Cap Qrinho pia

2ª Lei da Termodinâmica

SISTEMA FECHADO

- Conservação de massa: $m_i = m_f = m$ [Kg]
- 1ª Lei TMD: ${}_iQ_f + {}_iW_f = U_f - U_i = m(u_f - u_i)$ [J]
- 2ª Lei TMD: $\tilde{\Pi} = S_{gen} = \Delta S_{Univ} = \Delta S_{sist} + \Delta S_{viz} \geq 0 \begin{cases} = 0 & \text{Sist. Reversível} \\ > 0 & \text{Sist. Irreversível} \end{cases}$ [J/K]

$$\boxed{\Delta S_{viz} = \sum_{i=1}^{N_f} \left(\frac{Q_i}{T_i}\right)_{viz} = -\sum_{i=1}^{N_f} \left(\frac{Q_i}{T_i}\right)_{sist}}$$

$$\Delta S_{sist} = S_f - S_i = m(s_f - s_i)$$

Líquidos: valores de s [KJ/Kg K] lidos nas tabelas

Gás perfeito: $\Delta S_{sist} = m(s_f - s_i) = m\left[c_p \ln\frac{T_f}{T_i} - R \ln\frac{P_f}{P_i}\right]$

$$= m\left[c_p \ln\frac{T_f}{T_i} + R \ln\frac{V_f}{V_i}\right]$$

SISTEMA ABERTO (Reg. Permanente)

- Conservação de massa: $\Sigma(\dot{m})_{in} = \Sigma(\dot{m})_{out}$ [Kg/s]
- 1ª Lei TMD: $\dot{Q} + \dot{W} = \Sigma[\dot{m}(h + c^2/2 + gz)]_{out} - \Sigma[\dot{m}(h + c^2/2 + gz)]_{in}$ [W]
- 2ª Lei TMD: $\dot{\tilde{\Pi}} = \dot{S}_{gen} = \Delta\dot{S}_{Univ} = \Sigma[\dot{m}s]_{out} - \Sigma[\dot{m}s]_{in} - \sum_{i=1}^{N_f}\left(\frac{\dot{Q}_i}{T_i}\right)_{viz} \geq 0$ [W/K]

SISTEMA ABERTO (Regime Instacionário)

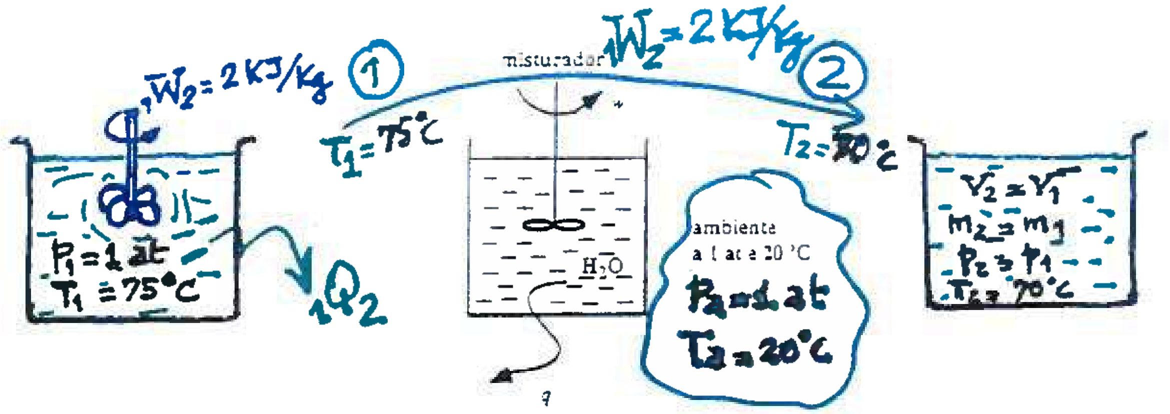
- Conservação de massa: $m_f - m_i = \Sigma(m)_{in} - \Sigma(m)_{out}$ [Kg]
- 1ª lei TMD: ${}_iQ_f + {}_iW_f = \Sigma[m(h + \ldots)]_{out} - \Sigma[m(h + \ldots)]_{in} + [m(u + \ldots)]_f - [m(u + \ldots)]_i$ [J]
- 2ª lei TMD:

$${}_i\tilde{\Pi}_f = {}_i(S_{gen})_f = \underbrace{[ms]_f - [ms]_i}_{\Delta S \text{ dentro do VC no } \Delta\tau \text{ em estudo}} + \underbrace{\Sigma[ms]_{out} - \Sigma[ms]_{in}}_{\Delta S \text{ associada à entrada e saída de massa do VC, no } \Delta\tau \text{ em estudo}} \underbrace{- \int_{\tau_i}^{\tau_f} \sum_{i=1}^{N_f}\left(\frac{\dot{Q}_i}{T_i}\right)_{viz} d\tau}_{\Delta S \text{ provocada por TC entre o VC e as fontes vizinhas, para o } \Delta\tau \text{ em estudo}} \geq 0$$

[J/K]

[illegible]

O trabalho fornecido ao sistema é de 2 kJ/kg e admite-se que [illegible] massa de água, nem o seu volume



a) Qual é a variação de entropia do universo associada ao processo ?

b) Qual é a variação de entropia do universo associada unicamente às irreversabilidades internas

a) $${}_1(\Delta S_{univ})_2 = {}_1(\Delta S_{sist})_2 + {}_1(\Delta S_{viz})_2 = m_{ag}(s_2-s_1) - \sum_{i=1}^{N_f=1}\left(\frac{{}_1Q_2}{T_a}\right)_{sist}$$

$$\hookrightarrow {}_1(\Delta s_{univ})_2 = \frac{{}_1(\Delta S_{univ})_2}{m_{ag}} = (s_2-s_1) - \left(\frac{{}_1q_2}{T_a}\right)_{sist}$$

① $P_1=1$ at; $T_1=75°C < T_{sat}(P_1)=100°C$ / Líquido comprimido: Tab. pág. 154

$s_1=1{,}013775$ KJ/kg K

$h_1=314{,}01$ KJ/kg

② $P_2=1$ at; $T_2=70°C < T_{sat}(P_1)=100°C$ / Líquido comprimido: Tab. pág. 154

$s_2=0{,}95275$ KJ/kg K

$h_2=293{,}076$ KJ/kg

1ª Lei TMD – Sistema fechado

$${}_1q_2 + {}_1W_2 = u_2-u_1 = (h_2-\cancel{p_2v_2}) - (h_1-\cancel{p_1v_1})$$

$p_1v_1 \approx p_2v_2$

$${}_1q_2 = (h_2-h_1) - {}_1W_2$$

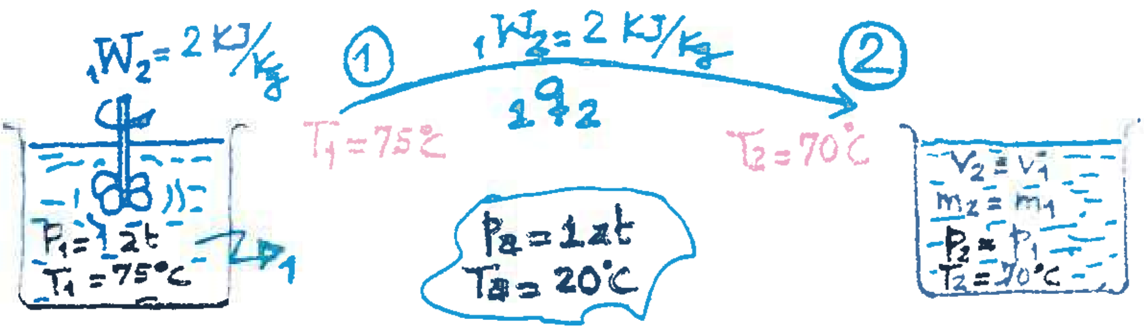
$${}_1q_2 = (293{,}076-314{,}01) - 2$$

$${}_1q_2 = -22{,}934 \text{ KJ/kg}$$

$${}_1(\Delta s_{univ})_2 = 0{,}95275 - 1{,}013775 - \left(\frac{-22{,}934}{293{,}15}\right)$$

$${}_1(\Delta s_{univ})_2 = 0{,}017208 \text{ KJ/kg K}$$

(6.1.b)



- Elimina-se uma das causas das irreversibilidades internas (agitação → $_1W_2$) e deixa-se o sistema evoluir entre os mesmos estados inicial ① e final ②.

A T. Calor da água para o ambiente ($_1q_2$) ocorre devido a um ΔT finito, sendo uma irreversibilidade externa (ou interna) dependendo da fronteira

$$(\Delta S_{univ})_{irrev\ int} = (\Delta S_{univ})_{irrev\ int+ext} - (\Delta S_{univ})_{irrev\ ext}$$

$$(\Delta s_{univ})_{irrev\ int} = (\Delta s_{univ})_{irrev\ int+ext} - (\Delta s_{univ})_{irrev\ ext}$$

- $(\Delta s_{univ})_{irrev\ int+ext} = 0{,}017208$ KJ/Kg K ← calculado na alínea a)
- $(\Delta s_{univ})_{irrev\ ext} = \Delta s_{sist} - \sum_{i=1}^{Nf=1} \left(\frac{Q_i}{T_i}\right)_{sist} = (s_2 - s_1) - \left(\frac{_1q_2}{T_a}\right)_{sist}$

  - $s_2 - s_1 = 0{,}95275 - 1{,}013775 = -0{,}061025$ KJ/Kg K {ver alínea a) estado inicial e final não variam}
  - 1ª Lei TMD – SISTEMA FECHADO

$$_1q_2 + \underbrace{\cancel{_1W_2}}_{=0\ (\text{eliminada a irrev. interna})} = u_2 - u_1 = (h_2 - \cancel{p_2v_2}) - (h_1 - \cancel{p_1v_1})$$

$p_2v_2 \approx p_1v_1$

$_1q_2 = h_2 - h_1 = 293{,}076 - 314{,}01 = -20{,}934$ KJ/Kg {ver alínea a)}

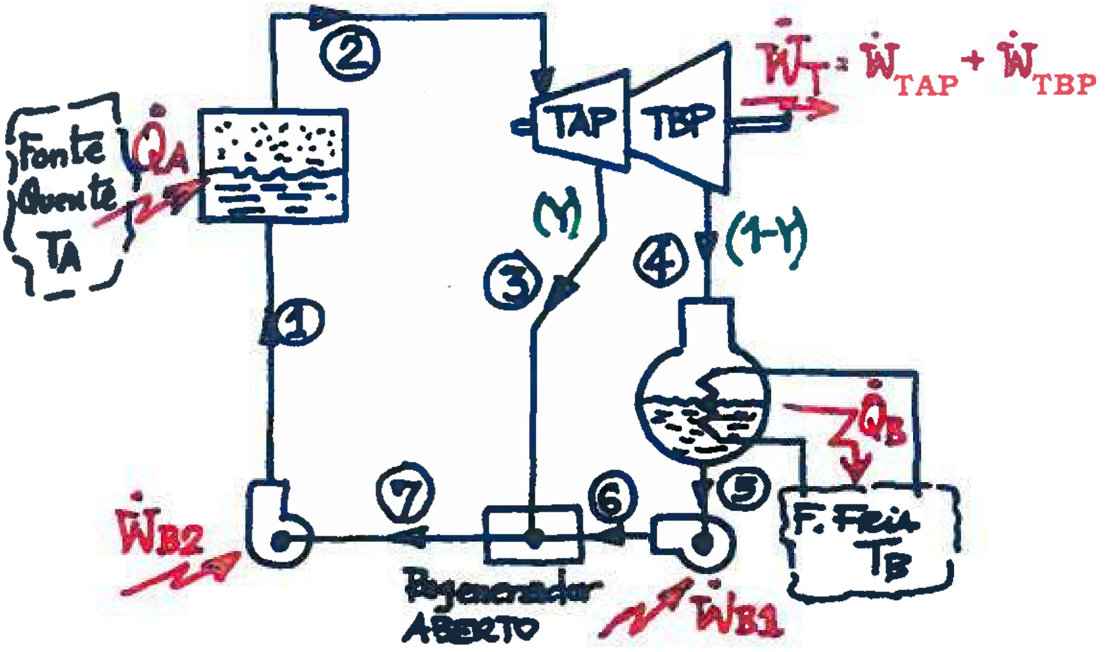
  - $(\Delta S_{univ})_{irrev\ ext} = -0{,}061025 - \frac{-20{,}934}{293{,}15} = 0{,}010386$ KJ/Kg K

$(\Delta s_{univ})_{irrev} = 0{,}017208 - 0{,}010386 = 0{,}006822$ KJ/Kg K

CAP. 1 - Ciclos [illegible]

1.1 - Os ciclos motores a vapor (de água) referidos nas varias alíneas seguintes, trabalham entre as pressões mínima e máxima de 0,04 e 50 at, respectivamente. Calcule o rendimento térmico (η_t), a razão de trabalho (r_w), e o consumo especifico de vapor (c.e.v.), para cada ciclo. Sempre que não haja referência aos rendimentos isentrópicos (η_s) estes são de 100%.

i) Ciclo de Rankine simples regenerativo, com um único aquecedor de água de alimentação por contacto.



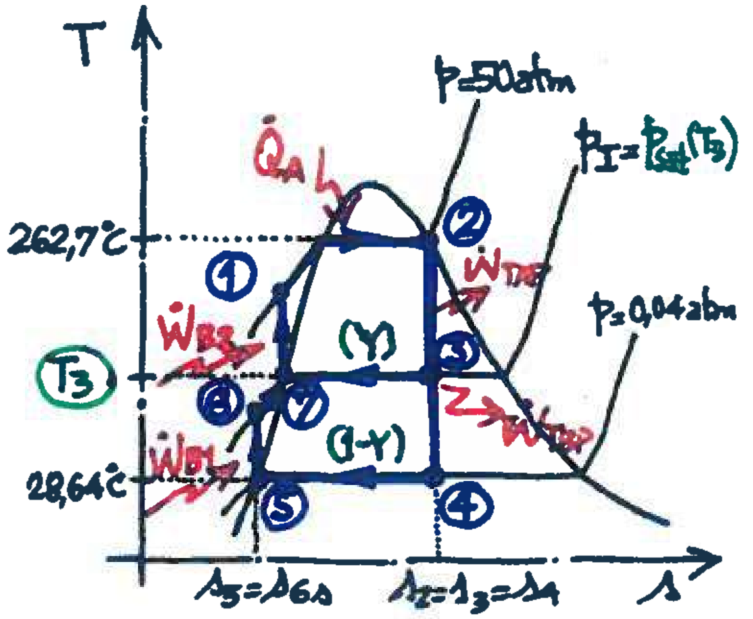
Balanços no Regenerador para cálculo de Y:

Balanço mássico: $\dot{m}_3 + \dot{m}_6 = \dot{m}_7$

1ª Lei Tmd-SA-RP: $\cancel{\dot{Q}} + \cancel{\dot{W}} + \dot{m}_3 \times h_3 + \dot{m}_6 \times h_6 = \dot{m}_7 \times h_7$

$$\frac{\cancel{\dot{Q}} + \cancel{\dot{W}} + \dot{m}_3 \times h_3 + \dot{m}_6 \times h_6 = \dot{m}_7 \times h_7}{\dot{m}_7} \rightarrow \underbrace{\frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_7}}_{Y} \times h_3 + \underbrace{\frac{\dot{m}_6}{\dot{m}_7}}_{1-Y} \times h_6 = h_7$$

$$Y \times h_3 + (1 - Y) \times h_6 = h_7 \rightarrow Y = \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_7} = \frac{h_7 - h_6}{h_3 - h_6} = 0,2194$$



$h_1 = 618,359$ kJ/kg

$h_2 = 2794,689$ kJ/kg

$h_3 = 2365,611$ kJ/kg

$h_4 = 1799,192$ kJ/kg

$h_5 = 120,036$ kJ/kg

$h_6 = 120,456$ kJ/kg

$h_7 = 612,948$ kJ/kg

$\eta_t = 39,77\ \%$

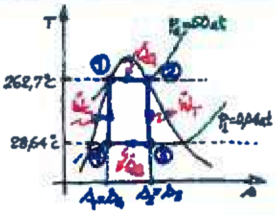
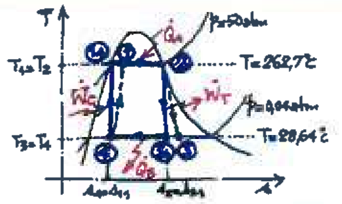
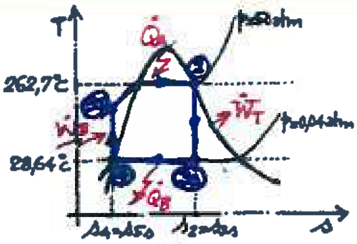
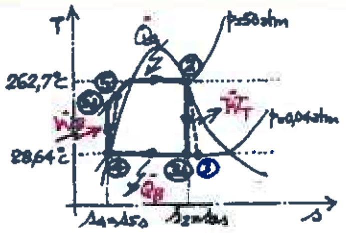
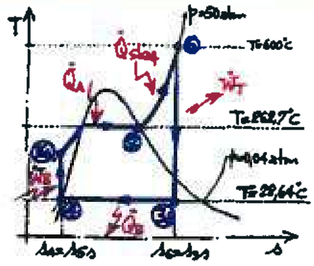
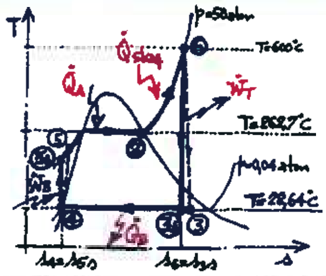
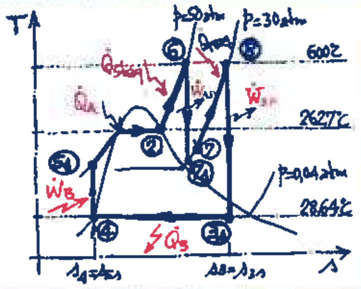
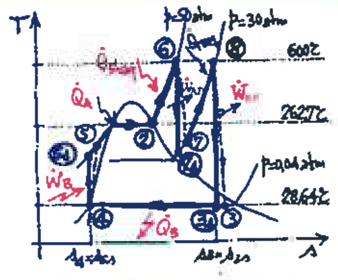
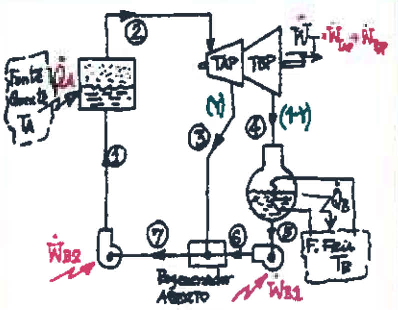
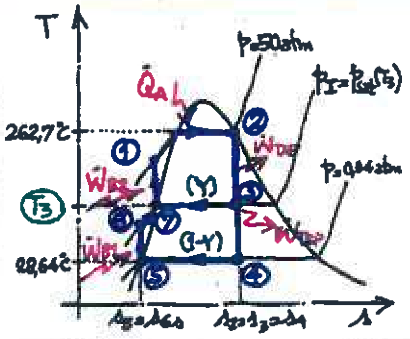
$r_w = 0,9934$

$cev = 4,16\ \frac{kg}{kWh}$

1.1 - Os ciclos motores a vapor (de água) referidos nas várias alíneas seguintes, trabalham entre as pressões mínima e máxima de 0,04 e 50 at, respectivamente. Calcule o rendimento térmico (η_t), a razão de trabalho (r_w), e o consumo específico de vapor (c.e.v.), para cada ciclo. Sempre que não haja referência aos rendimentos isentrópicos (η_s) estes são de 100%.

Construa um quadro em que vai colocar os valores de η_t, r_w e **c.e.**v. obtidos em cada alínea e observe a evolução desses resultados à luz da teoria.

1at ≈ 100 kPa

a) Ciclo de Carnot	**b) Ciclo de "Carnot" com η_s = 85% para T e C**
 η_t = 43,7 % r_w = 0,7224 $cev = 5{,}01 \frac{kg}{kWh}$	 η_t = 32,62 % r_w = 0,6160 $cev = 6{,}91 \frac{kg}{kWh}$
c) Ciclo de Rankine simples reversível	**d) Ciclo Rankine simples: η_s = 85% para T e B**
 η_t = 37,09 % r_w = 0,9940 $cev = 3{,}64 \frac{kg}{kWh}$	 η_t = 31,47 % r_w = 0,9920 $cev = 4{,}29 \frac{kg}{kWh}$
e) Ciclo de Rankine com sobreaquecimento até 600°C (reversível)	**f) Ciclo de Rankine com sobreaquecimento até 600°C e η_s = 85% para a T e B**
 η_t = 41,79 % r_w = 0,9960 $cev = 2{,}44 \frac{kg}{kWh}$	 η_t = 35,35 % r_w = 0,9949 $cev = 2{,}88 \frac{kg}{kWh}$
g) Ciclo de Rankine com reaquecimento até 600°C e pressão de reaquecimento de 30 at (reversível)	**h) Ciclo de Rankine com reaquecimento até 600°C e pressão de reaquecimento de 30 at, η_s = 85% para T e B**
 η_t = 42,84 % r_w = 0,9970 $cev = 2{,}24 \frac{kg}{kWh}$	 η_t = 36,65 % r_w = 0,9950 $cev = 2{,}64 \frac{kg}{kWh}$
i) Ciclo de Rankine simples regenerativo, com um único aquecedor de água de alimentação por contacto) 	 η_t = 39,77 % r_w = 0,9934 $cev = 4{,}16 \frac{kg}{kWh}$

E.1.2 Determine as TEMPERATURAS MEDIAS da fonte quente e fonte fria e com elas determine o η_t de Carnot para os ciclos considerados nas alineas E.1 a) e) f) h) do problema anterior. Compare resultados e justifique as diferenças

DIAS DE CA

$$\boxed{\delta q_f = T\,ds} \Rightarrow \int_i^f \delta q_f = \int_i^f T\,ds \cong T_m \int_i^f ds \Rightarrow \boxed{T_m = \frac{{}_iq_f}{s_f - s_i}}$$

para ${}_iq_f = q_A$ tem-se $T_m = T_{m,A}$

$$\eta_t = 1 - \frac{T_B}{T_{m,A}} = 1 - \frac{273{,}15 + 28{,}64}{T_{m,A}} = 1 - \frac{301{,}79}{T_{m,A}}$$

IGUAL para todos os Ciclos considerados

---

a) $T_{m,A} = T_A = 535{,}84\ K$ → $\underline{\underline{\eta_t = 43{,}67\,\%}} \cong \eta_{t,6.1.a)} = 43{,}69\,\%$

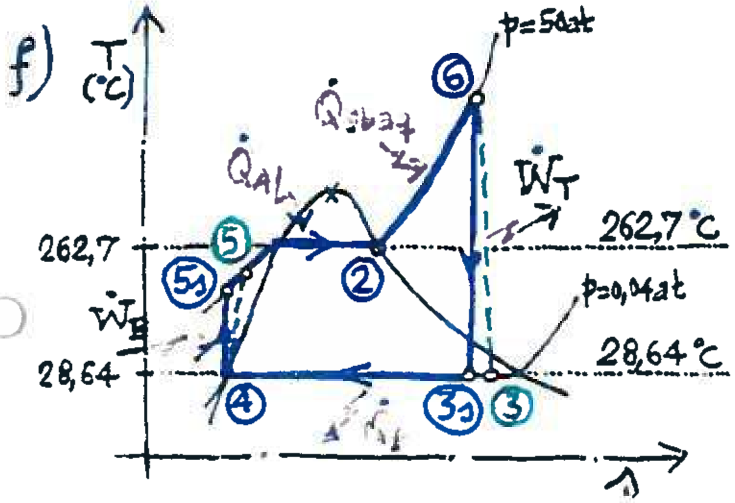
(ciclo Carnot reversível)

---

e) $T_{m,A} = 517{,}063\ K$ → $\underline{\underline{\eta_t = 41{,}63\,\%}} \cong \eta_{t,6.1.e)} = 41{,}79\,\%$

---

f)



$$T_{m,A} = \frac{|q_A| + |q_{sbaq}|}{|s_6 - s_5|} = \frac{|h_6 - h_5|}{s_6 - s_5}$$

$$T_{m,A} = \frac{3666{,}799 - 126{,}511}{7{,}2666 - 0{,}42110}$$

$$T_{m,A} = 517{,}170\ K$$

$$\eta_t = 1 - \frac{T_B}{T_{m,A}} = 1 - \frac{301{,}79}{517{,}170} \Rightarrow \underline{\underline{\eta_t = 41{,}65\,\%}} \neq \eta_{t,6.1.f} = 35{,}35\,\%$$

A diferença deve-se a $T_{m,A}$, que NÃO REPRESENTA devidamente a gama de variação de T, entre T_{5_1} e T_6, a que é adicionado $\dot{q}_f$

---

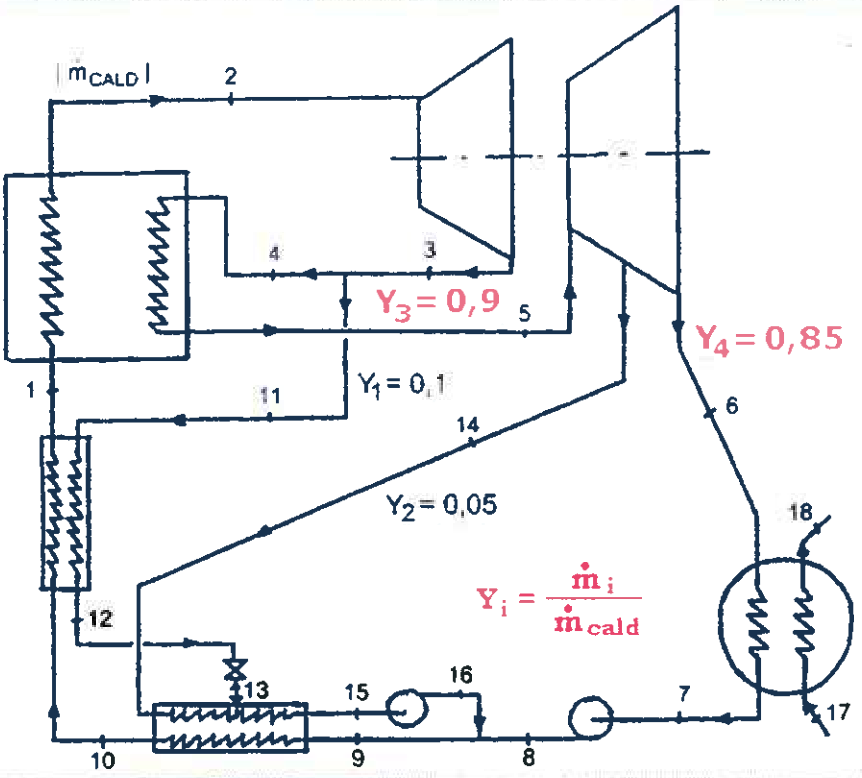
h) $T_{m,A} = 526{,}674\ K$ → $\underline{\underline{\eta_t = 42{,}70\,\%}} \neq \eta_{t,6.1.h)} = 36{,}65\,\%$

A diferença deve-se a $T_{m,A}$, que não representa com "precisão"

1.3. Na instalação abaixo esquematizada, a bombas e as turbinas são isentrópicas

a) Calcule o rendimento térmico da instalação, a razão de trabalho e o consumo especifico de vapor

b) Calcule a potência debitada pela instalação e o caudal de água de arrefecimento do condensador.



