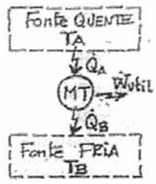
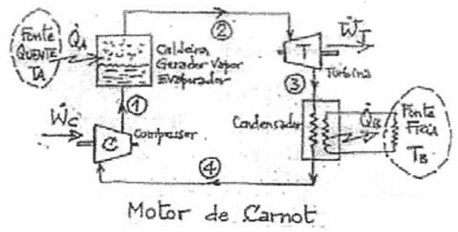
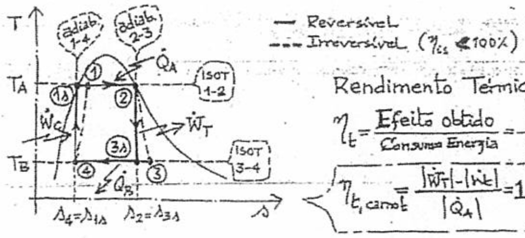
Ciclos Motores







Rendimento Térmico da Instalação

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

$$\eta_{t,\,carnot} = \frac{|\dot{W}_T|-|\dot{W}_C|}{|\dot{Q}_A|} = 1-\frac{T_B}{T_A}$$ (Válido para o ciclo de Carnot reversível)

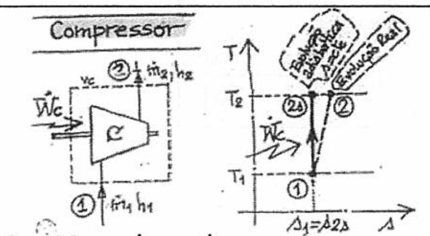
$$\eta_t = \frac{|\dot{W}_{util}|}{|\dot{Q}_A|} = \frac{|\dot{W}_T|-|\dot{W}_C|}{|\dot{Q}_A|} = \frac{W_{util}}{q_{fornec.}} = \frac{|W_T|-|W_C|}{|q_A|} = \frac{|h_3-h_2|-|h_1-h_4|}{|h_2-h_1|} = 1-\frac{T_B}{T_A}$$

$$r_W = \frac{W_{util}}{W_{Turb}^{Exp}} = \frac{|W_T|-|W_C|}{|W_T|} = 1-\frac{|W_C|}{|W_T|} = 1-\frac{|h_1-h_4|}{|h_3-h_2|}$$

$r_W \equiv 1 \rightarrow$ Motor Reversível
$r_W \rightarrow 1$: Menos Sensível a Irreversibili.
$r_W \rightarrow 0$: Mais sensível Irreversibilidade

$$cev = \frac{3600}{W_{util}} = \frac{3600}{|\,{}_2W_3| - |\,{}_4W_1|} = \frac{3600}{|h_3-h_2|-|h_1-h_4|}\left(\frac{Kg}{KWh}\right)$$

Compressor



Cons Massa: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$

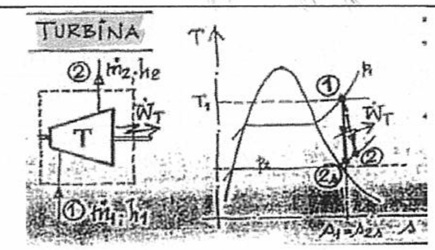
Potência: ${}_1\dot{Q}_2 + {}_1\dot{W}_2 + \dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2$

$$\dot{W}_C = \dot{m}(h_2-h_1)$$
$$\dot{W}_C = \dot{m}(h_{2s}-h_1)$$

Rendimento isentrópico:

$$\eta_{is}^C = \frac{W_{comp.is(ideal)}}{W_{comp(real)}} = \frac{h_{2s}-h_1}{h_2-h_1}$$
$$\rightarrow h_2 = h_1 + \frac{h_{2s}-h_1}{\eta_{is}^C}$$

TURBINA



Cons Massa: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$

Potência: ${}_1\dot{Q}_2 + {}_1\dot{W}_2 + \dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2$

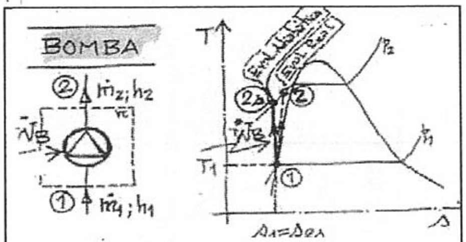
$$\dot{W}_T = \dot{m}(h_2-h_1)$$

Rendimento isentrópico:

$$\eta_{is}^T = \frac{W_{expansão\ real}}{W_{exp.\ isent.}} = \frac{h_2-h_1}{h_{2s}-h_1}$$
$$\rightarrow h_2 = h_1 + \eta_{is}^C \frac{h_2-h_1}{h_{2s}-h_1}$$

$h_2 = h_1 + \eta_{is}^T (h_{2s}-h_1)$

BOMBA



Cons Massa: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$

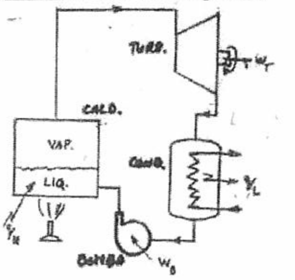
Potência: ${}_1\dot{Q}_2 + {}_1\dot{W}_2 + \dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2$

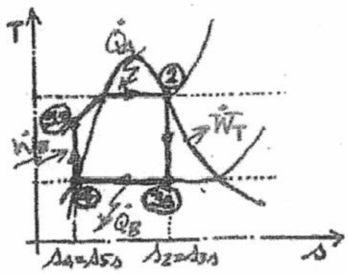
$$\dot{W}_B = \dot{m}(h_2-h_1)$$

Rendimento isentrópico:

$$\eta_{is}^B = \frac{W_{comp.isent.}}{W_{comp.real}} = \frac{h_{2s}-h_1}{h_2-h_1}$$
$$\rightarrow h_2 = h_1 + \frac{h_{2s}-h_1}{\eta_{is}^B}$$

