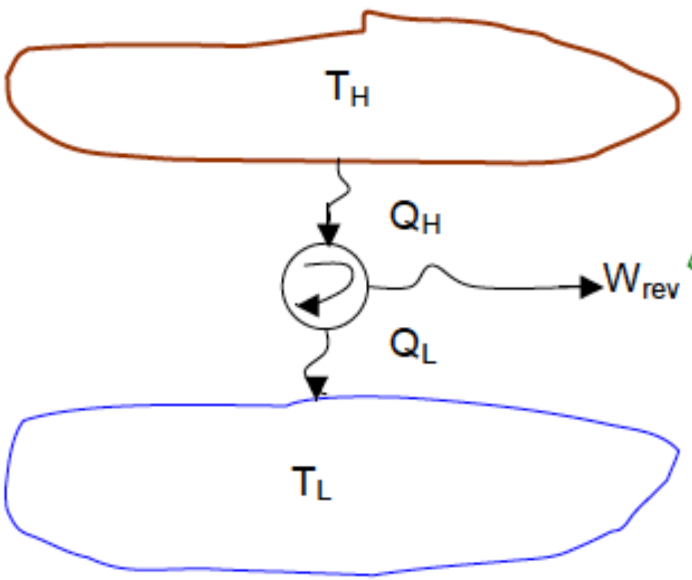
ENTROPIA

Desigualdade de Clausius

(corolário da 2ª Lei)

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$



$$\oint \delta Q = Q_H - Q_L > 0$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L} = 0$$

pois $\dfrac{Q_H}{Q_L} = \dfrac{T_H}{T_L}$

Motor Irreversível (opera entre T_H e T_L e recebe Q_H)

$$W_{ir} < W_{rev}$$

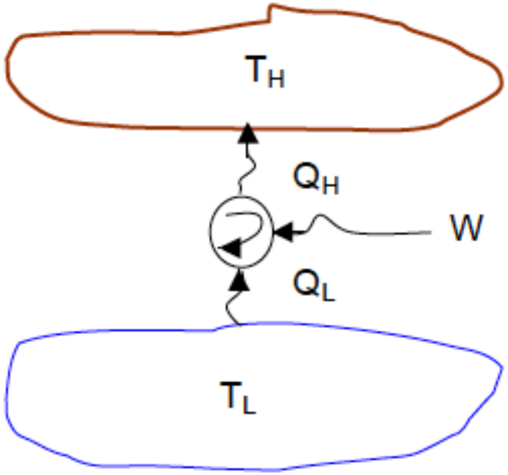
$$Q_H - Q_{L_{ir}} < Q_H - Q_L \quad \rightarrow \quad Q_{L_{ir}} > Q_L$$

Assim $\oint \delta Q = Q_H - Q_{L_{ir}} > 0$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_{L_{ir}}}{T_L} < 0$$

$$\therefore \oint \frac{\delta Q}{T} < 0$$

Ciclos de Refrigeração



Reversível

$$\oint \delta Q = -Q_H + Q_L < 0$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = -\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_L}{T_L} = 0$$

Irreversível → $\oint \delta Q = -Q_{H_{ir}} + Q_L < 0$

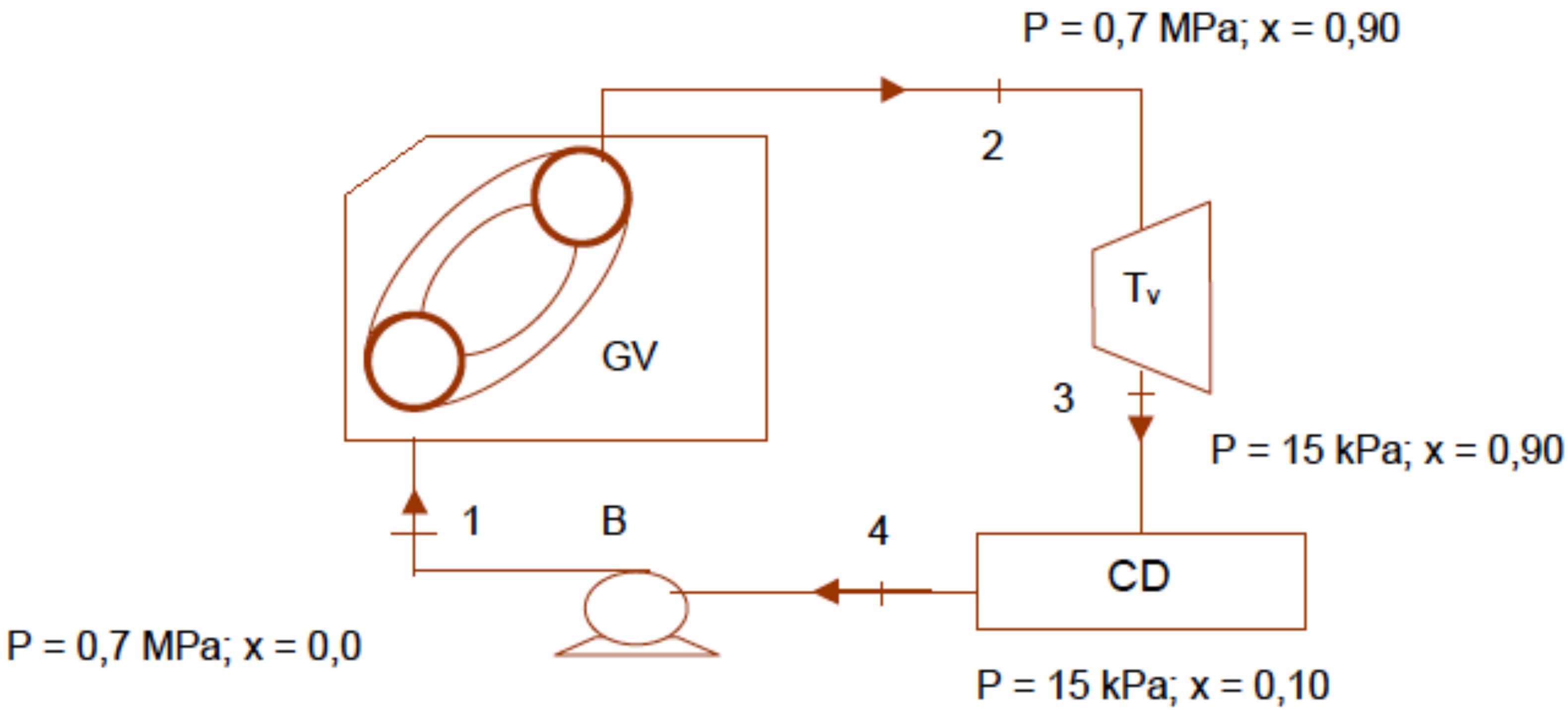
(T_H, T_L, Q_L)

$$W_{ir} > W_{rev}$$

$$Q_{H_{ir}} - Q_L > Q_H - Q_L \rightarrow Q_{H_{ir}} > Q_H$$

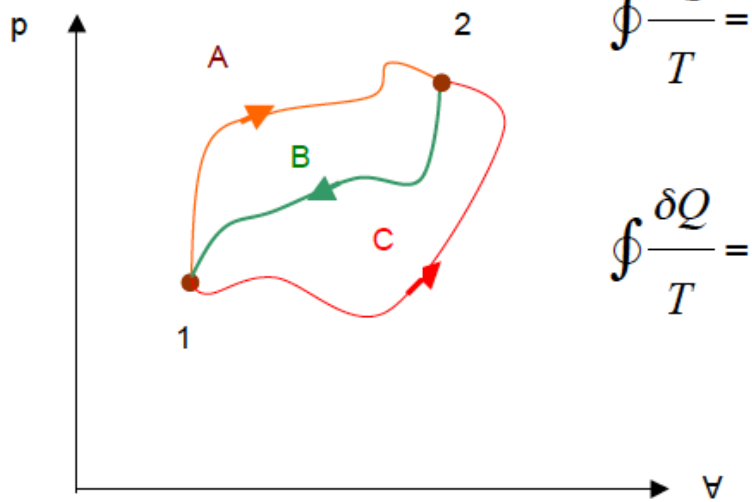
$$\oint \frac{\delta Q}{T} = -\frac{Q_{H_{ir}}}{T_H} + \frac{Q_L}{T_L} < 0$$

