

14 – COMBUSTÍVEIS E TEMPERATURA DE CHAMA

O calor gerado pela reação de combustão é muito usado industrialmente. Entre inúmeros empregos podemos citar três aplicações mais importantes e frequentes:

= Geração de vapor d'água em caldeiras – geralmente a pressões altas para acionar turbinas para geração de energia elétrica, compressores e bombas de maior porte e também o uso do vapor como fluido para aquecimento, resfriamento (“quench”), fluido reagente, fluido motor para formação de vácuo etc.

= Fornos reatores e de aquecimento – tanto de fluidos de processo como de fluidos térmicos para fornecimento de calor em condições especiais.

= acionamento de turbinas a gás de combustão – acionadoras de geradores de energia elétrica, compressores etc.

14.1 PRINCIPAIS TIPOS DE COMBUSTÍVEIS INDUSTRIAIS

Os combustíveis queimados industrialmente podem ser: SÓLIDOS, LÍQUIDOS ou GASOSOS.

Os combustíveis normalmente disponíveis são:

COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS

Carvão mineral (composto de Carbono, Hidrogênio, Oxigênio, Nitrogênio, Enxofre e cinzas)

Coque Verde de Petróleo (produto da decomposição térmica controlada de resíduo de vácuo na refinação do petróleo, após a separação dos hidrocarbonetos voláteis)

Lenha e carvão vegetal

Bagaço e palha da cana de açúcar

COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS

Basicamente os derivados do petróleo, como o GLP, gasolina, óleo diesel, óleo combustível. O GLP (gás liquefeito de petróleo) é comercializado e transportado em forma líquida, mas é utilizado na fase gasosa. O Etanol hidratado e o Etanol anidro mais usado na mistura com a gasolina.

COMBUSTÍVEIS GASOSOS

Principalmente o gás natural (com 80 a 95% de Metano) e nas Refinarias de Petróleo, o gás leve de refinaria, composto de Metano, Etano, Etileno, Propano etc.

14.2 PODER CALORÍFICO DOS COMBUSTÍVEIS

Para os combustíveis industriais, como os mostrados acima, é bastante usado o PODER CALORÍFICO DO COMBUSTÍVEL, EM VEZ DE ENTALPIA PADRÃO DE COMBUSTÃO.

O poder calorífico de um combustível é definido como a quantidade de calor liberada na sua queima completa, estequiometricamente.

O PODER CALORÍFICO é determinado em laboratório, empregando-se uma bomba calorimétrica com temperatura controlada do banho onde

está imersa a bomba em que se faz a queima de uma massa conhecida do combustível.

Como a quantidade de calor gerada é medida incluindo o calor da condensação da água formada na queima, o poder calorífico medido é chamado de PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS), OU “HIGHER HEAT VALUE” – HHV).

Caso seja diminuído do (PCS) exatamente a entalpia de vaporização da água formada na queima do Hidrogênio contido no combustível e da água (umidade) já contida anteriormente no combustível, teremos o PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI), OU “LOWER HEAT VALUE” – LHV).

A relação entre o (PCS) e o (PCI) é a seguinte:

$$(PCI) = (PCS) - 2440 (9H + u), \text{ onde}$$

(PCI) = poder calorífico inferior em kJ/kg em base seca

(PCS) = poder calorífico superior em kJ/kg

H = teor de Hidrogênio no combustível, em kg/kg em base seca

u = teor de umidade do combustível em kg água/kg de combustível seco

IMPORTANTE:

Normalmente o que mais se usa é o Poder Calorífico Inferior (PCI), uma vez que, na maioria dos processos industriais, os gases de combustão são liberados a temperaturas altas onde a água neles contida se encontra na fase gasosa.

14.3 ESTIMATIVA DE PODER CALORÍFICO

A determinação do poder calorífico de combustíveis líquidos e sólidos pode ser feita de forma expedita como uma estimativa com base na densidade.

Considerando-se que os combustíveis sejam misturas de hidrocarbonetos sem contaminantes, o PCI a 25°C é estimado COM PRECISÃO DE 1%, por:

$$(\text{PCI}) = 46,43 + 3,16 d - 8,79 d^2 \text{ sendo}$$

(PCI) = poder calorífico inferior MJ/kg

d = densidade 60°F/60°F

ou

$$(\text{PCI}) = 46,05 + 3,91 d - 9,21 d^2$$

(PCI) = poder calorífico inferior MJ/kg

d = densidade 20°C/4°C

Na prática, os óleos combustíveis comerciais contêm significativas quantidades de contaminantes, como: água, cinzas, enxofre.