Rankine Simples





$h_2 = h''(P_H) \rightarrow Tab.144\ldots$

$h_4 = h'(P_L) \rightarrow Tab.118\ldots$

$$h_3 =\rightarrow X_3 = \frac{s_3 - s'(P_3)}{s''(P_3)-s'(P_3)} = \frac{h_3 - h'(P_3)}{h''(P_3)-h'(P_3)} \rightarrow Tab.118\ldots$$

$s_3 = s_2 = s''(P_H) \rightarrow Tab.144\ldots$

$s_{1'} = s_4 = s''(P_L)$

$P_1 = P_{1'} = P_H \rightarrow Tab \rightarrow s_{1'} = s'_4 \rightarrow h$: *ir à tabela* P_H *e procurar* $s'_4(P_L)$

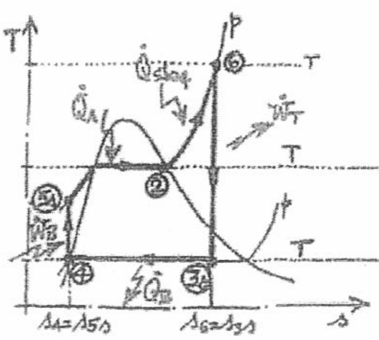
Turbina:

Bomba:

$$c.e.v = \frac{3600}{W_{util}} \qquad r_w = \frac{W_{util}}{W_{exp}} = \frac{W_{util}}{{}_2W_3} = \frac{W_{util}}{h_3-h_2}$$

$$\eta_t = \frac{W_{util}}{q_{forn}} = \frac{|\,{}_2W_3|-|\,{}_4W_{1'}|}{|\,{}_3Q_2|} = \frac{|h_3-h_2|-|h_5-h_4|}{|h_2-h_3|}$$

Rankine C/Sobreaquecimento



$h_2 = h''(P_H) \rightarrow Tab.144 \quad h_5 = h_{1'}(Rankine\ simples)$

$$h_4 = h'(P_L) \rightarrow Tab.118 \quad h_6 \rightarrow \begin{cases} T_6 = Temp.\ sobreaq. \\ P_6 = P_H \end{cases} \begin{cases} h_6(T_{sobr}) \\ s_6(T_{sobr}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} s_6 = s_3 \\ P_3 = P_1 = P_L \end{cases} \Big| \quad h_3 =\rightarrow X_3 = \frac{s_3-s'(P_3)}{s''(P_3)-s'(P_3)} = \frac{h_3-h'(P_3)}{h''(P_3)-h'(P_3)} \rightarrow Tab.118\ldots$$

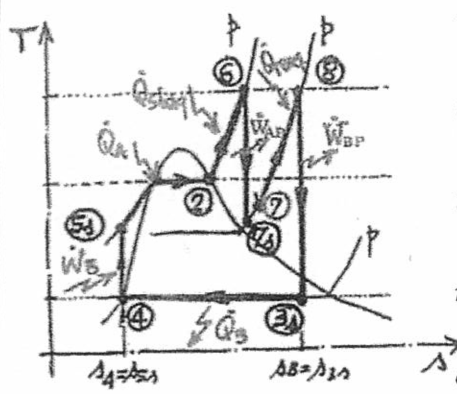
$$\eta_t = \frac{W_{util}}{q_{forn}} = \frac{|\,{}_6W_3|-|\,{}_4W_5|}{|\,{}_5Q_6|} = \frac{|h_3-h_6|-|h_5-h_4|}{|h_6-h_5|}$$

$$c.e.v = \frac{3600}{W_{util}} \qquad r_w = \frac{W_{util}}{W_{exp}} = \frac{W_{util}}{{}_6W_3} = \frac{W_{util}}{h_3-h_6}$$

Turbina:

Bomba:

Rankine Reversível C/Reaquecimento ?ºC e P=? atm



$$7\begin{cases} P_7 = P_{reaq.} \\ s_7 = s_6 \end{cases}$$

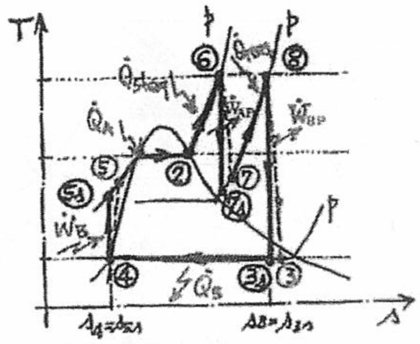
$$8\begin{cases} P_8 = P_{reaq.} \\ T_8 = T_{reaq.} \end{cases} \quad \begin{cases} h = P_{reaq.} \rightarrow T_{reaq.} \\ s = P_{reaq.} \rightarrow T_{reaq.} \end{cases} \rightarrow Tab.144\ldots$$

$$3\begin{cases} s_3 = s_8 \\ P_3 = P_L \end{cases} \Bigg| \rightarrow X_3 = \frac{s_3 - s'(P_3)}{s''(P_3) - s'(P_3)} = \frac{h_3 - h'(P_3)}{h''(P_3) - h'(P_3)} \rightarrow Tab.118\ldots$$

$$\eta_t = \frac{W_{util}}{q_{forn}} = \frac{|{}_6W_7| + |{}_8W_3| - |{}_4W_5|}{|{}_5Q_6| + |{}_7Q_8|} = \frac{|h_7 - h_6| + |h_3 - h_8| - |h_5 - h_4|}{|h_6 - h_5| + |h_8 - h_7|}$$

$$c.e.v = \frac{3600}{W_{util}} \qquad r_w = \frac{W_{util}}{W_{exp}} = \frac{W_{util}}{|{}_6W_7| + |{}_8W_3|} = \frac{W_{util}}{|h_7 - h_6| + |h_3 - h_8|}$$

Rankine C/Reaquecimento , P reaq. e η?

