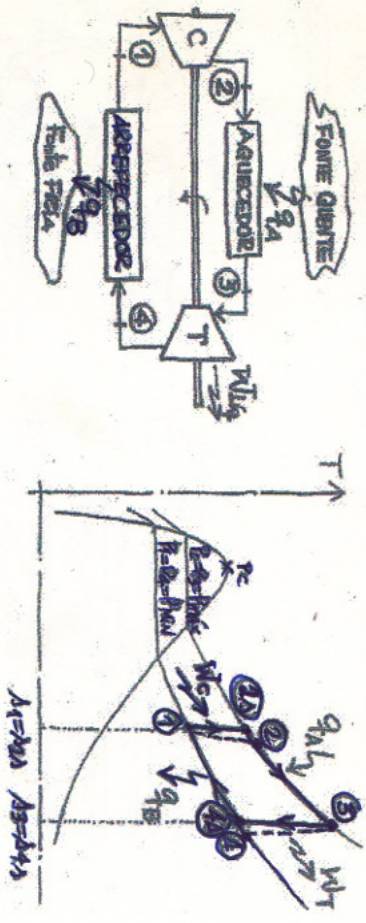


# CICLO DE JOULE-BRAYTON

Ciclo ideal para turbinas a gás simples. O fluido de trabalho é considerado um gás perfeito (utiliza equações de gases perfeitos).



Turbina a gás simples de ciclo fechado, sem regeneração:



NOTA: Na compressão (1-2) e na expansão (3-4) isotérmicas de um gás perfeito são válidas as seguintes relações  $P \cdot V^k = T$  (k - expoente politrópico):

$P \cdot V^k = \text{cte.}$       $T \cdot V^{k-1} = \text{cte.}$       $T \cdot P^{\frac{1-k}{k}} = \text{cte.}$

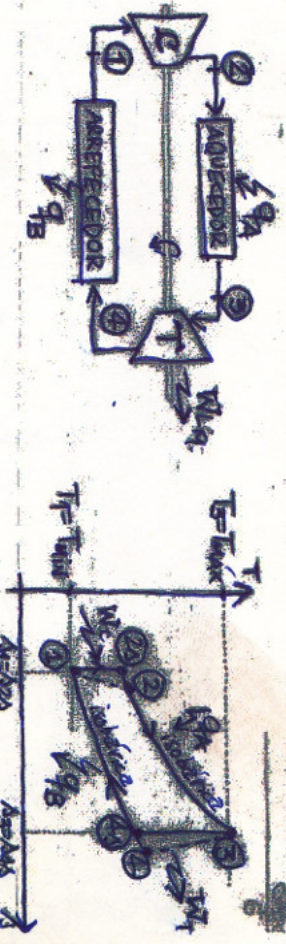
**RAZÃO de pressão:**  $r_p = \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{min}}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{\frac{k}{k-1}}$

**IP Máxima:** Corresponde a uma compressão isotérmica que permite atingir a temperatura máxima (T3 máx.).

**Para que se obtenha W máximo**  $\Rightarrow r_p = \sqrt{\frac{T_{3\text{máx}}}{T_1}}$

$T_2 = (r_p)^{\frac{k-1}{k}} \cdot T_1$

# CICLO DE JOULE-BRAYTON SEM REGENERAÇÃO



Rendimento térmico:

$\eta_t = \frac{W_{\text{útil}}}{Q_{\text{fornecido}}} = \frac{h_3 - h_4 - |h_2 - h_1|}{|h_3 - h_2|} = \frac{c_p(T_3 - T_4) - c_p(T_2 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)}$

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

Rendimentos ISENTRÓPICOS:

**Compressor:**  $\eta_c = \frac{W_{\text{isotr}}}{W_{\text{real}}} = \frac{h_2 - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{T_2 - T_1}{T_2 - T_1} \Rightarrow T_2 = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{\eta_c}$

**Turbina:**  $\eta_t = \frac{W_{\text{real}}}{W_{\text{isotr}}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_4} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_4} \Rightarrow T_4 = T_3 + \eta_t(T_3 - T_4)$

RAZÃO de Trabalho:

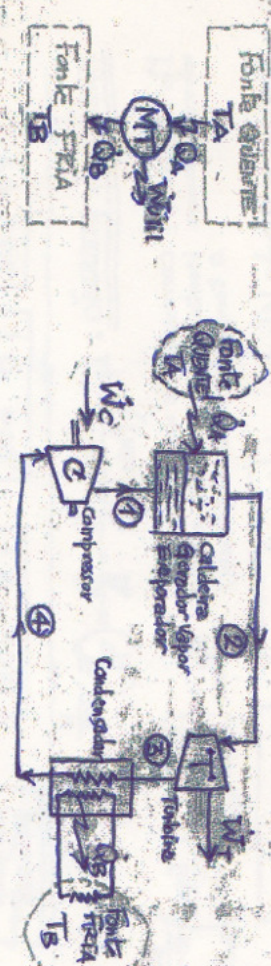
$r_w = \frac{W_{\text{útil ciclo}}}{W_{\text{op. turb}}} = 1 - \frac{|W_c|}{|W_t|} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \left(\frac{r_p}{r_p}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \left(\frac{r_p}{r_p}\right)^{\frac{k-1}{k}}$

Consumo específico de GÁS

$C_{eg} = \frac{3600}{W_{\text{útil ciclo}}} = \frac{3600}{c_p [T_3 - T_4 - |T_2 - T_1|]} \left[ \frac{kg}{gas} / kW \cdot h \right]$

$\eta_c = \frac{W_{\text{isotr}}}{W_{\text{real}}} = \frac{c_p(T_2 - T_1)}{c_p(T_2 - T_1)}$

