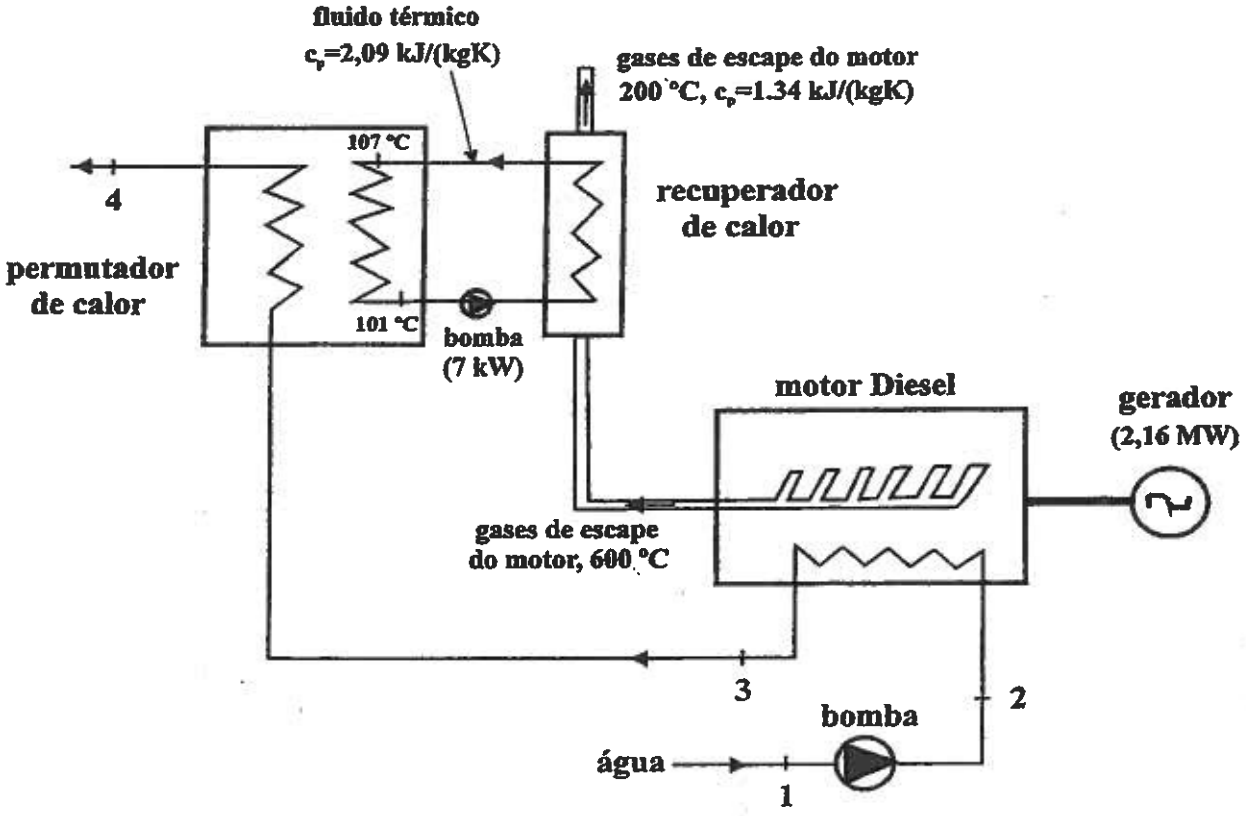
DEMEGI
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
Faculdade Engenharia, Universidade do Porto.
Rua dos Bragas - 4099 Porto Codex - Portugal — Telefs. 351-2-2003628-2007505-2041752 — Fax 319125

Máquinas Térmicas

(parte prática)

1ª Chamada, 1997/07/02 — Duração: 2 horas

1) A figura representa esquematicamente uma instalação de cogeração, indicando-se algumas condições de operação.