	$\oint \delta Q$	$\oint \frac{\delta Q}{T}$	
Motor	≥ 0	≤ 0	*
Refrigerador	≤ 0	≤ 0	*



$$\left.\begin{array}{l} {}_1q_2 = h_2 - h_1 = 2066{,}3 \text{ kJ/kg} \\ {}_3q_4 = h_4 - h_3 = -1898{,}4 \text{ kJ/kg} \end{array}\right\} \begin{array}{l} \oint \dfrac{\delta Q}{T} = \int \left(\dfrac{\delta Q}{T}\right)_{GV} + \int \left(\dfrac{\delta Q}{T}\right)_{CD} \\ \oint \dfrac{\delta Q}{T} = \dfrac{2066{,}3}{164{,}97 + 273{,}15} - \dfrac{1898{,}4}{53{,}97 + 273{,}15} = -1{,}87 \text{ kJ/kg.K} \end{array}$$

Entropia



$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \int_{1A}^{2A} \frac{\delta Q}{T} + \int_{2B}^{1B} \frac{\delta Q}{T} = 0$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \int_{1C}^{2C} \frac{\delta Q}{T} + \int_{2B}^{1B} \frac{\delta Q}{T} = 0$$

$$\int_{1A}^{2A} \frac{\delta Q}{T} = \int_{1C}^{2C} \frac{\delta Q}{T}$$

$$dS \equiv \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{reversível}$$

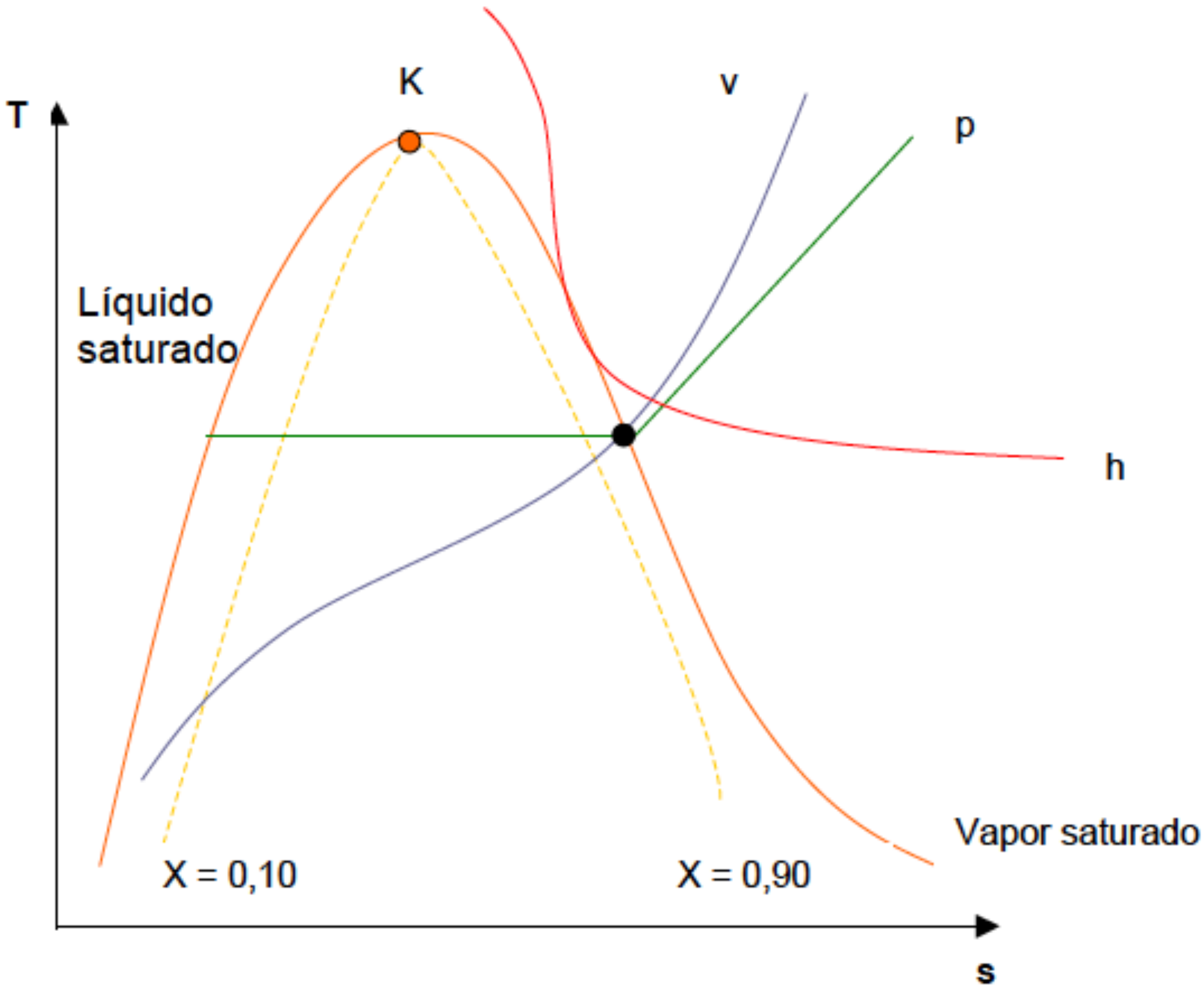
$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{reversível}$$

