



**Pergunta 1 (5 valores)**

A que temperatura se faz a mistura num motor que funciona com o combustível  $C_8H_{17}$  à pressão ambiente de 110 kPa, num local onde a gravidade é de  $9,81 \text{ m/s}^2$  e com mistura estequiométrica, sabendo que o diâmetro do difusor do carburador tem 3,1 cm, a pressão no difusor é de 0,02 bar, e a massa específica do combustível é de  $790 \text{ kg/m}^3$ , sabendo ainda que diâmetro do *gicleur* é de 5 mm o coeficiente de descarga do ar é de 0,8 e o do combustível 0,7.

**Dados:**

$$C_a=0,8$$

$$C_c=0,7$$

$$d_d=0,031 \text{ [m]}$$

$$P_1=1,1 \times 10^5 \text{ [Pa]}$$

$$P_2=0,02 \times 10^5 \text{ [Pa]}$$

$$g=9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

$$a_1=8$$

$$b_1=17$$

$$\rho_{o_{ag}}=1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$d_g=0,005 \text{ [m]}$$

**Resolução:**

$$y = b/a = 18/7 = \mathbf{2,57}$$

$$RAC_s = \frac{34,32(4+y)}{12+1 \times y} = \frac{34,32(4+2,125)}{12+1 \times 2,125} = \mathbf{14,88}$$

$$RAC = \frac{C_a \cdot d_2^2 \cdot P_1 \cdot 0,12 \sqrt{g/T_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{1,43} - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{1,71} \right]}}{C_f \cdot d_f^2 \cdot 1,11 \sqrt{G \Delta P}}$$

$$RAC^2 = \frac{C_a^2 \cdot d_2^4 \cdot P_1^2 \cdot 0,12^2 \left[ g/T_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{1,43} - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{1,71} \right] \right]}{C_f^2 \cdot d_f^4 \cdot 1,11^2 G \Delta P}$$

$$T_1 = \frac{C_a^2 \cdot d_2^4 \cdot P_1^2 \cdot 0,12^2 \left[ \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{1,43} - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{1,71} \right] \right]}{RAC^2 \cdot C_f^2 \cdot d_f^4 \cdot 1,11^2 \cdot G \cdot \Delta P}$$

$$= \frac{C_a^2 \cdot d_2^4 \cdot P_1^2 \cdot 0,12^2 \left[ g / T_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{1,43} - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{1,71} \right] \right]}{RAC^2 \cdot C_f^2 \cdot d_f^4 \cdot \frac{\rho_{comb}}{\rho_{\acute{a}gua}} \cdot 1,11^2 \Delta P}$$

$$T_1 = \frac{0,8^2 \cdot 0,031^4 \cdot 110000^2 \cdot 0,12^2 \left[ 9,81 \left[ \left( \frac{2000}{110000} \right)^{1,43} - \left( \frac{2000}{110000} \right)^{1,71} \right] \right]}{14,88^2 \cdot 0,7^2 \cdot 0,005^4 \cdot \frac{790}{1000} \cdot 1,11^2 (110000 - 2000)}$$

$$T_1 = 310,1 \text{ [K]} \approx 36,97 \text{ [C]}$$

### Pergunta 2 (5 valores)

Uma turbina a gás com regeneração opera com dois estágios de compressão e dois de expansão. A relação de pressão em cada estágio do compressor e da turbina é de 4,5. O ar entra em cada estágio do compressor a 30 °C e em cada estágio da turbina a 1400 K. As eficiências do compressor e da turbina são de 80% e 86%, respectivamente, e a eficiência do regenerador é de 72%. Assumindo o calor específico do ar constante à temperatura ambiente  $c_p = 1,005 \text{ [kJ/kgK]}$  e o coeficiente politrópico do fluido motor  $k = 1,41$ , determine:

- O trabalho líquido;
- A relação entre os trabalhos do compressor e da turbina; e a
- A eficiência térmica do ciclo.