DADOS:

$\dot m_{CALD} = 500$ ton/h

$T_2 = 550$ °C

$T_5 = 500$ °C

$T_7 = 30$ °C

$T_{15} = 40$ °C

$T_{10} = 80$°C

$T_{17} = 20$ °C

$T_{18} = 28$ °C

$p_1 = p_2 = p_8 = p_9 = p_{10} = 30$ at

$p_3 = p_4 = p_5 = p_{11} = p_{12} = 2,5$ at

$p_{13} = p_{14} = p_{15} = 0,5$ at

$p_{17} = p_{18} = 1,0$ at

$x_7 = 0\%$

$Y_1 = 0,1$

$Y_2 = 0,05$

ESTADO		p (at)	T (°C)	x (%)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)
1	LC	30	129,7		546,584	1,6261
2	VS	30	550		3569,666	7,3822
3 4	VS	2,5	195,1		2857,292	7,3822
5	VS	2,5	500		3487,186	8,4176
6	VH	0,04325	30	99,6	2545,107	8,4176
7	LS	0,04325	30	0,0	125,688	0,4367
8	LC	30	30,3		129,480	0,4367
9	LC	30	31,8		135,618	0,4569
10	LC	2,5	80		334,944	1,0748
11	VS	2,5	195,1		2857,292	7,3822
12	VH	2,5	126,8	9,5	740,873	2,1211
13	VH	0,5	80,7	17,5	740,873	2,2219
14	VS	0,5	265,9		3007,191	8,4176
15	LC	0,5	40		167,472	0,5715
16	LC	30	40,1		170,398	0,5715
17	L	1,0	20		84,155	0,2964
18	L	1,0	28		117,432	0,4064

a)

$\eta = \frac{W_T - W_B}{q - q} = 42,7\ \%$

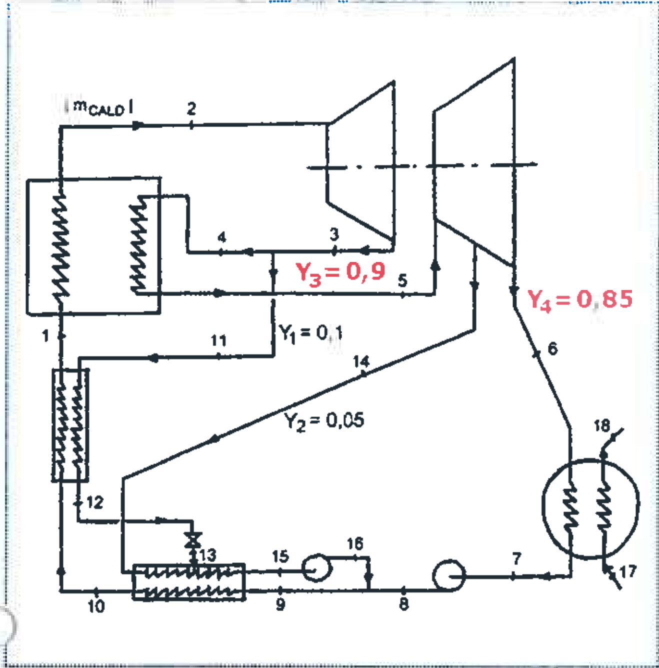
$r_u = 0.9976$

$cev = 2.35\ \frac{kg}{kWh}$

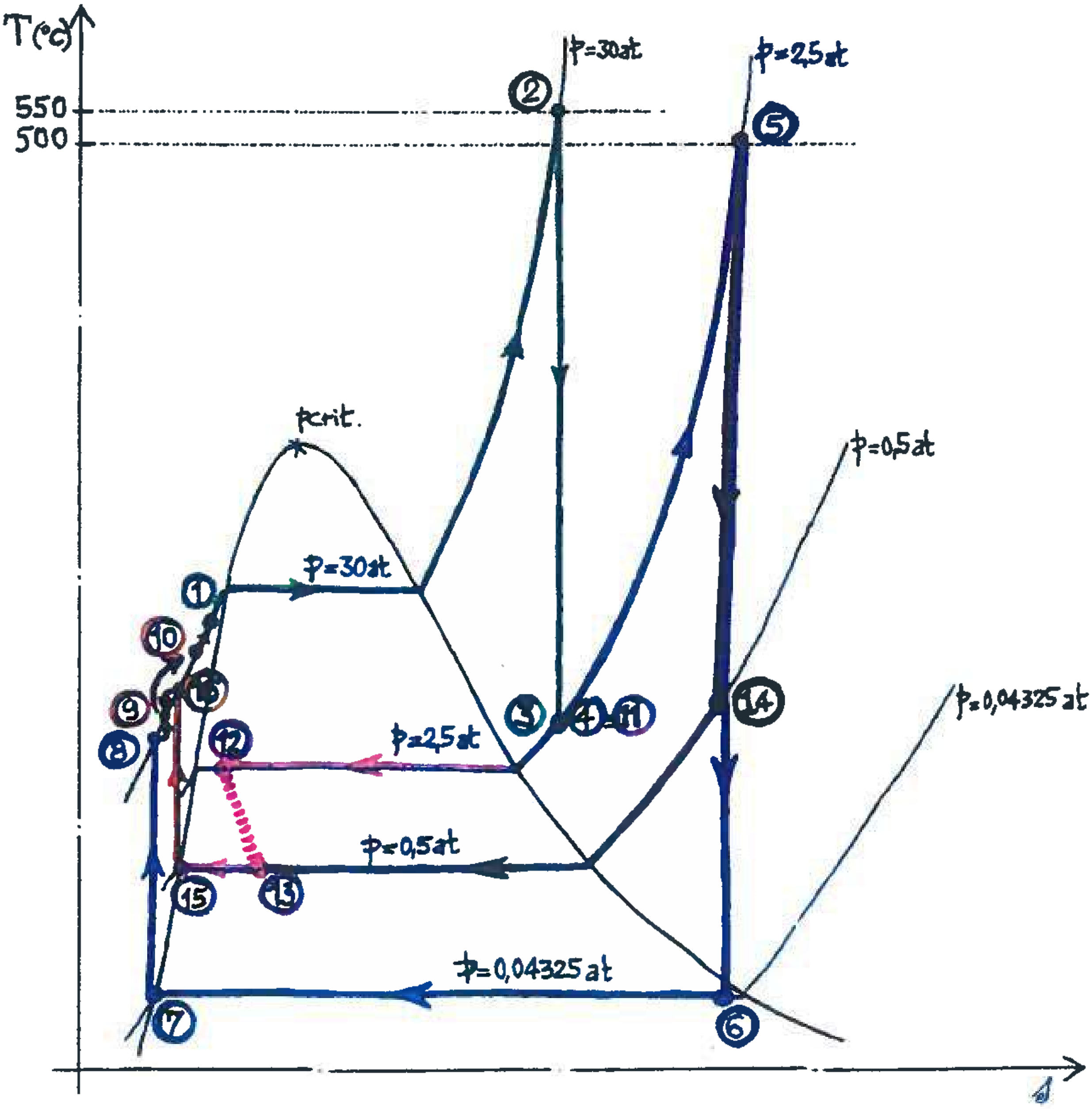
b)

$\dot W = \dot m \cdot W = 213\ MW$

$\dot m = 30879$ ton/h



ESTADO		p	T	x	h	s
		(at)	(°C)	(%)	(kJ/kg)	(kJ/kg.K)
1	LC	30	129,7		546,584	1,6261
2	VS	30	550		3569,666	7,3822
3 4	VS	2,5	195,1		2857,292	7,3822
5	VS	2,5	500		3487,186	8,4176
6	VH	0,04325	30	99,6	2545,107	8,4176
7	LSt	0,04325	30	0,0	125,688	0,4367
8	LC	30	30,3		129,480	0,4367
9	LC	30	31,8		135,618	0,4569
10	LC	2,5	80		334,944	1,0748
11	VS	2,5	195,1		2857,292	7,3822
12	VH	2,5	126,8	9,5	740,873	2,1211
13	VH	0,5	80,7	17,5	740,873	2,2219
14	VS	0,5	265,9		3007,191	8,4176
15	LC	0,5	40		167,472	0,5715
16	LC	30	40,1		170,398	0,5715
17	LC	1,0	20		84,155	0,2964
18	LC	1,0	28		117,482	0,4064

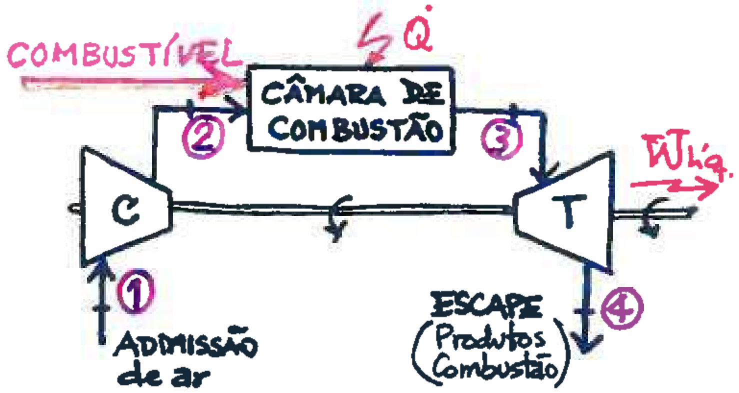


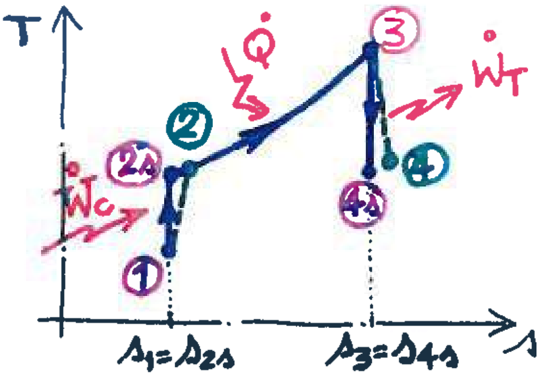
CICLO de JOULE - BRAYTON

Ciclo IDEAL para turbinas a gás simples. O fluido de trabalho é considerado um GÁS PERFEITO

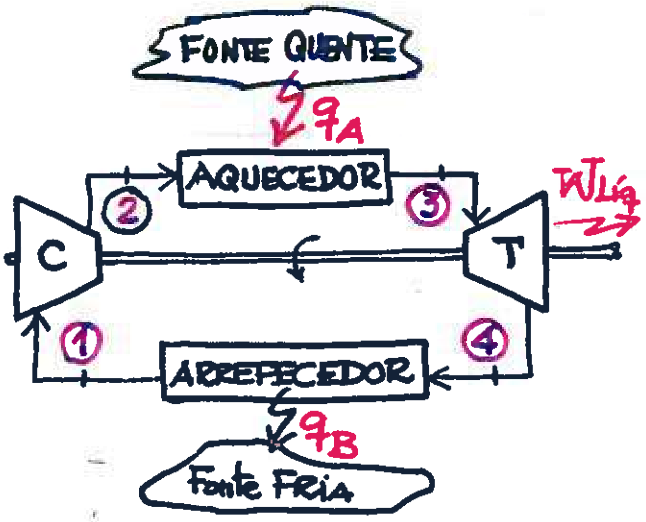
Turbina a gás simples de CICLO ABERTO, SEM REGENERAÇÃO:

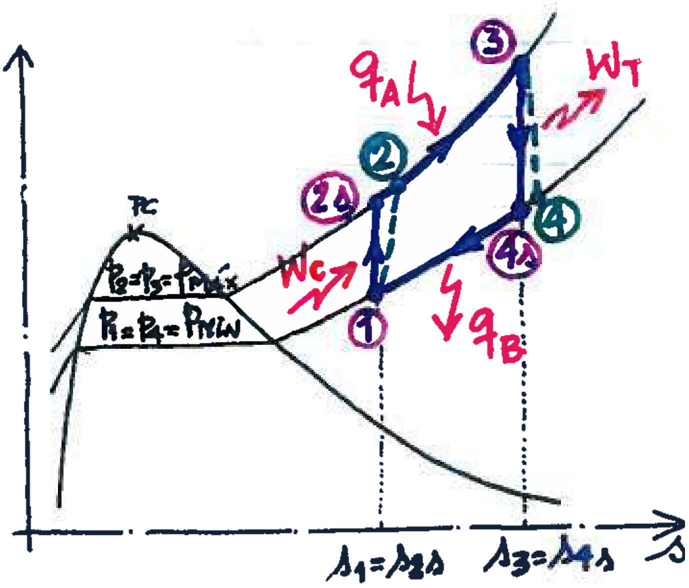
(utiliza processo de combustão interna)





Turbina a gás simples de CICLO FECHADO, SEM REGENERAÇÃO:





NOTA: Na compressão (1-2s) e na expansão (3-4s) isentrópicas de um gás perfeito, são válidas as seguintes relações p, v, T (K - expoente politrópico):

$$\boxed{p v^{K} = cte.} \quad \boxed{T v^{K-1} = cte.} \quad \boxed{T p^{\frac{1-K}{K}} = cte}$$

Notar que:
$K = c_p/c_v$
$pV = mRT$

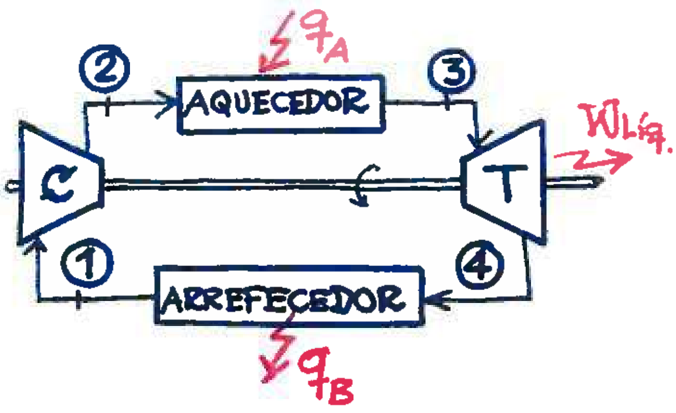
razão de pressão: $r_p = \left(\frac{p_{MÁX}}{p_{MIN}}\right)_{ciclo} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{K}{K-1}} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{\frac{K}{K-1}}$

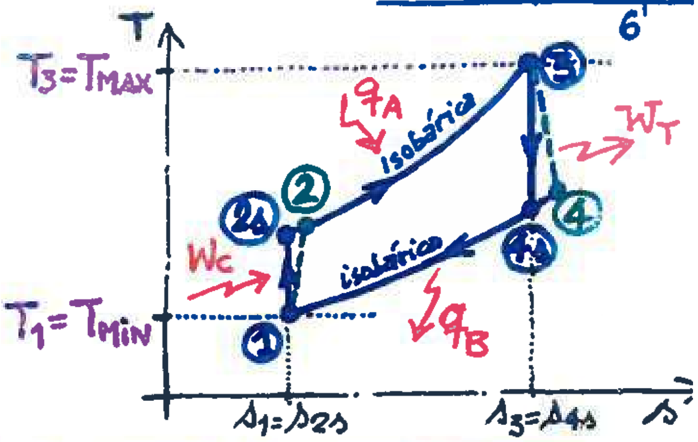
r_p MÁXIMA: Corresponde a uma compressão isentrópica que permite atingir a temperatura máxima ($T_{3\,máx}$)

$$r_{p_{max}} = \left(\frac{p_{MAX}}{p_{MIN}}\right)_{EXTREMAS} = \left(\frac{T_{MAX}}{T_{MIN}}\right)^{\frac{K}{K-1}}_{Extrem}$$

Para que se obtenha $W_{\text{máximo do ciclo}}$ ⇒ $\boxed{r_p = \sqrt{r_{p_{MAX}}}}$ e $\boxed{1 < r_p < r_{p_{MAX}}}$

ciclo de JOULE-BRAYTON SEM REGENERAÇÃO





Rendimento térmico :

$$\eta_t = \frac{W_{útil\ ciclo}}{q_{fornecido}} = \frac{|W_T| - |W_C|}{|q_A|} = \frac{|h_4 - h_3| - |h_2 - h_1|}{|h_3 - h_2|} = \xrightarrow[(C_p = cte)]{dh = C_p dT} = \frac{|T_4 - T_3| - |T_2 - T_1|}{|T_3 - T_2|}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{1}{r_p}\right)^{\frac{K-1}{K}}$$

$$\longrightarrow \eta_{MAX} = 1 - \left(\frac{1}{r_{P_{MAX}}}\right)^{\frac{K-1}{K}} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{máx}}$$

Rendimento ISENTRÓPICO :

Compressor : $\eta_{is}^{c} = \frac{W_{isent}}{W_{real}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \Rightarrow T_2 = T_1 + \frac{T_{2s} - T_1}{\eta_{is}^{c}}$

Turbina : $\eta_{is}^{T} = \frac{W_{real}}{W_{isent}} = \frac{h_4 - h_3}{h_{4s} - h_3} = \frac{T_4 - T_3}{T_{4s} - T_3} \Rightarrow T_4 = T_3 + \eta_{is}^{T}(T_{4s} - T_3)$

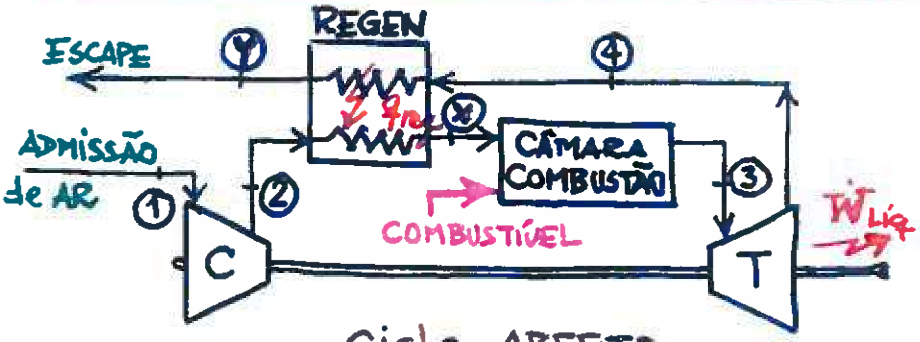
Razão de trabalho :

$$r_W = \frac{W_{útil\ ciclo}}{W_{exp.\ turb.}} = 1 - \frac{|W_c|}{|W_T|} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4} = 1 - \frac{T_1}{T_3}(r_p)^{\frac{K-1}{K}} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{máx}}(r_p)^{\frac{K-1}{K}}$$

Consumo específico de GÁS

$$ceg = \frac{3600}{W_{útil\ ciclo}} = \frac{3600}{C_p\left[|T_4 - T_3| - |T_2 - T_1|\right]} \quad [kg_{gás}/kWh]$$

CICLO de JOULE-BRAYTON COM REGENERAÇÃO



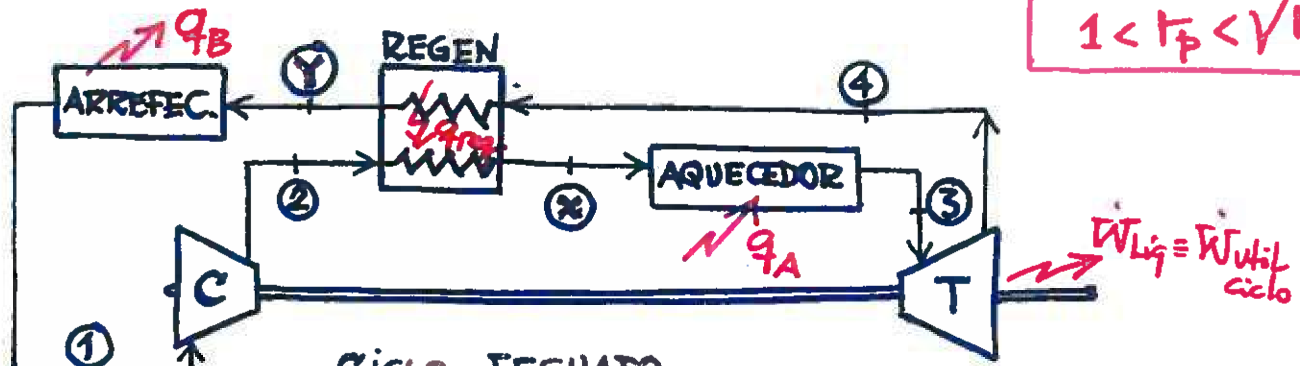
Ciclo ABERTO

para que a REGENERAÇÃO SEJA POSSÍVEL

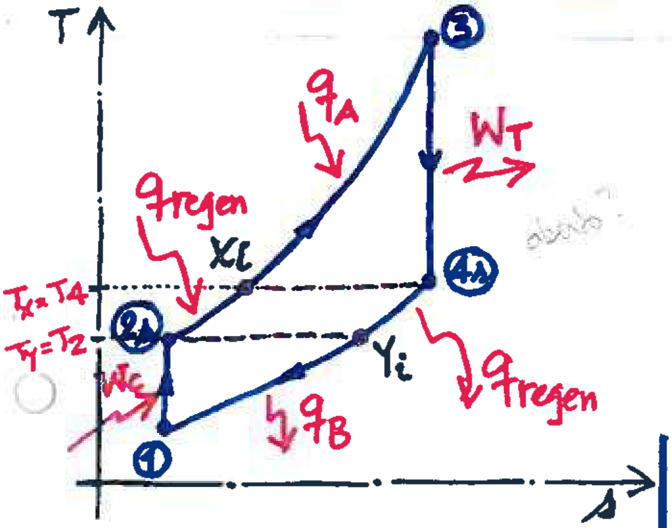
$$T_4 > T_2$$

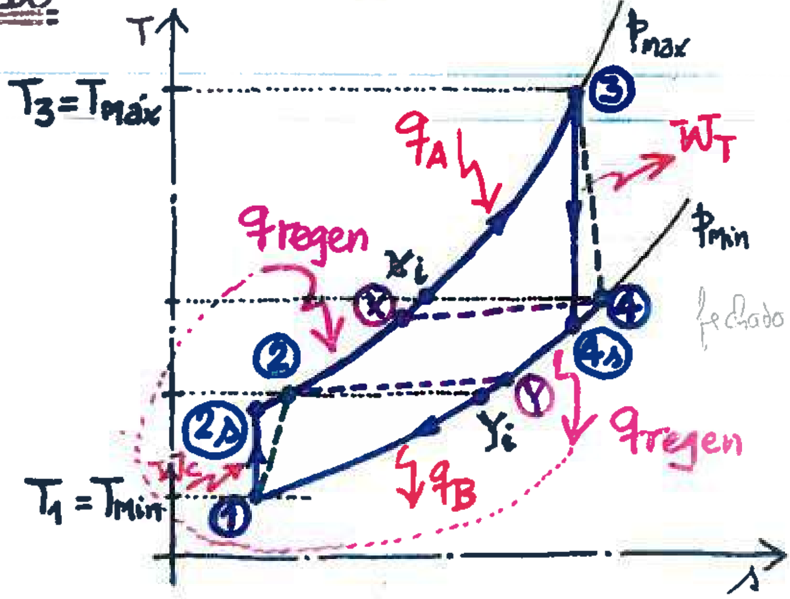
ou

$$1 < r_p < \sqrt{r_{p_{máx}}}$$



Ciclo FECHADO





$\eta_{is}^{T} = 100\%$; $\eta_{is}^{C} = 100\%$

$\eta_{reg} = 100\% \Rightarrow X = X_i$ e $Y = Y_i$

$T_X = T_4$ e $T_Y = T_2$

$$\eta_t = \frac{W_{util}}{q_{forn}} = 1 - \frac{|T_2 - T_1|}{|\underset{\hookrightarrow T_{X_i}}{T_4} - T_3|} = 1 - \frac{T_1}{T_3}(r_p)^{\frac{K-1}{K}}$$

$$r_W = \frac{W_{util\ ciclo}}{W_{Turb}^{exp}} = 1 - \frac{|T_2 - T_1|}{|T_4 - T_3|} = \eta_t$$

$$c_{eg} = \frac{3600}{C_p\left[|T_4 - T_3| - |T_2 - T_1|\right]} \left(\frac{Kg_{gás}}{KWh}\right)$$

$\eta_{is}^{T} < 100\%$; $\eta_{is}^{C} < 100\%$; $\eta_{reg} < 100\%$

$$\eta_{reg} = \frac{\text{Calor real Transferido}}{\text{Calor Possível de Transferir}} = \frac{h_X - h_2}{h_{X_i} - h_2} = \frac{h_4 - h_Y}{h_4 - h_{Y_i}}$$

