

Geradores de Vapor

4º ano

Aula 5



Tipos de Combustíveis e Combustão

- Tópicos
 - Combustíveis
 - Combustão
 - Volume teórico dos Produtos de Combustão
 - Volume real dos Produtos de Combustão
 - Poder calorífico
 - Temperatura Adiabática de Chama



Combustíveis

- Na indústria são usados vários tipos de combustível com o intuito de gerar energia térmica através da combustão. Existem várias formas de classificar os combustíveis, que vão desde a sua origem, estado de agregação, composição e quantidade de calor liberto na combustão.
- Os combustíveis são geralmente classificados pela sua origem e estado de agregação. Desta forma os combustíveis dividem-se em naturais e artificiais e cada um destes grupos dependendo do estado de agregação subdividem-se em sólidos, líquidos e gasosos. Na Tabela 5.1 apresenta-se a classificação de vários tipos de combustíveis.

Combustíveis

Tabela 5.1 Classificação de vários tipos de combustíveis

Estado do Combustível	Origem	
	Natural	Artificial
Sólido	Madeira, Turfa, Lenhite, Xisto, Carvão de pedra,	Carvão vegetal, Coque, Carvão em pó
Líquido	Petróleo	Gasolina, Petróleo de iluminação, Gasóleo, Mazute, Biocombustível, Álcool, Etc.
Gasoso	Gás natural	Gás de Coque, Gás de Alto Forno, Gás liquefeito do Petróleo, Gás de água. Etc.





Combustíveis

A composição química dos combustíveis é determinada em laboratórios e ela pode ser apresentada de quatro formas diferentes:

- **Massa Orgânica.** A composição do combustível quando apresentada na forma de massa orgânica ostenta os seguintes elementos: Carbono, Hidrogénio, Oxigénio e Nitrogénio. A designação dos elementos que compõem a massa orgânica é feita com o sobescrito **o**, por exemplo (x^o).
- **Massa de Combustível.** Quando o combustível é apresentado em massa de combustível, para além do percentual dos elementos que se ostentam na massa orgânica, também apresenta-se o percentual de enxofre que o combustível contém. Isto é, os elementos do combustível que se apresentam quando se trata de massa de combustível são: Carbono, Hidrogénio, Oxigénio, Nitrogénio e Enxofre. Os elementos do combustível quando apresentados neste tipo de composição patenteiam o sobescrito **c** (x^c).



Combustíveis

- **Massa seca.** A apresentação do combustível em massa seca difere da em massa de combustível pelo percentual de cinzas que o combustível tiver. Os elementos que compõem o combustível, quando este é apresentado em massa seca são: Carbono, Hidrogénio, Oxigénio, Nitrogénio, Enxofre e Cinzas. Os elementos nesta apresentação são exibidos com o sobrescrito s (x^s).
- **Massa de trabalho.** A massa de trabalho do combustível é a que se utiliza para os diversos cálculos de combustão. Esta massa é igual a massa seca mais a humidade que se apresenta no combustível. Os diversos elementos que compõem a massa de trabalho são o Carbono, Hidrogénio, Oxigénio, Nitrogénio, Enxofre, Cinzas e Humidade. Os componentes da massa de trabalho ostentam o sobrescrito t (x^t). A composição da massa de trabalho escreve-se da seguinte maneira $C^t + H^t + O^t + N^t + S^t + A^t + W^t = 100\%$

Combustíveis

Tabela 5.2 Apresentação da composição do combustível em diversas massas

		Elementos						
Massa	Orgânica	Carbono	Hidrogénio	Oxigénio	Nitrogénio			
	Combustível	Carbono	Hidrogénio	Oxigénio	Nitrogénio	Enxofre		
	Seca	Carbono	Hidrogénio	Oxigénio	Nitrogénio	Enxofre	Cinzas	
	de Trabalho	Carbono	Hidrogénio	Oxigénio	Nitrogénio	Enxofre	Cinzas	Humidade



Como se pode ver da Tabela 5.2, a massa do combustível apresentada nas diversas formas só difere no quadrante que se encontra sombreado. Então a conversão de um elemento de combustível apresentado de uma forma para outra depende somente dos elementos Enxofre, Cinzas e Humidade.

Combustíveis

O cálculo da massa percentual de um elemento da massa de combustível pode ser facilmente efectuado através de um elemento dado numa composição conhecida pelas seguintes expressões:
Para o cálculo de um elemento da massa orgânica através de um elemento da massa de combustível.

$$x^o = x^c \frac{100}{100 - S^c} \quad (5.1)$$

Para o cálculo de um elemento da massa orgânica através de um elemento da massa seca.

$$x^o = x^d \frac{100}{100 - (S^d + A^d)} \quad (5.2)$$



Combustíveis

A composição da massa de trabalho escreve-se da seguinte maneira :

$$C^t + H^t + O^t + N^t + S^t + A^t + W^t = 100\%$$

O cálculo de uma massa através de outra pode facilmente ser feita pelas seguintes expressões:

$$x^o = x^t \frac{100}{100 - (S^t + A^t + W^t)} \quad (5.3)$$

$$x^c = x^d \frac{100}{100 - A^d} \quad (5.4)$$

$$x^c = x^t \frac{100}{100 - (A^t + W^t)} \quad (5.5)$$

$$x^d = x^t \frac{100}{100 - W^t} \quad (5.6)$$



Combustíveis

Onde:

- X^d - é a quantidade de um elemento na massa seca
- X^t - é a quantidade de um elemento na massa de trabalho
- X^c - é a quantidade de um elemento na massa de combustível
- X^o - é a quantidade de um elemento na massa orgânica





Combustão

- A forma mais empregue para produção de calor na indústria é a combustão, definida como a reacção entre os elementos químicos de um combustível e o oxigénio.
- A oxidação dos combustíveis é uma reacção exotérmica, sendo a quantidade de calor libertada função da composição química do combustível e dos produtos finais de combustão.



