

$$E_1 = E_2$$

$$E = U + E_p + E_c$$

1ª Lei da Termodinâmica

SISTEMAS ABERTOS

REGIME INSTACIONÁRIO e UNIFORME

Equação de Conservação de massa:

$$m_f - m_i = \sum_{j=1}^{N_{in}} m_{j,in} - \sum_{l=1}^{N_{out}} m_{l,out}$$

massa no VC no instante final massa no VC no instante inicial massa que entra no VC massa que sai do VC

No caso de se ter 1 entrada e 1 saída $\rightarrow m_f - m_i = m_e - m_s$

Equação de conservação de energia:

(1ª lei - sistema aberto em regime instacionário e uniforme)

$$Q + W = \left[m \left(u + \frac{c^2}{2} + gz \right) \right]_f - \left[m \left(u + \frac{c^2}{2} + gz \right) \right]_i + \sum_{out} \left[m \left(h + \frac{c^2}{2} + gz \right) \right]_{out} - \sum_{in} \left[m \left(h + \frac{c^2}{2} + gz \right) \right]_{in}$$

Energia dentro VC no instante final Energia dentro VC no instante inicial Energia que sai do VC Energia que entra no VC

Se as Energias Cinética e Potencial são desprezáveis:

$$Q + W = m_f u_f - m_i u_i + \sum_{out} (mh)_{out} - \sum_{in} (mh)_{in}$$

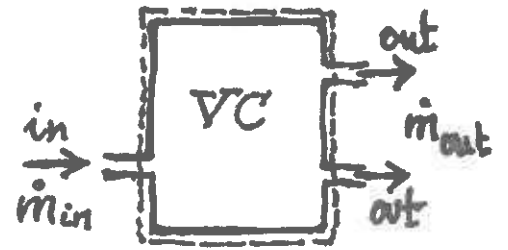
No caso de se ter 1 entrada e 1 saída:

$$Q + W = m_f u_f - m_i u_i + m_s h_s - m_e h_e$$

1ª Lei TERMODINÂMICA

Sistemas Abertos

VOLUME de Controle



Eq. Continuidade
Eq. Conservação de massa

$$\sum_{j=1}^{N_{in}} \dot{m}_{j,in} = \sum_{i=1}^{N_{out}} \dot{m}_{i,out}$$

$$\dot{m} = \rho CA \quad (kg/s)$$

$$\dot{m} = \rho \dot{V}$$

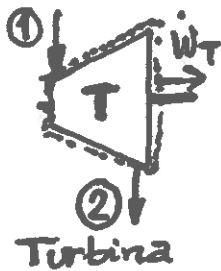
$$\dot{V} = CA \quad (m^3/s)$$

1ª Lei TMD

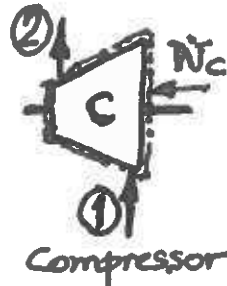
- regime permanente
- propriedades uniformes nas "in" e "out"

$$\dot{Q} + \dot{W} = \sum_{i=1}^{N_{out}} \left[\dot{m} \left(h + \frac{c^2}{2} + gz \right) \right]_{i,out} - \sum_{j=1}^{N_{in}} \left[\dot{m} \left(h + \frac{c^2}{2} + gz \right) \right]_{j,in}$$

Balanco energético



Turbina

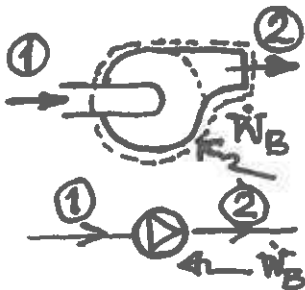


Compressor

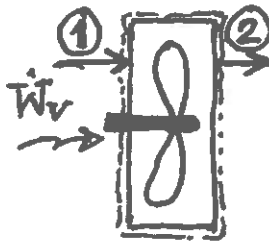
$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$$

