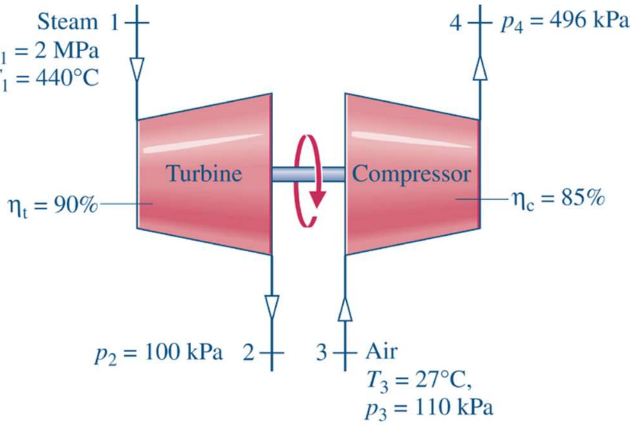
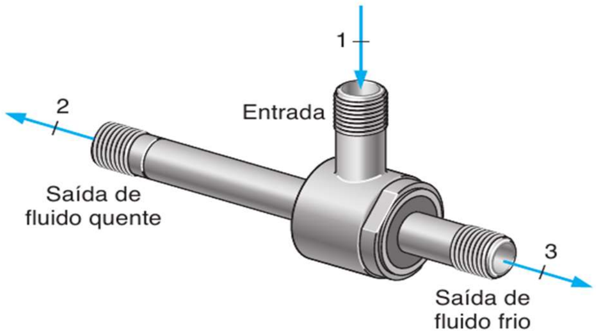
Lista de exercícios resolvidos 07 – 2ª Lei para Volumes de Controle

1- Conforme ilustrado na figura, uma turbina a vapor com 90% de eficiência isentrópica aciona um compressor de ar com 85% de eficiência isentrópica. Dados operacionais de regime permanente são fornecidos na figura. Admita o modelo de gás ideal para o ar e ignore as perdas de calor e os efeitos das energias cinética e potencial. Determine a razão entre a vazão mássica do vapor na turbina e a vazão mássica de ar no compressor.

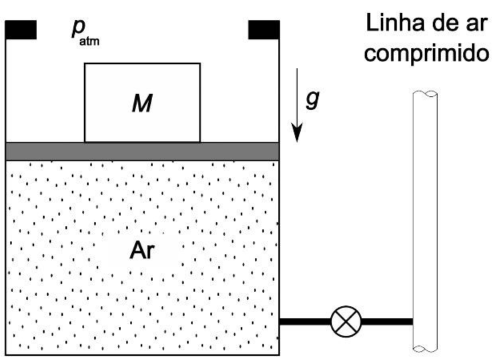


2- Um tubo de Hilch é alimentado com uma corrente de ar que apresenta temperatura e pressão iguais a 20 °C e 200 kPa. O tubo de Hilch descarrega duas correntes separadamente. As pressões dessas correntes são iguais a 100 kPa, mas as temperaturas são diferentes. A temperatura de uma das correntes é igual a 0 °C e a da outra é 40 °C. A transferência de calor do tubo para o ambiente e as energias cinéticas de todas as correntes são desprezíveis.



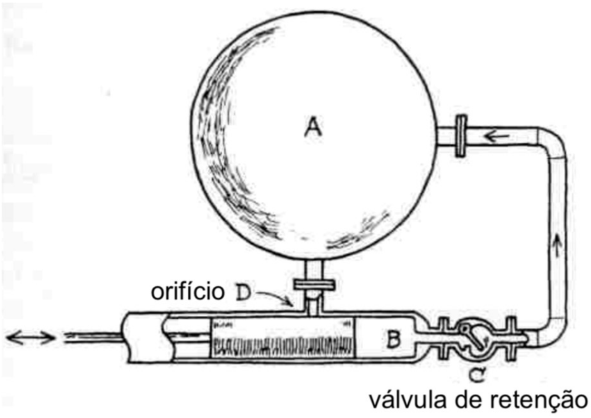
(a) Admitindo que a operação do tubo de Hilch ocorra em regime permanente, determine a relação entre a vazão mássica da corrente que apresenta temperatura igual a 0 °C e a vazão mássica da corrente na seção de alimentação.
(b) É possível operar esse dispositivo nas condições indicadas?

