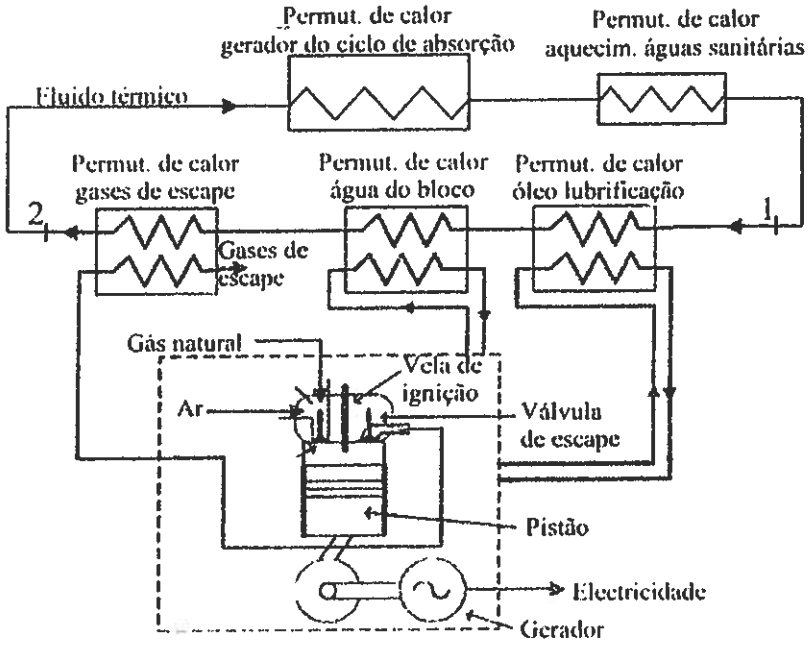
Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
FEUP

Exame de Máquinas Térmicas (parte prática)

DEMEGI 2006/2007

Duração 2h — 13/6/2007

A instalação de cogeração representada na figura, utiliza um motor Ford ESG 642, funcionando a gás natural, para gerar energia eléctrica, para produzir frio,



aproveitando o calor gerado pelo funcionamento do motor através de uma máquina frigorífica que funciona segundo um ciclo de absorção, e também para aquecer águas sanitárias.

Os dados conhecidos da instalação representada são os seguintes:

Motor Ford ESG 642:	(m_{ar}/m_{comb}) =17.8	PCI=33718 kJ/m^3 (15ºC e 1 atm)	Alimentado a gás natural
	M_{comb} 18.78 kg/kmol	$\dot{V}_{comb}$ =9.3 m^3/h (15ºC e 1 atm)	Ignição por faísca (ciclo Otto)
	Aspiração natural cond. aspir 15 ºC e 1 atm	$\varnothing_{cilindro}$ 97 mm	λ 0.25 (braço da cambota comprimento da biela= r/L)
	4 T, 6 cilindros em V	Velocidade média do pistão 4.7 m/s	Plena carga
	Taxa comp. ε =9.3	4.2 L de cilindrada	P.m.e.=572.0 kPa
Gerador:	$\eta_{Gerador}$= 84%		
Circuito do fluido térmico:	$\dot{Q}_{agua\ aquecim.}$ = 12 kW	$C_{p\ fluido\ termico}$ =2.41 kJ/kg·K	T_1 40 ºC, T_2 350 ºC
Máquina frigorifica	Efeito. frigorífico 35 kW	COP = 0.9	

Com base nos dados anteriormente apresentados responda às seguintes questões:

