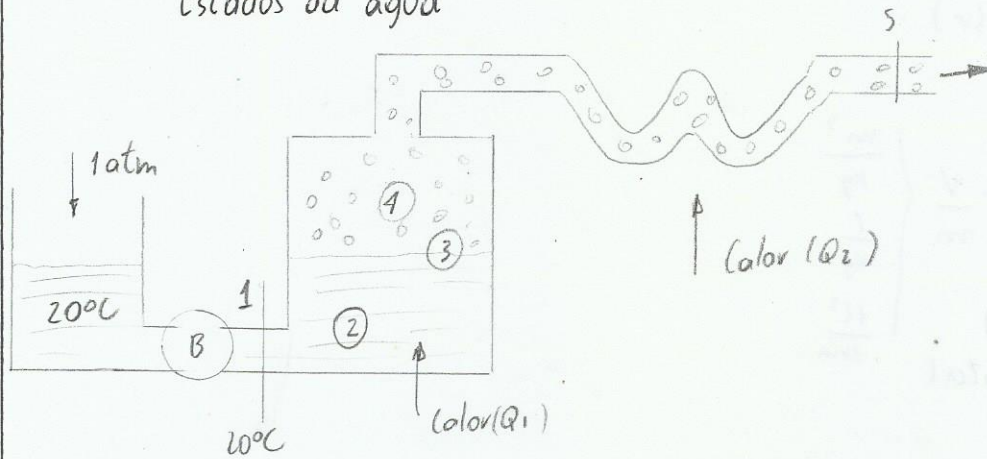


Estados da água



$P = 10 \text{ atm} \rightarrow \text{temp} = 179^\circ\text{C}$

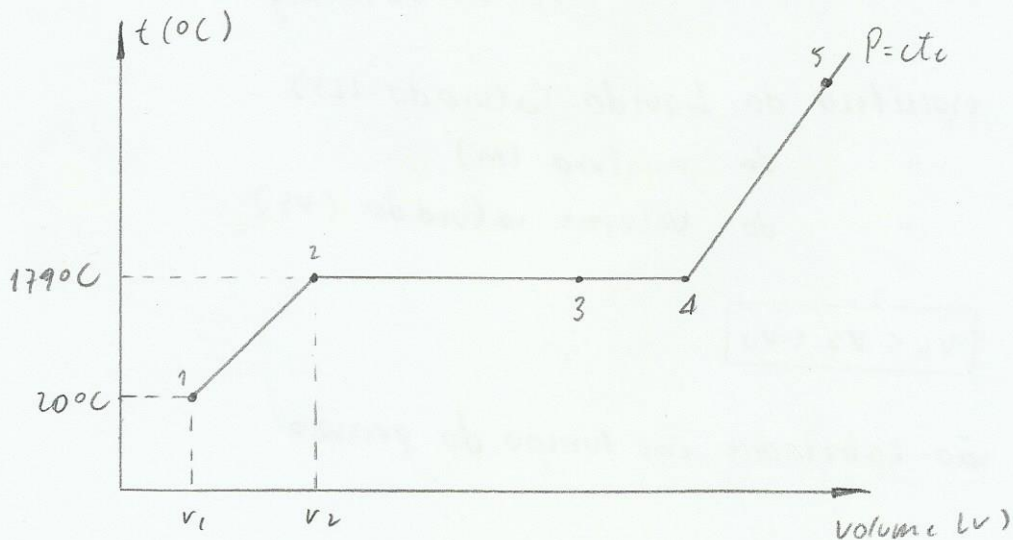
$P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = P_5$

$P = 10 \text{ atm}$   
 $t_{\text{sat}} = 179^\circ\text{C}$

- $\left\{ \begin{array}{l} \text{ponto (2)} \rightarrow \text{líquido saturado } (t_2 = t_{\text{sat}}) \\ \text{ponto (4)} \rightarrow \text{vapor saturado seco } (t_4 = t_{\text{sat}}) \\ \text{ponto (3)} \rightarrow \text{mistura (vapor saturado úmido)} (t_3 = t_{\text{sat}}) \end{array} \right.$

$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = 10 \text{ atm} \\ t_1 = 20^\circ\text{C} \end{array} \right. \rightarrow \text{líquido sub-resfriado (LSR)} (t_1 < t_{\text{sat}})$

$\left\{ \begin{array}{l} P_5 = 10 \text{ atm} \\ t_5 > t_{\text{sat}} \end{array} \right. \rightarrow \text{vapor super aquecido}$



# Propriedades termodinâmicas

Volume específico ( $v$ )

vapor de  
água

$v = \frac{V}{m}$

}

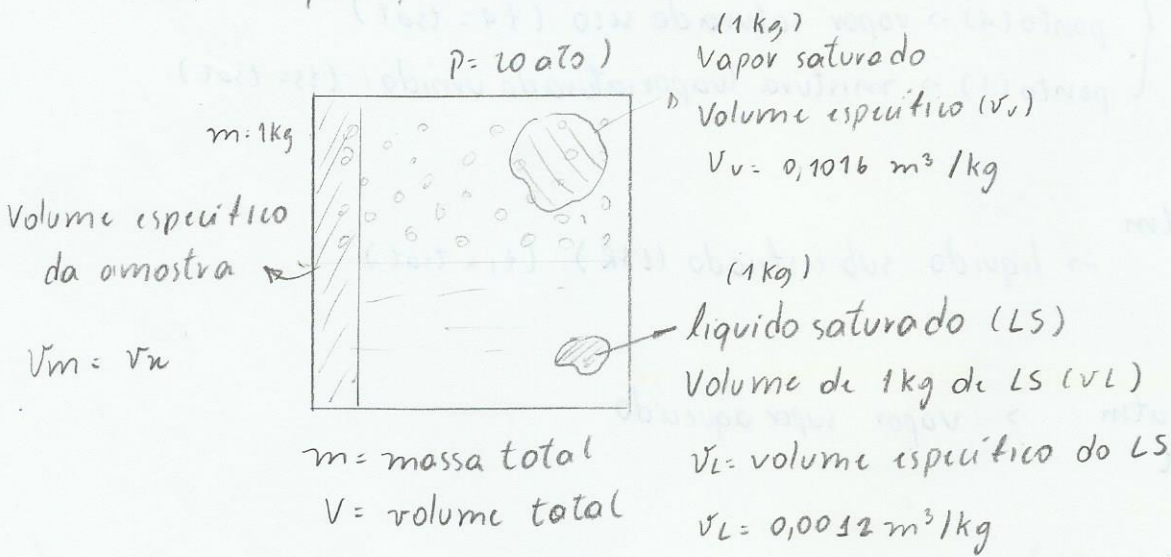
$\frac{m^3}{kg}$   
 $\frac{l}{kg}$   
 $\frac{ft^3}{lbm}$

$V = \text{volume total}$   
 $m = \text{massa total}$

Exemplo:

|  |                         |                                    |
|--|-------------------------|------------------------------------|
| $P = 20 \text{ ata}$<br><br>$T_{\text{sat}} = 211,4^\circ\text{C}$ | $t = 250^\circ\text{C}$ | $v = 0,1139 \text{ m}^3/\text{kg}$ |
|  | $t = 350^\circ\text{C}$ | $v = 0,1413 \text{ m}^3/\text{kg}$ |
|  | $t = 450^\circ\text{C}$ | $v = 0,1667 \text{ m}^3/\text{kg}$ |

(vapor superaquecido)



- $v_L$ : Volume específico do líquido Saturado (LS)
- $v_x$ : " " da mistura (M)
- $v_v$ : " " do volume saturado (VS)