3- A figura mostra um dispositivo pneumático para levantamento de peso. Um cilindro, dotado de pistão de diâmetro de 1 m e peso desprezível que se movimenta sem atrito, é conectado a uma linha de ar comprimido onde o fluido circula a 1 MPa e 300 K. Numa dada situação, o pistão apresenta inicialmente uma altura de 0,8 m e repousa sobre ele uma carga de *M* = 500 kg. O ar interior do cilindro está a 20 °C. A válvula de admissão é aberta e a carga é erguida a uma altura de 2,0 m, fechando-se a válvula em seguida. Sabendo que o processo ocorre numa velocidade alta o suficiente para que a troca de calor possa ser desprezada, que a pressão atmosférica no local vale 100 kPa e que a aceleração da gravidade é de 9,8 m/s², determine:



(a) A massa de ar final no cilindro.
(b) A entropia gerada no processo.

4- Um sistema de aumento de temperatura de um gás por bateladas é mostrado na figura. A esfera *A*, de volume 1 m³, está conectada a uma pequena unidade cilindro-pistão. Há uma válvula de retenção em *C* que permite escoamento apenas na direção indicada. O processo tem início com a esfera A repleta de gás a 1 MPa e o pistão totalmente à direita. O pistão é então deslocado para a esquerda até que o orifício *D* é desobstruído. Nesta configuração, o volume do cilindro é 0,01 m³ O gás então escoa da esfera *A* para o cilindro *B* até que as pressões são equalizadas. (Antes do orifício *D* ser desobstruído, pode-se assumir vácuo perfeito em *B*.) O pistão é então deslocado para a direita, obstruindo o orifício *D*, e o gás é transportado através da válvula *C* de volta a *A*. Este processo é repetido diversas vezes. Não há transferência de calor significativa para o ambiente, e o gás processado pode ser considerado ideal com um calor específico a volume constante igual a 33,256 J/(mol·K), independente da temperatura. A operação do conjunto pistão-cilindro é adiabática e reversível. Para uma mudança de temperatura do gás de 300 K para 600 K:



(a) Quantas vezes o processo precisa ser repetido?
(b) Qual o trabalho realizado sobre o gás?
(c) Qual a entropia gerada? Por que ela é gerada?
(d) Qual a eficiência isentrópica do procedimento?

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

Soluções da Lista de Exercícios 07

1) Faremos a análise dos dois volumes de controle (turbina e compressor) e utilizaremos o fato de que o trabalho produzido na turbina é consumido no compressor. Em ambos os volumes de controle os processos ocorrem em regime permanente, adiabaticamente e os efeitos de energia cinética e potencial podem ser desprezados.

Turbina: Substância de trabalho: água. Modelo: tabela B.1.

Estado 1: $p_1 = 2\,\text{MPa}$, $T_1 = 440\,°\text{C}$.
vapor superaquecido. A tabela B.1.3 fornece $h_1 = 3335{,}50\,\text{kJ/kg}$ e $s_1 = 7{,}2529\,\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$.

Estado 2s (estado hipotético, considerando processo isentrópico):
$p_{2s} = 100\,\text{kPa}$, $s_{2s} = s_1 = 7{,}2529\,\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ $\quad\Rightarrow\quad$ água saturada, $h_{2s} = 2635{,}79\,\text{kJ/kg}$.

Usando a eficiência isentrópica:

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} = 0{,}90 \quad\Rightarrow\quad h_2 = 3335{,}50 - 0{,}90 \times (3335{,}50 - 2635{,}79) = 2705{,}76\,\text{kJ/kg}$$

Aplicando a 1ª Lei:

$$\dot{W}_t = \dot{m}_t(h_1 - h_2) = 629{,}74\dot{m}_t$$

Compressor: Substância de trabalho: ar. Modelo: gás ideal ($R = 0{,}287\,\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$), calores específicos variáveis, com entalpias dadas pela tabela A.7.

Estado 3: $T_3 = 27\,°\text{C} = 300\,\text{K}$, $p_3 = 110\,\text{kPa}$.
A tabela A.7 fornece: $h_3 = 300{,}47\,\text{kJ/kg}$, $p_{r,3} = 1{,}1146$.

Estado 4s (estado hipotético, considerando processo isentrópico): $p_{4s} = 496\,\text{kPa}$.

