

Sistemas Energéticos

3º ano 6º semestre

Aula 18



Aula 18: Queimadores - Prática



Tópicos

- ***Consumo de combustível e distribuição do ar de combustão***
- ***Dimensionamento do circuito de óleo de um queimador***
- ***Dimensionamento da passagem de ar de atomização***
- ***Seleção de um queimador compacto e da válvula de gás***



Problema 18.1

Uma fornalha equipada com um queimador a gás natural deve fornecer uma potência térmica útil de 720 kW, com um rendimento térmico global de 90 %. O queimador opera com mistura parcial: parte do ar mistura-se com o combustível antes da entrada na fornalha e o restante é introduzido como ar secundário. Determine:

- ***A potência térmica fornecida pelo combustível;***
- ***Os caudais volumétrico e mássico de gás natural, em Nm³/h e kg/h;***
- ***O caudal mássico total de ar efectivamente fornecido ao queimador;***
- ***Os caudais mássicos de ar primário e secundário;***
- ***O caudal volumétrico total de ar, em m³/h;***
- ***Por que razão o ar secundário não deve ser confundido com o ar de excesso.***



Problema 18.1

Considere os seguintes dados:

Grandeza	Valor	Unidade
Potência térmica útil, P_u	720	kW
Rendimento térmico global, η	0,90	—
Poder calorífico inferior do gás natural, PC_{lv}	36	MJ/Nm ³
Massa específica do gás (condições normais), $\rho_{gás}$	0,72	kg/Nm ³
Relação ar–combustível estequiométrica, L_0	17,2	kg ar/kg comb.
Coefficiente de excesso de ar, λ	1,15	—
Ar primário (fracção do ar estequiométrico)	60	%
Massa específica do ar (cond. de alimentação), ρ_{ar}	1,18	kg/m ³

Problema 18.1 (Resolução I)

Potência térmica fornecida pelo combustível:

$$P_c = \frac{P_u}{\eta} = \frac{720}{0,90} = 800 \text{ kW}$$

Caudal volumétrico de gás (PCI em MJ/Nm³ ⇒ potência em MJ/h):

$$\dot{V}_{\text{gás}} = \frac{P_c \cdot 3,6}{PCI_v} = \frac{800 \cdot 3,6}{36} = 80,0 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Caudal mássico de gás natural:

$$\dot{m}_{\text{gás}} = \rho_{\text{gás}} \cdot \dot{V}_{\text{gás}} = 0,72 \cdot 80,0 = 57,60 \text{ kg/h}$$



Problema 18.1 (Resolução II)

Caudal de ar estequiométrico:

$$\dot{m}_{\text{ar},0} = L_0 \cdot \dot{m}_{\text{gás}} = 17,2 \cdot 57,60 = 990,72 \text{ kg/h}$$

Caudal total de ar efectivamente fornecido:

$$\dot{m}_{\text{ar}} = \lambda \cdot \dot{m}_{\text{ar},0} = 1,15 \cdot 990,72 = 1\,139,33 \text{ kg/h}$$

Ar primário (60 % do ar ESTEQUIOMÉTRICO) e ar secundário:

$$\dot{m}_{\text{p}} = 0,60 \cdot \dot{m}_{\text{ar},0} = 0,60 \cdot 990,72 = 594,43 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{\text{s}} = \dot{m}_{\text{ar}} - \dot{m}_{\text{p}} = 1\,139,33 - 594,43 = 544,90 \text{ kg/h}$$

Verificação:

$$\dot{m}_{\text{p}} + \dot{m}_{\text{s}} = 594,43 + 544,90 = 1\,139,33 \text{ kg/h}$$



Problema 18.1 (Resolução III)

Caudal volumétrico total de ar (condições de alimentação):

$$\dot{V}_{\text{ar}} = \frac{\dot{m}_{\text{ar}}}{\rho_{\text{ar}}} = \frac{1\,139,33}{1,18} = 965,53 \text{ m}^3/\text{h}$$

