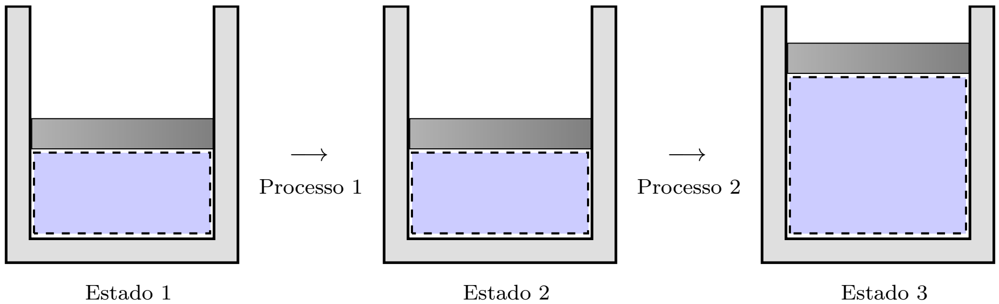
Data: 07/07/2017

Professor: Emílio G. F. Mercuri

(1) (40,0 pontos) Ar dentro de um cilindro-pistão é submetido a dois processos.
Processo 1: O ar no estado 1 a 227°C, 1000 kPa com um volume de 0,1 m^3 é aquecido até 1500 K em um processo isocórico chegando ao estado 2.
Processo 2: Agora o ar parte do estado 2 e é expandido em um processo politrópico ($P\nu^{1,4}$ = constante) atingindo uma pressão de 200 kPa no estado 3.



a) Determine a massa do ar e sua pressão no estado 2.
b) Calcule o trabalho e a transferência de calor no processo 1.
c) Encontre o volume final e a temperatura do estado 3.
d) Calcule o trabalho e a transferência de calor no processo 2.

Solução da Questão 1

Considere os dois processos:

- **Processo 1**: Estado 1 → Estado 2
- **Processo 2**: Estado 2 → Estado 3

a) Determine m_2 e P_2 (**10.0 pontos**)

O sistema é fechado ($m_1 = m_2 = m_3 = m$) e o processo 1 é isocórico ($V_1 = V_2 = V$), portanto: $\nu_1 = \nu_2 = V/m$.

Estado 1 ($T_1 = 227°\text{C} = 500{,}15$ K, $P_1 = 1000$ kPa, $V_1 = 0{,}1$ m^3)

Considerando o Ar dentro do cilindro-pistão como um gás ideal: $PV = mRT$, $R_{\text{ar}} = 0{,}287$ kJ/(kg K)

$$m = \frac{P_1 V_1}{R T_1} = 0{,}697\,\text{kg} \quad \blacksquare$$

Estado 2 ($T_2 = 1500$ K, $V_2 = V_1 = 0{,}1$ m^3)

Do modelo de gás ideal, tem-se que $P\nu = RT$. O processo 1 é isocórico, $\nu_1 = \nu_2$, portanto:

$$\frac{P}{T} = \frac{R}{\nu} = \text{constante}$$

Consequentemente:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \qquad \text{isolando } P_2 \qquad \rightarrow \qquad P_2 = T_2 \frac{P_1}{T_1} = 2999{,}1\,\text{kPa} \approx 3000\,\text{kPa} \quad \blacksquare$$

b) Determine ${}_1W_2$ e ${}_1Q_2$ (**10.0 pontos**)

Como o processo 1 é isocórico, temos que $V = V_1 = V_2$ constante, portanto o trabalho é nulo:

$${}_1W_2 = \int P\,dV = 0 \quad \blacksquare$$

Para o sistema fechado em questao, desprezando as variações de energia cinética e potencial, a 1a lei da Termodinâmica é:

$$E_2 - E_1 = m(u_2 - u_1) = {}_1Q_2 - {}_1W_2$$

Considerando c_v constante:

$${}_1Q_2 = m(u_2 - u_1) \approx m c_v (T_2 - T_1) = 0{,}697(0{,}717)(1500 - 500{,}15) = 499{,}75\,\text{kJ} \quad \blacksquare$$

Considerando c_v variável:

$${}_1Q_2 = m(u_2 - u_1) = 0{,}697(1205{,}25 - 359{,}84) = 589{,}25\,\text{kJ} \quad \blacksquare$$

c) Determine V_3 e T_3 (**10.0 pontos**)

Estado 3 ($P_3 = 200$ kPa, $P\nu^{1,4} = $ constante)