Conhecem-se os dados seguintes:

Motor Diesel:

4 T, 6 cilindros, l = 420 mm, ϕ = 320 mm

Velocidade média do pistão = 8,4 m/s

Pressão média de perdas = 3,95 bar

P.C.I. = 11 077 kcal/kg

ciclo teórico, δ = 1,6 , ρ = 1,1 , ε = 20

(Pot. não queimados + Pot. irradiada) = 680 kW

c_p produtos = 1,34 kJ/(kgK)

η_{global} = 38%

$\eta_{volumétrico}$ = 94%

Condições de admissão do ar nos cilindros:

P = 1,9 at , T = 35 °C

Circuito de água:

1 - 2 at, 74 °C,

2 - 3 at

3 - 3 at, 81,3 °C

4 - 3 at

c_p = 4,1868 kJ/(kgK)

Gerador:

η_g = 98%

Potência eléctrica = 2,16 MW

Condições ambiente:

1 atm, 25 °C

Calcule:

a) (2 v) a velocidade de rotação do motor, pressão média indicada, binário resistente e rendimento indicado;

b) (1 v) o valor estimado para a potência indicada do motor, se a velocidade de rotação fôr a da alínea a) e a carga fôr nula;

c) (1 v) a massa de combustível introduzida dentro de cada cilindro em cada injecção;

d) (1,5 v) o caudal mássico de ar introduzido no motor e o valor aproximado da riqueza da mistura;

e) (1,5 v) a potência calorífica fornecida à água de arrefecimento do motor, $_2\dot{Q}_3$;

f) (1,5 v) a potência calorífica trocada no permutador;

g) (1,5 v) a temperatura de saída da água, T_4, e o rendimento da instalação;

h) (1 v) a eficiência do permutador.

NOTA: Caso não tenha calculado todas as alíneas e necessite de alguns valores não calculados, admita os valores seguintes:

N = 600 rpm, $\dot{m}_{ar}$ = 1,9 kg/s, $_2\dot{Q}_3$ = 1 200 kW, $\dot{Q}_{permutador}$ = 1 220 kW.

2) Um compressor tem um volume residual igual a 6% do volume deslocado, e comprime ar entre 1 at, pressão de admissão, e 5 at, pressão relativa de descarga.

(1 v) Calcule a variação percentual verificada no caudal admitido quando o expoente da evolução politrópica de compressão varia de 1,3 para 1,2 .

EXAME 97/07/02

1.

a. n ?

$$\bar{V} = \frac{2ln}{60} \rightarrow 8,4 = \frac{2 \times 0,420 \times n}{60} \rightarrow n = 600 \text{ rpm}$$

p_{mi} ?

$$p_{mi} = p_{me} + p_{mp} = 2171 \times 10^3 + 3,95 \times 10^5 = 2566 \times 10^3 \text{ Pa} = \underline{\underline{2566 \text{ kPa}}}$$

$$N_e = p_{me} \frac{\pi d^2}{4} L \cdot i \cdot \frac{n}{60A}$$

N_e ?

$$\eta_{GER} = \frac{\dot{W}_{ELECT}}{\underbrace{\dot{W}_{VEIO}}_{N_e}} \rightarrow N_e = \frac{2,16}{0,98} \simeq 2,20 \text{ MW}$$

$$2,20 \times 10^3 = p_{me} \frac{\pi \cdot 0,320^2}{4} \times 0,420 \times 6 \times \frac{600}{60 \cdot 2}$$

$p_{me} \simeq 2171 \text{ kPa}$

BINÁRIO ?

$$N_e = \text{BINÁRIO} \times \omega \Rightarrow 2,20 \times 10^3 = \text{BINÁRIO} \times \frac{2\pi 600}{60}$$

$$\text{BINÁRIO} \simeq \underline{\underline{35,0 \text{ kN.m}}}$$

η_i = ?

$$\eta_G = \eta_t \cdot \eta_i \cdot \eta_m \rightarrow \eta_i = \frac{\eta_G}{\eta_t \cdot \eta_m}$$

η_t = ?