Ar de excesso (quantidade acima da estequiométrica):

$$\dot{m}_{\text{exc}} = \dot{m}_{\text{ar}} - \dot{m}_{\text{ar},0} = 1\,139,33 - 990,72 = 148,61 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_s = 0,40 \cdot 990,72 + 148,61 = 544,90 \text{ kg/h}$$

O ar secundário define-se pelo local (etapa) em que é introduzido; o ar de excesso, pela quantidade acima da necessidade estequiométrica. Aqui, o ar secundário inclui os 40 % de ar estequiométrico em falta e todo o excesso.



Calculando resulta que:

$$P_c = 800 \text{ kW}; \quad \dot{V}_{\text{gás}} = 80 \text{ Nm}^3/\text{h}; \quad \dot{m}_{\text{ar}} = 1\,139,33 \text{ kg/h}$$



Problema 18.2

Um queimador de combustível líquido deve fornecer uma potência térmica útil de 500 kW. Pretende-se dimensionar o canal de alimentação e o orifício de saída do óleo. Determine:

- ***Os caudais mássico e volumétrico de óleo, em kg/h e L/h;***
- ***O diâmetro interior do canal de alimentação;***
- ***O número de Reynolds e o regime de escoamento;***
- ***O factor de atrito de Darcy e a perda de pressão no canal e nos acessórios;***
- ***A diferença de pressão disponível no orifício de saída;***
- ***O diâmetro de um único orifício circular capaz de fornecer o caudal;***
- ***O efeito do aumento da viscosidade na perda de pressão e na atomização.***

Admita escoamento permanente, canal circular horizontal e pressão disponível no orifício igual à de alimentação menos as perdas no canal e nos acessórios.



Problema 18.2

Considere os seguintes dados:

Grandeza	Valor	Unidade
Potência térmica útil, P_u	500	kW
Rendimento térmico global, η	0,85	–
Poder calorífico inferior do óleo, PCI	40	MJ/kg
Massa específica do óleo à temperatura de injeção, ρ_o	900	kg/m ³
Viscosidade dinâmica do óleo, μ_o	0,020	Pa·s
Velocidade média adoptada no canal, u_o	0,80	m/s
Comprimento do canal, L	0,50	m
Soma dos coeficientes de perdas localizadas, ΣK	3,0	–
Pressão à entrada do canal (relativa à descarga), Δp_{disp}	300	kPa
Coeficiente de descarga do orifício, C_d	0,70	–



Problema 18.2 (Resolução I)

Caudais mássico e volumétrico de óleo:

$$\dot{m}_o = \frac{P_u}{\eta \cdot PCI} = \frac{500}{0,85 \cdot 40\,000} = 0,014706 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_o = 0,014706 \cdot 3\,600 = 52,94 \text{ kg/h}$$

$$\dot{V}_o = \frac{\dot{m}_o}{\rho_o} = \frac{52,94}{900} = 0,058824 \text{ m}^3/\text{h} = 58,82 \text{ L/h}$$

Área e diâmetro interior do canal (equação da continuidade):

$$A_c = \frac{\dot{m}_o}{\rho_o \cdot u_o} = \frac{0,014706}{900 \cdot 0,80} = 2,0425 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$d_c = \sqrt{\frac{4A_c}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,0425 \times 10^{-5}}{\pi}} = 5,10 \times 10^{-3} \text{ m} = 5,10 \text{ mm}$$

Problema 18.2 (Resolução II)

