DEMEGI
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto.
Rua dos Bragas - 4099 Porto Codex - Portugal — Telefs. 351-2-[illegible] — Fax 318025

Máquinas Térmicas

(parte prática)

1ª Chamada. 1999/07/01 **Duração: 2 horas**

Considere a instalação representada na Figura 1 que opera nas condições indicadas na folha seguinte.

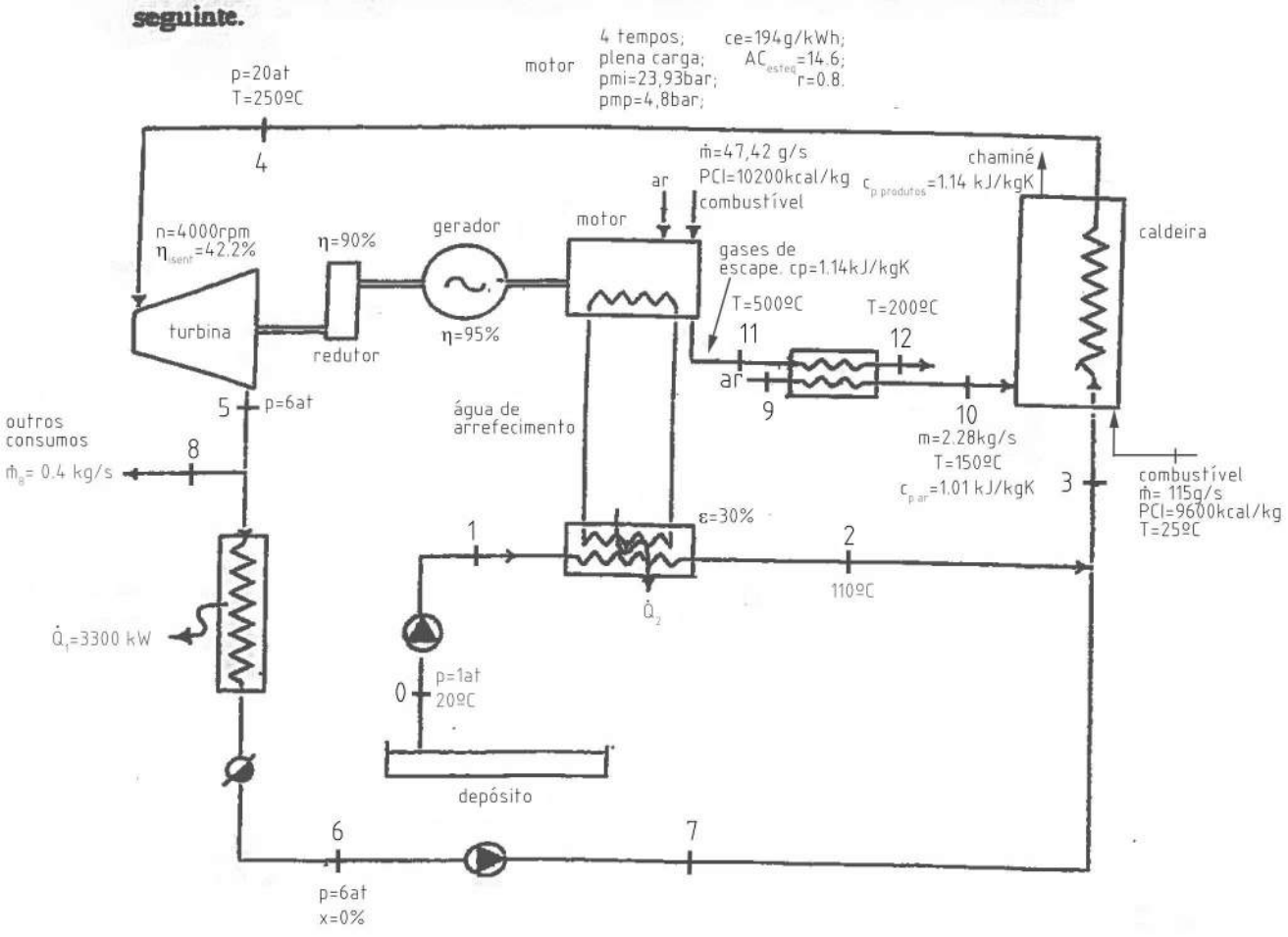
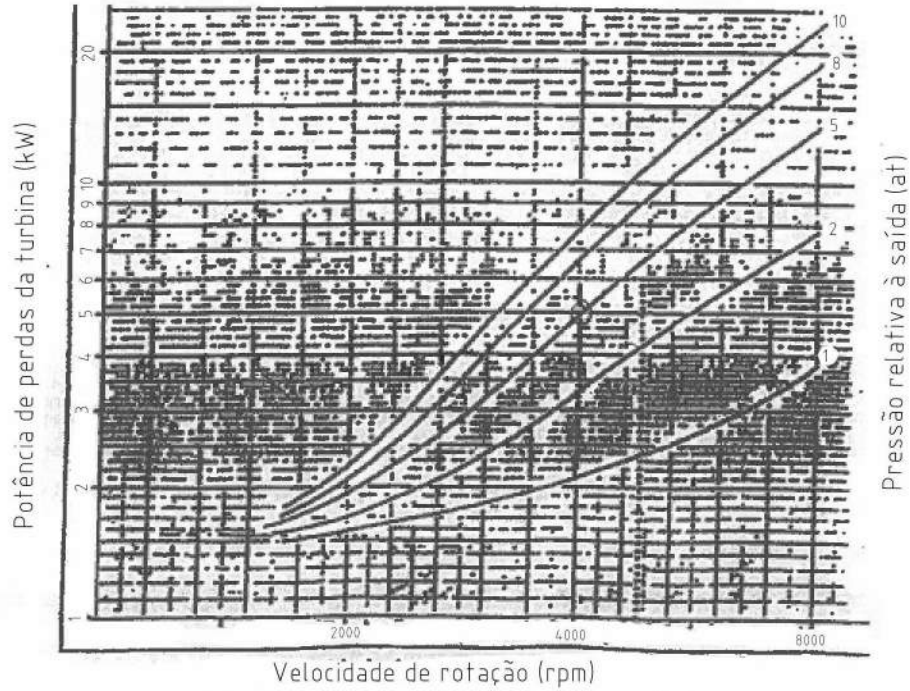