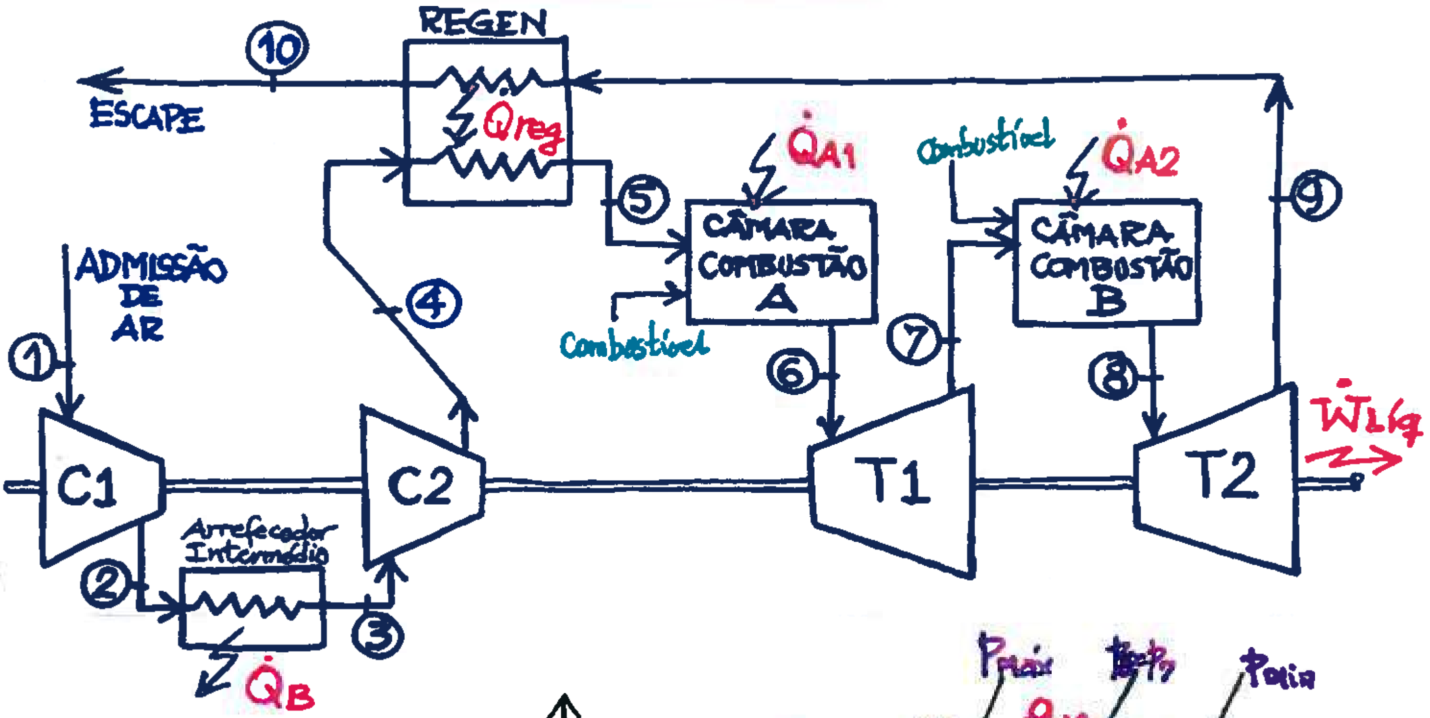
$$\eta_{reg} = \frac{\cancel{C_p}|T_X - T_2|}{\cancel{C_p}|T_{X_i} - T_2|} \Rightarrow T_X = T_2 + \eta_{reg}(\underset{= T_4}{T_{X_i}} - T_2)$$

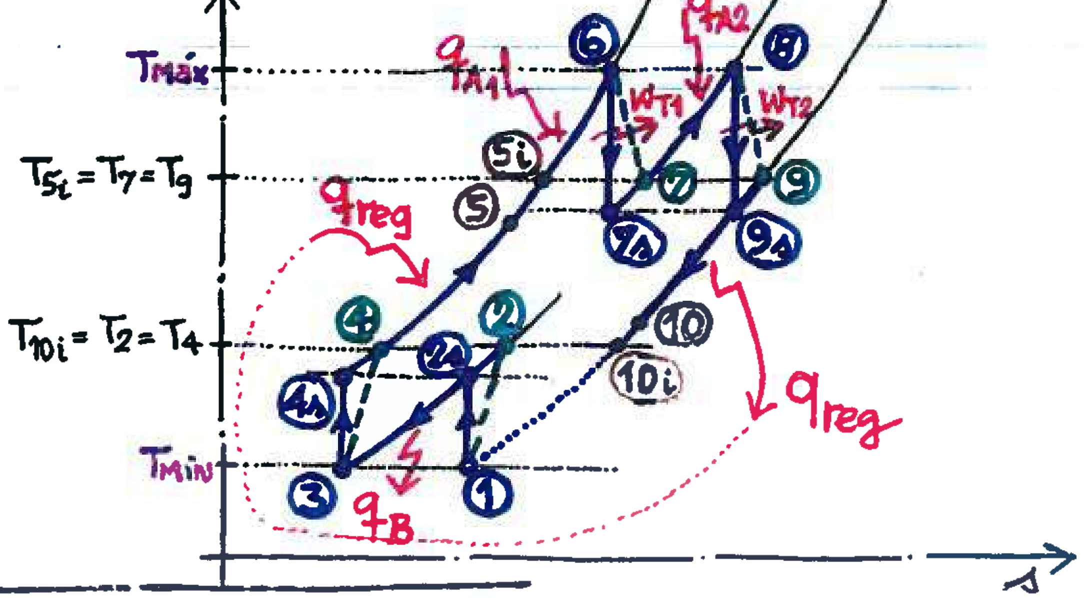
$$\eta_t = \frac{|W_T| - |W_C|}{{}_X q_3} = \frac{|T_4 - T_3| - |T_2 - T_1|}{|T_3 - T_X|}$$

$$r_W = 1 - \frac{|T_2 - T_1|}{|T_4 - T_3|} \; ; \; c_{eg} = \frac{3600}{C_p\left[|T_4 - T_3| - |T_2 - T_1|\right]} \left(\frac{Kg_{gás}}{KWh}\right)$$

Ciclo de JOULE-BRAYTON

COMPRESSÃO E/OU EXPANSÃO EM ANDARES (COM Aquecimento/Arrefecimento INTERMÉDIOS)





2 andares de compressão
+
2 andares de expansão

razão de pressão INTERMÉDIA $r_{p_i} = \sqrt[n]{r_p}$

Wútil CICLO MÁXIMO →

- Para MINIMIZAR o trabalho de Compressão MANTER A MESMA RAZÃO DE COMPRESSÃO EM CADA ANDAR (de compressão)

$$\boxed{r_{p_{comp}} = \sqrt[n_c]{r_p}} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_4}{p_3}$$

n_c - nº compressores

- Para MAXIMIZAR o trabalho de EXPANSÃO MANTER A MESMA RAZÃO DE EXPANSÃO EM CADA ANDAR (de expansão)

$$\boxed{r_{p_{turb}} = \sqrt[n_t]{r_p}} = \frac{p_6}{p_7} = \frac{p_8}{p_9}$$

n_t - nº de Turbinas

Notar que: $r_p = \left(\frac{P_{max}}{P_{min}}\right)_{estes} = \frac{p_6}{p_9} = \frac{p_4}{p_{10}}$

Cap2. Ciclo de Joule-Brayton

DIA DE OURO UPC

E.2.3 Uma instalação de turbina a gás, com ar como fluido de trabalho, funciona entre as temperaturas extremas de 15ºC e 940K sendo a pressão mínima de 1.2bar e $r_p=0,82\sqrt{r_{p\,max}}$.

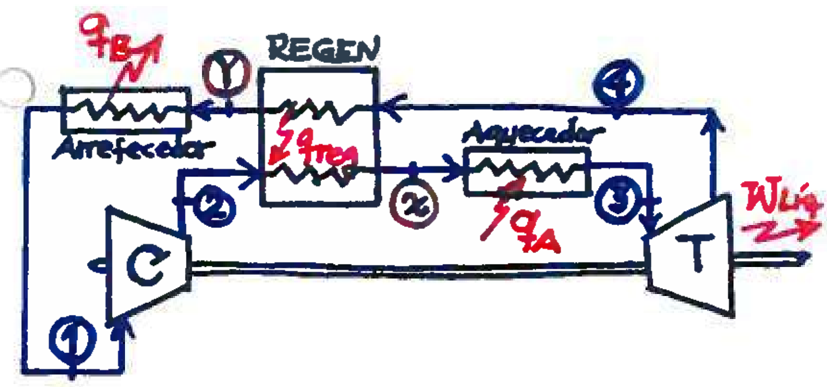
1/2

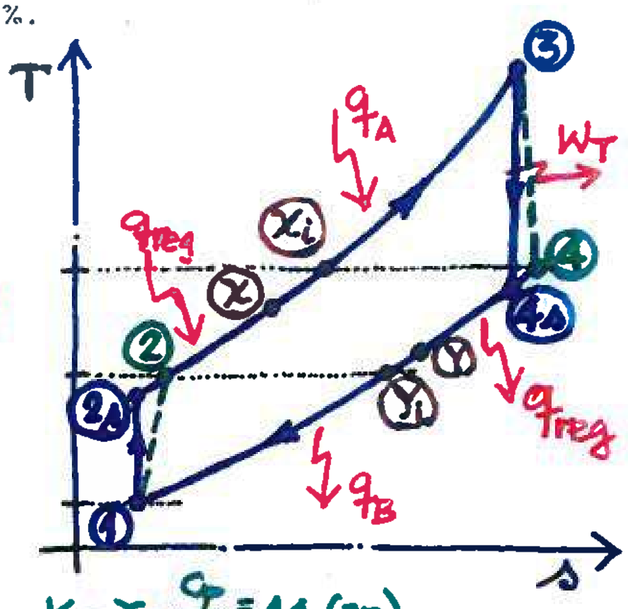
a) Admitindo que a instalação tem um só andar de compressão e um só andar de expansão, que $\eta_{is\,turb}=\eta_{is\,comp}=90\%$ e que $\eta_{reg}=85\%$ calcule η_t, r_w e c.e.g.;

b) Admita agora que o ciclo, a funcionar entre as mesmas condições extremas, tem dois andares de compressão e três de expansão e é internamente reversível.

i) Escolha as razões de pressão intermédias por forma a maximizar o desempenho da instalação;

ii) Calcule então η_t, r_w e c.e.g. Não se esqueça que pode usar a regeneração e admita que $\eta_{reg}=100\%$.





$T_1=T_{Min}=288{,}15\,K$ $\qquad p_{Min}=1{,}2\,bar$

$T_3=T_{Máx}=940\,K$ $\qquad r_p=0{,}82\sqrt{r_{p\,Max}}$ $\qquad K=\gamma=\frac{c_p}{c_v}\equiv 1{,}4\ (ar)$

$$r_{p\,Máx}=\left(\frac{T_{Máx}}{T_{Min}}\right)^{K/K-1}=\left(\frac{940}{288{,}15}\right)^{1{,}4/0{,}4}=62{,}702 \Rightarrow \sqrt{r_{p\,Máx}}=7{,}918$$

$$r_p=0{,}82\sqrt{r_{p\,Máx}}=0{,}82\times 7{,}918=6{,}493 \Rightarrow \cdot\ r_p \overset{>1}{<} \sqrt{r_{p\,Máx}} \Rightarrow \boxed{\text{Regeneração é Aplicável}}$$

$$\left\{\begin{array}{l} T_{2s}=T_1(r_p)^{K-1/K}=288{,}15\,(6{,}493)^{0{,}4/1{,}4}=491{,}75\,K \\ T_{4s}=T_3/(r_p)^{K-1/K}=940/(6{,}493)^{0{,}4/1{,}4}=550{,}81\,K \end{array}\right\rangle T_{4s}>T_{2s} \Rightarrow \boxed{\text{Regeneração é Aplicável}}$$

$$\left\{\begin{array}{l} \eta_{is}^{C}=\frac{W_{isent}}{W_{real}}=\frac{T_{2s}-T_1}{T_2-T_1} \Rightarrow T_2=288{,}15+\frac{491{,}75-288{,}15}{0{,}90} \rightarrow T_2=514{,}37\,K \\ \eta_{is}^{T}=\frac{W_{real}}{W_{isent}}=\frac{T_4-T_3}{T_{4s}-T_3} \Rightarrow T_4=940+0{,}90\,(550{,}81-940) \rightarrow T_4=589{,}73\,K \end{array}\right.$$

$$\eta_{reg}=\frac{\text{Calor real Trocado}}{\text{Calor possível Trocar}}=\frac{h_x-h_2}{h_{x_i}-h_2}=\frac{h_x-h_2}{h_4-h_2} \quad ou \quad \eta_{reg}=\frac{h_4-h_Y}{h_4-h_{Y_i}=h_2}$$

$$\eta_{reg}=\frac{T_x-T_2}{T_{x_i}-T_2} \dashrightarrow T_x=T_2+\eta_{reg}[T_4-T_2]$$

$$T_x=514{,}37+0{,}85\,[589{,}73-514{,}37] \Big\rangle\ T_x=578{,}43\,K$$

6.2.3
2/2

Dias [illegible]

a)

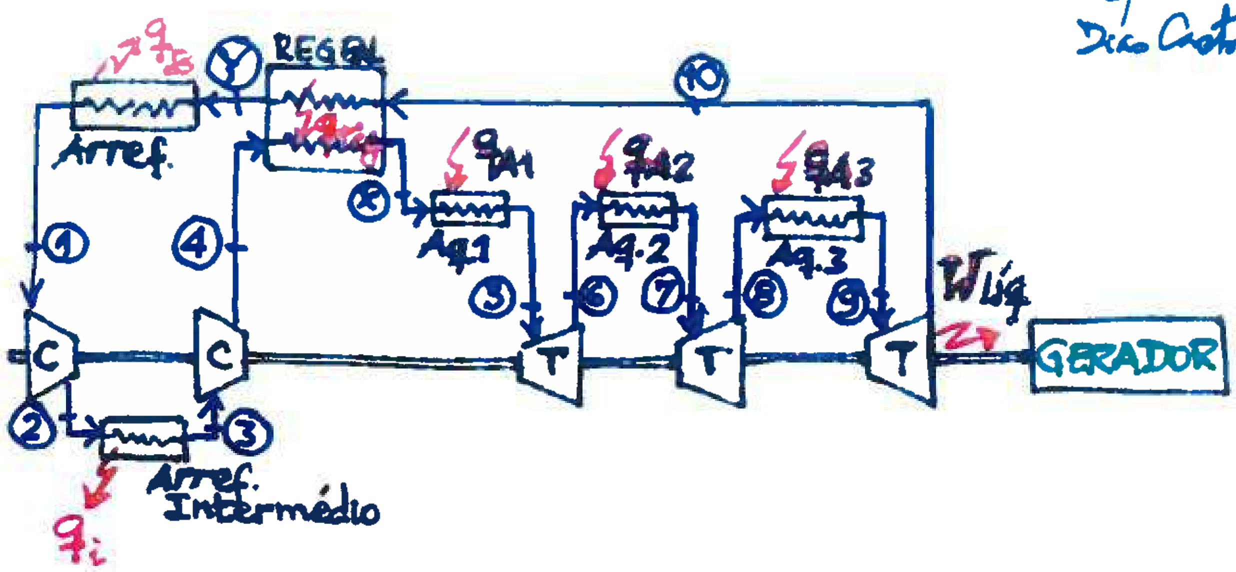
$$\eta_t = \frac{|T_4 - T_3| - |T_2 - T_1|}{|T_3 - T_x|} = \frac{|900 - 589{,}73| - |514{,}37 - 288{,}15|}{|940 - 578{,}43|} \rightarrow 31\%$$

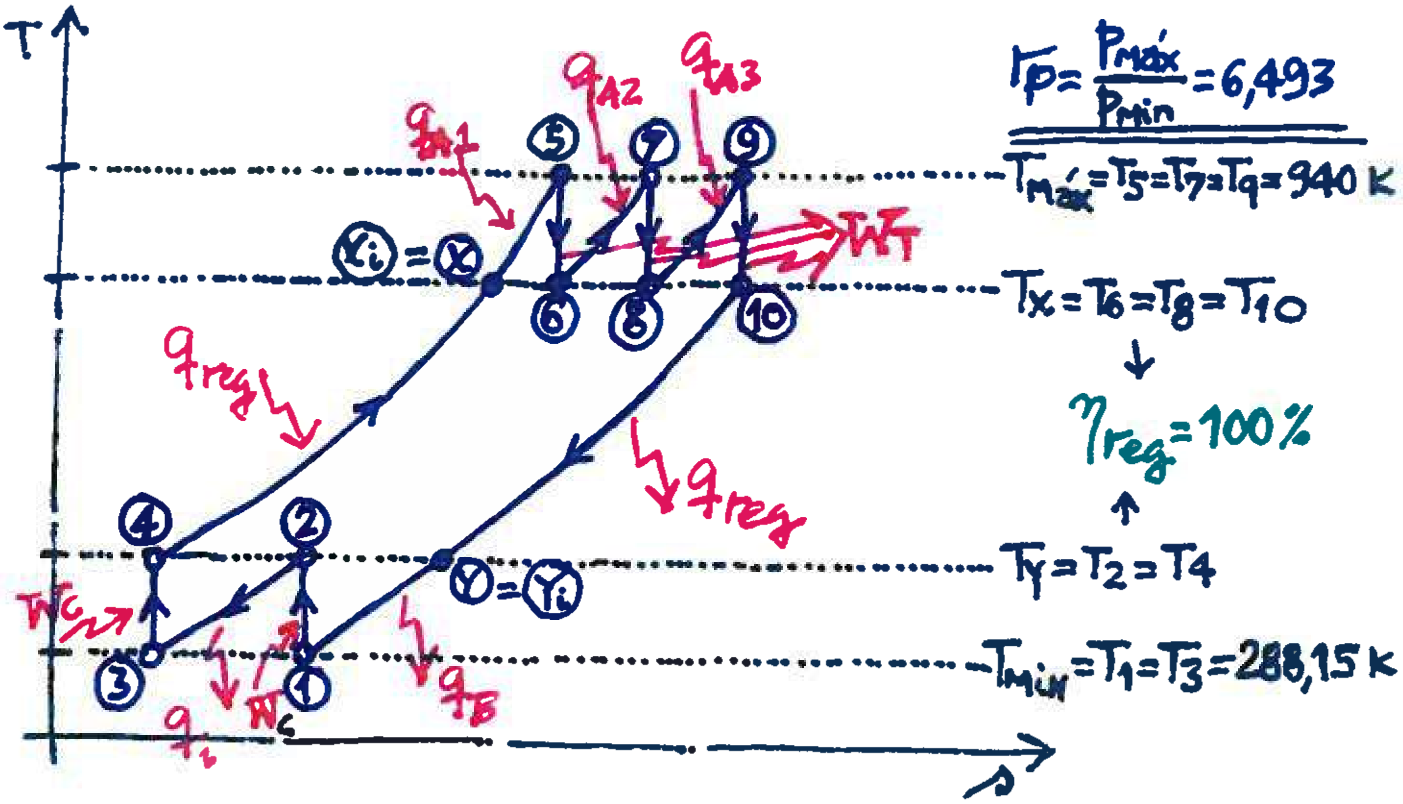
$$r_W = 1 - \frac{|T_2 - T_1|}{|T_4 - T_3|} = 1 - \frac{|514{,}37 - 288{,}15|}{|589{,}73 - 940|} \longrightarrow r_W = 3542$$

$$Ceg = \frac{3600}{1{,}005 \left[|589{,}73 - 940| - |514{,}37 - 288{,}15| \right.} \longrightarrow Ceg = 28{,}9 \ Kg/kWh$$

2.3.b)

Dico Castro





$$r_P = \frac{P_{máx}}{P_{min}} = 6{,}493$$

b i) $r_{P_{comp}} = \sqrt[2]{r_P} = \sqrt{6{,}493} \Rightarrow r_{P_C} = 2{,}548 = \frac{P_4}{P_3} = \frac{P_2}{P_1}$

$r_{P\,turb} = \sqrt[3]{r_P} = \sqrt[3]{6{,}493} \Rightarrow r_{P_t} = 1{,}866 = \frac{P_5}{P_6} = \frac{P_7}{P_8} = \frac{P_9}{P_{10}}$

b.ii) $$\eta_t = \frac{|{}_5W_6 + {}_7W_8 + {}_9W_{10}| - |{}_1W_2 + {}_3W_4|}{|{}_xq_5 + {}_6q_7 + {}_8q_9|} = \frac{3|\cancel{c_p}(T_6 - T_5)| \; 2|\cancel{c_p}(T_2 - T_1)|}{3 \cdot \cancel{c_p}|T_5 - T_x|} = 1 - \frac{2|T_2 - T_1|}{3|T_5 - T_x|} = 61{,}7\%$$

$r_W = \eta_t = 0{,}617$ $(\eta_{reg} = 100\% \ldots)$

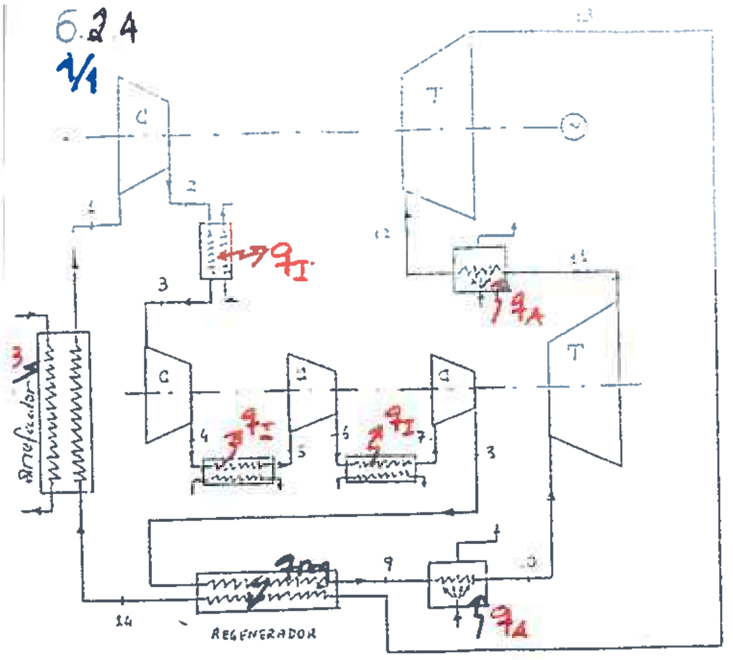
$$c_{eg} = \frac{3600}{3c_p|T_6 - T_5| - 2c_p|T_2 - T_1|} = \frac{3600}{1{,}005\,[3|786{,}55 - 940| - 2|376{,}42 - 288{,}15|]} = 12{,}62\ \mathrm{Kg/kWh}$$

$T_6 = T_5 / r_{P_t}^{\gamma-1/\gamma} = 940/(1{,}866)^{0{,}4/1{,}4} = 786{,}55\ \mathrm{K} = T_8 = T_{10} = T_x$

6.2 A

1/1

Dias de Castro



$p_1 = 5{,}0\,kgf/cm^2 = p_{14}$ $p_8 = 65\,kgf/cm^2$

$T_1 = T_3 = T_5 = T_7 = 20^\circ C$ $\dot{m} = 300\,t/h$

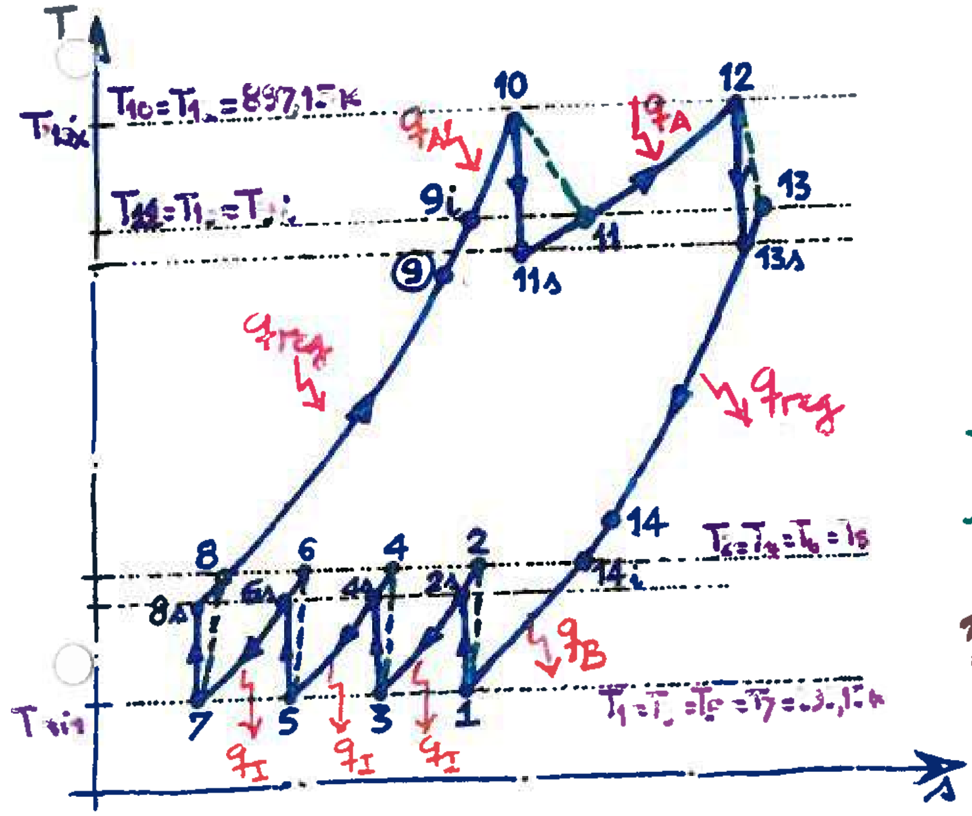
$T_{10} = T_{12} = 565^\circ C$

O esquema refere-se a uma central de turbina de gás e o fluido de trabalho é ar

Os rendimentos isentrópicos são: | compressores=85% turbinas=90%

O rendimento de regeneração é 75%

Calcule η_t, r_w e c.e.g. escolhendo as razões intermédias convenientes.



$$r_p = \frac{P_{máx}}{P_{mín}} = \frac{P_8 = P_{10}}{P_1 = P_{14}} = \frac{65}{5} = 13$$

$$r_{p_i} = \sqrt[n]{r_p} \left\langle \begin{array}{l} r_{p_{comp}} = \sqrt[4]{13} = 1{,}899 \\ r_{p_{turb}} = \sqrt[2]{13} = 3{,}606 \end{array} \right.$$

$$T_{8s} = T_7 \cdot (r_{p_c})^{\gamma-1/\gamma} = 352{,}10\ K$$

$$T_{11s} = T_{10} / (r_{p_t})^{\gamma-1/\gamma} = 621{,}89\ K$$

$$T_8 = T_7 + \frac{T_{8s} - T_7}{\eta_{is}^c} = 366{,}84\ K$$

$$T_{11} = T_{10} + \eta_{is}^T (T_{10} - T_{11s}) = 649{,}42\ K$$

$$\eta_{reg} = \frac{T_9 - T_8}{T_{9i} - T_8} \quad \underset{T_{11}}{\overset{\shortparallel}{}} \quad \left\{ \begin{array}{l} T_9 = T_8 + \eta_{reg}(T_{11} - T_8) \\ T_9 = 578{,}78\ K. \end{array} \right.$$

$$\eta_t = \frac{|W_T| - |W_C|}{{}_9q_{10} + {}_{11}q_{12}} = \frac{|2(T_{11} - T_{10})| - |4(T_8 - T_7)|}{|T_{10} - T_9| + |T_{12} - T_{11}|} \longrightarrow \eta_t = 35{,}5\ \%$$