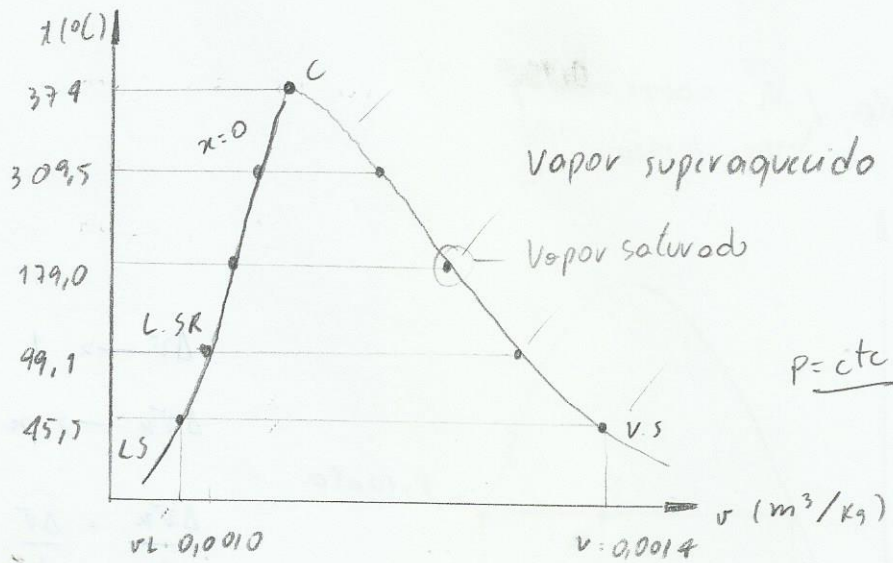
$v_L < v_x < v_v$

$v_L$  e  $v_v$  são tabelados em função da pressão

# Água

| P<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | T <sub>sat</sub> (°C) | v <sub>L</sub> (m <sup>3</sup> /kg) | v <sub>V</sub> |
|-----------------------------|-----------------------|-------------------------------------|----------------|
| 0,1                         | 45,5                  | 0,0010                              | 14,9500        |
| 1,0                         | 99,1                  | 0,0010                              | 1,7250         |
| 10                          | 179,0                 | 0,0011                              | 0,1980         |
| 100                         | 309,5                 | 0,0014                              | 0,0185         |

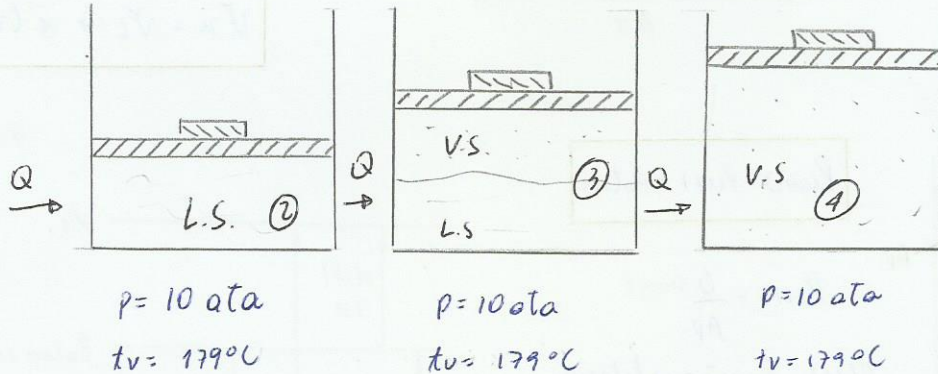
(Ponto crítico) 225 374 0,0032 0,0032



## Propriedades Termodinâmicas

1- Volume específico (v) aula passada

2- título (x)



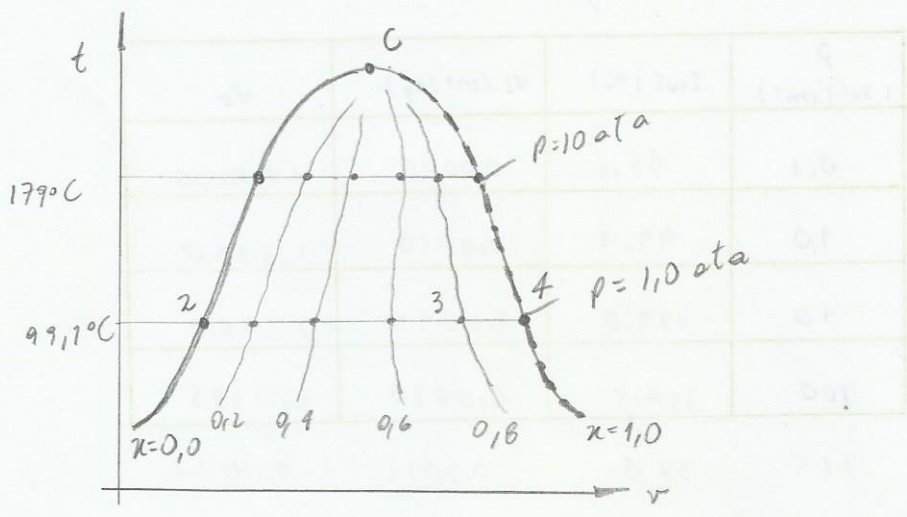
Obs.:  
Na troca de estado, a temperatura é const.

$$\text{título: } x = \frac{m_v}{m_v + m_a} = \frac{m_v}{m_T}$$

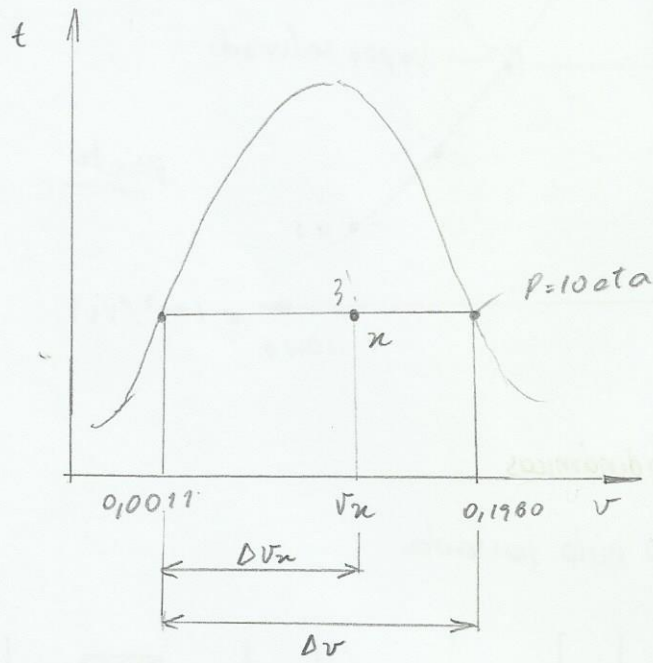
(2) L.S.  $\rightarrow m_v = 0 \therefore x_2 = 0,0$

(3) M  $\rightarrow 0 < m_v < m_T \therefore 0 < x_3 < 1$

(4) V.S.  $\rightarrow m_L = 0 \therefore m_v = m_T \therefore x_4 = 1$



$p = 10 \text{ ata}$   $\left\{ \begin{array}{l} v_L = 0,0011 \text{ m}^3/\text{kg} \\ v_V = 0,1980 \text{ v} \end{array} \right.$



$\Delta v \rightarrow 1$

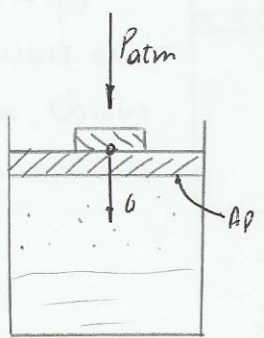
$\Delta v_x \rightarrow x$

$\frac{\Delta v_x}{x} = \frac{\Delta v}{1}$

$\Delta v_x = x \Delta v$

$(v_x - v_L) = x(v_V - v_L)$

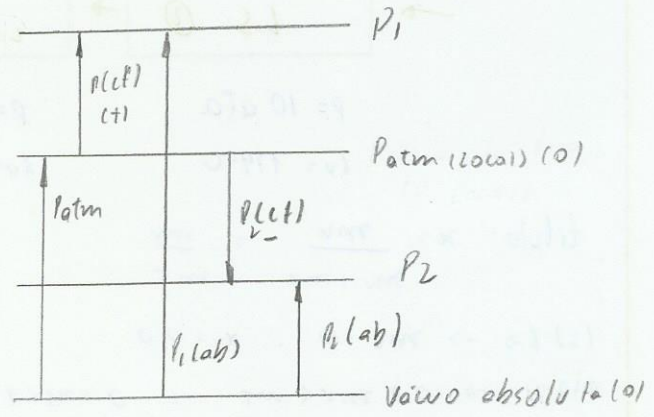
$v_x = v_L + x(v_V - v_L)$



$P_{(abs)} = P_{(ef)} + P_{atm}$

$P_{(ef)} = \frac{G(mg)}{A_p}$

$P_{(ef)}$ : Pressão efetiva ou relativa



Exemplo:

