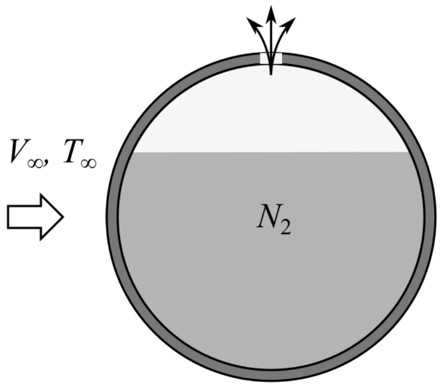
PME3398 – Fundamentos de Termodinâmica e Transferência de Calor
1º semestre / 2019 – Profs. Bruno Souza Carmo e Antonio Luiz Pacífico

Gabarito da Prova de Recuperação

Questão 1: Nitrogênio líquido saturado é armazenado a pressão atmosférica (101,33 kPa) num tanque esférico de 2 m de diâmetro interno, esquematizado na figura, preenchendo inicialmente todo o volume interno do tanque. A parede do tanque é composta por uma camada de 30 mm de espessura de isolante térmico, cuja condutividade térmica é $k_{iso} = 0{,}023\,\mathrm{W/(m\cdot K)}$, e uma chapa de aço carbono de 3 mm de espessura. O tanque está num local onde o vento sopra a $V_\infty = 4\,\mathrm{m/s}$ e a temperatura do ar é de $T_\infty = 20\,°\mathrm{C}$. No topo do tanque há um respiro pelo qual vaza nitrogênio gasoso, enquanto a pressão permanece constante dentro do tanque.

Para uma situação onde o nitrogênio vaza até que não haja mais líquido no interior do tanque, e considerando que a temperatura na superfície interna do tanque é igual à do nitrogênio, determine:



(a) A massa e temperatura iniciais de nitrogênio no tanque; **(0,8 ponto)**

(b) O calor trocado e a entropia gerada ao longo do processo;**(2,0 pontos)**

(c) A temperatura na superfície externa do tanque e o tempo de duração do processo. **(2,2 pontos)**

Solução:

(a) O volume interno do tanque é $\forall = \dfrac{\pi D_i^3}{6} = \dfrac{\pi \times 2^3}{6} = 4{,}189\,\mathrm{m^3}$ $\boxed{\textbf{0,2 pt}}$

No estado inicial, o nitrogênio é líquido saturado ($x_1 = 0$) a pressão de $p_1 = 101{,}33\,\mathrm{kPa}$. As tabelas fornecem para este estado:

$$T_1 = 77{,}35\,\mathrm{K}; \quad \boxed{\textbf{0,2 pt}} \qquad v_1 = 0{,}001241\,\mathrm{m^3/kg} \quad \boxed{\textbf{0,2 pt}}$$

A massa inicial de nitrogênio no tanque é $m_1 = \dfrac{\forall}{v_1} = 3376{,}51\,\mathrm{kg}$ $\boxed{\textbf{0,2 pt}}$

(b) Trata-se de um processo em regime uniforme, para o qual valem as equações de conservação de massa, 1ª Lei e 2ª Lei escritas nas formas abaixo:

$$\text{Conservação de massa}: \quad m_2 - m_1 = -m_s$$
$$1^{\text{a}}\ \text{Lei}: \quad m_2u_2 - m_1u_1 = -m_sh_s + {}_1Q_2$$
$$2^{\text{a}}\ \text{Lei}: \quad m_2s_2 - m_1s_1 + m_ss_s - \frac{{}_1Q_2}{T_\infty} = S_{ger}$$

Estado 1: $x_1 = 0$, $p_1 = 101{,}33\,\mathrm{kPa} \rightarrow u_1 = -122{,}14\,\mathrm{kJ/kg}$, $s_1 = 2{,}8342\,\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$ $\boxed{\textbf{0,2 pt}}$

Estado 2: $x_2 = 1$, $p_2 = 101{,}33\,\mathrm{kPa}$

$\rightarrow u_2 = 55{,}19\,\mathrm{kJ/kg}$, $v_2 = 0{,}216819\,\mathrm{m^3/kg}$, $s_2 = 5{,}4090\,\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$ $\boxed{\textbf{0,2 pt}}$

$$m_2 = \frac{\cancel{V}}{v_2} = 19{,}32\,\text{kg} \quad \boxed{\textbf{0,2 pt}}$$

