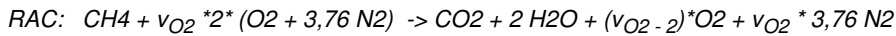


PME2479 Máquinas Térmicas - P2 - Questões 1, 2 e 3

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

Q1) (1,0 pts) Uma turbina a gás industrial utiliza metano (CH_4 / PCI= 50000 kJ/kg) como combustível, que entra a $T_{amb} = T_{ref} = 25$ oC e é nebulizado no combustor, queimando com 200% de excesso de ar. Ar ambiente entra no compressor a $P_A = 100$ kPa. A relação de pressão no compressor é de 9 e a eficiência isoentrópica do compressor é de 0,83. Determine: (a) Razão ar combustível, em massa (RAC); (b) Temperaturas na saída do compressor (T_B) e na saída da câmara de combustão (T_C). Dados: $k = 1,4$ (ar, gases de combustão); C_p médio: $C_{p,ar} = 1,0$ kJ/kg K (compressor), $C_{p,gas,tur,comb} = 1,28$ kJ/kg K (combustor).



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

$$\text{Ciclo Brayton} \quad T_{ref} = 25 + 273,15 \quad T_A = T_{ref}$$

$$\eta_{comp} = 0,83 \quad C_{p,ar} = 1 \quad C_{p,gas,tur} = 1,28 \quad k = 1,4 \quad r_p = 9$$

$$T_{Bs} = T_A \cdot r_p^{\left[\frac{k-1}{k} \right]} \quad T_B = T_A + \frac{T_{Bs} - T_A}{\eta_{comp}} \quad T_{B,C} = T_B - 273,15$$

$$PCI_{metano} = 50000 \quad RAC \cdot C_{p,ar} \cdot [T_B - T_{ref}] + PCI_{metano} = [RAC + 1] \cdot C_{p,gas,tur} \cdot [T_C - T_{ref}]$$

Q2) (4,0 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 a temperatura dos gases de combustão na entrada da turbina descrita acima é de 1007 oC e a potência total da turbina a gás é de 40 MW, com eficiência isoentrópica de 0,87. Considere que óleo combustível de PCI ($T_{ref} = 25$ oC) = 43000 kJ/kgcomb 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 $R_{ar,comb} = 20$ kgar seco/ kgcomb. A temperatura dos gases na saída da caldeira de recuperação é de $T_F = 450$ oC. Os dados do ciclo a vapor d'água estão apresentados a seguir. A bomba tem eficiência isoentrópica de 0,85, é alimentada com líquido saturado a $P_1 = 10$ kPa e descarrega o líquido na pressão de $P_2 = 4$ MPa. A temperatura do vapor na seção de alimentação da turbina é $T_3 = 400$ OC, sendo que a eficiência isoentrópica da turbina é de 0,87. Nestas condições, determine: (a) Temperatura na saída da turbina (T_D); (b) Vazão em massa dos gases na turbina a gás (m_{gases}); (c) Vazão de óleo combustível (m_{comb}); (d) Temperatura máxima dos gases na fornalha (T_E); (e) Entalpias em todos os pontos do ciclo a vapor (h_1, h_2, h_3, h_4); (f) Vazão em massa de vapor d'água ($m_{vap,rank}$); (g) Potência da turbina a vapor ($W_{tur,vap}$); (h) Potência líquida do ciclo combinado ($W_{liq,cc}$); (i) Rendimento térmico global do ciclo combinado (h_{cc}). Dados: $k = 1,4$ (ar, gases de combustão); C_p médio: $C_{p,ar} = 1,0$ kJ/kg K (compressor), $C_{p,gas,tur} = 1,28$ kJ/kg K (combustor, turbina), $C_{p,gas,rec} = 1,19$ kJ/kg k (caldeira de recuperação).