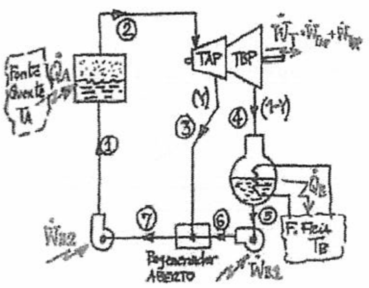


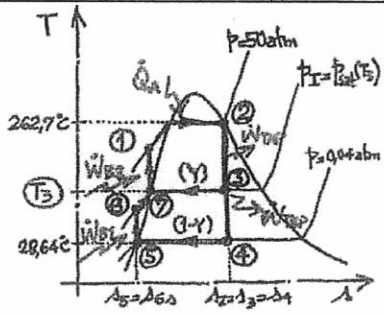
TAP	TBP	Bomba
$\eta_t^{TAP} = \frac{\lvert h_{7r} - h_6\rvert}{\lvert h_{7s} - h_6\rvert}$	$\eta_t^{TBP} = \frac{\lvert h_{3r} - h_8\rvert}{\lvert h_{3s} - h_8\rvert}$	$\eta_{is}^{B} = \frac{\lvert h_{5s} - h_4\rvert}{\lvert h_{5r} - h_4\rvert}$

$$\eta_t = \frac{W_{util}}{q_{forn}} = \frac{|{}_6W_{7r}| + |{}_8W_{3r}| - |{}_4W_{5r}|}{|{}_{5r}Q_6| + |{}_{7r}Q_8|}$$

$$c.e.v = \frac{3600}{W_{util}} \qquad r_w = \frac{W_{util}}{W_{exp}} = \frac{W_{util}}{|{}_6W_{7r}| + |{}_8W_{3r}|}$$

Rankine simples Regenerativo c/ aquecedor de água de alimentação por contacto

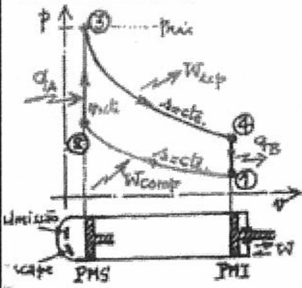




Ciclos Motores Padrões a ar

$$\begin{cases} K = \gamma = \dfrac{C_p}{C_v} \\ C_p = 1{,}005\ Kj/KgK) \\ C_v = 0{,}718\ Kj/KgK) \end{cases} \quad K = 1{,}4$$

Ciclo OTTO - ciclo ideal que se aproxima do motor de



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 isométrico 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 isométrico reversível $\dot{Q}_B = \dot{m}\, C_v (T_1 - T_4)$

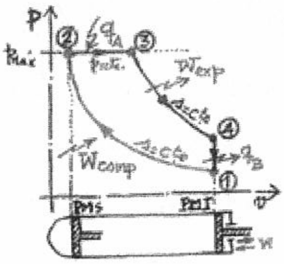
Taxa de Compressão: $r_v = \dfrac{v_1}{v_2} = \dfrac{v_4}{v_3} = \left(\dfrac{T_2}{T_1}\right)^{1/k-1} = \left(\dfrac{T_3}{T_4}\right)^{1/k-1}$

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

$Q_A = q_{adm} = u_3 - u_2 = c_v(T_3 - T_2)$ $\qquad \dfrac{T_1}{T_2} = \left(\dfrac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} = \left(\dfrac{v_3}{v_4}\right)^{k-1} = \dfrac{T_4}{T_3}$

$Q_B = q_{sai} = u_4 - u_1 = c_v(T_4 - T_1)$

Ciclo OTTO (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

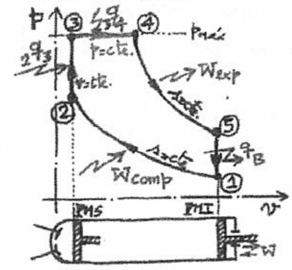
razão de combustão à pressão constante: $r_{cp} = \dfrac{v_3}{v_2} = \dfrac{T_3}{T_2} = \left(\dfrac{p_4}{p_1}\right)^{1/k} = \left(\dfrac{T_4}{T_1}\right)^{1/k}$

$$\eta_t = \frac{W_{util}}{q_{adm}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{K(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{r_v^{K-1}} \left[\frac{r_{C_p}^K - 1}{K(r_v - 1)} \right]$$

$$q_{adm} - w_{f,\,sai} = u_3 - u_2 \rightarrow q_{adm} = P_2(v_3 - v_2) + (u_3 - u_2) = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2)$$

$$q_{sai} = u_1 - u_4 \rightarrow q_{sai} = u_4 - u_1 = c_v(T_4 - T_1)$$

Ciclo Misto ou de SABATHIÉ



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: $r_v = \dfrac{v_1}{v_2} = \dfrac{v_1}{v_3} = \dfrac{v_5}{v_2} = \dfrac{v_5}{v_3} = \left(\dfrac{T_2}{T_1}\right)^{1/k-1}$

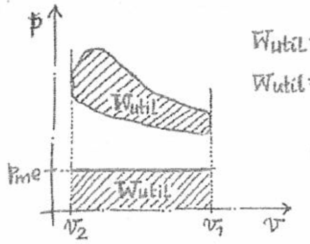
razão de combustão a pressão constante: $r_{cp} = \dfrac{v_4}{v_3} = \dfrac{T_4}{T_3}$ || razão de combustão a volume constante: $r_{cv} = \dfrac{p_3}{p_2} = \dfrac{T_3}{T_2}$

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

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

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

pressão média efectiva (pme)

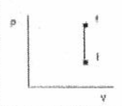
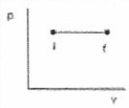
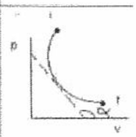
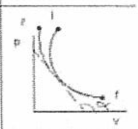
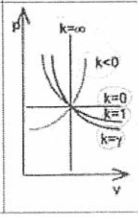


