Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
FEUP
DEMEGI
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Máquinas Térmicas
(parte prática)

Recurso, 19/07/2004 — **Duração: 2 horas**

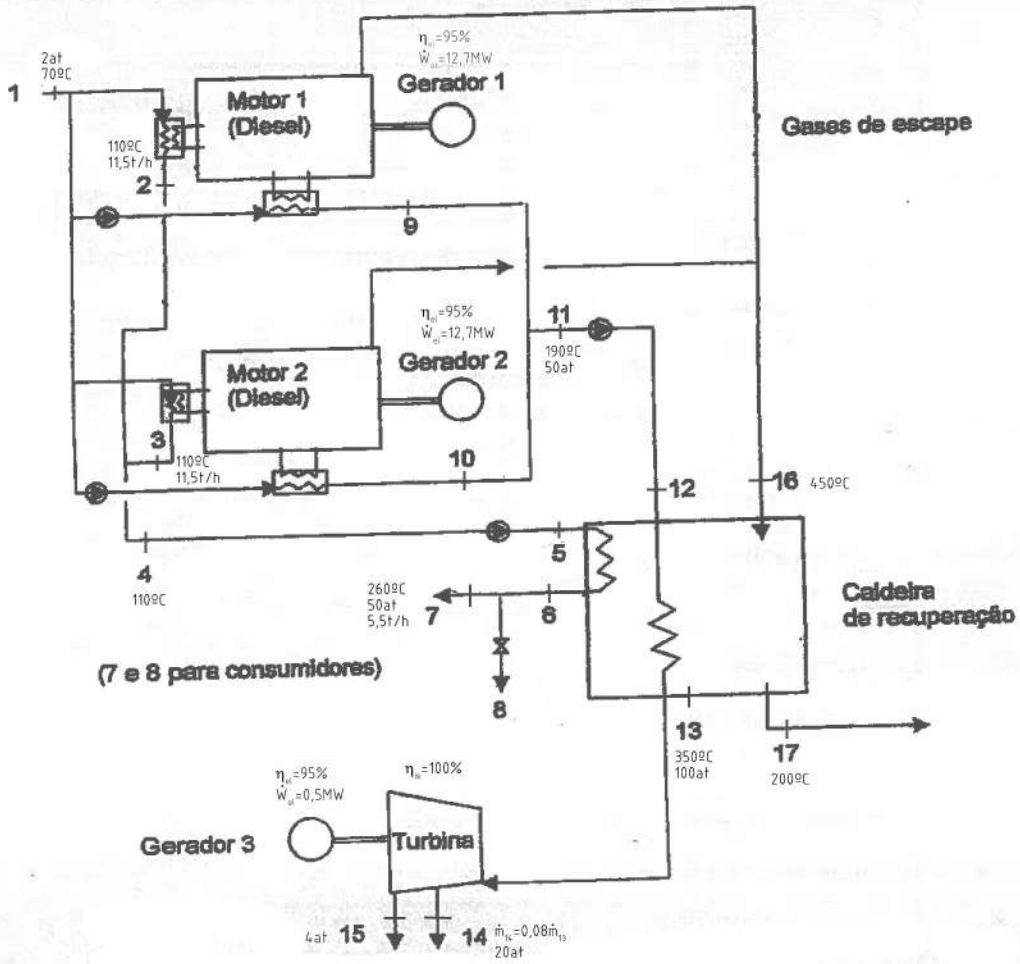
1. A figura representa uma instalação de cogeração que opera nas condições indicadas na tabela que se lhe segue.

motores
4 tempos
10 cilindros
n=1800rpm
pme=1400kPa
$\dot{W}_p$=2000kW

combustível
AC_{esteq}=14,6
PCI=10775kcal/kg
ρ_{comb}=850kg/m³
V/(cilindro×ciclo)=5,8cm³

ar de admissão
T=30ºC
p=1,4at

Produtos
XCO_2=9%
XCO=1%
XO_2=2,6%
c_p=1,2kJ/kgK



Caso não tenha resolvido alíneas anteriores cujos resultados sejam relevantes para a resolução de alíneas subsequentes, considere:

$$r = 0{,}9,\ \dot{m}_{comb} = 0{,}74 \text{ kg/s/motor},\ \dot{m}_{13} = 1{,}6 \text{ kg/s}$$