Combustão

Os elementos que não participam na combustão mantêm-se inalterados.

Na combustão o objectivo é obter o máximo possível de calor. Não basta porém que o rendimento calorífico atenda às necessidades requeridas, é preciso que isto seja feito de forma económica. A fim de maximizar-se o rendimento da combustão, deve-se obter o melhor aproveitamento possível do potencial energético do combustível através de alguns factores operacionais, como:

- - Regular a relação ar-combustível;
- - Proporcionar uma perfeita mistura ar-combustível.

Combustão

A mistura do combustível com o ar aumenta a superfície de contacto entre ambos e tem influência decisiva na velocidade da combustão.

Quanto mais íntima a união dos elementos, melhor a combustão.

- Ar para a Combustão

Conhecendo-se a composição do combustível e com base na estequiometria da reacção, consegue-se calcular o ar necessário para a queima do combustível.



Combustão

A quantidade de ar que fornece o oxigénio teoricamente suficiente para a combustão completa do combustível, é chamada de "ar teórico" ou "ar estequiométrico".

Na prática, sabe-se que é muito difícil obter uma boa combustão apenas com o ar estequiométrico.

Se utilizar-se somente o "ar teórico", há grande probabilidade do combustível não queimar totalmente (haverá formação de CO ao invés de CO₂) e consequentemente a quantidade de calor libertada será menor.





Combustão

- Para se garantir a combustão completa recorre-se a uma quantidade adicional de ar além do estequiométrico, garantindo desse modo que as moléculas de combustível encontrem o número apropriado de moléculas de oxigénio para completar a combustão. Essa quantidade de ar adicional utilizada é chamada de excesso de ar. O excesso de ar é a quantidade de ar fornecida além da teórica.

Combustão

O excesso de ar proporciona uma melhor mistura entre o combustível e o oxidante, mas deve ser criteriosamente controlado durante o processo de combustão. Deve-se conhecer a quantidade ideal mínima possível de excesso a ser introduzida na queima, pois o ar que não participa da combustão tende a esfriar a chama, sem contribuir para a reacção. Quanto maior o excesso de ar, maior o volume de gases nos produtos de combustão e consequentemente maior a perda de calor pela chaminé, influenciando negativamente na eficiência da combustão.





Combustão

O valor de excesso de ar a ser utilizado varia de acordo com o tipo de combustível a ser queimado e também com o equipamento de queima, sendo menor para combustíveis gasosos e maior para combustíveis líquidos e sólidos.

Isto acontece porque no processo de queima de combustíveis gasosos estes encontrarem-se bastante atomizados o que facilita que as moléculas estejam totalmente envolvidas pelo ar disponível.

Método de queima	Fornalha de carvão pulverizado com o fundo seco	Fornalha com tiragem de escória	Fornalha de leito fluidizado borbulhante	Fornalhas a combustível líquido e gasoso		Fornalha de leito fluidizado circulante
Tipo de combustível	Antracite betuminoso de baixa classificação	Lenhite betuminosa	Todos os tipos de carvão	Fornalha de pressão negativa	Fornalha de pressão ligeiramente positiva	Todos os tipos de carvão
α_1	1,20-1,25	1,15-1,20	1,30-1,50	1,08-1,10	1,05-1,07	1,2

Volume teórico de ar

Considerando a massa específica do ar a $P = 1 \text{ atm}$ e $T = 0^\circ \text{ C}$, $\rho_{(\text{ar})}$ igual a $1,2928 \text{ Kg/m}^3$, tem-se que o volume teórico de ar para a combustão completa será:

Para combustível sólido e líquido

$$V_{ar}^o = 8,89 \cdot \frac{C}{100} + 26,5 \cdot \frac{H}{100} + 3,33 \cdot \frac{S}{100} - 3,33 \cdot \frac{O}{100} \left[\frac{m_{ar}^3 N}{kg_{comb}} \right] \quad (5.7)$$