$1/T \rightarrow$ fator integrante

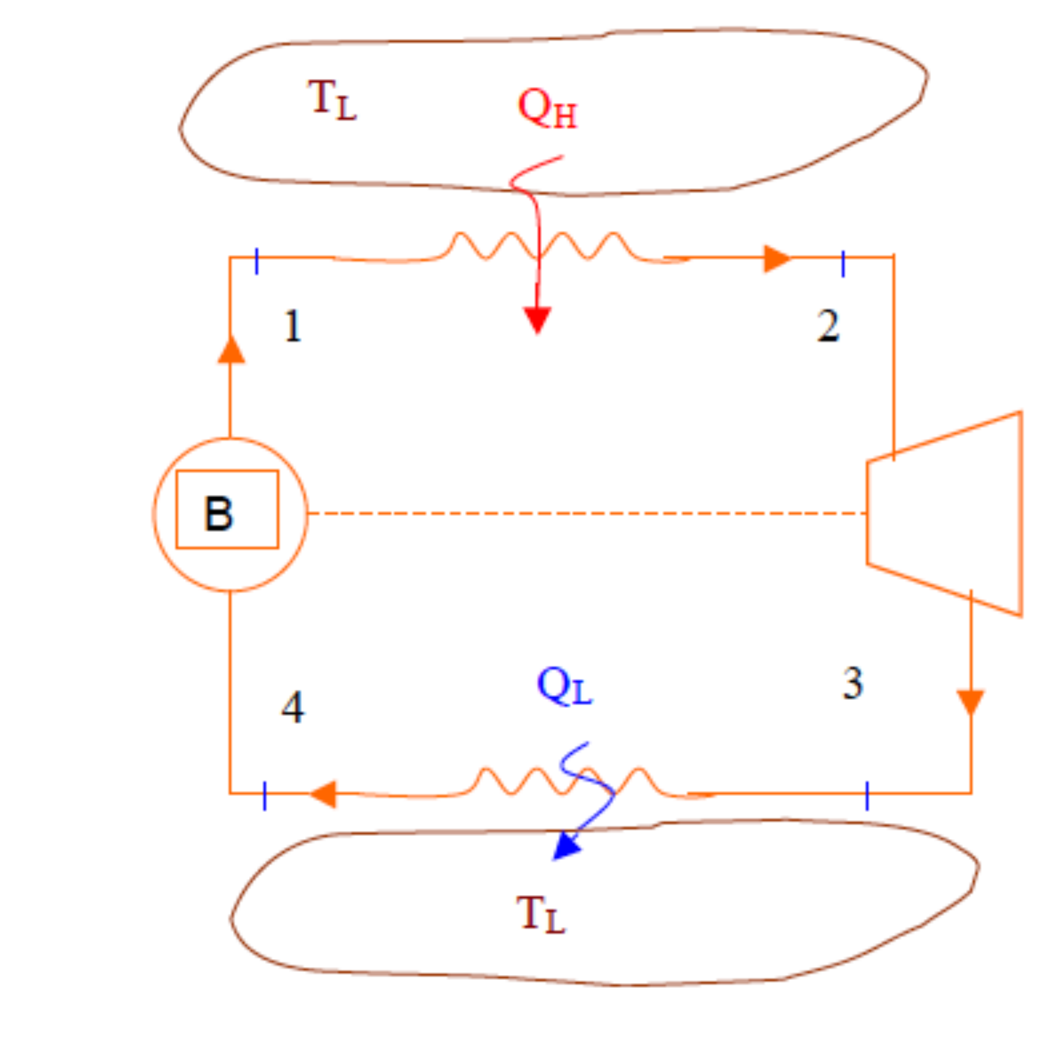
$s = \frac{S}{m} \rightarrow [s] =$ J/kg.K

Entropia específica

Na região de saturação: $s = s_1 + x\left(s_v - s_1\right)$



Variação de Entropia em Processos Reversíveis



$$m(s_2 - s_1) = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \frac{1}{T_H}\int_1^2 \delta Q = \frac{{}_1Q_2}{T_H} \quad \left({}_1Q_2 > 0\right)$$

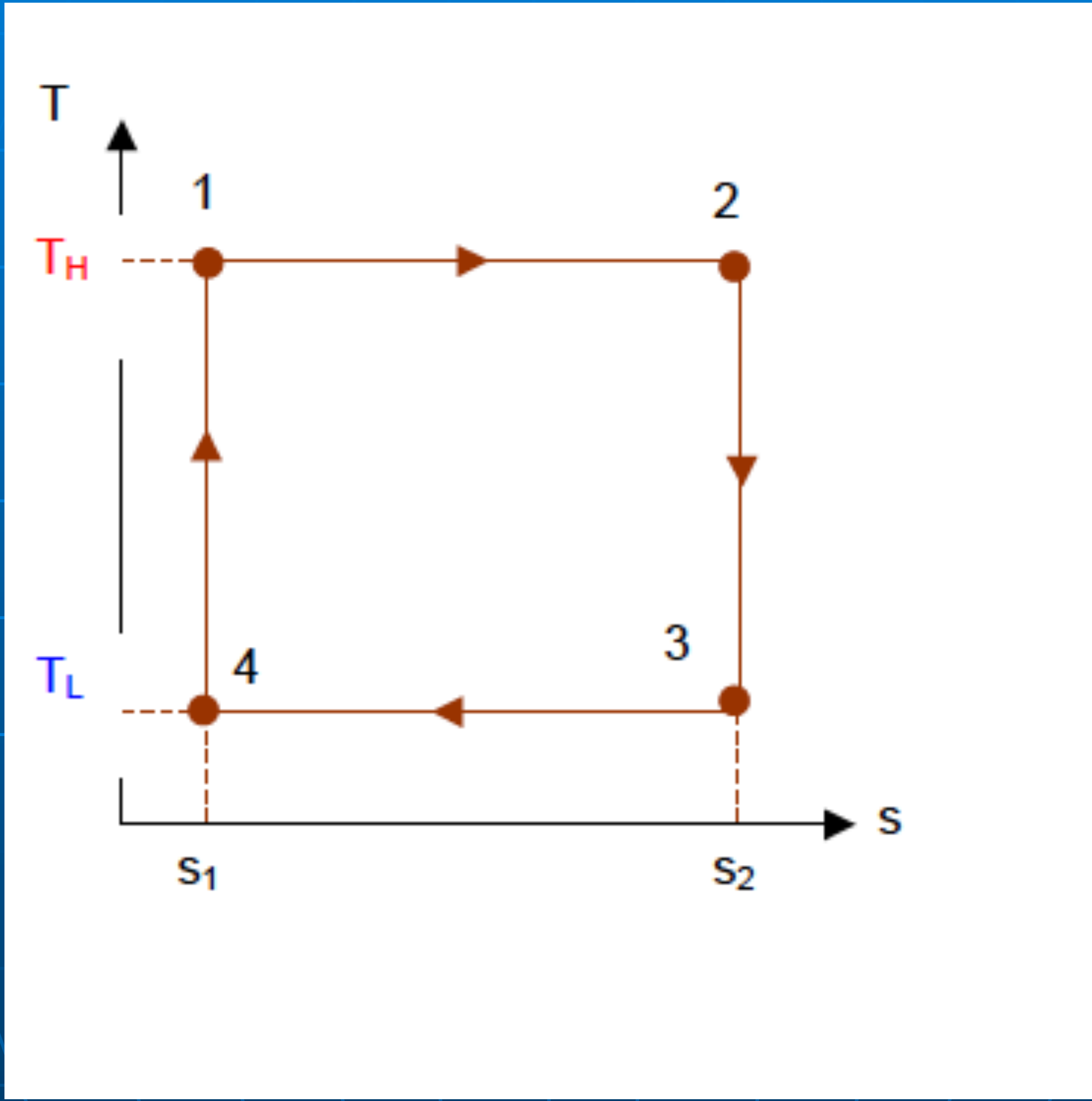
$$m(s_3 - s_2) = \int_2^3 \frac{\delta Q}{T}$$ (Processo isoentrópico)