Figura 1

Dados:

0	p= 1at	T = 20 °C	
2		T = 110 °C	
4	p = 20 at	T = 250 °C	
5	p = 6 at		
6	p = 6 at		líquido saturado
Motor Diesel:	4 tempos	plena carga	
	p.m.i. = 23,93 bar	p.m.p. = 4,8 bar	
	combustível:	$\dot{m}_{comb.}$ = 47,42 g/s	
		P.C.I. = 10 200 kcal/kg	
		c.e.c. = 194 g/kWh	
		$(\dot{m}_{ar.} / \dot{m}_{comb.})_{esteq.}$ = 14,6	r = 0,8
	gases de escape:	$Cp_{produtos}$ = 1,14 kJ/(kgK)	T_{11} = 500 °C
			T_{12} = 200 °C
Caldeira:	$\dot{m}_{comb.}$ = 115 g/s	$T_{comb.}$ = 25 °C	P.C.I. = 9 600 kcal/kg
	$\dot{m}_{ar.}$ = 2,28 kg/s	Cp_{ar} = 1,01 kJ/(kgK)	T_{10} = 150 °C
		$Cp_{produtos}$ = 1,14 kJ/(kgK)	
Turbina:	n = 4000 r.p.m.	$\eta_{isen.}$ = 42,2%	$\eta_{mec.}$ ver Fig. 2
Gerador:	$\eta_{ger.}$ = 95%		
Redutor:	$\eta_{red.}$ = 90%		



Nota: Caso queira responder às alíneas sem ser pela ordem proposta, considere os seguintes dados: $\dot{m}_{produtos} = 0.9$ kg/s. $\dot{m}_a = 1.5$ kg/s.

