

Combustão Industrial

JOSÉ EDUARDO MAUTONE BARROS

Professor Adjunto da Universidade Federal de Minas Gerais

Coordenador do Laboratório de Combustíveis e Combustão

Doutor em Engenharia Mecânica - Térmica (UFMG)

Doutor em Engenharia Aeronáutica - Energia (ITA)

Engenheiro Químico (UFMG)

www.mautone.eng.br

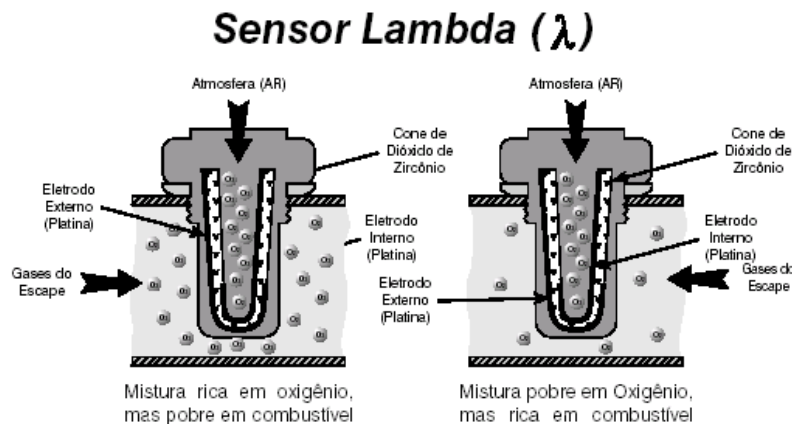
mautone@demec.ufmg.br

SUMÁRIO

- INTRODUÇÃO A COMBUSTÃO
- DEFINIÇÕES BÁSICAS
- COMBUSTÍVEIS
- CLASSIFICAÇÃO DE CHAMAS
- REGIMES DE COMBUSTÃO
- QUEIMADORES INDUSTRIAIS
- **EMISSÕES**

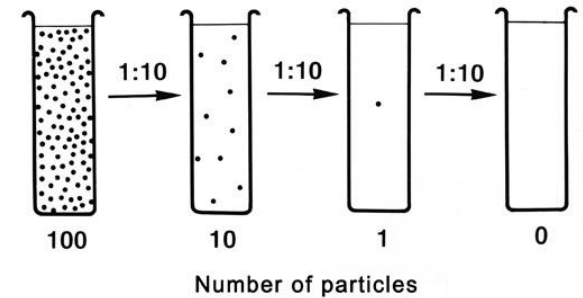
EMISSÕES

- **Controle de excesso de ar (O_2)**
 - Através da análise do teor de oxigênio nos gases de exaustão é possível controlar o excesso de ar empregado na combustão.
 - Para efeito de redução de emissões deve-se operar na condição estequiométrica.



- O sensor mais usado para medir o oxigênio é o sensor eletroquímico de óxido de zircônia. É o mesmo usado na sonda lambda dos veículos.

EMISSÕES



● Diluição

- As medições de concentrações de poluentes são feitas em base seca, ou seja, a água é retirada do gás antes da análise.
- Outro fator importante é verificar se os gases de exaustão são diluídos com ar atmosférico antes do ponto de coleta da amostra.
- A diluição é feita geralmente para manter as temperaturas na faixa de operação do equipamento.
- As normas especificação o grau de diluição que devem ser reportado as medições, exigindo assim correção dos valores medidos.

EMISSÕES



- **Monóxido e dióxido de carbono - CO e CO₂**
 - O CO e CO₂ são medidos por sensores de absorção no infravermelho.
 - O CO é tóxico e deve ser limitado a 39 cm³/m³ de ar na área operacional.
 - Os limites de emissão são especificados pelo ministério do trabalho.
 - A queima de misturas ricas são a fonte principal de CO.
 - Outra fonte é a carbonização de madeira, produção de coque e craqueamento.
 - A vazão de CO₂ é importante para o inventário de emissões.

EMISSÕES



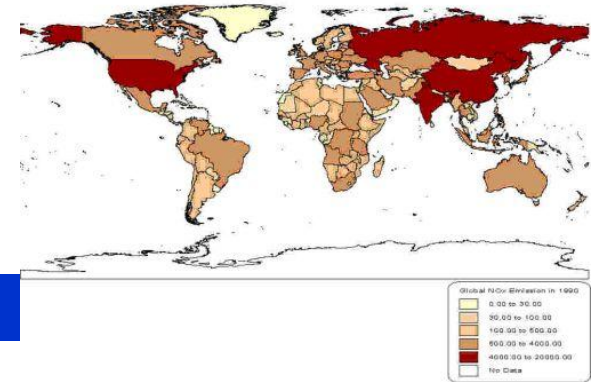
● Particulados

- Particulados são partículas presentes nos gases de combustão provenientes da queima do combustível.
- Fuligem é o resultado da queima incompleta do combustível.
- As cinzas do combustível também geram particulados.
- A medição é feita por coleta e pesagem de amostras em filtros ou por processos de dispersão de luz, usando escalas empíricas (Opacímetro).
- Os limites de emissões são estabelecidos pelo CONAMA e/ou órgãos ambientais locais.
($<0,120\text{kg/Gcal}$)