Adiabático e reversível

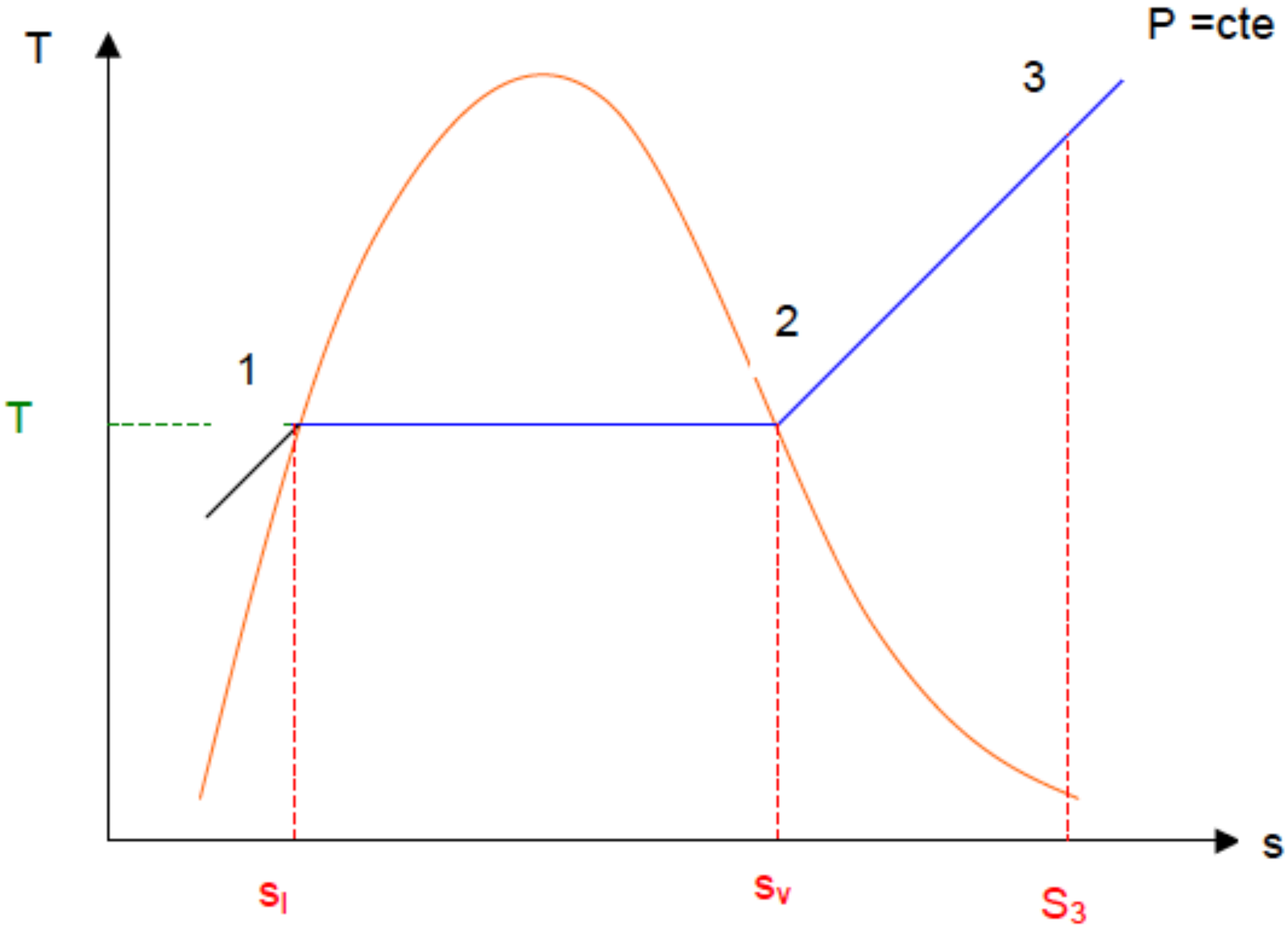
$$m(s_4 - s_3) = \int_3^4 \frac{\delta Q}{T} = \frac{{}_3Q_4}{T_L} \quad \left({}_3Q_4 < 0\right)$$

$$m(s_1 - s_4) = \int_4^3 \frac{\delta Q}{T}$$ (Processo isoentrópico)

$$W = Q_H - Q_L = \Delta S\left(T_H - T_L\right)$$



T
1
2
T_H
3
T_L
4
s
s_1
s_2



$$s_2 - s_1 = s_{\ell v} = \frac{1}{m}\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{rev} = \frac{h_V - h_\ell}{T}$$

DUAS RELAÇÕES TERMODINÂMICAS ÚTEIS

Válidas para substâncias Compressíveis e Simples na ausência de movimento e $\vec{g}$

$$\boxed{\begin{aligned} TdS &= dU + pd\forall \\ TdS &= dH - \forall dp \end{aligned}}$$

1ª Lei: $\delta Q = dU + \delta W$

Processo Reversível: $\begin{aligned} \delta Q &= TdS \\ \delta W &= pd\forall \end{aligned}$

$$\therefore TdS = dU + pd\forall$$

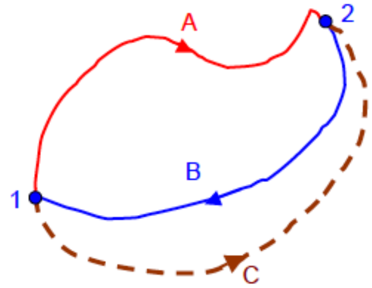
Entalpia: $H = U + p\forall$

$$dH = dU + pd\forall + \forall dp$$

$$\therefore TdS = dH - \forall dp$$

$$\begin{aligned} Tds &= du + pdv \\ Tds &= dh - vdp \end{aligned}$$

Variação de Entropia para um Sistema Durante um Processo Irreversível



$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \int_{1A}^{2A} \frac{\delta Q}{T} + \int_{2B}^{1B} \frac{\delta Q}{T} = 0$$

$$\underbrace{\oint \frac{\delta Q}{T} = \int_{1C}^{2C} \frac{\delta Q}{T} + \int_{2B}^{1B} \frac{\delta Q}{T} < 0}_{\text{Processo Irreversível}}$$

Processo Irreversível

$$\int_{1A}^{2A} \frac{\delta Q}{T} - \int_{1C}^{2C} \frac{\delta Q}{T} > 0 \quad \rightarrow \quad \int_{1A}^{2A} \frac{\delta Q}{T} > \int_{1C}^{2C} \frac{\delta Q}{T}$$

Mas

$$\Delta S_1^2 = \int_{1A}^{2A} \frac{\delta Q}{T}$$

$$\therefore \quad \Delta S_1^2 > \int_{1C}^{2C} \frac{\delta Q}{T}$$

logo

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T} \quad \begin{cases} = \text{Processo Reversível} \\ > \text{Processo Irreversível} \end{cases}$$

Geração de Entropia

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \delta S_{ger}$$

$S_{ger} = \sigma =$ geração de entropia
ou
"produção de
entropia"

(irreversibilidades
internas e externas

$$S_{ger} \geq 0$$

(SEMPRE) !!!

$$dS \gtreqless 0$$

Efeitos da Geração de Entropia

Processo Reversível

$$\delta Q = TdS$$
$$\delta W = pd\forall$$

Processo Irreversível

$$dS = \frac{\delta Q_{IR}}{T} + \delta S_{ger}$$

$$*\delta Q_{ir} = TdS - T\delta S_{ger}*$$

$$\delta Q_{ir} = dU + \delta W_{ir} \leftarrow 1^{a}\ \text{Lei}$$

Como

$dU = TdS - pd\forall$ pode-se escrever:

$$TdS - T\delta S_{ger} = TdS - pd\forall + \delta W_{ir}$$

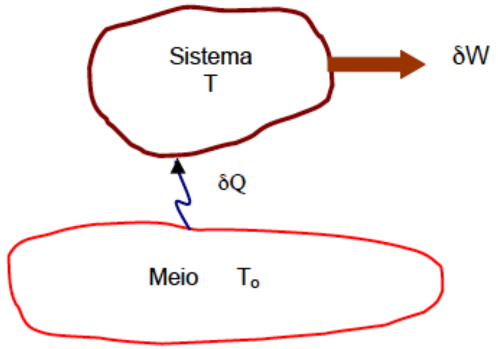
Assim:

$$*\delta W_{ir} = pd\forall - T\delta S_{ger}*$$

Trabalho Perdido: $*\delta W_{perdido} = T\delta S_{ger}*$

$$*\delta W_{ir} + \delta W_{perdido} = pd\forall*$$

Princípio do Aumento de Entropia



$$\left(dS\right)_{sistema} \geq \frac{\delta Q}{T}$$

$$\left(dS\right)_{meio} \geq \frac{-\delta Q}{T_o}$$

$$\left(dS\right)_{liq} = \left(dS\right)_{sistema} + \left(dS\right)_{meio} \geq \frac{SQ}{T} - \frac{SQ}{T_o}$$

$$\left(dS\right)_{liq} \geq \delta Q\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o}\right) = \delta Q\left(\frac{T_o - T}{T_o T}\right) \geq 0$$

$$\left(dS\right)_{liq} = \left(dS\right)_{sistema} + \left(dS\right)_{meio} \geq 0$$