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}} \cdot \frac{\rho\delta^{\gamma} - 1}{(\rho-1) + \gamma\rho(\delta-1)} = 1 - \frac{1}{20^{0,4}} \cdot \frac{1,1 \times 1,6^{1,4} - 1}{(1,1-1) + 1,4 \times 1,1 \times (1,6-1)}$$

$\gamma \simeq 1,4$

$\simeq 0,669 = 66,9\ldots$

η_m ?

$$\eta_m = \frac{pme}{pmi} = \frac{2171}{2566} = 0,846 = 84,6\%$$

$$\therefore \eta_i = \frac{0,38}{0,846 \times 0,669} \simeq 0,671 = 67,1\%$$

b. N_i ?

CARGA NULA: → $pmi = pmp$

$$N_i = pmi \frac{\pi d^2}{4} l . i \frac{n}{60.A} = 3,95 \times 10^5 \times \frac{\pi \times 0,320^2}{4} . 0,420 \times 6 \times \frac{600}{60 \times 2}$$

$$N_i \simeq 400,3 \text{ kW}$$

c. $\dot{m}_{COMB/ciL/ciclo}$?

$$\dot{m}_{COMB/ciL/ciclo} = \frac{\dot{m}_{COMB}}{i . \frac{n}{60A}} = \frac{0,125}{6 . \frac{600}{60 \times 2}} \simeq 4,17 \times 10^{-3} \text{ kg} = 4,17 \text{ g}$$

$\dot{m}_{COMB}$?

$$\eta_G = \frac{Ne}{\dot{m}_{COMB} . PCI} \rightarrow 0,38 = \frac{2,20 \times 10^3}{\dot{m}_{COMB} . 11077 \times 4,1868}$$

$$\dot{m}_{COMB} = 0,125 \text{ kg/s}$$

d. $\dot{m}_{ae}$?

$\dot{m}_{ae} = \rho_{ae}\ \dot{V}_{ae}$

ρ_{ae} ?

$$p = \rho RT \rightarrow \rho_{AR} = \frac{P}{RT} = \frac{1,9 \times 9,8 \times 10^4}{287 \times (273,15+35)} \simeq 2,105\ kg/m^3$$

$\dot{V}_{ae}$?

$$\eta_V = \frac{\dot{V}_{AR}}{\text{CILINDRADA} \cdot \frac{n}{60A}} \Rightarrow 0,94 = \frac{\dot{V}_{ar}}{\frac{\pi \cdot 0,320^2}{4} \cdot 0,420 \times 6 \times \frac{600}{60 \times 2}}$$

$$\text{CILINDRADA} = \frac{\pi d^2 l \cdot i}{4}$$

$$\dot{V}_{AR} \simeq 0,952\ m^3/s$$

$$\dot{m}_{ae} = 2,105 \times 0,952 \simeq \underline{2,0\ kg/s}$$

R?

$$R = \frac{\left(\dot{m}_{ar}/\dot{m}_{COMB}\right)_{est}}{\left(\dot{m}_{ar}/\dot{m}_{COMB}\right)_{real}}$$

Considerando que se trata de um hidrocarboneto $\left(\frac{\dot{m}_{ar}}{\dot{m}_{COMB}}\right)_{estq} \simeq 15$

$$R = \frac{15}{2,4/0,125} = 0,938$$

e. ${}_2\dot{Q}_3$?