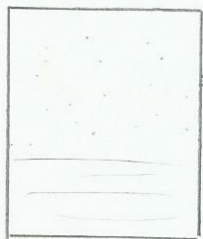
dado:  $P_{atm} = \frac{1 \text{ kgf}}{\text{cm}^2} = 1 \text{ ata}$

$$V_T = 1,2 \text{ m}^3$$

$$P(\text{ab}) = 19 + 1 = 20 \text{ ata}$$

$$P = \frac{19 \text{ kgf}}{\text{cm}^2} = 19 \text{ at}$$

$$m_T = 200 \text{ kg}$$



$$P = 19 \text{ at}$$

$$V_T = 1,2 \text{ m}^3$$

$$P(\text{ab}) = 19 + 1 = 20 \text{ ata}$$

"Um tanque de  $1,2 \text{ m}^3$  contém  $200 \text{ kg}$  de uma mistura líquido + vapor de água, sujeita a pressão absoluta de  $20 \text{ ata}$ . Calcular: 1-) Volume específico e título da mistura 2-) Massa de vapor e de líquido 3-) Volume ocupado pelas fases líquida e vapor".

Cálculo do título ( $x$ )

Obter os valores da tabela

$$\textcircled{I} \quad \bar{v}_x = \bar{v}_L + x(\bar{v}_v - \bar{v}_L)$$

$$p = 20 \text{ ata} \quad \begin{cases} \bar{v}_L = 0,0012 \text{ m}^3/\text{kg} \\ \bar{v}_v = 0,1016 \text{ m}^3/\text{kg} \end{cases}$$

$$\bar{v}_x = \frac{V_T}{m_T} = \frac{1,2 \text{ m}^3}{200 \text{ kg}} = \underline{0,0060 \text{ m}^3/\text{kg}}$$

Através de I, temos

$$x = \frac{\bar{v}_x - \bar{v}_L}{\bar{v}_v - \bar{v}_L} = \frac{0,0060 - 0,0012}{0,1016 - 0,0012} \quad \therefore \underline{x = 0,0478} \Rightarrow x = 4,78\% \text{ de vapor em massa}$$

Através da seguinte fórmula

$$x = \frac{m_v}{m_T} \Rightarrow 0,0478 = \frac{m_v}{200} \quad \therefore \underline{m_v = 9,56 \text{ kg de vapor}}$$

$$m_T = m_v + m_L$$

$$m_L = 200 - 9,56 \quad \therefore \underline{m_L = 190,44 \text{ kg de água}}$$

ou

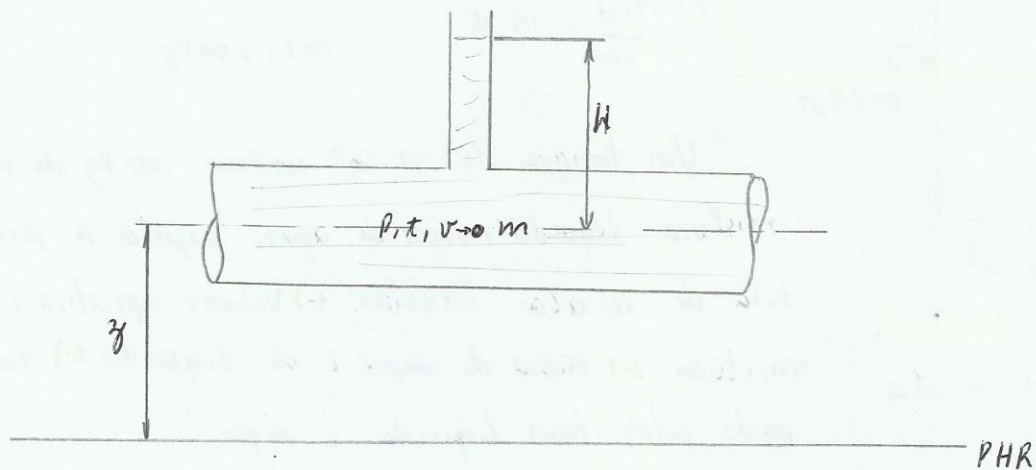
$$m_L = (1 - x) \cdot 200 = \underline{190,44 \text{ kg de líquido saturado}}$$

$$\bar{v}_L = \frac{V_L}{m_L} \quad \therefore V_L = \bar{v}_L \cdot m_L = 0,0012 \cdot 190,44 = \underline{0,2285 \text{ m}^3}$$

$$\bar{v}_v = \frac{V_v}{m_v} \quad \therefore V_v = \bar{v}_v \cdot m_v = 0,1016 \cdot 9,56 = \underline{0,9713 \text{ m}^3}$$

### 3) Entalpia (h)

Energia de um fluido em movimento



$$E_T = mgz + m \frac{v^2}{2} + E_{pr} + E_{temp}$$

$$E_{pr} = mgh = mg \frac{p}{\rho g} = \frac{m \cdot p}{\rho} = m p \cdot v$$

Lei de Stevin

$$p = \rho \cdot g \cdot H \quad \therefore \quad H = \frac{p}{\rho \cdot g}$$

$E_{temp}$ : Energia interna da substância =  $m \cdot u$ .

$u$  = energia interna, por unidade de massa

$$E_T = mgz + \frac{mv^2}{2} + m p v + m u$$

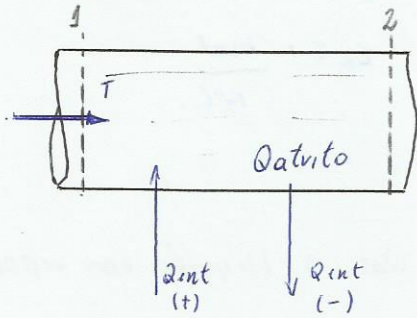
$$* E_T = m \left( gz + \frac{v^2}{2} + \underbrace{u + p v}_h \right)$$

$h$ : entalpia  $h = u + p \cdot v$

$h = f(p, t)$

A entalpia é uma propriedade termodinâmica que representa as unidades de pressão e temperatura de uma substância. Os valores  $h_f$  e  $h_g$  são tabelados para cada substância em função da pressão.

# Entropia (s)



$T =$  temperatura absoluta ( $T > 0$  sempre)

$Q_{atrito} =$  calor gerado pelo atrito ( $Q_{at} > 0$ )

## Definição

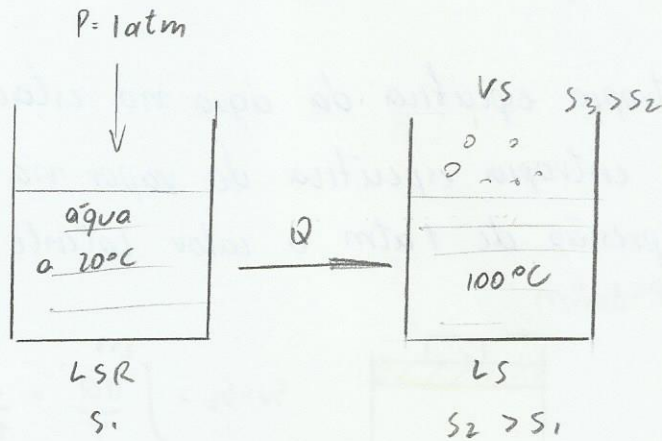
$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ_{ent}}{T} + \int_1^2 \frac{dQ_{at}}{T}$$

## Significado da variação de entropia

$Q_{ent} > 0 \rightarrow T > 0 \rightarrow \int \frac{dQ_{ent}}{T} > 0 \rightarrow$  entropia aumenta