ou

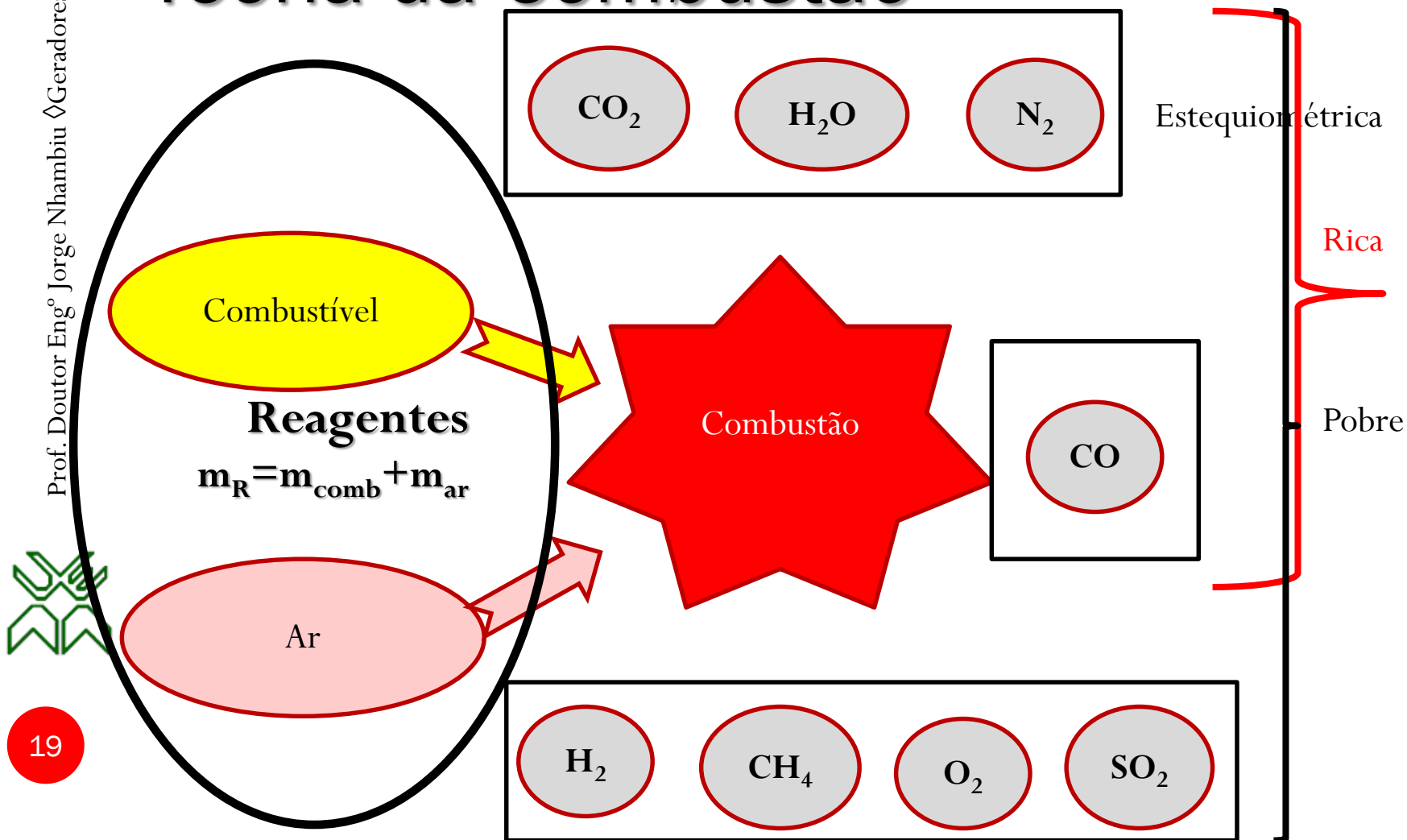
$$V_{ar}^o = 0,0889 \cdot (C + 0,375 \cdot S) + 0,265 \cdot H - 0,033 \cdot O \left[\frac{m_{ar}^3 N}{kg_{comb}} \right] \quad (5.8)$$

18

Para combustível gasoso

$$V_{ar}^o = 0,0476 \left[0,5 \times CO + 0,5 H_2 + 1,5 \times H_2 S \right] + \frac{1}{4} \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \left[\frac{m_{ar}^3 N}{m_{gás}^3} \right] \quad (5.9)$$

Teoria da Combustão



Coeficiente de Excesso de ar

Como foi referido , para se atingir a combustão completa , adiciona-se um excesso de ar para compensar as imperfeições da mistura de combustível e ar. O coeficiente de excesso de ar (α) é definido como a razão entre os volumes real de ar e teórico de ar

$$a = \frac{V}{V^0} \quad (5.10)$$

Apesar de ajudar na combustão, o ar em excesso também aumenta a perda de calor na fornalha. Assim, um coeficiente de excesso de ar é chamado ideal quando as perdas de calor associadas a ele são mínimas. O valor óptimo do excesso de ar depende do tipo de combustível, dos métodos de queima, do tipo de fornalha e da geometria do queimador. Da experiência, os projectistas de caldeiras recomendam os valores apresentados na Tabela 5.3 para o coeficiente de excesso de ar para diferentes sistemas de queima.



Coeficiente de Excesso de ar

Num forno de pressão negativa, há infiltrações do ar frio do ambiente para dentro do forno através de aberturas ao longo do percurso dos gases de combustão. Assim, em virtude das infiltrações o excesso do ar aumenta ao longo da condução dos gases de combustão. A quantidade de ar infiltrado, ΔV (por kg de combustível), é expressa como a razão entre o ar infiltrado e o volume de ar teórico V^0 e é conhecido como o coeficiente de infiltração de ar, $\Delta\alpha$.



$$Da = \frac{\Delta V}{V^0} \quad (5.11)$$

Coeficiente de Excesso de ar

Numa secção transversal da conduta de gás fora da fornalha o coeficiente de excesso de ar é a soma das infiltrações nos pontos a montante.

$$a = a_e + \sum D a \quad (5.12)$$

onde α e α_e são respectivamente, o total de ar infiltrado numa dada secção da caldeira e na saída da fornalha. A infiltração de ar frio aumenta o volume do gás de combustão e reduz a sua temperatura.