$$\dot{Q}_{COMB} = Ne + \dot{Q}_{H_2O,\ ARREF} + \dot{Q}_{GASES\ ESCAPE} + \left(\dot{Q}_{INQUEIMADOS} + \dot{Q}_{IRR}\right)$$

$${}_2\dot{Q}_3$$

$$\dot{m}_{COMB} \cdot PCI = 2,20 \times 10^3 + {}_2\dot{Q}_3 + \dot{m}_{produtos}\ c_{p\,produtos}\ (T_G - T_{AR}) + 680$$

$$0,125 \times 11077 \times 4,1868 = 2,20 \times 10^3 + {}_2\dot{Q}_3 + (2+0,125) \cdot 1,34 \times (600-25) + 680$$

$${}_2\dot{Q}_3 = \underline{1279,8\ kW}$$

f. $\dot{Q}_{PERMUTADOR}$?

$$\dot{Q}_{PERM} = 4 + \dot{m}_{prod}\, c_{p\,prod}\,(T_{G_2} - T_{G_1})$$

$$= 4 + (2 + 0{,}125) \cdot 1{,}34 \times (600 - 200)$$

$$= 1146\ kW$$

(*) $\dot{m}_{refr}$ = ?

$$\dot{Q}_{PERM} = \dot{m}_{refr}\, c_{p\,refr}\, \Delta t$$

$$1146 = \dot{m}_{ref} \cdot 2{,}09\,(101 - 101)$$

$$\dot{m}_{ref} \simeq 91{,}4\ kg/s$$

g. T_4?

$$\dot{Q}_{PERMUTADOR} = \dot{m}_{H_2O}(h_4 - h_3)$$

$$1220 = 39{,}2\,(h_4 - 340{,}414) \rightarrow h_4 \simeq 371{,}556\ kJ/kg$$

$\dot{m}_{ÁGUA}$?

$$\dot{Q}_3 = \dot{m}_{H_2O}\,(h_3 - h_2) \Rightarrow 1200 = \dot{m}_{H_2O}\,(340{,}414 - 309{,}823) \rightarrow \dot{m}_{H_2O} \simeq 39{,}2\ kg/s$$

(2) $p_2 = 3\,at$, $T_2 = 99°C$ $\rightarrow h_2 = 309{,}823\ kJ/kg$

(3) $p_3 = 3\,at$, $T_3 = 81{,}3°C$ $\rightarrow h_3 = 340{,}414\ kJ/kg$

(4) $h_4 = 371{,}556\ kJ/kg$, $p_4 = 3\,at$ $\rightarrow$ $T_4 = 88{,}7°C$

h. EFICIÊNCIA DO PERMUTADOR ?

(*)

ε =

dados do exercício

$AC = 14$ $PCI = 44960$ $Cp = 1.08$ $T_1 = 617$ $T_2 = 119$

$Y_{CO2} = 0.08$ $W_{indicado} = 0.205$ $D_{cilin} = 58$

$cilind = 359$ $i = 2$ $n = 2480$ $Ce = 306$ $TaxaC = 8.5$

$Np = 1.27$ $\lambda = 1/4$

$P_{adm} = 750$ $T_{adm} = 18$ $P_{amb1} = 760$ $T_{amb1} = 15$

$\eta_{gerad} = 0.75$ $Pot_{eléct} = 2$ $Q_{56} = 11.1$ $Q_{aquecim} = 31.1$

$h_7 = 241$ $h_8 = 285$ $\eta_{vol,comp} = 0.8$ $\eta_{comp} = 0.91$

$cilin_{comp} = 161$

Alínea a)

$Ne = Ni - Np$

$$Ni = W_{indicado} \cdot n \cdot \frac{\left|0.016667 \cdot \frac{s^{-1}}{min^{-1}}\right|}{2} \cdot i$$

$$\eta_{mec} = \frac{Ne}{Ni}$$

$$\eta_{global} = \eta_{Otto} \cdot \eta_{indic} \cdot \eta_{mec} \qquad \eta_{Otto} = 1 - \frac{1}{TaxaC^{[\gamma - 1]}} \qquad \gamma = 1.4$$

$$\eta_{global} = \frac{\left|1000 \cdot \frac{g}{kg}\right|}{Ce \cdot PCI \cdot \left|0.000277778 \cdot \frac{kWh}{kJ}\right|}$$