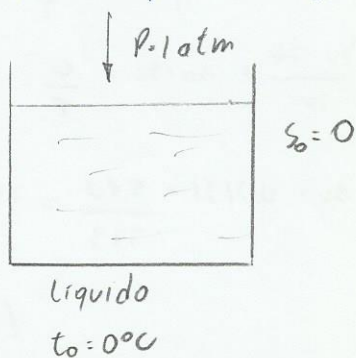
$Q_{ent} < 0 \rightarrow T > 0 \rightarrow \int \frac{dQ_{ent}}{T} < 0 \rightarrow$  entropia diminui

$Q_{at} > 0 \rightarrow T > 0 \rightarrow \int \frac{dQ_{at}}{T} > 0 \rightarrow$  entropia aumenta

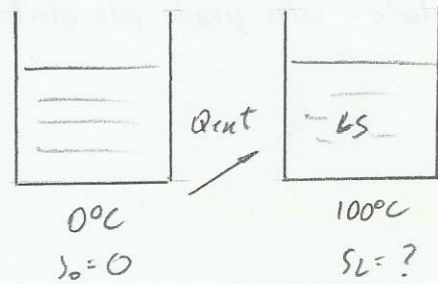


## Escala de Entropia

Estado padrão para a água



\* Calcular a entropia da água no estado líquido saturado na temperatura a  $100^{\circ}\text{C}$  e pressão a  $1\text{atm}$ . Dados:  $c_e = 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}}$



$Q_{at} = 0$  (líquido em repouso)

$$\Delta S_0^{100} = \int_{273\text{K}}^{373\text{K}} \frac{dQ_{ext}}{T} = mc \int_{273}^{373} \frac{dT}{T} = mc \cdot \ln \frac{373}{273}$$

$$Q_{ext} = mc \Delta T$$

$$dQ_{ext} = mc dT$$

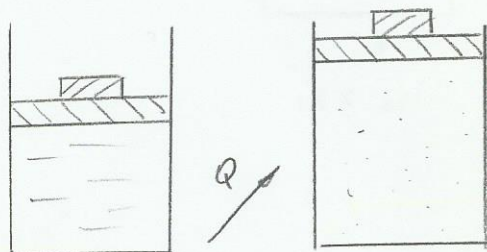
$$\Delta S_0^{100} = S_L - S_0^0 = mc \cdot \ln \frac{373}{273}$$

$$\Delta S_0^{100} = m \cdot 1 \cdot \ln \left( \frac{373}{273} \right) = 0,3121 m \left[ \frac{\text{Kcal}}{\text{K}} \right]$$

$$\Delta_L = \frac{S_L}{m} = 0,3121 \left( \frac{\text{Kcal}}{\text{kg K}} \right) \text{ (tabelado)}$$

\* Conhecida a entropia específica da água no estado líquido saturado, calcular a entropia específica do vapor na mesma pressão.

Sabe-se que na pressão de  $1\text{atm}$  o calor latente da água é  $540 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$



$$\Delta_L = 0,3121 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg K}}$$

$$t = 100^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta_V = ?$$

$$t = 100^{\circ}\text{C}$$

$$S_V - S_L = \int_{273}^{273} \frac{dQ}{T} = \frac{1}{T} \int dQ$$

$$S_V - S_L = \frac{Q_{ext}}{T} = \frac{m \cdot L}{T}$$

$$\frac{S_V - S_L}{m} = \Delta_V - \Delta_L = \frac{L}{T}$$

$$\Delta_V = 0,3121 + \frac{540}{373} = 1,7598 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg K}}$$

(tabelado)



Observação:

$$1 \text{ ata} = 1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \text{ (abs)}$$

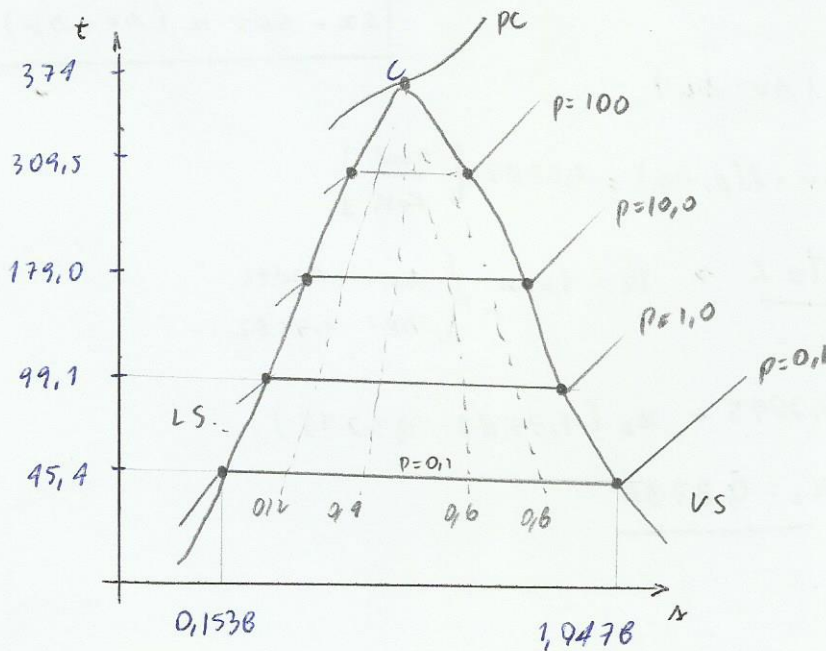
$$1 \text{ atm} = 1,033 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \text{ (abs)}$$

tabela de vapor (estado saturado)

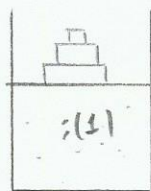
| P (ata) | $t_v$ (°C) | $x_v$  | $x_v$    |
|---------|------------|--------|----------|
| 0,1     | 45,5       | 0,1538 | 1,9478   |
| 1,0     | 99,1       | 0,3095 | 1,7582   |
| 10,0    | 179,0      | 0,5085 | 1,5742   |
| 100,0   | 309,5      | 0,7988 | 1,3440   |
| 225     | 374        | 1,0580 | = 1,0580 |

PC

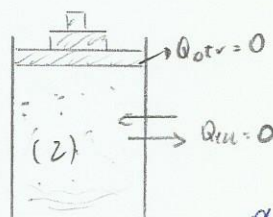
Diagrama  $t, x$



Exemplo:

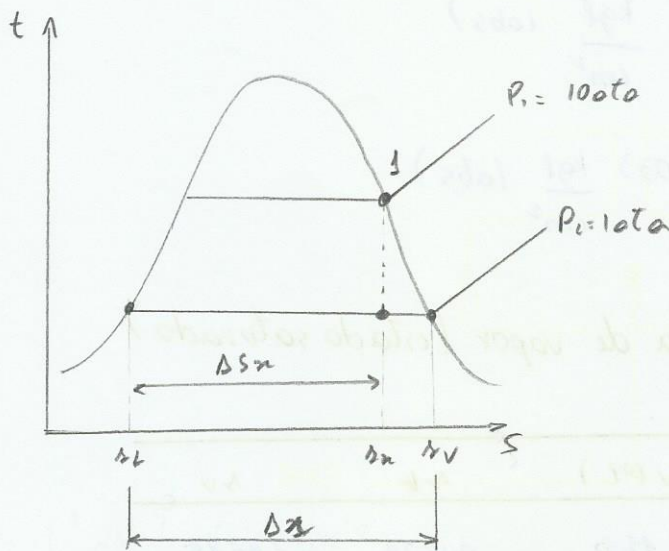


$P_1 = 10 \text{ ata}$   
 $t = 179,0^\circ\text{C}$   
 V.S



$P_2 = 1 \text{ ata}$

O cilindro da figura contém inicialmente vapor de água saturado, a pressão 10 ata. O pistão é deslocado para cima um oitavo até que a pressão interna seja reduzida para 1 ata. Admitindo-se que não haja troca de calor com o ambiente externo. Representar a transformação no diagrama  $t, x$  e calcular o estado final.



$$\Delta S_1^2 = \int_{s_L}^{s_n} \frac{dQ_{ext}}{T} + \int_{s_n}^{s_V} \frac{dQ_{ext}}{T} = 0 \therefore s_L = s_V$$

$$\Delta n \rightarrow 1 (\Delta n = 1)$$

$$\Delta s_n \rightarrow n(n-0)$$

$$\frac{\Delta n}{1} = \frac{\Delta s_n}{n} \therefore \Delta s_n = n(\Delta n)$$

$$\Delta n - n_L = n(n_V - n_L)$$

$$s_2 = s_L + n_2(n_V - n_L)$$

$$s_2 = s_1 = s_V = f(p_1 = 10) = 1,5742 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right]$$