a) (3.5 val.) Sem calcular a velocidade de rotação determine o binário e a velocidade máxima instantânea do pistão.
b) (3 val.) calcule a potência efectiva do motor, o consumo específico em m^3/kWh e o número de faíscas por segundo, produzidas por cada vela de ignição.
c) (2 val.) Que percentagem de potência teórica é convertida em potência efectiva?
d) (3.5 val.) Qual o rendimento volumétrico do motor, calculado com base nos volumes de ar e de combustível?
e) (2 val.) Qual o rendimento global da instalação?
f) (3.5 val.) Qual o caudal de fluido térmico que percorre a instalação?
g) (2.5 val.) Qual a potência calorífica total rejeitada pela máquina frigorífica?

```
"Exame de Máquinas térmicas 13/6/2007"

"Dados do problema"
M_arcomb=17,8[-]: PCI=33718 [kJ/m^3]: M_comb=18,78[kg/kmol]:V_dot_comb=9,3[m^3/h]: PHI_cilindro=97[mm]
Lambda=0,25[-]: i=6[-]:Velo_media=4,7 [m/s]: C=4,2[L]: PME=572[kPa]:Eta_gerador=0,84[-]: taxa_comp=9,3[-]
Q_dot_aguasSani=12[kW]:Cp_fluidoTerm=2,41[kJ/kg-K]:T_1=40[C]:T_2=350[C]:Q_dot_efeitoFrig=35[kW]
COP=0,9[-]: P_asp=1[atm]:T_asp=15[C]

"Alínea a)"
Binario*2*pi/60=PME*C*convert(L;M^3)/(60*2)
"2*pi*n/60*l/2=Velo_media*pi/2": V_max=Velo_media*pi/2*(sin(alpha)+Lambda/2*sin(2*alpha))
alpha=arccos((sqrt(8*lambda^2+1)-1)/(4*lambda))

"Alínea b)"
2*pi*n/convert(min;S)*l/2=Velo_media*pi/2: (PHI_cilindro*convert(mm;m))^2*pi/4*i*l=C*convert(L;M^3)
Ne=PME*C*convert(L;M^3)/(convert(min;s)*2)*n
Ce_mássico=m_dot_comb*convert(h;s)/(Ne*convert(h;s)*convert(kJ;kWh))
Ce_volúmico=V_dot_comb/Ne
n°_falscas=n/2/convert(min;s)

"Alínea c)"
NeNt=Eta_motor/Eta_teorico: Eta_motor=Ne/Q_dot_comb
Q_dot_comb=(V_dot_comb*convert(m^3/h;m^3/s)*PCI)
Eta_teorico=1-1/taxa_comp^(1,4-1)

"Alínea d)"
m_dot_comb=V_dot_comb*convert(m^3/h;m^3/s)*rho_gas
rho_gas=P_asp*convert(atm;kPa)*M_comb/R#/converttemp(C;K; T_asp)
Eta_volum=(V_dot_ar+V_dot_comb*convert(m^3/h;m^3/s))/(c*convert(L;M^3)*n/2/convert(min;s))
V_dot_ar=m_dot_comb/rho_ar*M_arcomb: rho_ar=Density(Air_ha;T=T_asp;P=P_asp*convert(atm;kPa))

"Alínea e)"
Eta_globalInst=(Ne*Eta_gerador+Q_dot_aguassani+Q_dot_efeitoFrig)/(V_dot_comb*convert(m^3/h;m^3/s)*PCI)

"Alínea f)".
Q_dot_aguasSani+Q_dot_gerador=m_dot_fluidoTerm*Cp_fluidoTerm*(T_2-T_1)
Q_dot_gerador=Q_dot_efeitoFrig/COP

"Alínea g)"
Q_dot_regeitado=Q_dot_gerador+Q_dot_efeitoFrig
```

Exame de Máquinas térmicas 13/6/2007

Dados do problema

$M_{arcomb} = 17{,}8$ [-] $PCI = 33718$ [kJ/m³] $M_{comb} = 18{,}78$ [kg/kmol]

$\dot{V}_{comb} = 9{,}3$ [m³/h] $\Phi_{cilindro} = 97$ [mm]

$\lambda = 0{,}25$ [-] $i = 6$ [-] $Velo_{média} = 4{,}7$ [m/s] $C = 4{,}2$ [L]

$PME = 572$ [kPa] $\eta_{gerador} = 0{,}84$ [-] $taxa_{comp} = 9{,}3$ [-]

$\dot{Q}_{aguasSani} = 12$ [kW] $Cp_{fluidoTerm} = 2{,}41$ [kJ/kg-K] $T_1 = 40$ [C]

$T_2 = 350$ [C] $\dot{Q}_{efeitoFrig} = 35$ [kW]

$COP = 0{,}9$ [-] $P_{asp} = 1$ [atm] $T_{asp} = 15$ [C]

Alínea a)

$$Binario \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{60} = PME \cdot C \cdot \frac{\left|0{,}001 \cdot \frac{M^3}{L}\right|}{60 \cdot 2}$$

*2*pi*n/60*l/2=Velo$_{media}$*pi/2*

$$V_{max} = Velo_{média} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \left[\sin(\alpha) + \frac{\lambda}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha)\right]$$