Por conseguinte, aumenta a absorção de calor pelas partículas do gás de combustão, aumentando desse modo a temperatura do gás de escape. Isto afecta negativamente o custo de operação da caldeira, aumentando as perdas com os gases de chaminé e o consumo de energia do ventilador no caso de tiragem induzida.



Coeficiente de Excesso de ar

Por exemplo, numa caldeira a carvão pulverizado, em que o coeficiente de infiltração do ar aumenta de 0,1 para 0,2, a temperatura do gás da chaminé aumenta de 3-8 °C, e a eficiência da caldeira diminui em 0,2-0,5%. Quando o coeficiente infiltração do ar aumenta em 0,1, o consumo de energia do ventilador aumentar em 2 kW por cada MW de energia elétrica produzida. Portanto, medidas adequadas devem ser tomadas para reduzir a infiltração de ar numa caldeira.

Nas tabelas seguintes apresentam-se coeficientes médios de excesso de ar para vários dispositivos de caldeiras.



Excesso de ar em fornalhas e Gaseadutos

Tipo de Dispositivo	Valor de infiltração do ar $\Delta\alpha$
Fornalhas:	
De camadas com alimentação manual	0,3
De camada com alimentação mecanizada ou semi-mecanizada	0,1
De câmaras com pó de carvão pulverizado	0,07
De câmaras com queimadores de gás e mazute	0,05
Gasodutos:	
Do primeiro feixe tubular	0,05
Do segundo feixe tubular	0,1
Superaquecedor	
Economizador de aço de um estágio	0,08
Economizador de aço para dois estágios (para cada estágio)	0,04
Economizador de ferro fundido	0,1
Aquecedor de ar de um estágio	0,06
Aquecedor de ar de dois estágios (para cada estágio)	0,03
Aquecedor de ar das placas	0,1



Excesso de ar em fornalhas e Gaseadutos

Tipo de Dispositivo	Valor de infiltração do ar $\Delta\alpha$
Aquecedor de ar regenerativo para:	
Caldeiras < 50 [t/h]	0,2
Caldeiras $\geq$ 50 [t/h]	0,25
Aquecedor de ara de ferro fundido com alhetas	0,1
Precipitador	0,05
Conduitas que vão desde o aquecedor de ar até ao aspirador de fumo	
De aço, para cada 10 m de comprimento	0,01
De tijolo, para cada 10 m de comprimento	0,05



Combustão

A composição dos produtos de combustão a custa da queima de 1kg de combustível pode ser escrita na seguinte forma geral:

$$1kg_{comb} + ar = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} + V_{N_2} + V_{CO} + V_{CH_4} + V_{H_2} \quad \frac{m^3}{kg_{combustv.}} \quad (5.13)$$

Sendo:

Para Combustão completa V_{CO_2} ; V_{SO_2} ; V_{H_2O}

Onde: V_{CO_2} e V_{SO_2} - volumes dos gases triatómicos secos.

V_{H_2O} - volume dos vapores de água formados devido à reacção química

Para mistura pobre também V_{O_2} ; V_{N_2} - volume dos elementos residuais da combustão.

Para mistura rica também V_{CO} ; V_{CH_4} ; V_{H_2} - produtos da combustão incompleta.



Volume dos produtos de combustão

Os produtos de combustão são geralmente constituídos por CO_2 , SO_2 , O_2 , N_2 , e H_2O . O volume teórico do gás de combustão é o volume dos produtos gasosos da combustão completa do combustível que arde com a quantidade teórica de ar. A partir das equações de reacção química atrás apresentadas, pode-se calcular o volume de gases de combustão para a combustão completa de um combustível, para um kg de combustível como se apresenta nas fórmulas seguintes.



Volume de CO₂

O dióxido de carbono é produzido a partir da combustão do carbono no combustível e da calcinação dos sorventes (CaCa). A partir da reacção de decomposição do calcário ($\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{O}_2$), pode-se computar o CO₂ adicional como $(0,7R'S / 100)$, onde R' é a relação molar entre o cálcio e o enxofre no combustível combinado com o sorvente. A quantidade de CO₂ produzida desprezando-se a presença de magnésio no calcário e qualquer CaO presente no combustível é:

$$V_{\text{CO}_2} = 1,866 \frac{C}{100} + 0,7 \frac{R'S}{100} \quad m^3 N / kg_{comb} \quad (5.14)$$



Volume de SO₂

O dióxido de enxofre é produzido pela oxidação do enxofre no combustível, mas parte dele é também produzido na fornalha através de uma reacção com o sorvente ($\text{CaO} + \text{SO}_2 + 1/2\text{O}_2 = \text{CaSO}_4$). A pedra calcária de sorvente alimentada na fornalha é raramente totalmente utilizado devido à obstrução dos poros das partículas de CaO. A fracção que pode ser utilizada depende de uma série de factores. Portanto, assume-se que apenas uma fracção, E_{sorv} , do enxofre do combustível é mantido no CaSO_4 . O volume resultante de SO_2 produzido a partir de 1 kg de combustível queimado é determinado pela expressão:

$$V_{\text{SO}_2} = 0,7 \frac{S}{100} (1 - E_{\text{sor}}) \quad \text{m}^3 \text{N/kg}_{\text{comb}} \quad (5.15)$$



Volume de SO_2 (II)