Num processo isentrópico: $\dfrac{p_{4s}}{p_3} = \dfrac{p_{r,4s}}{p_{r,3}} \quad\Rightarrow\quad p_{r,4s} = \dfrac{496}{110} \times 1{,}1146 = 5{,}0258.$

Este valor de $p_{r,4s}$ corresponde a um valor de entalpia $h_{4s} = 462{,}40\,\text{kJ/kg}$. Usando a eficiência isentrópica:

$$\eta_c = \frac{h_{4s} - h_3}{h_4 - h_3} = 0{,}85 \quad\Rightarrow\quad h_4 = \frac{462{,}40 - 300{,}47}{0{,}85} + 300{,}47 = 490{,}98\,\text{kJ/kg}$$

Aplicando a 1ª Lei:

$$\dot{W}_c = \dot{m}_c(h_4 - h_3) = 190{,}51\dot{m}_c$$

Como $\dot{W}_t = \dot{W}_c$, temos então,

$$629{,}74\dot{m}_t = 190{,}51\dot{m}_c \quad\Rightarrow\quad \frac{\dot{m}_t}{\dot{m}_c} = \frac{190{,}51}{629{,}74} = 0{,}303$$

2) O tubo de Hilch, também conhecido como tubo de vórtices (*vortex tube*) é um dispositivo clássico quase sempre apresentado quando se estuda a 2^a Lei da Termodinâmica para Volumes de Controle em regime permanente. Algumas informações podem ser obtidas na Wikipedia ou no YouTube.

As equações para a solução deste exercício são:

Conservação da Massa:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \text{ (I)}$$

Conservação da Energia (1^a Lei da Termodinâmica para Volumes de Controle em regime permanente):

$$\dot{m}_1.h_1 = \dot{m}_2.h_2 + \dot{m}_3.h_3 \text{ (II)}$$

Balanço de Entropia (2^a Lei da Termodinâmica para Volumes de Controle em regime permanente):

$$\dot{m}_1.s_1 + \dot{S}_{ger} = \dot{m}_2.s_2 + \dot{m}_3.s_3 \text{ (III)}$$

Uma vez que T_1 = 20 °C = 293,15 K, T_2 = 40 °C = 313,15 K e T_3 = 0 °C = 273,15 K, para esses valores, da Tabela A.7, por interpolação, h_1 = 293,59546 kJ/kg, s_1° = 6,84597 kJ/kg.K, h_2 = 313,69233 kJ/kg, s_2° = 6,91191 kJ/kg.K, h_3 = 273,51603 kJ/kg e s_3° = 6,77451 kJ/kg.K. Como as correntes 2 e 3 de ar encontram-se a 100 kPa, segue-se que: $s_2 = s_2^\circ$ e $s_3 = s_3^\circ$.

a. Dividindo-se a Eq. (I) por $\dot{m}_1$, obtém-se:

$$1 = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} + \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} \Rightarrow \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} = 1 - \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} \text{ (IV)}$$

Dividindo a Eq. (II) por $\dot{m}_1$ e, a seguir, aplicando a Eq. (IV) ao resultado obtido:

$$h1 = h_2 \cdot \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} + h_3 \cdot \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} \Rightarrow h_1 = h_2 \cdot \left(1 - \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1}\right) + h_3 \cdot \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1}$$

Isolando $\dot{m}_3/\dot{m}_1$ e substituindo os valores:

$$\frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} = \frac{h_1 - h_2}{h_3 - h_2} = \frac{293{,}59546 - 313{,}69233}{273{,}51603 - 313{,}69233} = 0{,}50022$$

$$\frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} = 0{,}5$$

b. A verificação da possibilidade em operar esse dispositivo nas condições indicadas equivale a a calcular a entropia gerada, $\dot{S}_{ger}$, na Eq. (III) e verificar se o resultado é $\geqslant 0$. Como não é possível conhecer os valores das três vazões mássicas neste exercício (em função da falta de informação no enunciado), será calculado o termo $\dot{S}_{ger}/\dot{m}_1$. Como, necessariamente, $\dot{S}_{ger} \geqslant 0$, e $\dot{m}_1 > 0$, segue-se que, para ser possível operar este disposivo, $\dot{S}_{ger}/\dot{m}_1 \geqslant 0$.