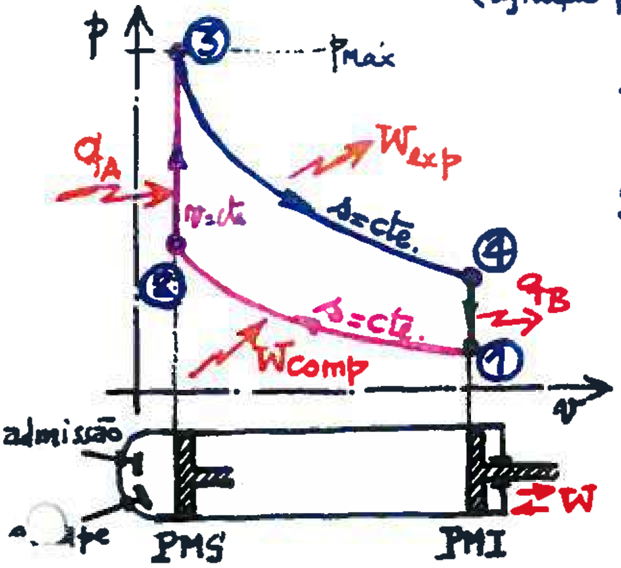
$$r_w = \frac{W_{útil}}{W_{exp_{turb}}} = \frac{|2(T_{11} - T_{10})| - |4(T_8 - T_7)|}{|2(T_{11} - T_{10})|} \longrightarrow r_w = 0{,}405$$

$$ceg = \frac{3600}{c_p \left[|2(T_{11} - T_{10})| - |4(T_8 - T_7)| \right]} \longrightarrow ceg = 17{,}85\ \frac{kg_{gás}}{kWh}$$

CICLOS MOTORES PADRÕES A AR

$$\left\{\begin{array}{l} k = \gamma = c_p/c_v \\ c_p = 1{,}005\ kJ/kg\,K \\ c_v = 0{,}718\ kJ/kg\,K \end{array}\right\rangle k = 1{,}4$$

CICLO de OTTO : Ciclo ideal que se aproxima do MOTOR COMBUSTÃO INTERNA (ignição por faísca)



1-2 (PMI→PMS): Compressão adiabática reversível
$(pv^{k} = cte ; Tv^{k-1} = cte; Tp^{\frac{1-k}{k}} = cte.)$

2-3 (no PMS): Aquecimento <u>ISOMÉTRICO</u> reversível
$$\dot{Q}_A = \dot{m}\, c_v (T_3 - T_2)$$
No motor real, corresponde à ignição e queima da mistura combustível-ar

3-4 (PMS→PMI): Expansão adiabática reversível
$(pv^{k} = cte ; Tv^{k-1} = cte; Tp^{\frac{1-k}{k}} = cte.)$

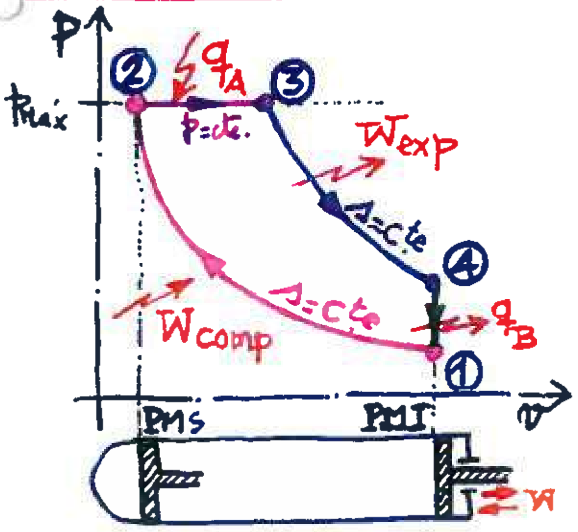
4-1 (no PMI): Arrefecimento <u>ISOMÉTRICO</u> reversível
$$\dot{Q}_B = \dot{m}\, c_v (T_1 - T_4)$$
No motor real, corresponde aos processos de escape e de admissão

---

Taxa de Compressão: $r_v = \dfrac{v_1}{v_2} = \dfrac{v_4}{v_3} = \left(\dfrac{T_2}{T_1}\right)^{1/k-1} = \left(\dfrac{T_3}{T_4}\right)^{1/k-1}$

Rendimento: $\eta_t = \dfrac{W_{útil}}{q_{forn}} = \dfrac{|q_A| - |q_B|}{|q_A|} = 1 - \dfrac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \dfrac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\dfrac{1}{r_v}\right)^{k-1}$

CICLO DIESEL : Ciclo ideal para o motor Diesel



1-2 : Compressão adiabática reversível

2-3 : Aquecimento Isobárico reversível
$$\dot{Q}_A = \dot{m}\, c_p (T_3 - T_2)$$
Num motor real, corresponde à injecção e queima do combustível.

3-4 : Expansão adiabática reversível

4-1 : Arrefecimento ISOMÉTRICO reversível.
$$\dot{Q}_B = \dot{m}\, c_v (T_1 - T_4)$$
Traduz os processos de escape e de admissão no motor real

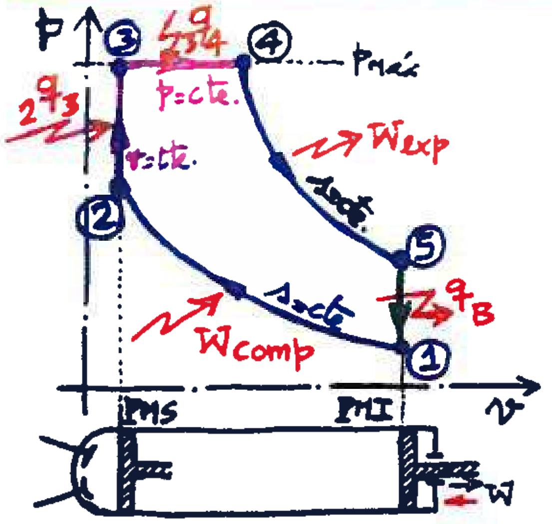
---

razão de combustão a pressão constante : $r_{cp} = \dfrac{v_3}{v_2} = \dfrac{T_3}{T_2} = \left(\dfrac{p_4}{p_1}\right)^{1/k} = \left(\dfrac{T_4}{T_1}\right)^{1/k}$

rendimento térmico : $\eta = \dfrac{W_{útil}}{q} = 1 - \dfrac{T_4 - T_1}{k(T - T)} = 1 - \dfrac{1}{r^{k-1}}\left[\dfrac{r_{cp}^{k} - 1}{k(r - 1)}\right]$

CICLOS MOTORES PADRÕES a AR

CICLO MÍSTO ou de SABATHIEÉ



1-2: Compressão adiabática reversível

2-3: Aquecimento Isométrico reversível / ${}_2q_3 = C_v(T_3-T_2) = U_3-U_2$

3-4: Aquecimento ISOBÁRICO reversível / ${}_3q_4 = C_p(T_4-T_3) = U_4-U_3$

4-5: Expansão adiabática reversível

5-1: Arrefecimento IsoMÉTRICO reversível / ${}_5q_1 = C_v(T_5-T_1) = U_5-U_1$

Taxa de Compressão: $r_v = \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_1}{v_3} = \frac{v_5}{v_2} = \frac{v_5}{v_3} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{1/K-1}$

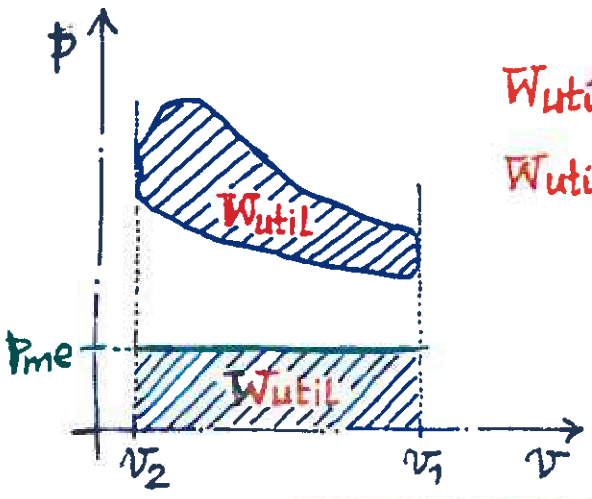
razão de combustão a pressão constante: $r_{cp} = \frac{v_4}{v_3} = \frac{T_4}{T_3}$ ‖ **razão de combustão a volume constante:** $r_{cv} = \frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2}$

rendimento: $\eta_t = 1 - \frac{T_5 - T_1}{(T_3-T_2) - K(T_4-T_3)} = 1 - \frac{1}{r_v^{K-1}}\left[\frac{(r_{cp}^K * r_{cv}) - 1}{(r_{cv}-1) + K * r_{cv}(r_{cp}-1)}\right]$

quando $r_{cv} \to 1 \Rightarrow \eta_{t,\text{DIESEL}}$
quando $r_{cp} \to 1 \Rightarrow \eta_{t,\text{OTTO}}$

---

pressão média efectiva (pme)



$W_{util} = pme\,(v_1 - v_2)$

$W_{util} = \eta_t * q_A$

$$pme = \frac{\eta_t \times q_A}{v_1 - v_2}$$

Menor pme → maior sensibilidade às irreversibilidades Internas
↳ MOTOR { MENOS COMPACTO / MAIOR DIMENSÃO

Notar que: $v_1 - v_2 = v_1\left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right) = v_1\left(1 - \frac{1}{r_v}\right)$

4.2 Num ciclo motor padrão a ar Otto o fluido está a 1,013 bar e 20°C no início da compressão isentrópica. A razão de compressão é de 9 e a pressão máxima do ciclo de 44 atm

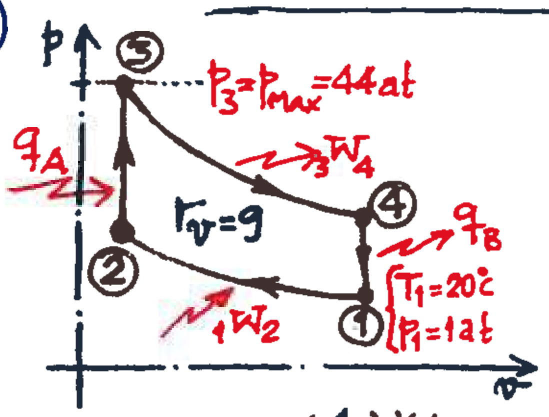
1/3

DIAS DE CASTRO

- a) Calcule o η_t deste ciclo;
- b) Considerando um ciclo Diesel com as mesmas condições iniciais (p_1 e T_1), a mesma pressão máxima (44atm) e o mesmo q_A, calcule o η_t;
- c) Repita finalmente os cálculos para um ciclo misto com idênticas condições iniciais (p_1 e T_1) a mesma pressão máxima (44atm) e o mesmo q_A sendo porém 50% recebido isométricamente e o restante isobáricamente;
- d) Qual dos três ciclos é o mais sensível a irreversibilidades? Justifique! Represente os três ciclos no diagrama T-s.

$$\left(Ar: K = \frac{C_p}{C_v} = \gamma = \frac{1005}{718} = 1,4\right)$$

a)



CICLO OTTO:

$$T_2 = T_1 \cdot r_v^{\gamma-1} = 293,15\,(9)^{0,4} = 705,97\,K$$

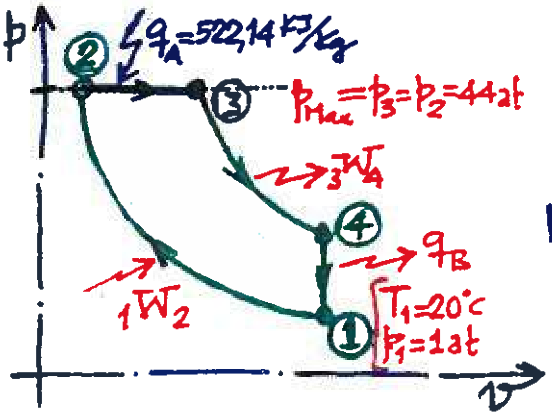
$$\frac{p_3 \cancel{v_3} = R T_3}{p_2 \cancel{v_2} = R T_2} \Rightarrow T_3 = \frac{p_3}{p_2} \cdot T_2 = \frac{44}{\boxed{21,67}} \cdot 705,97 = 1433,18\,K$$

$$\left(p_2 v_2^{\gamma} = p_1 v_1^{\gamma} \Rightarrow p_2 = p_1\, r_v^{\gamma} = 21,67\,at\right)$$

$$\eta_{t,otto} = 1 - \left(\frac{1}{r_v}\right)^{K-1} = 1 - \left(\frac{1}{9}\right)^{0,4} \Longrightarrow \eta_{t,otto} = 58,5\,\%$$

necessário nas alíneas seguintes : $\dot{Q}_A + \cancel{\dot{W}_A} = \Delta U = \dot{m}\, C_v (T_3 - T_2) \Rightarrow q_A = \frac{\dot{Q}_A}{\dot{m}} = C_v (T_3 - T_2) = 522,14\,kJ/kg$

b)



CICLO DIESEL (Mesmo estado inicial (p_1, T_1)
Mesma pressão máxima
Mesmo calor adicionado (q_A))

$$r_v = \frac{v_1}{v_2} = \underbrace{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1/K}}_{p_1 v_1^K = p_2 v_2^K} = \left(\frac{44}{1}\right)^{1/1,4} \Rightarrow r_v = 14,924$$

$$r_{cp} = \frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2} = \frac{1383,81}{864,27} \Longrightarrow r_{cp} = 1,6$$

$$T_2\, p_2^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_1\, p_1^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \Rightarrow T_2 = 293,15 \cdot \left(\frac{1}{44}\right)^{-0,4/1,4} \Rightarrow T_2 = 864,27\,K$$

$$q_A = C_p (T_3 - T_2) \Rightarrow T_3 = 864,27 + \frac{522,14}{1,005} \Rightarrow T_3 = 1383,81\,K$$

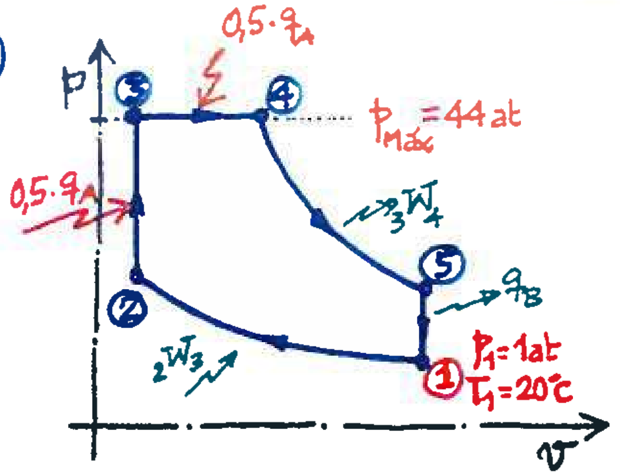
$$\eta_{t,diesel} = 1 - \frac{1}{(r_v)^{\gamma-1}} \left[\frac{r_{cp}^{\gamma} - 1}{\gamma (r_{cp} - 1)}\right] \Longrightarrow \eta_{t,diesel} = 62,5\,\%$$

6.3.2

CICLO MISTO

Mesmo estado inicial (p_1, T_1)
Mesma pressão máxima (44 at)
Mesmo calor adicionado $\left(q_A \begin{cases} 50\% \text{ em } (2\text{-}3) \\ 50\% \text{ em } (3\text{-}4) \end{cases}\right)$

c)



$$\eta_{t,misto} = 1 - \frac{1}{(r_v)^{\gamma-1}}\left[\frac{(r_{cp}^{\gamma} \cdot r_{cv}) - 1}{(r_{cv}-1) + \gamma \cdot r_{cv}(r_{cp}-1)}\right]$$

$$\eta_{t,misto} = 61{,}3\%$$

- $r_v = \frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} = 11{,}34$
- $r_{cv} = \frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2} = 1{,}47$ // $r_{cp} = \frac{v_4}{v_3} = \frac{T_4}{T_3} = 1{,}23$

→ Cálculo das temperaturas:

$\rightarrow \begin{matrix} p_2 v_2 = R T_2 \\ p_3 v_3 = R T_3 \end{matrix} \longrightarrow T_2 = T_3 \cdot \frac{p_2}{p_3}$

$\rightarrow T_2 \, p_2^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_1 \, p_1^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \rightarrow T_2 = T_1 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{-\frac{0{,}4}{1{,}4}}$

$\rightarrow 0{,}5 \cdot q_A = C_v (T_3 - T_2) \rightarrow T_2 = T_3 - \frac{0{,}5 \cdot q_A}{C_v}$

3 eq ↔ 3 incógnitas

$T_2 = 774{,}24$ K
$T_3 = 1137{,}85$ K
$p_2 = \cdots$

$\rightarrow 0{,}5 \cdot q_A = C_p (T_4 - T_3) \rightarrow T_4 = 1137{,}85 + \frac{0{,}5 \times 522{,}14}{1{,}005} \rightarrow T_4 = 1397{,}62$ K

d) $pme = \frac{W_{útil}}{v_1 - v_2} = \frac{\eta_t \times q_A}{v_1\left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right)} \Rightarrow pme = \frac{\eta_t \times q_A}{v_1\left(1 - \frac{1}{r_v}\right)}$

$\begin{cases} \cdot\ v_1 = \frac{R T_1}{p_1} = \frac{0{,}287 \times 293{,}15}{1{,}013 \cdot 10^2} = 0{,}8297 \text{ m}^3/\text{Kg} \\ \cdot\ q_A = 522{,}14 \text{ KJ/Kg (ver alínea a))} \end{cases}$ // Têm o mesmo valor em todos os ciclos

$$\boxed{pme = \frac{522{,}14 \times \eta_t}{0{,}8297\left(1 - \frac{1}{r_v}\right)}}$$

OTTO $\begin{cases} \eta_t = 58{,}5\% \\ r_v = 9 \end{cases} \rightarrow (pme)_{OTTO} = 414{,}02$ kPa

+ SENSível a IrreversiB.

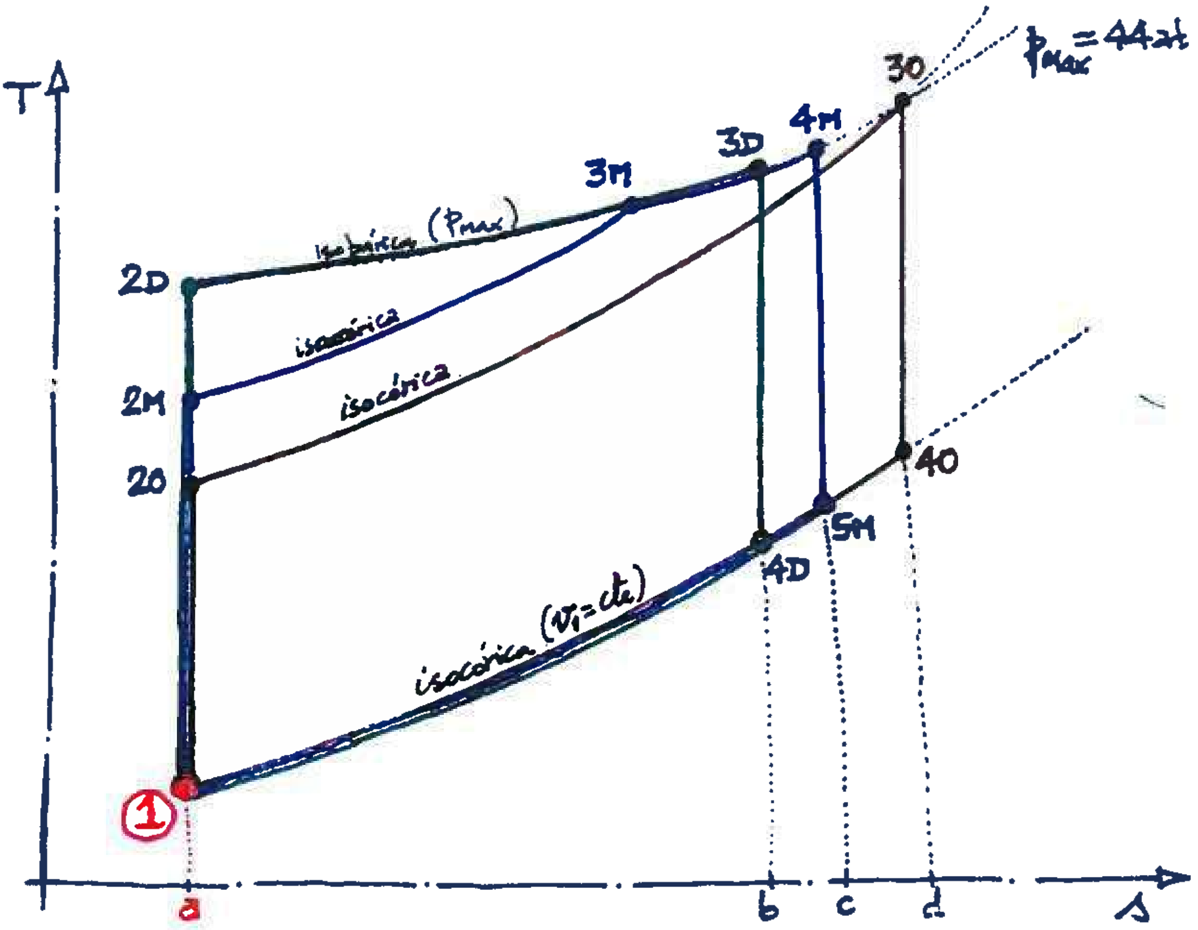
DIESEL $\begin{cases} \eta_t = 62{,}5\% \\ r_v = 14{,}924 \end{cases} \rightarrow (pme)_{Diesel} = 420{,}9$ kPa

MISTO $\begin{cases} \eta_t = 61{,}3\% \\ r_v = 11{,}34\% \end{cases} \rightarrow (pme)_{MISTO} = 423{,}2$ kPa

6.3.2 d)
3/3

DIAS DE CASTRO

ciclos	①		②		③		④		⑤	
	T (K)	p (at)	T (K)	p (at)	T (K)	p (at)	T (K)	p (at)	T (K)	p (at)
OTTO	293,15	1	705,97	21,67	1435,18	44	595,12		—	—
DIESEL	293,15	1	864,27	44	1383,81	44	566,25		—	—
MISTO	293,15	1	774,24		1137,85	44	1397,62	44	574,55	



- Mesma quantidade de calor trocada com a Fonte Quente:

$$q_A = [a, 2D, 3D, b, a] = [a, 2M, 3M, 4M, c, a] = [a, 2O, 3O, d, a]$$

- Quantidade de calor rejeitada:

$$q_B = [a, 1, 4D, b, a] < [a, 1, 5M, c, a] < [a, 1, 4O, d, a]$$

como:

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_B|}{|q_A|}$$

$$\boxed{\eta_D > \eta_M > \eta_O}$$

- Mesmas condições iniciais (T_1, p_1)
- Mesma pressão Máxima
- Mesma quantidade de calor (q_A)

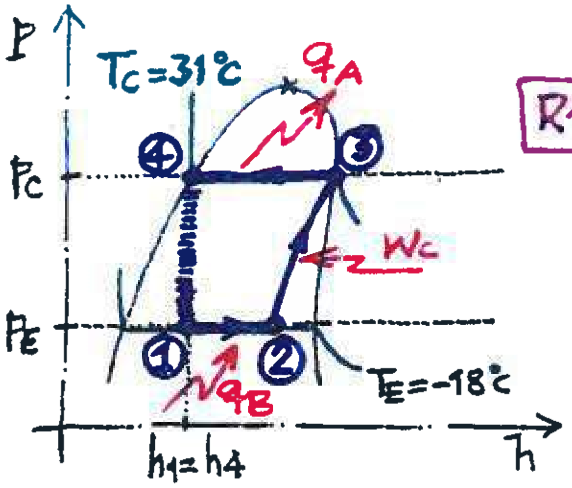
ex 3.1

1/1

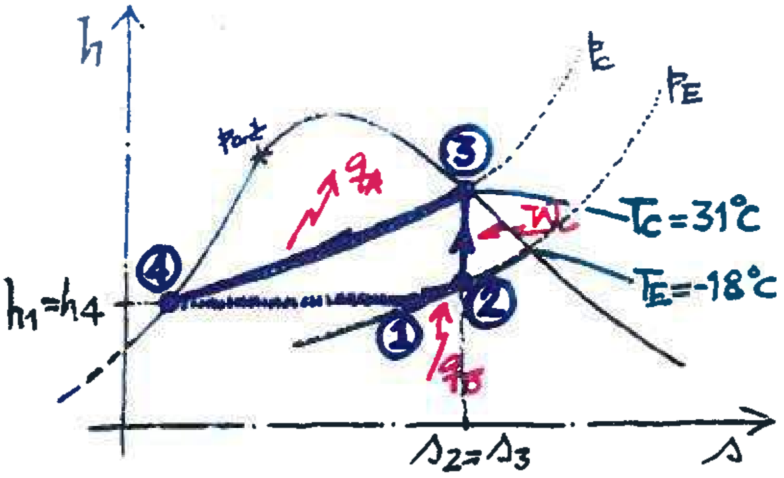
Dias de Castro

[illegible]

Qual será a eficiência de uma bomba de calor funcionando segundo o mesmo ciclo?
Represente o ciclo nos diagramas p-h e T-s.



R12



R12 = Freon 12 (CF_2CL_2) : Tabelas VAPOR SATURADO : pág. 192–195
dicloro difluor de metano　Tabelas V Sobreaq. + LC : pág. 207–216

i) Efeito frigorífico

$$q_B=h_2-h_1$$

$$q_B=111{,}167\ kJ/kg$$

$$\begin{cases} h_1=h_4=h'_{(31°C)}=448{,}867\ kJ/kg \\ h_2=h'+x_2(h''-h')_{(-18°C)}=560{,}034\ kJ/kg \\ x_2=\dfrac{s_2-s'}{s''-s'}=96{,}9\% \leftarrow s_2=s_3=s''_{(31°C)}=4{,}7437\ kJ/kgK \end{cases}$$

ii) $$COP_{MF}=CCT_{MF}=\frac{|q_B|}{|W_C|}=\frac{111{,}167}{26{,}788}=4{,}15$$

$$W_C=h_3-h_2=h''_{(31°C)}-h_2=586{,}822-560{,}034=26{,}788\ kJ/kg$$

iii) Rendimento frigorífico:

$$\eta_f=\frac{COP_{MF}}{(COP_{MF})_{Carnot}}=\frac{COP_{MF}}{\frac{T_B}{T_A-T_B}}\cong\frac{COP_{MF}}{\frac{T_E}{T_C-T_E}}=\frac{4{,}15}{\frac{255{,}15}{304{,}15-255{,}15}}=\frac{4{,}15}{5{,}21}=79{,}7$$

iv) Nas mesmas condições operacionais:

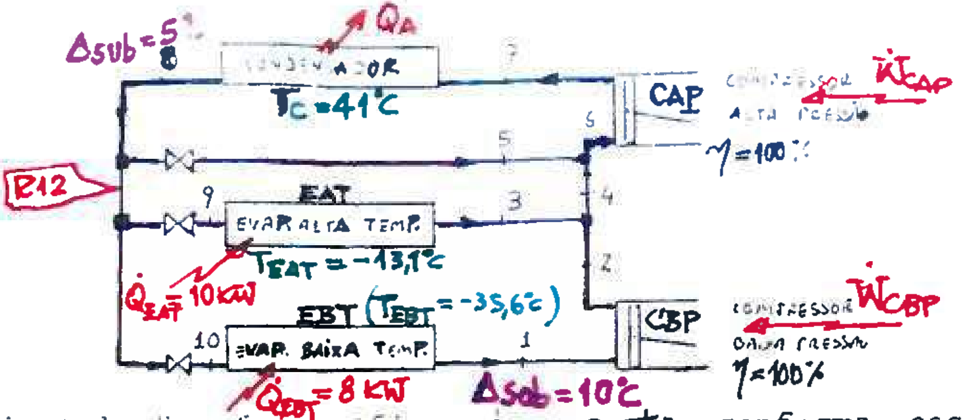
$$COP_{BC}=COP_{MF}+1 \longrightarrow COP_{BC}=5{,}15$$

$= 4{,}15+1$

5 3.6

1/2

DIAS de CASTRO



Uma instalação frigorífica é composta conforme esquema junto e funciona com R-12, sendo os compressores isentrópicos. Sabe-se que à entrada do compressor de baixa pressão o R-12 está sobreaquecido de 10ºC (sobreaquecimento útil), que à saída do evaporador de alta temperatura está saturado e que entra no compressor de alta pressão também em vapor saturado. À saída do condensador o R-12 tem 5ºC de sub-arrefecimento.