# CICLOS MOTORES A VAPOR



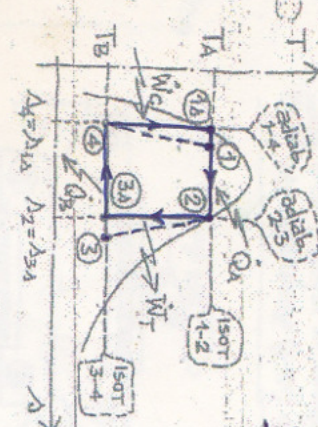
Reversível  
Inversível ( $\eta_{is} \approx 100\%$ )

Rendimento Técnico da Instalação

$$\eta_t = \frac{\text{Efeito obtido}}{\text{Consumo Energia}} = \frac{|W_{t\text{ útil ciclo}}|}{\dot{Q}_{\text{fornecido}}}$$

$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{|W_T| - |W_C|}{|Q_A|} = 1 - \frac{T_B}{T_A}$$

(Válido para o ciclo de Carnot Inversível)



Razão de Trabalho

$$\frac{|W_{\text{t\text{ útil ciclo}}}|}{|W_{\text{positivo ciclo}}|} = \frac{|W_T| - |W_C|}{|W_T|}$$

Consumo Específico de Vapor

$$CEV = \frac{\dot{m} \cdot 3600}{|W_{\text{t\text{ útil ciclo}}}|} \quad \text{N/A}$$

$$CEV = \frac{3600}{|W_{\text{t\text{ útil ciclo}}}|}$$

$$[m] = kg/s$$

$$[W_{\text{t\text{ útil ciclo}}}] = kW \Rightarrow [CEV] = kg/kWh \leftarrow [M] = kg/s$$

O ecrã do eixo de trabalho e uma instabilidade relativamente a outros

$$\eta^* = \frac{T_2 - T_1}{T_2 - T_1}$$

Sistemas Abertos  
Razão de Performance  
 $\dot{m}_E$  - Entradas  
 $\dot{m}_S$  - Saídas

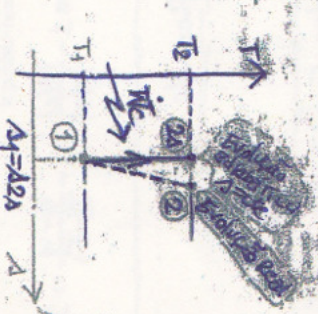
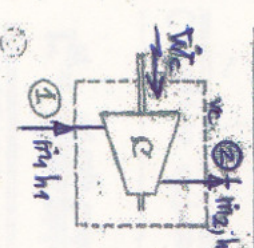
Conservação da Massa:

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_j$$

Lei de Tiro:

$$\dot{Q} + \dot{W} + \sum_{E1} \dot{m} (h + \frac{c^2}{2} + gz) = \sum_{S1} \dot{m} (h + \frac{c^2}{2} + gz)$$

Compressor



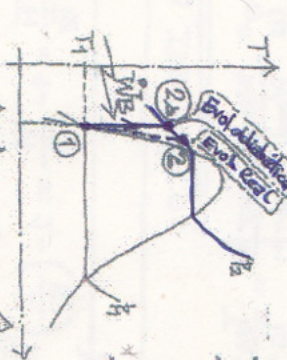
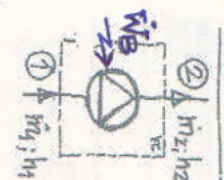
Rendimento Isentrópico do Compressor:

$$\eta_{is} = \frac{\dot{W}_{\text{Compressão Isentrópica (Ideal)}}}{\dot{W}_{\text{Compressão Real}}}$$

$$\eta_{is} = \frac{h_2 - h_1}{h_2 - h_1^*}$$

$$h_2 = h_1 + \frac{h_2 - h_1}{\eta_{is}}$$

BOMBA



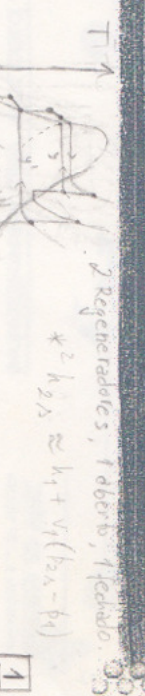
Cons. Massa:  $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$   
Potência da Bomba:  $\dot{Q}_c + \dot{W}_2 + \dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 \Rightarrow \dot{W}_B = \dot{m} (h_2 - h_1)$   
Rendimento Isentrópico de  $\frac{\dot{W}_B}{\dot{W}_{\text{comp. real}}} = \frac{h_2 - h_1}{h_2 - h_1^*}$   
 $h_2 = h_1 + \frac{h_2 - h_1}{\eta_{is}}$

TURBINA



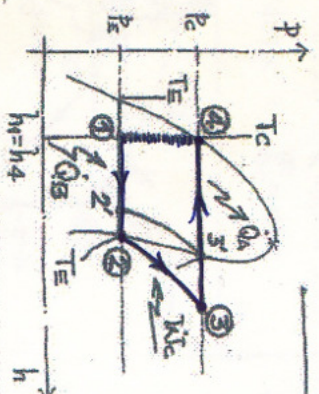
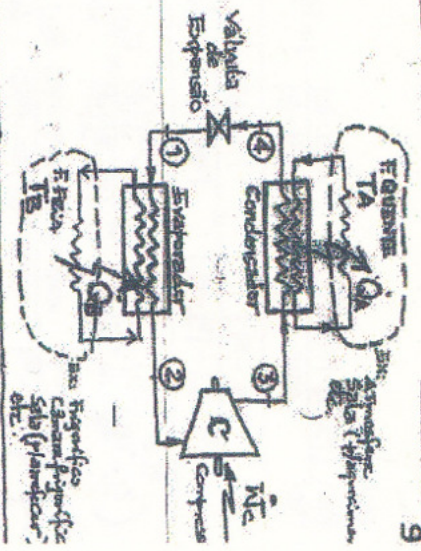
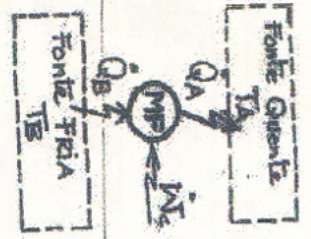
Cons. massa:  $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$   
Potência da Turbina:  $\dot{Q}_c + \dot{W}_2 + \dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 \Rightarrow \dot{W}_T = \dot{m} (h_1 - h_2)$   
Rendimento Isentrópico de Turbina:  $\eta_{is} = \frac{\dot{W}_T}{\dot{W}_{\text{comp. real}}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2^*}$   
 $h_2 = h_1 + \eta_{is} (h_2 - h_1)$