Água	1		2 at, 70ºC
	2		110 ºC, 11,5 t/h
	3		110 ºC, 11,5 t/h
	4		110ºC
	7		50 at, 260ºC, 5,5 t/h
	11		50 at, 190 ºC
	13		100 at, 350 ºC
	14		20 at, $\dot{m}_{14} = 0{,}08\ \dot{m}_{13}$
	15		4 at
Motor 1 (com turbo compressor) = Motor 2 (com turbo compressor)	4 tempos	10 cilindros	n = 1800 rpm
	p.m.e.=1400 kN/m^2	Pot. Perdas (Np) = 2 MW	
	Combustível – $(m_{ar}/m_{comb})_{est.}$ = 14,6	P.C.I. = 10775 kcal/kg	$\rho_{comb.}$=850 kg/m^3
	Volume de combustível injectado = 5,8 cm^3 /(cilindro*ciclo)		
	Ar de admissão a 30 ºC	Pressão relativa do ar de admissão = 0,4 at	
	Análise de Orsat	X_{CO2}=9%, X_{CO}=1%, X_{O2}=2,6%	
		Cp produtos de combustão = 1,2 kJ/kgK	T_{16} = 450ºC T_{17} = 200ºC
Turbina	η_{is}=100%		
Gerador 1	η_{ger}=95%	$W_{elétrico}$ = 12,7 MW	
Gerador 2	η_{ger}=95%	$W_{elétrico}$ = 12,7 MW	
Gerador 3	η_{ger}=95%	$W_{elétrico}$ = 0,5 MW	

Determine, para os motores:

a) (1,5 v) a riqueza da mistura;

b) (1,5 v) o rendimento global;

c) (1,0 v) o trabalho indicado por cilindro e por ciclo;

d) (2,0 v) o rendimento volumétrico.

Determine, para a turbina de vapor:

e) (2,0 v) o caudal de vapor de admissão na turbina, ponto13;

f) (2,0 v) a potência de perdas.

Calcule, para a instalação:

g) (1,0 v) o rendimento eléctrico (efeito útil é apenas as potências eléctricas);

h) (1,0 v) a potência fornecida aos consumidores.

Parte Prática

a) $\lambda = \dfrac{\left(\dot{m}_{ar}/\dot{m}_{comb}\right)_{est}}{\left(\dot{m}_{ar}/\dot{m}_{comb}\right)_{real}} = 14,6$

$\dot{m}_{comb} = 850 \times 5,8 \times 10^{-6} \times 10 \times \dfrac{\frac{n''}{2}}{A \cdot 60} = 0,7395 \text{ Kg/s / motor}$ (1800)

→ O prof. disse que se resolvia assim: (Em tinha feito por $(CO)_{ed}$

$C_x H_y + a\left(x + \frac{y}{4}\right)\left(O_2 + 3,76\, N_2\right) \rightarrow n_1 CO_2 + n_2 CO +$

$+ n_3 O_2 + n_4 N_2 + n_5 H_2O$

Bal C: $x = n_1 + n_2$

Bal H: $y = 2 n_5$

Bal O: $a\left(x + \frac{y}{4}\right) = 2n_1 + n_2 + 2n_3 + n_5$

Bal N: $a\left(x + \frac{y}{4}\right) 3,76 = 2 \cdot n_4$

$\Rightarrow$ (...)

$X_{CO_2}: \dfrac{n_1}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4} = 0,09$

$X_{CO}: \dfrac{n_2}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4} = 0,01$

$X_{O_2}: \dfrac{n_3}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4} = 0,026$

$X_{N_2}: \dfrac{n_4}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4} = 1 - 0,09 - 0,01 - 0,026$

b) $\eta_g = \frac{N_e}{\dot{Q}_{=\dot{m}_{comb} \cdot PCI}}$

$\dot{W}_{ger\ I} = \eta_{ger\ I} \cdot N_{e\ mot.\ I} \Rightarrow 12\,700 = 0{,}95\ N_e \Rightarrow N_e \tilde{=} 13\,368{,}4$ kW

Os motores são iguais e operam nas mesmas circunstâncias.