a) (1.5 v) Calcule a potência efectiva, Ne, a pressão média efectiva, p.m.e., e o rendimento mecânico, η_m;

b) (1.5 v) Se para a mesma velocidade de rotação mas a ½ carga a potência indicada for 60% da potência fornecida pelo combustível, qual é o valor do consumo específico ?

c) (1 v) Mostre que, para a mesma velocidade de rotação, o facto do caudal de combustível consumido variar linearmente com a potência efectiva do motor equivale a dizer que o consumo específico calculado com base na potência indicada é constante;

d) (2 v) Se o quociente entre o comprimento da biela e o raio da cambota (l/λ) for igual a 3.5 , calcule o valor da razão entre a velocidade máxima instantânea e a velocidade média do pistão:

e) (1 v) Qual é o caudal de produtos de combustão à saída do motor ?

f) (1.5 v) Calcule o binário aplicado no veio da turbina e a potência eléctrica produzida no gerador;

g) (1 v) Qual é o valor da potência calorífica $\dot{Q}_2$?

h) (1.5 v) Qual é a temperatura dos gases de escape à saída da caldeira ?

i) (1 v) Calcule a eficiência do permutador de aquecimento do ar da caldeira.

Parte Prática

1.

a) $p.m.e. = p.m.i. - p.m.p. = 23,93 - 4,8 = \boxed{19,13 \text{ bar}}$

$$\eta_g = \frac{3600 \times 2000}{Ce \cdot PCI} = \frac{3600 \times 1000}{194 \times (10200 \times 4,1868)} \simeq 0,4345$$

Mas:

$$\eta_g = \frac{N_e}{\frac{\dot{m}_{Comb}}{1000} \times PCI} \Rightarrow \boxed{N_e \simeq 879,96 \text{ kW}}$$

$\frac{\dot{m}_{Comb}}{1000}$ ⇩ 17,92 g/s

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} = \frac{p.m.e}{p.m.i} = \frac{19,13}{23,93} \simeq 0,7994 \simeq \boxed{80\ \%}$$

b) $\frac{1}{2}$ carga $\Rightarrow$ $N_{e_{1/2 \text{ carga}}} = \frac{1}{2} N_{e_{\text{plena carga}}} = 439,98 \text{ kW}$

$$\frac{N_i}{\dot{Q}_1} = \overbrace{\eta_t \cdot \eta_i}^{\eta_g / \eta_m} = 0,60 \Rightarrow \frac{\eta_g}{\eta_m} = 0,60 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{3600 \times 1000}{Ce \cdot PCI} = \eta_m \times 0,60 \Rightarrow Ce \simeq 175,8 \text{ g/s}$$

PCI = $10200 \times 4,1868$

η_m ⇘ $\frac{N_e}{N_i} \simeq 0,7994$

N_i ← Como não sabemos N_i e como o motor roda à mesma velocidade, assumimos que o η_m se mantém

c) $(Ce)_i = \dfrac{\dot{m}_{comb} \cdot 3600}{N_i}$

Se $\dot{m}_{comb} = a \cdot N_e + b$

Para a mesma velocidade de rotação: $\eta_m \simeq cte \Rightarrow$

$\Rightarrow \dfrac{N_e}{N_i} = cte \Rightarrow N_i = \dfrac{N_e}{cte} = \dfrac{a}{cte} N_e + \dfrac{b}{cte}$

Mas:

$$(Ce)_i = \frac{\dot{m}_{comb} \cdot 3600}{N_i} = \frac{(a \cdot N_e + b) \cdot 3600}{\frac{1}{cte} \cdot (a \cdot N_e + b)} = 3600 \cdot cte =$$

$= cte$

C. q. d.

d) $\bar{V} = \dfrac{2 n l}{60}$

$V_{max} = ?$

$V_{inst} = \underbrace{\frac{n}{60} \cdot 2\pi}_{\omega} r \left(\sin\alpha + \frac{\lambda}{l} \sin 2\alpha \right) \Rightarrow$ $r = \frac{l}{2}$