$W_{util} = pme\,(v_1 - v_2)$ // $pme = \dfrac{\eta_t \times q_A}{v_1 - v_2}$

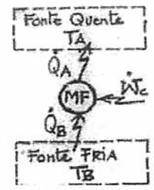
$W_{util} = \eta_t \times q_A$

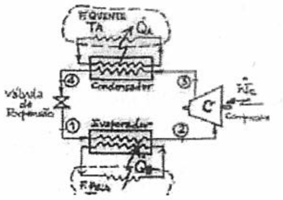
Menor pme → maior sensibilidade às irreversibilidades internas

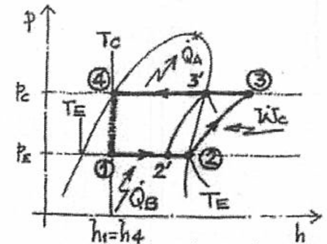
↪ MOTOR { MENOS COMPACTO; MAIOR DIMENSÃO

TRANSFORMAÇÃO	RELAÇÃO p.V.T	TRABALHO (W)	CALOR (Q)	GRÁFICO
ISOCÓRICA (V = constante)	$\frac{p}{T} = constante$ $\frac{p_i}{T_i} = \frac{p_f}{T_f}$	${}_iW_f = 0$ porque dV=0	${}_iQ_f = \Delta U$ ${}_iQ_f = mc_v\Delta T$	
ISOBÁRICA (p = constante)	$\frac{V}{T} = constante$ $\frac{V_i}{T_i} = \frac{V_f}{T_f}$	${}_iW_f = -p_i(V_f - V_i)$ $= -p_f(V_f - V_i)$	${}_iQ_f = \Delta U - {}_iW_f$ $= \Delta U + p_i(V_f - V_i)$ $= \Delta H$ $= mc_p\Delta T$	
ISOTÉRMICA (T = constante)	$pV = constante$ $p_iV_i = p_fV_f$	${}_iW_f = -\int_i^f \frac{mrT}{V}dV$ $= -mrT\ln\frac{V_f}{V_i}$ $= -p_iV_i\ln\frac{p_i}{p_f}$ $= -p_fV_f\ln\frac{p_i}{p_f}$	${}_iQ_f = -{}_iW_f$ $= mrT\ln\frac{V_f}{V_i}$ $= p_iV_i\ln\frac{p_i}{p_f}$ $= p_fV_f\ln\frac{p_i}{p_f}$	 $tg\alpha = \frac{dp}{dV} = -\frac{p}{V}$
ADIABÁTICA (Q=0) γ: expoente da adiabática $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1{,}4 = \frac{1005}{718}$	$TV^{\gamma-1} = constante$ $T_iV_i^{\gamma-1} = T_fV_f^{\gamma-1}$ $pV^{\gamma} = constante$ $p_iV_i^{\gamma} = p_fV_f^{\gamma}$ $\boxed{V = \frac{RT}{P}}$ $pT^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = constante$ $p_iT_i^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = p_fT_f^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}$	${}_iW_f = -\int_i^f \frac{cons}{V^{\gamma}}dV$ $= \frac{p_iV_i - p_fV_f}{1-\gamma}$ $= \frac{mr}{1-\gamma}(T_i - T_f)$ $= \Delta U$ $= mc_v\Delta T$	${}_iQ_f = 0$	 $i - f$: adiabática $i' - f$: isotérmica $tg\alpha = \frac{dp}{dV} = -\gamma\frac{p}{V}$
POLITRÓPICA k: expoente da politrópica $k = \infty \Rightarrow$ Isocórica $k = 0 \Rightarrow$ Isobárica $k = 1 \Rightarrow$ Isotérmica $k = \gamma \Rightarrow$ Adiabática	$TV^{k-1} = constante$ $T_iV_i^{k-1} = T_fV_f^{k-1}$ $pV^k = constante$ $p_iV_i^k = p_fV_f^k$ $pT^{\frac{k}{1-k}} = constante$ $p_iT_i^{\frac{k}{1-k}} = p_fT_f^{\frac{k}{1-k}}$	${}_iW_f = -\int_i^f \frac{cons}{v^k}dV$ $= \frac{p_iV_i - p_fV_f}{1-k}$ $= \frac{mc_p}{\gamma}\left(\frac{\gamma-1}{k-1}\right)\Delta T$	${}_iQ_f = \Delta U - {}_iW_f$ $= mc_v\frac{\gamma-k}{1-k}\Delta T$ $= -{}_iW_f\frac{\gamma-k}{\gamma-1}$	

Ciclos Frigoríficos







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

Bomba de Calor: Fornece Calor ($\dot{Q}_A$)
Máquina Frigorifica: Retira Calor ($\dot{Q}_B$)

Tabelas Vapor Saturado: pág. 192-195
Tabelas Vapor Sobreaquecido + LC: pág. 207-216

Efeito Frigorífico: $q = h_2 - h_1$ → Quantidade de calor que uma máquina frigorífica consegue retirar do espaço a refrigerar, por unidade de massa.

Potência Frigorifica: $\dot{Q}_B = \dot{m}(h_2 - h_1)$ → Efeito frigorifico por unidade de tempo.

