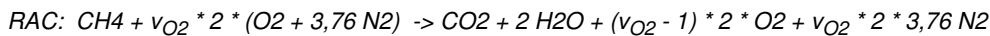


PME2445 Sistemas Térmicos - P2 - Questões 1, 2 e 3 - Exemplo para Aluno

Q1) Câmara de Comb TG; Q2) Ciclo Combinado (TG + Cald.Rec) ; Q3) Sistema de Cogeração (TG+TV+Proc. Ind)

Q1) (3,5 pts) Uma turbina a gás industrial utiliza metano ($CH_4 / PCI = 50000 \text{ kJ/kg}$) como combustível e é queimado com 180% de excesso de ar. Metano é fornecido numa linha a $P_C = 300 \text{ kPa}$ e $T_C = 25 \text{ OC}$, passa por um compressor booster, sendo comprimido com eficiência isoentrópica de 0,85 até a pressão do combustor. Ar ambiente entra no compressor a $P_A = 100 \text{ kPa}$ e $T_A = 25 \text{ OC}$. A relação de pressão no compressor da turbina é de 15 e a sua eficiência isoentrópica é de 0,85. Um gerador elétrico, acoplado ao eixo da turbina a gás, produz 100 MW de potência elétrica. A eficiência isoentrópica da turbina é de 0,90. Determine: (a) Razão ar-combustível, em massa (RAC_{ar,CH_4}); (b) Temperaturas na saída do compressor da turbina (T_B) e na saída do compressor booster (T_D); (c) Temperatura na saída da câmara de combustão (T_E); (d) Temperatura na saída da turbina (T_F); (e) Vazão de metano (m_{CH_4}); (f) Vazão em massa dos gases na turbina a gás (m_{gases}). Dados: $T_{ref} (PCI) = 25 \text{ OC}$; $k=1,3$ (metano), $k = 1,4$ (ar, gases de combustão); C_p médio: $C_{p_{metano}} = 2,25 \text{ kJ/kg K}$ (booster), $C_{p_{ar}} = 1,0 \text{ kJ/kg K}$ (compressor), $C_{p_{gas,comb}} = 1,28 \text{ kJ/kg K}$ (combustor), $C_{p_{gas,tur}} = 1,15 \text{ kJ/kg k}$ (turbina).



$$e_{O_2} = 1,8 \quad \nu_{O_2} = 1 + e_{O_2} \quad RAC_{metano} = \left[\nu_{O_2} \cdot 2 + \nu_{O_2} \cdot 2 \cdot 3,76 \right] \cdot \frac{28,97}{16}$$

$$T_{ref} = 25 + 273,15 \quad T_A = T_{ref} \quad P_A = 100 \quad P_C = 300 \quad r_p = 15$$

$$W_{liq,gas} = 100000 \quad \eta_{tg} = 0,9 \quad \eta_{cp} = 0,85 \quad PCI_{metano} = 50000$$

$$C_{p_{ar}} = 1 \quad C_{p_{metano}} = 2,25 \quad C_{p_{gas,comb}} = 1,28 \quad C_{p_{gas,tur}} = 1,15$$

$$k_{metano} = 1,3 \quad T_{Ds} = T_C \cdot \left[P_A \cdot \frac{r_p}{P_C} \right]^{\left[\frac{k_{metano} - 1}{k_{metano}} \right]} \quad T_D = T_C + \frac{T_{Ds} - T_C}{\eta_{cp}}$$

$$k_{ar} = 1,4 \quad T_{Bs} = T_A \cdot r_p^{\left[\frac{k_{ar} - 1}{k_{ar}} \right]} \quad T_B = T_A + \frac{T_{Bs} - T_A}{\eta_{cp}}$$

$$RAC_{metano} \cdot C_{p_{ar}} \cdot [T_B - T_{ref}] + PCI_{metano} + C_{p_{metano}} \cdot [T_D - T_{ref}] = [RAC_{metano} + 1] \cdot C_{p_{gas,comb}} \cdot [T_E - T_{ref}]$$

$$T_{Fs} = \frac{T_E}{r_p^{\left[\frac{k_{ar} - 1}{k_{ar}} \right]}} \quad T_F = T_E - \eta_{tg} \cdot [T_E - T_{Fs}] \quad w_{e_{cp}} = C_{p_{ar}} \cdot [T_A - T_B]$$

$$T_C = 25 + 273,15 \quad w_{e_{boost}} = C_{p_{metano}} \cdot [T_C - T_D] \quad w_{e_{tg}} = C_{p_{gas,tur}} \cdot [T_E - T_F]$$

$$m_{ar} = RAC_{metano} \cdot m_{metano} \quad W_{liq,gas} = m_{gas} \cdot w_{e_{tg}} + m_{ar} \cdot w_{e_{cp}}$$

$$W_{boost} = m_{metano} \cdot w_{e_{boost}} \quad m_{gas} = [RAC_{metano} + 1] \cdot m_{metano}$$