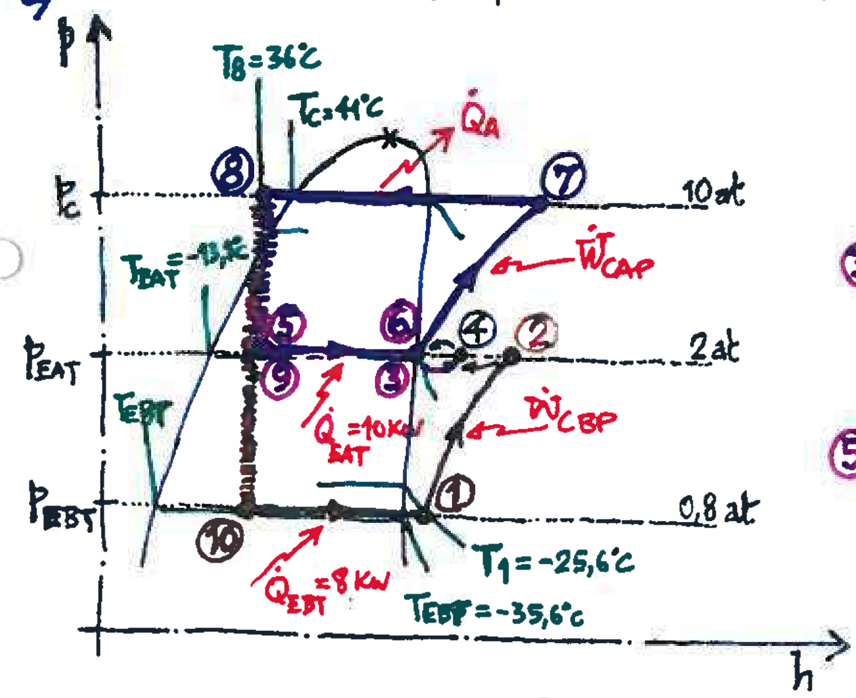
Sabendo que as temperaturas de evaporação são respectivamente -35,6ºC e -13,1ºC, que a temperatura de condensação é de 41ºC, e que as energias retiradas nos evaporadores de alta e baixa temperatura são respectivamente 10kW e 8kW:

a) Represente no diagrama p-h o funcionamento da instalação marcando os pontos respectivos em correspondência com o esquema junto;

b) Calcule o caudal de frigorisénio que passa no condensador;

c) Calcule o coeficiente de comportamento térmico da instalação (eficiência).

a)



① $\begin{cases} h_1 = 561,988 \text{ KJ/Kg} \\ s_1 = 4,7992 \text{ KJ/Kg K} \end{cases}$

② $\{ h_2 = 578,083 \text{ KJ/Kg}$

③=⑥ $\begin{cases} h_3 = h_6 = 567,345 \text{ KJ/Kg} \\ s_3 = s_6 = 4,7603 \text{ KJ/Kg K} \end{cases}$

④ $\{ h_4 = 572,246 \text{ KJ/Kg}$

⑤=⑨ $\{ h_5 = h_9 = h_8 = 453,975 \text{ KJ/Kg}$

⑧ $\{ h_8 = h'_{(T_8 = 36°C)} = 453,975 \text{ KJ/Kg}$

⑦ $\{ h_7 = 596,669 \text{ KJ/Kg}$

⑩ $\{ h_{10} = h_8 = 453,975 \text{ KJ/Kg}$

$\Delta sob = T_1 - T_{EBT} = 10°C \longrightarrow T_1 = -25,6°C$

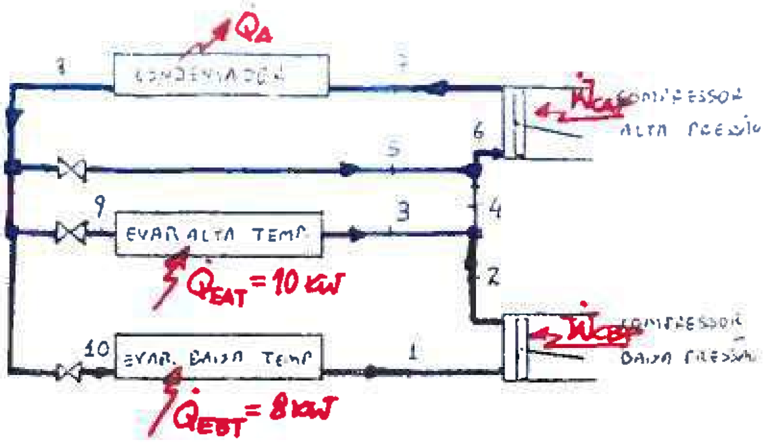
$\Delta sub = T_C - T_8 = 5°C \longrightarrow T_8 = 36°C$

b) $\dot{m}_{Cond} = \dot{m}_6 = \dot{m}_7 = \dot{m}_8 = 169,3 \text{ gr/s}$ $\begin{cases} \dot{m}_9 = \dot{m}_3 = 88,21 \text{ gr/s} \\ \dot{m}_{10} = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = 74,07 \text{ gr/s} \end{cases}$ $\Big\rangle$ $\dot{m}_4 = 162,28 \text{ gr/s}$; $\dot{m}_5 = \dot{m}_6 - \dot{m}_4$

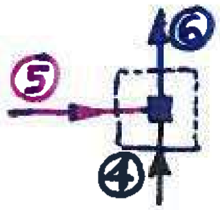
c) $(COP)_{MF} = (CCT)_{MF} = 2,92$

6.4.6
2/2

Dias de Castro



b)



$$\dot{m}_{Cond} = \dot{m}_6 = \dot{m}_4 + \dot{m}_5$$

$$\cancel{\dot{Q}} + \cancel{\dot{W}} + \dot{m}_6 h_6 = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_4 h_4$$

$$\dot{m}_{Cond} = \frac{h_4 - h_5}{h_6 - h_5} \cdot \dot{m}_4$$

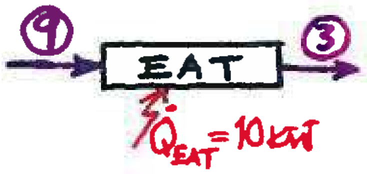
$$\dot{m}_{cond} = 0{,}1693 \text{ kg/s}$$

bi) Cálculo de $\dot{m}_4$ e h_4

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 = 0{,}07407 + 0{,}08821 = 0{,}16228 \text{ kg/s}$$

$$\cancel{\dot{Q}} + \cancel{\dot{W}} + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 \Rightarrow h_4 = \frac{\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3}{\dot{m}_4} = 572{,}246 \text{ kJ/kg}$$

bii) Cálculo de $\dot{m}_2$ e $\dot{m}_3$



$$\dot{Q}_{EAT} + \cancel{\dot{W}} + \dot{m}_3 h_9 = \dot{m}_3 h_3$$

$$\dot{m}_3 = \frac{|\dot{Q}_{EAT}|}{|h_3 - h_9|} = \frac{10}{|567{,}345 - 453{,}975|} = 0{,}08821 \text{ kg/s}$$

$$\dot{Q}_{EBT} + \cancel{\dot{W}} + \dot{m}_2 h_{10} = \dot{m}_2 h_1$$

$$\dot{m}_2 = \frac{|\dot{Q}_{EBT}|}{|h_1 - h_{10}|} = \frac{8}{|561{,}988 - 453{,}975|} = 0{,}07407 \text{ kg/s}$$

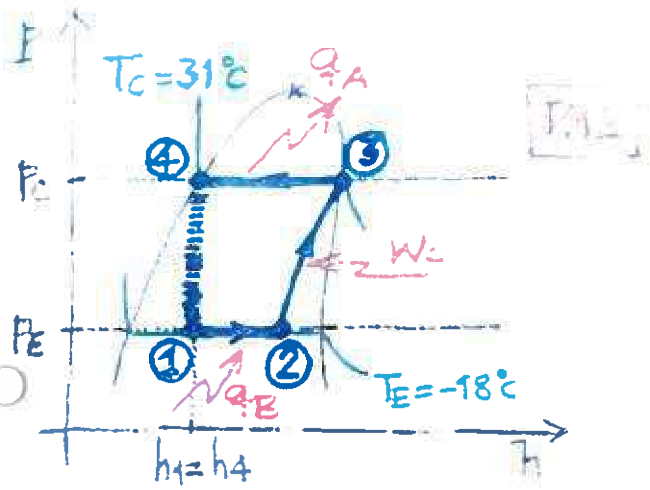
c)

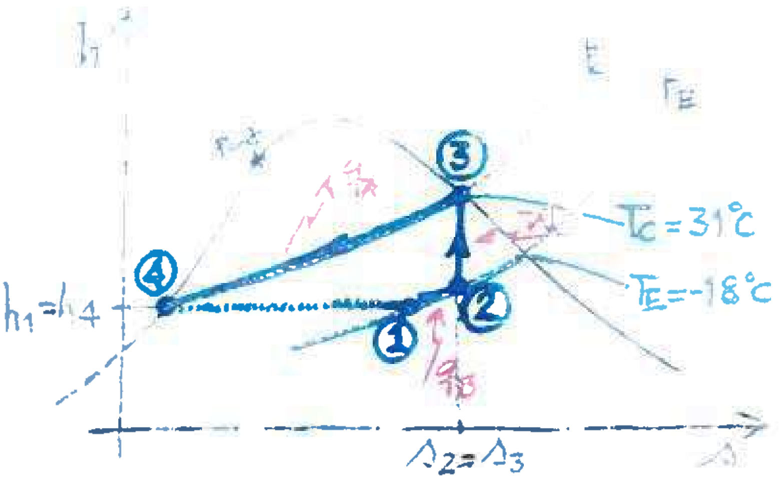
$$COP_{MF} = \frac{\dot{Q}_B}{\dot{W}_C} = \frac{|\dot{Q}_{EBT}| + |\dot{Q}_{EAT}|}{|\dot{W}_{CBP}| + |\dot{W}_{CAP}|} = \frac{|\dot{Q}_{EBT}| + |\dot{Q}_{EAT}|}{|\dot{m}_2 (h_2 - h_1)| + |\dot{m}_6 (h_7 - h_6)|}$$

$$COP_{MF} = \frac{8 + 10}{|0{,}07407 (578{,}083 - 561{,}988)| + |0{,}1693 (596{,}669 - 567{,}345)|}$$

$$COP_{MF} = 2{,}924$$

DIAS de CASTRO





R 12 = Freon 12 (CF_2Cl_2) dicloro difluor de metano : Tabelas VAPOR SATURADO : pág. 192–195
Tabelas V Sobreaq. + LC : pág. 207–216

---

i) Efeito frigorífico

$$q_B=h_2-h_1$$

$q_B=111,167$ kJ/kg

$h_1=h_4=h'_{(31°C)}=448,867$ kJ/kg

$h_2=h'+x_2(h''-h')_{(-18°C)}=560,034$ kJ/kg

$x_2=\frac{s_2-s'}{s''-s'}=95,9\%$ ⇐ $s_2=s_3=s''_{(31°C)}=4,7437$ kJ/kgK

ii) $COP_{MF}=CCT_{MF}=\frac{|q_B|}{|W_c|}=\frac{111,167}{26,788}=4,15$

$W_c=h_3-h_2=h''_{(31°C)}-h_2=586,822-560,034=26,788$ kJ/kg

iii) Rendimento frigorífico :

$$\eta_f=\frac{COP_{MF}}{(COP_{MF})_{Carnot}}=\frac{COP_{MF}}{\frac{T_B}{T_A-T_B}}=\frac{COP_{MF}}{\frac{T_E}{T_C-T_E}}=\frac{4,15}{\frac{255,15}{304,15-255,15}}=\frac{4,15}{5,21}=[illegible]$$

iv) Nas mesmas condições operacionais :

$COP_{BC}=COP_{MF}+1$

CAP5

MISTURAS GASOSAS

fracção molar $$\bar{X}_i = \frac{\text{nº Moles do Elemento i}}{\text{nº Moles da Mistura}} = \frac{n_i}{n} = \frac{p_i}{p}$$

$$\bar{X}_i \cong Y_i$$

NUMERICAMENTE IGUAIS

fracção volúmica $$Y_i = \frac{\text{Volume do Elemento i}}{\text{Volume da Mistura}} = \frac{V_i}{V}$$

fracção mássica $$Z_i = \frac{\text{Massa do Elemento i}}{\text{Massa da Mistura}} = \frac{m_i}{m} = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}} = \frac{\bar{X}_i M_i}{\sum \bar{X}_i M_i} = \bar{X}_i \frac{M_i}{M}$$

Massa da Mistura $$m = \sum m_i = \sum n_i M_i = \cancel{\sum} n_{mist} M_{mist}$$

Massa Molecular Aparente da Mistura $$M = \sum \bar{X}_i M_i = \frac{\bar{R}}{R} = \frac{8314.3}{R} \quad (kg/kmol)$$

Constante Particular da Mistura $$R = \sum Z_i R_i = \frac{\bar{R}}{M} = \frac{8314.3}{M} = c_p - c_v \quad (J/kg.K)$$

Calores Específicos da Mistura

$$\bar{c}_p = \sum \bar{X}_i \bar{c}_{p,i} = c_p M \quad (J/kmol.\,K)$$

$$\bar{c}_v = \sum \bar{X}_i \bar{c}_{v,i} = c_v M \quad (J/kmol.\,K)$$

$$c_p = \sum Z_i c_{p,i} = \frac{\bar{c}_p}{M} = \sum \frac{m_i}{m} c_{p,i} = \sum \frac{\bar{X}_i M_i}{M} c_{p,i} \quad (J/kg.\,K)$$

$$c_v = \sum Z_i c_{v,i} = \frac{\bar{c}_v}{M} = \sum \frac{m_i}{m} c_{v,i} = \sum \frac{\bar{X}_i M_i}{M} c_{v,i} \quad (J/kg.\,K)$$

Constante Adiabática de uma Mistura $$\gamma = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_v} = \frac{c_p}{c_v}$$

Tabelas Termodinâmicas:

R	→	[illegible]	[illegible]		
c_p	→	[illegible]	c_{pm}	=	[illegible]
c_v	→	[illegible]	c_{vm}	=	[illegible]
$\bar{c}_p$	→	[illegible]	$\bar{c}_{pm}$	=	[illegible]
$\bar{c}_v$	→	[illegible]	$\bar{c}_{vm}$	=	[illegible]

Caps Misturas Gasosas

Cálculo do Calor Específico

$$\bar{c}_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (kJ/kmol.K)$$

T [illegible] a b c d

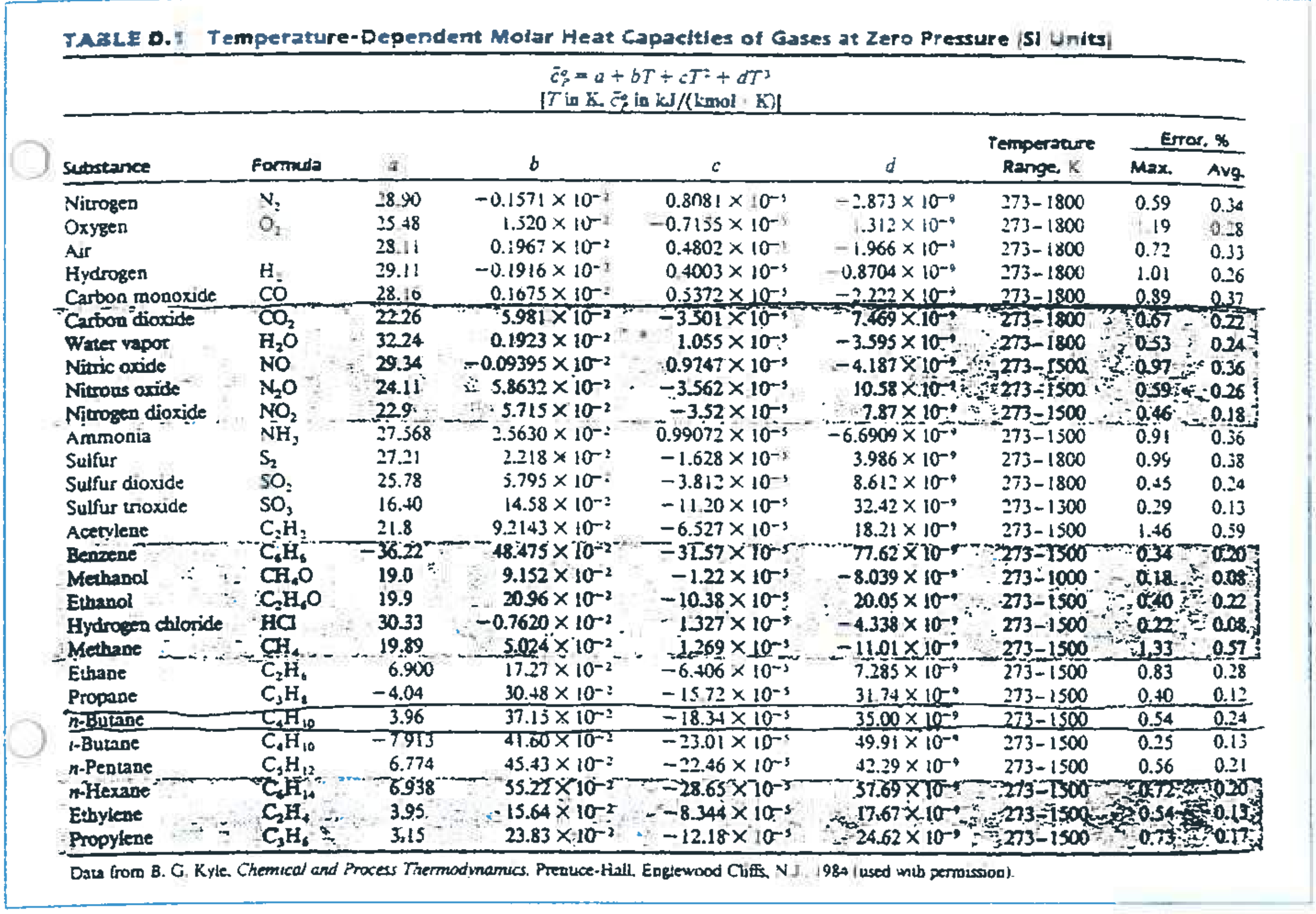


TABLE D.1 Temperature-Dependent Molar Heat Capacities of Gases at Zero Pressure (SI Units)

$$\bar{c}_p^\circ = a + bT + cT^2 + dT^3$$
[T in K, $\bar{c}_p^\circ$ in kJ/(kmol · K)]

Substance	Formula	a	b	c	d	Temperature Range, K	Error, % Max.	Avg.
Nitrogen	N_2	28.90	-0.1571×10^{-2}	0.8081×10^{-5}	-2.873×10^{-9}	273–1800	0.59	0.34
Oxygen	O_2	25.48	1.520×10^{-2}	-0.7155×10^{-5}	1.312×10^{-9}	273–1800	1.19	0.28
Air		28.11	0.1967×10^{-2}	0.4802×10^{-5}	-1.966×10^{-9}	273–1800	0.72	0.33
Hydrogen	H_2	29.11	-0.1916×10^{-2}	0.4003×10^{-5}	-0.8704×10^{-9}	273–1800	1.01	0.26
Carbon monoxide	CO	28.16	0.1675×10^{-2}	0.5372×10^{-5}	-2.222×10^{-9}	273–1800	0.89	0.37
Carbon dioxide	CO_2	22.26	5.981×10^{-2}	-3.501×10^{-5}	7.469×10^{-9}	273–1800	0.67	0.22
Water vapor	H_2O	32.24	0.1923×10^{-2}	1.055×10^{-5}	-3.595×10^{-9}	273–1800	0.53	0.24
Nitric oxide	NO	29.34	-0.09395×10^{-2}	0.9747×10^{-5}	-4.187×10^{-9}	273–1500	0.97	0.36
Nitrous oxide	N_2O	24.11	5.8632×10^{-2}	-3.562×10^{-5}	10.58×10^{-9}	273–1500	0.59	0.26
Nitrogen dioxide	NO_2	22.9	5.715×10^{-2}	-3.52×10^{-5}	7.87×10^{-9}	273–1500	0.46	0.18
Ammonia	NH_3	27.568	2.5630×10^{-2}	0.99072×10^{-5}	-6.6909×10^{-9}	273–1500	0.91	0.36
Sulfur	S_2	27.21	2.218×10^{-2}	-1.628×10^{-5}	3.986×10^{-9}	273–1800	0.99	0.38
Sulfur dioxide	SO_2	25.78	5.795×10^{-2}	-3.812×10^{-5}	8.612×10^{-9}	273–1800	0.45	0.24
Sulfur trioxide	SO_3	16.40	14.58×10^{-2}	-11.20×10^{-5}	32.42×10^{-9}	273–1300	0.29	0.13
Acetylene	C_2H_2	21.8	9.2143×10^{-2}	-6.527×10^{-5}	18.21×10^{-9}	273–1500	1.46	0.59
Benzene	C_6H_6	−36.22	48.475×10^{-2}	-31.57×10^{-5}	77.62×10^{-9}	273–1500	0.34	0.20
Methanol	CH_4O	19.0	9.152×10^{-2}	-1.22×10^{-5}	-8.039×10^{-9}	273–1000	0.18	0.08
Ethanol	C_2H_6O	19.9	20.96×10^{-2}	-10.38×10^{-5}	20.05×10^{-9}	273–1500	0.40	0.22
Hydrogen chloride	HCl	30.33	-0.7620×10^{-2}	1.327×10^{-5}	-4.338×10^{-9}	273–1500	0.22	0.08
Methane	CH_4	19.89	5.024×10^{-2}	1.269×10^{-5}	-11.01×10^{-9}	273–1500	1.33	0.57
Ethane	C_2H_6	6.900	17.27×10^{-2}	-6.406×10^{-5}	7.285×10^{-9}	273–1500	0.83	0.28
Propane	C_3H_8	−4.04	30.48×10^{-2}	-15.72×10^{-5}	31.74×10^{-9}	273–1500	0.40	0.12
n-Butane	C_4H_{10}	3.96	37.15×10^{-2}	-18.34×10^{-5}	35.00×10^{-9}	273–1500	0.54	0.24
i-Butane	C_4H_{10}	−7.913	41.60×10^{-2}	-23.01×10^{-5}	49.91×10^{-9}	273–1500	0.25	0.13
n-Pentane	C_5H_{12}	6.774	45.43×10^{-2}	-22.46×10^{-5}	42.29×10^{-9}	273–1500	0.56	0.21
n-Hexane	C_6H_{14}	6.938	55.22×10^{-2}	-28.65×10^{-5}	57.69×10^{-9}	273–1500	0.72	0.20
Ethylene	C_2H_4	3.95	15.64×10^{-2}	-8.344×10^{-5}	17.67×10^{-9}	273–1500	0.54	0.13
Propylene	C_3H_6	3.15	23.83×10^{-2}	-12.18×10^{-5}	24.62×10^{-9}	273–1500	0.73	0.17

Data from B. G. Kyle, *Chemical and Process Thermodynamics*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1984 (used with permission).