Muitas vezes utiliza-se o volume dos gases triatômicos para representar a soma do dióxido de carbono e o dióxido de enxofre produzidos, então a expressão torna-se:

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} = 1,866 \frac{C + 0,375S(1 + R' - E_{sor})}{100} \text{ m}^3 N / \text{kg}_{comb} \quad (5.16)$$



Volume de N_2

O N_2 entra nos produtos de combustão de dois modos:

- com o ar

$$0,79 \cdot V_{\text{ar}}^o \quad (5.17)$$

- E com o combustível:

$$\frac{N^t}{r_{N2.100}} = \frac{N^t}{1,25 \times 100} = 0,008 N^t \quad (5.18)$$

$$V_{N_2}^o = 0,79 \times V_{\text{ar}}^o + 0,008 N^t \quad \left(\frac{\text{m}^3 N}{\text{kg}_{\text{comb}}} \right) \quad (5.19)$$



Volume de Água (H_2O)

O volume dos vapores de H_2O nos produtos de combustão podem provir de três diferentes fontes:

- formado pela reacção química de $O_2 + H_2$

$$V_{H_2O}^H = \frac{9H^t}{\rho_{H_2O.100}} = \frac{9H^t}{0,804 \cdot 100} = 0,111 \cdot H^t \quad m^3 N/kg_{comb} \quad (5.20)$$

- formado pela evaporação do H_2O do combustível

$$V_{H_2O}^w = \frac{22,4}{18} \frac{W^t}{r_{H_2O.100}} = 0,0124 \cdot W^t \quad m^3 N/kg_{comb} \quad (5.21)$$

- formado pela introdução do vapor na fornalha com ar atmosférico

$$V_{H_2O}^{ar} = \frac{1,293}{0,804} V_{ar}^0 \cdot a = 1,61 \cdot V_{ar}^0 \cdot a \quad m^3 N/kg_{comb} \quad (5.22)$$



Volume de Água (H_2O) (II)

Onde 1,293 e 0,804 são as massas específicas do ar e do vapor de água às condições padrão. O teor de humidade no ar seco (a , kg/kg_{ar}) depende da humidade relativa e da pressão barométrica. O valor típico de a , é de 0,013. Assim, o volume total de água de 1 kg de combustível é

$$V_{H_2O}^0 = 0,111 \cdot H + 0,0124 \cdot W + 1,6V^0a \quad m^3 N/kg_{comb} \quad (5.23)$$

Quando se queima um combustível líquido num gerador de vapor é geralmente usado vapor para a atomização do combustível. O vapor atomizado torna-se parte da água dos gases de combustão. Se 1 kg de óleo necessita D_{as} kg de vapor de atomização, o volume do vapor de água será:

$$V_{H_2O}^0 = 0,111 \cdot H + 0,0124 \cdot W + 1,6V^0a + 1,24D_{as} \quad m^3 N/kg_{comb} \quad (5.24)$$

O volume teórico dos produtos de combustão é a soma dos volumes de gases triatómicos, azoto e do vapor de água.

$$V_g^0 = V_{R0_2}^0 + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 \quad m^3 N/kg_{comb} \quad (5.25)$$

Volume real dos gases

Na prática, uma caldeira funciona com uma determinada quantidade de ar em excesso. Assim, o volume total dos produtos de combustão (V_g) é a soma do volume teórico de gases de combustão (V_g^o) o excesso de ar $(\alpha - 1)V^o$, e o vapor de água $[1,6 (\alpha - 1) V^o a]$, formado com o excesso de ar.

$$V_g = V_g^o + (\alpha - 1)V_{ar}^o + 1,6 \cdot (\alpha - 1)V_{ar}^o \cdot a \quad m^3 N / kg_{comb} \quad (5.26)$$

Na equação. (5.24), soma-se a humidade adicional do ar em excesso para se obter o volume total de vapor de água no volume dos produtos de combustão como:

$$V_{H_2O} = 0,111 \cdot H + 0,0124 \cdot W + 1,24 D_{as} + 1,6 \alpha V^o a \quad m^3 N / kg_{comb} \quad (5.27)$$

O volume real dos produtos de combustão secos é obtido pela subtracção do total da água de V_g

$$V_{gs} = V_g - V_{H_2O} = V_{R_{O_2}} + V_{N_2}^o + (a - 1)V^o \quad m^3 N / kg_{comb} \quad (5.28)$$



Volume Real dos Produtos (combustível líquido e sólido)

Volume real dos gases Triatómicos $[m^3/kg_{comb}]$

$$0,01866 \cdot [C + 0,375S (1 + R' - E_{sor})] \quad m^3 N / kg_{comb} \quad (5.29)$$

Volume real dos gases Biatómicos $[m^3/kg_{comb}]$

$$V_{R_2} = V_{N_2}^o + (\alpha - 1) \cdot V_{ar}^o \cdot 0,79 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right] \quad (5.30)$$

Volume real de água $[m^3/kg_{comb}]$

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^o + 1,61 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{ar}^o \cdot a \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right] \quad (5.31)$$

Volume do oxigénio excedente $[m^3/kg_{comb}]$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{ar}^o \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right] \quad (5.32)$$



Volume Real dos Produtos (combustível gasoso)

Volume real dos gases Biatómicos [$\text{m}^3/\text{m}^3_{\text{comb}}$]

$$V_{R_2} = V_{N_2}^o + (a - 1) \times V_{ar}^o \times 0,79 \frac{\dot{e}_{m^3 N} \dot{U}}{\dot{e}_{m^3_{\text{comb}}} \dot{U}} \quad (5.33)$$