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

Alínea b)

$$2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{\left|60 \cdot \frac{s}{min}\right|} \cdot \frac{i}{2} = Velo_{média} \cdot \frac{\pi}{2}$$

$$\left[\Phi_{cilindro} \cdot \left|0{,}001 \cdot \frac{m}{mm}\right|\right]^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot i \cdot i = C \cdot \left|0{,}001 \cdot \frac{M^3}{L}\right|$$

$$Ne = PME \cdot C \cdot \frac{\left|0{,}001 \cdot \frac{M^3}{L}\right|}{\left|60 \cdot \frac{s}{min}\right| \cdot 2} \cdot n$$

$$Ce_{mássico} = \dot{m}_{comb} \cdot \frac{\left|3600 \cdot \frac{s}{h}\right|}{Ne \cdot \left|3600 \cdot \frac{s}{h}\right| \cdot \left|0{,}000277778 \cdot \frac{kWh}{kJ}\right|}$$

$$Ce_{volúmico} = \frac{\dot{V}_{comb}}{Ne}$$

$$n°_{falscas} = \frac{\frac{n}{2}}{\left|60 \cdot \frac{s}{min}\right|}$$

Alínea c)

$$NeNt = \frac{\eta_{motor}}{\eta_{teorico}} \qquad \eta_{motor} = \frac{Ne}{\dot{Q}_{comb}}$$

$$\dot{Q}_{comb} = \dot{V}_{comb} \cdot \left|0{,}000277778 \cdot \frac{m^3/s}{m^3/h}\right| \cdot PCI$$

$$\eta_{teorico} = 1 - \frac{1}{taxa_{comp}^{[1{,}4 - 1]}}$$

Alínea d)

$$\dot{m}_{comb} = \dot{V}_{comb} \cdot \left|0{,}000277778 \cdot \frac{m^3/s}{m^3/h}\right| \cdot \rho_{gas}$$

$$\rho_{gas} = P_{asp} \cdot \left| 101,325 \cdot \frac{kPa}{atm} \right| \cdot \frac{\frac{M_{comb}}{8,314\ [kJ/kmol\text{-}K)}}{ConvertTemp\ [C; K; T_{asp}]}$$

$$\eta_{volum} = \frac{\dot{V}_{ar} + \dot{V}_{comb} \cdot \left| 0,000277778 \cdot \frac{m^3/s}{m^3/h} \right|}{C \cdot \left| 0,001 \cdot \frac{M^3}{L} \right| \cdot \frac{\frac{n}{2}}{\left| 60 \cdot \frac{s}{min} \right|}}$$

$$\dot{V}_{ar} = \frac{\dot{m}_{comb}}{\rho_{ar}} \cdot M_{arcomb} \qquad \rho_{ar} = \rho\left['Air_{ha}' ; T = T_{asp} ; P = P_{asp} \cdot \left| 101,325 \cdot \frac{kPa}{atm} \right| \right]$$

Alinea e)

$$\eta_{globalInst} = \frac{Ne \cdot \eta_{gerador} + \dot{Q}_{aguasSani} + \dot{Q}_{aletaFrig}}{\dot{V}_{comb} \cdot \left| 0,000277778 \cdot \frac{m^3/s}{m^3/h} \right| \cdot PCI}$$

Alinea f)

$$\dot{Q}_{aguasSani} + \dot{Q}_{gerador} = \dot{m}_{fluidoTerm} \cdot Cp_{fluidoTerm} \cdot [T_2 - T_1]$$

$$\dot{Q}_{gerador} = \frac{\dot{Q}_{aletaFrig}}{COP}$$

Alinea g)

