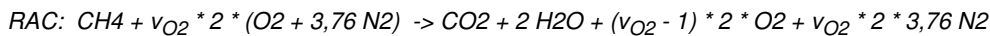


## PME2479 Máquinas Térmicas - P2 - Questões 1, 2 e 3 - Exemplo para Aluno

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).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$e_{O_2} = 1,8$  [-]  
 $h_2 = 203,1$  [kJ/kg]  
 $h_4 = 2246$  [kJ/kg]  
 $h_5 = 191,8$  [kJ/kg]  
 $h_7 = 209,5$  [kJ/kg]  
 $k_{metano} = 1,3$   
 $m_{exc,ar} = 163,6$  [kg/s]  
 $m_{gas,rec} = 267,9$  [kg/s]  
 $m_{oleo} = 8,18$  [kg/s]  
 $v_{O_2} = 2,8$  [-]  
 $PCI_{oleo} = 42000$  [kJ/kg]  
 $P_2 = 5000$  [kPa]  
 $P_4 = 10$  [kPa]  
 $P_7 = 200$  [kPa]  
 $P_C = 300$  [kPa]  
 $Q_{proc} = -83821$  [kW]  
 $RAC_{metano} = 48,26$  [-]  
 $r_P = 15$  [-]  
 $T_3 = 673,2$  [K]  
 $T_A = 298,1$  [K]  
 $T_{Bs} = 646,3$  [K]  
 $T_C = 298,1$  [K]  
 $T_{Ds} = 432,3$  [K]  
 $T_E = 1410$  [K]  
 $T_F = 726,5$  [K]  
 $T_{F,C} = 453,3$  [C]  
 $T_{G,C} = 1504$   
 $T_{ref} = 298,1$  [K]  
 $v_5 = 0,00101$  [m<sup>3</sup>/kg]  
 $w_{b,1} = -0,2313$  [kJ/kg]  
 $w_{cp} = -409,6$  [kJ/kg]  
 $w_{tv} = 949,2$  [kJ/kg]  
 $W_{b,1} = -19,48$  [kW]  
 $W_{liq,ciclo} = 177389$  [kW]  
 $W_{liq,vap} = 79260$  [kW]  
 $x_{4s} = 0,7996$  [-]

$h_1 = 197,3$  [kJ/kg]  
 $h_3 = 3196$  [kJ/kg]  
 $h_{4s} = 2104$  [kJ/kg]  
 $h_6 = 192,1$  [kJ/kg]  
 $k_{ar} = 1,4$   
 $m_{ar} = 254,5$  [kg/s]  
 $m_{gas} = 259,8$  [kg/s]  
 $m_{metano} = 5,273$  [kg/s]  
 $m_{vap} = 112,3$  [kg/s]  
 $PCI_{metano} = 50000$  [kJ/kg]  
 $P_1 = 200$  [kPa]  
 $P_3 = 5000$  [kPa]  
 $P_5 = 10$  [kPa]  
 $P_A = 100$  [kPa]  
 $Q_{cald} = 335999$  [kW]  
 $RAC_{est} = 17,24$  [-]  
 $RAC_{oleo} = 20$  [-]  
 $s_3 = 6,646$  [kJ/kg-K]  
 $T_7 = 323,1$  [K]  
 $T_B = 707,8$  [K]  
 $T_{B,C} = 434,6$  [C]  
 $T_D = 455,9$  [K]  
 $T_{D,C} = 182,8$  [C]  
 $T_{E,C} = 1137$  [C]  
 $T_{Fs} = 650,5$  [K]  
 $T_G = 1777$  [K]  
 $T_H = 723,2$  [K]  
 $v_1 = 0,001011$  [m<sup>3</sup>/kg]  
 $w_{boost} = -355$  [kJ/kg]  
 $w_{b,2} = -5,845$  [kJ/kg]  
 $w_{tg} = 786,3$  [kJ/kg]  
 $W_{boost} = -1872$  [kW]  
 $W_{b,2} = -656,3$  [kW]  
 $W_{liq,gas} = 100000$  [kW]  
 $W_{tv} = 79936$  [kW]

No unit problems were detected.

EES suggested units (shown in purple) for T\_Fs .