$$Ne = pme \cdot cilind \cdot \left|0.000001 \cdot \frac{m^3}{cm^3}\right| \cdot n \cdot \frac{\left|0.016667 \cdot \frac{s^{-1}}{min^{-1}}\right|}{2}$$

$$Vmax_{plst} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot \left|0.016667 \cdot \frac{s^{-1}}{min^{-1}}\right| \cdot r \cdot \left[\sin(\alpha) + \frac{\lambda}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha)\right]$$

$$\alpha = \arccos\left[\frac{\sqrt{8 \cdot \lambda^2 + 1} - 1}{4 \cdot \lambda}\right]$$

$$cilind \cdot \left|0.000001 \cdot \frac{m^3}{cm^3}\right| = \pi \cdot \frac{\left[D_{cilin} \cdot \left|0.001 \cdot \frac{m}{mm}\right|\right]^2}{4} \cdot r \cdot 2 \cdot i$$

Alínea b)

$$\eta_{volMotor} = \frac{\dot{V}_{ar}}{cilind \cdot \left|0.000001 \cdot \frac{m^3}{cm^3}\right| \cdot n \cdot \frac{\left|0.016667 \cdot \frac{s^{-1}}{min^{-1}}\right|}{2}} \qquad \dot{m}_{ar} = \dot{m}_{comb} \cdot AC$$

$$\dot{m}_{comb} \cdot PCI \cdot \eta_{global} = Ne$$

$$\rho_{ar} = \rho\left['Air', T = T_{adm}, P = P_{adm} \cdot \left|0.133322 \cdot \frac{kPa}{mmHg}\right|\right] \qquad \dot{m}_{ar} = \dot{V}_{ar} \cdot \rho_{ar}$$

Alínea c)

$$\dot{m}_{comb} = m_{comb} \cdot \left|0.000001 \cdot \frac{kg}{mg}\right| \cdot n \cdot \frac{\left|0.016667 \cdot \frac{s^{-1}}{min^{-1}}\right|}{2} \cdot i$$

Alínea d)

$P_{amb2} = 740$ $T_{amb2} = 35$ $P_{saturação} = P_{sat}['Steam_{IAPWS}', T = T_{amb2}]$

$\phi = 0.6$ $P_{arSeco2} = P_{amb2} - P_{saturação} \cdot \phi \cdot \left|7.50062 \cdot \frac{mmHg}{kPa}\right|$

$$Ne_2 = Ne \cdot \frac{P_{arSeco2}}{P_{amb1}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ConvertTemp}[C, K, T_{amb1}]}{\text{ConvertTemp}[C, K, T_{amb1}]}}$$

Alínea e)

$Pot_{comp} \cdot \eta_{comp} = \dot{m}_{1346} \cdot [h_8 - h_7]$ $Ne = \frac{Pot_{eléct}}{\eta_{gerad}} + Pot_{comp}$

$$\dot{V}_{R1346} = cilin_{comp} \cdot \left|0.000001 \cdot \frac{m^3}{cm^3}\right| \cdot n \cdot \left|0.016667 \cdot \frac{s^{-1}}{min^{-1}}\right| \cdot \eta_{vol,comp}$$

Alínea f)

$Q_{45} + Q_{56} + Q_{63} = Q_{aquecim}$ $Q_{63} = [\dot{m}_{comb} + \dot{m}_{ar}] \cdot Cp \cdot [T_1 - T_2]$

$Q_{45} = Pot_{comp} \cdot \eta_{comp} + Q_{107}$

Alínea g)

$$m_{CO2} = [\dot{m}_{comb} + \dot{m}_{ar}] \cdot Y_{CO2} \cdot \left|1000 \cdot \frac{g/s}{kg/s}\right| \cdot \frac{t}{[Pot_{eléct} + Q_{aquecim}] \cdot t \cdot \left|0.000277778 \cdot \frac{kWh}{kJ}\right|}$$