$$\dot{Q}_{rejeitado} = \dot{Q}_{gerador} + \dot{Q}_{aletaFrig}$$

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

α = 77,01	Binario = 0,191 [kN*m]
C = 4,2 [L]	$Ce_{mássico}$ = 0,2479 [kg/kWh]
$Ce_{volúmico}$ = 0,3121 [m^3/kWh]	COP = 0,9 [-]
$Cp_{fluidoTerm}$ = 2,41 [kJ/kg-K]	$\eta_{gerador}$ = 0,84 [-]
$\eta_{globalInst}$ = 0,827 [-]	η_{motor} = 0,3421 [-]
$\eta_{teórico}$ = 0,5902 [-]	η_{volum} = 0,6217 [-]
l = 6 [-]	l = 0,09473 [m]
λ = 0,25 [-]	M_{arcomb} = 17,8 [-]
M_{comb} = 18,78 [kg/kmol]	$\dot{m}_{comb}$ = 0,002052 [kg/s]
$\dot{m}_{fluidoTerm}$ = 0,0681 [kg/s]	n = 1489 [min^{-1}]
Ne = 29,8 [kW]	NeNt = 0,580 [-]
$n°_{faíscas}$ = 12,4 [1/s]	PCI = 33718 [kJ/m^3]
$\Phi_{cilindro}$ = 97 [mm]	PME = 572 [kPa]
P_{asp} = 1 [atm]	$\dot{Q}_{aguasSani}$ = 12 [kW]
$\dot{Q}_{comb}$ = 87,1 [kW]	$\dot{Q}_{aletaFrig}$ = 35 [kW]
$\dot{Q}_{gerador}$ = 38,89 [kW]	$\dot{Q}_{rejeitado}$ = 73,9 [kW]
ρ_{ar} = 1,225 [kg/m^3]	ρ_{gas} = 0,7943 [kg/m^3]
$taxa_{comp}$ = 9,3 [-]	T_1 = 40 [C]
T_2 = 350 [C]	T_{asp} = 15 [C]
$Velo_{medio}$ = 4,7 [m/s]	$\dot{V}_{ar}$ = 0,02981 [m^3/s]
$\dot{V}_{comb}$ = 9,3 [m^3/h]	$V_{máx.}$ = 7,60 [m/s]

2 potential unit problems were detected.

EXAME 13/06/2007

a. BINÁRIO (V) sem calcular n ?

- $Ne = \text{BINÁRIO} \times \omega$

$$\text{pme. CILINDRADA} \cdot \frac{n}{60A} = \text{Binário} \times \frac{2\pi n}{60}$$

$$\text{Binário} = \frac{\text{pme CILINDRADA} \cdot 7 \cdot 60}{60A \cdot 2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{\text{pme CILINDRADA}}{A \cdot 2\pi}$$

4 TEMPOS $\rightarrow A = 2$

$$= \frac{572{,}0 \times 9{,}2 \times 10^{-3}}{2 \times 2\pi} \simeq 0{,}191 \text{ kN.m}$$

- $V = \omega R \left(\sin\alpha + \left(\lambda / 2 \right) \sin 2\alpha \right)$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \qquad R = \frac{L}{2} \qquad \bar{V} = \frac{2nL}{60} \rightarrow L = \frac{\bar{V} \cdot 60}{2n}$$

$$\omega \cdot R = \frac{2\pi n}{60} \cdot \frac{\bar{V} 60}{2 \cdot 2n} = \frac{\pi}{2} \bar{V}$$

$\alpha = ?$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\sqrt{8\lambda^2 + 1} - 1}{4\lambda} \right) \qquad \lambda = 0{,}25.$$

$$\alpha \simeq 77{,}01°$$

$$V = \frac{\pi}{2} \cdot 4{,}7 \left(\sin 77{,}01 + \frac{0{,}25}{2} \sin(2 \times 77{,}01) \right) \simeq \underline{\underline{7{,}60 \text{ m/s}}}$$

b.

Ne ?

$$Ne = pme \cdot C_{UNDRADA} \cdot \frac{n}{60A} = 572 \times 4{,}2 \times 10^{-3} \times \frac{1489}{60 \times 2} \simeq 29{,}8 \text{ kW}$$

- n = ?

$$\omega R = \frac{\pi \bar{V}}{2}$$

$$\frac{2\pi n}{60} \frac{L}{2} = \frac{\pi \bar{V}}{2} \rightarrow n = \frac{\pi \bar{V} 60}{\pi L \times 2} = \frac{4{,}7 \times 60}{0{,}0947 \times 2} \simeq 1489 \text{ rpm}$$

L ?

$$C_{UNDRADA} = \frac{\pi d^4}{4} \cdot L \cdot i$$

$$4{,}2 \times 10^{-3} = \frac{\pi \times 0{,}097^2}{4} \cdot L \cdot 6 \rightarrow L = 0{,}0947 \text{ m}$$

C.e. m^3/kwh ?

$$Ce = \frac{\dot{m}\ 3600}{Ne} \rightarrow g/kwh \qquad \dot{m}(g/s)$$

$$Ce = \frac{\dot{V}}{Ne} = \frac{9{,}3}{29{,}8} \frac{(m^3/h)}{(kW)} \simeq 0{,}312 \ m^3/kwh$$