$\frac{1}{\lambda} = 3{,}5 \simeq \lambda = \frac{1}{3{,}5}$

$\Rightarrow \dfrac{dV_{inst}}{d\alpha} = 0 \Rightarrow \dfrac{n}{60} \cdot 2\pi \cdot \dfrac{l}{2} \cdot \left(\cos\alpha + \lambda \cos 2\alpha \right) = 0 \Rightarrow$

vp

$$\Rightarrow \quad \cos\alpha + \frac{1}{3{,}5}\cos 2\alpha = 0 \quad \Rightarrow \quad \alpha \approx 1{,}318 \text{ rad}$$

$$V_{max} = \frac{n}{60} \cdot 2\pi \cdot \frac{l}{2}\left(\operatorname{sen} 1{,}318 + \frac{1}{2}\cdot\frac{1}{3{,}5}\operatorname{sen}(2\times 1{,}318)\right) =$$

$$\simeq \frac{2\,n\,l}{60} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot 1{,}0374$$

$$\frac{V_{max}}{V} = \frac{\left(\frac{2\,n\,l}{60}\right)\cdot\frac{\pi}{2}\cdot 1{,}0374}{\frac{2\,n\,l}{60}} \simeq \boxed{1{,}630}$$

e)

$$\pi = \frac{\left(\dot{m}_{ar}/\dot{m}_{comb}\right)_{st}}{\left(\dot{m}_{ar}/\dot{m}_{comb}\right)_{real}} \Rightarrow \left(\frac{\dot{m}_{ar}}{\dot{m}_{comb}}\right)_{real} = \frac{14{,}6}{0{,}8} = 18{,}25$$

$$\dot{m}_{ge} = \dot{m}_{ar} + \dot{m}_{comb} = 18{,}25\cdot\dot{m}_{comb} + \dot{m}_{comb} = 18{,}25\times 0{,}04742$$

$$+ 0{,}04742 = 0{,}912835 \text{ kg/s} = 912{,}835 \text{ g/s}$$

f)

$$4:\begin{cases} P_4 = 20 \text{ bar} \\ T_4 = 250^\circ C \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} h_4 = 2901{,}871 \text{ kJ/kg} \\ s_4 = 6{,}5502 \text{ kJ/kg K} \end{cases}$$

$$5:\begin{cases} P_5 = 6 \text{ bar} \\ s_{5s} = s_4 = 6{,}5502 \text{ kJ/kg K} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} s_{5s} = (1-x)\,s'_{1{,}8531} + x\cdot s''_{6{,}8283} \Rightarrow x_{5s} \simeq 0{,}9441 \\ h_{5s} = (1-0{,}9441)\,h'_{636{,}813} + 0{,}9441\,h''_{2747{,}217} \simeq \boxed{2629{,}79\ \text{kJ/kg}} \end{cases}$$

VD (7)

$$\eta_{isent,\,turb} \overset{0,422}{=} \frac{h_5 - h_4}{h_{5\lambda} - h_4} \Rightarrow h_5 \cong 2787,054 \text{ kJ/kg}$$

Aplicando a 1ª LTD ao permutador 7:

$$-\dot{Q}_1 \overset{3300\text{ kW}}{+} \cancel{\dot{W}}^{=0} = \dot{m}_6 \cdot h_6 - \dot{m}_\ell h_\ell \overset{h_5}{=} \Rightarrow \dot{m}_6 \cong 1,557 \text{ kg/s}$$

$\dot{m}_\ell = \dot{m}_6$

$\hookrightarrow \begin{cases} P_6 = 6 \text{ at} \\ \text{líq. sat.} \end{cases} \Rightarrow h_6 = 666,957 \text{ kJ/kg}$

Logo,

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_\lambda + \dot{m}_6 = 0,4 + 1,557 = 1,957 \text{ kg/s}$$