Para Sistema Isolado:

$$dS_{\substack{sistema \\ isolado}} = \delta S_{ger} \geq 0$$

Variação de Entropia para Sólido ou Líquido

Como: $Tds = du + pdv$

$$ds \approx \frac{du}{T} \approx \frac{c}{T} dT$$

$$s_2 - s_1 \approx c \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

c = cte

Variação de Entropia para Gás Perfeito

$$Tds = du + pdv \begin{cases} du = c_{vo} dT \\ p = \dfrac{TR}{v} \end{cases}$$

Assim: $ds = \dfrac{c_{vo}}{T} dT + R\dfrac{dv}{v}$

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 c_{vo} \frac{dT}{T} + R\ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

Analogamente: $s_2 - s_1 = \int_1^2 C_{po} \dfrac{dT}{T} - R\ln\left(\dfrac{p_2}{p_1}\right)$

$$s_T^o = \int_{T_o}^{T} c_{po} \frac{dT}{T}$$

$$\therefore s_2 - s_1 = \left(s_{T_2}^o - s_{T_1}^o\right) - R\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

Lembrando que:

$$Tds = dh - vdp$$

p/ Processo isentrópico (ds = 0)

$$dh = c_{po}dT = vdp = RT\frac{dp}{p}$$

$$\frac{dp}{p} = \frac{c_{po}}{R}\frac{dT}{T}$$

$$\ell n \underbrace{\left(\frac{p}{p_o}\right)}_{p_r \text{ (pressão relativa)}} = \frac{1}{R}\int_{T_o}^{T} C_{po}\frac{dT}{T}$$

$$\ln p_r = \frac{1}{R}\int_{T_o}^{T} C_{po}\frac{dT}{T} = \frac{s_T^o}{R}$$

$$p_r = f(T)$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{p_{r1}}{p_{r2}}\right)_{s=cte}$$

Idem para a

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{v_{r1}}{v_{r2}}\right)_{s=cte}$$

Processo Politrópico Reversível para Gás Perfeito

Processo adiabático e reversível (isoentrópico)

$pv^k = cte$ com $k = c_{po} / c_{vo}$

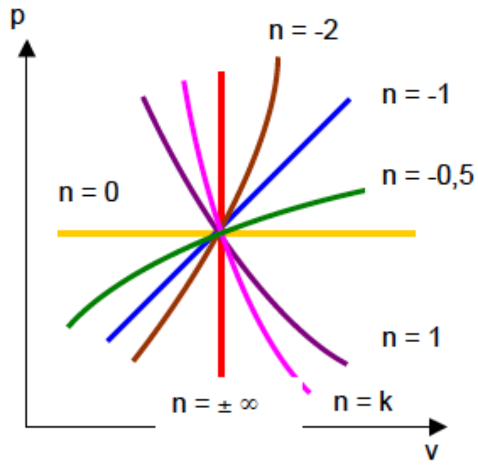
$$\left(T_2 / T_1 \right) = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}$$

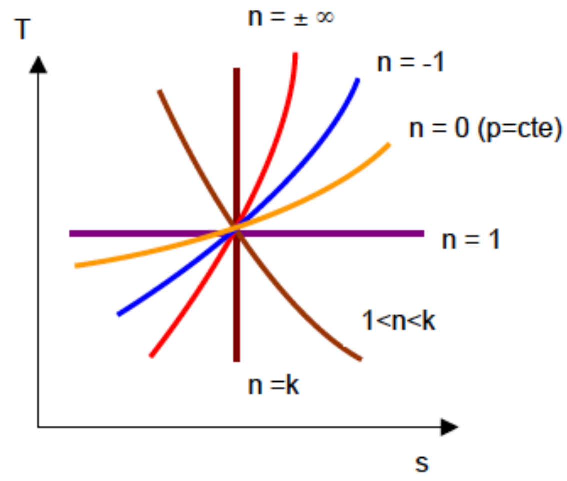
$${}_1Q_2 = m\left(u_2 - u_1\right) + {}_1W_2 = 0$$

$${}_1W_2 = -m\left(u_2 - u_1\right) = -mc_{vo}\left(T_2 - T_1\right)$$

$${}_1W_2 = \frac{mR}{1-k}\left(T_2 - T_1\right) = \frac{p_2\forall_2 - p_1\forall_1}{1-k}$$

processo politrópico reversível: $p\forall^n = cte$





$${}_1W_2 = \frac{p_2\forall_2 - p_1\forall_1}{1-n} = \frac{mR}{1-n}\left(T_2 - T_1\right) \qquad c/\ n \neq 1$$

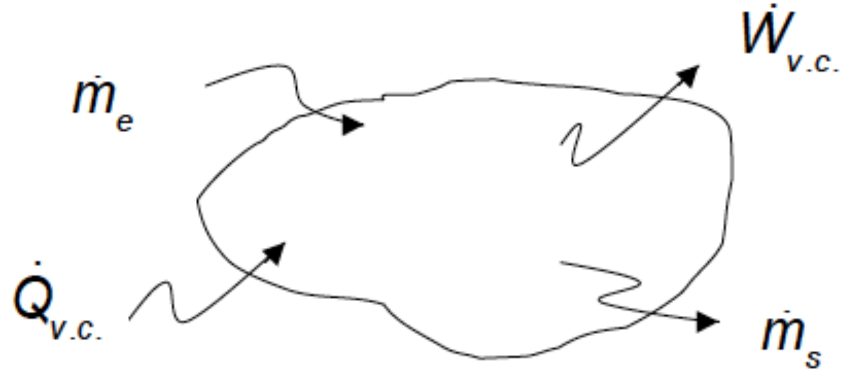
$$n = 0 \rightarrow p = cte; \qquad \underbrace{n = 1 \rightarrow T = cte}_{{}_1W_2 = mRT\ell n\, p_1/p_2} \quad ;$$

$$n = k \rightarrow s = cte$$

$$n = \infty \rightarrow \forall = cte$$

Segunda Lei para um Volume de Controle

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \delta S_{ger}$$



$$\frac{dS_{V.c.}}{dt} + \int s\rho\vec{V}.\vec{n}\,dA = \sum_{V.c}\left(\frac{\dot{Q}_{V.c}}{T}\right) + \dot{S}_{ger}$$

$$\frac{dS_{V.c}}{dt} + \sum \dot{m}_S s_S - \sum \dot{m}_e s_e = \sum_{V.c}\left(\frac{\dot{Q}_{V.c.}}{T}\right) + \dot{S}_{ger}$$

Processo em Regime Permanente: $\frac{dS_{v.c.}}{dt} = 0$

$$\sum \dot{m}_s s_s - \sum \dot{m}_e s_e = \sum_{v.c.} \left(\frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T} \right) + \dot{S}_{ger}$$

