

Combustão: Uma análise estequiométrica

Hannel Freitas

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte - Campus Apodi



Introdução

Processos de combustão

A combustão de fontes combustíveis como forma de gerar calor é um processo muito antigo. A descoberta do fogo remonta aos primórdios da linha evolucionária que leva até o *Homo sapiens*



Uma reação de combustão pode ser classificada como...

- **Completa:** Liberação de CO_2 , H_2O e energia.
- **Incompleta:** Liberação de CO_2 , H_2O , intermediários (CO , etc) e energia

Uma reação de queima estequiométrica é realizada através da completa oxidação do combustível, ou seja: **todo ele é queimado**.

Em base molar (ou volumétrica), o ar possui aproximadamente: 21% de oxigênio, 78% de nitrogênio e 1% de Argônio.

Exercício:

Determine a composição do ar **em base mássica** (CNTP) ;)

Massa molar O_2 : 32 g.mol^{-1}

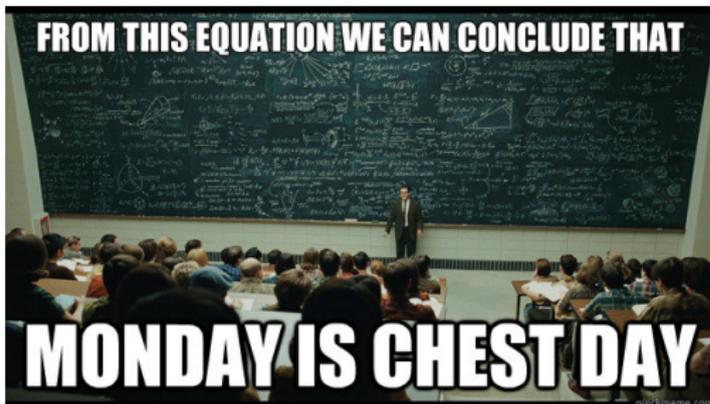
Massa molar N_2 : 28 g.mol^{-1}

Densidade O_2 : $1,33 \text{ kg.m}^{-3}$

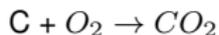
Densidade N_2 : $1,165 \text{ kg.m}^{-3}$

Volume de 1 mol na CNTP: $22,4 \text{ L}$

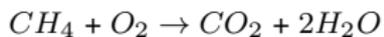
Constante R: $0,082 \text{ atm.L.mol}^{-1}.K^{-1}$



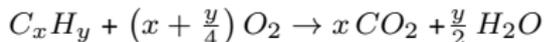
Queima do carbono



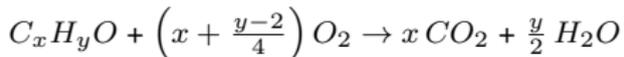
Queima do metano



Queima de hidrocarbonetos

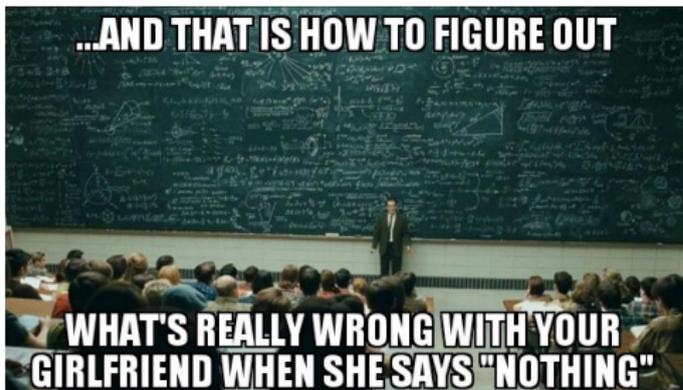


Queima de alcóois



Exercício:

Deduza as equações para a queima estequiométrica de hidrocarbonetos e alcóois.



A formação de água na combustão é resultado da presença de hidrogênio no combustível. Conforme já foi discutido, a evaporação da água “consome” parte da energia útil proporcionada pela queima do material ($PCI \leq PCS$)

Section: Appendix A
Lower and Higher Heating Values of Gas, Liquid and Solid Fuels

Fuels	Lower Heating Value (LHV) [1]			Higher Heating Value (HHV) [1]			Density
	Btu/ft ³ [2]	Btu/lb [3]	MJ/kg [4]	Btu/ft ³ [2]	Btu/lb [3]	MJ/kg [4]	grams/ft ³
Gaseous Fuels @ 32 F and 1 atm							
Natural gas	983	20.267	47,141	1089	22.453	52,225	22,0
Hydrogen	290	51.682	120,21	343	61.127	142,18	2,55
Still gas (in refineries)	1458	20.163	46,898	1.584	21.905	50,951	32,8
Liquid Fuels	Btu/gal [2]	Btu/lb [3]	MJ/kg [4]	Btu/gal [2]	Btu/lb [3]	MJ/kg [4]	grams/gal
Crude oil	129.670	18.352	42,686	138.350	19.580	45,543	3.205
Conventional gasoline	116.090	18.679	43,448	124.340	20.007	46,536	2.819
Reformulated or low-sulfur gasoline	113.602	18.211	42,358	121.848	19.533	45,433	2.830
CA reformulated gasoline	113.927	18.272	42,500	122.174	19.595	45,577	2.828
U.S. conventional diesel	128.450	18.397	42,791	137.380	19.676	45,766	3.167
Low-sulfur diesel	129.488	18.320	42,612	138.490	19.594	45,575	3.206
Petroleum naphtha	116.920	19.320	44,938	125.080	20.669	48,075	2.745
NG-based FT naphtha	111.520	19.081	44,383	119.740	20.488	47,654	2.651
Residual oil	140.353	16.968	39,466	150.110	18.147	42,210	3.752

Quanto menor a quantidade de água no combustível (umidade), menor será a diferença $PCS - PCI$.