Estado s: $x_s = 1$, $p_s = 101{,}33\,\text{kPa} \rightarrow h_s = 77{,}16\,\text{kJ/kg}$, $s_s = 5{,}4090\,\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ $\boxed{\textbf{0,2 pt}}$

Aplicando a conservação de massa: $m_s = m_1 - m_2 = 3357{,}19\,\text{kg}$ $\boxed{\textbf{0,4 pt}}$

Aplicando a 1ª Lei: ${}_1Q_2 = m_2u_2 - m_1u_1 + m_sh_s = 672518\,\text{kJ}$ $\boxed{\textbf{0,4 pt}}$

Aplicando a 2ª Lei: $S_{ger} = m_2s_2 - m_1s_1 + m_ss_s - \dfrac{{}_1Q_2}{T_\infty} = 6399{,}8\,\text{kJ/K}$ $\boxed{\textbf{0,4 pt}}$

(c) Para encontrar a temperatura da superfície externa do tanque, calcularemos a taxa de transferência de calor do ar externo para o nitrogênio. Trata-se de transferência de calor sem geração, e vamos admitir que o processo ocorre em regime permanente. Há três resistências térmicas: convecção no ar, condução no aço e condução no isolante. As resistências de condução são:

$$R_{iso} = \frac{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}{4\pi k_{iso}} = \frac{\left(\frac{1}{1} - \frac{1}{1{,}03}\right)}{4\times\pi\times 0{,}023} = 0{,}1008\,\text{W/K} \quad \boxed{\textbf{0,2 pt}}$$

$$R_{aço} = \frac{\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3}\right)}{4\pi k_{aço}} = \frac{\left(\frac{1}{1{,}03} - \frac{1}{1{,}033}\right)}{4\times\pi\times 60{,}5} = 3{,}709\times 10^{-6}\,\text{W/K} \quad \boxed{\textbf{0,2 pt}}$$

Para calcular a resistência de convecção, precisamos determinar o valor do coeficiente de película. Trata-se de convecção forçada em escoamento externo a uma esfera, e para usar a correlação empírica necessitamos das propriedades do ar avaliadas à temperatura $T_\infty = 20\,°\text{C} = 293{,}15\,\text{K}$:

$k_f = 0{,}02575\,\text{W/(m}\cdot\text{K)}$; $Pr = 0{,}7088$; $\nu = 1{,}528\times10^{-5}\,\text{m}^2\text{/s}$; $\mu = 1{,}812\times10^{-5}\,\text{Pa}\cdot\text{s}$ $\boxed{\textbf{0,2 pt}}$

$$Re_D = \frac{V_\infty D_e}{\nu} = \frac{4\times 2{,}066}{1{,}528\times10^{-5}} = 5{,}408\times10^5 \quad \boxed{\textbf{0,2 pt}}$$

Precisamos também do valor da viscosidade dinâmica à temperatura da superfície, que não conhecemos. Vamos então estimar um valor e conferir posteriormente. Para evitar neste primeiro momento uma interpolação na tabela, usaremos $T_{\text{sup}} = 250\,\text{K}$, para a qual $\mu_{sup} = 1{,}596\times10^{-5}\,\text{Pa}\cdot\text{s}$.

Aplicando a correlação da esfera (o número de Reynolds está fora da faixa de validade, mas é a melhor estimativa que temos):

$$\overline{Nu_D} = 2 + \left(0{,}4Re_D^{1/2} + 0{,}06Re_D^{2/3}\right)Pr^{0{,}4}\left(\frac{\mu}{\mu_{sup}}\right)^{1/4} = 624{,}8 \quad \boxed{\textbf{0,2 pt}}$$

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu_D}k_f}{D_e} = \frac{624{,}8\times0{,}02575}{2{,}066} = 7{,}79\,\text{W/(m}^2\cdot\text{K)} \quad \boxed{\textbf{0,2 pt}}$$

$$R_{conv} = \frac{1}{\bar{h}A_{s,e}} = \frac{1}{7{,}79\times\pi\times2{,}033^2} = 9{,}575\times10^{-3}\,\text{W/K} \quad \boxed{\textbf{0,2 pt}}$$

$$q = \frac{(T_\infty - T_i)}{R_{iso}+R_{aço}+R_{conv}} = \frac{(293{,}15 - 77{,}35)}{0{,}1008 + 3{,}709\times10^{-6} + 9{,}575\times10^{-3}} = 1955{,}5\,\text{W} \quad \boxed{\textbf{0,2 pt}}$$

$$T_{sup} = T_\infty - qR_{conv} = 274{,}4\,\mathrm{K} \quad \boxed{\textbf{0,2 pt}}$$