CICLO RANKINE (H2O)  
(bigrama T-s)



# CICLOS FRIGORÍFICOS

DIAS DE CASA  
9



Compressão seca : 1 2 3 4 1  
Compressão húmida : 1 2' 3' 4 1

**BOMBA DE CALOR** : Fornece calor ( $Q_A$ ) à fonte quente

**MÁQUINA FRIGORÍFICA** : Retira calor ( $Q_B$ ) da fonte fria

**Efeto frigorífico**  $Q_B = h_2 - h_1 \rightarrow$  Quantidade de calor que uma máquina frigorífica consegue retirar do espaço a refrigerar, por unidade de massa

**Potência frigorífica**  $Q_B = \dot{m}(h_2 - h_1) \rightarrow$  Efeito frigorífico por unidade de tempo

**Potência**  $\dot{W}_c = \dot{m}(h_2 - h_1) \rightarrow$  Potência que é necessário fornecer ao compressor

## MÁQUINA FRIGORÍFICA

$$COP_{MF} = \frac{|Q_B|}{|W_c|} = \frac{|Q_B|}{|W_c|}$$

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

Nas máquinas comerciais operacionais

## BOMBA DE CALOR

$$COP_{Bc} = \frac{|Q_A|}{|W_c|} = \frac{|Q_A|}{|W_c|}$$

Nas máquinas comerciais operacionais

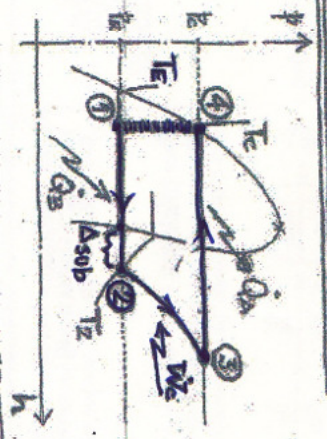
$$(COP_{MF})_{Carnot} = \frac{|Q_B|}{|W_c|} = \frac{T_B}{T_A - T_B}$$

$$(COP_{Bc})_{Carnot} = \frac{|Q_A|}{|W_c|} = \frac{T_A}{T_A - T_B}$$

$$\eta = \frac{COP_{real}}{COP_{max}}$$

# CICLO FRIGORÍFICO COM SOBREAQUECIMENTO

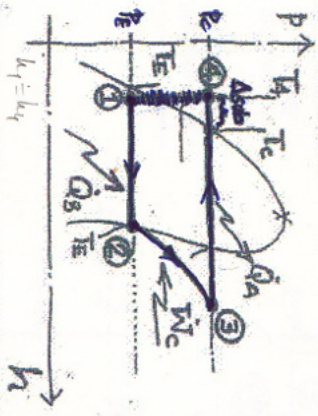
TUD. 1 - RESUMO  
DIAS DE CASA  
10



Grãos de **Sobreaquecimento** :  
 $\Delta_{sob} = T_{(saturado \text{ no compressor})} - T_{(saturado \text{ no evaporador})}$

Se o sobreaquecimento for útil à máquina o efeito frigorífico  $\rightarrow COP_{MF} \uparrow$

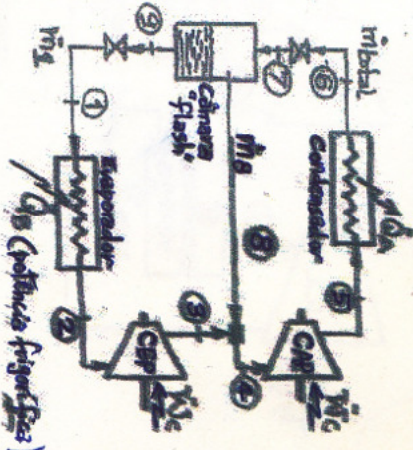
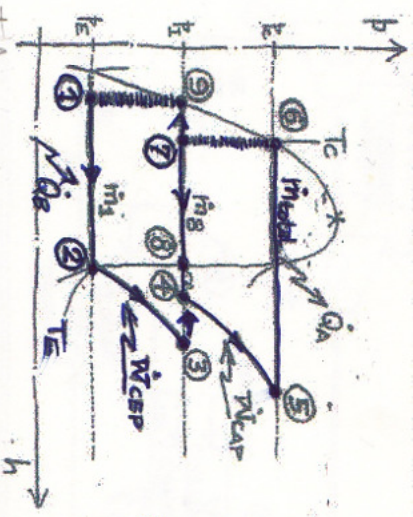
# CICLO FRIGORÍFICO COM SUBARREFECIMENTO



$\Delta_{sub} = T_{(saturado)} - T_{(saturado \text{ na válvula de expansão})}$

Se o subarrefecimento for útil à máquina o efeito frigorífico  $\rightarrow COP_{MF} \uparrow$