Volume real dos gases Triatómicos [$\text{m}^3/\text{m}^3_{\text{comb}}$]

$$V_{R_{O_2}} = 0,01 \times \frac{\dot{e}_{CO_2} + \dot{e}_{CO} + \dot{e}_{H_2S} + \dot{e}_{\text{a}} (mC_m H_n)}{\dot{e}_{m^3_{\text{comb}}} \dot{U}} \frac{\dot{e}_{m^3 N} \dot{U}}{\dot{e}_{m^3_{\text{comb}}} \dot{U}} \quad (5.34)$$

Volume real de água [$\text{m}^3/\text{m}^3_{\text{comb}}$]

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^o + 0,0161 \times (a - 1) \times V_{ar}^o \frac{\dot{e}_{m^3 N} \dot{U}}{\dot{e}_{m^3_{\text{comb}}} \dot{U}} \quad (5.35)$$



36

Volume do oxigénio excedente [$\text{m}^3/\text{m}^3_{\text{comb}}$]

$$V_{O_2} = 0,21 \times (a - 1) \times V_{ar}^o \frac{\dot{e}_{m^3 N} \dot{U}}{\dot{e}_{m^3_{\text{comb}}} \dot{U}} \quad (5.36)$$

Fracções volúmicas

A fracção Volúmica dos Gases Triatómicos nos Gases de Combustão é dada por:

$$r_{R_{O_2}} = \frac{V_{R_{O_2}}}{V_g} \quad (5.37)$$

A fracção Volúmica real dos Gases Biatómicos nos Gases de Combustão é dada por:

$$r_{R_2} = \frac{V_{R_2}}{V_g} \quad (5.38)$$

A fracção Volúmica da Água nos Gases de Combustão é dada por:

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_g} \quad (5.39)$$

A fracção Volúmica do Oxigénio excedente nos Gases de Combustão é dada por:

$$r_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_g} \quad (5.40)$$



Poder calorífico

- Os combustíveis libertam calor durante a sua queima. O calor libertado está intimamente ligada a composição do combustível.
- A quantidade de calor libertada durante a combustão de uma unidade de um combustível é chamada poder calorífico do combustível e designa-se por Q e tem a dimensão de $\text{kJ/kg}_{\text{comb}}$, $\text{kJ/m}^3_{\text{comb}}$ ou $\text{kJ/kg} - \text{mole}$.
- Em engenharia distinguem-se o poder calorífico superior e inferior.



Poder calorífico

- **Poder calorífico inferior:** é a quantidade de calor libertada pela combustão completa de uma unidade em volume ou massa de um combustível, quando queimado completamente a uma certa temperatura, permanecendo os produtos de combustão em fase gasosa (sem condensação do vapor de água).
- **Poder calorífico superior:** é a quantidade de calor libertada pela combustão completa de uma unidade em volume ou massa de um combustível, quando queimado completamente a uma determinada temperatura, levando-se os produtos da combustão, por resfriamento, à temperatura da mistura inicial (o vapor de água é condensado e o calor recuperado).



Poder calorífico

A diferença entre o poder calorífico superior e inferior por quilograma de água é dada por:

$$Q_s^t - Q_i^t = 2677,9 - 160,70 = 2516,39 \text{ kJ/kg} \quad (5.41)$$

Como os produtos de combustão contêm uma mistura de combustíveis (W_1) e a água formada com a queima de hidrogénio ($W_2 = H_2O/H_2 = 18/2H = 9H$), a diferença entre o poder calorífico superior e inferior por quilograma de combustível é dada por:

$$Q_s^t - Q_i^t = 2516,39(W_1 + W_2) = 2516,39(W_1 + 9H) \text{ kJ/kg} \quad (5.42)$$

Ou se W_1 e H forem dados em percentagem

$$Q_s^t - Q_i^t = 25,1639(W_1 + 9H) \text{ kJ/kg} \quad (5.43)$$



Poder calorífico

O poder calorífico de combustíveis sólidos e líquidos é geralmente determinado na base da análise elementar pela formula empírica de Mendeleev

$$Q_s^t = 4,187 \left(81C^t + 300H^t - 26(O^t - S^t) \right) \text{ kJ/kg}_{\text{comb}} \quad (5.44)$$

Ou para o poder calorífico inferior

$$Q_i^t = 4,187 \left(81C^t + 300H^t - 26(O^t - S^t) - 6(W^t + 9H^t) \right) \text{ kJ/kg}_{\text{comb}} \quad (5.45)$$



O poder calorífico superior do carvão é por vezes determinado pela fórmula de Dulong

$$Q_s^t = 4,187 \left(80,8C^t + 344,6H^t - \frac{O^t}{8} - 22,5S^t \right) \text{ kJ/kg}_{\text{comb}} \quad (5.46)$$

Poder calorífico

Para combustíveis gasosos o poder calorífico calcula-se de:

$$\begin{aligned}
 Q_i^t = & 108,3 \cdot H_2 + 126,8 \cdot CO + 234,6 \cdot H_2S + 359,3 \cdot CH_4 \\
 & + 639,5 \cdot C_2H_6 + 915,4 \cdot C_3H_8 + 592,5 \cdot C_2H_4 + 1190,2 \cdot C_4H_{10} \\
 & + 1465,4 \cdot C_5H_{12} + 862,7 \cdot C_3H_6 + 1138,7 \cdot C_4H_8 \quad \left[\text{kJ/m}^3 \right]
 \end{aligned} \tag{5.47}$$