A água e as cinzas são consideradas inertes (porém deve-se considerar o calor de vaporização da água) e o Enxofre é queimado a dióxido de Enxofre, contribuindo com uma parcela para o poder calorífico do óleo.

A equação então sofre correções e fica como segue:

$$(\text{PCI})_c = (\text{PCI}) - 0,01 (\% \text{água} + \% \text{cinzas} + \% \text{Enxofre}) + 0,0942 (\% \text{Enxofre}) - 0,0245 (\% \text{água})$$

(PCI)_c = poder calorífico inferior corrigido, MJ/kg

%água = % em massa de água

%cinzas = % em massa de cinzas

%Enxofre = % em massa de Enxofre

Outra fórmula para estimativa do poder calorífico é a FÓRMULA DE DULONG, QUE TEM UMA MARGEM DE ERRO DE 3%.

$$(PCS) = 14544 C + 62028 (H - O/8) + 4,05 S$$

(PCS) = poder calorífico superior em Btu/lbm

C = fração em massa de Carbono

H = fração em massa de Hidrogênio

O = fração em massa de Oxigênio

S = fração em massa de Enxofre

$$(PCI) = (PCS) - 91,23 (\% \text{ do H em massa})$$

Para os óleos combustíveis, em Btu/lbm, pode ser aproximadamente:

$$(PCS) = 17887 + 57,5 (^\circ\text{API}) - 102,2 (\% \text{ S em massa})$$

14.4 PODER CALORÍFICO DE MISTURA DE COMBUSTÍVEIS

Para misturas de gases combustíveis, quando se conhece a sua fração em quantidade de matéria (mol), ou em volume, o poder calorífico é calculado por:

$$(PCS)_{\text{mistura}} = \sum (PCS)_i Y_i \text{ e}$$

$$(PCI)_{\text{mistura}} = \sum (PCI)_i Y_i$$

Para o cálculo do (PCI) a partir do (PCS) é necessário conhecer a entalpia de vaporização da água a 25°C e na pressão de vapor a esta temperatura.

A entalpia de vaporização da água é 44,012 kJ/mol a 25°C e 101,325 kPa.

Como a pressão de vapor da água nessa condição é de 3,17 kPa, o valor da entalpia de vaporização passa a ser de 43,911 kJ/mol de água, aproximadamente 43,9 kJ/mol de água, que deve ser usado para os cálculos de Engenharia.

14.5 TEMPERATURA DE REAÇÃO - TEMPERATURA DE CHAMA ADIABÁTICA

Esse termo especial é definido como a temperatura obtida dentro do processo quando:

- a) A reação ocorre sob condições adiabáticas, isto é, não há troca de calor entre o reator em que está ocorrendo a reação e a vizinhança, e
- b) Quando não existem outros efeitos, tais como efeitos elétricos, trabalho, ionização, formação de radical livre, etc.

Como se supõe que os produtos saem na temperatura de reação, se procura conhecer a temperatura dos produtos, pois automaticamente fica conhecida a temperatura da reação.

Nos cálculos de temperaturas de chama para as reações de combustão, a temperatura da reação adiabática ASSUME A COMBUSTÃO COMPLETA.

Como todas essas considerações são principalmente simplificadoras, para que se possa aplicar o conhecimento técnico, vejamos uma amostra do que acontece em decorrência disso.

Em um equipamento que usa Metano como combustível, se for calculado com ar teórico, a temperatura adiabática da chama, encontraremos 2020°C. Para a combustão incompleta chegaríamos a 1920°C. A temperatura medida é de 1885°C.

14.6 UTILIZAÇÃO NA ENGENHARIA

A temperatura de chama adiabática nos informa o limite superior da temperatura de um processo. Naturalmente a temperatura real pode ser menor.

Assim, a temperatura adiabática de reação nos ajuda a selecionar e especificar os diversos, corretos e mais seguros tipos de materiais para serem usados nos equipamentos onde ocorrerão reações.

A combustão química do ar produz gases na temperatura de até 2500 K, podendo ser aumentada para até 3000 K, com o uso de ar enriquecido com Oxigênio e outros oxidantes mais sofisticados.