Lei de Gibbs-Dalton:

$$m = \sum_{i=1}^{N} m_i \qquad \frac{1}{v} = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{1}{v_i} \right) \qquad \rho = \sum_{i=1}^{N} \rho_i \qquad p = \sum_{i=1}^{N} p_i$$

$$U = \sum_{i=1}^{N} U_i = \sum_{i=1}^{N} m_i u_i \qquad H = \sum_{i=1}^{N} H_i = \sum_{i=1}^{N} m_i h_i \qquad S = \sum_{i=1}^{N} S_i = \sum_{i=1}^{N} m_i s_i$$

Lei de Amagat-Leduc:

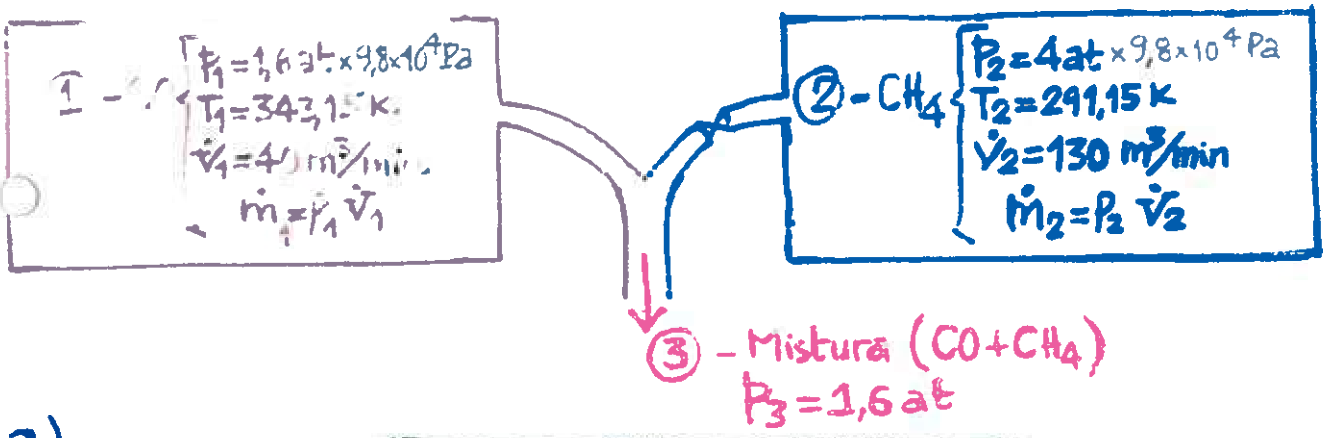
$$V = \sum_{i=1}^{N} V_{i(p,T)}$$

(ATENÇÃO ÀS CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO DESTAS LEIS)

2157

DIAS de CASTRO

1/2



$1 - CO \begin{cases} P_1 = 1,6\ at \times 9,8\times10^4\ Pa \\ T_1 = 343,15\ K \\ \dot{V}_1 = 40\ m^3/min \\ \dot{m}_1 = \rho_1 \dot{V}_1 \end{cases}$

$② - CH_4 \begin{cases} P_2 = 4\ at \times 9,8\times10^4\ Pa \\ T_2 = 291,15\ K \\ \dot{V}_2 = 130\ m^3/min \\ \dot{m}_2 = \rho_2 \dot{V}_2 \end{cases}$

③ – Mistura $(CO + CH_4)$

$P_3 = 1,6\ at$

a) $Y_i = ?\quad (=\bar{X}_i)$

$$\boxed{\begin{gathered} Z_i = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{mist}} = \frac{\bar{X}_i M_i}{M_{mist}} \\ M_{mist} = \frac{\bar{R}}{R} = \frac{\bar{R}}{\sum Z_i R_i} = \frac{8314,3}{\sum \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{mist}} \times \frac{\bar{R}}{M_i}} \end{gathered}}$$

$$Y_i = \bar{X}_i = \frac{8314,3\ \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{mist}}}{M_i \sum \left(\frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{mist}} \cdot \frac{8314,3}{M_i} \right)}$$

sendo $i = CO;\ CH_4$

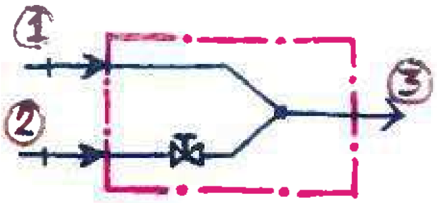
- $\underline{M_i}$: $M_{CO} = 12 + 16 = 28\ Kg/kmol$; $M_{CH_4} = 12 + 4 = 16\ Kg/kmol$
- $\underline{R_i}$: $R_{CO} = 296,945\ J/kg\,K$; $R_{CH_4} = 518,772\ J/kg\,K$ (tab TMD pág 251)
- $\dot{m}_i = \rho_i \dot{V}_i = \frac{P_i}{R_i T_i} \dot{V}_i \implies \dot{m}_{CO} = 1,026\ kg/s$; $\dot{m}_{CH_4} = 5,623\ kg/s$
- $\dot{m}_{Mist} = \dot{m}_{CO} + \dot{m}_{CH_4} = 6,649\ kg/s$
- $\sum \left(\frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{mist}} \times \frac{8314,3}{M_i} \right) = \frac{1,026}{6,649} \times \frac{8314,3}{28} + \frac{5,623}{6,649} \times \frac{8314,3}{16} = 484,5\ J/kg\,K$
- $\begin{cases} \bar{X}_{CO} = 0,095 \\ \bar{X}_{CH_4} = 0,905 \end{cases} \implies \begin{matrix} Y_{CO} = 9,5\ \% \\ Y_{CH_4} = 90,5\ \% \end{matrix}$ (em volume)

7.7

2/2

Dias de CASTRO

b)



$T_3 = ?$

Mist. Adiabática

$$\cancel{\dot{Q}} + \dot{W} + \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2)\, h_3$$

$$\dot{m}_1 (h_3 - h_1) + \dot{m}_2 (h_3 - h_2) = 0$$

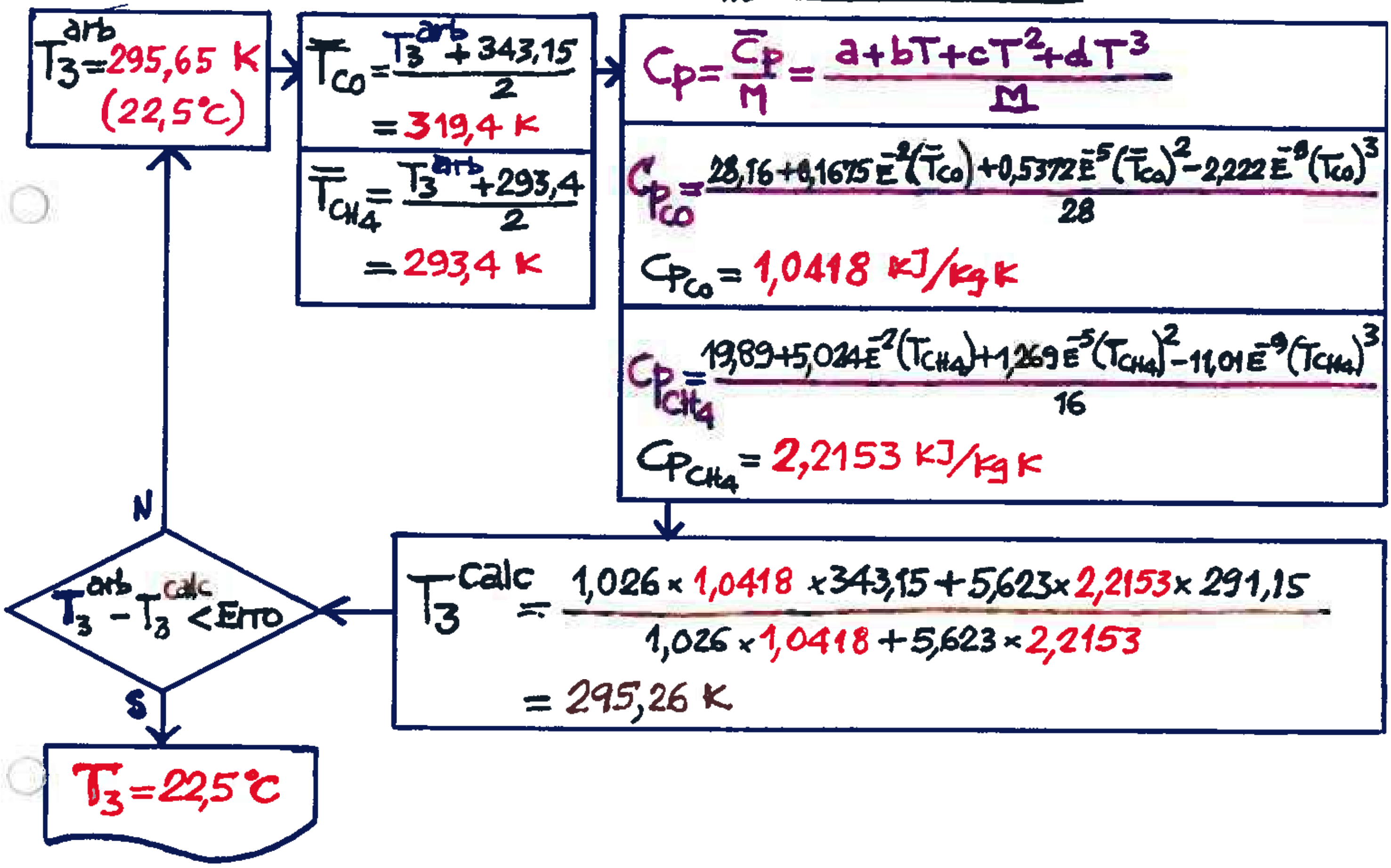
gás perfeito

$$\dot{m}_1 c_{p_{CO}} (T_3 - T_1) + \dot{m}_2 c_{p_{CH_4}} (T_3 - T_1) = 0$$

$$T_3 = \frac{\dot{m}_1 c_{p_{CO}} T_1 + \dot{m}_2 c_{p_{CH_4}} T_2}{\dot{m}_1 c_{p_{CO}} + \dot{m}_2 c_{p_{CH_4}}}$$

$\dot{m}_1 = \dot{m}_{CO} = 1{,}026$ kg/s ; $T_1 = 343{,}15$ K

$\dot{m}_2 = \dot{m}_{CH_4} = 5{,}623$ kg/s ; $T_2 = 291{,}15$ K



$T_3^{arb} = 295{,}65$ K (22,5°C)

$\bar{T}_{CO} = \dfrac{T_3^{arb} + 343{,}15}{2} = 319{,}4$ K

$\bar{T}_{CH_4} = \dfrac{T_3^{arb} + 293{,}4}{2} = 293{,}4$ K

$c_p = \dfrac{\bar{c}_p}{M} = \dfrac{a + bT + cT^2 + dT^3}{M}$

$c_{p_{CO}} = \dfrac{28{,}16 + 0{,}1675\,E^{-2}(\bar{T}_{CO}) + 0{,}5372\,E^{-5}(\bar{T}_{CO})^2 - 2{,}222\,E^{-9}(\bar{T}_{CO})^3}{28}$

$c_{p_{CO}} = 1{,}0418$ kJ/kg K

$c_{p_{CH_4}} = \dfrac{19{,}89 + 5{,}024\,E^{-2}(T_{CH_4}) + 1{,}269\,E^{-5}(T_{CH_4})^2 - 11{,}01\,E^{-9}(T_{CH_4})^3}{16}$

$c_{p_{CH_4}} = 2{,}2153$ kJ/kg K

$T_3^{calc} = \dfrac{1{,}026 \times 1{,}0418 \times 343{,}15 + 5{,}623 \times 2{,}2153 \times 291{,}15}{1{,}026 \times 1{,}0418 + 5{,}623 \times 2{,}2153} = 295{,}26$ K

$T_3^{arb} - T_3^{calc} < \text{Erro}$

N

S

$T_3 = 22{,}5$ °C

e) $\Delta S_{CO} = \dot{m}_{CO} \left[c_{p_{CO}} \cdot \ln \dfrac{T_3}{T_1} - R_{CO} \ln \dfrac{p_{3,CO}}{p_1} \right]$ (CO ≡ gás perfeito)

$\dot{m}_{CO} = 1{,}026$ kg/s

$c_{p_{CO}} = 1{,}0418$ kJ/kg K

$R_{CO} = 296{,}945 \times 10^{-3}$ kJ/kg K

$T_3 = 295{,}65$ K

$T_1 = 343{,}15$ K

$p_1 = 1{,}6$ at $= p_{3,\text{mistura}}$

$$\bar{x}_{CO} = \frac{p_{3,CO}}{p_{mist}} \rightarrow p_{3,CO} = \bar{x}_{CO} \cdot p_{3,mist} = 0{,}095 \times 1{,}6 \text{ at}$$

$$\Delta S_{CO} = 1{,}026 \left[1{,}0418 \cdot \ln \frac{295{,}65}{343{,}15} - 0{,}296495 \cdot \ln \frac{0{,}095 \times 1{,}6}{1{,}6} \right] = 0{,}56 \text{ kW/K}$$

CAP 6→ PSICROMETRIA

COMPOSIÇÃO DO AR: ⇒ **AR = AR SECO + VAPOR DE ÁGUA**

É composto por:

N2	78,0840%
O2	20,9476%
Argon	0,9340%
CO2	0,0314%
OUTROS (Neon, Hélio, ...)	0,0030%

PODE EXISTIR NOS TRÊS ESTADOS: SÓLIDO, LÍQUIDO ou GASOSO

Nas condições normais de pressão e temperatura:

M_a = 28,9645 kg/kmole
R_a = 287,055 J/kg.k
Cp_a = 1005 J/kg.k

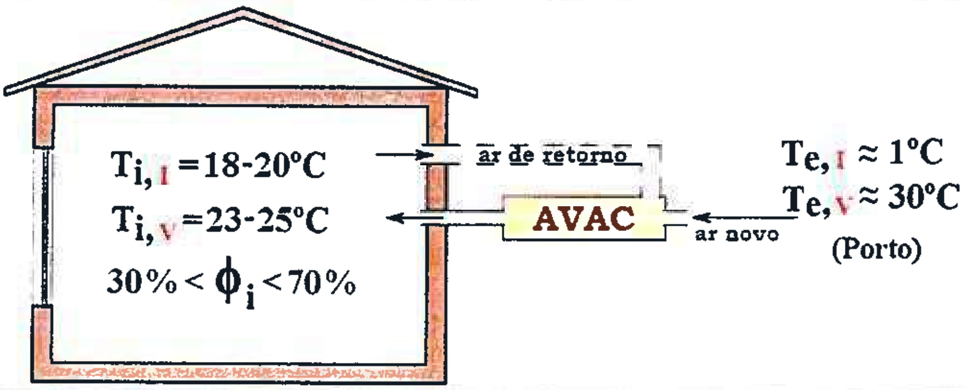
M_v = 18,01534 kg/kmole
R_v = 461,518 J/kg.k
Cp_v = 1,84 J/kg.k

OBJECTIVO:

Estudo das propriedades termodinâmicas do ar com o objectivo generalizado de analisar os sucessivos estados do ar nos processos de:

- **AQUECIMENTO (com/sem humidificação)**
- **ARREFECIMENTO (com/sem desumidificação)**
- **CONTROLE DE HUMIDADE**

Associados aos **sistemas de climatização** (p. ex.: dos edifícios).



O sistema AVAC tem a função de tratar o ar, isto é proceder ao:

Aquecimento (sensível)

Aquecimento + Humidificação

Arrefecimento (sensível)

Arrefecimento + Desumidificação

Mistura de (2 ou +) correntes de ar

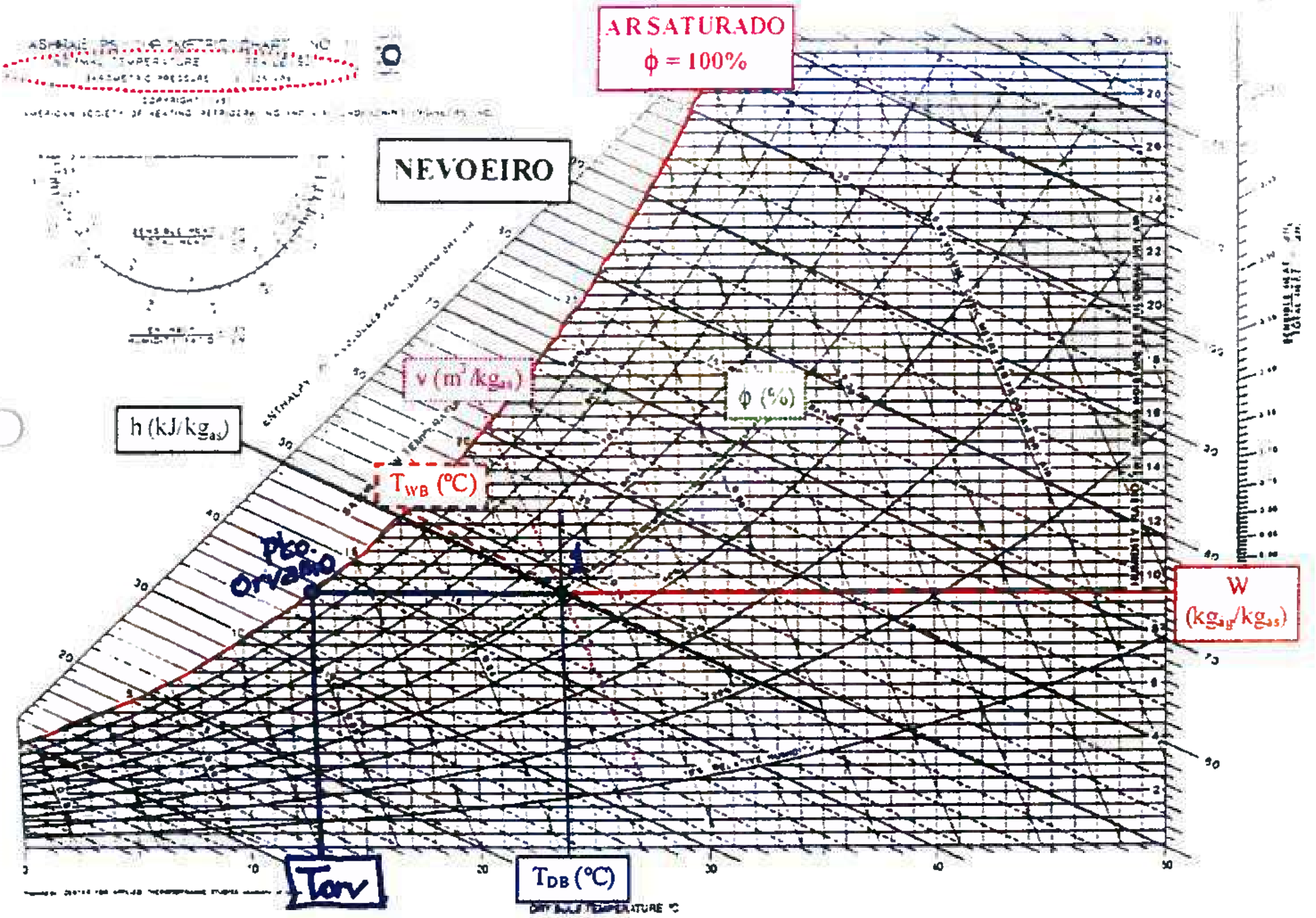
Ventilação

⇒ Consiste em tratar (adequar) as seguintes **variáveis**:

T (T_{db})	Temperatura de Bolbo Seco do ar [°C]
T_{wb}	Temperatura de Bolbo Húmido do ar [°C]
Φ	Humidade Relativa do ar [%]
⇒ W	Humidade Absoluta do ar [Kg_{ag}/kg_a]
$T_{orv}=T_d$	Temperatura de Orvalho do ar [°C]
h	Entalpia do ar [kJ/kg_a)]
v	Volume específico do ar [m^3/kg_a]

DIAGRAMAS PSICROMÉTRICOS:

As variáveis tratadas pelos sistemas AVAC estão "conjugadas" nos diagramas psicrométricos, de tal modo que, sabendo duas delas é possível determinar as restantes.



Os diagramas psicrométricos variam conforme a **pressão barométrica do ar** (mistura de ar seco + vapor de água). "Ao nível do mar", as pressões mais utilizadas na construção dos diagramas psicrométricos são:

- p = 1013,25 mbar = 101,325 kPa = 1,03323 at
- p = 1000 mbar = 100 kPa = 1,01972 at

DEFINIÇÃO ANALÍTICA DE ALGUMAS VARÁVEIS:

É possivel calcular algumas variáveis analiticamente, usando as expressões que se indicam a seguir:

Humidade relativa do ar

$$\phi = \frac{p_v\ (T)}{p_{v,\ sat}\ (T)} \qquad (\%)$$

DEFINIÇÃO ANALÍTICA DE ALGUMAS VARÁVEIS:

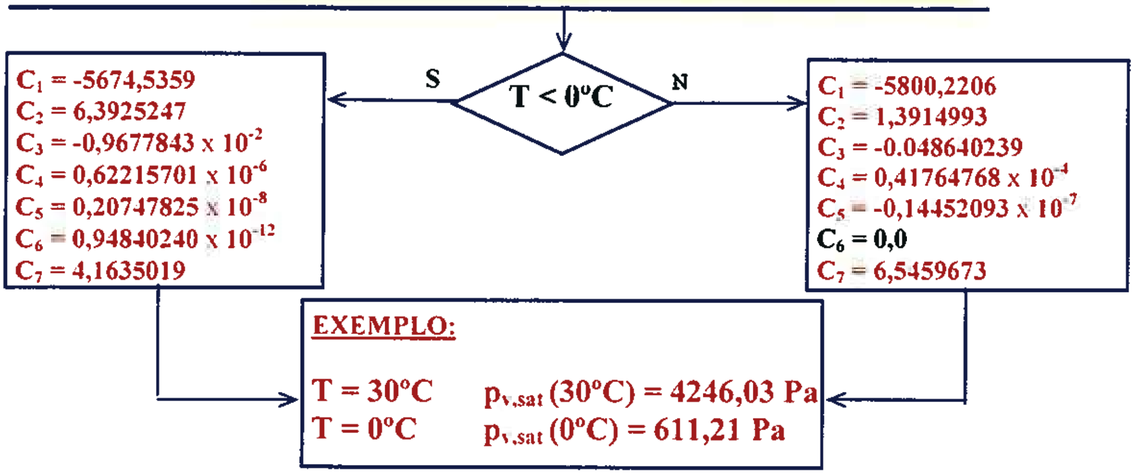
Humidade absoluta do ar

$$W = \frac{m_v}{m_a} = 0{,}622\,\frac{p_v\,(T)}{p - p_v\,(T)} \quad \left({kg_{água}}/{kg_{ar\ seco}} \right)$$

PRESSÃO DE SATURAÇÃO DO VAPOR DE ÁGUA À TEMPERATURA (T) DO AR:

$$p_{v,sat}(T) = EXP\left[\frac{C_1}{T} + C_2 + C_3 \cdot T + C_4 \cdot T^2 + C_5 \cdot T^3 + C_6 \cdot T^4 + C_7 \cdot Ln(T)\right]$$

[T] = K
[p] = Pa



$C_1 = -5674{,}5359$
$C_2 = 6{,}3925247$
$C_3 = -0{,}9677843 \times 10^{-2}$
$C_4 = 0{,}62215701 \times 10^{-6}$
$C_5 = 0{,}20747825 \times 10^{-8}$
$C_6 = 0{,}94840240 \times 10^{-12}$
$C_7 = 4{,}1635019$

$C_1 = -5800{,}2206$
$C_2 = 1{,}3914993$
$C_3 = -0.048640239$
$C_4 = 0{,}41764768 \times 10^{-4}$
$C_5 = -0{,}14452093 \times 10^{-7}$
$C_6 = 0{,}0$
$C_7 = 6{,}5459673$

EXEMPLO:

$T = 30°C$ $\quad p_{v,sat}\,(30°C) = 4246{,}03$ Pa
$T = 0°C$ $\quad p_{v,sat}\,(0°C) = 611{,}21$ Pa

Exemplo: Cálculo da pressão parcial do vapor a $T_1 = 30\,°C$ e $\phi_1 = 50\%$

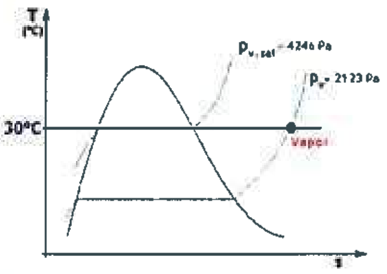
$$\phi_1 = \frac{p_v\,(T_1)}{p_{v,sat}\,(T_1)}$$

$$p_{v,T_1} = \phi_1 \times p_{v,sat,T_1}$$

Sendo:

$\phi_1 = 0{,}50$; $p_{v,sat,\,30°C} = 4246{,}03$ Pa ;

$$p_{v,T_1=30°C} = 2123 \text{ Pa}$$



Entalpia do Ar (húmido):

Soma das entalpias do AR SECO e do VAPOR de ÁGUA, referenciadas à mesma origem (geralmente é o Ar Seco a 0°C)

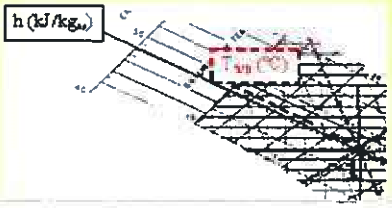
$$h = h_a + h_v$$

Ar seco: $h_a = c_{p_a} \times T$

Vapor Água: $h_v = c_{p_v} \times T + h_{lv}$

Entalpia do ar (húmido)

$$h = c_{p_a} \times T + W\left(c_{p_v} \times T + h_{lv}\right)$$



[h] = kJ/kg_a
[T] = °C
[Cp$_a$] = $kJ/kg_a.K$ (usar o valor Cp$_a$ = 1,005 $kJ/kg_a.K$)
[Cp$_v$] = $kJ/kg_v.K$ (usar o valor Cp$_v$ = 1,87 $kJ/kg_v.K$)
[h$_{lv}$] = kJ/kg_v (para T = 0°C, h$_{lv}$ = 2501 kJ/kg_v)
[W] = kg_v/kg_a

DEFINIÇÃO ANALÍTICA DE ALGUMAS VARÁVEIS:

Temperatura de Bolbo Húmido (T_{WB}):

É a temperatura de equilíbrio de uma superfície saturada de água, em contacto com o ar em movimento.