O valor de T_{sup} é bastante diferente da estimativa feita. Fazemos então uma nova iteração, avaliando a viscosidade dinâmica para este novo valor de T_{sup}, $\mu_{sup} = 1{,}718 \times 10^{-5}\,\mathrm{Pa \cdot s}$.

$$\overline{Nu_D} = 613{,}4; \qquad \bar{h} = 7{,}65\,\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}; \qquad R_{conv} = 9{,}753 \times 10^{-3}\,\mathrm{W/K}$$

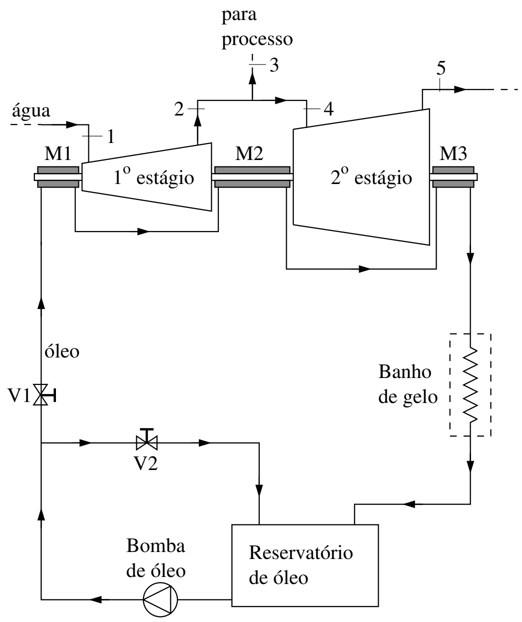
$$q = 1952{,}4\,\mathrm{W}; \qquad T_{sup} = 274{,}1\,\mathrm{K}$$

O processo convergiu, e a temperatura da superfície externa é $T_{sup} = 274{,}1\,\mathrm{K}$. $\boxed{\textbf{0,2 pt}}$

O tempo de duração do processo é:

$$\Delta t = \frac{{}_1Q_2}{q} = \frac{672518}{1{,}9524} = 3{,}445 \times 10^5\,\mathrm{s} = 95{,}68\,\mathrm{h} = 3{,}99\,\mathrm{dias} \quad \boxed{\textbf{0,2 pt}}$$

Questão 2: Considere uma turbina adiabática de dois estágios, operando em regime permanente com vapor d'água, como ilustrado na figura ao lado. A instrumentação instalada na turbina indica: $T_1 = 600\,°\mathrm{C}$; $p_1 = 15\,\mathrm{MPa}$; $p_2 = 800\,\mathrm{kPa}$; $p_5 = 20\,\mathrm{kPa}$; $\dot{m}_1 = 5\,\mathrm{kg/s}$; e $\dot{m}_3 = 1\,\mathrm{kg/s}$. Os estágios da turbina possuem eficiência isoentrópica de 85% cada. A turbina fica apoiada em três mancais (M1, M2 e M3) que utilizam óleo para sua lubrificação e resfriamento. A tubulação que transporta este óleo e o seu reservatório estão bem isolados, de modo que se pode considerar desprezíveis as perdas de calor do óleo para o ambiente. Para resfriar o óleo após sua passagem pelos mancais um trecho da sua tubulação passa por um banho de água e gelo mantidos a $0\,°\mathrm{C}$. As condições de convecção no banho de gelo promovem um coeficiente de transferência de calor por convecção de $10\,\mathrm{W/(m^2.K)}$. A tubulação que transporta o óleo é feita de aço inoxidável $[k_{aço} = 15\,\mathrm{W/(m.K)}]$ com diâmetros interno e externo de 24,3 mm e 33,4 mm, respectivamente. Para as variações de temperatura envolvidas no escoamento do óleo suas propriedades médias valem: $C_P = 1900\,\mathrm{J/(kg.K)}$; $\mu = 0{,}05\,\mathrm{N.s/m^2}$; $\rho = 880\,\mathrm{kg/m^3}$; $k = 0{,}145\,\mathrm{W/(m.K)}$; e $\mathrm{Pr} = 6400$.



