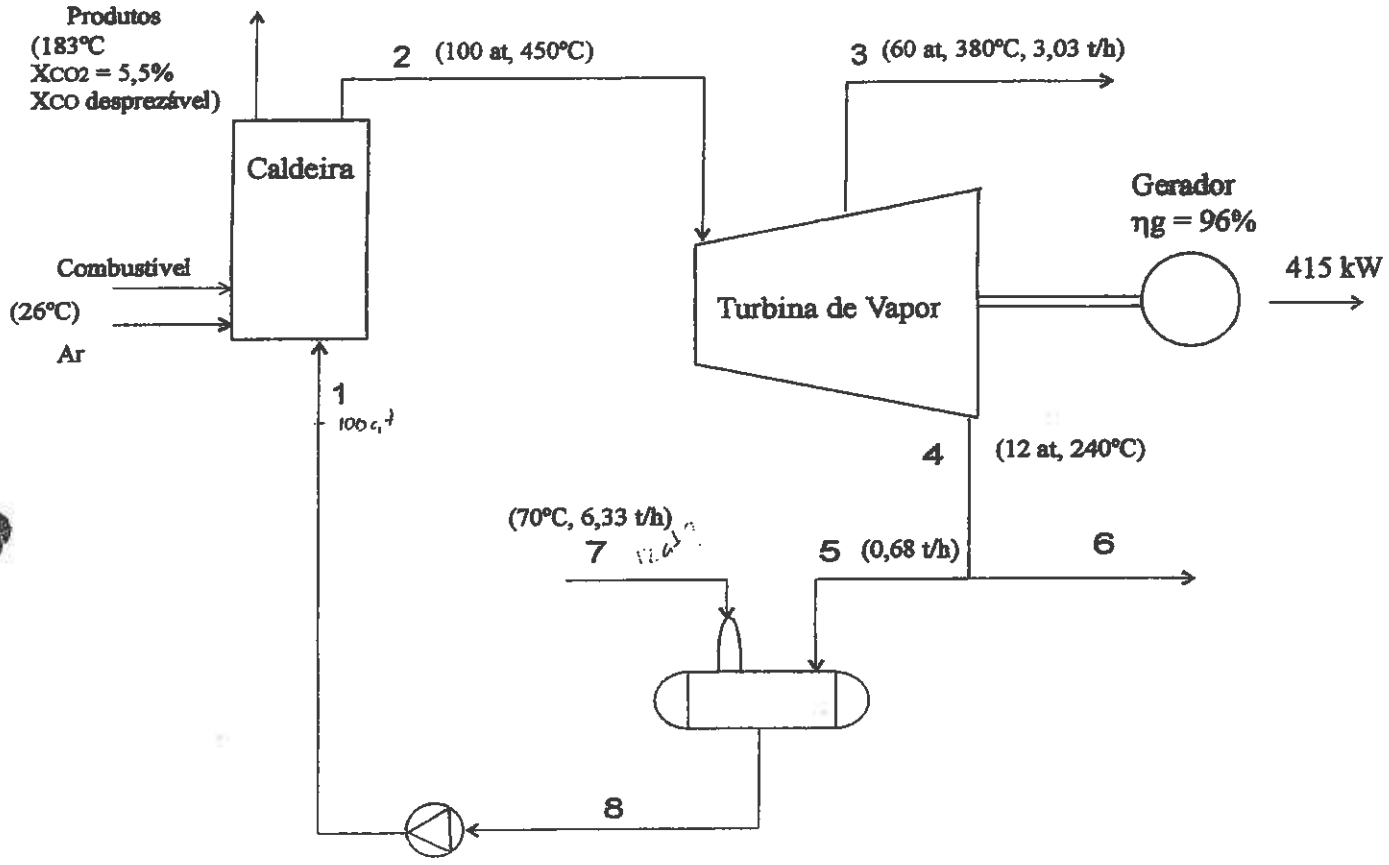
Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
FEUP
DEMEGI
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

# Máquinas Térmicas

## (parte prática)

Recurso, 2003/07/25 — Duração: 2 horas

1. A figura seguinte mostra uma instalação de vapor de água utilizada para produzir energia eléctrica e vapor, a enviar a um consumidor a duas pressões diferentes.




