kPa e a aceleração da gravidade 9,8 m/s^2, determine:

(a) O calor trocado pelo cilindro durante o seu armazenamento no fabricante **(1,5 ponto)**;
(b) A altura do pistão do reservatório ao final do processo de carga **(3,0 pontos)**;
(c) A massa de R-134a transferida do cilindro para o reservatório **(0,5 ponto)**.

Solução: Substância: R-134a (tabelas termodinâmicas). Efeitos de energia cinética e energia potencial desprezíveis.

(a) Sistema: cilindro. Processo de resfriamento de R-134a no cilindro rígido (isocórico).

1^a *Lei*: ${}_1Q_2 - \cancel{{}_1W_2} = U_2 - U_1 \quad \Rightarrow \quad {}_1Q_2 = m_{c1}(u_{c2} - u_{c1})$ $\boxed{\textbf{0,4 pt}}$

O enunciado informa que durante o processo a substância passa pelo seu ponto crítico. Como o processo é isocórico, o volume específico é constante e pode ser obtido tomando o volume específico do ponto crítico na tabela ($v_{pc} = 0{,}00197\,\mathrm{m^3/kg}$). A massa de fluido no cilindro é, portanto:

$$m_{c1} = m_{c2} = \frac{\cancel{V}_c}{v_{pc}} = \frac{0{,}015}{0{,}00197} = 7{,}614\,\mathrm{kg} \quad \boxed{\textbf{0,4 pt}}$$

Estado $c1$: $p_{c1} = 6$ MPa, $v_{c1} = 0{,}00197\,\mathrm{m^3/kg} \rightarrow$ vapor superaquecido

tabela: $u_{c1} = 408{,}37$ kJ/kg $\boxed{\textbf{0,3 pt}}$

Estado $c2$: $T_{c2} = 20$ °C, $v_{c2} = 0{,}00197\,\mathrm{m^3/kg} \rightarrow$ saturado

Usando os valores do líquido e vapor saturado da tabela: $x_{c2} = \frac{v_{c2}-v_l}{v_{lv}} = \frac{0{,}00197-0{,}000817}{0{,}03524} = 0{,}03272$

$$u_{c2} = u_l + x_{c2}u_{lv} = 227{,}03 + 0{,}03272 \times 162{,}16 = 232{,}34\,\mathrm{kJ/kg} \quad \boxed{\textbf{0,3 pt}}$$

Substituindo na expressão da 1ª Lei: ${}_1Q_2 = 7{,}614 \times (232{,}34 - 408{,}37) = -1340{,}3$ kJ $\boxed{\textbf{0,1 pt}}$

(b) Sistema: cilindro + reservatório. Processo adiabático como um todo e quase estático no reservatório. Ao final do processo o estado no cilindro e no reservatório é uniforme.

1ª Lei: $\cancel{{}_2Q_3} - {}_2W_3 = U_3 - U_2 \quad \Rightarrow \quad -{}_2W_3 = m_t u_3 - (m_{c2}u_{c2} + m_{r2}u_{r2})$ **0,4 pt**

Trabalho: ${}_2W_3 = \int_{V_{r2}}^{V_{r3}} p\,\mathrm{d}V = p_3(V_{r3} - V_{r2})$ (durante o levantamento do pistão o processo é isobárico). **0,4 pt**

<u>Estado $r2$</u>: $p_{r2} = 100\,\mathrm{kPa}$, $T_{r2} = 20\,°\mathrm{C} \rightarrow$ vapor superaquecido

tabela: $v_{r2} = 0{,}23392\,\mathrm{m^3/kg}$, $u_{r2} = 396{,}66\,\mathrm{kJ/kg}$ **0,3 pt**

$$V_{r2} = A_b y_i = \frac{\pi D^2}{4} y_i = \frac{\pi \times 1^2}{4} \times 0{,}5 = 0{,}3927\,\mathrm{m^3} \qquad m_{r2} = \frac{V_{r2}}{v_{r2}} = \frac{0{,}3927}{0{,}23392} = 1{,}679\,\mathrm{kg}$$ **0,4 pt**

<u>Estado 3</u>: $p_3 = p_{\mathrm{atm}} + \frac{M_p g}{A_b} = 100 \times 10^3 + \frac{577 \times 9{,}8}{\left(\frac{\pi \times 1^2}{4}\right)} = 107{,}2\,\mathrm{kPa}$ **0,2 pt**

Substituindo a expressão do trabalho na 1ª Lei:

$$-p_3(V_{r3} - V_{r2}) = m_t u_3 - (m_{c2}u_{c2} + m_{r2}u_{r2})$$

Há duas incógnitas nesta expressão, V_{r3} e u_3, que estão relacionadas pelo estado termodinâmico final com a pressão p_3. Portanto, pode-se empregar um método iterativo para chegar na solução. Entretanto, há um método mais fácil utilizando a entalpia. Somando e subtraindo o volume do cilindro, V_c, nos parênteses do lado esquerdo da equação:

$$-p_3(V_{r3} + V_c - V_{r2} - V_c) = -p_3(V_{t3} - V_{t2}) = p_3 V_{t2} - m_t p_3 v_3 = m_t u_3 - (m_{c2}u_{c2} + m_{r2}u_{r2})$$

Rearranjando:

$$m_t u_3 + m_t p_3 v_3 = m_t h_3 = p_3 V_{t2} + m_{c2}u_{c2} + m_{r2}u_{r2} \quad \Rightarrow \quad h_3 = \frac{p_3 V_{t2} + m_{c2}u_{c2} + m_{r2}u_{r2}}{m_t}$$

$$h_3 = \frac{107{,}2 \times (0{,}3927 + 0{,}015) + 7{,}614 \times 232{,}34 + 1{,}679 \times 396{,}66}{(7{,}614 + 1{,}679)} = 266{,}73\,\mathrm{kJ/kg}$$ **0,6 pt**

Portanto, no estado final o fluido está na zona de saturação ($T_3 = -25\,°\mathrm{C}$).

$$x_3 = \tfrac{h_3 - h_l}{h_{lv}} = \tfrac{266{,}73 - 167{,}38}{215{,}57} = 0{,}4609$$

$$v_3 = v_l + x_3 v_{lv} = 0{,}000730 + 0{,}4609 \times 0{,}17957 = 0{,}08349\,\mathrm{m^3/kg}$$

$$V_3 = m_t v_3 = (7{,}614 + 1{,}679) \times 0{,}08349 = 0{,}7759\,\mathrm{m^3}$$ **0,4 pt**

$$y_f = \frac{V_{r3}}{A_b} = \frac{V_3 - V_c}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{0{,}7759 - 0{,}0150}{\frac{\pi \times 1^2}{4}} = 0{,}9688\,\mathrm{m}$$ **0,3 pt**

(c) No estado final, o reservatório contém vapor saturado de R-134a a $p_3 = 107{,}2\,\mathrm{kPa}$.

$$m_{r3} = \frac{V_{r3}}{v_v} = \frac{0{,}7759 - 0{,}0150}{0{,}18030} = 4{,}220\,\mathrm{kg}$$ **0,3 pt**

Portanto, a massa transferida foi $m_{r3} - m_{r2} = 4{,}220 - 1{,}679 = 2{,}541\,\mathrm{kg}$ **0,2 pt**