$\eta_g = \frac{13\,368{,}42}{0{,}7395 \times (10\,775 \times 4{,}1868)} \tilde{=} 0{,}401 = 40{,}1\ \%$

c) $N_i = N_e + N_p = 13\,368{,}42 + 2000 = 15\,368{,}42$ kW

$N_i = \frac{W_i}{\text{trabalho indicado por cilindro e por ciclo}} \cdot i \cdot \frac{n}{A \cdot 60} \Rightarrow 15\,368{,}42 = W_i \times 10 \times \frac{1800}{2 \times 60} \Leftrightarrow$

$\Leftrightarrow W_i = 102{,}456$ kJ/cilindro · ciclo

d) $\eta_V = \frac{\dot{V}_{ar}}{\frac{\pi d^2}{4} l \cdot i \times \frac{n}{A\,60}}$

$\left(\frac{\dot{m}_{ar}}{\dot{m}_{comb}}\right)_{real} = \frac{\left(\dot{m}_{ar}/\dot{m}_{comb}\right)_{est}}{\lambda} = \frac{14{,}6}{0{,}9} = 16{,}(2) \Rightarrow$ (vou usar 0,7395)

$\Rightarrow \dot{m}_{ar} = 16{,}(2) \times \dot{m}_{comb} \tilde{=} 11{,}996$ kg/s

$$P_{adm} = \rho_{ar} \cdot R\, T_{ar} \Rightarrow 1{,}4 \times 98066{,}5 = \rho_{ar} \times 287 \times (30 + 273{,}15) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \rho_{ar} \simeq 1{,}578 \ kg/m^3$$

$$\dot{V}_{ar} = \frac{\dot{m}_{ar}}{\rho_{ar}} \simeq 7{,}602 \ m^3/s$$

Por outro lado:

$$N_i = P \cdot m \cdot l \cdot \frac{\pi}{4} d^2 l \cdot i \cdot \frac{n}{A \cdot 60} \Rightarrow \frac{\pi d^2}{4} l \cdot i \frac{n}{A\,60} = \frac{N_i}{P \cdot m \cdot l} =$$

$$\simeq 9{,}5489 \ m^3/s$$

$$\eta_v = \frac{7{,}602}{9{,}5489} \simeq 0{,}796 = 79{,}6\ \%$$

l)

$$4: \begin{cases} P_4 = P_3 = P_2 = P_1 = 2\ at \\ T_4 = T_3 = T_2 = 110^\circ C \end{cases} \Rightarrow h_4 = h_3 = h_2 \equiv 461{,}386 \ kJ/kg$$

$$h_5 - h_4 = \int T \overbrace{ds}^{=0} + \overbrace{v}^{0{,}001} \times 98{,}0665 \times (\overbrace{P_5}^{50} - \overbrace{P_4}^{2}) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow h_5 \simeq 466{,}093 \ kJ/kg$$

$$h_6 = h_7$$

$$\hookrightarrow 7: \begin{cases} P_7 = 50\ at \\ T_7 = 260^\circ C \end{cases} \Rightarrow h_7 \simeq 1135{,}041 \ kJ/kg = h_6$$

$$11: \begin{cases} P_{11} = 50 \text{ at} \\ T_{11} = 190°C \end{cases} \Rightarrow h_{11} = 808{,}890 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{12} - h_{11} = 0{,}001 \times 98{,}0665 \times (100 - 50) \Rightarrow h_{12} \cong 813{,}793 \text{ kJ/kg}$$

$$13: \begin{cases} P_{13} = 100 \text{ at} \\ T_{13} = 350°C \end{cases} \Rightarrow h_{13} = 2926{,}573 \text{ kJ/kg}$$

1ª LTD à cald. recup.

$$\underbrace{\dot{Q}}_{\simeq 0} + \underbrace{\dot{W}}_{=0} = \dot{m}_{13} h_{13} + \dot{m}_{17} \overset{c_{p,prod} T_{17}}{h_{17}} + \underset{\dot{m}_2 + \dot{m}_3 = 2 \times \frac{11{,}5 \times 1000}{3600}}{\dot{m}_6} h_6 - \dot{m}_5 h_5 -$$

$$- \overset{\dot{m}_{13}}{\dot{m}_{12}} h_{12} - \overset{\dot{m}_{17}}{\dot{m}_{16}} \overset{c_{p,prod} \cdot T_{16}}{h_{16}}$$

$$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{16} = \dot{m}_{gases} = 2 \times \left[\overset{11{,}996}{\dot{m}_{ar}} + \overset{0{,}7395}{\dot{m}_{comb}} \right] = 25{,}471 \text{ kg/s}$$