### Dados:

$$T_6 = 1400 \text{ [K]}$$

$$T_8 = T_6$$

$$\pi_t = \pi_c = 3,5$$

$$t_1 = 30 \text{ [C]}$$

$$P_1 = 100 \text{ [kPa]}$$

$$T_3 = T_1$$

$$\eta_{reg} = 0,72$$

$$\eta_c = 0,80$$

$$\eta_t = 0,86$$

### Resolução:

a) Determine o trabalho líquido e a eficiência térmica do ciclo;

$$T_{4s} = T_{2s} = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} = 303,2 \times (4,5)^{(1,41-1)/1,41} = \mathbf{469,5 \text{ K}}$$

$$\eta_c = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{c_p (T_{2s} - T_1)}{c_p (T_2 - T_1)} \rightarrow T_4 = T_2 = T_1 + (T_{2s} - T_1) / \eta_c$$

$$= 303,2 + (469,5 - 303,2) / 0,8 = \mathbf{511 \text{ K}}$$

$$T_{9s} = T_{7s} = T_6 \left( \frac{P_7}{P_6} \right)^{(k-1)/k} = 1400 \times \left( \frac{1}{4,5} \right)^{(1,4-1)/1,4} = \mathbf{904 \text{ K}}$$

$$\eta_T = \frac{h_6 - h_7}{h_6 - h_{7s}} = \frac{c_p (T_6 - T_7)}{c_p (T_6 - T_{7s})} \rightarrow T_7 = T_9 = T_6 - \eta_T (T_6 - T_{7s})$$

$$1250 - 0,86(1400 - 904) = \mathbf{973,5 \text{ K}}$$

$$\varepsilon = \frac{h_5 - h_4}{h_9 - h_4} = \frac{c_p (T_5 - T_4)}{c_p (T_9 - T_4)} \rightarrow T_5 = T_4 + \varepsilon (T_9 - T_4)$$

$$= 511 + 0,72(973,5 - 511) = \mathbf{844 \text{ K}}$$

$$W_{c,in} = 2(h_2 - h_1) = 2c_p (T_2 - T_1) = 2 \cdot 1,005(511 - 303,2) = \mathbf{417,9 \text{ kJ/kg}}$$

$$W_{T,out} = 2(h_6 - h_7) = 2c_p (T_6 - T_7) = 2 \cdot 1,005(1400 - 973,5) = \mathbf{857,3 \text{ kJ/kg}}$$

A Razão dos trabalhos é nos dada por:

$$r_r = \frac{W_{c,in}}{W_{T,out}} = \frac{417,9}{857,3} = \mathbf{48,7 \%}$$

$$q_{in} = (h_6 - h_5) + (h_8 - h_7) = c_p [(T_6 - T_5) + (T_8 - T_7)]$$

$$= 1,005 [(1400 - 844) + (1400 - 973,5)] = \mathbf{987,4 \text{ kJ/kg}}$$

O trabalho Líquido determina-se de:

$$W_{liq} = W_{T,out} - W_{c,in} = 857,3 - 417,9 = \mathbf{439,5 \text{ kJ/kg}}$$

O Rendimento Total do Ciclo é dado por:

$$\eta_{tot} = \frac{W_{liq}}{q_{in}} = \frac{439,5}{987,4} = \mathbf{44,5 \%}$$

### Pergunta 3 (5 valores)

Um motor turbojato opera num avião a velocidade de 250 m/s num voo a altitude onde a pressão atmosférica é de 0,25 atm e a temperatura de -50°C. O motor suga 60 kg/s de ar e o comprime até a pressão de 12 atm, com a eficiência isentrópica de 85%. O combustível utilizado, querosene C7H17, tem o poder calorífico de 42600 kJ/kg, e é usado com o coeficiente de excesso de ar 2,1. Após a combustão, os gases se expandem na saída da turbina até uma determinada pressão. Assumindo que a eficiência da turbina é de 90%, a do bocal de exaustão 80% e que a perda de pressão na câmara de combustão é negligenciável, a constante universal dos gases é  $R=287 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ , o poder calorífico do ar à pressão constante  $c_p=1,005 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  e o coeficiente politrópico do fluido motor 1,41. Determine:

- A potência desenvolvida pelo motor;
- A velocidade de saída dos gases de exaustão;
- O impulso do motor; e o
- O empuxo específico.