Processo em Regime Uniforme com Escoamento Uniforme

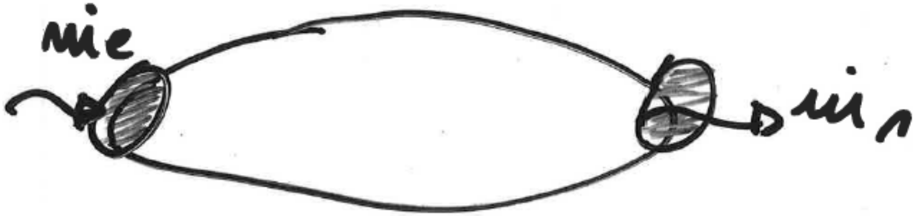
$$\frac{d}{dt}(ms)_{v.c.} + \sum \dot{m}_s s_s - \sum \dot{m}_e s_e = \sum_{v.c.} \frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T} + \dot{S}ger$$

$$(m_2 s_2 - m_1 s_1)_{v.c.} + \sum m_s s_s - \sum m_e s_e = \underbrace{\int_o^t \sum \frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T} dt}_{\int_o^t \frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T} dt} + {}_1Sger_2$$

$$(m_2 s_2 - m_1 s_1)_{v.c.} + \sum m_s s_s - \sum m_e s_e = \int_o^t \left(\frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T} \right) dt + {}_1Sger_2$$

PROCESSO REVERSIVEL EM REGIME PERMANENTE

V.C. com 1 entrada e 1 saida



$\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}$

$$q = \frac{\dot{Q}_{v.c.}}{\dot{m}} \qquad w = \frac{\dot{W}_{v.c.}}{\dot{m}}$$

1ª Lei: $$q = (h_s - h_e) + \frac{V_s^2 - V_e^2}{2} + g(z_s - z_e) + w$$

2ª Lei: $$\dot{m}(s_s - s_e) = \sum_{v.c.} \left(\frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T}\right) + \dot{S}_{ger}$$

Considere dois Processos Reversíveis

- adiabático
- isotérmico

a) Processo Adiabático e Reversível

2ª Lei $\Rightarrow s_s = s_e$

$$T\,\cancelto{0}{ds} = dh - v\,dp \Rightarrow dh = v\,dp$$

$$h_s - h_e = \int_e^s v\,dp$$

Levando este resultado na 1ª Lei:

$$w = (h_e - h_s) + \left(\frac{V_e^2 - V_s^2}{2}\right) + g(z_e - z_s)$$

$$w = -\int_e^s v\,dp + \left(\frac{V_e^2 - V_s^2}{2}\right) + g(z_e - z_s)$$

b) Processo Isotérmico e Reversível

$$\dot m (s_s - s_e) = \frac{\dot Q_{v.c.}}{T}$$

$$T(s_s - s_e) = q$$

Substituindo q na 1ª Lei:

$$T(s_s - s_e) = q$$

e lembrando que:

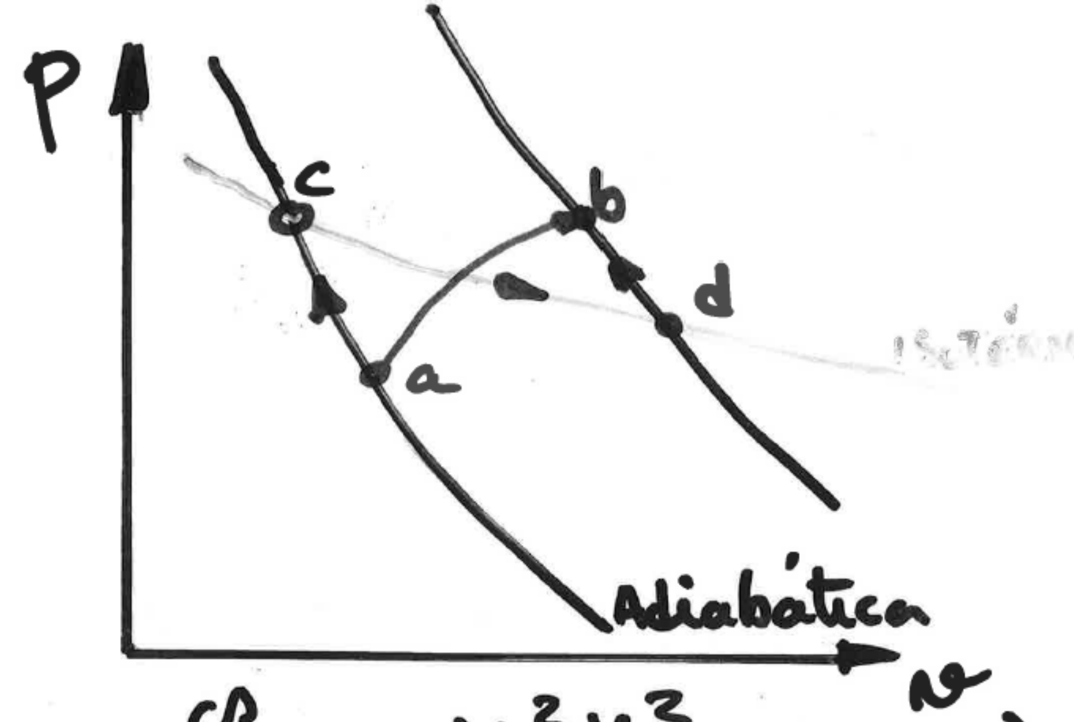
$$T(s_s - s_e) = h_s - h_e - \int_e^s v\,dp$$

obtém-se:

$$w = -\int_e^s v\,dp + \left(\frac{V_e^2 - V_s^2}{2}\right) + g(z_e - z_s)$$

Assim, no limite, qualquer processo reversível pode ser aproximado por:

$\sum$ (processos adiabáticos e isotérmicos reversíveis alternados)