$$\dot{W}_T = \dot{m} (h_2 - h_1)$$

$$\dot{W}_C = \dot{m} (h_2 - h_1)$$



Bomba

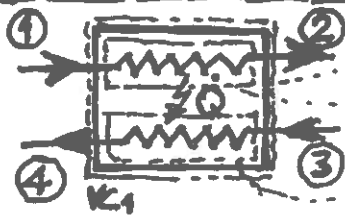


ventilador

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$$

$$\dot{W}_B = \dot{m} (h_2 - h_1)$$

$$\dot{W}_V = \dot{m} (h_2 - h_1)$$



Permutador de Calor

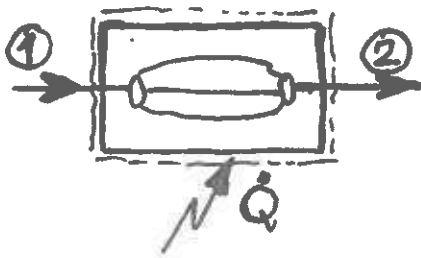
$$\dot{Q} + \dot{W} = (\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4) - (\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_3 h_3)$$

$$\dot{Q} + \dot{W} = \dot{m}_1 (h_2 - h_1)$$

$$\dot{Q} + \dot{W} = \dot{m}_3 (h_4 - h_3)$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

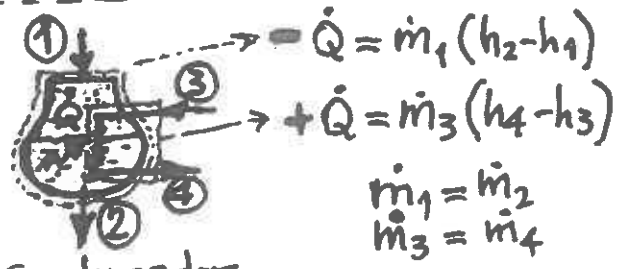
$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4$$



caldeira

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$$

$$\dot{Q} + \dot{W} = \dot{m} (h_2 - h_1)$$



Condensador

Evaporador / igual ao Condensador mas atenção aos sinais

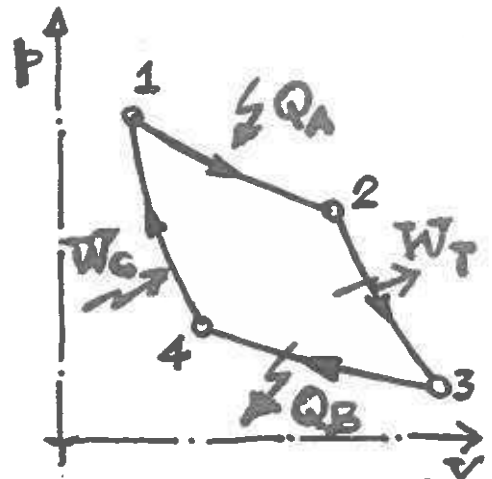
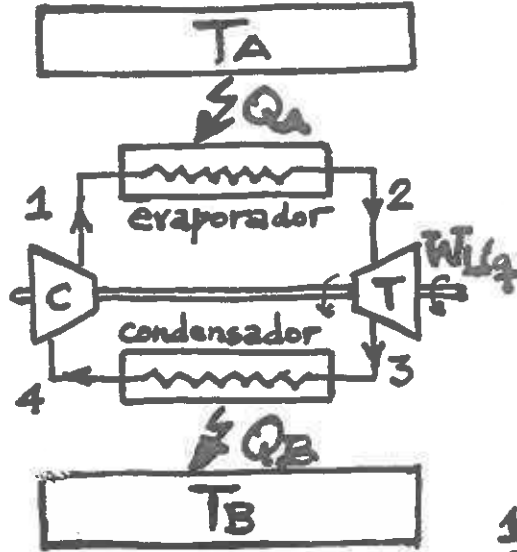
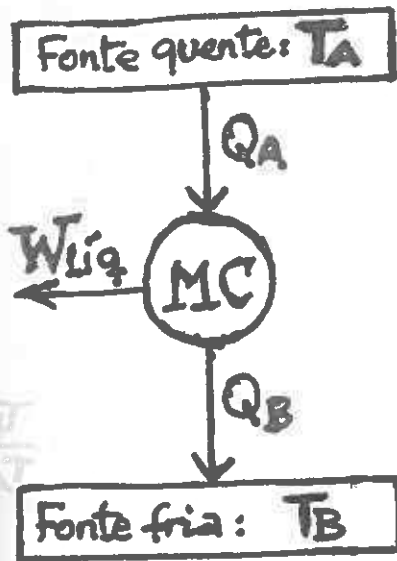
$$\dot{Q} = \dot{m}_1 (h_2 - h_1)$$

$$+\dot{Q} = \dot{m}_3 (h_4 - h_3)$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4$$