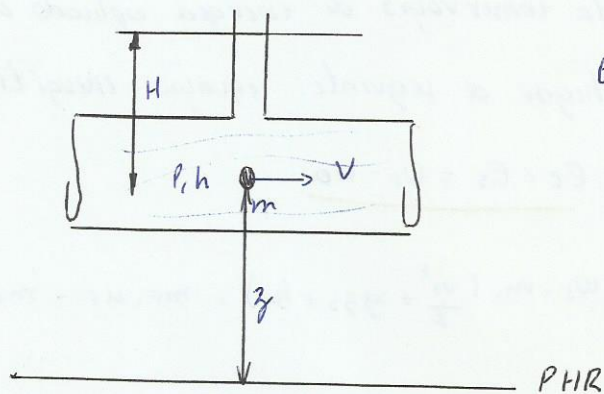
$$\text{No ponto 2} \rightarrow p_2 = 1 \text{ at a} \begin{cases} n_L = 0,3095 \\ n_V = 1,7582 \end{cases}$$

$$1,5742 = 0,3095 + n_2(1,7582 - 0,3095)$$

$$\therefore \underline{n_2 = 0,8730}$$

# Primeira lei da termodinâmica

## Energia do fluido em movimento



$$E_T = mgz + \frac{mV^2}{2} + mh$$

$$h = (\mu + pv)$$

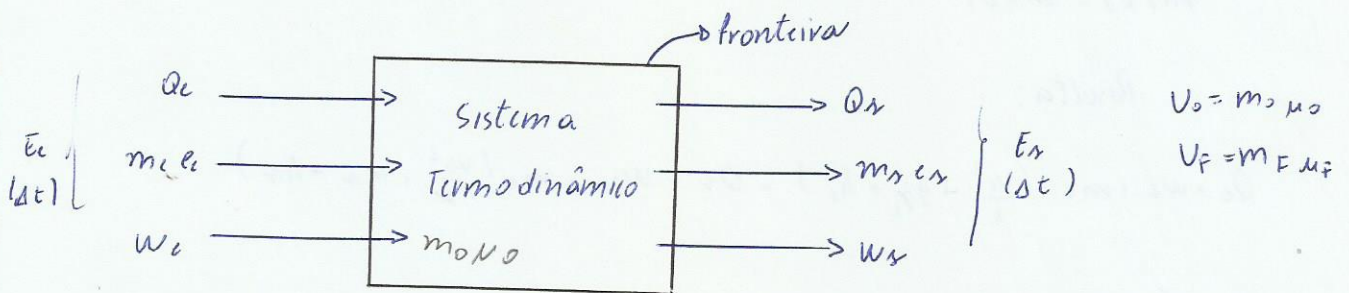
$\mu$  = energia interna

$$\mu = f(t)$$

$$E_T = m \left( gz + \frac{v^2}{2} + h \right) = m e_T$$

$e_T$ : energia total, por unidade de massa do fluido.

## Sistema termodinâmico



$$U_o = m_o \cdot u_o$$

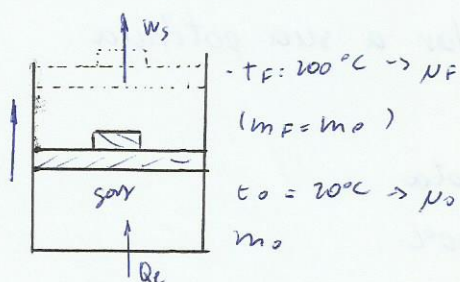
$m_o$  = massa interna dentro do sistema ( $t_o$ )

$u_o$  = energia interna no instante ( $t_o$ )

$m_f$  = massa interna dentro do sistema no instante ( $t_f$ )

$u_f$  = energia interna no instante final

### Exemplo



Sistema fechado  $\left\{ \begin{array}{l} m_c = 0 \\ m_s = 0 \end{array} \right. \quad m_o = m_f$

## Princípio da conservação de energia

De acordo com o princípio da conservação de energia aplicado ao sistema termodinâmico, pode-se chegar a seguinte equação energética:

$$U_0 + E_e - E_s = U_F \quad \therefore \quad \underline{E_e - E_s = U_F - U_0}$$

$$Q_e + W_e + m_e \left( \frac{v_e^2}{2} + g z_e + h_e \right) - Q_s - W_s - m_s \left( \frac{v_s^2}{2} + g z_s + h_s \right) = m_F U_F - m_0 U_0$$

### Caso particular

Regime permanente: Um sistema funciona em regime permanente, quando todas as grandezas internas permanecem inalteradas ao longo do tempo

$$m_0 = m_F$$

$$m_0 = m_F$$

$$m_0 U_0 = m_F U_F$$

RP  $\rightarrow$

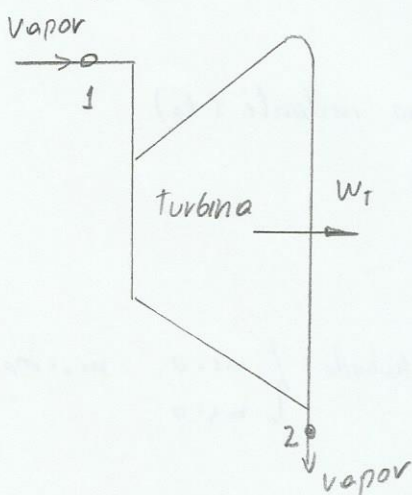
$$m_F U_F - m_0 U_0 = 0$$

Resulta:

$$Q_e + W_e + m_e \left( \frac{v_e^2}{2} + g z_e + h_e \right) = Q_s + W_s + m_s \left( \frac{v_s^2}{2} + g z_s + h_s \right)$$

Sendo:  $m_0 = m_F \rightarrow m_e = m_s$

Exemplo:



Uma turbina funciona em regime permanente com uma vazão de vapor de 12.000 kg/h. Sabendo que a turbina é revestida com isolante térmico perfeito e que o vapor passa por ela sem atrito. Calcular a sua potência.

Dados:

$$P_1 = 40 \text{ ata}$$

$$T = 460^\circ\text{C}$$

$$P_2 = 0,2 \text{ ata}$$

$$Q_c = 0 \quad Q_s = 0 \quad W_c = 0 \quad m_c = m_s$$

$$m_c \left( \frac{v_c^2}{2} + g z_c + h_c \right) = W_T + m_s \left( \frac{v_s^2}{2} + g z_s + h_s \right)$$

$$W_T = m_c \left( \frac{v_c^2 - v_s^2}{2} + g(z_c - z_s) + (h_c - h_s) \right)$$

$m$  = massa

$W_T$  = trabalho

$$M = \text{vazão} = \frac{m}{\Delta t}$$

$$\frac{W_T}{\Delta t} = \text{potência} = \dot{W}_T$$

$$\dot{W}_T = M_v \left[ \frac{(v_c^2 - v_s^2)}{2} + g(z_c - z_s) + (h_c - h_s) \right]$$

Através da tabela de vapor superaquecido

$$h_1 = 800,9 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$s_1 = 1,6662 \frac{\text{kcal}}{\text{kgK}}$$