Considerando as condições de funcionamento indicadas, determine:

a) (1,5 val.) a potência calorífica fornecida à água na caldeira;

b) (2,0 val.) o consumo de propano na caldeira (PCI = 46 348 kJ/kg)

*(se não fez a) considere como resposta a essa alínea 4,8 MW)*;

c) (1,5 val.) a potência de perdas mecânicas perdidas na transmissão na turbina;

Pretendendo-se comprimir 150 litros/min. de vapor (considerado como gás perfeito) num compressor alternativo, desde as condições do ponto 4 até às do ponto 3 indicadas na figura, determine:

d) (2,0 val.) a potência politrópica gasta na compressão do vapor;

Considere que, devido a uma avaria da turbina de vapor, se utilizou um motor Diesel operando nas condições mostradas na tabela seguinte para produzir igual quantidade de electricidade com o mesmo gerador.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Motor (com turbo) | 4 tempos | 5 cilindros | Curso/diâmetro = 1,588 |
| | | plena carga | Diâmetro = 170 mm |
| | Parâmetros do ciclo teórico: | $\delta = 6$, $\rho = 1$ | Wteórico = 15 300 J/(cilindro*ciclo) |
| | Velocidade média do pistão = 8,1 m/s | Np = 53,4 kW | |
| | Combustível – $C_{16}H_{30}$ $(m_{ar}/m_{comb})_{est.} = 14,6$ | P.C.I. = 10 125 kcal/kg | $\rho_{comb.} = 850$ kg/m$^3$ |
| | | Volume de combustível injectado = 0,8 cm$^3$/(cilindro*ciclo) | |
| | Ar de admissão a 30 °C | Pressão relativa do ar de admissão = 0,8 bar | |
| | | $\eta$volumétrico=93% | |
| Gerador | $\eta_{ger.}$=96% | $W_{eléctrico}$ = 415 kW | |

Determine:

e) (1,5 val.) o momento motor;

f) (2,0 val.) a taxa de compressão;

g) (1,5 val.) a riqueza da mistura.

# Parte Prática

1. a) Precisamos de determinar $h_1 = h_8 = ?$

$$7: \begin{cases} T_7 = 70^\circ C \\ p_7 = ? \end{cases} \Rightarrow h_7 \approx \underbrace{c_p}_{4{,}1868\ kJ/kg\,K} T_7 \Rightarrow$$

praticamente a qualquer pressão acima de 1 at para líquido subarrefecido!

$$\Rightarrow h_7 \approx 293{,}076\ kJ/kg$$

Reparar que $p_7 = 12\,at \xrightarrow{\text{Tabelas}} h_7 = 293{,}913\ kJ/kg$ ! Quase não muda ...

$$\underbrace{\dot{Q}}_{\approx 0} + \underbrace{\dot{W}}_{=0} = \dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_5 \underbrace{h_5}_{h_4}$$

$$4: \begin{cases} p_4 = 12\,at \\ T_4 = 240^\circ C \end{cases} \Rightarrow h_4 = 2911{,}082\ kJ/kg$$

Logo:

$$0 = \left(\frac{6{,}33 \times 1000}{3600} + \frac{0{,}68 \times 1000}{3600}\right) h_8 - \frac{6{,}33 \times 1000}{3600} \times 293{,}076 -$$

$$- \frac{0{,}68 \times 1000}{3600} \times 2911{,}082 \Rightarrow h_8 \approx 544{,}034\ kJ/kg$$

$$h_1 - h_8 = \int T \underbrace{ds}_{\approx 0} + 0{,}001 \times 98{,}0665 \times (100 - \underbrace{p_8}_{?})$$

Mas repare-se que mesmo que $p_8$ fosse 1 at a diferença de entalpia: $h_1 - h_8 = 9{,}7$ KJ/kg, que é desprezável.

Logo, assume-se que:

$$h_1 \approx h_8 = 544{,}034 \text{ KJ/kg}$$

Então, na caldeira:

$$\dot{Q} + \cancel{\dot{W}}^{=0} = \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_1 h_1$$

2: $\begin{cases} p_2 > 100 \text{ at} \\ T_2 > 450^\circ C \end{cases} \Rightarrow h_2 = 3242{,}258 \text{ KJ/kg}$

$$\dot{Q} = \frac{(6{,}33+0{,}68)\times 1000}{3600} \times (3242{,}258 - 544{,}034) \approx 5254{,}042 \text{ kW} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{\dot{Q} \approx 5{,}2 \text{ MW}}$$

b) $C_3H_8 + a\left(3+\frac{8}{4}\right)(O_2 + 3{,}76 N_2) \longrightarrow m_1 CO_2 + m_2 CO + m_3 O_2 + m_4 N_2 + m_5 H_2O$

Fazendo os balanços:

ENGANEI-ME! Bastava calcular o Rendimento da caldeira!