2ª Lei da TERMODINÂMICA

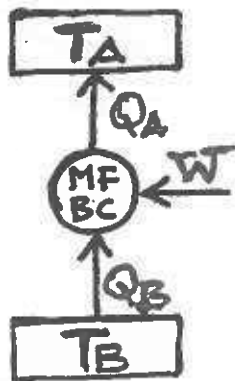


- 1-2: Isotérmica reversível
- 2-3: Adiabática reversível
- 3-4: Isotérmica reversível
- 4-1: Adiabática reversível

• Rendimento térmico Motor de Carnot = $\frac{\text{Efeito pretendido}}{\text{Consumo para obter esse efeito}}$

$$\eta_{MC} = \frac{|W_{liq}|}{|Q_A|} = \frac{|Q_A| - |Q_B|}{|Q_A|} = 1 - \frac{|Q_B|}{|Q_A|} = 1 - \frac{T_B}{T_A} \leftarrow \text{T absolutas}$$

• Máquina frigorífica de Carnot
Bomba de calor de Carnot



Coefficient of performance

$$(COP)_{MF_c} = \frac{|Q_B|}{|W|} = \frac{|Q_B|}{|Q_A| - |Q_B|} = \frac{1}{\frac{T_A}{T_B} - 1}$$

$$(COP)_{BC_c} = \frac{|Q_A|}{|W|} = \frac{|Q_A|}{|Q_A| - |Q_B|} = \frac{1}{1 - \frac{T_B}{T_A}}$$

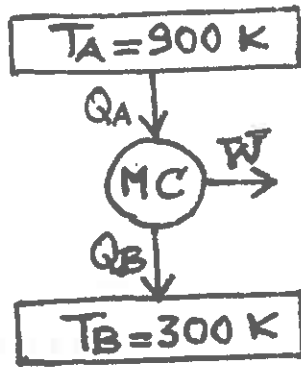
Se (MF) e (BC) funcionarem entre as mesmas fontes a T_A e T_B $\Rightarrow (COP)_{BC_c} = (COP)_{MF_c} + 1$

NOTA:

η_{MC} ; COP_{MF_c} ; COP_{BC_c} \rightarrow São valores máximos para Máquinas Térmicas a funcionarem entre as mesmas fontes

- 5.2 a) Calcule o rendimento térmico de um motor de Carnot cujo fluido de trabalho é vapor de água, e que opera entre duas fontes térmicas a 900K e 300K;
 b) Calcule a eficiência de um refrigerador de Carnot cujo fluido frigorífico é o amoníaco (NH₃) e que trabalha entre duas fontes térmicas a -30 °F e 0 °F;
 c) Calcule a eficiência de uma bomba de calor de Carnot a funcionar entre 0 °C e 18 °C.

a)



$$\eta_{MC} = \frac{\text{Efeito}}{\text{Consumo}} = \frac{|W|}{|Q_A|} = \frac{|Q_A| - |Q_B|}{|Q_A|} = 1 - \frac{|Q_B|}{|Q_A|}$$

Para uma MT reversível:

$$\Delta S_{univ} = \Delta S_{sist} + \Delta S_{viz} = 0$$

= 0 (ciclo reversível)

$$\Delta S_{univ} = \sum \left(\frac{Q_i}{T_i} \right)_{viz} = -\frac{|Q_A|}{T_A} + \frac{|Q_B|}{T_B} = 0$$

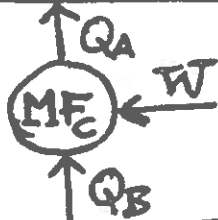
$$\frac{|Q_B|}{|Q_A|} = \frac{T_B}{T_A}$$

$$\eta_{MC} = 1 - \frac{T_B}{T_A} = 1 - \frac{300}{900} \Rightarrow \eta_{MC} = 66,7\%$$

Valor máximo possível para uma MT a funcionar entre as mesmas fontes a T_A e T_B

b)

$$T_A = 0^\circ\text{F} = 255,4 \text{ K}$$



$$T_B = -30^\circ\text{F} = 238,7 \text{ K}$$

$$\text{COP}|_{MF} = \frac{\text{Efeito}}{\text{Consumo}} = \frac{|Q_B|}{|W|} = \frac{|Q_B|}{|Q_A| - |Q_B|} = \frac{1}{\frac{|Q_A|}{|Q_B|} - 1}$$

$$\Delta S_{univ} = \Delta S_{sist} + \Delta S_{viz} = \sum \left(\frac{Q_i}{T_i} \right)_{viz} = \frac{|Q_A|}{T_A} - \frac{|Q_B|}{T_B} = 0$$