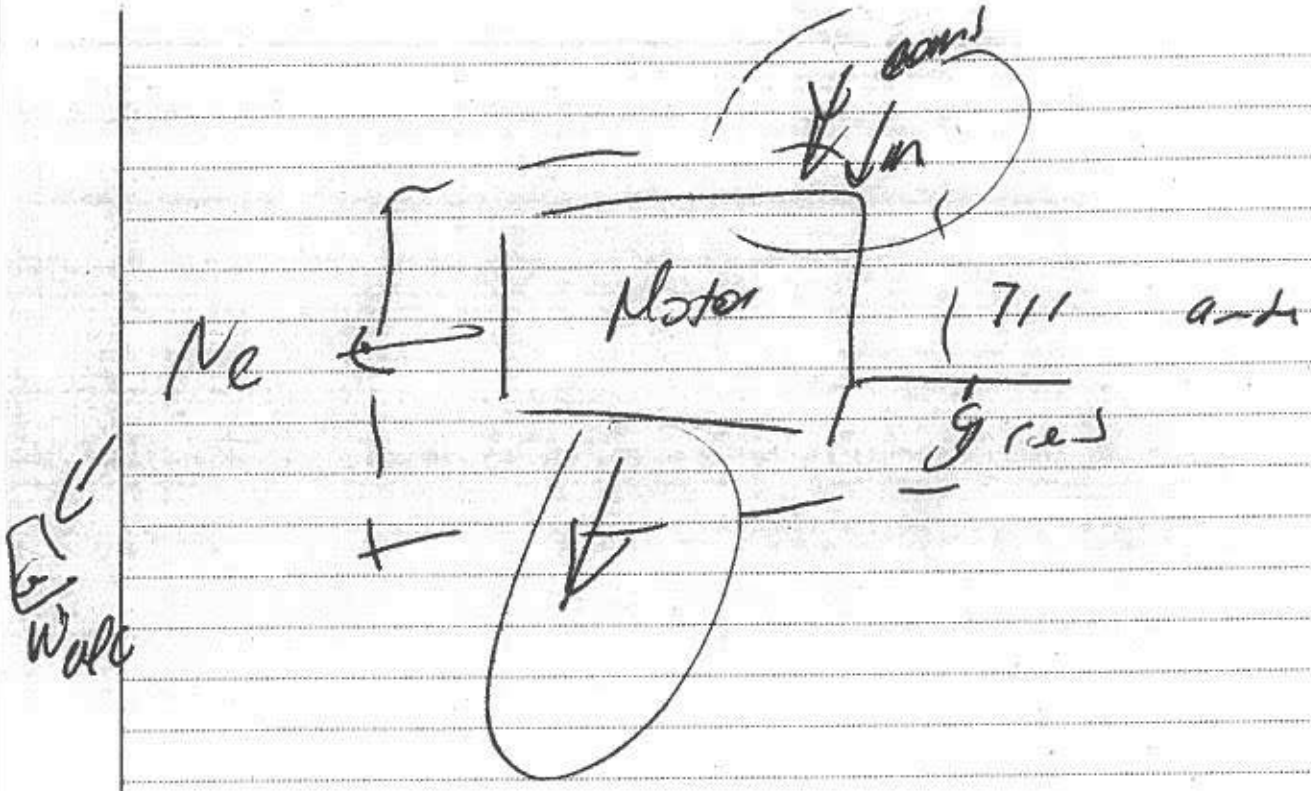
$$\dot{W}_T = \eta_m \cdot \dot{m}_4 \cdot (h_5 - h_4) \qquad \dot{m}_4 = \dot{m}_5$$

$\hookrightarrow$ Figura 2 $\Big|_{p=5\text{ at}} \Rightarrow \dot{W}_{perdas} \cong 5 \text{ kW} \Rightarrow \eta_m = \dfrac{|\dot{m}_4 (h_5 - h_4)| - 5}{|\dot{m}_4 (h_5 - h_4)|}$

$$\dot{W}_{T_{veio}} = |\dot{m}_4 (h_5 - h_4)| - 5 \overset{\dot{m}_4 = 1,957,\ h_5 - h_4 \cong 2901,871}{\cong} 219,697 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{T_{veio}} = B \cdot \frac{n}{60} \cdot 2\pi \overset{n = 4000 \text{ rpm}}{\Rightarrow} B \cong 0,5245 \text{ kN} \cong 524,5 \text{ N}$$