$$T_{B;C} = T_B - 273,15 \quad T_{D;C} = T_D - 273,15 \quad T_{E;C} = T_E - 273,15$$

$$T_{F;C} = T_F - 273,15$$

Q2) (2,0 pts) A turbina a gás descrita acima está acoplada a uma caldeira de recuperação com queima suplementar que gera vapor superaquecido para uma turbina a vapor. Considere que óleo combustível de PCI ($T_{ent} = T_{ref} = 25 \text{ oC}$) = 42000 kJ/kgoleo é consumido na queima suplementar de tal forma que todo o oxigênio excedente (na saída da turbina a gás) é utilizado nesta queima. A relação de massa de ar de combustão do óleo combustível é de $RAC_{ar,oleo} = 20 \text{ kgar seco/kgoleo}$. A temperatura dos gases na saída da caldeira de recuperação é de $T_H = 450 \text{ oC}$. Nestas condições, determine: (a) Vazão de óleo combustível (moleo); (b) Temperatura máxima (adiabática) dos gases na fornalha (TG); (c) Calor fornecido ao vapor pela caldeira de recuperação (Q_{cald}). Dados: $C_{p_{gas,rec}} = 1,19 \text{ kJ/kg k}$ (caldeira de recuperação).

$$C_{p_{gas;rec}} = 1,19 \quad PCI_{oleo} = 42000 \quad RAC_{est} = \left[2 + 2 \cdot 3,76 \right] \cdot \frac{28,97}{16}$$

$$RAC_{oleo} = 20 \quad m_{exc;ar} = [RAC_{metano} - RAC_{est}] \cdot m_{metano}$$

$$m_{oleo} = \frac{m_{exc;ar}}{RAC_{oleo}} \quad m_{gas;rec} = m_{gas} + m_{oleo}$$

$$m_{gas} \cdot Cp_{gas,tur} \cdot [T_F - T_{ref}] + m_{oleo} \cdot PCI_{oleo} = m_{gas;rec} \cdot Cp_{gas;rec} \cdot [T_G - T_{ref}]$$

$$T_H = 450 + 273,15 \quad Q_{cald} = m_{gas;rec} \cdot Cp_{gas;rec} \cdot [T_G - T_H] \quad T_{G;C} = T_G - 273,15$$

Q3) (3,5 pts) Considere que a temperatura do vapor na saída da caldeira de recuperação é $T_3 = 400$ OC e a pressão $P_3 = 5$ MPa. 75% do vapor gerado na caldeira de recuperação são utilizados para acionar uma turbina a vapor de condensação. Os 25% restantes são utilizados para fornecer calor para um processo industrial, que retorna como líquido à pressão de $P_7 = 200$ kPa e $T_7 = 50$ OC. A bomba B1 é alimentada com líquido saturado vindo do condensador à pressão de $P_4 = P_5 = 10$ kPa e descarrega o líquido à pressão $P_6 = 200$ kPa. Esta corrente é misturada com o retorno do processo industrial e entra na bomba B2 à pressão $P_1 = 200$ kPa, que comprime esta corrente até a pressão $P_2 = 5$ MPa (entrada da caldeira). As bombas têm eficiência isoentrópica de 0,83 e a eficiência isoentrópica da turbina é de 0,87. Nestas condições, determine: (a) Vazão em massa de vapor d'água (m_{vap}); (b) Potência da turbina a vapor ($W_{tur,vap}$); (c) Potência das bombas (W_{B1} , W_{B2}); (d) Potência líquida do ciclo combinado ($W_{liq,cc}$), considerando que a energia para acionar o compressor booster é retirada do gerador elétrico deste sistema; (e) Calor fornecido ao processo industrial (Q_{proc}); (f) Rendimento térmico global do ciclo combinado de cogeração (h_{cc}). Faça um diagrama esquemático do ciclo combinado de cogeração, com a indicação de todos os pontos.

$$P_1 = 200 \quad P_7 = P_1 \quad P_2 = 5000 \quad P_3 = P_2 \quad P_4 = 10$$

$$P_5 = P_4 \quad T_3 = 400 + 273,15 \quad T_7 = 50 + 273,15 \quad \eta_{bomba} = 0,83$$

$$\eta_{tv} = 0,87 \quad h_3 = h [\text{Steam} ; P = P_3 ; T = T_3] \quad s_3 = s [\text{Steam} ; P = P_3 ; T = T_3]$$

$$h_{4s} = h [\text{Steam} ; P = P_4 ; s = s_3] \quad x_{4s} = x [\text{Steam} ; P = P_4 ; s = s_3]$$

$$h_4 = h_3 - \eta_{tv} \cdot [h_3 - h_{4s}] \quad we_{tv} = h_3 - h_4 \quad h_5 = h [\text{Steam} ; P = P_5 ; x = 0]$$