= 0 (ciclo reversível)

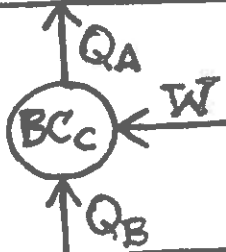
$$\text{COP}|_{MF} = \frac{1}{\frac{T_A}{T_B} - 1} = \frac{1}{\frac{255,4}{238,7} - 1} \Rightarrow \text{COP}|_{MF} = 14,3$$

Valor máximo para uma MF a funcionar entre as mesmas fontes

$$T(\text{K}) = 273,15 + \frac{5}{9} [T(\text{F}) - 32]$$

c)

$$T_A = 18^\circ\text{C} = 291,15 \text{ K}$$



$$T_B = 0^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$$

$$\text{COP}|_{BC} = \frac{\text{Efeito}}{\text{Consumo}} = \frac{|Q_A|}{|W|} = \frac{|Q_A|}{|Q_A| - |Q_B|} = \frac{1}{1 - \frac{|Q_B|}{|Q_A|}}$$

$$\Delta S_{univ} = \Delta S_{sist} + \Delta S_{viz} = \sum \left(\frac{Q_i}{T_i} \right)_{viz} = \frac{|Q_A|}{T_A} - \frac{|Q_B|}{T_B} = 0$$

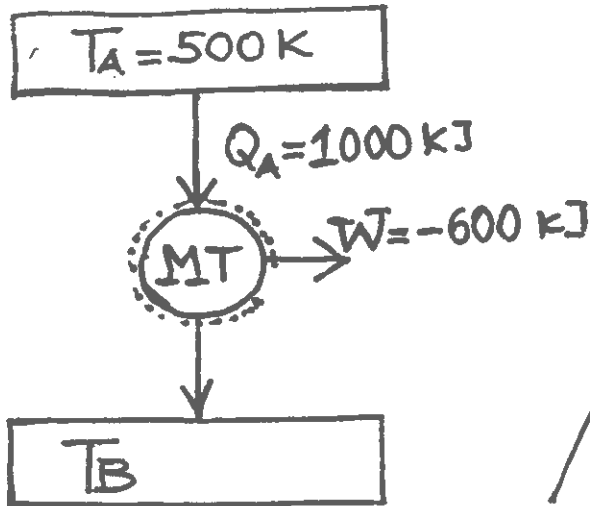
= 0 (ciclo reversível)

$$\text{COP}|_{BC} = \frac{1}{1 - \frac{T_B}{T_A}} = \frac{1}{1 - \frac{273,15}{291,15}} \Rightarrow \text{COP}|_{BC} = 16,2$$

Valor máximo para uma BC a funcionar entre as mesmas fontes (T_A e T_B)

5.3 Uma máquina térmica reversível recebe calor $Q = 1000 \text{ kJ}$ de uma fonte térmica a 500 K , e produz trabalho $W = 600 \text{ kJ}$.

- Determine a quantidade de calor perdida para a fonte fria;
- Determine a variação de entropia de cada fonte;
- Qual é a variação de entropia do universo?



a)

1ª Lei TMD para a MT

$$\sum Q + \sum W = \Delta U = 0 \text{ (ciclo)}$$

$$Q_A + Q_B + W = 0$$

$$1000 + Q_B - 600 = 0$$

$$\underline{\underline{Q_B = -400 \text{ kJ}}}$$

b) Para cada fonte:

$$dS = \frac{\partial Q}{T} \Rightarrow \Delta S = \sum_{i=1}^{N_{\text{fontes}}} \left(\frac{Q_i}{T_i} \right)$$

fonte quente: $\Delta S_{fq} = \frac{Q_A}{T_A} = \frac{1000}{500} \Rightarrow \underline{\underline{\Delta S_{fq} = 2 \text{ kJ/K}}}$

fonte fria: $\Delta S_{ff} = \frac{Q_B}{T_B} = \frac{-400}{200} \Rightarrow \underline{\underline{\Delta S_{ff} = -2 \text{ kJ/K}}}$

Cálculo de T_B :

MT reversível $\Rightarrow \sum_{i=1}^{N_{\text{fontes}}} \frac{\partial Q}{T} = 0 \rightarrow -\frac{|Q_A|}{T_A} + \frac{|Q_B|}{T_B} = 0$