Potência Requerida: $\dot{W}_C = \dot{m}(h_3 - h_2)$ → Potência que é necessário fornecer ao compressor

Rendimento Frigorifico: $\eta_f = \dfrac{COP_{MF}}{(COP_{MF})_{carnot}}$

$h_1 = h_4 = h'_{Tmax}$

$h_2 = h' + X_2(h'' - h')_{Tmin}$

$X_2 = \dfrac{s_2 - s'}{s'' - s'}$

$h_3 = h''(T_{máx})$

Máquina Frigorifica: $COP_{MF} = \dfrac{|q_B|}{|W_{ciclo}|} = \dfrac{|\dot{Q}_B|}{|\dot{W}_C|}$

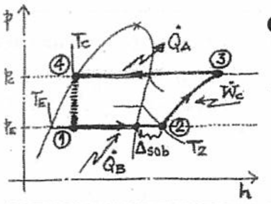
$(COP_{MF})_{carnot} = \dfrac{|q_B|}{|q_A| - |q_B|} = \dfrac{T_B}{T_A - T_B}$

Bomba de Calor: $COP_{BC} = \dfrac{|q_A|}{|W_{ciclo}|} = \dfrac{|\dot{Q}_A|}{|\dot{W}_C|}$

$(COP_{BC})_{carnot} = \dfrac{|q_A|}{|q_A| - |q_B|} = \dfrac{T_A}{T_A - T_B}$

$(COP_{MF})_{carnot} = (COP_{MF})_{carnot} + 1$

Ciclo Frigorifico com SOBREAQUECIMENTO

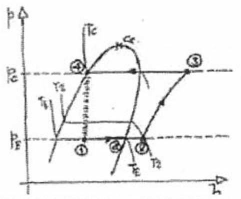


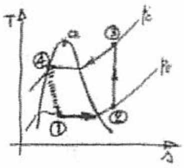
Graus de Sobreaquecimento:

$\Delta_{SOB} = T_{\left(\begin{smallmatrix}Entrada\\ no\\ compressor\end{smallmatrix}\right)} - T_{\left(\begin{smallmatrix}Saturação\\ no\\ Evaporador\end{smallmatrix}\right)}$

$$\Delta_{SOB} = T_2 - T_E$$

Se o sobreaquecimento for **ÚTIL** → Efeito Frigorifico ↗ → COP_{MF} ↗





$T_E = T_{Sat}(p_C)$

Pretende-se uma máquina com a potência $\dot{Q}_B$. Essa potência pode ser obtida com:

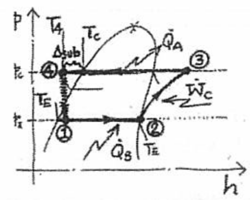
Sobreaquecimento UTIL	Sobreaquecimento INUTIL
$\dot{Q}_B = \dot{m}\,{}_1q_2$	$\dot{Q}_B = \dot{m}'\,{}_1q_a$

$({}_1q_2 = h_2 - h_1 > {}_1q_a = h_a - h_1$

$\dot{m} > \dot{m}'$ | $\dot{m}$ ↙ caudal fluido frigogénio é menor se o sobreaquecimento é útil.

$(CCT)_{MF} = \frac{q_B}{W}\begin{cases}{}_1q_2 > {}_1q_a\\ W = h_3 - h_2\end{cases}$ | $(CCT)_{\substack{MF\\ c/sobreaq\\ util}} > (CCT)_{\substack{MF\\ c/sobreaq\\ inutil}}$

Ciclo Frigorifico com SUB – ARREFECIMENTO

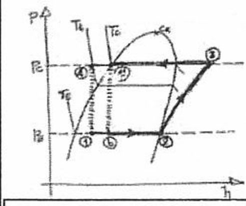


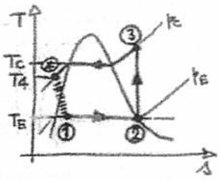
Graus de Sobreaquecimento:

$\Delta_{SUB} = T_{\left(\begin{smallmatrix}Saturação\\ no\\ Condensador\end{smallmatrix}\right)} - T_{\left(\begin{smallmatrix}Entrada\ na\\ Válvula\ de\\ Laminagem\end{smallmatrix}\right)}$

$$\Delta_{SUB} = T_C - T_4$$

Se o sobreaquecimento for **ÚTIL** → Efeito Frigorifico ↗ → COP_{MF} ↗





$T_c = T_{Sat}(p_c)$

Pretende-se uma máquina com a potência $\dot{Q}_B$. Essa potência pode ser obtida com:

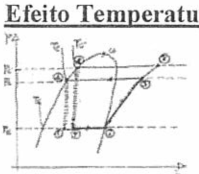
Sub-arrefecimento UTIL	Sub-arrefecimento INUTIL
$\dot{Q}_B = \dot{m}\,{}_1q_2$	$\dot{Q}_B = \dot{m}'\,{}_bq_2$

$({}_1q_2 = h_2 - h_1 > {}_bq_2 = h_2 - h_b$

$\dot{m} > \dot{m}'$ | $\dot{m}$ ↙ c/ aproveitamento do sub-arrefecimento

$(CCT)_{MF} = \frac{q_B}{W}$ | $(CCT)_{\substack{MF\\ Mc/sub-arref\,F\\ util}} > (CCT)_{\substack{MF\\ c/sub-arref\\ inutil}}$

Efeito Temperatura de Evaporação



Sendo $T_0 < T_{0'}$

$\dot{Q}_B = \dot{m}\,{}_1q_2 = \dot{m}(h_2 - h_1)$
$\dot{Q}_B = \dot{m}'\,{}_{1'}q_2 = \dot{m}'(h_2 - h_{1'})$

→ $\dot{m} < \dot{m}'$ → $T_C\downarrow$ $\dot{m}$ ↙

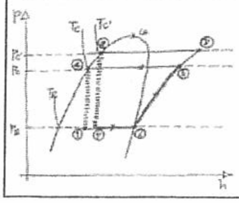
$W = \dot{m}(h_3 - h_2)$
$W' = \dot{m}'(h_{3'} - h_2)$

→ $W < W'$
→ ${}_1q_2 > {}_{1'}q_2$

→ $(CCT)'_{MF} < (CCT)_{MF}$

T_C ↙ $(CCT)_{MF}$ ↗

Efeito Temperatura de Condensação



Sendo $T_0 < T_{0'}$

$\dot{Q}_B = \dot{m}\,{}_1q_2 = \dot{m}(h_2 - h_1)$
$\dot{Q}_B = \dot{m}'\,{}_{1'}q_2 = \dot{m}'(h_2 - h_{1'})$