Bal C: $3 = n_1 + n_2$

Bal H: $8 = 2n_5$

Bal O: $a\left(3+\frac{8}{4}\right)\times 2 = 2n_1 + n_2 + 2n_3 + n_5$

Bal N: $a\left(3+\frac{8}{4}\right)\times 2 \times 3{,}76 = 2n_4$

$\Rightarrow$

$n_1 = 3$

$n_5 = 4$

$n_3 = 18{,}8a - 5 \cong 23{,}275$

$n_4 = 18{,}8a \cong 28{,}275$

$a \cong 1{,}504$

$n_2 = 0$

$X_{CO_2}$: $\dfrac{n_1}{n_1+n_2+n_3+n_4} = 0{,}085$

$X_{O_2}$: $\dfrac{n_2}{n_1+n_2+n_3+n_4} \approx 0$

Então:

$$\left(\frac{m_{ar}}{m_{comb}}\right)_{real} = \frac{1{,}504\times\left(3+\frac{8}{4}\right)\times 4{,}76\times \overbrace{28{,}96}^{M_{ar}}}{1\times(3\times 12 + 8\times 1)} \cong 23{,}56$$

Logo: $m_{ar} = 23{,}56\, m_{comb}$

Aplicando a 1ª LTP à caldeira e considerando - a adiabática:

$$\underbrace{\dot{Q}}_{\approx 0} + \underbrace{\dot{W}}_{=0} = \dot{m}_2 h_2 + \overbrace{24{,}56\, \dot{m}_{comb}}^{\dot{m}_{gases}} c_{p,gases}(183-25) - \overbrace{1{,}947(2)}^{h_1} + \overbrace{23{,}56\, \dot{m}_{comb}}^{\dot{m}_{ar}} c_{p,ar}\times(26-25) + \dot{m}_{comb}\overbrace{PCI}^{\Delta h_0}$$

$$- \dot{m}_{comb}\cdot c_{p,comb}(25-25)$$

$c_{p,\,gases} = ?$

$m_1 M_{CO_2} + m_2 M_{CO} + m_3 M_{O_2} + m_4 M_{N_2} + m_5 M_{H_2O} = 1740,5 \text{ kg}$

$Y_{CO_2} = \dfrac{m_1 M_{CO_2}}{1740,5} = 0,0758$

$Y_{CO} = 0$

$Y_{O_2} = \dfrac{m_3 M_{O_2}}{1740,5} \simeq 0,4279$

$Y_{N_2} \simeq 0,4587$

$Y_{H_2O} \simeq 0,0414$

$\tilde{c}_{p,\,gases}\Big|_{\frac{183+26}{2} \simeq 100^\circ C} = \sum Y_i \cdot c_{p,i} = 0,0758 \times 0,9136 + 0 + 0,4279 \times 0,9137 +$

$+ 0,4587 \times 1,0421 + 0,0414 \times 1,8903 \simeq 1,025 \text{ kJ/kg K}$

Nota: $c_{p,\,ar}\Big|_{100^\circ C} \simeq 1,0103 \text{ kJ/kg}$, logo se tivéssemos usado $c_{p,ar}$ não ia haver um erro grande.

Falta determinar: $c_{comb} = c_{p\,C_3H_8}\Big|_{25^\circ C} \simeq 1,6663 \text{ kJ/kg}$

Já podemos calcular $\dot{m}_{comb}$:

$$0 = \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_1 h_1 + 24,56\, \dot{m}_{comb} \cdot 1,025 \times (183-25) - \dot{m}_{comb} \times 1,6663 \times (26-25) - 23,56\, \dot{m}_{comb} \cdot 1,0103 \times (26-25) + \dot{m}_{comb} \times (-46\,348) \Rightarrow \boxed{\dot{m}_{comb} \cong 0,1239 \text{ kg/s}}$$

c)

$$3: \begin{cases} P_3 = 60 \text{ at} \\ T_3 = 380^\circ C \end{cases} \Rightarrow h_3 \cong 3123,771 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{W}_T + \underbrace{\dot{Q}}_{\cong 0} = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_2 h_2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \dot{W}_T = \frac{(6,33 + 0,68 - 3,03) \times 1000}{3600} \times 2911,082 +$$

$$+ \frac{3,03 \times 1000}{3600} \times 3123,771 - \frac{(6,33 + 0,68) \times 1000}{3600} \times 3242,258 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \dot{W}_T \cong -465,860 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{T,\text{veio}} = \frac{415}{0,96} \cong 432,292 \text{ kW}$$