Ponto de Orvalho e Temperatura de Ponto de Orvalho (T_d) ou (T_{orv}):

Temperatura de Orvalho é a temperatura do ar que, para o mesmo teor em água (W), tem uma humidade relativa de 100% (AR SATURADO).

$$0°C \leq T \leq 70°C$$

$$\downarrow$$

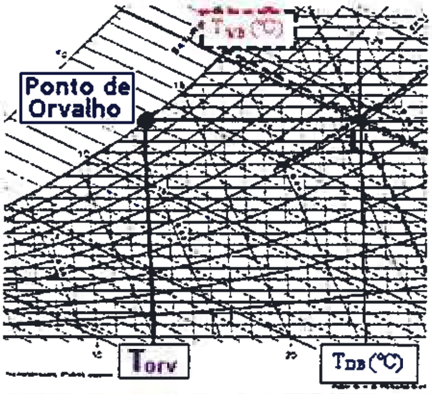
$$T_d = -35,957 - 1,8576 \text{ Ln}\left[p_v(T)\right] + 1,1689\left[p_v(T)\right]^2$$

$$-60°C \leq T < 0°C$$

$$\downarrow$$

$$T_d = -60,450 - 7,0322 \text{ Ln}\left[p_v(T)\right] + 0,3700\left[p_v(T)\right]^2$$

Nas expressões acima: $[T_d] = °C$ e $[p_v(T)] = kPa$



Massa de ar:

AR = AR SECO + VAPOR DE ÁGUA

Massa de ar seco

$$m_a = \frac{p_a V}{R_a T} = \frac{V}{R_a T}\left[p - \phi \times p_{v,sat}\right]$$

Massa de Vapor

$$m_v = \frac{p_v V}{R_v T} = \frac{V}{R_v T}\left[\phi \times p_{v,sat}\right]$$

Massa de ar (húmido)

$$m = m_a + m_v$$

$$m = \frac{V}{T}\left[\frac{p}{R_a} - \phi \cdot p_{v,sat}\left(\frac{1}{R_a} - \frac{1}{R_v}\right)\right]$$

m	Massa Total da Mistura (Ar Húmido)	(kg)
m_a	Massa de Ar Seco	(kg)
m_v	Massa de Vapor de Água	(kg)
p	Pressão da Mistura	(N/m²)
p_a	Pressão Parcial do Ar Seco	(N/m²)
p_v	Pressão Parcial do Vapor de Água	(N/m²)
$p_{v,\,sat}$	Pressão Parcial do Vapor Água Saturado à Temperatura da Mistura	(N/m²)
V	Volume Ocupado pelo Ar	(m³)
T	Temperatura do Ar	(K)
ϕ	Humidade Relativa do Ar	(%)

Massa de volúmica do ar (húmido):

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{T}\left[\frac{p}{R_a} - \phi \cdot p_{v,sat}\left(\frac{1}{R_a} - \frac{1}{R_v}\right)\right]$$

$$[\rho] = \left(\frac{kg_{ar\ húmido}}{m^3_{ar\ húmido}}\right)$$

Volume específico do ar (húmido):

$$v = \frac{V_{ar\ húmido}}{m_a} = \frac{1 - W}{\rho}$$

$$[v] = \left(\frac{m^3_{ar\ húmido}}{kg_{ar\ seco}}\right)$$

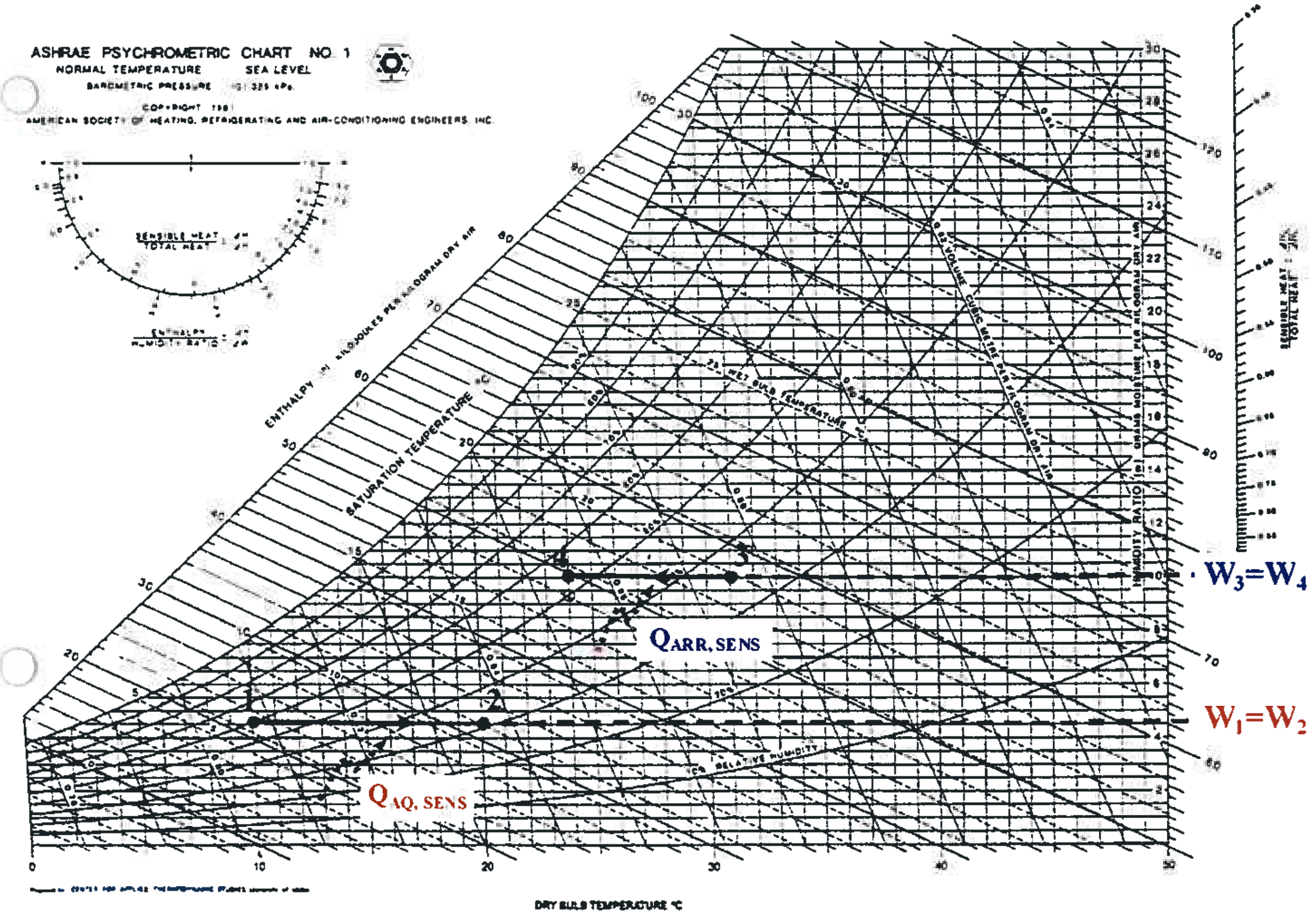
PROCESSOS PSICROMÉTRICOS:

O tratamento de ar envolve alguns processos psicrométricos. Os processos principais são:

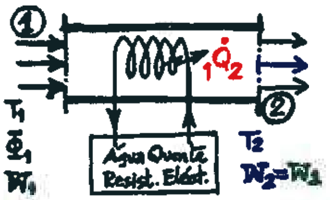
- ✧ **AQUECIMENTO SENSÍVEL**
- ✧ **ARREFECIMENTO SENSÍVEL**
- ✧ **AQUECIMENTO SENSÍVEL + HUMIDIFICAÇÃO**
- ✧ **ARREFECIMENTO SENSÍVEL + DESUMIDIFICAÇÃO**
- ✧ **MISTURA ADIABÁTICA DE DUAS MASSAS (CAUDAIS) DE AR**

O tratamento do ar pode exigir a combinação deste processos.

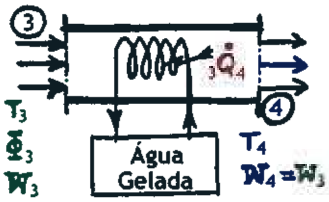
AQUECIMENTO E ARREFECIMENTO (SEM DESUMIDIFICAÇÃO) SENSÍVEIS



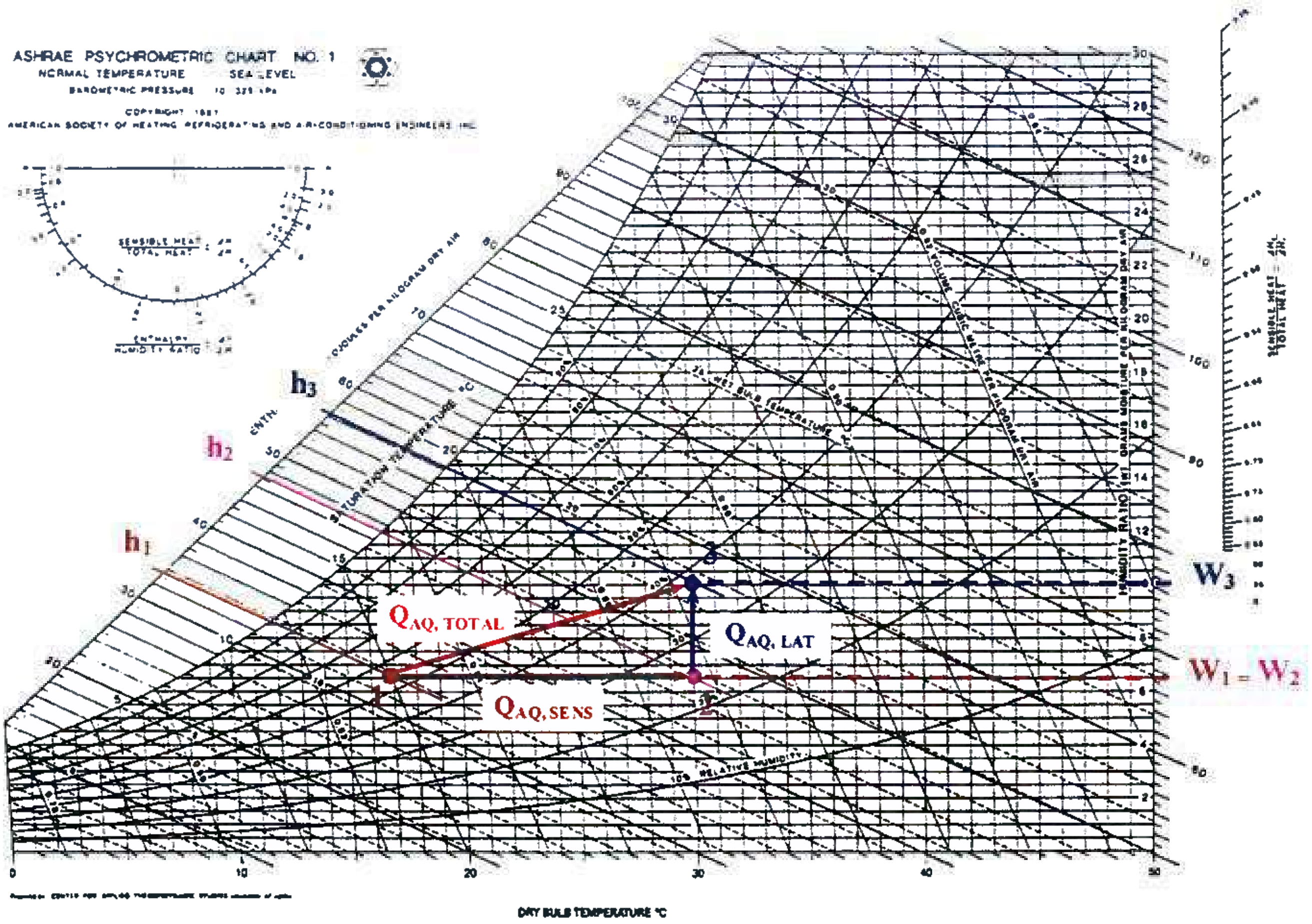
Aquec. Sensível: $q_{1-2} = \frac{\dot{Q}_{1-2}}{m_a} = h_2 - h_1$



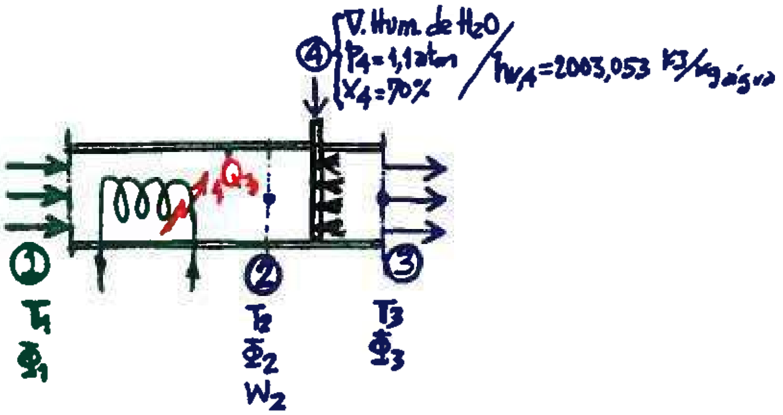
Arrefec. Sensível: $q_{3-4} = \frac{\dot{Q}_{3-4}}{m_a} = h_4 - h_3$



AQUECIMENTO E HUMIDIFICAÇÃO:

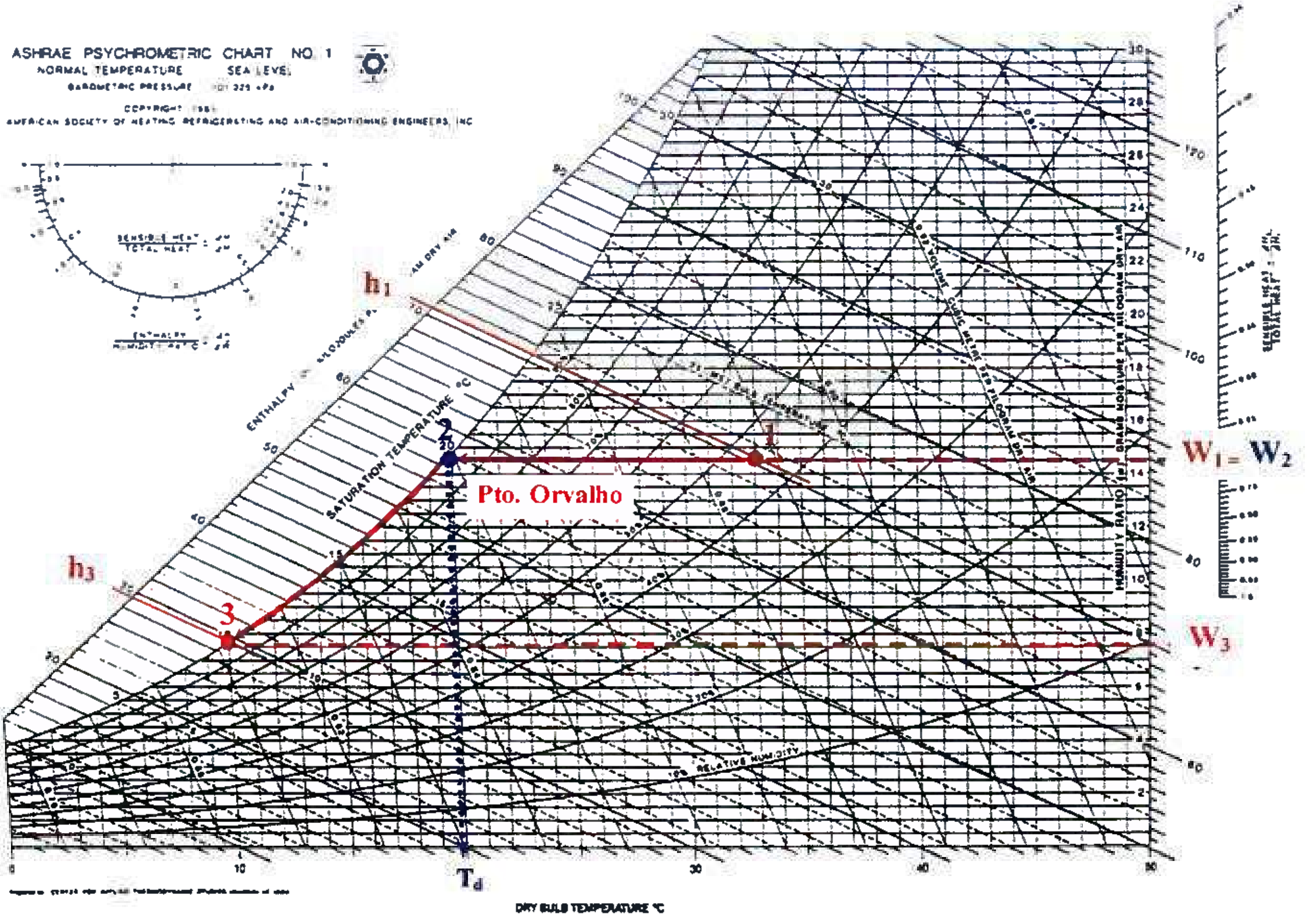


$$\frac{\dot{m}_{v,4}}{\dot{m}_a} = W_3 - W_2 \quad \text{e} \quad q_{1-3} = \frac{\dot{Q}_{1-3}}{\dot{m}_a} = h_3 - h_1 - (W_3 - W_1) \times h_{v,4}$$

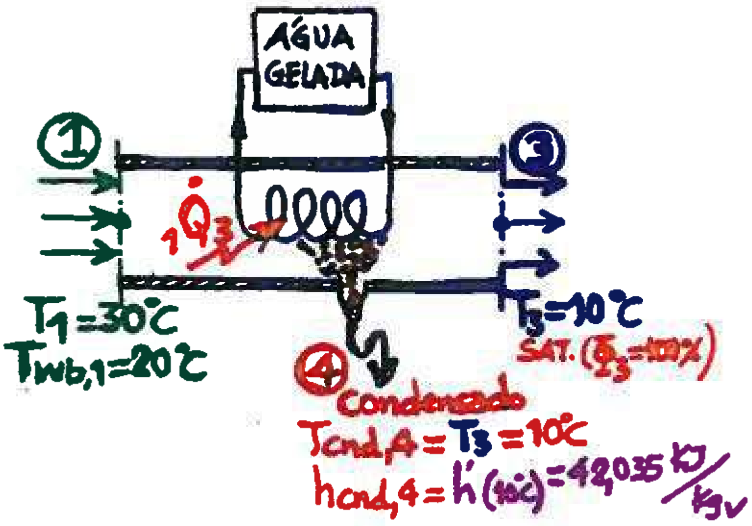


Nota: Esta não é a única forma de humidificação.

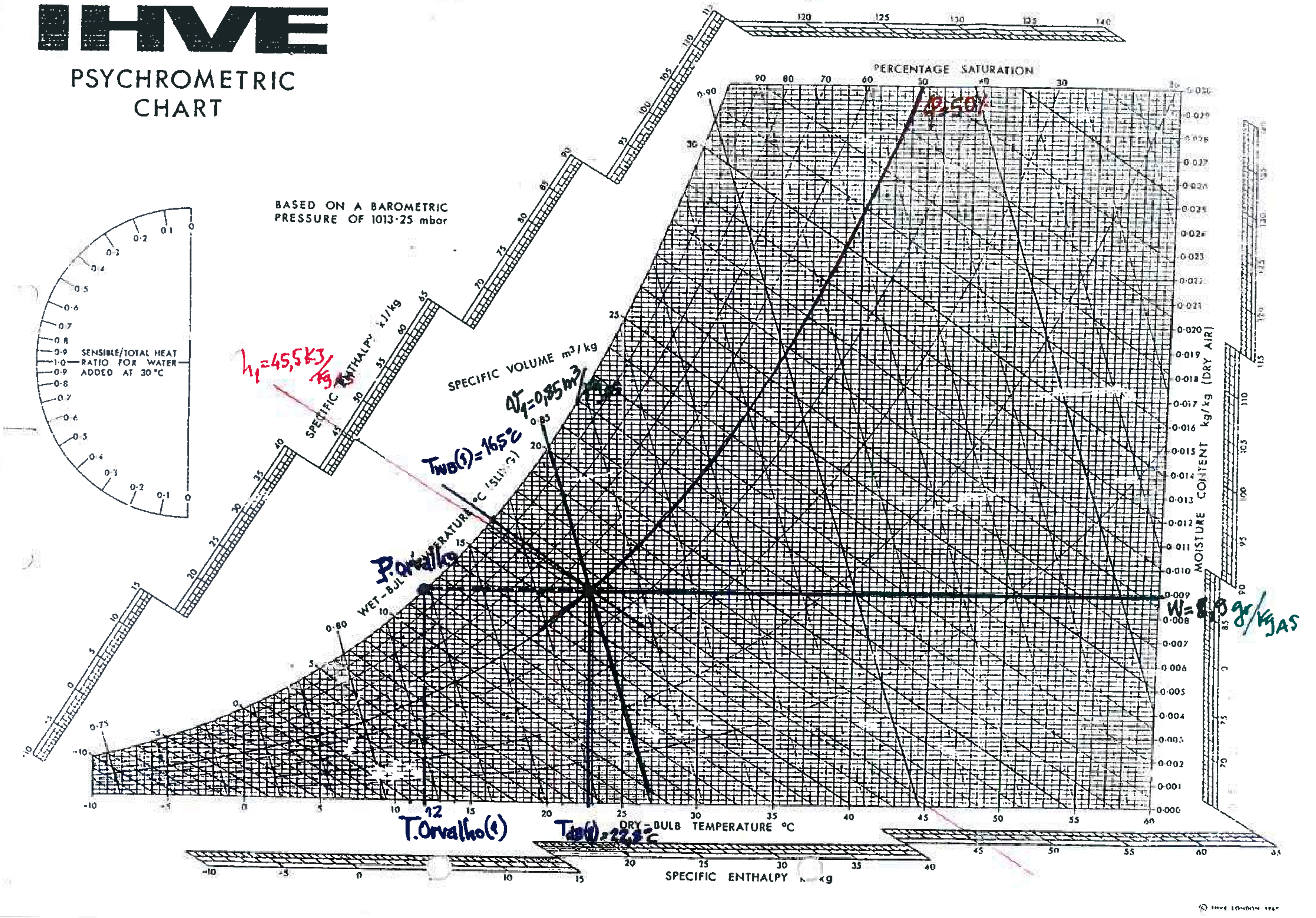
ARREFECIMENTO COM DESUMIDIFICAÇÃO:



$$\frac{m_{cnd,4}}{m_a} = W_1 - W_3 \quad \text{e} \quad q_{1-3} = \frac{\dot{Q}_{1-3}}{m_a} = h_3 - h_1 + (W_1 - W_3) \times h_{cnd,4}$$