Dividindo a Eq. (III) por $\dot{m}_1$, inserindo a Eq.(IV) e rearranjando:

$$\frac{\dot{S}_{ger}}{\dot{m}_1} = \left(1 - \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1}\right) \cdot s_2 + \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} \cdot s_3 - s_1$$

$$\frac{\dot{S}_{ger}}{\dot{m}_1} = s_2 - s_1 + \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} \cdot (s_3 - s_2)$$

$$\frac{\dot{S}_{ger}}{\dot{m}_1} = s_2^\circ - s_1^\circ - R.\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) + \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1}\cdot(s_3^\circ - s_2^\circ)$$

$$\frac{\dot{S}_{ger}}{\dot{m}_1} = 6{,}91191 - 6{,}84597 - 0{,}287.\ln\left(\frac{100}{200}\right) + 0{,}50022\cdot(6{,}77451 - 6{,}91191)$$

$$\frac{\dot{S}_{ger}}{\dot{m}_1} = 0{,}19614\,\mathrm{kJ/kg.K} = 196{,}14\,\mathrm{J/kg.K}$$

Segue-se que **é possível** operar esse dispositivo nas condições indicadas.

3) $\cancel{V}C$, regime uniforme. Substância: ar [gás ideal, $R = 0{,}287\,\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$, c_p e c_v constantes, avaliados a 25 ℃ – $c_p = 1{,}004\,\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$, $c_v = 0{,}717\,\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$]. ΔEC e ΔEP desprezíveis. Processo quase-estático no pistão. Temperatura de referência para energia interna e entalpia, $T_{\mathrm{ref}} = 0\,\mathrm{K}$.

$$\begin{aligned}
\text{Conservação de massa}: &\quad m_2 - m_1 = m_s \\
1^{\text{a}}\ \text{Lei}: &\quad m_2u_2 - m_1u_1 = -{}_1W_2 + m_eh_e \\
2^{\text{a}}\ \text{Lei}: &\quad \Delta S_{\mathrm{ger}} = m_2s_2 - m_1s_1 - m_es_e \\
\text{Equação de estado}: &\quad p\cancel{V} = mRT \\
\text{Variação de entropia}: &\quad s_A - s_B = c_p\ln\left(\frac{T_A}{T_B}\right) - R\ln\left(\frac{p_A}{p_B}\right) \\
\text{Trabalho}: &\quad {}_1W_2 = \int_1^2 p\,\mathrm{d}\cancel{V} = p(\cancel{V}_2 - \cancel{V}_1) \\
\text{Energia interna}: &\quad u = c_vT \\
\text{Entalpia}: &\quad h = c_pT
\end{aligned}$$

<u>Estado 1</u>: $p_1 = p_{\mathrm{atm}} + \dfrac{Mg}{A_p} = 10^5 + \dfrac{500\times 9{,}8}{\pi\times\frac{1^2}{4}} = 106{,}24\,\mathrm{kPa}$, $T_1 = 293{,}15\,\mathrm{K}$

$\cancel{V}_1 = l_1A_b = 0{,}8\times\dfrac{\pi\times 1^2}{4} = 0{,}6283\,\mathrm{m}^3$, $\qquad m_1 = \dfrac{p_1\cancel{V}_1}{RT_1} = 0{,}7934\,\mathrm{kg}$, $\qquad u_1 = c_vT_1 = 210{,}19\,\mathrm{kJ/kg}$

<u>Estado e</u>: $p_e = 1\,\mathrm{MPa}$, $T_e = 300\,\mathrm{K}$, $h_e = c_pT_e = 301{,}7\,\mathrm{kJ/kg}$

<u>Estado 2</u>: $p_2 = p_1 = 106{,}24\,\mathrm{kPa}$, $\cancel{V}_2 = l_2A_b = 2\times\dfrac{\pi\times 1^2}{4} = 1{,}571\,\mathrm{m}^3$

$${}_1W_2 = p_1(\cancel{V}_2 - \cancel{V}_1) = 100{,}15\,\mathrm{kJ}$$

(a) Substituiremos a expressão de m_2 obtida com a equação de estado e a expressão de u_2 na 1ª Lei:

$$m_2 = \frac{p_2\cancel{V}_2}{RT_2},\quad u_2 = c_vT_2 \quad\Rightarrow\quad \frac{p_2\cancel{V}_2}{R\cancel{T_2}}c_v\cancel{T_2} - m_1u_1 = -{}_1W_2 + m_eh_e$$

$$m_e = \frac{p_2\cancel{V}_2c_v}{Rh_e} - \frac{m_1u_1}{h_e} + \frac{{}_1W_2}{h_e} = 1{,}163\,\mathrm{kg}$$

Substituindo na equação da conservação de massa: $m_2 = m_e + m_1 = 1{,}957\,\mathrm{kg}$

$T_2 = \dfrac{p_2\cancel{V}_2}{m_2 R} = 297{,}22\,\mathrm{K} \rightarrow$ a temperatura não varia muito e fica mesmo em torno de 25 ℃, portanto a aproximação de calores específicos constantes é razoável (se não fosse, bastaria iterar a solução a partir dos calores específicos calculados com sucessivas estimativas de temperatura, sendo a primeira justamente essa que calculamos).