Então: $\dot{W}_{T,\text{perdas}} = 465,860 - 432,292 = \boxed{33,568 \text{ kW}}$

d) $\dot{m}_{adm} = \frac{\ell_{arg} \cdot 150 \times 10^{-3}}{60}$

$$P_4 = \rho_{vapor} \cdot \frac{\bar{R}}{M_{vapor}} \times T_4 \Rightarrow 12 \times 980665 = \rho_{vap} \cdot \frac{8314}{2\times1+16} \times (240+273{,}15)$$

$$\Leftrightarrow \rho_{vapor} \cong 4{,}965 \ kg/m^3$$

$$\dot{m}_{adm} = 4{,}965 \times \frac{150 \times 10^{-3}}{60} \cong 0{,}0124 \ kg/s$$

$$\dot{W}_{poli} = \frac{n}{n-1} \dot{m}_{adm} \frac{\bar{R}}{M_{vapor}} \cdot T_4 \left[ \left( \frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

Para saber $n$:

$$\frac{T_3}{T_4} = \left( \frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{n-1}{n}} \Rightarrow \frac{780+273{,}15}{240+273{,}15} = \left( \frac{60}{12} \right)^{\frac{n-1}{n}} \Rightarrow n \cong 1{,}18$$

$$\dot{W}_{poli} \cong 5361{,}412 \ W \approx 5{,}4 \ kW$$

l) $$N_e = \frac{415}{0{,}96} \cong 432{,}292 \ kW$$

$\frac{l}{d} = 1{,}588 \Rightarrow l = 0{,}26996 \ m$ (com $d = 0{,}170$)

$$\bar{V} = 8{,}1 \ m/s \Rightarrow 8{,}1 = \frac{2 n l}{60} \Leftrightarrow n \cong 900 \ rpm$$

$$N_e = B \cdot W \Rightarrow 432{,}292 = B \cdot \frac{900}{60} \times 2\pi \Rightarrow$$

$$\Rightarrow B \cong 4{,}586 \ kN$$

VII

f) $\delta = \frac{V_3}{V_2} = 6$

$\ell = 1$ ← ciclo teórico é o Diesel

$\varepsilon = ?$

$$\eta_t = \frac{W_t}{Q_t}$$

$Q_t = m_{comb} \cdot PCI$

$m_{comb} = 850 \times 0{,}8 \times 10^{-6} = 6{,}8 \times 10^{-4}$ kg / cilindro * ciclo

$$\eta_t = \frac{15{,}300}{6{,}8 \times 10^{-4} \times (10\,125 \times 4{,}1868)} \cong 0{,}531$$

Como:

$$\eta_t = 1 - \frac{\delta^{\gamma=1{,}4} - 1}{\gamma \cdot \varepsilon^{\gamma-1} \cdot (\delta - 1)} \Rightarrow \varepsilon \cong 21{,}88 \approx \boxed{22}$$

g) $\eta_V = 93\% = \frac{\dot{V}_{ar}}{\frac{\pi d^2}{4} \cdot l \cdot i \cdot \frac{n}{A\,60}} \times 100 \Leftrightarrow$

($i = 2$)

$\Leftrightarrow \dot{V}_{ar} \cong 0{,}2137$ m³/s

$P_{ar} = \ell_{ar} R T_{ar} \Rightarrow 1{,}8 \times 10^5 = \ell_{ar} \times 287 \times (30 + 273{,}15) \Leftrightarrow$

$\Leftrightarrow \ell_{ar} \cong 2{,}069$ kg/m³

$$\dot{m}_{ar} = \rho_{ar} \dot{V}_{ar} \simeq 0,4421 \ kg/s$$

$$\dot{m}_{comb} = 850 \times 0,8 \times 10^{-6} \times 5 \times \frac{n}{A60} \simeq 0,0255 \ kg/s$$

$$\left(\frac{\dot{m}_{ar}}{\dot{m}_{comb}}\right)_{real} = \frac{0,4421}{0,0255} \simeq 17,34$$

$$\Lambda = \frac{\left(\dot{m}_{ar}/\dot{m}_{comb}\right)_{est}}{\left(\dot{m}_{ar}/\dot{m}_{comb}\right)_{real}} \simeq \boxed{0,84}$$

EXAME 2003/07/25

a. $\dot{Q}_{H2O,CALD}$ ?