Escala Ótica
de Fuligem



EMISSÕES



● Óxidos de Nitrogênio – NO_x

- Os óxidos de nitrogênio são, em ordem de importância: NO, NO₂, N₂O, N₂O₄, NO₃, N₂O₆, N₃O₄, N₂O₇
- Os óxidos de nitrogênio são formados na combustão a alta temperatura.
- São provenientes do nitrogênio do ar e de nitrogênio presente em alguns combustíveis (óleos combustíveis).
- O método mais usado de redução de sua geração é dividir a combustão em uma etapa de queima de mistura rica e uma etapa final de queima de uma mistura pobre, de maneira a reduzir a temperatura média da chama.
- Os sensores usados para sua medição são eletroquímicos ou por quimioluminescência.
- Limites de emissões estabelecidos pelo Banco Mundial. (<225ppm óleo combustível)

EMISSÕES



- **Dióxido de Enxofre - SO_2**
 - Oriundos da queima de enxofre presente nos combustíveis fósseis.
 - O vanádio presente nos aços dos equipamentos pode catalisar a formação de SO_2 , facilitando a corrosão nos equipamentos. O óleo combustível contém vanádio também, vindo do processo de refino.
 - Quando lançado na atmosfera dissolve-se na água e forma o ácido sulfúrico (H_2SO_4), gerando a chuva ácida.
 - A medição de emissão é feita pela absorção de uma amostra de gases de exaustão em água. O teor é determinado por titulação manual ou automática.
 - Os limites de emissões são estabelecidos pelo CONAMA e/ou órgãos ambientais locais.
($<2\text{kg/Gcal}$)

EMISSÕES



Combustível	
	fração molar
N2	0,75059
O2	0,19952
CH4	0,04988
AC molar	19,05
AC molar estq	9,52
phi	0,50

Ar	
	fração molar
N2	0,79
O2	0,21

Diluição nominal	7	%v/v
------------------	---	------

Composição	fração molar	%v/v	%v/v seca	excesso de ar de diluição	Volume corrigido (m3)	%v/v corrigido	fração molar corrigida		
H2O	0,09973	9,97							
N2	0,75018	75,02	83,33	15,18	68,15	84,36	0,84358		
O2	0,09935	9,94	11,04	4,04	7,00	8,67	0,08665		
CO2	0,04988	4,99	5,54	0,00	5,54	6,86	0,06859		
CO	5,59E-07	5,59E-05	6,21E-05	0,00	6,21E-05	7,69E-05	7,686E-07	0,7686	ppm
Outros	8,59E-04	0,0859	0,09546	0,00	0,09546	0,11817	0,0011817		
Total	1	100,00	100,00	19,22	80,78	100,00	1		
	Total seco	90,03							

- Exemplo: Correção de emissão devido a diluição dos gases de combustão de 11% v/v em O₂ para uma nominal de 7% v/v em O₂

BIBLIOGRAFIA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5484: Motores alternativos de combustão interna de ignição por compressão (Diesel) ou ignição por centelha (Otto) de velocidade angular variável – Ensaio – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1985.
- BARROS, J. E. M. *Estudo de Motores de Combustão Interna Aplicando Análise Orientada a Objetos*. Belo Horizonte: Tese de Doutorado, Engenharia Mecânica, UFMG, 2003.

BIBLIOGRAFIA

- BAUKAL Jr., C. E. *Air-oxy/Fuel Burners*. In: *Industrial Burners Handbook*, BAUKAL Jr., C. E. (ed.). Boca Raton: CRC Press, 2003.
- COSTA, M. *Combustão sem Chama Visível (Flameless Combustion)*. Palestra, II Escola de Combustão. São José dos Campos: RNC, 22-26 de Junho de 2009.
- ESCOLA DE COMBUSTÃO em <http://redenacionaldecombustao.org/escoladecombustao/>, jan/2011.

BIBLIOGRAFIA

- GARCIA, R. *Combustíveis e Combustão Industrial*. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.
- GLASSMAN, I. *Combustion*. New York: Academic Press, 1977.
- KUO K. K. *Principles of Combustion*. New York: John Willey & Sons, 1986.
- LEFEBVRE, A. *Gas Turbine Combustion*. Philadelphia: Taylor&Francis, 1998.
- LEVENSPIEL, O. *Engenharia das Reações Químicas*. São Paulo: Edgar Blucher, vol. 2, 1974.

BIBLIOGRAFIA

- REDE NACIONAL DE COMBUSTÃO (RNC) em <http://redenacionaldecombustao.org/>, jan/2011.
- SHARMA, S. P. et MOHAN, C. *Fuels and Combustion*. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1984.
- SMITH, J. M. e VAN NESS, H. C. *Introdução a Termodinâmica da Engenharia Química*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 3ª Ed., 1980.
- STREHLOW, R. A. *Combustion Fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 1988.

BIBLIOGRAFIA

- TURNS, S. R. *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. Boston: McGraw-Hill, 2000.
- WILLIAMS, F. A. *Combustion Theory*. New York: Benjamin Cumings Pub., 1985.