Relação de Poderes Caloríficos em Massas Diferentes

Para se calcular o poder calorífico inferior do combustível da massa de trabalho a partir da massa seca utiliza-se a seguinte expressão:

$$Q_i^t = Q_i^s \frac{100 - w^t}{100} - 0,025 \cdot W^t [MJ / kg] \quad (5.48)$$

Para se calcular o poder calorífico inferior do combustível da massa de trabalho a partir da massa do combustível utiliza-se a seguinte

 expressão:

$$Q_i^t = Q_i^c \frac{100 - (A^t + W^t)}{100} - 0,025 \cdot W^t \quad (5.49)$$

Entalpia do ar e dos Produtos de Combustão

A entalpia teórica do ar e dos produtos de combustão calcula-se usando as seguintes expressões [kJ/m³]:

$$I_g = r_{RO_2} \cdot (C\theta)_{RO_2} + r_{N_2} \cdot (C\theta)_{N_2} + r_{H_2O} \cdot (C\theta)_{H_2O} + r_{O_2} \cdot (C\theta)_{O_2} \quad (5.50)$$

Onde:

$(C\theta)_{ar}$ - entalpia específica do ar

$(C\theta)_{RO_2}$ - entalpia específica dos gases triatómicos

$(C\theta)_{N_2}$ - entalpia específica do nitrogénio

$(C\theta)_{H_2O}$ - entalpia específica do vapor de água

$(C\theta)_{O_2}$ - entalpia específica do oxigénio



Entalpia dos Produtos de Combustão

Valor Reduzido de Cinzas nos Produtos de Combustão [g/MWs]

$$A^{red} = 10 \cdot A^r \cdot a_{arr} / Q_i^r \quad (5.51)$$

Se $A^{red} > 4$, no cálculo dos produtos de combustão deve-se levar em consideração a entalpia de cinzas

$$I_{cinz} = 0,001 \cdot A^r a_{arr} (C\theta)_{cinz} \quad (5.52)$$

• Entalpia dos Produtos de Combustão [Kj/m³]



$$I_{pc} = I_g + I_{cinz} \quad (5.53)$$

45

A entalpia dos produtos de combustão é calculada para a faixa de temperatura de 800 – 2200 °C, sendo esta, a recomendada para as fornalhas

Temperatura Adiabática de Chama

- É a temperatura teórica máxima alcançada pelos produtos de combustão, em condições adiabáticas. Na prática, não são obtidas em virtude de não se conseguir condições adiabáticas perfeitas, da existência de reações simultâneas que ocorrem durante a combustão, da dissociação de CO_2 e H_2O que ocorrem a partir de $1200\text{ }^\circ\text{C}$, da presença de N_2 no gás combustível, do excesso de Oxigênio, de erros de leitura, etc..
- A combustão sempre ocorre em concomitância com perdas de calor.
- A temperatura prática pode ser verificada com boa aproximação por leitura com pirômetros ópticos e termopares



Temperatura Adiabática de Chama

A temperatura da combustão é entendida como a temperatura que os produtos de combustão adquirem do calor envolvido na combustão. Existe diferença entre a temperatura teórica e calorimétrica da queima.

A temperatura teórica de queima é determinada tendo em conta a dissociação nos produtos de combustão, isto é:

$$T_t = (Q_i^t - q_{dis}) / V_{pc} c_{v,p} \left[^\circ C \right] \quad (5.54)$$

 Onde:

Q_i^t é o poder calorífico do combustível kJ/m^3 ou kJ/kg

q_{dis} é o calor despendido na dissociação kJ

V_{pc} é o volume dos produtos de combustão por unidade de combustível m^3

c_v é o calor específico dos volumes de combustão $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$

Temperatura Adiabática de Chama

Outro método de cálculo da temperatura dos produtos é usar a entalpia específica que é o produto entre o calor específico e a temperatura.

$$I_{pc} = c_{v,p} \cdot T_t \quad \text{kJ/m}^3 \quad (5.55)$$

Combinando as equações 5.54 e 5.55, obtém-se

$$Q_i^t = I_{pc} \cdot V_{cp} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{comb}} \right] \quad (5.56)$$

A quantidade de calor transferido na combustão por unidade de combustível é o produto da entalpia pelo volume dos produtos de combustão, que também se pode escrever:

$$I_{pc} = \frac{Q_i^t}{V_g} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \text{ ou } \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (5.57)$$



Temperatura Adiabática de Chama

Para o caso de aquecimento do ar a entalpia do ar (I_{ar}) calcula-se da seguinte fórmula:

$$I_{ar} = \frac{T_{ar} \cdot c_{p_{ar}} \cdot \alpha \cdot V_{ar}^o}{V_g} \left[\frac{kJ}{m^3} \right] \quad (5.58)$$

Para o caso de aquecimento do combustível a entalpia do combustível (I_{comb}) calcula-se da seguinte fórmula

$$I_{comb} = \frac{T_{comb} \cdot c_{p_{comb}}}{V_g} \left[\frac{kJ}{m^3} \right] \quad (5.59)$$

Onde:

T_{ar} — é a temperatura a que o ar é aquecido [°C]