$$w = -\int_e^s v\,dp + \frac{V_e^2 - V_s^2}{2} + g(z_e - z_s)$$

Para $w = 0$ e $\rho = cte$

$$\frac{p_s - p_e}{\rho} + \frac{V_s^2 - V_e^2}{2} + g(z_s - z_e) = 0$$

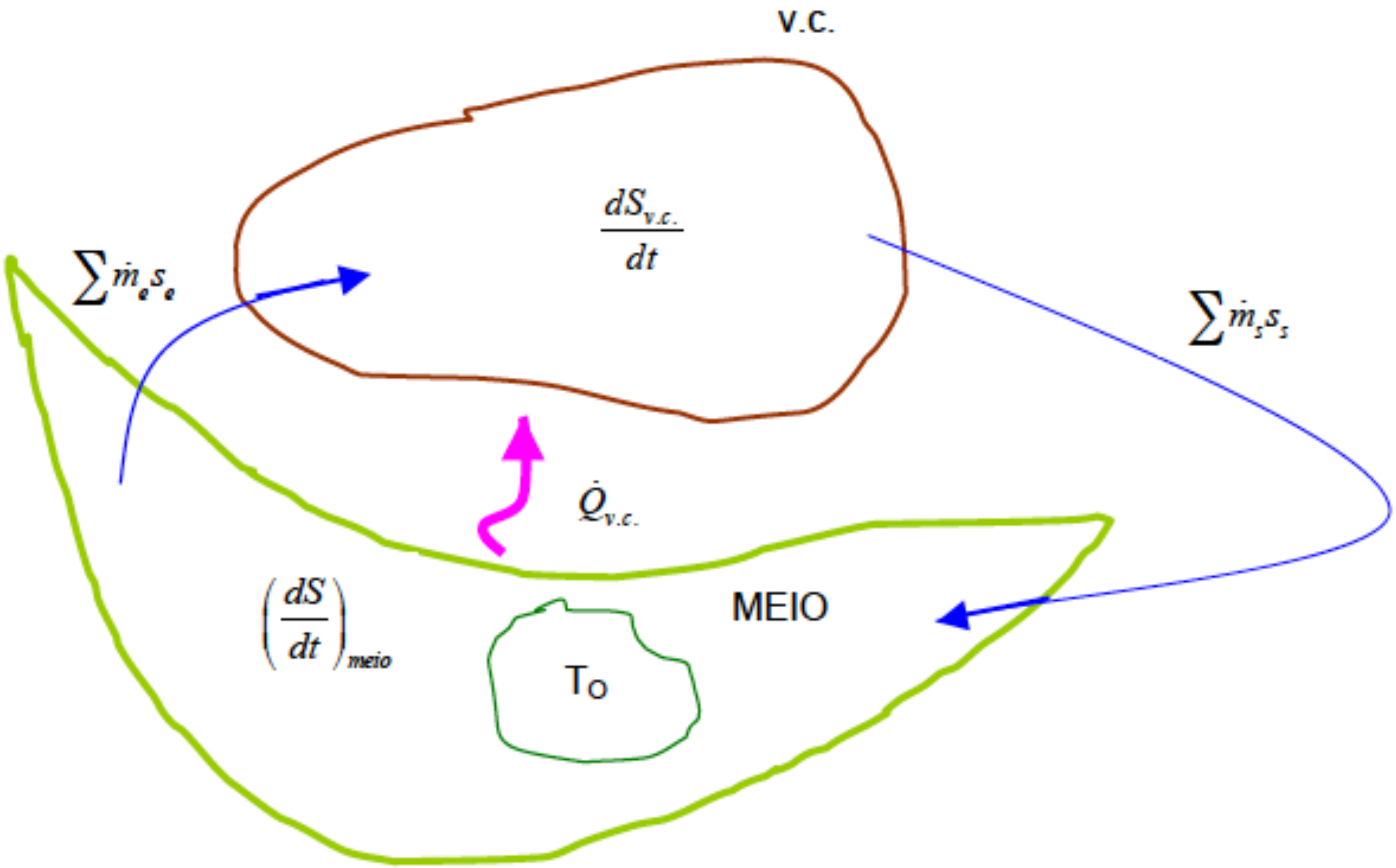
BERNOULLI !

Turbinas e Compressores:

$$w = -\int_e^s v\,dp$$

desprezando-se $\Delta E.C.$ e $\Delta E.P.$

Princípio do Aumento de Entropia para um Volume de Controle



$$\frac{dS_{v.c.}}{dt} + \sum \dot{m}_s s_s - \sum \dot{m}_e s_e \geq \sum_{v.c.} \left(\frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T} \right)$$

$$\left(\frac{dS}{dS} \right)_{meio} = \sum \dot{m}_s s_s - \sum \dot{m}_s s_s - \frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T_o}$$

$$\frac{dS_{líq}}{dt} = \frac{dS_{v.c.}}{dt} + \frac{dS_{meio}}{dt} \geq \sum_{v.c.} \left(\frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T} \right) - \frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T_o}$$

$$\therefore \frac{dS_{líq}}{dt} = \frac{dS_{v.c.}}{dt} + \frac{dS_{meio}}{dt} \geq 0$$

* regime permanente: $dS_{v.c.}/dt = 0$

* regime uniforme: $\Delta S_{v.c.} = \left(m_2 s_2 - m_1 s_1 \right)_{v.c.}$

$$\Delta S_{meio} = \frac{-Q_{v.c.}}{T_o} + \sum m_s s_s - \sum m_e s_e$$

$$\Delta S_{liq} = \Delta S_{v.c.} + \Delta S_{meio}$$

Eficiência

* $\eta_{turbina} = \dfrac{W_{real}}{W_{ise}}$ *

* $\eta_{bocal} = \dfrac{V_r^2/2}{V_{ise}^2/2}$ *

* $\eta_{\substack{compressor \\ adiabático}} = \dfrac{W_{ise}}{W_{real}}$ *

* $\eta_{\substack{compressor \\ resfriado}} = \dfrac{W_{isotérmico}}{W_{real}}$ *

2ª Lei proporciona meios de:

1)predizer o sentido de processos;

2)estabelecer condições para o equilíbrio termodinâmico;

3)determinar desempenho máximo de ciclos térmicos;

4)avaliar quantitativamente fatores que impedem a obtenção de desempenho máximo;

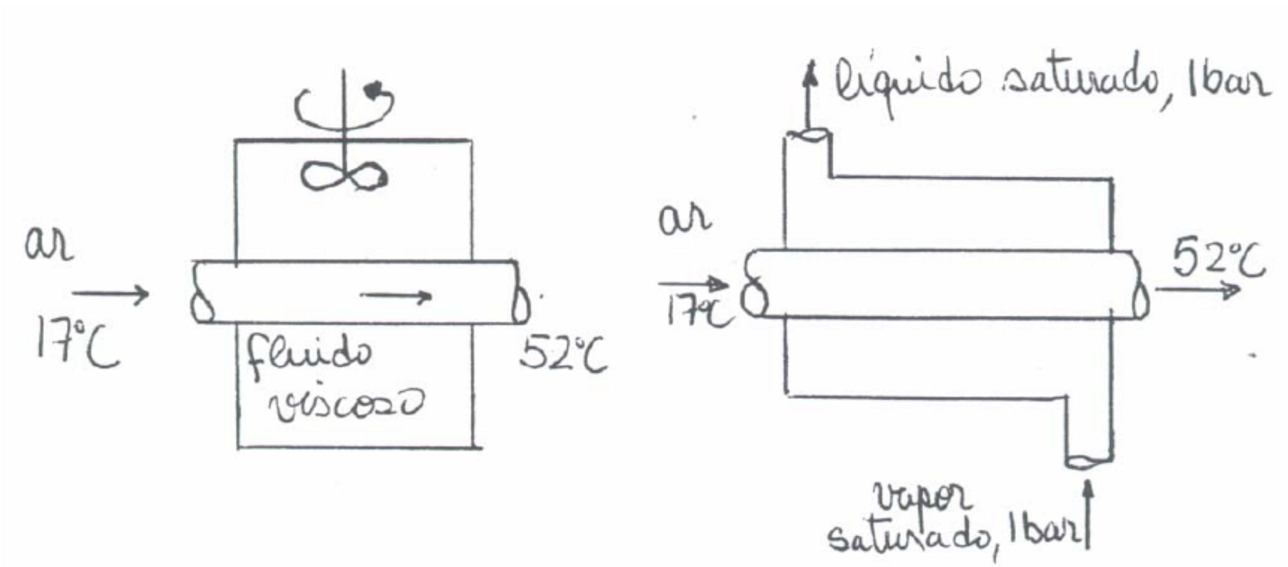
5)definição de uma escala termodinâmica de temperatura (independente das propriedades da substância termométrica);

6)avaliação de "u" e "h" em termos de propriedades que são facilmente obtidas experimentalmente.