#### Dados:

$$P_{atm}=0,25 \text{ [atm]}$$

$$T_{amb}=-50 \text{ [C]}$$

$$\dot{m}_{ar}=60 \text{ [kg/s]}$$

$$P_2=12 \text{ [atm]}$$

$$\eta_c=0,85$$

$$\eta_t=0,9$$

$$\eta_b=0,8$$

$$Q_{\text{comb}}=42600 \text{ [kJ/kg]}$$

$$k=1,41$$

$$c_p=1,005 \text{ [kJ/(kg}\cdot\text{K)]}$$

$$R=287 \text{ [J/(kg}\cdot\text{K)]}$$

$$V_0=250 \text{ [m/s]}$$

$$a=7$$

$$b=17$$

$$\lambda=2,1$$

### Resolução:

$$P_1=P_{\text{atm}}\times 101325 = 25331 \text{ [Pa]}$$

$$P_2=12\times 101325=1,216\times 10^6 \text{ [Pa]}$$

$$T_1=-50+273,15=223,2 \text{ [K]}$$

$$y = b/a = 17/7=2,429$$

$$RAC_s = \frac{34,32(4+y)}{12+1\times y} = \frac{34,32(4+2,429)}{12+1\times 2,429} = \mathbf{15,29}$$

$$RCA = \frac{1}{RAC_s \cdot \lambda} = \frac{1}{15,29 \cdot 2,1} = \mathbf{0,03114}$$

1. A temperatura após a compressão pode ser encontrada usando a relação isentrópica:

$$T_{2s} = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$T_{2s} = 223,15 \left( \frac{1216000}{25331} \right)^{\frac{0,41}{1,41}} = 687,8 \text{ K}$$

2. A temperatura real após a compressão, considerando a eficiência:

$$T_2 = T_1 + \frac{T_{2s} - T_1}{\eta_c}$$

$$T_2 = 223,15 + \frac{687,8 - 223,15}{0,85} = 769,8 \text{ K}$$

3: Energia adicionada pelo combustível

$$\dot{Q} = RCA \cdot \dot{m}_{ar} \cdot Q_r$$

$$\dot{Q} = 0,031 \times 60 \times 42600 = 79598 \text{ kW}$$

4. Condições na saída da turbina:

A temperatura dos gases de combustão é:

$$T_3 = T_2 + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_{ar} \cdot C_p}$$

$$T_3 = 769,8 + \frac{79598}{60 \times 1,005} = 2090 \text{ K}$$

5: Potência desenvolvida pela turbina

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{ar} \cdot C_p \cdot (T_3 - T_4) \cdot \eta_t$$

Onde  $T_4$  é a temperatura de saída da turbina, que pode ser encontrada considerando que a expansão é isentrópica:

$$T_{4s} = T_3 \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$T_{4s} = 2090 \left( \frac{25331}{1216000} \right)^{\frac{0,41}{1,41}} = 678 \text{ K}$$

► A temperatura real após a expansão, considerando a eficiência da turbina:

$$T_4 = T_3 - \eta_t (T_3 - T_{4s})$$

$$T_4 = 2090 - 0,90(2090 - 678) = 819,2 \text{ K}$$

A Potência desenvolvida pela turbina:

$$\dot{W}_t = 60 \times 1,005 \times (2090 - 819,2) \times 0,9 = 68958 \text{ kW}$$

#### 6. Velocidade de Saída dos Gases de Exaustão

A velocidade de saída pode ser determinada a partir da equação de energia de Bernoulli:

$$V_e = \sqrt{2c_p(T_3 - T_4)\eta_b}$$

$$V_e = \sqrt{2 \times 1005 \times (2090 - 819,2) \times 0,8} = 1429 \text{ m/s}$$