$$W_{gas} = 40000 \quad \eta_{tur} = 0,87 \quad T_F = 450 + 273,15$$

$$T_{Ds} = \frac{T_C}{r_p^{\left[\frac{k-1}{k} \right]}} \quad T_D = T_C - \eta_{tur} \cdot [T_C - T_{Ds}]$$

$$T_{C,C} = T_C - 273,15 \quad T_{D,C} = T_D - 273,15 \quad T_{F,C} = T_F - 273,15$$

$$w_{e,c} = C_{p,ar} \cdot [T_A - T_B] \quad w_{e,tur,gas} = C_{p,gas,tur} \cdot [T_C - T_D]$$

$$W_{gas} = w_{e,tur,gas} \cdot m_{gas} \quad m_{gas} = [RAC + 1] \cdot m_{comb}$$

$$m_{ar} = RAC \cdot m_{comb} \quad W_c = w_{e,c} \cdot m_{ar} \quad W_{liq,gas} = W_{gas} + W_c$$

$$\text{Ciclo de Rankine} \quad P_1 = 10 \quad P_2 = 4000 \quad P_3 = P_2 \quad T_3 = 400 + 273,15$$

$$P_4 = P_1 \quad \eta_{\text{bomba}} = 0,85$$

$$h_3 = \mathbf{h} [\text{'Steam'} ; P = P_3 ; T = T_3] \quad s_3 = \mathbf{s} [\text{'Steam'} ; P = P_3 ; T = T_3]$$

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

$$h_4 = h_3 - \eta_{\text{tur}} \cdot [h_3 - h_{4s}] \quad w_{e_{\text{tur,vap}}} = h_3 - h_4$$

$$h_1 = \mathbf{h} [\text{'Steam'} ; P = P_1 ; x = 0] \quad v_1 = \mathbf{v} [\text{'Steam'} ; P = P_1 ; x = 0]$$

$$w_{e_b} = -v_1 \cdot \left[\frac{P_2 - P_1}{\eta_{\text{bomba}}} \right] \quad h_2 = h_1 - w_{e_b} \quad T_{\text{sat}} = T_{\text{sat}} [\text{'Steam'} ; P = P_2]$$

$$T_2 = \mathbf{T} [\text{'Steam'} ; P = P_2 ; h = h_2] \quad T_1 = \mathbf{T} [\text{'Steam'} ; P = P_1 ; x = 0]$$

$$T_{2;C} = T_2 - 273,15 \quad T_{1;C} = T_1 - 273,15 \quad T_{\text{sat};C} = T_{\text{sat}} - 273,15$$

$$\text{Caldeira de Recuperação} \quad C_{p_{\text{gas;rec}}} = 1,19 \quad RAC_{\text{est}} = [2 + 2 \cdot 3,76] \cdot \frac{28,97}{16}$$

$$RAC_{\text{oleo}} = 20 \quad m_{\text{exc;ar}} = [RAC - RAC_{\text{est}}] \cdot m_{\text{comb}} \quad m_{\text{oleo}} = \frac{m_{\text{exc;ar}}}{RAC_{\text{oleo}}}$$

$$m_{\text{gas;cald}} = m_{\text{gas}} + m_{\text{oleo}}$$

$$m_{\text{gas}} \cdot C_{p_{\text{gas;tur}}} \cdot [T_D - T_{\text{ref}}] + m_{\text{oleo}} \cdot PCI_{\text{oleo}} = m_{\text{gas;cald}} \cdot C_{p_{\text{gas;rec}}} \cdot [T_E - T_{\text{ref}}]$$

$$m_{\text{gas;cald}} \cdot C_{p_{\text{gas;rec}}} \cdot [T_E - T_F] = m_{\text{vap;rank}} \cdot [h_3 - h_2] \quad T_{E;C} = T_E - 273,15$$

$$\text{Potência Líquida do Ciclo} \quad W_{\text{tur,vap}} = m_{\text{vap;rank}} \cdot w_{e_{\text{tur,vap}}} \quad W_b = m_{\text{vap;rank}} \cdot [h_1 - h_2]$$

$$W_{\text{liq,vap}} = W_{\text{tur,vap}} + W_b \quad W_{\text{liq;ciclo}} = W_{\text{liq;gas}} + W_{\text{liq,vap}} \quad PCI_{\text{oleo}} = 43000$$

$$\text{Rendimento do Ciclo} \quad \eta_{\text{ciclo;combinado}} = \frac{W_{\text{liq;ciclo}}}{m_{\text{comb}} \cdot PCI_{\text{metano}} + m_{\text{oleo}} \cdot PCI_{\text{oleo}}}$$