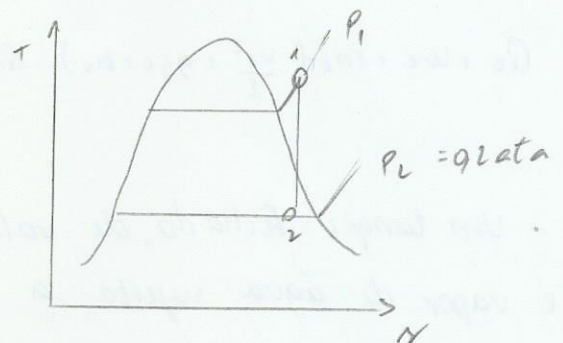
$$\Delta S_1^2 = \int_1^2 \frac{dQ_{\text{ent}}}{T} + \int_1^2 \frac{dQ_{\text{otr}}}{T}$$

$$s_1 = s_2$$

$$s_2 = s_L + x(s_v - s_L) \quad p_1 = 0,2 \text{ ata}$$

$$1,6662 = 0,1974 + x(1,8699 - 0,1974)$$

$$x_L = 0,87$$



$$h_L = h_L + x \Delta h = 59,6 + 0,87 \cdot 563,4$$

$$h_2 = 549,8 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$\dot{W}_T = 12000 \left[ (800,9 - 549,8) + g(z_1 - z_2) + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \right]$$

$$h \Rightarrow \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$g z \Rightarrow \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$\frac{v^2}{2} \Rightarrow = \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$\left( \frac{\text{mL}}{\text{s}^2} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{kg}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{kg}} = \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg}} = \frac{1}{9,8} \cdot \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kg}} = \right.$$

$$\left. = \frac{1}{9,8} \cdot 9,8 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kg}} \right)$$

$$\left( \begin{aligned} 1 \text{ kgf} &= 9,8 \text{ N} \\ 1 \text{ kcal} &= 427 \text{ kgf} \cdot \text{m} \end{aligned} \right)$$

$$\dot{W}_T = M \left[ 251,1 + \frac{g(z_1 - z_2)}{9,8 \cdot 427} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 427} \right] \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Obs.: Nos problemas de termodinâmica envolvendo caldeira, turbina, condensador, bomba, trocadores de calor, válvulas, compressores, e tubulações, as energias unitárias e potenciais são desprezíveis em relação a entalpia.

$$\Delta \dot{W}_T = 12000 \cdot 251,1 - 3013200 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} = 860 \Rightarrow \dot{W}_T = 3504 \text{ kW (} \approx 0,792 \text{)}$$

$$1 \text{ kW} = 860 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

$$\dot{W}_T = 4767 \text{ CV}$$

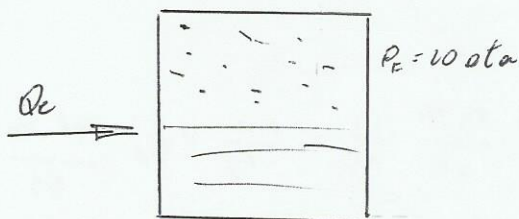
$$Q_e + W_e + m_e \left( \frac{v_e^2}{2} + g z_e + h_e \right) - Q_s - W_s - m_s \left( \frac{v_s^2}{2} + g z_s + h_s \right) = m_F v_F - m_{\text{out}}$$

- Um tanque fechado, de volume constante, contém 100 kg de líquido e vapor de água sujeito a pressão de 5 ata. Com entrada de calor a pressão aumentou para 20 ata. Calcular:

1-) título de vapor nos 2 estados

2-) calor fornecido ao sistema

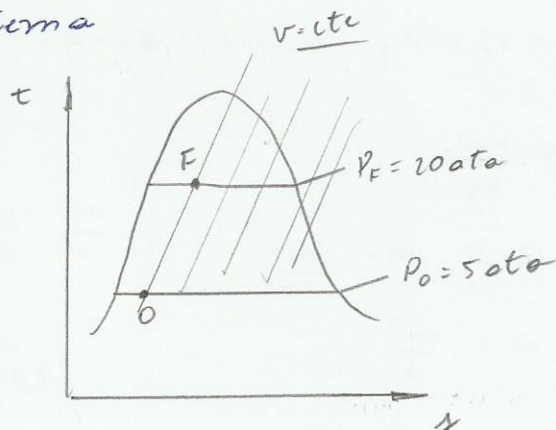
↳ Admitir que não existe perda de calor no sist.



$$V = 1,2 \text{ m}^3$$

$$m_{\text{total}} = 100 \text{ kg}$$

$$P_0 = 5 \text{ ata}$$



$$V_T = \rho \cdot V$$

$$m_T = \rho \cdot V$$

$$V_0 = V_F$$

$$\frac{V_T}{m_T} = V = \rho \cdot V$$

### ESTADO INICIAL

$$P_0 = 5 \text{ ata}$$

$$V_0 = \frac{1,2 \text{ m}^3}{200 \text{ kg}} = 0,006 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_0 = V_L + \kappa (V_V - V_L)$$

$$0,006 = 0,0011 + \kappa_0 (0,3816 - 0,0011) \quad \therefore \kappa_0 = 0,0129 \Rightarrow \kappa_0 = 1,29\%$$

### ESTADO FINAL

$$P_F = 10 \text{ ata}$$

$$V_F = V_0 = 0,006 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_0 = V_L + \kappa (V_V - V_L)$$

$$0,006 = 0,0012 + \kappa_F (0,1016 - 0,0012) \quad \therefore \kappa_F = 0,0478 \Rightarrow \kappa_F = 4,78\%$$

De acordo com a 1ª lei da termodinâmica

$$\text{- Sistema fechado} \begin{cases} m_e = m_s = 0 \\ m_o = m_F \end{cases}$$

$$\text{- Volume constante: } W_c = 0 \quad W_A = 0$$

$$Q_e \neq 0 \quad Q_A = 0$$

$$Q_e = m_F u_F - m_o u_o$$

temos a equação

$$Q_e = m (u_F - u_o)$$

$$h_2 = u_o + \frac{p_o v_o}{427}$$

Agora é só  
achar  $h_o$ , e depois  
 $u_o$

$$h_o = h_L + x(h_v - h_L)$$

$$h_o = 152,1 + 0,0129 \cdot 503,6 \quad \therefore h_o = 158,6 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

$$u_o = h_o - \frac{p_o v_o}{427}$$

$$= 158,6 - \frac{5 \cdot 10^4 \cdot 0,006}{427} \quad \therefore u_o = 157,896 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \quad (I)$$

$$h_F = h_L + x_F \Delta h$$

$$h_F = 215,8 + 0,0478 \cdot 453,0$$

$$\therefore h_F = 237,5 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

$$pV \rightarrow 5 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \cdot 10^4 \cdot 0,06$$

$$\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}} = \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{Kg}}$$

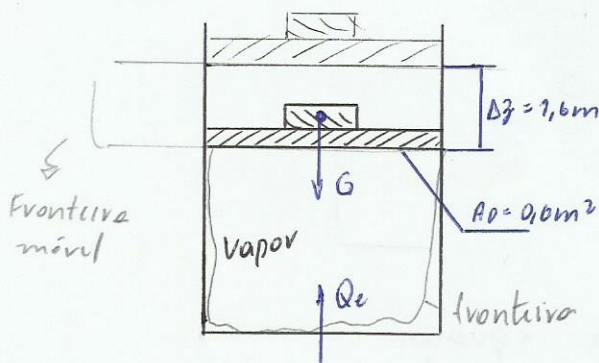
$$1 \text{ Kcal} = 427 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

$$u_F = h_F - \frac{p_F v_F}{427}$$

$$= 237,5 - \frac{20 \cdot 10^4 \cdot 0,006}{427} \quad \therefore u_F = 234,643 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \quad (II)$$

$$Q_c = m(u_F - u_o)$$

$$Q_c = 200 (234,643 - 157,896) \quad \therefore Q_c = 15349,419 \text{ kcal}$$



$$P_o (\text{cvs}) = \frac{G}{A_p} + P_{atm}$$

Dado  $P_o = 50 \text{ ata}$

$P_F = 50 \text{ ata}$

(como o G e a pressão atm não varia, a pressão é const.)