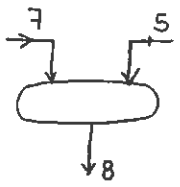
$\dot{Q}_{H2O,CALD} + \dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2$

$\dot{Q}_{H2O,CALD} = \dot{m}_1 (h_2 - h_1)$

$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$

$\dot{m}_1 = \dot{m}_5 + \dot{m}_4 = 6{,}33\ t/h + 0{,}68\ t/h = 7{,}01\ t/h$

① $h_1$ ?




VC

② $p = 100\ at$, $T = 450°C$ → $h_2 = 3242{,}258\ KJ/KG$

$\dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_5 h_5$

$\frac{7{,}01 \times 10^3}{3600} h_8 = \frac{6{,}33 \times 10^3}{3600} \times 293{,}076 + \frac{0{,}68 \times 10^3}{3600} \times 2911{,}022$

⑦ $T = 70°C$, $p = 1\ at$ → $h_7 = 293.076\ KJ/kg$

⑤ $T = 240°C$, $p = 12\ at$ → $h_5 = 2911{,}022\ KJ/kg$

$h_8 = 547{,}034\ KJ/kg$

VC BOMBA

DESPREZANDO O TRABALHO DA BOMBA

$h_1 = h_8$

$\dot{Q}_{H2O\ CALD} = \frac{7{,}01 \times 10^3}{3600} \times (3242{,}259 - 547{,}034) = 5248{,}2\ kW$

b. $\dot{m}_{COMB,CALD}$ ?

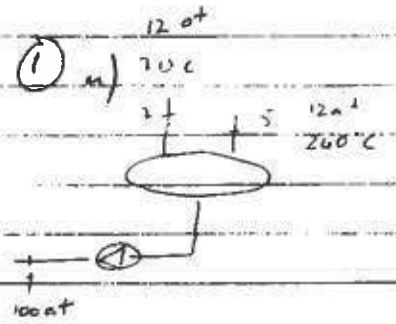
$\eta_{CALD} = \frac{\dot{Q}_{H2O\ CALD}}{\dot{m}_{COMB} \cdot PCI}$ → $\dot{m}_{COMB,CALD} = \frac{\dot{Q}_{H2O,CALD}}{\eta_{CALD} \cdot PCI}$

$\eta_{CALD}$ ?

$\eta_{CALD} = 100 - \Sigma Perdas$

25/7/2003

① a)




$\dot{m}_7 = 6{,}33\ t/h = 1{,}758\ kg/s$

$\dot{m}_5 = 0{,}68\ t/h = 0{,}189\ kg/s$

$\dot{m}_1 = \dot{m}_5 + \dot{m}_7 = 1{,}947\ kg/s$

Desprezando Wbomba

$h_7 = 293{,}913\ kJ/kg$

$h_5 = 2911{,}082\ kJ/kg$

$h_2 = 3242{,}258\ kJ/kg$

$\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_5 h_5$

$1{,}947 h_1 = 1{,}758 \times 293{,}913 + 2011{,}082 \times 0{,}189$

$h_1 = 547{,}97\ kJ/kg$

$\dot{Q} = \dot{m}_1 (h_2 - h_1) = 1{,}947 \times (3242{,}258 - 547{,}97) = 5{,}25\ MW$

b) $PCI = 46348\ kJ/kg$

Método das perdas

$\eta_{cald} = 100 - \Sigma\ perdas = 100 - (12{,}85 + 1{,}71 + 1{,}4) = 84{,}04\ \%$

$P_{cv} = P_{cf} = 0$

$P_{qc} = \dfrac{0{,}45\ (183 - 26)}{5{,}5} = 12{,}85\ \%$

$P_{H_2O} = \dfrac{5 \times 18{,}2\ (210 - 4{,}2 \times 26 + 2{,}1 \times 183)}{46348} = 1{,}71\ \%$