$t = 3600$

SOLUTION
Unit Settings: [kJ]/[C]/[kPa]/[kg]/[degrees]

AC = 14 [-]	α = 77.01 [deg]	Ce = 306 [g/kWh]
cilind = 359 [cm^3]	$cilin_{comp}$ = 161 [cm^3]	Cp = 1.08 [kJ/kg·K]
D_{cilin} = 58 [mm]	η_{comp} = 0.91 [-]	η_{gerad} = 0.75
η_{global} = 0.2617 [-]	η_{indic} = 0.535 [-]	η_{mec} = 0.850 [-]
η_{Otto} = 0.5752 [-]	$\eta_{volMotor}$ = 0.966 [-]	$\eta_{vol,comp}$ = 0.8 [-]
γ = 1.4 [-]	h_7 = 241 [kJ/kg]	h_8 = 285 [kJ/kg]
i = 2 [-]	λ = 0.25 [-]	m_{CO2} = 79.9 [g/kWh]
m_{comb} = 14.81 [mg]	$\dot{m}_{134a}$ = 0.09383 [kg/s]	$\dot{m}_{ar}$ = 0.008572 [kg/s]
$\dot{m}_{comb}$ = 0.0006123 [kg/s]	n = 2480 [min^{-1}]	Ne = 7.20 [kW]
Ne_2 = 6.77 [kW]	Ni = 8.474 [kW]	Np = 1.27 [kW]
PCI = 44960 [kJ/kg]	ϕ = 0.6 [-]	pme = 970.9 [kPa]
Pot_{comp} = 4.537 [kW]	Pot_{elec1} = 2.00 [kW]	P_{adm} = 750 [mmHg]
P_{amb1} = 760 [mmHg]	P_{amb2} = 740 [mmHg]	$P_{arSeco2}$ = 714.7 [mmHg]
$P_{saturação}$ = 5.629 [kPa]	Q_{107} = 10.93 [kW]	Q_{45} = 15.06 [kW]
Q_{58} = 11.1 [kW]	Q_{63} = 4.94 [kW]	$Q_{aquecim}$ = 31.1 [kW]
r = 0.0340 [m]	ρ_{ar} = 1.197 [kg/m^3]	t = 3600 [s]
TaxaC = 8.5 [-]	T_1 = 617 [C]	T_2 = 119 [C]
T_{adm} = 18 [C]	T_{amb1} = 15 [C]	T_{amb2} = 35
$Vmax_{pist}$ = 9.08 [m/s]	$\dot{V}_{ar}$ = 0.007164 [m^3/s]	$\dot{V}_{R134a7}$ = 0.00532 [m^3/s]
$W_{indicado}$ = 0.205 [kJ]	Y_{CO2} = 0.08 [-]	

No unit problems were detected.

KEY VARIABLES

pme = 970.9 [kPa]	*a) pme*
Ne = 7.20 [kW]	*a) Ne*
$Vmax_{pist}$ = 9.08 [m/s]	*a) velocidade máxima pistão*
η_{indic} = 0.535 [-]	*a) rendimento indicado*
η_{mec} = 0.850 [-]	*a) rendimento mecânico*
$\eta_{volMotor}$ = 0.966 [-]	*b) rendimento volumétrico do motor*
m_{comb} = 14.81 [mg]	*c) massa de comb. por cilindro e por ciclo*
Ne_2 = 6.77 [kW]	*d) Potência efectiva a outras condições*
$\dot{m}_{134a}$ = 0.09383 [kg/s]	*e) caudal de R134a*
$\dot{V}_{R134a7}$ = 0.00532 [m^3/s]	*e) caudal volúmico em 7*
Q_{107} = 10.93 [kW]	*f) Potência trocada no evaporador*
m_{CO2} = 79.9 [g/kWh]	*g) massa de CO2 por kWh útil*