#### 7. A pressão de exaustão é dada por:

$$\frac{P_e}{P_3} = \left( \frac{T_4}{T_3} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$P_e = P_3 \cdot \left( \frac{T_4}{T_3} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$P_e = 1216000 \cdot \left( \frac{819,2}{2090} \right)^{\frac{1,41}{1,41-1}} = 48548 \text{ Pa}$$

#### 8. O Impulso é dado por:

$$F = \dot{m} \cdot (V_j - V_0) + (P_e - P_0) \cdot A_e \quad [N]$$

A massa específica do escoamento:

$$\rho_e = \frac{P_e}{R \cdot T_e}$$

$$\rho_e = \frac{48548}{287 \cdot 819,2} = 0,2065 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

A área do escoamento é calculada de:

$$A_e = \frac{60}{0,2065 \cdot 1429} = 0,203 \text{ m}^2$$

$$F = 60 \cdot (1429 - 250) + (48548 - 25331) \cdot 0,203 \quad [N]$$

$$F = 75484 \text{ N}$$

#### 9. Empuxo específico é dado por:

$$S = \frac{F}{\dot{m}} \quad [m/s]$$

$$S = \frac{75484}{60} = 1258 [m/s]$$

#### Pergunta 4 (5 valores)

Determine a que temperatura o fluido motor entra na turbina de um ciclo de Brayton, sabendo que a temperatura de entrada do mesmo no compressor é de 25 °C, à entrada da câmara de combustão de 500 °C, que o calor específico a pressão constante do fluido é de 28,5 kJ/kmol K, a constante universal dos gases é de 8,314 kJ/kmol K, o rendimento térmico do ciclo real de Brayton é 36%, o rendimento do compressor é 85% e o rendimento do da turbina 82%.

#### Dados:

$$t_1 = 25 \text{ °C}$$

$$t_2 = 500 \text{ °C}$$

$$\eta_{\text{ricom}} = 0,85$$

$$\eta_{\text{riturb}} = 0,82$$

$$c_p = 28,5 \text{ kJ/kmol K}$$

$$R = 8,314 \text{ kJ/kmol K}$$

$$\eta_{\text{t.Bryton}} = 0,36$$

#### Resolução:

$$k = \frac{c_p}{c_p - R} = \mathbf{1,412}$$

$$\gamma = \left[ 1 + \eta_{ri}^{comp} (\theta - 1) \right]$$

$$\alpha = \eta_{ri}^{comp} \eta_{ri}^{turb} \theta$$

$$\eta_t = \frac{\left( 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}} \right) \cdot \left( \alpha - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right)}{\gamma - \beta^{\frac{k-1}{k}}}$$

$$\beta^{\frac{k-1}{k}} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{773,2 \text{ [K]}}{298,2 \text{ [K]}} = 2,593$$

$$0,36 = \frac{\left( 1 - \frac{1}{2,593} \right) \cdot (\alpha - 2,593)}{\gamma - 2,593}$$

$$0,36(\gamma - 2,593) = \left( 1 - \frac{1}{2,593} \right) \cdot (\alpha - 2,593)$$

$$0,36 \left( \left[ 1 + \eta_{ri}^{comp} (\theta - 1) \right] - 2,593 \right) = \left( 1 - \frac{1}{2,593} \right) \cdot \left( \eta_{ri}^{comp} \eta_{ri}^{turb} \theta - 2,593 \right)$$

$$0,36 \left( \left[ 1 + 0,85(\theta - 1) \right] - 2,593 \right) = \left( 1 - \frac{1}{2,593} \right) \cdot (0,85 \cdot 0,82 \cdot \theta - 2,593)$$

$$\theta = 5,839$$

$$\theta = \frac{T_3}{T_1} \rightarrow T_3 = T_1 \cdot \theta$$

$$T_3 = 298,2 \text{ [K]} \cdot 5,839 = \mathbf{1741 \text{ [K]}} \approx 1468 \text{ [C]}$$

O Regente  
Prof. Doutor Eng<sup>o</sup> Jorge Nhambiu