- 1 **PCS:** Produtos da combustão contém água em estado líquido.
- 2 **PCI:** Produtos da combustão contém água em estado gasoso.

Dentre as diversas fórmulas utilizadas para a relação direta entre estas grandezas, a demonstrada a seguir é bastante comum (Garcia, 2002):

$$PCI = PCS - 2440 \frac{kJ}{kg} \left(9 \frac{\text{kg hidrogênio}}{\text{kg combustível}} + u \frac{\text{kg água}}{\text{kg combustível seco}} \right)$$

Exercício:

Usando a fórmula de Garcia(2002), determine o PCI do etanol e compare-o com o valor tabelado a seguir.

Section: Appendix A
Lower and Higher Heating Values of Gas, Liquid and Solid Fuels

Fuels	Lower Heating Value (LHV) [1]			Higher Heating Value (HHV) [1]			Density
	Btu/ft ³ [2]	Btu/lb [3]	MJ/kg [4]	Btu/ft ³ [2]	Btu/lb [3]	MJ/kg [4]	grams/ft ³
Gaseous Fuels @ 32 F and 1 atm							
Natural gas	983	20,267	47,141	1089	22,453	52,225	22.0
Hydrogen	290	51,682	120,21	343	61,127	142,18	2,55
Still gas (in refineries)	1456	20,163	46,898	1,584	21,905	50,951	32,8
Liquid Fuels	Btu/gal [2]	Btu/lb [3]	MJ/kg [4]	Btu/gal [2]	Btu/lb [3]	MJ/kg [4]	grams/gal
Crude oil	129,670	18,352	42,686	138,350	19,580	45,543	3,205
Conventional gasoline	116,090	18,679	43,448	124,340	20,007	46,536	2,819
Reformulated or low-sulfur gasoline	113,602	18,211	42,358	121,848	19,533	45,433	2,830
CA reformulated gasoline	113,927	18,272	42,500	122,174	19,595	45,577	2,828
U.S. conventional diesel	128,450	18,397	42,791	137,380	19,676	45,766	3,167
Low-sulfur diesel	129,488	18,320	42,612	138,490	19,594	45,575	3,206
Petroleum naphtha	116,920	19,320	44,938	125,080	20,669	48,075	2,745
NG-based FT naphtha	111,520	19,081	44,383	119,740	20,488	47,654	2,651
Residual oil	140,353	16,968	39,466	150,110	18,147	42,210	3,752
Methanol	57,250	8,639	20,094	65,200	9,838	22,884	3,006
Ethanol	76,330	11,597	26,952	84,530	12,832	29,847	2,988
Butanol	99,837	14,775	34,366	108,458	16,051	37,334	3,065
Acetone	83,127	12,721	29,589	89,511	13,698	31,862	2,964

20 minutes after
engineering
school.

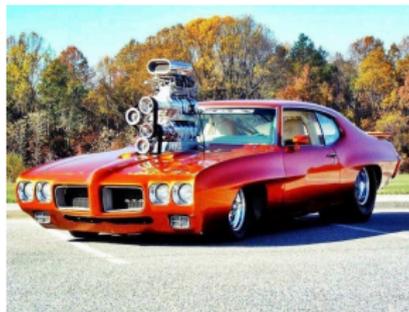


Determinação da quantidade de oxigênio para queima

A reação de combustão consiste em uma oxidação, cujo agente oxidante é o oxigênio, ocasionando a redução do material combustível.

Quantidade de oxigênio estequiométrica: Quantidade de oxigênio necessária para oxidar todo o material combustível, de acordo com a proporção estequiométrica.

Quantidade de oxigênio em excesso: Quantidade de oxigênio que ultrapassa a quantidade estequiométrica, utilizada para garantir a queima completa.



Exemplo

Calcular a vazão de ar estequiométrica necessária para garantir a queima completa de metano em um motor, no qual a vazão de admissão é de 10 kg/min.

Resolução

Seja a massa molar do CH_4 de 16 g/mol, tem-se que: $10 \text{ kg/min} = 625 \text{ mol/min}$

A equação estequiométrica de queima é: $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$

Logo, são necessários 2 mols de O_2 por mol de CH_4 queimado. Para a vazão calculada, teremos:

$$625 \text{ mol/min} \times 2 \frac{\text{mols de } O_2}{\text{mol de } CH_4} = 1250 \frac{\text{mols de } O_2}{\text{min}} = 40 \frac{\text{kg de oxigênio}}{\text{min}}$$

Sendo o ar composto de 23% (kg/kg) de oxigênio, a quantidade necessária será:

$$40 \frac{\text{kg de oxigênio}}{\text{min}} / 0,23 \frac{\text{kg de oxigênio}}{\text{kg de ar}} \approx 173,91 \frac{\text{kg de ar}}{\text{min}}$$