(a) Para a saída do segundo estágio (5) determine o título da água, se for mistura líquido-vapor, ou a temperatura, se for vapor superaquecido; **(1,0 ponto)**

(b) Calcule a potência desenvolvida pela turbina; **(1,0 ponto)**

(c) Sabendo que o óleo entra no banho de gelo a $50\,°\mathrm{C}$; com vazão de 0,02 kg/s; e o comprimento de tubo imerso no banho é de 10 m, calcule a temperatura de saída do óleo; **(2,0 pontos)**

(d) Determine a taxa de geração de entropia na turbina, considerando os fluxos de água e óleo. Considere que os mancais não trocam calor com o ambiente externo. **(1,0 ponto)**

Solução: Inicialmente deve-se determinar os 5 estados indicados para a água que escoa através da turbina. Quando necessários interpolações serão realizadas diretamente.

(a) Estado 1: $T_1 = 600\,°\mathrm{C}$ e $p_1 = 15\,\mathrm{MPa} \Rightarrow$ vapor superaquecido. $h_1 = 3583{,}13\,\mathrm{kJ/kg}$ e $s_1 = 6{,}6796\,\mathrm{kJ/(kg.K)}$.

Estado 2: $p_2 = 800\,\mathrm{kPa}$ e $s_{2s} = s_1 = 6{,}6796\,\mathrm{kJ/(kg.K)} \Rightarrow$ vapor superaquecido. $h_{2s} = 2776{,}54\,\mathrm{kJ/kg}$,

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \Rightarrow h_2 = h_1 - \eta_t.\,(h_1 - h_{2s}) = 2897{,}53\,\mathrm{kJ/kg}$$

Com h_2 e p_2 conhecidos, o estado continua como vapor superaquecido e $s_2 = 6{,}9337\,\mathrm{kJ/(kg.K)}$.

Estado 3: Mesmo estado que o 2: $h_3 = h_2 = 2897{,}53\,\mathrm{kJ/kg}$ e $s_3 = s_2 = 6{,}9337\,\mathrm{kJ/(kg.K)}$.

Estado 4: Mesmo estado que o 2: $h_4 = h_2 = 2897{,}53\,\mathrm{kJ/kg}$ e $s_4 = s_2 = 6{,}9337\,\mathrm{kJ/(kg.K)}$.

Estado 5: $p_5 = 20\,\text{kPa}$ e $s_{5s} = s_4 = 6{,}9337\,\text{kJ/(kg.K)} \Rightarrow$ mistura líquido-vapor para a qual: $s_l = 0{,}8320\,\text{kJ/(kg.K)}$; $s_v = 7{,}9072\,\text{kJ/(kg.K)}$; $h_l = 251{,}42\,\text{kJ/kg}$; e $h_v = 2608{,}94\,\text{kJ/kg}$. Assim, o título em 5 para processo isoentrópico seria:

$$x_{5s} = \frac{s_{5s} - s_l}{s_v - s_l} = 0{,}8624$$

Portanto,

$$h_{5s} = (1 - x_{5s}).h_l + x_{5s}.h_v = 2284{,}56\,\text{kJ/kg}$$

Aplicando a eficiência isoentrópica:

$$\eta_t = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{5s}} \Rightarrow h_5 = h_4 - \eta_t.(h_4 - h_{5s}) = 2376{,}51\,\text{kJ/kg}$$

Finalmente, como se trata de mistura líquido-vapor em 5:

$$x_5 = \frac{h_5 - h_l}{h_v - h_l} = 0{,}9014 \therefore x_5 = 0{,}9 \quad \boxed{\textbf{1,0 pt}}$$

Para finalizar, pois será necessário no item (d) adiante, calcula-se a entropia em 5:

$$s_5 = (1 - x_5).s_l + x_5.s_v = 7{,}2097\,\text{kJ/(kg.K)}$$

(b) A potência desenvolvida pela turbina é calculada por:

$$\dot{W}_t = \dot{m}_1.(h_1 - h_2) + \dot{m}_4.(h_4 - h_5)$$

$$\dot{W}_t = 5.(3583{,}13 - 2897{,}53) + 4.(2897{,}53 - 2376{,}51) = 5512\,\text{kW} \quad \boxed{\textbf{1,0 pt}}$$