Logo:

$$\dot{m}_{13} = 1{,}594 \text{ kg/s}$$

2) Vejamos a análise da turbina:

$$\dot{W}_{T,veio} = \frac{\dot{W}_{ger\,3}}{\eta_{ger\,3}} = \frac{0,5}{0,95} = 0,5263\ MW \equiv 526,3\ kW$$

$$\dot{W}_T + \cancel{\dot{Q}}^{\approx 0} = \dot{m}_{14} h_{14} + \dot{m}_{15} h_{15} - \dot{m}_{13} h_{13}$$

$$\frac{\dot{W}_{T,veio}}{\eta_m}$$

14 s: $\begin{cases} P_{14} = 20\ at \\ s_{14s} = s_{13} = 5,9582\ kJ/kg\,K \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} s_{14s} = (1-x)\,s_L + x\,s_v \Rightarrow x \approx 0,90 \\ h_{14s} = (1-x)\,h_L + x\,h_v \Rightarrow \end{cases}$

($s_L = 2,4376$, $s_v = 6,3476$, $x = 0,90$)

$$\Rightarrow h_{14s} \approx 2610,157\ kJ/kg$$

15 s: $\begin{cases} P_{15} = 4\ at \\ s_{15s} = s_{13} = 5,9582\ kJ/kg \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} s_{15s} = (1-x)\,s_L + x\,s_v \Rightarrow x \approx 0,8148 \\ h_{15s} = (1-x)\,h_L + x\,h_v \Rightarrow \end{cases}$

($s_L = 1,7993$, $s_v = 6,9137$)

$$\Rightarrow h_{15s} \approx 2342,244\ kJ/kg$$

$\eta_{isent} = 70\%$

$$\eta_{isent} = \frac{h_{14} - h_{13}}{h_{14s} - h_{13}} \Rightarrow h_{14} = h_{14s} \wedge h_{15s} = h_{15}$$

Então:

$$-\frac{526,3}{\eta_m} = 0,08\,\dot{m}_{13}\,(2610,157) + 0,92\,\dot{m}_{13}\,(2342,244) - \dot{m}_{13}\,(2926,573)$$

($\dot{m}_{14} = 0,08\,\dot{m}_{13}$, $\dot{m}_{15} = 0,92\,\dot{m}_{13}$, $\dot{m}_{13} = 1,594$)

$$\Rightarrow \eta_m \approx 0,587 = 58,7\ \%$$

$$\eta_m = \frac{\dot{W}_{T,veio}}{\dot{W}_{T,veio} + \dot{W}_{Perdas}} \Rightarrow \dot{W}_{Perdas} \approx 370,940\ kW$$

g)

$$\eta_{elétrico} = \frac{\dot{W}_{ger\,1} + \dot{W}_{ger\,2} + \dot{W}_{ger\,3}}{(\dot{m}_{comb} \cdot PCI) \times 2 + \dot{W}_{bombas}}$$

$$\dot{W}_{bombas} = \left[\frac{1,594}{2} \times 0,001 \times 98,0665 \times (50 - 2) \right] \times 2 +$$

$$+ 1,594 \times 0,001 \times 98,0665 \times (100 - 50) + \frac{2 \times 11,5 \times 1000}{3600} \times 98,0665 \times (50 - 2) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \dot{W}_{bombas} \simeq 30\,089,046 \text{ KW}$$

Logo:

$$\eta_{elétrico} = \frac{12700 \times 2 + 500}{(0,7395 \times 10775 \times 4,1868) \times 2 + 30\,089,046} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \eta_{elétrico,\,instalação} \simeq 0,2675 \simeq 27\,\%$$

h)

$6 \rightarrow 7$
$\searrow 8$

$$h_8 = h_{ent\ válvula} = h_6 = h_7 = 1135,041 \text{ KJ/kg}$$

$$\underbrace{\dot{Q}}_{=0} + \underbrace{\dot{W}}_{=0} = \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_6 h_6 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \dot{m}_6 h_6 = \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_7 h_7$$

No caso de 15 e 14:

$$\dot{m}_{15} h_{15} + \dot{m}_{14} h_{14}$$

Logo, se desprezarmos a energia cinética e a potencial.

$$\dot{W}_{\text{fornecida aos consumidores}} = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{15} h_{15} + \dot{m}_{14} h_{14} =$$

($\frac{2 \times 11,5 \times 1000}{3600}$ = 0,92 $\dot{m}_{13}$ = 0,08 $\dot{m}_{13}$)

$$\cong 10\,895,317 \text{ KW}$$