→ $\dot{m} < \dot{m}'$ → $T_E\uparrow$ $\dot{m}$ ↙

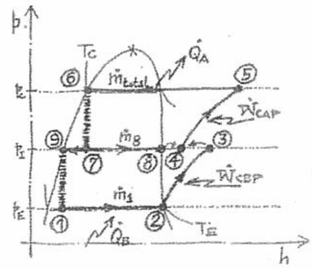
${}_2W_{3'} = \dot{m}(h_{3'} - h_2)$
${}_2W_3 = \dot{m}'(h_3 - h_2)$

→ ${}_2W_{3'} < {}_2W_3$
→ ${}_1q_2 < {}_{1'}q_2$

→ $(CCT)'_{MF} < (CCT)_{MF}$

$T_E\uparrow$ $(CCT)_{MF}$ ↗

Ciclo Frigorifico com compressão em andares

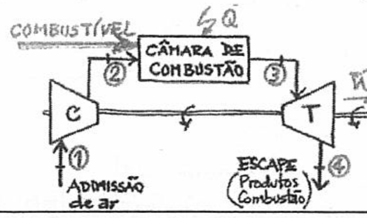


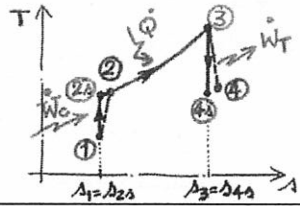
Joule Brayton

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

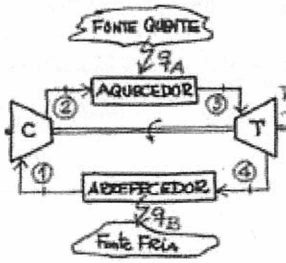
Turbina a gás simples de CICLO Aberto, s/Regeneração

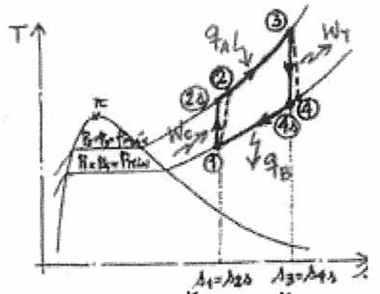
(Utiliza processo de combustão interna)





Turbina a gás simples de CICLO FECHADO.



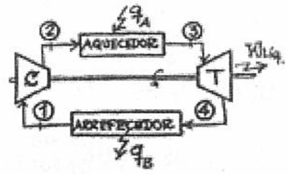


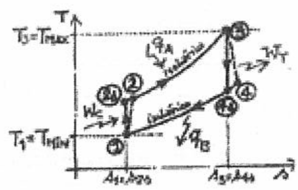
razão de pressão: $r_p = \left(\frac{P_{MAX}}{P_{MIN}}\right)_{ciclo} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{K}{K-1}} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{\frac{K}{K-1}}$

r_p MÁXIMA: corresponde a uma compressão isentrópica que permite atingir a temperatura máxima ($T_{3\,máx}$) $\quad r_{p_{MAX}} = \left(\frac{P_{MAX}}{P_{MIN}}\right)_{Extremas} = \left(\frac{T_{MAX}}{T_{MIN}}\right)_{Extrem}^{\frac{K}{K-1}}$

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

Joule Brayton S/ Regeneração





Rendimento térmico:

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

$$\eta_t = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{1}{r_p}\right)^{\frac{K-1}{K}} \longrightarrow \eta_{MÁX} = 1 - \left(\frac{1}{r_{p_{MAX}}}\right)^{\frac{K-1}{K}} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{máx}}$$

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

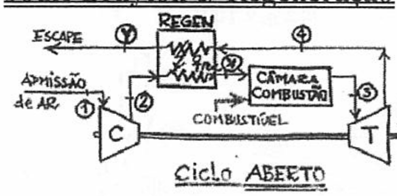
Razão de trabalho:

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

Consumo específico de GÁS

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

Joule Brayton c/ Regeneração



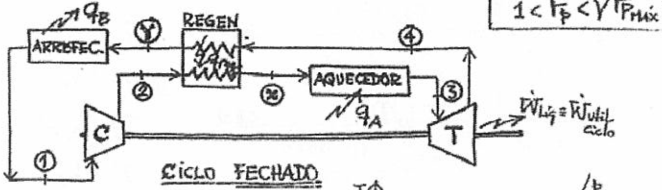
Ciclo ABERTO

para que a REGENERAÇÃO SEJA POSSÍVEL

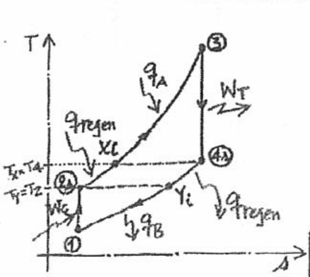
$T_4 > T_2$

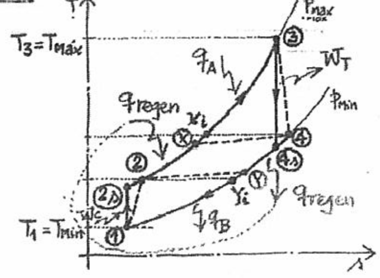
ou

$1 < r_p < \sqrt{r_{p_{MÁX}}}$



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 $T_Y = T_2$

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

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

$$ceg = \frac{3600}{C_p\left[|T_4 - T_3| - |T_2 - T_1|\right]} \left(\frac{kg_{gás}}{kWh}\right)$$