- No sistema da figura, o pistão se movimenta sem atrito provocado pela expansão da massa de vapor. Sabendo que o volume inicial  $v_o = 10 \text{ m}^3$  (calcular: 1-) Massa de vapor, sabendo que a  $t_o = 300^\circ \text{C}$  3-) trabalho total realizado pela exp. do vapor 2-) O peso G do pistão e a carga juntos 4-) o fornecido ao sistema.



$$Q_c - W_x = m_F m_F - m_o m_o ; \text{ como } m_F = m_o \text{ (sistema fechado)}$$

$$Q_c - W_s = m(m_F - m_o)$$

Obs.:  $p = 50 \text{ ata}$   $t_{\text{vap}} = 262,7^\circ$

(como  $t_o = 300^\circ \text{C}$   $\therefore$  Vapor superaquecido)

1-) Massa Vapor

$$v_o = \frac{V_o}{m_o} \quad v_o = f(p_o, t_o) \quad (\text{Através da tabela})$$
$$v_o = 0,0464 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$m_o = \frac{V_o}{v_o} = \frac{1,8 \text{ m}^3}{0,0464 \text{ (m}^3/\text{kg)}} \quad \therefore m_o = \underline{38,79 \text{ kg}} = m_F$$

(pois, sistema fechado)

2-)

$$P_o = \frac{G}{A_p} + P_{\text{atm}}$$

$$50 \cdot 10^4 = \frac{G}{0,6} + 9243$$

$$\therefore \underline{G = 294.454,2 \text{ Kgf}}$$

Obs.:

|           |   |                          |
|-----------|---|--------------------------|
| 760 mm Hg | - | 10330 Kgf/m <sup>2</sup> |
| 680 mm Hg | - | $n$                      |

$$\therefore n = 9243 \text{ Kgf/m}^2$$

3-) Cálculo de  $W_s$

$$W = \int_0^F m p dv = p \int_0^F m dv = p \int_0^F dV$$

$$\therefore W = p \cdot (V_F - V_o) ; p = 50 \text{ ata}$$

$$V_o = 1,8 \text{ m}^3$$

$$V_F = 1,8 + A_p \cdot D^2 \quad \therefore V_F = 2,76 \text{ m}^3$$
$$= 1,8 + 0,6 \cdot 1,6$$

$$W = 50 \cdot 10^4 (2,76 - 1,8)$$

$$\therefore \underline{W = 460.000 \text{ Kgf} \cdot \text{m}}$$

4-1)  $Q_c$  : calor que entra

(ATENÇÃO)

$$Q_c = \frac{W_s}{427} + m(h_E - h_o) ;$$

$$W = \frac{460000}{427} = 1124 \text{ Kcal}$$

Estado inicial

$$h_o = f(p_o, t_o) \quad \left\{ \begin{array}{l} p_o = 50 \text{ ata} \\ t_o = 300 \text{ ata} \end{array} \right. \quad \therefore h_o = 700 \text{ kcal/kg}$$

$$v_o = \frac{v_o}{m} = \frac{1,8}{38,79} \quad \therefore v_o = 0,0464 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$m_o = h_o - \frac{p_o v_o}{427}$$

$$m_o = 700 - \frac{50 \cdot 10^4 \cdot 0,0464}{427} \quad \therefore m_o = 645,67 \text{ kcal/kg}$$

Estado final

(Preciso de 2 propriedades para definir um ponto)

$$p_E = 50 \text{ ata}$$

$$v_E = \frac{V_T}{m} = \frac{2,76}{38,79} \quad \therefore v_E = 0,0712 \text{ m}^3/\text{kg}$$

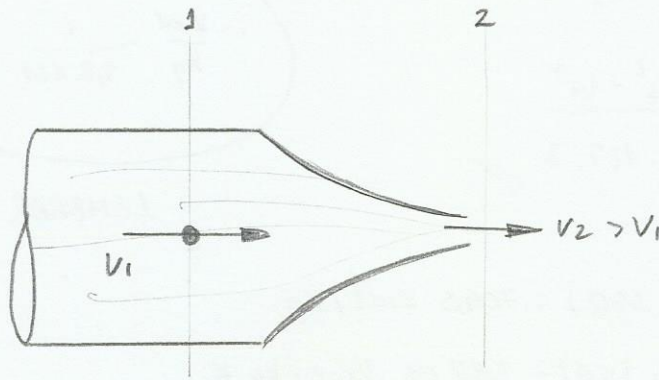
tabela  $\rightarrow$   $h_E = 025,7 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$

$$t_E = 510^\circ\text{C}$$

$$m_E = 025,7 - \frac{50 \cdot 10^4 \cdot 0,0712}{427} \quad m_E = 742,3 \text{ kcal/kg}$$

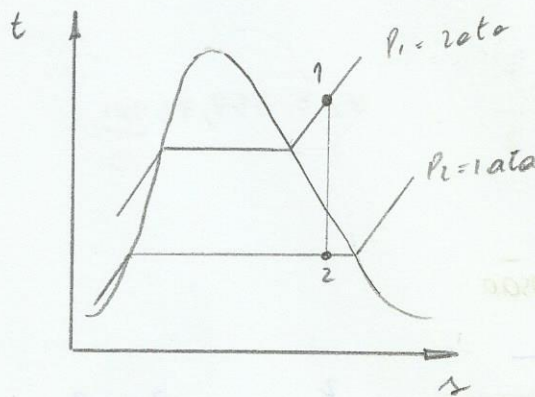
$$Q_c = 1124 + 38,79 (742,3 - 645,67) \quad \therefore Q_c = 4871 \text{ kcal}$$

### Bocal de expansão



$$\begin{aligned}
 p_1 &= 2 \text{ ata} & p_2 &= 1 \text{ ata} \\
 t_1 &= 250^\circ\text{C} & v_2 &= ? \\
 v_1 &= 50 \frac{\text{m}}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

O vapor de água entra em um bocal de expansão com pressão  $p_1 = 2 \text{ ata}$  e passa por ele sem atrito e sem troca de calor com o ambiente externo  $s = \text{cte}$ . Calcular a velocidade de saída, sabendo que a pressão  $p_2 = 1 \text{ ata}$ .



$$\Delta S_1 = \int \frac{dQ_{\text{int}}}{T} + \int \frac{dQ_{\text{ext}}}{T} = 0$$

$$\therefore s_2 = s_1$$

$$Q_e + W_e + m_e \left( \frac{v_e^2}{2} + h_e + g z_e \right) = Q_s + W_s + m_s \left( \frac{v_s^2}{2} + h_s + g z_s \right)$$

$$m_e \left( \frac{v_1^2}{2} + h_e \right) = m_s \left( \frac{v_2^2}{2} + h_s \right) \quad ; \quad m_e = m_s$$

Propriedades:

$$h \rightarrow \left[ \frac{\text{KJal}}{\text{kg}} \right] \quad v = \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right]$$

$$1 \text{ KJal} = 427 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

$$\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot \text{s}^2} = \frac{\text{Nm}}{\text{kg}}$$

$$1 \text{ kgf} = 9,8 \text{ N}$$

$$\frac{\text{Nm}}{\text{kg}} = \frac{\text{kgf}}{9,8} \cdot \frac{\text{m}}{\text{kg}} = \frac{\text{KJal}}{9,8 \cdot 427 \cdot \text{kg}}$$

Retornando a equação

$$h_1 - h_2 = \frac{v_2^2 - v_1^2}{9,8 \cdot 427,2}$$

$$\therefore \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}} = \frac{1}{9,8 \cdot 427,2} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

LEMBRAR

$$h_1(p, t) = h(2; 250) = 709,5 \text{ Kcal/Kg}$$

$$s_1(p, t) = s(2; 250) = 1,8429 \text{ Kcal/Kg.K}$$

$$s_2 = s_1 \therefore s_2 = 1,8429 \text{ Kcal/Kg.K}$$

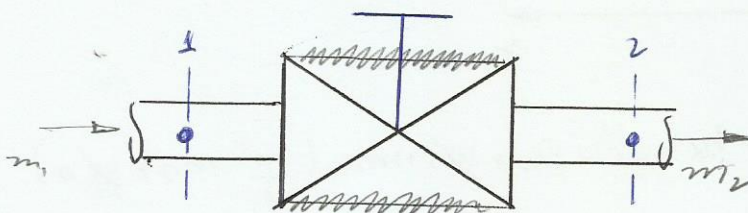
$$P_2 = 1 \text{ ata}$$

$$h_2(p_2, s_2) = h(1; 1,8429) = 672,6 \text{ Kcal/Kg}$$

(superaquecido)

$$709,5 - 672,6 = \frac{v_2^2 - 50^2}{9,8 \cdot 427,2} \therefore v_2 = \underline{\underline{557,96 \frac{\text{m}}{\text{s}}}}$$