Q3) (3,0 pts) Substitua o ciclo de potência a vapor da questão anterior por um sistema de cogeração para produção de vapor de processo e água gelada. Neste sistema de cogeração, os gases quentes que saem da turbina entram num recuperador de calor (trocador de calor com efetividade $\epsilon=0,7$), cujo objetivo é produzir vapor saturado a $T_6=180$ oC a partir do líquido de retorno (processo industrial e chiller). 80% desse vapor é utilizado num processo industrial e retorna como condensado a $T_7 = 90$ oC. O restante deste vapor (20%) é utilizado no chiller de absorção ($COP=0,9$) para produzir água gelada e retorna como líquido saturado a $T_8 = 180$ oC. Considerando-se que a temperatura de saída dos gases de combustão na turbina a gás é de $T_D = 487,5$ oC, que a vazão dos gases quentes é de $m_{\text{gas}} = 60$ kg/s, que a potência líquida do ciclo de turbina a gás é de $W = 22$ MW, e que a água gelada entra no chiller a $T_9=12$ oC e sai a $T_{10}=7$ oC; pede-se: (a) Temperatura dos gases na saída do recuperador (T_E, rec); (b) Vazão mássica total de vapor gerado; (c) Calor utilizado no processo industrial (Q_{proc}); (d) Capacidade de refrigeração do chiller (Q_{refrig}); (e) Vazão de água gelada produzida (m_{ag}); (f) Rendimento térmico global do sistema de cogeração ($hcog$). Dado: $C_{p_{\text{gas;rec}}} = 1,19$ kJ/kg K (recuperador de calor).

$$m_{\text{gas;abs}} = 60 \quad W_{\text{liq;TG}} = 22000$$

$$T_9 = 12 + 273,15 \quad T_{10} = 5 + 273,15 \quad T_7 = 90 + 273,15$$

$$\text{Recuperador de Calor} \quad T_6 = 180 + 273,15 \quad T_8 = T_6 \quad \epsilon = 0,7$$

$$h_7 = \mathbf{h} [\text{'Steam'} ; T = T_7 ; x = 0] \quad h_8 = \mathbf{h} [\text{'Steam'} ; T = T_8 ; x = 0]$$

$$h_5 = 0,8 \cdot h_7 + 0,2 \cdot h_8 \quad h_6 = h \text{ ['Steam' ; } T=T_6 ; x=1 \text{]}$$

$$T_5 = T \text{ ['Steam' ; } h=h_5 ; x=0 \text{]} \quad Q_{\text{recup}} = \varepsilon \cdot m_{\text{gas;abs}} \cdot C_{p_{\text{gas;rec}}} \cdot [T_D - T_5]$$

$$Q_{\text{recup}} = m_{\text{gas;abs}} \cdot C_{p_{\text{gas;rec}}} \cdot [T_D - T_{E;\text{rec}}] \quad Q_{\text{recup}} = m_{\text{vap}} \cdot [h_6 - h_5]$$

$$Q_{\text{proc}} = 0,8 \cdot m_{\text{vap}} \cdot [h_6 - h_7]$$

$$\text{Chiller } h_9 = h \text{ ['Steam' ; } T=T_9 ; x=0 \text{]} \quad h_{10} = h \text{ ['Steam' ; } T=T_{10} ; x=0 \text{]}$$

$$\text{COP} = 0,9 \quad Q_{\text{refrig}} = \text{COP} \cdot 0,2 \cdot m_{\text{vap}} \cdot [h_6 - h_8] \quad Q_{\text{refrig}} = m_{\text{ag}} \cdot [h_9 - h_{10}]$$

$$\text{Rendimento do Ciclo} \quad \eta_{\text{cogeracao}} = \frac{W_{\text{liq;TG}} + Q_{\text{proc}} + Q_{\text{refrig}}}{m_{\text{comb}} \cdot \text{PCI}_{\text{metano}}}$$

SOLUTION

Unit Settings: SI K kPa kJ mass deg

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

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

$$\varepsilon = 0,7 \text{ [-]}$$

$$\eta_{\text{ciclo,combinado}} = 0,3438 \text{ [-]}$$

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

$$e_{O_2} = 2 \text{ [-]}$$

$$h_{10} = 21,02 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h_3 = 3213 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h_{4s} = 2144 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h_6 = 2778 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h_8 = 763,2 \text{ [kJ/kg]}$$