# CICLO FRIGORÍFICO COM COMPRESSÃO EM ANDARRES

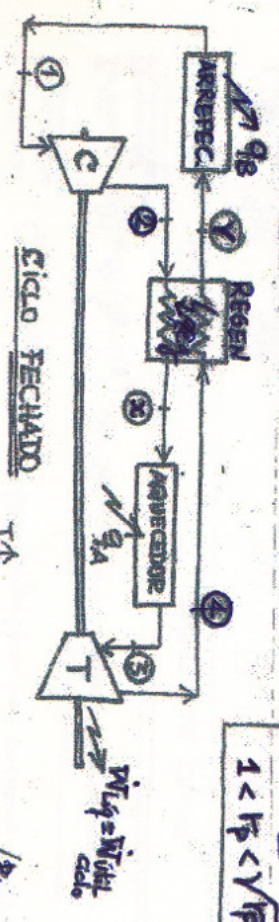


**CICLO de Joule-Brayton COM REGENERAÇÃO**

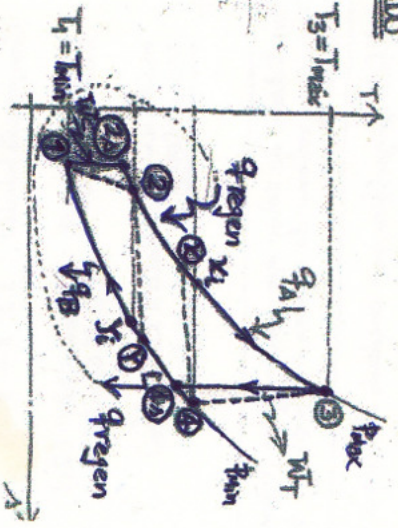
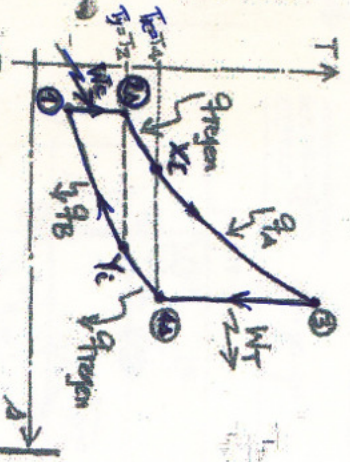


**CICLO ABERTO**

Para que a regeneração seja possível:  
 $T_4 > T_2$   
 ou  
 $1 < r_p < \sqrt{r_{máx}}$



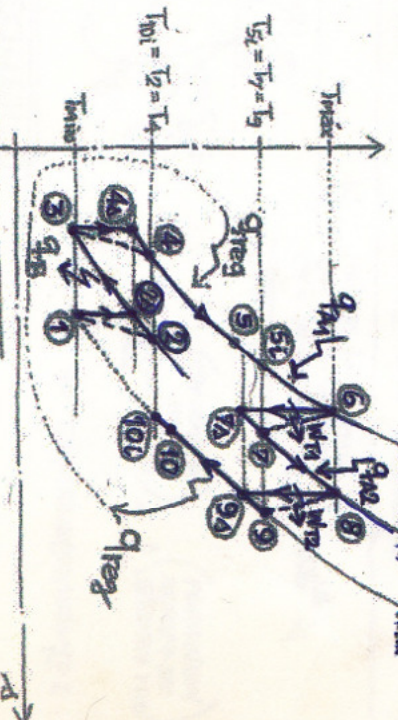
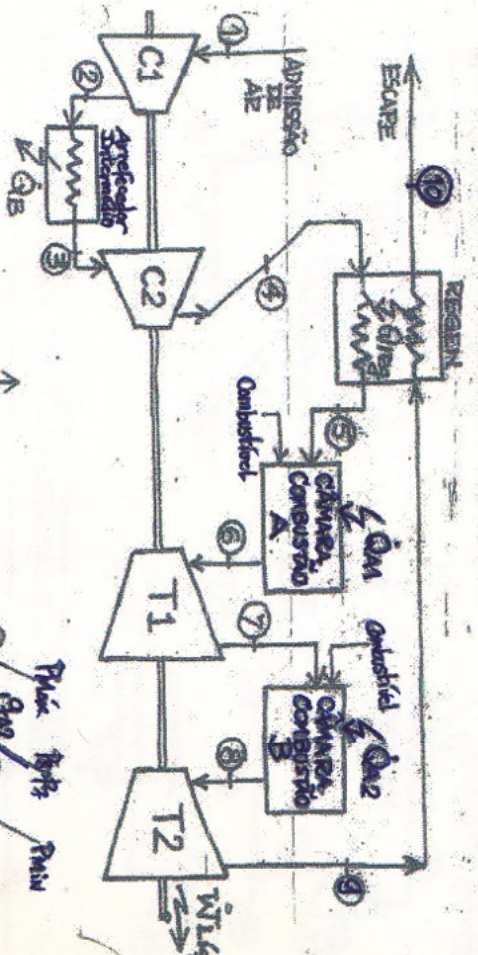
**CICLO FECHADO**



$\eta_T = 100\%$  ;  $\eta_C = 100\%$   
 $\eta_{reg} = 100\% \Rightarrow X = X_1 = X_2 = Y_1 = Y_2$   
 $K = \frac{h_3 - h_2}{h_3 - h_1} = \frac{h_4 - h_3}{h_4 - h_2}$   
 $\eta_f = \frac{W_{útil}}{q_{forn}} = 1 - \frac{h_2 - h_1}{h_4 - h_1} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_4 - T_1}$   
 $\eta_f = \frac{W_{útil}}{W_{forn}} = 1 - \frac{|T_2 - T_1|}{|T_4 - T_1|} = \eta_f$   
 $Deq = C_p [(T_4 - T_1) - (T_2 - T_1)] \left( \frac{r_p q_a}{r_{máx}} \right)$