Número de Reynolds e regime de escoamento:

$$Re = \frac{\rho_o \cdot u_o \cdot d_c}{\mu_o} = \frac{900 \cdot 0,80 \cdot 0,005100}{0,020} = 183,6$$

$$Re = 183,6 < 2\,300 \Rightarrow \text{escoamento laminar}$$

Factor de atrito de Darcy (regime laminar):

$$f_D = \frac{64}{Re} = \frac{64}{183,6} = 0,3486$$

Perda de pressão no canal e nos acessórios:

$$\Delta p_{\text{canal}} = \left(f_D \frac{L}{d_c} + \Sigma K \right) \frac{\rho_o u_o^2}{2}$$

$$\Delta p_{\text{canal}} = \left(0,3486 \cdot \frac{0,50}{0,005100} + 3,0 \right) \cdot \frac{900 \cdot 0,80^2}{2}$$

$$\Delta p_{\text{canal}} = (34,18 + 3,0) \cdot 288 = 10\,708 \text{ Pa} = 10,71 \text{ kPa}$$





Problema 18.2 (Resolução III)

Diferença de pressão disponível no orifício:

$$\Delta p_j = \Delta p_{\text{disp}} - \Delta p_{\text{canal}} = 300 - 10,71 = 289,29 \text{ kPa}$$

Área e diâmetro do orifício de saída:

$$\dot{m}_o = C_d \cdot A_j \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_o \cdot \Delta p_j} \Rightarrow A_j = \frac{\dot{m}_o}{C_d \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_o \cdot \Delta p_j}}$$

$$\sqrt{2 \cdot \rho_o \cdot \Delta p_j} = \sqrt{2 \cdot 900 \cdot 289\,292} = 22\,819 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

$$A_j = \frac{0,014706}{0,70 \cdot 22\,819} = 9,206 \times 10^{-7} \text{ m}^2 = 0,921 \text{ mm}^2$$

$$d_j = \sqrt{\frac{4 \cdot A_j}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 9,206 \times 10^{-7}}{\pi}} = 1,083 \times 10^{-3} \text{ m} \approx 1,08 \text{ mm}$$

Calculando resulta que:

$$d_c = 5,10 \text{ mm}; \quad Re = 183,6; \quad \Delta p_{\text{canal}} = 10,71 \text{ kPa}; \quad d_j = 1,08 \text{ mm}$$



Problema 18.2 (Resolução IV)

Efeito do aumento da viscosidade do óleo (caudal e geometria constantes):

- ***Diminui o número de Reynolds;***
- ***Aumenta a perda de pressão por atrito no regime laminar ($f_D = 64/Re$);***
- ***Reduz a pressão disponível no orifício, se a pressão de alimentação for constante;***
- ***Dificulta a fragmentação do óleo, produzindo gotículas maiores e pior atomização.***

O diâmetro calculado é um resultado de pré-dimensionamento, condicionado pelo coeficiente de descarga adoptado. Se os dados conduzirem a regime turbulento, $f_D = 64/Re$ deixa de ser válido.



Problema 18.3

Um queimador de alta pressão consome 120 kg/h de óleo e utiliza ar comprimido para a atomização. O ar sai por uma passagem anular em torno do tubo de óleo. Admita que todo o ar de atomização participa na combustão. Determine:

- ***O caudal mássico de ar de atomização, em kg/h e kg/s;***
- ***A razão de pressões e se o escoamento está estrangulado;***
- ***A área mínima necessária para a passagem do ar;***
- ***O diâmetro exterior da secção anular e a folga radial;***
- ***O caudal mássico de ar secundário necessário;***
- ***O novo caudal e a nova razão ar/óleo se a pressão total absoluta descer para 400 kPa.***



Problema 18.3

Considere os seguintes dados:

Grandeza	Valor	Unidade
Consumo de óleo, $\dot{m}_o$	120	kg/h
Razão mássica ar de atomização/óleo, R_a	0,70	kg/kg
Pressão total absoluta do ar à entrada do bico, p_0	600	kPa
Temperatura total do ar à entrada do bico, T_0	300	K
Pressão absoluta na zona de descarga, p_b	105	kPa
Coeficiente de descarga da passagem de ar, C_d	0,85	—
Razão dos calores específicos do ar, γ	1,40	—
Constante específica do ar, R	287	J/(kg·K)
Diâmetro interior da secção anular, d	8,0	mm
Relação ar–combustível estequiométrica, L_0	14,0	kg/kg
Coeficiente de excesso de ar, λ	1,20	—