$P_{CO} = 0$

$P_R = \alpha = 1{,}4$

$P_p = 0$

$\eta_{cald} = \dfrac{\dot{Q}}{\dot{m}_{comb}\ PCI} \Rightarrow \dot{m}_{comb} = \dfrac{5{,}25 \times 10^3}{0{,}8404 \times 46348} = 0{,}135\ kg/s$

c) $\dot{W}_{útil} = \frac{\dot{W}_{elect.}}{\eta_{ger}} = \frac{415}{0,96} = 432,292\ KW$

$\dot{W}_{perdas} = \dot{W}_{exp\ real} - \dot{W}_{útil}$

VC turbina $\dot{m}_2 h_2 = \dot{W}_{exp.\ real} + \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_3 h_3$

$1,867 \times 3242,258 - \frac{3,03 \times 1000}{3600} \times 3173,371 - 1,105 \times 2911,082 = \frac{\dot{W}_{útil}}{real}$

$\dot{W}_{exp\ real} = 466,8\ KW$

$\dot{W}_{perdas} = 466,8 - 432,292 = 34,5\ KW$

d) 150 l/min

$P_{ot\ polit} = \dot{m}_{ar} R T_1 \frac{n}{n-1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$

$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \Leftrightarrow \frac{273 + 360}{273 + 240} = \left( \frac{60 \times 9,8 \times 10^4}{12 \times 9,8 \times 10^4} \right)^{\frac{n-1}{n}}$

$\rightarrow n = 1,176$

$P_{polit} = \frac{2040}{RT_1} \frac{1,176}{0,176} \left[ \left( \frac{60}{12} \right)^{\frac{0,176}{1,176}} - 1 \right]$

$= 5350\ W$

$pV = mRT$

$12 \times 9,8 \times 10^4 \times \frac{0,15}{60} = \dot{m} \times 287 \times 240$

$\dot{m} = \frac{2040}{RT}$

e)

$\dot{W}_{útil} = 432,292\ KW = N_e$

$\bar{v} = \frac{2nl}{60} \rightarrow n = \frac{8,1 \times 60}{2 \times 1,588 \times 0,17} = 900\ rpm$

$\omega = \frac{2\pi n}{60} = 94,25\ rad/s$

$T_{om} = \frac{N_e}{\omega} = \frac{432,292}{94,25} = 4,59\ KN\,m$

d) $\eta_v$ : 93 %

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} = \frac{N_e}{N_e + N_p} = \frac{432,282}{432,282 + 53,4} = 0,89$$

$$N_t = W_t \times \frac{n \times i}{60 \times A} = 15,3 \times \frac{900 \times 5}{60 \times 2} = 573,75 \text{ kW}$$

$$\eta_i = \frac{N_i}{N_t} = \frac{N_e + N_p}{N_t} = \frac{432,282 + 53,4}{573,75} = 0,847$$

$$\eta_g = \frac{N_e}{\dot{m}_{comb} \cdot PCI} = \frac{432,292}{0,8 \times 10^{-6} \times \frac{900 \times 5}{60 \times 2} \times 850 \times 10125 \times 4,1868} = 0,4$$

$\rho$

$$\eta_g = \eta_i \, \eta_m \, \eta_t$$

$$\eta_t = \frac{0,4}{0,847 \times 0,89} = 0,53$$

$$\eta_{t\,diesel} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}} \times \frac{\beta^{\gamma}-1}{\gamma(\beta-1)}$$

$$0,53 = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{1,4-1}} \times \frac{6^{1,4}-1}{1,4(6-1)} \Rightarrow \varepsilon = 21,8$$

e) $$\lambda = \frac{\left(\frac{m_{ar}}{m_{comb}}\right)_{EXTER}}{\left(\frac{m_{ar}}{m_{comb}}\right)_{REAL}}$$

f) $$\eta_v = \frac{\dot{V}\,120}{\frac{\pi d^2}{4} \cdot l \times i \times n} \Rightarrow 0,93 = \frac{\dot{V}\,120}{\frac{\pi 0,127^2}{4} \times 1,588 \times 0,17 \times 5 \times 900} = 0,214 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$p\,V = m\,R\,T$$

$$\frac{0,8 \times 10^5 \times 0,2137}{287\,(20+273,15)} = m_{ar} = 0,196 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{comb} = 0,8 \times 10^{-6} \times \frac{900 \times 5}{60 \times 2} \times 850 = 0,0255 \text{ kg/s}$$

$$\left(\frac{m_{ar}}{m_{comb}}\right)_{real} = \frac{0,196}{0,0255} = 7,7$$

$$\lambda = \frac{14,6}{7,7} = 1,9$$