$\eta_T < 100\%$  ;  $\eta_C < 100\%$  ;  $\eta_{reg} < 100\%$   
 $\eta_f = \frac{W_{útil}}{q_a} = 1 - \frac{|T_2 - T_1|}{|T_4 - T_1|}$   
 $\eta_{reg} = \frac{q_{reg}}{q_a} = \frac{C_p (T_3 - T_2)}{C_p (T_3 - T_1)} \Rightarrow T_3 = T_2 + \eta_{reg} (T_3 - T_1)$   
 $\eta_f = \frac{W_{útil}}{q_a} = 1 - \frac{|T_2 - T_1|}{|T_4 - T_1|}$   
 $\eta_f = 1 - \frac{|T_2 - T_1|}{|T_4 - T_1|}$  ;  $C_{reg} = \frac{3600}{C_p (T_3 - T_1 - T_2 - T_1)} \left( \frac{r_p q_a}{r_{máx}} \right)$

**Ciclo de Joule-Brayton COM REGENERAÇÃO EM ANDARIMOS**  
 (com aquecimento/aquecedores intermediários)



**Taxão de compressão INTERMÉDIA**  
 $r_{p_i} = \sqrt{r_p}$

**Wútil Máximo**

Para maximizar o trabalho de compressão manter a mesma razão de compressão em cada andar (de compressão)

$r_{p_{comp}} = \sqrt{r_p}$   
 $r_{p_{turb}} = \sqrt{r_p}$   
 $\eta_{turb} = \frac{h_8 - h_7}{h_8 - h_7}$   
 $\eta_{comp} = \frac{h_2 - h_1}{h_2 - h_1}$   
 $\eta_{turb} = \frac{h_8 - h_7}{h_8 - h_7}$   
 $\eta_{comp} = \frac{h_2 - h_1}{h_2 - h_1}$

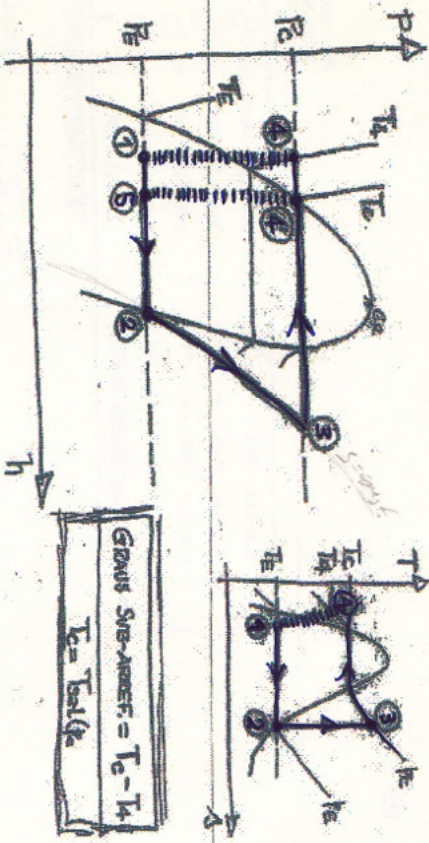
Notar que:  $r_p = \left( \frac{P_{max}}{P_{atm}} \right)^{\frac{1}{n}}$  ;  $r_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_4}{P_3}$

$r_p = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}} = \left( \frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{1}{n}}$

**CICLOS FRIGORÍFICOS**

**SUB-ARREFECIMENTO**

TIPO DE CICLO  
VPL  
TI



PERDEDE-SE UMA MÁXIMA QUANTIDADE COM A PERDIDA Q<sub>B</sub>.  
ESSA PERDIDA PODE SER OBTIDA COM:

SUB-ARREFECIMENTO ÚTIL

SUB-ARREFECIMENTO NÃO ÚTIL

$$Q_B = \dot{m} \cdot q_2$$

$$Q_B = \dot{m}' \cdot q_2$$

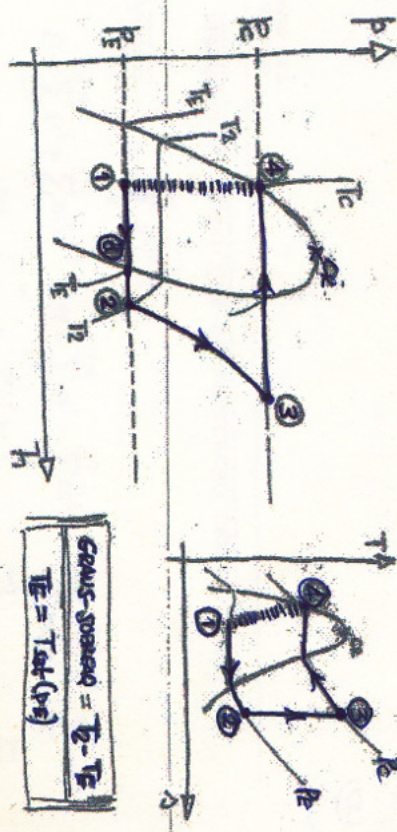
$$(q_2 = h_2 - h_1) > (q_2 = h_2 - h_1')$$

$\dot{m} < \dot{m}'$		$\dot{m} \neq$ C/ aproveitando do sub-arrefecimento
$(CCT)_{MF} = \frac{q_B}{W}$		$(CCT)_{MF} > (CCT)_{MF}$ dispendioso invtil

**CICLOS FRIGORÍFICOS**

**SOBRESAQUECIMENTO**

TIPO DE CICLO  
VPL  
TI



PERDEDE-SE UMA MÁXIMA QUANTIDADE COM A PERDIDA Q<sub>B</sub>.  
QUE PODE SER OBTIDA:

SUB-ARREFECIMENTO ÚTIL

SOBRESAQUECIMENTO ÚTIL

$$Q_B = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1)$$

$$Q_B = \dot{m}' \cdot (h_2 - h_1)$$

$$q_{h2} = (h_2 - h_1) > q_{h2} = (h_2 - h_1')$$

$\dot{m} < \dot{m}'$		$\dot{m} \neq$ Caudal fluido refrigerante e massa de o subaquecimento é útil
$(CCT)_{MF} = \frac{q_B}{W}$		$(CCT)_{MF} > (CCT)_{MF}$ dispendioso invtil

**MISTURAS GASOSAS**

Fração molar  $\bar{X}_i = \frac{n^\circ \text{ Moles do Elemento } i}{n^\circ \text{ Moles da Mistura}} = \frac{n_i}{n} = \frac{P_i}{P}$

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

Fração mássica  $Z_i = \frac{\text{Massa do Elemento } i}{\text{Massa da Mistura}} = \frac{m_i}{m} = \frac{X_i M_i}{\sum X_i M_i}$

Massa Molecular Aparente da Mistura  $M = \sum \bar{X}_i M_i = \frac{8314,3}{R} \text{ (kg/kmol)}$

Constante Particular da Mistura  $R = \sum Z_i R_i = \frac{R}{M} = \frac{8314,3}{M} = C_p - C_v \text{ (J/kg.K)}$

Calores Específicos da Mistura  $\bar{C}_p = \sum \bar{X}_i \bar{C}_{p,i} = C_{p,M} \text{ (J/kmol.K)}$   
 $\bar{C}_v = \sum \bar{X}_i \bar{C}_{v,i} = C_{v,M} \text{ (J/kmol.K)}$

$C_p = \sum Z_i C_{p,i} = \frac{C_p}{M} = \sum \frac{M_i}{M} C_{p,i} = \sum \frac{\bar{X}_i M_i}{M} C_{p,i} \text{ (J/kg.K)}$   
 $C_v = \sum Z_i C_{v,i} = \frac{C_v}{M} = \sum \frac{M_i}{M} C_{v,i} = \sum \frac{\bar{X}_i M_i}{M} C_{v,i} \text{ (J/kg.K)}$

Constante Adiabática de uma Mistura  $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{C_{p,M}}{C_{v,M}}$

Tabelas Termodinâmicas:

R	pág. 251	VALORES médios (0°C a 20°C)
$C_p$	pág. 253-255	$C_{p,m}$ → pag. 271-272
$C_v$	pág. 256-258	$C_{v,m}$ → pag. 273-274
$C_p$	pág. 259-261	$C_{p,m}$ → pag. 275-276
$C_v$	pág. 262-264	$C_{v,m}$ → pag. 277-278

Manual Dias do Casio  
Pot. Auxiliar - DESA - FSUP

$h = \frac{m}{M}$

$PV = mRT \parallel PV = nRT$

Massa em unidades SI e Kg  
 $\frac{m}{M} = \frac{m}{\text{kg}}$

**Cálculo do calor específico**

Pode usar-se a seguinte expressão para calcular o valor molar do calor específico a pressão constante:

$\bar{C}_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \text{ (J/mol.K)}$

Onde T, é a temperatura absoluta, e os coeficientes a, b, c, e d dependem do tipo de gás.

Os valores destes coeficientes estão registados na seguinte tabela:

TABLE 9.1 Temperature-Dependent Molar Heat Capacities at Constant Pressure (J/mol.K)

Substance	Formula	a	b	c	d	Temperature Range, K	Emp. %
Nitrogen	N <sub>2</sub>	28,50	-0,1571 × 10 <sup>-5</sup>	6,8081 × 10 <sup>-7</sup>	-1,873 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,99
Oxygen	O <sub>2</sub>	24,48	1,290 × 10 <sup>-5</sup>	-6,7155 × 10 <sup>-7</sup>	1,312 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	1,19
Ar	Ar	24,11	0,1987 × 10 <sup>-5</sup>	0,4802 × 10 <sup>-7</sup>	-1,966 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,72
Hydrogen	H <sub>2</sub>	21,11	-0,1916 × 10 <sup>-5</sup>	0,4003 × 10 <sup>-7</sup>	-0,6704 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	1,02
Carbon monoxide	CO	21,16	0,1897 × 10 <sup>-5</sup>	0,5727 × 10 <sup>-7</sup>	-2,4713 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,81
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	22,26	0,1881 × 10 <sup>-5</sup>	1,010 × 10 <sup>-7</sup>	-2,4713 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,81
Water vapor	H <sub>2</sub> O	25,25	0,6892 × 10 <sup>-5</sup>	0,679 × 10 <sup>-7</sup>	-1,595 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Water liquid	H <sub>2</sub> O	25,25	0,6892 × 10 <sup>-5</sup>	0,679 × 10 <sup>-7</sup>	-1,595 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Hydrogen fluoride	HF	24,41	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Hydrogen chloride	HCl	25,72	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Hydrogen bromide	HBr	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Hydrogen iodide	HI	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Ammonia	NH <sub>3</sub>	25,72	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Acetylene	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Ethylene	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Nonane	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Decane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Benzeno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Tolueno	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Xileno	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Estireno	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Heptano	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Nonano	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84
Decano	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	21,78	0,2803 × 10 <sup>-5</sup>	0,52 × 10 <sup>-7</sup>	-0,28 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0,84

Lei de Gibbs-Dalton:  $m = \sum_{i=1}^N m_i$   $\frac{1}{V} = \sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{V_i} \right)$   $\rho = \sum_{i=1}^N \rho_i$   $p = \sum_{i=1}^N p_i$

Lei de Amagat-Reduc:  $U = \sum_{i=1}^N U_i = \sum_{i=1}^N m_i u_i$   $H = \sum_{i=1}^N H_i = \sum_{i=1}^N m_i h_i$   $S = \sum_{i=1}^N S_i = \sum_{i=1}^N m_i s_i$

(ATENÇÃO AS CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO DESTAS LEIS)

Manual Dias do Casio  
Pot. Auxiliar - DESA - FSUP

$\Delta s = m \left[ c_p \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \right]$   
 para T =  $\frac{TE+273}{2}$   
 Para m balística, sist fechado  
 $w = \int_1^2 p dv$   $p_2 V_2 = p_1 V_1$   
 $M-1$

# PSICROMETRIA

ESTUDO DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DO AR COM O OBJETIVO GENERALIZADO DE ANALISAR OS SUCESSIVOS ESTADOS DO AR NOS PROCESSOS DE:

- > AQUECIMENTO
- > ARREFECIMENTO (com/sem deumidificação)
- > CONTROLE DE HUMIDADE

ASSOCIADOS AOS SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO DOS EDIFÍCIOS (por exemplo).