Problema 18.3 (Resolução I)

Caudal de ar de atomização:

$$\dot{m}_a = R_a \cdot \dot{m}_o = 0,70 \cdot 120 = 84,0 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_a = \frac{84,0}{3\,600} = 0,023333 \text{ kg/s}$$

Razão de pressões (pressões ABSOLUTAS) e razão crítica:

$$r = \frac{p_b}{p_0} = \frac{105}{600} = 0,175$$

$$r_{\text{crit}} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} = \left(\frac{2}{2,4}\right)^{3,5} = 0,5283$$

Verificação:

$$r = 0,175 < r_{\text{crit}} = 0,5283$$

O escoamento está estrangulado: atinge a velocidade sónica na secção mínima.



Problema 18.3 (Resolução II)

Área mínima da passagem do ar (escoamento estrangulado):

$$\dot{m}_a = C_d \cdot A_a \cdot p_0 \cdot F$$

$$F = \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0}} \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$$

$$F = \sqrt{\frac{1,4}{287 \cdot 300}} \left(\frac{2}{2,4}\right)^3 = 0,00233356 \text{ s/m}$$

$$A_a = \frac{0,023333}{0,85 \cdot 600\,000 \cdot 0,00233356} = 19,606 \text{ mm}^2$$

Diâmetro exterior da secção anular e folga radial:

$$A_a = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \Rightarrow D = \sqrt{d^2 + \frac{4A_a}{\pi}}$$

$$D = \sqrt{8,0^2 + \frac{4 \cdot 19,606}{\pi}} = 9,432 \text{ mm}$$

$$e = \frac{D - d}{2} = \frac{9,432 - 8,0}{2} = 0,716 \text{ mm}$$



Problema 18.3 (Resolução III)

Ar estequiométrico e ar total com excesso:

$$\dot{m}_{\text{ar},0} = L_0 \cdot \dot{m}_o = 14,0 \cdot 120 = 1\,680 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{\text{ar}} = \lambda \cdot \dot{m}_{\text{ar},0} = 1,20 \cdot 1\,680 = 2\,016 \text{ kg/h}$$

Ar secundário (o ar de atomização participa na combustão):

$$\dot{m}_s = \dot{m}_{\text{ar}} - \dot{m}_a = 2\,016 - 84 = 1\,932 \text{ kg/h}$$

Embora indispensável à pulverização, o ar de atomização representa apenas cerca de 4 % do ar total de combustão.



Problema 18.3 (Resolução IV)

Funcionamento com pressão total absoluta de 400 kPa:

$$r_2 = \frac{105}{400} = 0,2625 < 0,5283 \Rightarrow \text{continua estrangulado}$$

Com A , T_0 e C_d constantes, o caudal é proporcional a p_0 :

$$\dot{m}_{a,2} = \dot{m}_a \cdot \frac{p_{0,2}}{p_0} = 84 \cdot \frac{400}{600} = 56,0 \text{ kg/h}$$

$$R_{a,2} = \frac{56}{120} = 0,467 \text{ kg ar/kg óleo}$$

A razão de atomização diminui de 0,70 para 0,467 (redução de 33,3 %), o que pode prejudicar a pulverização.

Calculando resulta que:

$$A_a = 19,61 \text{ mm}^2; \quad D = 9,432 \text{ mm}; \quad e = 0,716 \text{ mm}; \quad \dot{m}_s = 1\,932 \text{ kg/h}$$

Problema 18.4

Uma caldeira necessita de uma potência térmica útil de 3 600 kW, com rendimento térmico global de 90 %. A contrapressão da fornalha é de 20 mbar e a pressão manométrica do gás à entrada do conjunto de alimentação é de 70 mbar. O gás natural tem PCI de 36 MJ/Nm³.