Falta calcular a potência produzida no gerador:



Motor
Ne

$$\dot{W}_e = \eta_{ger.} \cdot \left(\eta_{red.} \cdot \dot{W}_{T,veio} + \underbrace{\dot{W}_{motor,veio}}_{\| \; N_e} \right) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \dot{W}_e = 0{,}95 \times \left(0{,}90 \times 219{,}697 + 879{,}96 \right) \simeq \boxed{1023{,}803 \text{ kW}}$$

g) 1ª LTD aplicada à metade inferior do permutador 2:

Nota: Não consigo ler bem ε = ? Suponho que 80 %

$$\varepsilon \cdot \dot{Q}_2 + \underbrace{\dot{W}_2}_{=0} = \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_1 h_1$$

($\dot{m}_2 = 0{,}4$ kg/s; $\dot{m}_1 = 0{,}4$ kg/s)

$$\hookrightarrow \begin{cases} p_2 = 20 \text{ at} \\ T_2 = 110^\circ C \end{cases} \Rightarrow h_2 = 462{,}432 \text{ kJ/kg}$$

Para h_1:

$$\dot{W}_b = T \underbrace{\Delta s}^{=0} + \int v \, dp = \underbrace{v}_{0{,}001} \left(\underbrace{p_1}_{20 \times 10^2} - \underbrace{p_0}_{1 \times 10^2} \right) = \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_0 h_0 \Rightarrow$$

($\dot{m}_0 = 0{,}4$ kg/s; $4{,}1868 \times 20 \overset{\text{ou}}{=}$ Tabela: 84,155)

$$\Rightarrow 0{,}001 \times (2000 - 100) = 0{,}4 \times h_1 - 0{,}4 \times 84{,}155 \Leftrightarrow h_1 \simeq 88{,}905 \text{ kJ/kg}$$

[Também se podia ir pelas tabelas e calcular h_1 pela igualdade de entropias $s_0 = s_1$]

Então:

$$\underbrace{\varepsilon}_{0{,}80} \cdot \dot{Q}_2 = 0{,}4 \times (462{,}432 - 88{,}905) \Rightarrow \dot{Q}_{2,total} \simeq 186{,}719 \text{ kW}$$

h) Misturador: $\dot{m}_3 = 1{,}957$, $\dot{m}_7 = 1{,}557$, $\dot{m}_2 = 0{,}4\ kg/s$

$$\underbrace{\dot{Q}}_{=0} + \underbrace{\dot{W}}_{=0} = \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_2 h_2$$

$h_2 = 462{,}432$

Para h_7:

$$\dot{W}_{bomba\ 2} = \int \cancel{T\,ds}^{=0} + v(p_7 - p_6) = \dot{m}_6 (h_7 - h_6) \quad (*)$$

$\dot{m}_6 = 1{,}557$; $v = 0{,}001$; $p_7 = 20 \times 10^2$; $p_6 = 6 \times 10^2$; $h_6 = 666{,}957$

$$\Leftrightarrow h_7 \simeq 667{,}856\ kJ/kg$$

Logo:

$$0 = 1{,}957\, h_3 - 1{,}557 \times 667{,}856 - 0{,}4 \times 462{,}432 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow h_3 \simeq 625{,}868\ kJ/kg$$

Caldeira:

$$\underbrace{\dot{Q}_{cald}}_{\simeq 0} + \underbrace{\dot{W}}_{=0} = \dot{m}_{gases}\, c_{p\,prod} \left(T_{Prod} - T_0 \right) + \dot{m}_4 h_4 +$$

$\dot{m}_{gases} = 0{,}115 + 2{,}28$; $c_{p\,prod} = 1{,}14$; $T_0 = 25^\circ C$; $\dot{m}_4 = 1{,}957$; $h_4 = 2901{,}871$

(considerando a adiabática)

$$+ \dot{m}_{comb} \cdot \underbrace{\Delta h_0}_{-PCI = -9600 \times 4{,}1868} - \dot{m}_{comb} \cdot c_{comb} \cdot \left(T_{comb} - T_0 \right) - \dot{m}_{ar}\, c_{p\,ar} \left(T_{10} - T_0 \right) -$$