## COMPOSIÇÃO DO AR

AR = AR SECO + VAPOR DE ÁGUA

SÓ EXISTE NO ESTADO GASOSO  
 só composto por:

N <sub>2</sub>	78,0840%
O <sub>2</sub>	20,9476%
Argon	0,9340%
CO <sub>2</sub>	0,0314%
OUTROS (Neon, Hélio, ...)	0,0030%

A ÁGUA  
 PODE EXISTIR NOS TRES ESTADOS:  
 SÓLIDO, LÍQUIDO OU GASOSO

Na condição normal da pressão e temperatura:

M <sub>a</sub>	= 28,9645 kg/mol
R <sub>a</sub>	= 287,055 J/kg.K
C <sub>p</sub>	= 1005 J/kg.K

M <sub>w</sub>	= 18,01534 kg/mol
R <sub>w</sub>	= 461,518 J/kg.K
C <sub>p</sub>	= 1,84 J/kg.K

## MASSA TOTAL DE AR:

$$m = m_a + m_v = \frac{V}{R_a} \left[ \frac{P}{T} - \phi \cdot P_{v, sat} \left( \frac{1}{R_a} - \frac{1}{R_w} \right) \right]$$

$$m_a = \frac{P_a}{R_a T} = \frac{V}{R_a} \left[ \frac{P}{T} - \phi \cdot \frac{P_{v, sat}}{R_w} \right]$$

$$m_v = \frac{P_v}{R_w T} = \frac{V}{R_w} \left[ \frac{\phi \cdot P_{v, sat}}{R_w} \right]$$

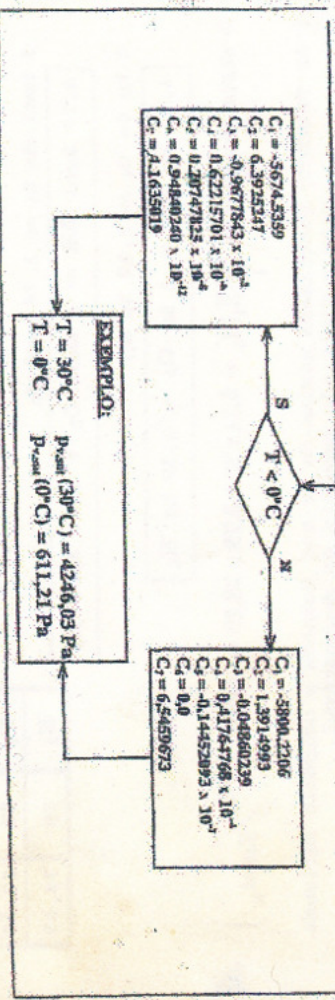
Q	M	Massa Total da Mistura (Ar Humido)	(kg)
m <sub>a</sub>	M <sub>a</sub>	Massa do Ar Seco	(kg)
m <sub>v</sub>	M <sub>w</sub>	Massa de Vapor de Água	(kg)
m	M	Massa da Mistura	(kg)
ρ <sub>a</sub>	ρ <sub>a</sub>	Densidade do Ar Seco	(kg/m <sup>3</sup> )
ρ <sub>v</sub>	ρ <sub>v</sub>	Densidade do Vapor de Água	(kg/m <sup>3</sup> )
ρ	ρ	Densidade da Mistura	(kg/m <sup>3</sup> )
P <sub>a</sub>	P <sub>a</sub>	Pressão Parcial do Ar Seco	(N/m <sup>2</sup> )
P <sub>v</sub>	P <sub>v</sub>	Pressão Parcial do Vapor de Água	(N/m <sup>2</sup> )
P <sub>tot</sub>	P <sub>tot</sub>	Pressão Total do Vapor de Água	(N/m <sup>2</sup> )
T	T	Temperatura da Mistura	(K)
T <sub>sat</sub>	T <sub>sat</sub>	Temperatura de Saturação do Ar	(K)
T <sub>sat</sub>	T <sub>sat</sub>	Temperatura de Saturação da Água	(K)
φ	φ	Umidade Relativa do Ar	(-)
φ	φ	Umidade Relativa da Água	(-)

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

T<sub>d</sub> = -35,957 - 1,8576 ln [p<sub>v</sub>(T)] + 1,1689 ln [T] ⇒ 0°C ≤ T ≤ 70°C  
 T<sub>d</sub> = -60,450 - 7,0322 ln [p<sub>v</sub>(T)] + 0,3700 ln [T] ⇒ -60°C ≤ T < 0°C  
 onde [T<sub>sat</sub>] = °C e [p<sub>v</sub>(T)] = kPa

## PRESSÃO DE SATURAÇÃO DO VAPOR DE ÁGUA A TEMPERATURA (T) DO AR

P<sub>v, sat</sub>(T) = EXP [C<sub>1</sub>/T + C<sub>2</sub> + C<sub>3</sub> · T + C<sub>4</sub> · T<sup>2</sup> + C<sub>5</sub> · T<sup>3</sup> + C<sub>6</sub> · T<sup>4</sup> + C<sub>7</sub> · Ln(T)]  
 [T] = K [p] = Pa