(c) Para o cálculo da temperatura de saída do óleo do banho de água e gelo, segue-se a sequência de cálculos a seguir, onde o subscrito "o" é utilizado para referir-se ao óleo no tubo.

$$\text{Re}_o = \frac{4.\dot{m}_o}{\pi.D_{ti}.\mu_o} = \frac{4.0{,}02}{\pi.0{,}0243.0{,}05} = 21$$

onde D_{ti} é o diâmetro interno do tubo.

Como se trata de escoamento laminar, verifica-se o comprimento de entrada térmico, $x_{fd,t}$:

$$x_{fd,t} \approx 0{,}05.\text{Re}_o.Pr_o.D_{ti} = 0.05.21.6400.0{,}0243 = 163{,}3\,\text{m}$$

Como o tubo imerso no banho possui apenas 10 m de comprimento, segue-se que:

$$\text{Nu}_o = 3{,}66 + \frac{0{,}0668.(D_{ti}/L).\text{Re}_o.\text{Pr}_o}{1 + 0{,}04.\left[(D_{ti}/L).\text{Re}_o.\text{Pr}_o\right]^{2/3}} = 11{,}2$$

que, embora seja válida para escoamento laminar em desenvolvimento, também possui como condição de contorno que a temperatura da superfície interna do tubo seja uniforme, o que não é extamente o caso, mas pode ser aproximada, já que o banho manterá esta superfície numa condição próxima à uniformidade de temperatura. Deste modo,

$$h_o = \frac{\text{Nu}_o.k_o}{D_{ti}} = \frac{11{,}2.0{,}145}{0{,}0243} = 66{,}8\,\text{W/(m}^2\text{.K)}$$

Como se sabe que a temperatura constante é a do banho, calcula-se o coeficiente global de transferência de calor. Utilizando este coeficiente baseado na área interna do tubo, U_i:

$$U_i = \left[\frac{1}{h_o} + D_{ti} \cdot \frac{\ln\left(D_{te}/D_{ti}\right)}{2.k_{aço}} + \frac{D_{ti}}{D_{te}} \cdot \frac{1}{h_{banho}}\right]^{-1}$$

$$U_i = \left[\frac{1}{66{,}8} + 0{,}0243 \cdot \frac{\ln\left(0{,}0334/0{,}0243\right)}{2.15} + \frac{0{,}0243}{0{,}0334} \cdot \frac{1}{10}\right]^{-1} = 11{,}4\,\mathrm{W/(m^2.K)}$$

Finalmente,

$$\frac{T_{banho} - T_{ms,o}}{T_{banho} - T_{me,o}} = \exp\left(-\frac{\pi.D_{ti}.L.U_i}{\dot{m}_o.C_{Po}}\right) \Rightarrow T_{ms,o} = T_{banho} - \left(T_{banho} - T_{me,o}\right).\exp\left(-\frac{\pi.D_{ti}.L.U_i}{\dot{m}_o.C_{Po}}\right)$$

$$T_{ms,o} = 0 - (0 - 50).\exp\left(-\frac{\pi.0{,}0243.10.11{,}4}{0{,}02.1900}\right) \Rightarrow T_{ms,o} = 39{,}8\,^{\circ}\mathrm{C} \quad \boxed{\textbf{2,0 pts}}$$

(d) Considerando todas as entradas e saídas de água e óleo na turbina e recordando que a turbina é adiabática e os mancais não rejeitam calor para o ambiente, pode-se escrever que:

$$\dot{S}_{ger} = \dot{\sigma} = \dot{m}_5.s_5 + \dot{m}_3.s_3 - \dot{m}_1.s_1 + \dot{m}_o.C_{Po}.\ln\left(\frac{T_{ms,o}}{T_{me,o}}\right)$$

$$\dot{S}_{ger} = 4.7{,}2097 + 1.6{,}9337 - 5.6{,}6796 + 0{,}02.1{,}9.\ln\left(\frac{39{,}8 + 273}{50 + 273}\right)$$

$$\dot{S}_{ger} = 2{,}37\,\mathrm{kW/K} \quad \boxed{\textbf{1,0 pt}}$$