$\Rightarrow T_B = T_A \cdot \frac{|Q_B|}{|Q_A|} = 500 \cdot \frac{|-400|}{|1000|} \Rightarrow \underline{\underline{T_B = 200 \text{ K}}}$

c) $\Delta S_{\text{univ}} = \Delta S_{\text{sist}} + \Delta S_{\text{viz}}$

$$= \Delta S_{\text{sist}} + \sum_{i=1}^{N_f} \frac{\partial Q_i}{T_i}$$

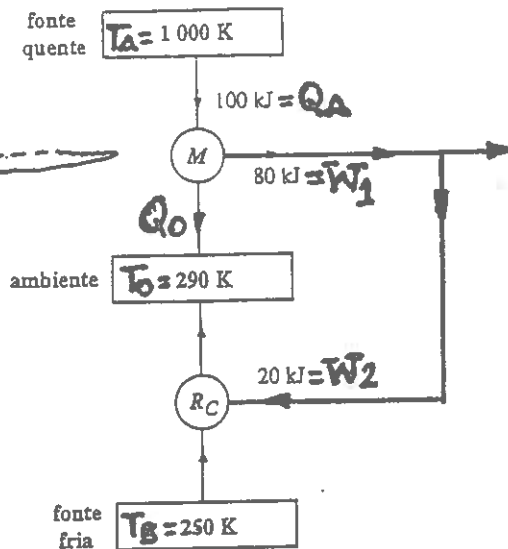
$= 0$ (MT reversível)

$$\Delta S_{\text{univ}} = -\frac{|Q_A|}{T_A} + \frac{|Q_B|}{T_B} = 0$$

$$\underline{\underline{\Delta S_{\text{univ}} = 2 - 2 = 0}}$$

5.6 Um inventor diz ter construído um motor térmico (M) como apresentado na figura adjacente. Parte do trabalho do motor é empregue no accionamento de um refrigerador reversível.

a) Calcule a variação de entropia do universo associada às máquinas apresentadas na figura;



1ª Lei da TMD aplicada a (M)

$$Q_A + W_1 + Q_0 = 0$$

$$Q_0 = -Q_A - W_1$$

$$Q_0 = -100 - (-80)$$

$$Q_0 = -20 \text{ KJ}$$

b) Comente o resultado da alínea anterior em função do desempenho do motor térmico desenvolvido pelo inventor;

c) Se o motor térmico (M) fosse um motor de Carnot, qual seria a variação de entropia do universo associada ao conjunto motor-refrigerador? Porquê?

a) $(\Delta S_{univ})_{RC} = 0 \rightarrow$ Refrigerador é reversível

$$(\Delta S_{univ})_M = \Delta S_{sist} + \Delta S_{viz} = \sum_{i=1}^{N_f} \left(\frac{Q_i}{T_i} \right)_{viz} = -\frac{|Q_A|}{T_A} + \frac{|Q_0|}{T_0} = -\frac{100}{1000} + \frac{20}{290} = -0,031 \text{ KJ/K}$$

$$(\Delta S_{univ})_M = -0,031 \text{ KJ/K} < 0 \Rightarrow \text{IMPOSSÍVEL}$$

A entropia é uma propriedade extensiva que permanece constante nos processos reversíveis, ou aumenta sempre

b) $\eta_M = \frac{\text{Efeito}}{\text{Consumo}} = \frac{|W_1|}{|Q_A|} = \frac{80}{100} \cdot 100 = 80\%$

$\eta_{MC} = \frac{|W_1|}{|Q_A|} = \frac{|Q_A| - |Q_0|}{|Q_A|} = 1 - \frac{|Q_0|}{|Q_A|} = 1 - \frac{T_0}{T_A} = \left(1 - \frac{290}{1000}\right) \cdot 100 = 71\%$

Entre as mesmas fontes $(\Delta S_{univ})_{MC} = \Delta S_{sist} + \Delta S_{viz} = -\frac{|Q_A|}{T_A} + \frac{|Q_0|}{T_0} = 0 \Rightarrow \frac{Q_0}{Q_A} = \frac{T_0}{T_A}$

$\eta_M > \eta_{MC}$
IMPOSSÍVEL

Em desacordo com a Lei da TMD \rightarrow Enunciado Kelvin Planck e corolário de Carnot