$\dot{m}_{comb} = 0{,}115$; $T_{comb} = 25$; $T_0 = 25$; $\dot{m}_{ar} = 2{,}28$; $c_{p\,ar} = 1{,}01$; $T_{10} = 150$; $T_0 = 25$

$$- \dot{m}_3 h_3$$

$\dot{m}_3 = 1{,}957$; $h_3 = 625{,}868$

$$\Rightarrow \boxed{T_{prod} \simeq 192^\circ C}$$

$$\dot{Q} + \cancel{\dot{W}}^{=0} = \dot{m}_{12}\, c_{p_{prod}}\, T_{12} + \dot{m}_{10}\, c_{p_{ar}}\, T_{10} - \dot{m}_{11}\, c_{p_{prod}}\, T_{11} -$$

$$- \dot{m}_9\, c_{p_{ar}}\, T_9 \quad (=)$$

↳ Asumm $T_9 = 25^\circ C$

$$\Leftrightarrow \dot{Q} = 0{,}912835 \times 1{,}14 \times 200 + 2{,}28 \times 1{,}01 \times 150 -$$

$$- 0{,}912835 \times 1{,}14 \times 500 - 2{,}28 \times 1{,}01 \times 25 \quad (\Rightarrow) \boxed{\dot{Q} \simeq -24{,}340\ kW}$$

$$\varepsilon = \frac{h_{10} - h_9}{h_{11} - h_9} = \frac{c_{p_{ar}} \cdot (T_{10} - T_9)}{c_{p_{prod}} \cdot T_{11} - c_{p_{ar}} \cdot T_9} \simeq 0{,}232 = \boxed{23{,}2\,\%}$$

1999/07/01

1 c) $p_{me} = p_{mi} - p_{mf} \Leftrightarrow p_{me} = 19,13$ bar

$\eta_m = \frac{p_{me}}{p_{mi}} = 0,799$

$C_e = \frac{\dot{m}}{N_e} 3600 \Leftrightarrow N_e = 879,96$ kW

b) $\eta_m(50\%) = \frac{p_{me}}{\frac{p_{me}}{2} + p_{mi}} = 0,66585$

$\eta_g = \eta_t \cdot \eta_i \cdot \eta_m \Leftrightarrow \eta_g = 0,6\,\eta_m \Leftrightarrow \eta_g = 0,39951$

$\eta_t \cdot \eta_i = \frac{N_i}{\dot{Q}_1} = 0,6\,\frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_1}$

$N_i = 0,6\,\dot{Q}_1$

$\eta_g = \frac{3600 \times 1000}{C_e \cdot 10200 \times 4,1868} \Leftrightarrow C_e = 211$ g/kWh

$\dot{Q}_1 = 2025,1$ kW

c) $N_e = \text{const}$

$C_e = \frac{\dot{m}}{N_e} 3600 \Leftrightarrow \dot{m} = \frac{C_e}{3600} \cdot N_e$ (const)

$C_{ei} = \dot{m} \cdot \frac{3600}{N_i} = \frac{C_e}{3600} \cdot N_e \cdot \frac{3600}{N_i}$

$C_{ei} = C_e \cdot \frac{\eta_m}{\text{const}}$ (const)

$\dot{m}_s = \dot{m}_c + \dot{m}_s$

$= 7,9467 \ kg/kg$

$\dot{W}_T = 192,14 \ kW$

$\dot{W}_T = B \cdot \omega \iff B = \dfrac{\dot{W}_T}{\frac{2\pi n}{60}} \iff B = 0,4587 \ kNm$

$\dot{W}_{eff} = (1 \ N_e + \dot{W}_T \ \eta_{red}) \ \eta_{gen}$

$= (879,96 + 192,14 \cdot 0,8) \ 0,95$

$= 1 \ MW$

g) $\dot{Q}_c = m_{eg} \cdot c_{p\,eg} \cdot \Delta T$

$= 0,4 \cdot 4,1868 \cdot 90 = 150,72 \ kW$

h)