Hum. // absoluta: W =  $\frac{\text{Massa de Vapor H}_2\text{O}}{\text{massa de ar seco}} = \frac{M_v}{M_a} = \frac{V_v}{V_a}$

Hum. // relativa: φ =  $\frac{\text{massa de vapor H}_2\text{O}}{\text{massa de vapor H}_2\text{O máxima a mesma T e P}}$

φ =  $\frac{P_v}{P_{v, sat}(T)}$  ⇒  $P_v = \phi \cdot P_{v, sat}(T)$

φ =  $\frac{W \cdot P_a}{W + P_a}$  ⇒  $W = 0,622 \frac{P_v}{P_{tot} - P_v}$  ⇒  $W = 0,622 \frac{\phi \cdot P_{v, sat}}{P_{tot} - \phi \cdot P_{v, sat}}$

↑ massa de vapor de água x o ar húmido colando água T<sub>sat</sub>

TIPO DE COMBUSTÃO

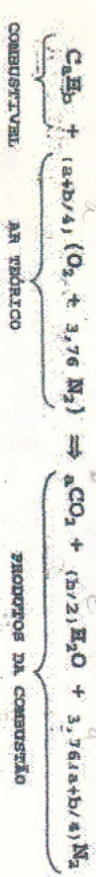
ESTEQUIOMÉTRICA ou QUEIMA NEUTRA: utiliza o ar teórico na queima do combustível.

OXIDANTE: utiliza ar em excesso (relativamente ao ar teórico) na queima do combustível.

REDUTORA: utiliza defeito de ar (relativamente ao ar teórico) na queima do combustível.

**COMBUSTÃO ESTEQUIOMÉTRICA DE UM REACTIVO SIMPLES:**

É uma Combustão Completa Realizada sem o emprego de ar = ar teórico



**Relações Estequiométricas**

Ar-Combustível  
Combustível-Ar

$$\frac{(AC)_{ar}}{(CA)_{ef}} = \frac{1}{1} = \frac{a + \frac{b}{4}}{1} = \frac{a + \frac{b}{4}}{1} \left[ \frac{\text{kmol AR}}{\text{kmol CB}} \right]$$

$$\frac{(AC)_{ar}}{(CA)_{ef}} = \frac{1}{1} = \frac{1}{(a \times M_C) + (b \times M_H)} \left[ \frac{\text{kg AR}}{\text{kg CB}} \right]$$

**FRACÇÕES MOLARES dos Produtos da Combustão:**

**BASE ÚMIDA**

(FUMOS NÚMEROS: inclui H<sub>2</sub>O)

$$\bar{X}_{O_2} = \frac{a}{a + 2 + 3,76(a + \frac{b}{4})} \left[ \frac{\text{kmol } O_2}{\text{kmol CB}} \right]$$

$$\bar{X}_{H_2O} = \frac{\frac{b}{2}}{a + 2 + 3,76(a + \frac{b}{4})} \left[ \frac{\text{kmol } H_2O}{\text{kmol CB}} \right]$$

$$\bar{X}_{N_2} = \frac{3,76(a + \frac{b}{4})}{a + 2 + 3,76(a + \frac{b}{4})} \left[ \frac{\text{kmol } N_2}{\text{kmol CB}} \right]$$

**BASE SECA**

(FUMOS SECCOS: exclui H<sub>2</sub>O)

$$\bar{X}_{O_2} = \frac{a}{a + 3,76(a + \frac{b}{4})} \left[ \frac{\text{kmol } O_2}{\text{kmol CB}} \right]$$

$$\bar{X}_{N_2} = \frac{3,76(a + \frac{b}{4})}{a + 3,76(a + \frac{b}{4})} \left[ \frac{\text{kmol } N_2}{\text{kmol CB}} \right]$$

Para as concentrações relativas as frações molares na base seca e húmida são calculadas de forma idêntica

Condições de referência:

$T_{ref} = 25^\circ C$   $P_{ref} = 1 \text{ atm}$

Manuel Dias do Castelo  
Pol. Auxiliar - DEVEGEI - FEUP

**COMBUSTÃO**

**COMBUSTÍVEL + AR (COMBURENTE) ⇒ PRODUTOS DA COMBUSTÃO**

**COMPOSIÇÃO DO AR SECO:**

Numa dada quantidade de ar existe sempre a relação:

1 kmol de O<sub>2</sub> ⇒ 3,76 kmol N<sub>2</sub>

4,76 kmol AR = 1 kmol O<sub>2</sub> + 3,76 kmol N<sub>2</sub>

1 kg de O<sub>2</sub> ⇒ 3,32 kg N<sub>2</sub>

4,32 kg AR = 1 kg O<sub>2</sub> + 3,32 kg N<sub>2</sub>

MASSA MOLECULAR  $\bar{M}_M = 0,21 \times 32 + 0,79 \times 28,15 = 28,96$  (kg/kmol ar)

AR TEÓRICO: Quantidade mínima de ar que fornece o oxigénio suficiente para a combustão completa do combustível.

RIQUEZA DA MISTURA:  $r = \frac{(AC)_{el}}{(AC)} = \frac{(CA)}{(CA)_{el}} = \frac{(AC)_{el}}{(AC)}$

r = 1 ⇒ Mistura Estequiométrica ou Queima Neutra

r < 1 ⇒ Mistura pobre: Excesso de Ar (Combustão Oxidante)

r > 1 ⇒ Mistura Rica: Defeito de Ar (Combustão Redutora)

Manuel Dias do Castelo  
Pol. Auxiliar - DEVEGEI - FEUP

1. ar teórico =  $\frac{AC}{AC_{to}}$

$\bar{h} = h_f + \Delta \bar{h}$

Para elementos estáveis (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, ...)

$\bar{h}_f = 0$