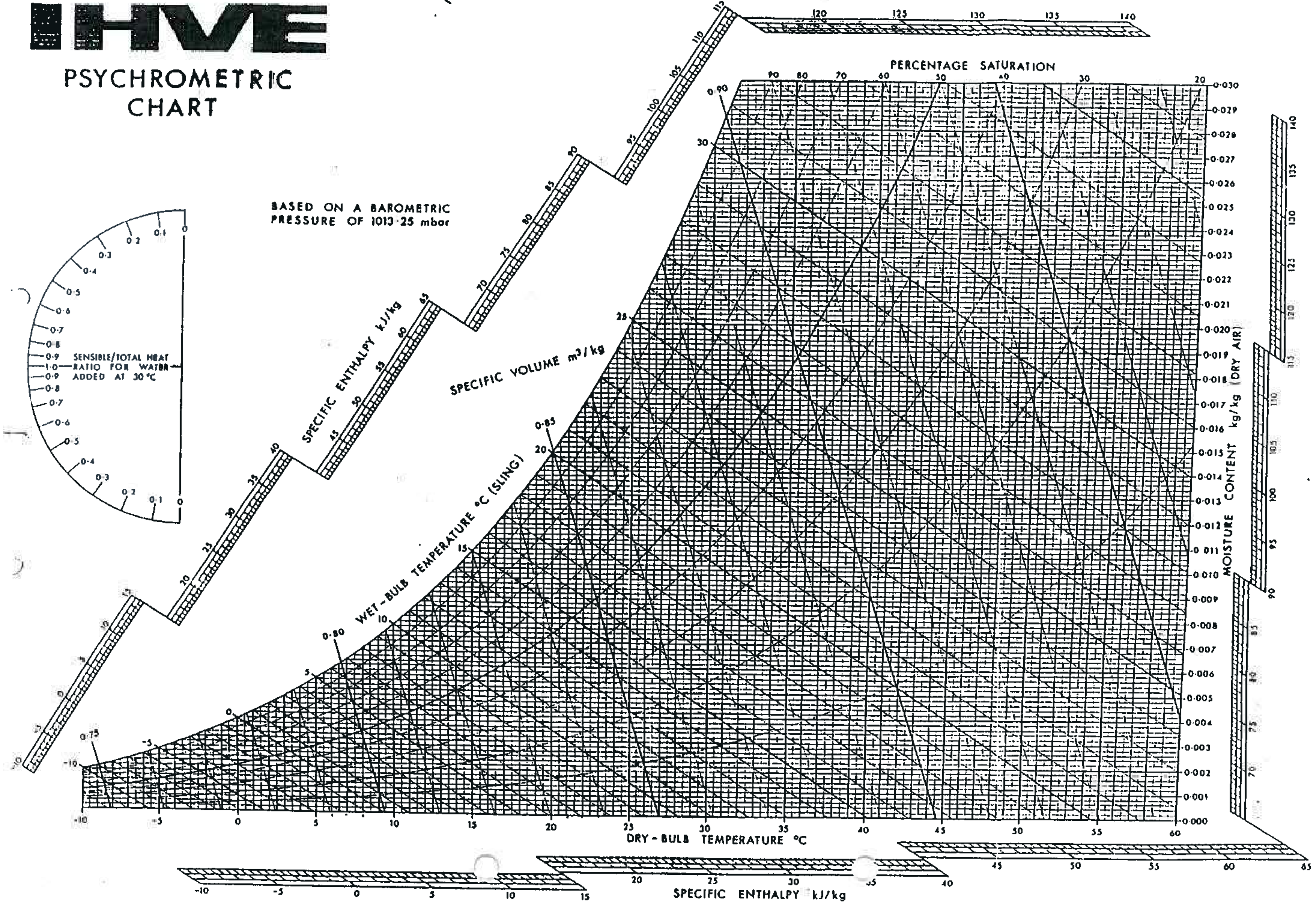


IHVE
PSYCHROMETRIC CHART



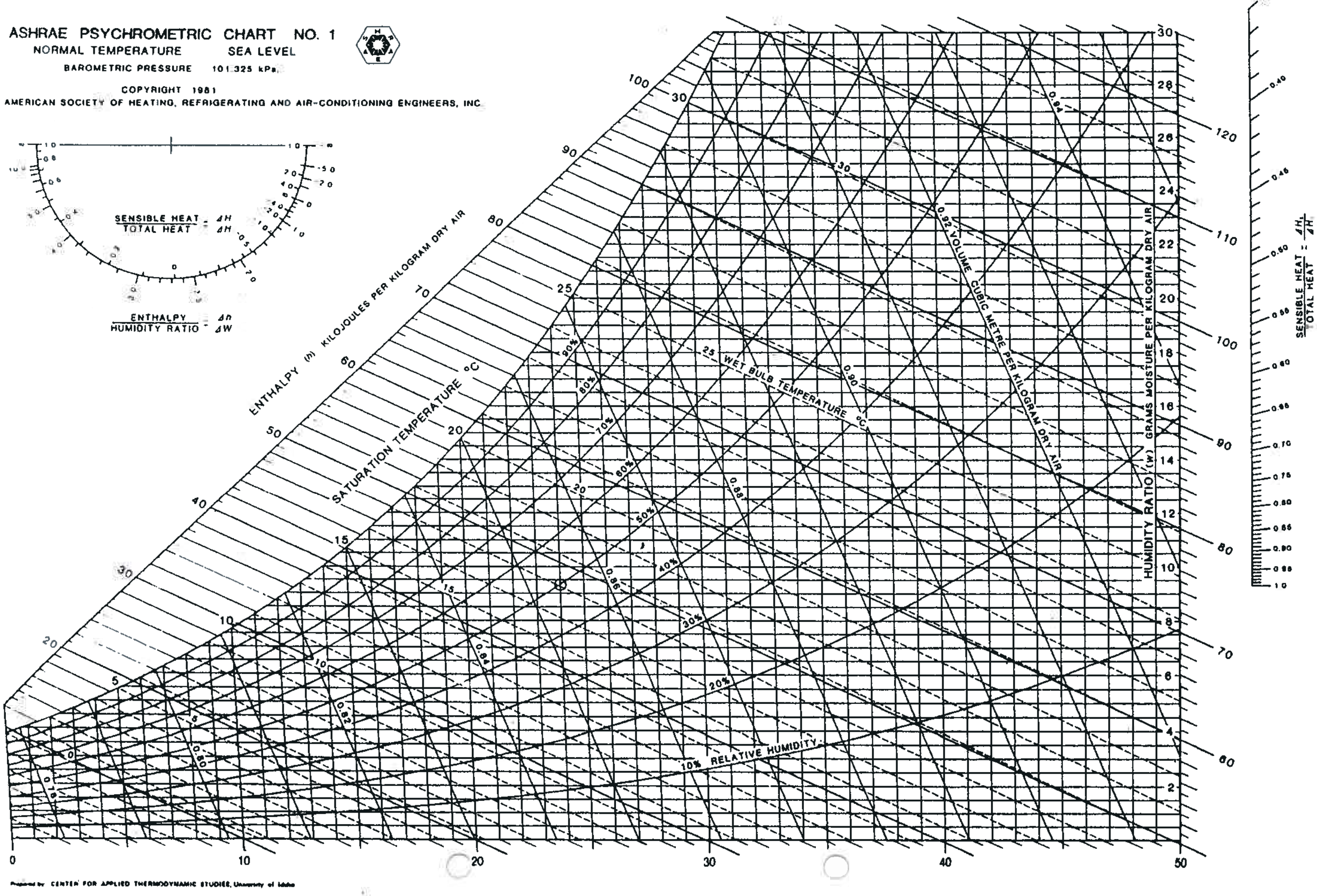
IHVE PSYCHROMETRIC CHART

BASED ON A BAROMETRIC PRESSURE OF 1013·25 mbar



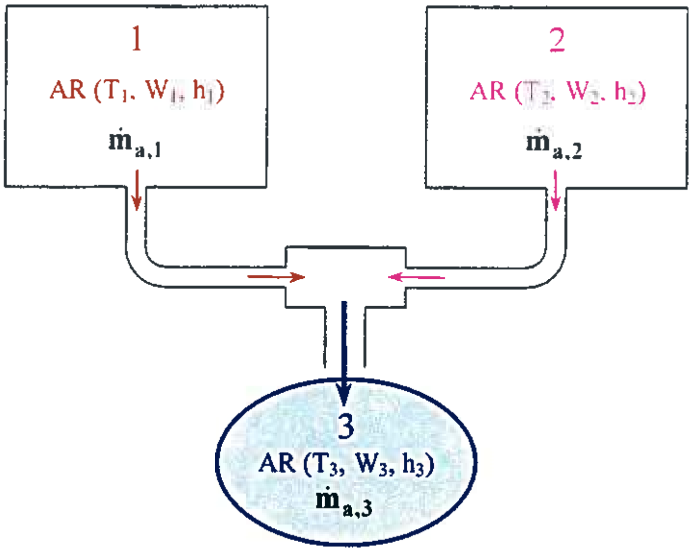
ASHRAE PSYCHROMETRIC CHART NO. 1

NORMAL TEMPERATURE SEA LEVEL
BAROMETRIC PRESSURE 101.325 kPa



Prepared by: CENTER FOR APPLIED THERMODYNAMIC STUDIES, University of Idaho

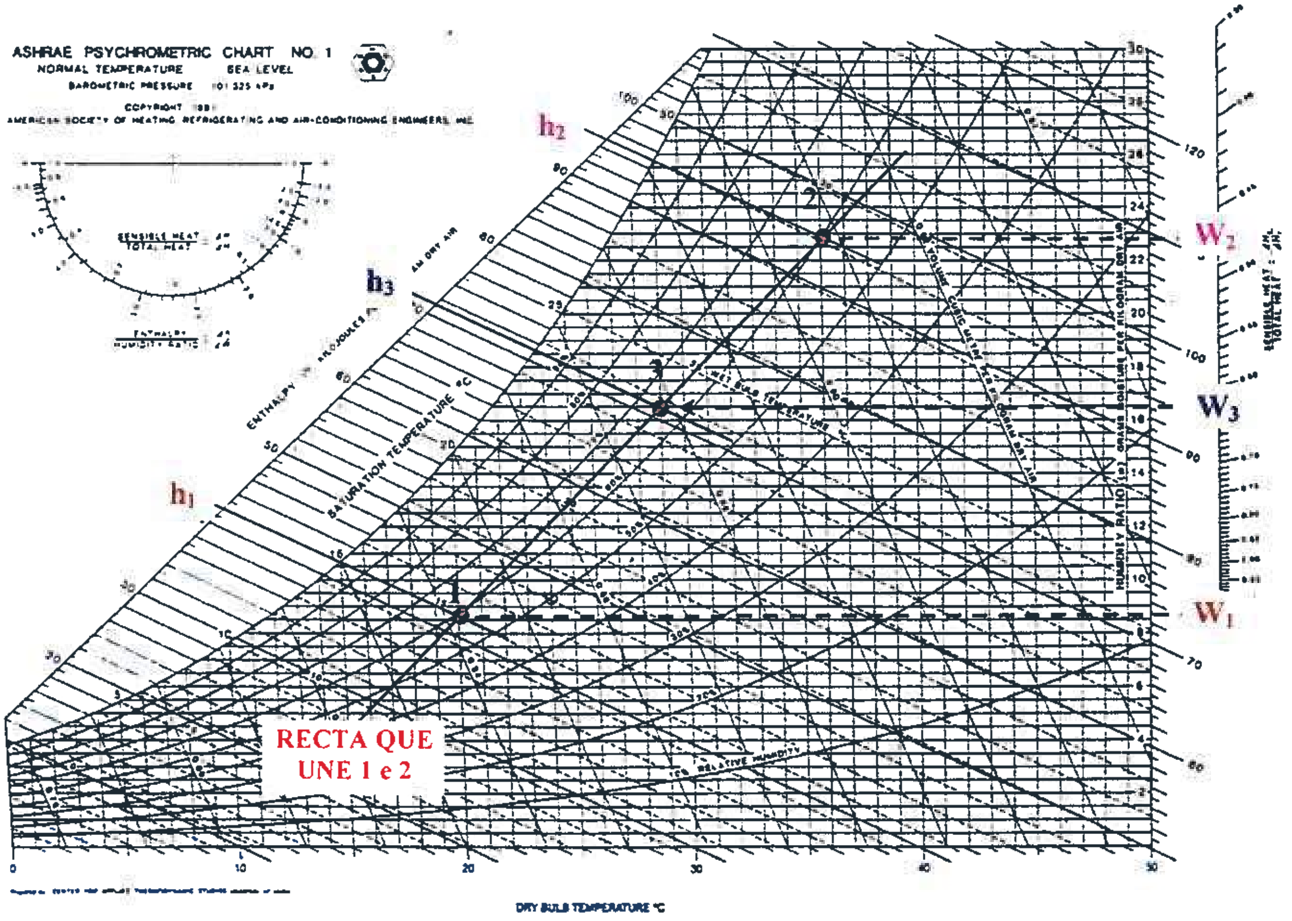
MISTURA ADIABÁTICA DE DUAS MASSAS DE AR:



No diagrama psicrométrico o estado da mistura **(3)** situa-se sobre a recta que une os pontos representativos dos estados **(1)** e **(2)**, e:

$$W_3 = \frac{\dot{m}_{a,1} W_1 + \dot{m}_{a,2} W_2}{\dot{m}_{a,1} + \dot{m}_{a,2}} \quad (\mathrm{kg/kg_{as}})$$

$$h_3 = \frac{\dot{m}_{a,1} h_1 + \dot{m}_{a,2} h_2}{\dot{m}_{a,1} + \dot{m}_{a,2}} \quad (\mathrm{kJ/kg_{as}})$$



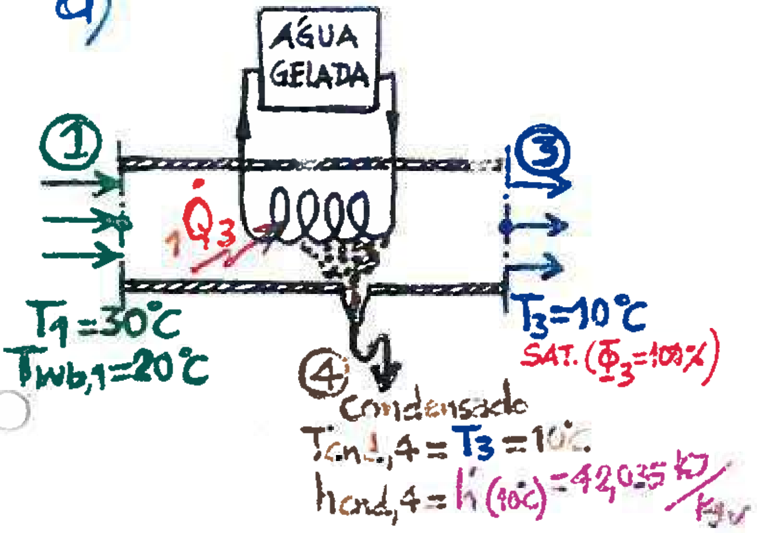
6.2 [illegible] 1 [illegible] de ar [illegible] [illegible], sendo as condições [illegible] do ar [illegible] Determine:

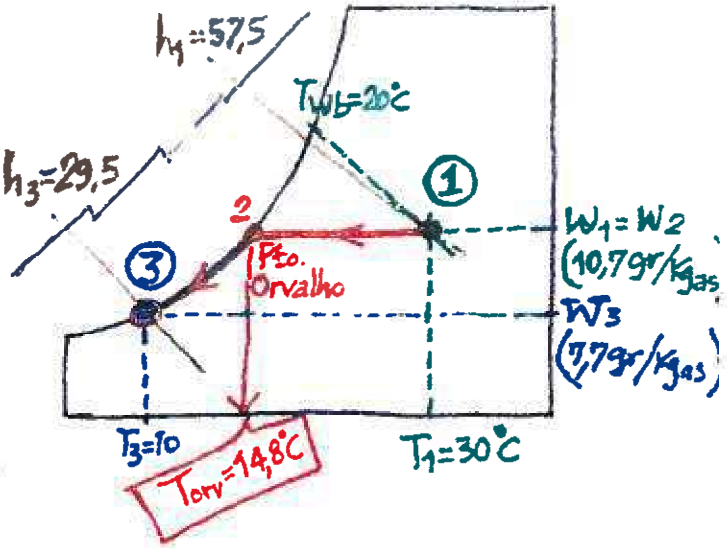
1/2

Dias de Castro

- a) A temperatura a que o vapor começa a condensar isto é, a temperatura de orvalho;
- b) A massa de vapor condensado ( ) por kg de ar seco quando se atingem os 10°C;
- c) A quantidade de calor retirada no processo.

a)





b) Balanço mássico (1-3):

$$\dot{m}_{a,1}=\dot{m}_{a,3}=\dot{m}_a=c^{te}$$

$$\frac{\dot{m}_{v,1}-\dot{m}_{cnd,4}=\dot{m}_{v,3}}{\dot{m}_a}$$

$$\frac{\dot{m}_{cnd,4}}{\dot{m}_a}=W_1-W_3=3\,gr/kg_{as}$$

c) Balanço energético (1-3)

$$\frac{_1\dot{Q}_3+\cancel{_1\dot{W}_3}+\dot{m}_{a,1}h_{a,1}+\dot{m}_{v,1}h_{v,1}=\dot{m}_{a3}h_{a,3}+\dot{m}_{v,3}h_{v,3}+\dot{m}_{cnd,4}h_{cnd,4}}{\dot{m}_a}$$

$$_1q_3=\frac{_1\dot{Q}_3}{\dot{m}_a}\left(\frac{kJ}{kg_{as}}\right)=\underbrace{(h_{a3}+W_3h_{v,3})}_{h_3}-\underbrace{(h_{a,1}+W_1h_{v,1})}_{h_1}+\underbrace{\frac{\dot{m}_{cnd,4}}{\dot{m}_a}}_{W_1-W_3}h_{cnd,4}$$

$$\boxed{_1q_3=\frac{_1\dot{Q}_3}{\dot{m}_a}=h_3-h_1+(W_1-W_3)h_{cnd,4}}$$

$$_1q_3=29{,}5-57{,}5+(0{,}0107-0{,}0077)\times42{,}035$$

$$_1q_3=-27{,}9\,kJ/kg_{as}$$

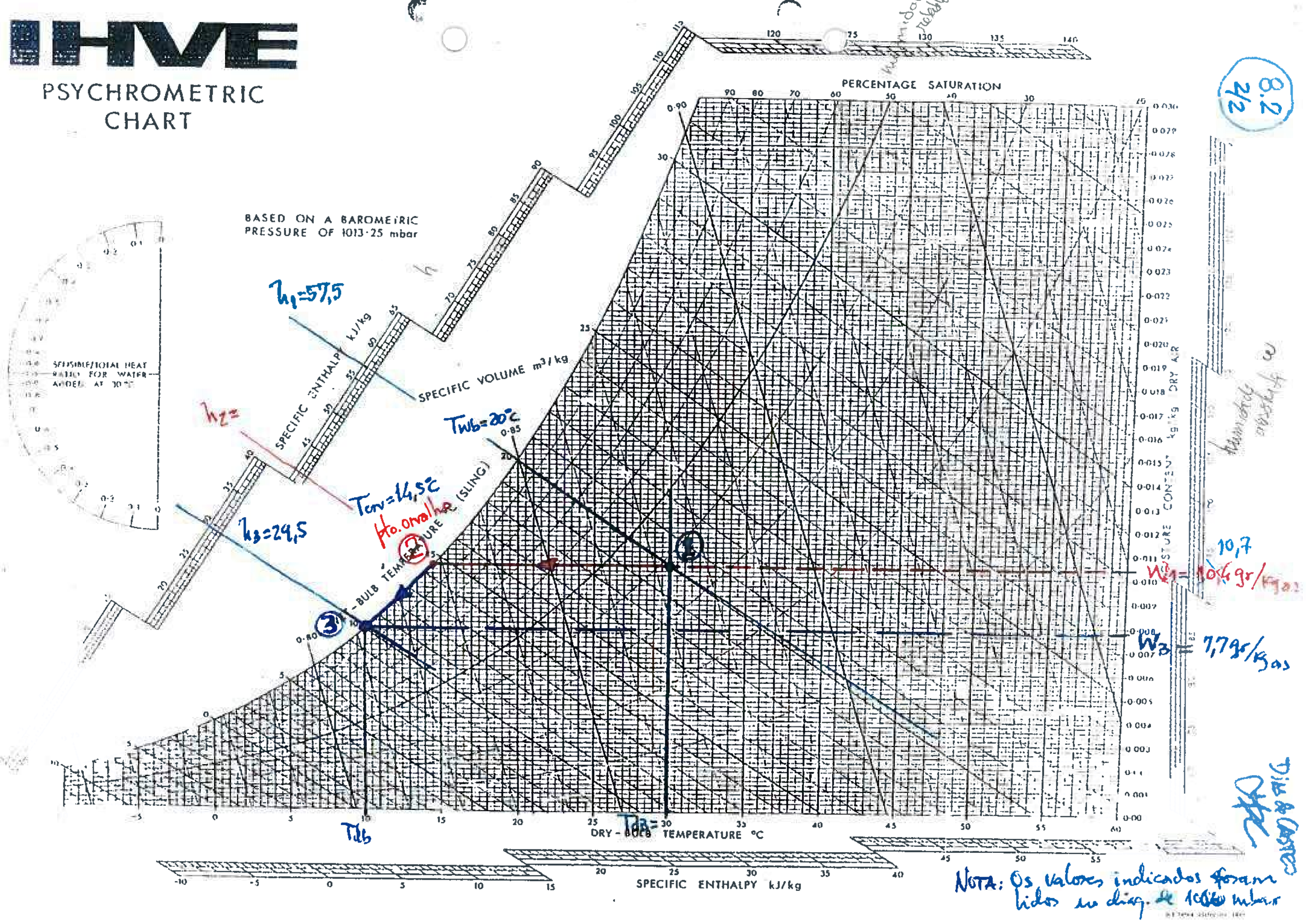
Analiticamente:

$$_1q_3=c_{p_a}(T_3-T_1)+c_{p_v}(W_3T_3-W_1T_1)+(W_3-W_1)(h_{LV}-h_{cnd,4})=-27{,}9\,kJ/kg_{as}$$

$$_1q_3=1{,}005(10-30)+1{,}84(0{,}0077\times10-0{,}0107\times30)+(0{,}0077-0{,}0107)(2500-42{,}035)$$

8.2
2/2

IHVE
PSYCHROMETRIC CHART


BASED ON A BAROMETRIC PRESSURE OF 1013·25 mbar

Nota: Os valores indicados foram lidos no diag. de 1060 mbar

Dias & CASTRO

6.4 0,7kg/s de ar a 36ºC e Φ=70% é misturado adiabaticamente com 1,2kg/s de ar a 18ºC e Φ=40%;

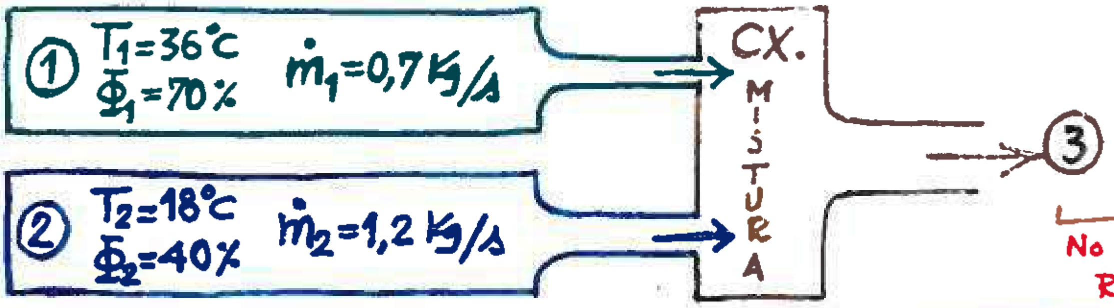
1/2

DIAS de CASTRO

a) Determine a temperatura da mistura assim como a humidade absoluta;

b) Represente o processo no diagrama psicrométrico

Mistura Adiabática de 2 correntes de Ar:



Mistura ①+②

$$\underbrace{\dot m_3=\dot m_1+\dot m_2}$$

No diagrama psicrométrico RECTA que UNE ① e ②

---

a) e b) **Balanço mássico na caixa de mistura:**

Vapor: $\dot m_{v,1}+\dot m_{v,2}=\dot m_{v,3}$

Ar Seco: $\dot m_{a,1}+\dot m_{a,2}=\dot m_{a,3}$

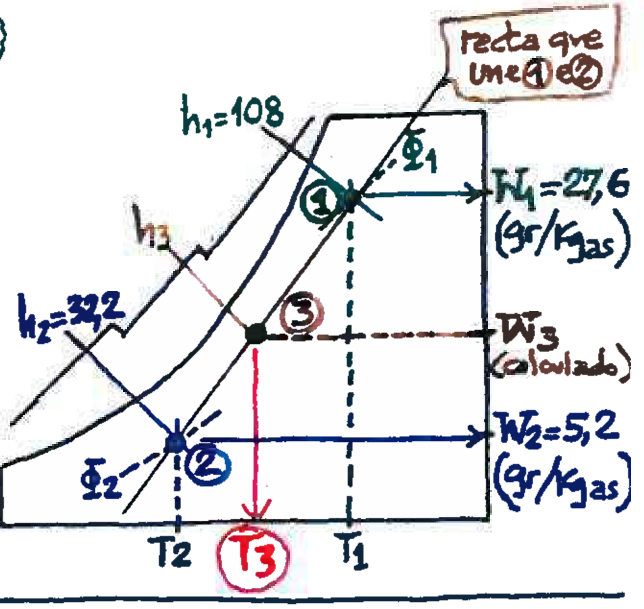
$$\Downarrow$$

$$\dot m_{a,1}\underbrace{\left(\frac{\dot m_{v,1}}{\dot m_{a,1}}\right)}_{=W_1}+\dot m_{a,2}\underbrace{\left(\frac{\dot m_{v,2}}{\dot m_{a,2}}\right)}_{=W_2}=(\dot m_{a,1}+\dot m_{a,2})\underbrace{\left(\frac{\dot m_{v,3}}{\dot m_{a,3}}\right)}_{W_3}$$

$$\boxed{W_3=\frac{\dot m_{a,1}W_1+\dot m_{a,2}W_2}{\dot m_{a,1}+\dot m_{a,2}}}$$

$$W_3=\frac{0{,}681\times0{,}0276+1{,}194\times0{,}0052}{0{,}681+1{,}194}=13{,}3\ gr/Kg_{as}$$

$$③\begin{cases}W_3=13{,}3\ gr/Kg_{as}\\ \text{RECTA QUE UNE ① e ②}\end{cases}\Rightarrow\boxed{T_3=25°C}$$



Caudais de Ar Seco:

$$\begin{rcases}W_1=0{,}0276=\dfrac{\dot m_{v,1}}{\dot m_{a,1}}\\ \dot m_{v,1}+\dot m_{a,1}=\dot m_1=0{,}7\end{rcases}\ \dot m_{a,1}=0{,}681\ Kg_{as}/s\quad \dot m_{v,1}=0{,}019\ Kg_v/s$$

$$\begin{rcases}W_2=0{,}0052=\dfrac{\dot m_{v,2}}{\dot m_{a,2}}\\ \dot m_{v,2}+\dot m_{a,2}=\dot m_2=1{,}2\end{rcases}\ \dot m_{a,2}=1{,}194\ Kg_{as}/s\quad \dot m_{v,2}=0{,}006\ Kg_v/s$$

- **ATRAVÉS DAS ENTALPIAS** (Balanço Energético na cx. mistura):

$$\dot Q+\dot W+(\dot m_{a,1}h_{a,1}+\dot m_{v,1}h_{v,1})+(\dot m_{a,2}h_{a,2}+\dot m_{v,2}h_{v,2})=(\dot m_{a,3}h_{a,3}+\dot m_{v,3}h_{v,3})$$

$$\dot m_{a,1}(\underbrace{h_{a,1}+W_1h_{v,1}}_{h_1})+\dot m_{a,2}(\underbrace{h_{a,2}+W_2h_{v,2}}_{h_2})=\dot m_{a,3}(\underbrace{h_{a,3}+W_3h_{v,3}}_{h_3})$$

$$③\begin{cases}\boxed{h_3=\dfrac{\dot m_{a,1}h_1+\dot m_{a,2}h_2}{\dot m_{a,1}+\dot m_{a,2}}}=\dfrac{0{,}681\times108+1{,}194\times32{,}2}{0{,}681+1{,}194}=59{,}7\ KJ/Kg_{as}\\ \text{RECTA QUE UNE ① e ②}\end{cases}$$

$T_3=25°C$

$W_3=13{,}3\ gr/Kg_{as}$

100
mb

8.4
2/2

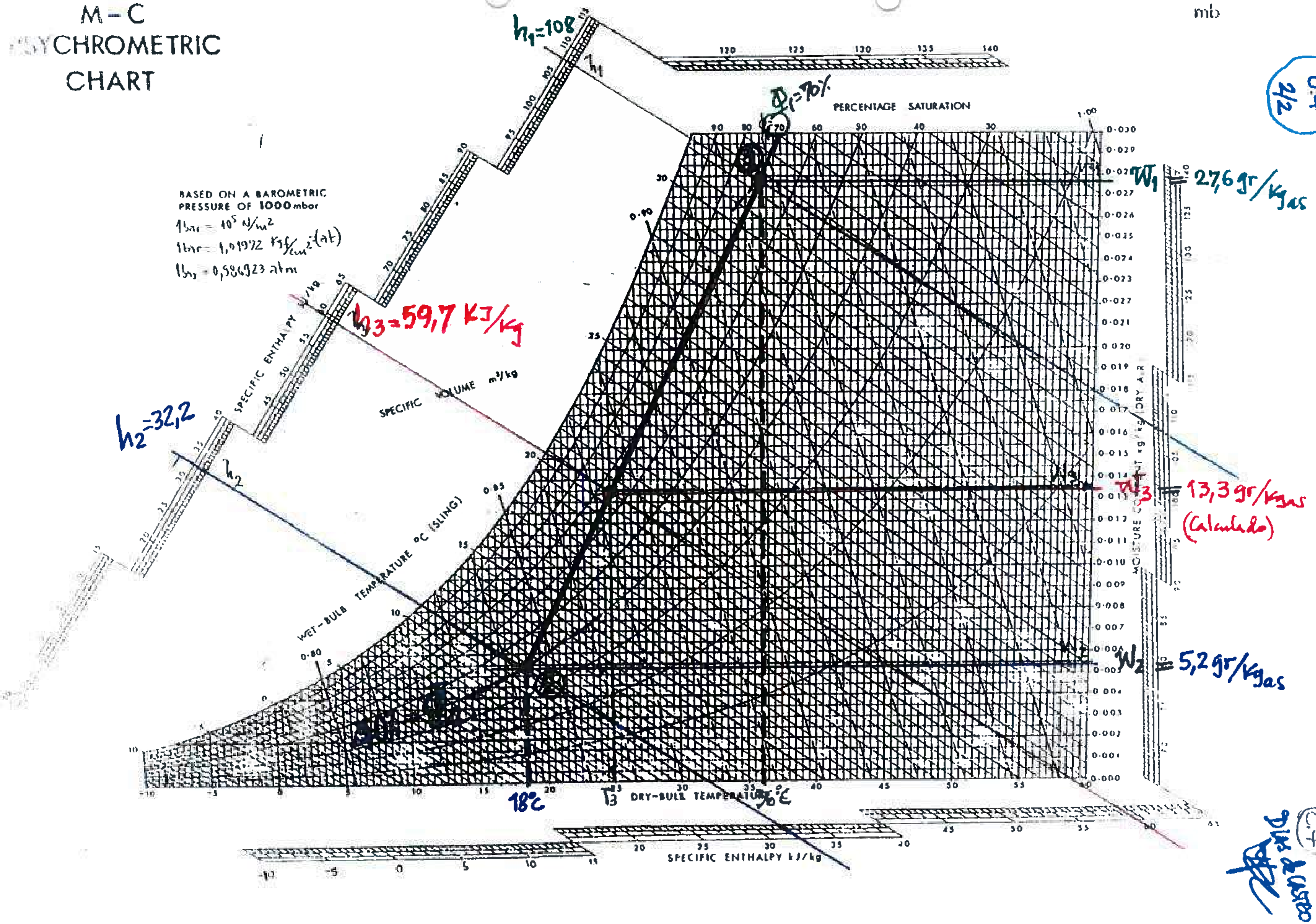
M – C
PSYCHROMETRIC
CHART

BASED ON A BAROMETRIC
PRESSURE OF 1000 mbar

1bar = 10^5 N/m^2

1bar = 1,01972 Kgf/cm^2 (at)

1bar = 0,986923 atm



8.7
Días de CASTRO