$$v_5 = v [\text{Steam} ; P = P_5 ; x = 0] \quad we_{b;1} = -v_5 \cdot \left[\frac{P_1 - P_5}{\eta_{bomba}} \right] \quad h_6 = h_5 - we_{b;1}$$

$$h_7 = h [\text{Steam} ; P = P_7 ; T = T_7] \quad h_1 = 0,7 \cdot h_6 + 0,3 \cdot h_7$$

$$v_1 = v [\text{Steam} ; P = P_1 ; h = h_1] \quad we_{b;2} = -v_1 \cdot \left[\frac{P_2 - P_1}{\eta_{bomba}} \right] \quad h_2 = h_1 - we_{b;2}$$

$$Q_{cald} = m_{vap} \cdot [h_3 - h_2] \quad Q_{proc} = 0,25 \cdot m_{vap} \cdot [h_7 - h_3]$$

$$W_{tv} = 0,75 \cdot m_{vap} \cdot [h_3 - h_4] \quad W_{b;1} = 0,75 \cdot m_{vap} \cdot we_{b;1} \quad W_{b;2} = m_{vap} \cdot we_{b;2}$$

$$W_{liq;vap} = W_{tv} + W_{b;1} + W_{b;2} \quad W_{liq;ciclo} = W_{liq;gas} + W_{liq;vap} + W_{boost}$$

$$\eta_{ciclo;combinado} = \frac{W_{liq;ciclo} + |Q_{proc}|}{m_{metano} \cdot PCI_{metano} + m_{oleo} \cdot PCI_{oleo}}$$

SOLUTION

Unit Settings: SI K kPa kJ mass deg

$$C_{par} = 1 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$C_{p,gas,rec} = 1,19 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$C_{p,metano} = 2,25 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$\eta_{ciclo,combinado} = 0,4302 \text{ [-]}$$

$$\eta_{tg} = 0,9 \text{ [-]}$$

$$C_{p,gas,comb} = 1,28 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$C_{p,gas,tur} = 1,15 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$\eta_{bomba} = 0,83 \text{ [-]}$$

$$\eta_{cp} = 0,85 \text{ [-]}$$

$$\eta_{tv} = 0,87 \text{ [-]}$$

eO2 = 1,8 [-]
h2 = 203,1 [kJ/kg]
h4 = 2246 [kJ/kg]
h5 = 191,8 [kJ/kg]
h7 = 209,5 [kJ/kg]
kmetano = 1,3
mexc,ar = 163,6 [kg/s]
mgas,rec = 267,9 [kg/s]
moleo = 8,18 [kg/s]
vO2 = 2,8 [-]
PCIoleo = 42000 [kJ/kg]
P2 = 5000 [kPa]
P4 = 10 [kPa]
P7 = 200 [kPa]
PC = 300 [kPa]
Qproc = -83822 [kW]
RACmetano = 48,26 [-]
rP = 15 [-]
T3 = 673,2 [K]
TA = 298,2 [K]
TBS = 646,3 [K]
TC = 298,2 [K]
TDS = 432,3 [K]
TE = 1410 [K]
TF = 726,5 [K]
TF,C = 453,3 [C]
TG,C = 1504
Tref = 298,2 [K]
v5 = 0,00101 [m3/kg]
web,1 = -0,2313 [kJ/kg]
wecp = -409,6 [kJ/kg]
wetv = 949,2 [kJ/kg]
Wb,1 = -19,48 [kW]
Wliq,ciclo = 177389 [kW]
Wliq,vap = 79260 [kW]
x4s = 0,7996 [-]

h1 = 197,3 [kJ/kg]
h3 = 3196 [kJ/kg]
h4s = 2104 [kJ/kg]
h6 = 192,1 [kJ/kg]
kar = 1,4
mar = 254,5 [kg/s]
mgas = 259,8 [kg/s]
mmetano = 5,273 [kg/s]
mvap = 112,3 [kg/s]
PCImetano = 50000 [kJ/kg]
P1 = 200 [kPa]
P3 = 5000 [kPa]
P5 = 10 [kPa]
PA = 100 [kPa]
Qcald = 336000 [kW]
RACest = 17,24 [-]
RAColeo = 20 [-]
s3 = 6,646 [kJ/kg-K]
T7 = 323,2 [K]
TB = 707,8 [K]
TB,C = 434,6 [C]
TD = 455,9 [K]
TD,C = 182,8 [C]
TE,C = 1137 [C]
TFs = 650,5
TG = 1777 [K]
TH = 723,2 [K]
v1 = 0,001011 [m3/kg]
weboost = -355 [kJ/kg]
web,2 = -5,845 [kJ/kg]
wetg = 786,3 [kJ/kg]
Wboost = -1872 [kW]
Wb,2 = -656,3 [kW]
Wliq,gas = 100000 [kW]
Wtv = 79936 [kW]

No unit problems were detected.