$$k = 1,4 \text{ [-]}$$

$$m_{\text{ar}} = 59,06 \text{ [kg/s]}$$

$$m_{\text{exc,ar}} = 39,38 \text{ [kg/s]}$$

$$m_{\text{gas,abs}} = 60 \text{ [kg/s]}$$

$$m_{\text{oleo}} = 1,969 \text{ [kg/s]}$$

$$m_{\text{vap,rank}} = 29,45 \text{ [kg/s]}$$

$$\text{PCI}_{\text{metano}} = 50000 \text{ [kJ/kg]}$$

$$P_1 = 10 \text{ [kPa]}$$

$$P_3 = 4000 \text{ [kPa]}$$

$$Q_{\text{proc}} = 15665 \text{ [kW]}$$

$$Q_{\text{refrig}} = 2957 \text{ [kW]}$$

$$\text{RAC}_{\text{est}} = 17,24 \text{ [-]}$$

$$r_P = 9 \text{ [-]}$$

$$T_1 = 318,9 \text{ [K]}$$

$$T_{1,C} = 45,79 \text{ [C]}$$

$$T_{2,C} = 46,09 \text{ [C]}$$

$$T_5 = 381,5 \text{ [K]}$$

$$T_7 = 363,2 \text{ [K]}$$

$$T_9 = 285,1 \text{ [K]}$$

$$T_B = 611,9 \text{ [K]}$$

$$T_{B,C} = 338,8 \text{ [C]}$$

$$T_{C,C} = 1007 \text{ [C]}$$

$$T_{Ds} = 683,1 \text{ [K]}$$

$$T_E = 1924 \text{ [K]}$$

$$T_{E,\text{rec}} = 495,2 \text{ [K]}$$

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

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

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

$$\eta_{\text{cogeracao}} = 0,7113 \text{ [-]}$$

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

$$h_1 = 191,7 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h_2 = 196,5 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h_4 = 2283 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h_5 = 454,2 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h_7 = 376,9 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h_9 = 50,36 \text{ [kJ/kg]}$$

$$m_{\text{ag}} = 100,8 \text{ [kg/s]}$$

$$m_{\text{comb}} = 1,142 \text{ [kg/s]}$$

$$m_{\text{gas}} = 60,21 \text{ [kg/s]}$$

$$m_{\text{gas,cald}} = 62,17 \text{ [kg/s]}$$

$$m_{\text{vap}} = 8,156 \text{ [kg/s]}$$

$$v_{O_2} = 3 \text{ [-]}$$

$$\text{PCI}_{\text{oleo}} = 43000 \text{ [kJ/kg]}$$

$$P_2 = 4000 \text{ [kPa]}$$

$$P_4 = 10 \text{ [kPa]}$$

$$Q_{\text{recup}} = 18951 \text{ [kW]}$$

$$\text{RAC} = 51,71 \text{ [-]}$$

$$\text{RAC}_{\text{oleo}} = 20 \text{ [-]}$$

$$s_3 = 6,769 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$T_{10} = 278,2 \text{ [K]}$$

$$T_2 = 319,2 \text{ [K]}$$

$$T_3 = 673,2 \text{ [K]}$$

$$T_6 = 453,1 \text{ [K]}$$

$$T_8 = 453,1 \text{ [K]}$$

$$T_A = 298,1 \text{ [K]}$$

$$T_{Bs} = 558,6 \text{ [K]}$$

$$T_C = 1280 \text{ [K]}$$

$$T_D = 760,6 \text{ [K]}$$

$$T_{D,C} = 487,5 \text{ [C]}$$

$$T_{E,C} = 1651 \text{ [C]}$$

$$T_F = 723,2 \text{ [K]}$$

$T_{F,C} = 450$ [C]	$T_{ref} = 298,1$ [K]
$T_{sat} = 523,5$ [K]	$T_{sat,C} = 250,4$ [C]
$v_1 = 0,00101$ [m ³ /kg]	$w_{eb} = -4,742$ [kJ/kg]
$w_{ec} = -313,8$ [kJ/kg]	$w_{tur,gas} = 664,4$ [kJ/kg]
$w_{tur,vap} = 930,7$ [kJ/kg]	$W_b = -139,7$ [kW]
$W_c = -18531$ [kW]	$W_{gas} = 40000$ [kW]
$W_{liq,ciclo} = 48740$ [kW]	$W_{liq,gas} = 21469$ [kW]
$W_{liq,TG} = 22000$ [kW]	$W_{liq,vap} = 27271$ [kW]
$W_{tur,vap} = 27411$ [kW]	$x_{4s} = 0,816$ [-]

No unit problems were detected.