PME 2340 TERMODINÂMICA I

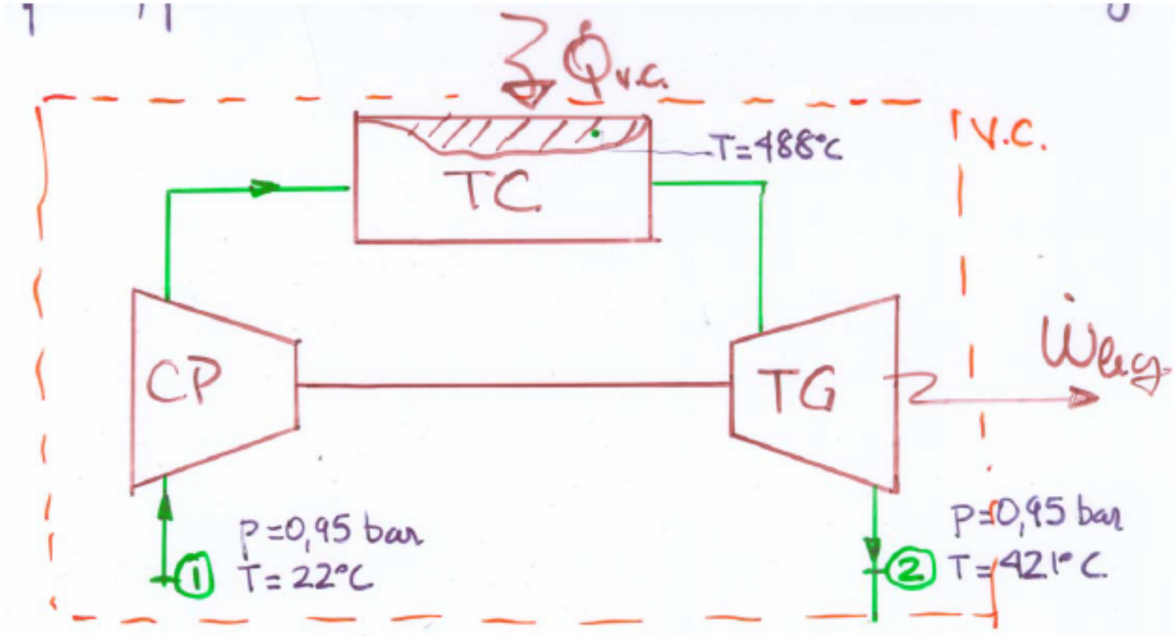
2ª Lista de Exercícios

5. Dois sistemas são propostos para aquecer ar de 17 a 52ºC a pressão constante, P = 1 bar.

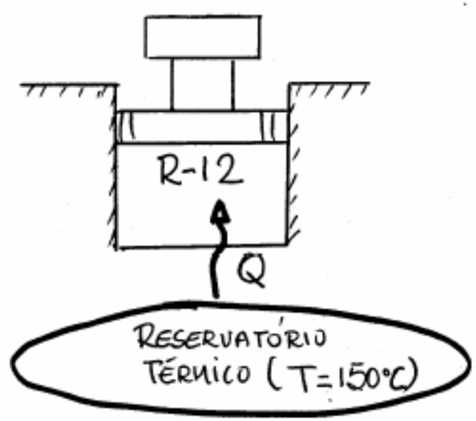


Admitindo operação em regime permanente, sem perdas para o meio ambiente e desprezando as variações de energia cinética e potencial, calcule a taxa de produção de entropia, por kg de ar que é aquecido, para cada um dos sistemas propostos. Comente os resultados.

6. A figura abaixo mostra uma planta de potência com turbina a gás que opera em regime permanente, composta por um compressor, um trocador de calor e uma turbina. Ar entra no compressor a 0,95 bar e 22ºC, saindo da turbina a 0,95 bar e 421ºC. A transferência de calor para o ar, quando ele percorre o trocador de calor, ocorre à temperatura média de 488ºC. O compressor e a turbina operam adiabaticamente. Determine o máximo valor do trabalho líquido, por unidade de massa de ar em kJ/kg.



7. Considere o dispositivo mostrado na figura abaixo, destinado a levantar uma massa através da transferência de calor de um reservatório a 150 ºC para o refrigerante 12. A pressão sobre o R-12 devida ao peso e à atmosfera é de 15 bar. Inicialmente, a temperatura do R-12 é 70 ºC e seu volume é 12 l. Transfere-se calor para o R-12 até que sua temperatura seja 150 ºC. Pede-se: a) o trabalho realizado e o calor transferido no processo; b) a variação líquida de entropia; c) um esquema para atingir o mesmo objetivo sem variação líquida de entropia.



8. Um bloco de gelo com massa de 1,5 kg e inicialmente a T = 260 K funde, a pressão constante de 1 bar, como resultado da troca de calor com o ambiente que se encontra a 293 K. Calcule a geração de entropia, considerando que a temperatura final da massa de água é a temperatura do ambiente.

   Dados: h_{sl} = 333,4 kJ/kg (gelo funde a 273,16 K); c_{gelo} = 2,07 kJ/kg K; $c_{líq}$ = 4,20 kJ/kg K

9. Demonstre que $\oint \delta Q/T = -S_{\text{gerada no ciclo}}$

Exercícios sobre Entropia

(a) Considere um tanque contendo um certo líquido. Este tanque possui um misturador que transfere 0,3kW ao líquido, em regime permanente. Há transferência de calor, sendo que a temperatura superficial do tanque é 60°C. A temperatura do meio no qual o tanque está colocado é 20°C. Admitindo que o tanque seja rígido determine a taxa de geração de entropia, em kW/K,

1) para o tanque;

2) para um sistema contendo o tanque e parte do meio a 20°C.

(b) Dois tanques isolados são ligados por uma válvula. Um dos tanques contém incialmente 0,5kg de ar a 80°C e 1bar, e o outro contém 1kg de ar a 50°C e 2bar. A válvula é aberta permitindo a mistura das duas massas de ar até que o equilíbrio seja atingido. Considerando que o ar se comporte como gás perfeito determine:

1) a temperatura final (°C);

2) a pressão final (bar);

3) a entropia gerada (kJ/K).

(c) Um trocador de calor do tipo contra-corrente opera em regime permanente. Uma das correntes é água (líquida) que entra no trocador a 15°C e sai a 25°C, com variação desprezível de pressão. A outra corrente é R-12 que entra a 14bar e 80°C, com vazão mássica de 5kg/min, e deixa o trocador como líquido saturado a 52°C. Desprezando-se os efeitos de energia cinética e potencial e considerando o trocador bem isolado, determine:

1) a vazão mássica de água (kg/min)

2) a taxa de geração de entropia no interior do trocador de calor (kW/K).

(d) Uma câmara com V=0,001m^3 está ligada a uma linha de vapor d´água. O estado do vapor na linha é dado por p=0,6MPa e x=0,97. Uma pequena parte do vapor que escoa através da linha de vapor é desviada para a câmara sendo extraída desta através de uma válvula. A câmara é isolada.

1) A vazão de entrada na câmara é igual a vazão de saída e a pressão na câmara é 0,05MPa. Determine a temperatura do vapor na câmara e a geração de entropia.

2) Em seguida a válvula de saída é fechada rapidamente, sendo que o processo de enchimento termina quando a pressão na câmara iguala a pressão da linha. A massa adicionada à câmara é de 0,0024kg. Determine a entropia do fluído na câmara e a entropia gerada.

(e) A Figura abaixo mostra uma resistência elétrica imersa em um duto isolado por onde há um fluxo de ar. A corrente elétrica que percorre a resistência, em condições de regime permanente é de 15 amperes. Nestas condições a temperatura da resistência permanece constante a 28°C. O ar entra no duto a 15°C e 1bar, deixando a 25°C e 1 bar. Desprezando variações de energia cinética e potencial, pede-se:

1) Considerando a resistência como sistema determine a taxa de geração de entropia (kW/K).

2) Para um volume de controle que engloba o duto, o ar e a resistência, determine a vazão mássica de ar (kg/s) e a taxa de geração de entropia (kW/K).