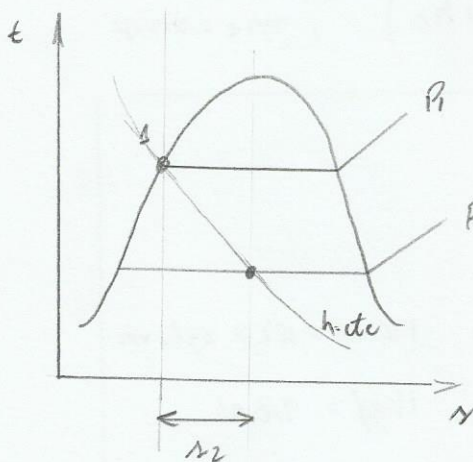
Válvula de expansão



$$P_2 < P_1$$

Obs:  $\begin{cases} v_2 \neq 0 \\ v_1 \neq 0 \end{cases}$  Sent = 0

Qatrito > 0  $\therefore s_2 > s_1$



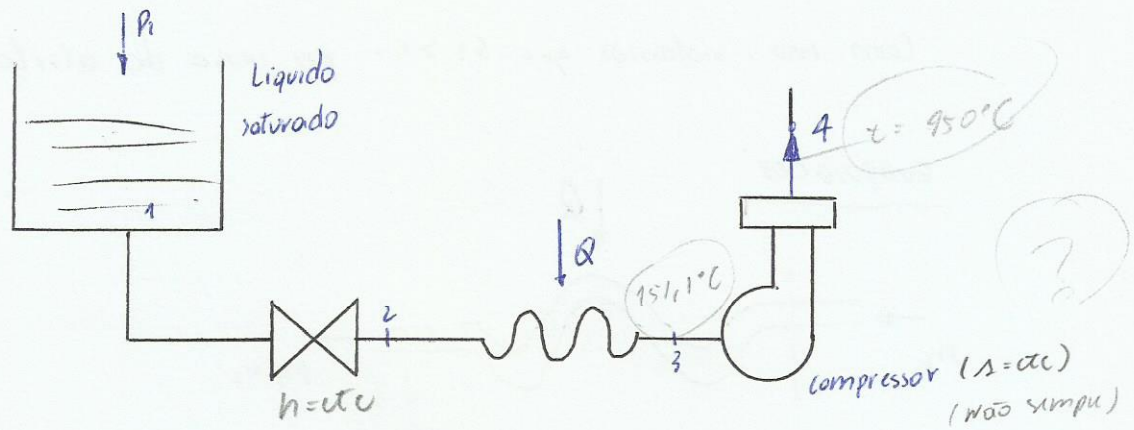
1ª Lei da termo dinâmica

$$m_1 \left( h_1 + \frac{v_1^2}{2} + g z_1 \right) = m_2 \left( h_2 + \frac{v_2^2}{2} + g z_2 \right)$$

Como  $v_1 = 0$  e  $v_2 = 0$

$$\therefore \underline{\underline{h_1 = h_2}}$$

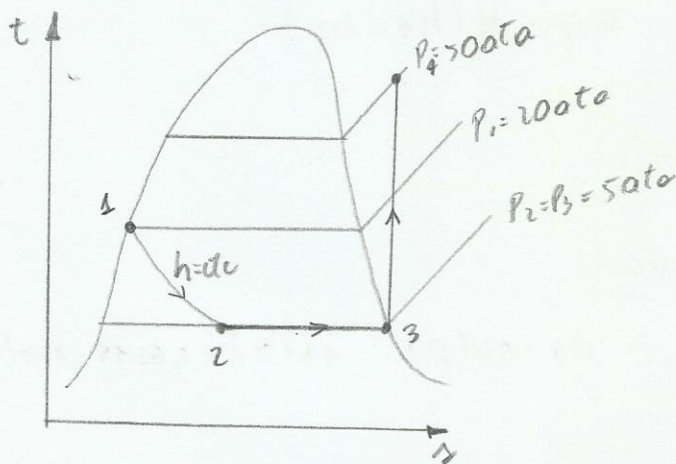
Exercício:



dados:  $P_1 = 20 \text{ ata}$   $P_2 = P_3$   $P_4 = 50 \text{ ata}$   
 $x_1 = 0,0$   $P_2 = 5 \text{ ata}$   $S_4 = S_3$   
 $x_3 = 1,0$

Calcular:

- título e entalpia da saída na válvula de expansão
- fluxo de calor trocado no evaporador, sabendo que a vazão é  $5000 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$
- Potência teórica do compressor



Ponto 1:  $P_1 = 20 \text{ ata}$   
 $x_1 = 0 \quad \therefore h_1 = h_L = 215,8 \text{ kJ/kg}$

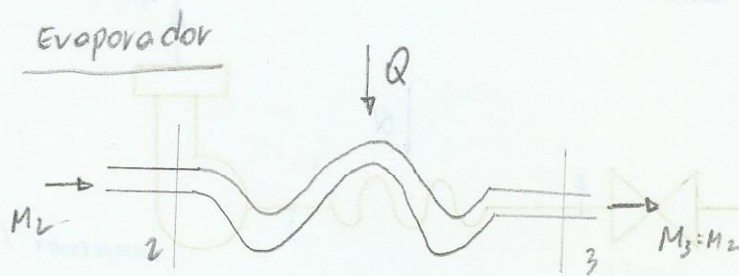
Ponto 2:  $P_2 = 5 \text{ ata}$   
 $h_2 = 215,8$

$$x_2 = \frac{215,8 - 152,17}{503,8} \quad \therefore x_2 = 0,126 \Rightarrow x_2 = 12,6\%$$

$$s_2 = 0,4424 + 0,126 \cdot (1,6295 - 0,4424) \quad \therefore s_2 = 0,592 \text{ kJ/kg K}$$

$$s_1 = s_L = 0,5818 \text{ Kwol/kgK}$$

Com isso, notamos que  $s_2 > s_1$  por causa do atrito

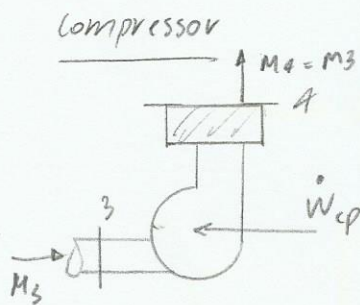


$$\dot{Q} + M_2 h_2 = M_3 h_3$$

$$\dot{Q} = M (h_3 - h_2) \quad ; \quad h_3 = h_v(s) = 655,9 \text{ Kwol/kg}$$

$$\dot{Q} = 5000 (655,9 - 215,8)$$

$$\therefore \dot{Q} = \underline{\underline{2\,200\,500 \frac{\text{Kwol}}{\text{h}}}}$$



$$M_3 h_3 + \dot{W}_{cp} = M_4 h_4$$

$$\dot{W}_{cp} = M (h_4 - h_3)$$

Ponto 4 :  $p_4 = 50 \text{ ata}$

$$s_4 = s_3 \quad ; \quad s_3 = s_v(p) \quad ; \quad s_3(s) = 1,6295 \text{ Kwol/kgK}$$

Vapor superaquecido

$$p_4 = 50 \text{ ata} \quad \rightarrow \quad h_4 = 792,2 \text{ Kwol/kg} \quad ; \quad t_4 = 450^\circ\text{C}$$

$$s_4 = 1,6295 \text{ Kwol/kg}$$

$$\dot{W}_{cp} = 5000 (792,2 - 655,9) \quad ; \quad \therefore \dot{W}_{cp} = 681\,500 \frac{\text{Kwol}}{\text{h}}$$

$$1 \text{ Kw} = 860 \text{ Kwol/h}$$

$$\dot{W}_{cp} = \underline{\underline{792,44 \text{ Kw}}}$$

**R134a** Ref: D.P. Wilson & R.S. Basu ASHRAE Transactions 1988, Vol. 94 part 2  
 DTU, Department of Energy Engineering  
 ssn [kJ/(kg·K)] ssn [m³/kg] Tsn [°C]  
 M.J. Skovrup & H.J.H. Nilsen 09-08-11