(b) $\Delta S_{\text{ger}} = m_2 s_2 - m_1 s_1 - m_e s_e = m_2 s_2 - m_1 s_1 - (m_2 - m_1) s_e = m_2(s_2 - s_e) + m_1(s_e - s_1)$

$$\Delta S_{\text{ger}} = m_2 \left[c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_e}\right) - R \ln\left(\frac{p_2}{p_e}\right) \right] + m_1 \left[c_p \ln\left(\frac{T_e}{T_1}\right) - R \ln\left(\frac{p_e}{p_1}\right) \right] = 0{,}7488\,\mathrm{kJ/K}$$

4)

(a) Substância: gás ideal com calores específicos constantes. Dividindo o processo em duas etapas.

Etapa 1-2: Pistão chega ao ponto D, ocorre uma expansão não resistida no cilindro

${}_1Q_2 = 0$, ${}_1W_2 = 0 \rightarrow U_1 = U_2$, gás ideal $\rightarrow T_1 = T_2$

Etapa 2-3: O pistão comprime o gás de forma adiabática e reversível $\rightarrow$ processo isentrópico

$$k = \frac{\bar{c_P}}{\bar{c_V}},\ \bar{R} = \bar{c_P} - \bar{c_V} = 8{,}314\,\mathrm{J/molK} \rightarrow \bar{c_P} = 41{,}57\,\mathrm{J/molK} \tag{1}$$
$$k = 1{,}25$$

$$\left(\frac{T_3}{T_2}\right) = \left(\frac{\cancel{V}_2}{\cancel{V}_3}\right)^{k-1} \tag{2}$$
$$= 1{,}01^{0{,}25}, \text{apos x repeticoes:} \tag{3}$$
$$\left(\frac{T_f}{T_i}\right) = 1{,}01^{0{,}25x} \tag{4}$$
$$\frac{600}{300} = 1{,}01^{0{,}25x} \rightarrow 0{,}25x = \frac{\ln 2}{\ln 0{,}1} \tag{5}$$
$$x = 278{,}64$$

Resposta: 279 repetições.

(b) ${}_iW_f = n\bar{c_V}(T_f - T_i)$

$$n = \frac{p_i \cancel{V}_i}{\bar{R} T_i} = \frac{10^6 \times 1}{8{,}314 \times 300} = 400{,}93\,\mathrm{mol}$$

Portanto: ${}_iW_f = 4\,\mathrm{MJ}$

(c)

$${}_i\sigma_f = n(s_f - s_i) = n \left[\bar{c_V} \ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right) + \bar{R} \ln\left(\frac{v_f}{v_i}\right) \right] = 400{,}93 \times 33{,}256 \times \ln 2 = 9{,}24\,\mathrm{kJ/K}$$

Há geração de entropia porque parte do processo porque há expansao não resistida do gás no cilindro, o que caracteriza irreversibilidade do processo.

(d) A eficiência isentrópica é a razao entre o trabalho realizado no processo se ele fosse isentrópico e o trabalho realizado durante o processo real. O trabalho calculado no item (b) e o trabalho realizado sobre o gás, que ocorre durante a porção isentrópica do processo (poderia tambem ser calculado admitindo um processo com $p\cancel{V}^k$ =constante, o valor é o mesmo). No processo real, além do trabalho realizado sobre o gás, o trabalho também tem de ser realizado sobre o meio para trazer o pistão de volta ao ponto D. Como a operação do conjunto cilindro pistão e reversível, considereraremos que este processo ocorre de forma quase-estática, e que a pressão do cilindro durante o percurso é constante e igual a pressão atmosférica, admitida 100 kPa. Assim, em cada repetição, o trabalho realizado sobre o meio e:

$W_{meio} = p_{atm} \times \Delta\cancel{V} - 100 \times 0{,}01 = 1\,\mathrm{kJ}$. Depois de 279 repetições, $W_{meio,total} = 279\,\mathrm{kJ}$

Assim,

$$\eta_s = \frac{W_s}{W_real} = \frac{4000}{4000 + 279} = 0{,}935$$