O processo 2 é politrópico, portanto:

$$P_2\nu_2^{1,4} = P_3\nu_3^{1,4} = \text{constante}$$

como a massa é constante, pode-se escrever também:

$$P_2V_2^{1,4} = P_3V_3^{1,4} = m^{1,4} \times \text{constante} = \text{outra constante}$$

Isolando V_3:

$$V_3 = V_2\left(\frac{P_2}{P_3}\right)^{1/1,4} = 0{,}1\left(\frac{3000}{200}\right)^{0{,}7143} = 0{,}692\,\mathrm{m}^3 \quad \blacksquare$$

$$P_3V_3 = mRT_3 \qquad \rightarrow \qquad T_3 = \frac{P_3V_3}{mR} = \frac{200(0{,}692)}{0{,}697(0{,}287)} = 691{,}87\,\mathrm{K} \quad \blacksquare$$

d) Determine ${}_2W_3$ e ${}_2Q_3$ (**10.0 pontos**)

Em processo politrópico com $n \neq 1$, temos que:

$${}_2W_3 = \frac{1}{1-n}(P_3V_3 - P_2V_2) = \frac{1}{1-n}(mRT_3 - mRT_2) = \frac{mR}{1-n}(T_3 - T_2)$$

$${}_2W_3 = \frac{0{,}697(0{,}287)}{1-1{,}4}(691{,}87 - 1500) = 404{,}14\,\mathrm{kJ} \quad \blacksquare$$

Da 1ª lei da termodinâmica, obtemos o balanço de energia e pode-se quantificar a transferência de calor ${}_2Q_3$:

Para c_v constante:

$${}_2Q_3 = m(u_3 - u_2) + {}_2W_3 \approx mc_v(T_2 - T_1) + {}_2W_3 = 0{,}697(0{,}717)(691{,}87 - 1500) + 404{,}14 = 0{,}27\,\mathrm{kJ} \quad \blacksquare$$

Para c_v variável:

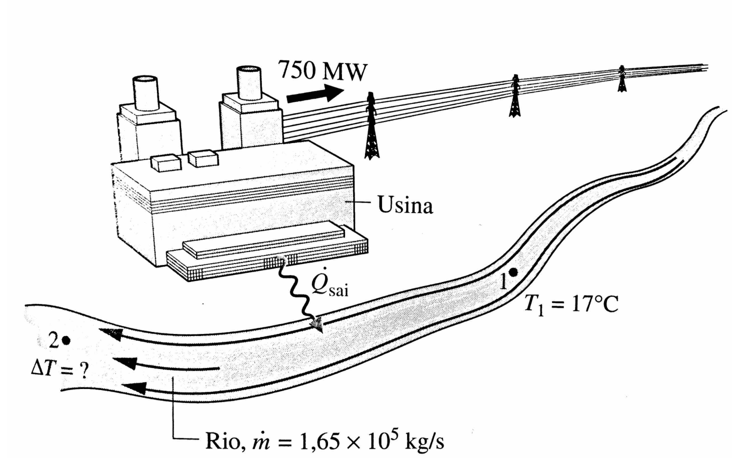
$${}_2Q_3 = m(u_3 - u_2) + {}_2W_3 = 0{,}697(506{,}25 - 1205{,}25) + 404{,}14 = -83\,\mathrm{kJ} \quad \blacksquare$$

(2) (60.0 pontos) Em regime permanente, uma usina de 750 MW recebe energia por transferência de calor a partir da combustão de um combustível a uma temperatura média de 317°C. Como ilustrado abaixo, a usina descarrega energia por transferência de calor para um rio, cuja vazão mássica é $1{,}65 \times 10^5$ kg/s. A montante da usina o rio está a 17°C. Determine o aumento de temperatura do rio, em °C, para essa transferência de calor se a eficiência da usina é:

a) a eficiência de Carnot de um ciclo de potência operando entre os reservatórios quente a 317°C e frio a 17°C.

b) dois terços da eficiência de Carnot obtida na parte (a).

c) Qual é o efeito das irreversibilidades no conjunto sistema e vizinhança?



Solução da Questão 2:

Hipóteses a serem adotadas na análise de engenharia:

- A usina é modelada como um ciclo de potência (máquina térmica) operando em regime permanente.
- A combustão gera energia na forma de calor que é transferida para o ciclo de potência. Essa energia é convertida em energia elétrica. Inevitavelmente, energia na forma de calor é rejeitada para o rio. Essas são as únicas formas de transferência de calor consideradas.
- Considera-se que o rio se desenvolve em escoamento incompressível com calor específico constante c.