C_{par} — é o calor específico do ar [kJ/(kg °C)]

α — é o coeficiente de excesso de ar

V_{ar} — volume teórico do ar [m³/kg_{comb}]

T_{comb} — temperatura a que o combustível é aquecido [°C]

C_{pcomb} — calor específico do combustível ar [kJ/(kg °C)]

V_{ar} — volume dos gases de escape [m³/kg_{comb}]



Temperatura Adiabática de Chama

Combinando as expressões anteriores

$$I_{pc} = I_g + I_{cinz} = \frac{Q_i^t}{V_g} \left[\frac{kJ}{m^3} \right] \quad (5.60)$$

O procedimento agora consiste em atribuir temperaturas aos produtos de combustão, retirar as entalpias das tabelas e substituir na expressão

até que a parte esquerda da equação se iguale a direita, ai retira-se a temperatura teórica de combustão.



50

$$r_{RO_2} \cdot (C\theta)_{RO_2} + r_{N_2} \cdot (C\theta)_{N_2} + r_{H_2O} \cdot (C\theta)_{H_2O} + r_{O_2} \cdot (C\theta)_{O_2} + I_{cinz} \approx \frac{Q_i^t}{V_{cp}} \quad (5.61)$$

Temperatura Adiabática de Chama

Considerando que o ar é pré-aquecido a expressão torna-se

$$I_{pc} = I_g + I_{cinz} = \frac{Q_i^t + T_{ar} \cdot c_{par} \cdot \alpha \cdot V_{ar}^o - q_{dis}}{V_g} \left[\frac{kJ}{m^3} \right] \quad (5.62)$$

Considerando que o combustível é pré-aquecido a expressão torna-se

$$I_{pc} = I_g + I_{cinz} = \frac{Q_i^t + T_{comb} \cdot c_{p_{comb}} - q_{dis}}{V_g} \left[\frac{kJ}{m^3} \right] \quad (5.63)$$



Considerando que o combustível e o ar são pré-aquecidos a expressão 5.63 torna-se

$$51 \quad I_{pc} = I_g + I_{cinz} = \frac{Q_i^t + T_{ar} \cdot c_{par} \cdot \alpha \cdot V_{ar}^o + T_{comb} \cdot c_{p_{comb}} - q_{dis}}{V_g} \left[\frac{kJ}{m^3} \right] \quad (5.64)$$

Temperatura da Combustão

Sub Cálculo_Tc()

' Cálculo_Tc Macro

' Macro recorded 30-09-2006 by Jorge Olivio Penicela Nhambiu

'

' Keyboard Shortcut: Ctrl+Shift+C

Dim x1

Dim y1

Dim z1

x1 = Range("E42").Value

z1 = 1000

y1 = Range("E48").Value

Do

z1 = z1 + 0.01

Range("e43").Value = z1

y1 = Range("e48").Value

Loop Until Abs(x1 - y1) < 0.1

End Sub





Entalpia (kJ/m³) de 1m³ de Gases a temperatura. dada e pressão de 1bar

Temp. °C	CO ₂	SO ₂	N ₂	H ₂ O	O ₂	Ar Seco	Cinzas
100	172,00	491,96	130,13	150,18	131,98	130,51	81,00
200	361,67	1248,40	260,60	303,47	267,38	261,94	169,80
300	564,24	2025,42	392,41	461,36	407,48	395,42	264,00
400	777,44	2821,89	526,89	623,69	551,85	532,08	360,00
500	1001,78	3636,65	664,58	791,55	700,17	672,01	458,00
600	1236,77	4468,54	805,06	964,68	851,64	814,96	560,00
700	1475,41	5316,43	940,36	1143,60	1005,24	960,75	662,50
800	1718,96	6179,15	1094,65	1328,10	1162,32	1109,05	768,00
900	1972,43	7055,55	1243,55	1517,90	1319,67	1259,36	825,00
1000	2226,75	7944,50	1393,86	1713,30	1480,11	1411,86	985,00
1100	2485,34	8844,83	1546,14	1913,70	1641,02	1565,94	1092,00
1200	2746,44	9755,39	1699,76	2118,80	1802,76	1721,36	1212,00
1300	3010,58	10675,04	1857,74	2328,00	1966,05	1879,27	1360,00
1400	3276,75	11602,62	2012,36	2540,30	2129,93	2036,87	1585,00
1500	3545,34	12536,98	2170,55	2758,40	2296,78	2196,19	1758,00
1600	3815,86	13476,97	2328,65	2979,10	2463,97	2356,68	1880,00
1700	4087,10	14421,45	2486,28	3203,10	2632,09	2517,60	2065,00
1800	4360,67	15369,25	2646,74	3429,90	2800,48	2680,01	2182,00
1900	4634,76	16319,23	2808,22	3657,90	2971,30	2841,43	2385,00
2000	4910,51	17270,24	2970,25	3889,70	3142,76	3006,26	2514,00
2100	5186,81	18221,12	3131,96	4121,80	3314,85	3169,77	2640,00
2200	5464,20	19170,74	3295,84	4358,80	3487,44	3338,21	2762,00
2300	5746,39	20117,92	3457,20	4485,30	3662,33	3500,54	-
2400	6023,25	21061,54	3620,58	4724,40	3837,64	3665,80	-
2500	6303,53	22000,42	3786,09	5076,70	4014,29	3835,29	-