Determine:

- ***A potência térmica requerida ao queimador;***
- ***O consumo de gás natural, em Nm³/h;***
- ***O modelo de menor capacidade que satisfaz a potência e a contrapressão;***
- ***A pressão efectiva na selecção da válvula e o menor diâmetro nominal adequado;***
- ***As folgas axial e radial entre a chama e a câmara (há contacto directo?);***



Problema 18.4

Dados hipotéticos de catálogo dos queimadores:

Modelo	Potência fornecida pelo combustível	Contrapressão máxima
A	1 000 – 4 500 kW	15 mbar
B	1 500 – 5 000 kW	25 mbar
C	2 500 – 6 500 kW	35 mbar

Capacidade das válvulas de gás a uma pressão efectiva de 50 mbar:

Diâmetro nominal	Potência máxima alimentada
DN 65	3 390 kW
DN 80	4 820 kW
DN 100	5 000 kW

Câmara de combustão: comprimento útil 2,8 m e diâmetro interior 1,2 m. Chama do modelo B: 2,3 m de comprimento e 0,8 m de diâmetro máximo, centrada no eixo.



Problema 18.4 (Resolução I)

Potência térmica requerida ao queimador e consumo de gás:

$$P_c = \frac{P_u}{\eta} = \frac{3\,600}{0,90} = 4\,000 \text{ kW}$$

$$\dot{V}_{\text{gás}} = \frac{P_c \cdot 3,6}{PCI_v} = \frac{4\,000 \cdot 3,6}{36} = 400 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Seleccção do modelo ($P_c = 4\,000 \text{ kW}$; contrapressão = 20 mbar):

Modelo	Potência?	Contrapressão?	Resultado
A	Sim (1 000 – 4 500 kW)	Não (só 15 mbar)	Rejeitado
B	Sim (1 500 – 5 000 kW)	Sim (25 mbar)	Adequado
C	Sim (2 500 – 6 500 kW)	Sim (35 mbar)	Adequado



Selecciona-se o modelo B, o de menor capacidade entre os que satisfazem ambos os requisitos.



Problema 18.4 (Resolução II)

Pressão efectiva na válvula (ambas manométricas):

$$p_{\text{ef}} = p_{\text{alim}} - p_{\text{forn}} = 70 - 20 = 50 \text{ mbar}$$

Capacidade das válvulas a 50 mbar face aos 4 000 kW necessários:

Válvula	Capacidade a 50 mbar	Verificação
DN 65	3 390 kW	Insuficiente
DN 80	4 820 kW	Suficiente
DN 100	5 000 kW	Suficiente

Selecciona-se a válvula DN 80, o menor diâmetro nominal adequado. As capacidades tabeladas a 50 mbar não valem automaticamente para outra pressão.

Problema 18.4 (Resolução III)

Folgas entre a chama e a câmara de combustão:

$$f_{\text{ax}} = L_{\text{câmara}} - L_{\text{chama}} = 2,8 - 2,3 = 0,50 \text{ m}$$

$$f_{\text{rad}} = \frac{D_{\text{câmara}} - D_{\text{chama}}}{2} = \frac{1,2 - 0,8}{2} = 0,20 \text{ m}$$

As duas folgas são positivas: não existe contacto directo entre a chama e as paredes (a aceitação final depende do fabricante).

Por que não basta a potência nominal?

O modelo A fornece os 4 000 kW, mas só admite 15 mbar, abaixo dos 20 mbar da fornalha. O queimador deve satisfazer,

simultaneamente, os requisitos de potência e de contrapressão, e é

preciso verificar a alimentação de combustível (válvula) e a

compatibilidade das dimensões da chama com a câmara.

Calculando resulta que:

$$P_c = 4\,000 \text{ kW}; \quad \dot{V}_{\text{gás}} = 400 \text{ Nm}^3/\text{h}; \quad \text{modelo B}; \quad \text{válvula DN 80}$$