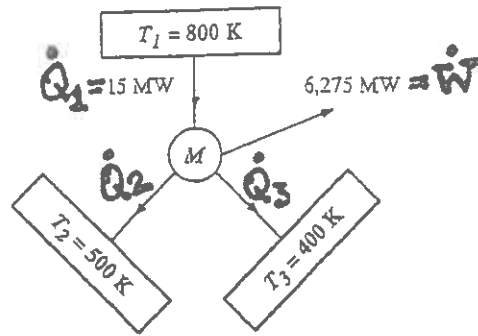
c) (M) \rightarrow M.T. reversível (Motor Carnot)
(Rc) \rightarrow M.T. reversível (Refrigerador Carnot)

Ambas as máquinas são reversíveis interna e externamente, logo

NÃO HA VARIÇÃO DA ENTROPIA DO UNIVERSO

$$(\Delta S_{univ})_{M+RC} = 0$$

5.7 A máquina totalmente reversível apresentada na figura recebe da fonte quente 15 MW de calor e produz 6,275 MW de trabalho.



- Calcule os calores trocados com as fontes frias;
- Determine a variação de entropia de cada fonte térmica;
- Calcule a variação de entropia do universo.

a)

$$1^a \text{ Lei: } \left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 + \dot{W} = \Delta U = U_f - U_i = 0 \\ \text{(ciclo: } U_f = U_i) \end{array} \right\} \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 = -8,725 \text{ MW}$$

$$15 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 - 6,275 = 0$$

2ª Lei: $\Delta S_{\text{univ}} = \Delta S_{\text{sist}} + \Delta S_{\text{viz}} = 0$ (sistema reversível)

$$\Delta S_{\text{univ}} = m(\Delta_f - \Delta_i) = \sum_{i=1}^{N_f} \left(\frac{\dot{Q}_i}{T_i} \right)_{\text{sist}} = 0 \Rightarrow - \left(\frac{\dot{Q}_1}{T_1} + \frac{\dot{Q}_2}{T_2} + \frac{\dot{Q}_3}{T_3} \right) = 0$$

(ciclo: $\Delta_f = \Delta_i$)

(Notar que se esta a analisar o sistema)

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 = -8,725 \\ + \left(\frac{15}{800} + \frac{\dot{Q}_2}{500} + \frac{\dot{Q}_3}{400} \right) = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_2 = -8,725 - \dot{Q}_3 \\ 37,5 + (-4 \times 8,725 - 4 \dot{Q}_3) + 5 \dot{Q}_3 = 0 \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l} \dot{Q}_2 = -6,125 \text{ MW} \\ \dot{Q}_3 = -2,6 \text{ MW} \end{array}$$

b)

$$\Delta S_1 = \frac{\dot{Q}_1}{T_1} = \frac{-15 \times 10^3}{800} = -18,75 \text{ kW/K} \quad (\dot{Q}_1 \text{ sai da fonte 1} \rightarrow \text{sinal -})$$

$$\Delta S_2 = \frac{\dot{Q}_2}{T_2} = \frac{+6,125 \times 10^3}{500} = +12,25 \text{ kW/K} \quad (\dot{Q}_2 \text{ entra na fonte 2} \rightarrow \text{sinal +})$$

$$\Delta S_3 = \frac{\dot{Q}_3}{T_3} = \frac{+2,6 \times 10^3}{400} = +6,5 \text{ kW/K} \quad (\dot{Q}_3 \text{ entra na fonte 3} \rightarrow \text{sinal +})$$

c)

$$\Delta S_{\text{univ}} = \Delta S_{\text{sist}} + \Delta S_{\text{viz}} = \left[\begin{array}{l} + \sum_{i=1}^{N_f} \left(\frac{\dot{Q}_i}{T_i} \right)_{\text{viz}} = + \left(\frac{\dot{Q}_1}{T_1} + \frac{\dot{Q}_2}{T_2} + \frac{\dot{Q}_3}{T_3} \right) \\ - \sum_{i=1}^{N_f} \left(\frac{\dot{Q}_i}{T_i} \right)_{\text{sist}} = - \left(\frac{\dot{Q}_1}{T_1} + \frac{\dot{Q}_2}{T_2} + \frac{\dot{Q}_3}{T_3} \right) \end{array} \right]$$

(ciclo: $\Delta_f = \Delta_i$)

$$\Delta S_{\text{univ}} = \left\{ \begin{array}{l} + (-18,75 + 12,25 + 6,5) = 0 \\ - (+18,75 - 12,25 - 6,5) = 0 \end{array} \right. \Rightarrow$$

$$\Delta S_{\text{univ}} = 0$$

(sistema reversível)