Data: 19/04/2017
Professor: Emílio G. F. Mercuri

(1) (50.0 pontos) Um sistema executa um ciclo termodinâmico e realiza trabalho enquanto recebe 1000 kJ por transferência de calor de uma fonte de calor a uma temperatura de 500 K e descarrega 600 kJ por transferência de calor em um reservatório frio a temperatura T_L. Qual é a natureza do ciclo (reversível, irreversível ou impossível) em cada caso?

a) $T_L = 200$ K
b) $T_L = 300$ K
c) $T_L = 400$ K

Solução da Questão 1:

Adota-se Q_a para a quantidade de calor afluente e Q_e para a quantidade de calor efluente.
Aplicando a desigualdade de Clausius, obtem-se:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_a}{T_H} - \frac{Q_e}{T_L} \leq 0$$

a) $T_L = 200$ K:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \frac{1000}{500} - \frac{600}{200} = -1\,\text{kJ/K} < 0 \quad \rightarrow \quad \text{irreversível} \quad \blacksquare$$

b) $T_L = 300$ K:

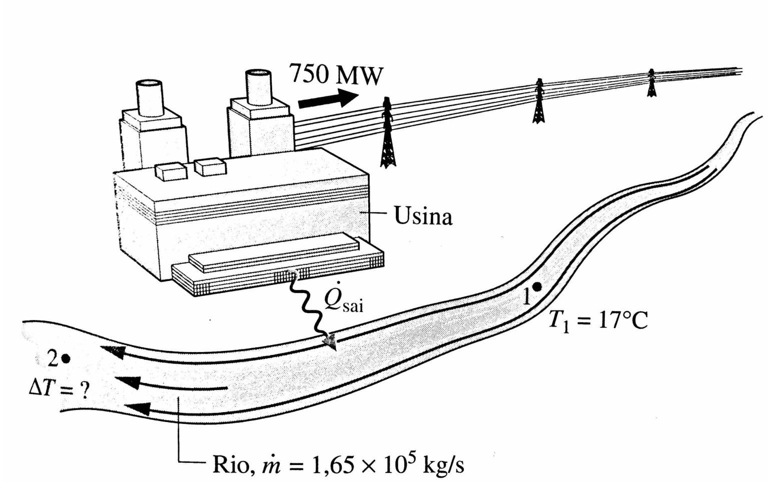
$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \frac{1000}{500} - \frac{600}{300} = 0\,\text{kJ/K} = 0 \quad \rightarrow \quad \text{reversível} \quad \blacksquare$$

c) $T_L = 400$ K:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \frac{1000}{500} - \frac{600}{400} = +0{,}5\,\text{kJ/K} < 0 \quad \rightarrow \quad \text{impossível} \quad \blacksquare$$

(2) (50.0 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, ΔT em °C, observável 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).



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:

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

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

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

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: $\dot{Q}_H = \dot{Q}_L + \dot{W}$

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

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

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

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

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

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

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

Comentário: O efeito das irreversibilidades na planta industrial executando um ciclo de potência é o aumento da transferência de calor para o rio.

Relações Matemáticas

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

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

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

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