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

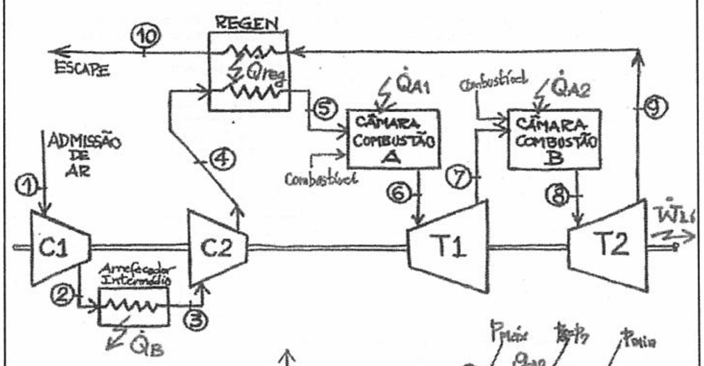
$$\eta_{reg} = \frac{\text{Calor real Transferido}}{\text{Calor Possível de Transferir}} = \frac{h_X - h_2}{h_{X_i} - h_2} = \frac{h_4 - h_Y}{h_4 - h_{Y_i}}$$

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

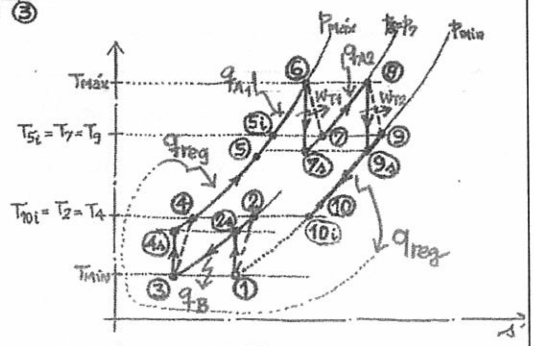
$$\eta_t = \frac{|W_T| - |W_C|}{{}_Xq_3} = \frac{|T_4 - T_3| - |T_2 - T_1|}{|T_3 - T_X|}$$

$r_W = 1 - \frac{|T_2 - T_1|}{|T_4 - T_3|}$; $ceg = \frac{3600}{C_p\left[|T_4 - T_3| - |T_2 - T_1|\right]} \left(\frac{kg_{gás}}{kWh}\right)$

Compressão e/ou Expansão em andares



2 andares de compressão + 2 andares de expansão



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

$\dot{W}_{útil\ ciclo}$ MÁXIMO $\Rightarrow$

- Para MINIMIZAR o trabalho de compressão MANTER A MESMA RAZÃO DE COMPRESSÃO EM CADA ANDAR (de compressão) $\quad \boxed{r_{p_{comp}} = \sqrt[n_c]{r_p}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_4}{P_3}$ $\quad n_c$ – nº compressores
- Para MAXIMIZAR o trabalho de expansão MANTER A MESMA RAZÃO DE EXPANSÃO EM CADA ANDAR (de expansão) $\quad \boxed{r_{p_{turb}} = \sqrt[n_t]{r_p}} = \frac{P_6}{P_7} = \frac{P_8}{P_9}$ $\quad n_t$ – nº de Turbinas

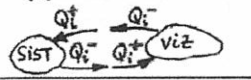
Notar que: $r_p = \left(\frac{P_{max}}{P_{min}}\right)_{extr} = \frac{P_6}{P_9} = \frac{P_4}{P_{10}}$

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]

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



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

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]

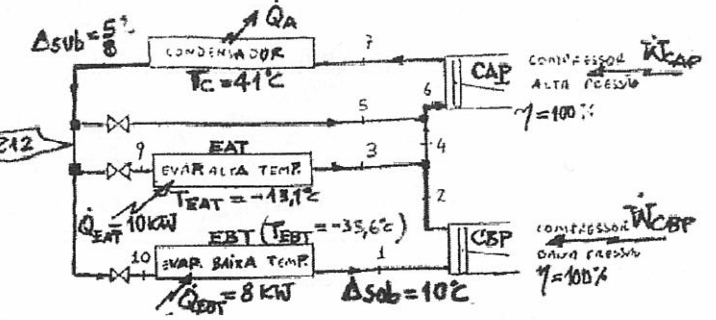
SISTEMA ABERTO (Regime Instacionário)

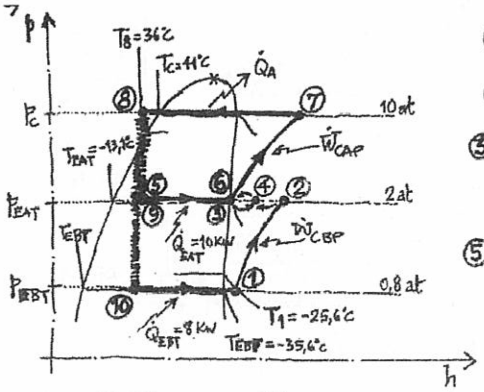
- Conservação de massa: $m_f - m_i = \Sigma(m)_{in} - \Sigma(m)_{out}$ [Kg]
- 1ª lei TMD: ${}_iQ_f + {}_iW_f = \Sigma[m(h+\ldots)]_{out} - \Sigma[m(h+\ldots)]_{in} + [m(u+\ldots)]_f - [m(u+\ldots)]_i$ [J]
- 2ª lei TMD:

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

[J/K]