$N_{FAISCAS}$?

$$N^{\circ}_{FAISCAS} = \frac{N(rpm)}{60\ A} = \frac{1489}{60 \times 2} = 12{,}4 \ (1/s)$$

c. $\frac{Ne}{Nt}$?

$$\frac{Ne}{Nt} = \frac{\eta_{GLOBAL} \cdot \dot{m}_{COMB} \cdot PCI}{\eta_t \cdot \dot{m}_{COMB} \cdot PCI} = \frac{\eta_G}{\eta_t} = \frac{0,342}{0,590} \simeq 0,58 \simeq 58\%.$$

$$\eta_G = \frac{Ne}{\dot{m}_{COMB} \cdot PCI} = \frac{Ne^{\checkmark kW}}{\dot{V}_{COMB} \; PCI} = \frac{29,8}{\frac{9,3}{3600} \times 33718} \simeq 0,342$$

($\dot{V}_{COMB}$: m^3/s; PCI: kJ/m^3)

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}} = 1 - \frac{1}{9,3^{0,4}} = 0,590$$

Considerando $\gamma \simeq 1,4$

ou $Ne = 29,8$ kW

$Nt = ?$ $\quad \eta_t = \frac{Nt}{\dot{V}_{COMB} \cdot PCI} \rightarrow Nt = 0,590 \times \frac{9,3}{3600} \times 33718 \simeq 58,4$ kW

$\frac{Ne}{Ni} \simeq 0,58 = 58\%.$

d. η_v ?

$$\eta_v = \frac{\dot{V}_{AR} + \dot{V}_{COMB}}{\text{CILINDRADA} \; \frac{n}{60 \; A}}$$

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

$$\dot{V}_{AR} = \frac{\dot{m}_{ar}}{\rho_{AR}} \qquad \rho_{AR} \; (T = 15°C \text{ e } p = 1 \text{ atm}) \simeq 1,185 \; kg/m^3$$

$$\dot{m}_{AR} = \dot{m}_{COMB} \cdot \%_{AR-COMB}$$

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

$$\dot{m}_{COMB} = \rho_{COMB} \cdot \dot{V}_{COMB}$$

ρ_{COMB} ?

$$\rho_{COMB} = P \cdot \frac{M_{COMB}}{R\,T} = 98 \cdot \frac{18,78}{8,314 \times (15 + 273,15)} \simeq 0,768 \text{ kg/m}^3$$

$R = 8,314$ KJ/kmol k

$$\therefore \dot{m}_{COMB} = \frac{9,3}{3600} \times 0,768 \simeq 0,002 \text{ kg/s}$$

$$\dot{V}_{ar} = \frac{0,002 \times 17,8}{1,185} \simeq 0,03 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\therefore \eta_v = \frac{0,03 + 9,3/3600}{4,2 \times 10^{-3} \times \frac{1489}{60,2}} = 0,625 \rightarrow 62,5\%$$

e. η_{INST} ?

$$\eta_{inst} = \frac{Ne\ \eta_{GERADOR} + \dot{Q}_{AG\ SANITÁRIAS} + \dot{Q}_B}{\dot{V}_{COMB}\ PCI} = \frac{29,8 \times 0,84 + 12 + 35}{\frac{9,3}{3600} \times 33718} \simeq 0,827 = \underline{\underline{82,7\%}}$$

f. $\dot{m}_{Fl.term}$?

$$\dot{Q}_{GERADOR} + \dot{Q}_{ÁG.\ SANITÁRIAS} = \dot{m}_{FL\ TÉRMICO} \cdot Cp_{\substack{fluido \\ térmico}} (T_2 - T_1)$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_B}{\dot{Q}_{GERADOR}} \Rightarrow \dot{Q}_{GERADOR} = \frac{\dot{Q}_B}{COP} = \frac{35}{0,9} = 38,9 \text{ kW}$$

$$38,9 + 12 = \dot{m}_{\substack{Fluido \\ Térmico}} \cdot 2,41 \times (350 - 40)$$

$$\dot{m}_{\substack{fluido \\ térmico}} \simeq \underline{\underline{0,068 \text{ kg/s}}}$$

g. $\dot{Q}_{REJEITADO}$?

$$\dot{Q}_{REJEITADO} = \dot{Q}_{GERADOR} + \dot{Q}_{B} = 38,9 + 35 = 73,9kW$$