Adotando o volume de controle do ponto 1 ao ponto 2 no rio, pode-se realizar o balanço de energia através da 1^a lei da termodinâmica:

$$\frac{dE_{\text{V.C.}}}{dt} = \dot{Q}_{\text{V.C.}} - \dot{W}_{\text{V.C.}} + \sum \dot{m}_e(h_e + \frac{1}{2}v_e^2 + gZ_e) - \sum \dot{m}_s(h_s + \frac{1}{2}v_s^2 + gZ_s)$$

Para o volume de controle adotado, considerando que da seção 1 para a seção 2 não há variação das energias cinética e potencial do rio, pode-se simplificar a 1^a lei:

$$0 = \dot{Q}_{\text{V.C.}} - 0 + \dot{m}(h_e) - \dot{m}(h_s)$$

$$\dot{Q}_{\text{V.C.}} = \dot{m}(h_s - h_e)$$

$$\dot{Q}_{\text{V.C.}} = \dot{m}\, c\, (T_s - T_e) \tag{1}$$

Para uma máquina térmica, temos que:

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_H} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_H}$$

A 1^a lei aplicada sobre a máquina térmica é $0 = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L - \dot{W}$, ou seja: $\dot{Q}_H = \dot{Q}_L + \dot{W}$

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_H} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_L + \dot{W}}$$

$$\eta(\dot{Q}_L + \dot{W}) = \dot{W}$$

$$\eta\dot{Q}_L = \dot{W} - \eta\dot{W} = \dot{W}(1 - \eta)$$

$$\dot{Q}_L = \dot{W}\left(\frac{1}{\eta} - 1\right) \tag{2}$$

Combinando as equações 1 e 2 e identificando que a taxa de tranferência de calor que entra no volume de controle do rio é $\dot{Q}_L$:

$$\dot{m}\, c\, (T_s - T_e) = \dot{W}\left(\frac{1}{\eta} - 1\right)$$

$$(T_s - T_e) = \frac{\dot{W}}{\dot{m}c}\left(\frac{1}{\eta} - 1\right)$$

a) (**20.0 pontos**) ΔT para a eficiência de Carnot de um ciclo de potência operando entre os reservatórios quente a 317°C e frio a 17°C.

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{290{,}15}{590{,}15} = 0{,}5083$$

$$(T_s - T_e) = \frac{\dot{W}}{\dot{m}\, c}\left(\frac{1}{\eta} - 1\right) = \frac{750 \times 10^3}{1{,}65 \times 10^5 (4{,}2)}\left(\frac{1}{0{,}5083} - 1\right) = 1{,}05\, K = 1{,}05°\text{C} \quad \blacksquare$$

b) (**20.0 pontos**) ΔT para dois terços da eficiência de Carnot obtida na parte (a).

$$\frac{2}{3}\eta_{\text{Carnot}} = 0{,}339$$

$$(T_s - T_e) = \frac{\dot{W}}{\dot{m}\, c}\left(\frac{1}{\eta} - 1\right) = \frac{750 \times 10^3}{1{,}65 \times 10^5 (4{,}2)}\left(\frac{1}{0{,}339} - 1\right) = 2{,}11\, K = 2{,}11°\text{C} \quad \blacksquare$$

c) (**20.0 pontos**) O efeito das irreversibilidades na planta industrial executando um ciclo de potência é <u>o aumento da transferência de calor para o rio</u>. $\blacksquare$

Relações Matemáticas

$$\frac{dm_{\text{V.C.}}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \qquad \frac{dE_{\text{V.C.}}}{dt} = \dot{Q}_{\text{V.C.}} - \dot{W}_{\text{V.C.}} + \sum \dot{m}_e(h_e + \frac{1}{2}v_e^2 + gZ_e) - \sum \dot{m}_s(h_s + \frac{1}{2}v_s^2 + gZ_s)$$

$$(m_2 - m_1)_{\text{V.C.}} = \sum m_e - \sum m_s \qquad E_2 - E_1 = Q_{\text{V.C.}} - W_{\text{V.C.}} + \sum m_e(h_e + \frac{1}{2}v_e^2 + gZ_e) - \sum m_s(h_s + \frac{1}{2}v_s^2 + gZ_s)$$

$$PV = mRT = n\bar{R}T \qquad n = \frac{m}{M} \qquad PV^\alpha = C \qquad \oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \qquad {}_1W_2 = \int_1^2 PdV$$

$$\eta_{\text{térmico real}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \leq 1 - \frac{T_L}{T_H} \qquad \beta_{\text{real}}^{\text{ref}} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} \leq \frac{T_L}{T_H - T_L} \qquad \beta_{\text{real}}^{\text{B.C.}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} \leq \frac{T_H}{T_H - T_L}$$