Volume específico: $v = \frac{V}{m}$ [m³/kg]	Pressão: $p = \frac{F}{A}$ [Pa]	Título: $x = \frac{\text{massa vapor}}{\text{massa total}}$	
Massa volúmica: $\rho = \frac{m}{V}$ [kg/m³]	Energia interna: U [J] Entalpia: $H = U + pV$ [J]	$v = v' + x(v'' - v')$ $s = s' + x(s'' - s')$	$u = u' + x(u'' - u')$ $h = h' + x(h'' - h')$
Equação de estado dos gases perfeitos: $pV = mrT = nRT$	r: constante específica dos gases [J/kg·K]		
Relação de Mayer: $r = c_p - c_v$	R: Constante universal [kJ/kmol·K]		
Calor específico a volume constante: $C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V$ $\left[\frac{J}{K}\right]$	Calor específico a pressão constante: $C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p$ $\left[\frac{J}{K}\right]$		
Trabalho realizado por variação de volume num processo quase-estático: ${}_iW_f = -\int_i^f pdV$ [J]			
A 1ª lei da Termodinâmica aplicada a um sistema fechado: ${}_iQ_f + {}_iW_f = U_f - U_i$	A 1ª lei da Termodinâmica aplicada a um ciclo: $Q_{ciclo} = -W_{ciclo}$		
A 1ª lei da Termodinâmica aplicada a um volume de controlo e a um processo em regime permanente: $\dot{Q} + \dot{W} = \sum\dot{m}_s\left(h_s + \frac{1}{2}c_s^2 + gz_s\right) - \sum\dot{m}_e\left(h_e + \frac{1}{2}c_e^2 + gz_e\right)$	Princípio da conservação da massa aplicado a um volume de controlo e a um processo em regime permanente: $\sum\dot{m}_s = \sum\dot{m}_e$	Equação da Continuidade: $\dot{m} = \rho \times c \times A$	
Rendimento térmico: $\eta = \frac{\text{energia pretendida}}{\text{energia fornecida}}$	Rendimento térmico de uma máquina térmica: $\eta_{MT} = \frac{W}{Q_H}$	Grau de eficácia de uma bomba de calor: $\varepsilon_{BC} = \frac{Q_H}{W}$	Grau de eficácia de uma máquina frigorífica: $\varepsilon_{MF} = \frac{Q_L}{W}$
Rendimento térmico de uma máquina térmica de Carnot: $\eta_{MTC} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$	Grau de eficácia de uma bomba de calor de Carnot: $\varepsilon_{BCC} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$	Grau de eficácia de uma máquina frigorífica de Carnot: $\varepsilon_{MFC} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$	
Desigualdade de Clausius: $\oint\frac{\delta Q}{T} \leq 0$	Entropia: S [J/K]	$\Delta S = \Delta S_e + \Delta S_i = \int_i^f\left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{rev} \geq \int_i^f\frac{\delta Q}{T}$	
Variação da entropia de um gás perfeito: $\Delta S = m\left[c_V\ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right) + r\ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)\right] = m\left[c_p\ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right) - r\ln\left(\frac{p_f}{p_i}\right)\right]$			
Equação de Gibbs: $TdS = dU + pdV = dH - Vdp$	2ª lei da Termodinâmica: $\Delta S_{isolado} = \Delta S_{sist} + \Delta S_{viz} \geq 0$		
2ª lei da Termodinâmica aplicada a um volume de controlo e a um processo em regime permanente: $\sum\dot{m}_s s_s - \sum\dot{m}_e s_e \geq \frac{\dot{Q}}{T_{viz}}$			
Escoamento incompressível em regime permanente reversível, envolvendo trabalho e com energias cinética e potencial desprezáveis: $\dot{W} = \dot{m}v\Delta p$	Escoamento incompressível em regime permanente reversível, trabalho nulo (equação de Bernoulli): $\frac{\Delta p}{\rho g} + \frac{\Delta c^2}{2g} + \Delta z = 0$		
Rendimento isentrópico: $\eta_{MT} = \frac{W_{real}}{W_{ideal}}$ $\eta_{turb} = \frac{W_{real}}{W_{isentrópico}}$	$\eta_{compressor} = \frac{W_{isentrópico}}{W_{real}}$	$\eta_{bocal} = \frac{c^2_{saída\ real}}{c^2_{saída\ isentrópico}}$	





① $\begin{cases} h_1 \\ s_1 \end{cases}$

② $\{ h_2$

③=⑥ $\begin{cases} h_3 = h_6 \\ s_3 = s_6 \end{cases}$

④ $\{ h_4 =$

⑤=⑨ $\{ h_5 = h_9 = h_8$

⑧ $\{ h_8 = h'_{(T_8 = 36°C)}$

⑦ $\{ h_7 =$

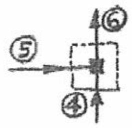
⑩ $\{ h_{10} = h_8$

$\Delta sob = T_1 - T_{EBT} = \longrightarrow T_1 =$

$\Delta sub = T_C - T_8 = \longrightarrow T_8 =$

$$\dot{m}_{Cond} = \dot{m}_6 = \dot{m}_7 = \dot{m}_8 = \begin{cases} \dot{m}_9 = \dot{m}_3 = \\ \dot{m}_{10} = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \end{cases} \Bigg\rangle \begin{matrix} \dot{m}_4 = \\ \dot{m}_5 = \dot{m}_6 - \dot{m}_4 \end{matrix}$$

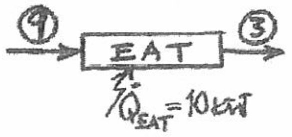
$(COP)_{MF} = (CCT)_{MF}$



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

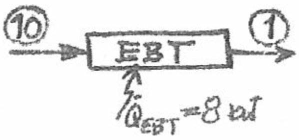
$\cancel{\dot{Q}} + \cancel{\dot{W}} + \dot{m}_6 h_6 = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_4 h_4$ // $\dot{m}_{Cond} = \frac{h_4 - h_5}{h_6 - h_5} \cdot \dot{m}_4$

Cálculo de $\dot{m}_2$ e $\dot{m}_3$



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

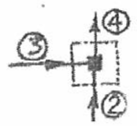
$$\dot{m}_3 = \frac{|\dot{Q}_{EAT}|}{|h_3 - h_9|}$$



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

$$\dot{m}_2 = \frac{|\dot{Q}_{EBT}|}{|h_1 - h_{10}|}$$

Cálculo de $\dot{m}_4$ e h_4



$\dot{m}_4 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$

$\cancel{\dot{Q}} + \cancel{\dot{W}} + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 \Rightarrow h_4 = \frac{\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3}{\dot{m}_4}$

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