

# Combustão

Contribuição de Bruno Ferreira Porto  
03 de December de 2007  
Última Atualização 12 de December de 2007

Os motores foguete mais comuns transformam a energia térmica de gases em cinética. A alta temperatura dos gases de combustão faz com que estes se expandam e ao fluir pela tubeira essa energia térmica é transformada em cinética. A combustão é simplesmente uma reação química exotérmica.

Para iniciar essa reação é necessário inserir energia suficiente para se atingir o ponto de fulgor, Shapiro, (11). É esse o trabalho do ignitor, quando a energia é inserida no sistema ela vai mudar a fase dos componentes até a gasosa onde a combustão se inicia, o ponto de fulgor. Por ser uma reação exotérmica, nas condições corretas faz a combustão ser auto-sustentável, pois a energia liberada do próprio processo mantém a reação. A combustão completa acontece quando os produtos da combustão são apenas os óxidos de menor energia de cada um dos elementos, Shapiro, (11). Como na combustão completa do propano, por exemplo:

Existe uma proporção entre o oxidante e o combustível que resulta em um balanço na massa na equação. Na realidade, dificilmente tem-se proporções exatas entre os componentes iniciais e mesmo que a tivesse existem muitos outros fatores que influenciam no processo, a combustão sempre é incompleta. O ar, oxidante usado em muitas máquinas térmicas, tem muitos componentes na sua constituição, traços de todos os tipos de gases e partículas sólidas em suspensão, por exemplo. Em alguns processos pode-se desejar aumentar a temperatura de combustão, isso se faz enriquecendo a mistura, ou seja, aumentando a proporção de oxidante. O mesmo é interessante para os motores foguete, já que quanto maior a temperatura, maior energia térmica, maior a expansão dos gases. Mas existem limites para isso, principalmente estruturais, os materiais do corpo e tubeira terão de suportar essa alta temperatura. Para o propelente KNEF, sendo o Epóxi o combustível, o nitrato de potássio o oxidante e o óxido de ferro como aditivo tem-se:

Onde  $n$  é o número de mols de cada um dos produtos que também contém traços insignificantes de:

A obtenção da equação de combustão é complexa, provavelmente uma das fases mais difíceis no desenvolvimento de um motor de propelente sólido. Considerando que o propelente sofre o processo de combustão em condições de pressão constante e forma produtos de combustão que estão em equilíbrio químico e na temperatura adiabática de chama, o primeiro passo é definir quais os gases resultantes possíveis. Para propelentes que contenham apenas carbono, oxigênio, hidrogênio e nitrogênio existem apenas doze possíveis produtos: Carbono, dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrogênio, vapor, oxigênio, nitrogênio, óxido nitroso e os íons, H, O, N e OH. Se o propelente tem elementos metálicos como potássio, sódio, alumínio ou ferro ou contenha cloro isso irá resultar em produtos condensados (líquidos ou sólidos) de combustão como carbonato de potássio, ou equivalentes em sódio, óxido de alumínio ou cloreto de potássio.

Tendo definido os possíveis produtos de combustão o próximo passo é determinar o número de mols, ou fração molar, de cada um deles. Para isso é necessário resolver simultaneamente um grupo de equações relacionando os produtos da reação para respeitar as condições de balanço de massa, equilíbrio químico e balanço de energia.

A condição de equilíbrio químico é atingida quando a Energia Livre de Gibbs não variar mais, ou seja,  $\Delta G=0$ . A Energia Livre de Gibbs,  $G$ , é a quantidade de energia capaz de realizar trabalho durante uma reação à temperatura e pressões constantes. Durante o processo de combustão  $\Delta G \neq 0$ , isso significa que o processo ainda tem energia suficiente para mais reações químicas entre os componentes. Os produtos da combustão são o conjunto de moléculas que a determinada temperatura e pressão estão em equilíbrio químico,  $\Delta G=0$ , e respeitam as leis de conservação de massa e energia.

A solução das equações de equilíbrio químico é trabalhosa até mesmo para reações simples como a do propano. Por isso geralmente são escritos softwares para essa tarefa, felizmente existe mais de um software de equilíbrio químico direcionado a foguetes experimentais. O mais conhecido e divulgado deles é o ProPep e sua extensão gráfica para Windows, chamada GuiPep. Baseado no Propep também existe o GDL\_ProPep. O software mais fácil de usar e que apresenta resultados de uma forma mais organizada é o CproPep, do grupo Dark, (12), e usado neste projeto. Também existe o CEA da NASA, muito completo, mas difícil de usar. Em comum estes softwares tem como referência um artigo da NASA intitulado Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications, (13). Estes softwares foram criados especificamente para cálculo das características de propelentes como impulso específico, velocidade característica, razão dos calores específicos dos gases produtos da combustão, temperatura adiabática de chama, densidade, composição dos gases e a fase de cada elemento, etc. A interface do CproPep e um exemplo de seus resultados podem ser vistos nas Figura 2 e Figura 3.

Figura 2 - Exemplo da janela do CProPep com os resultados

Figura 3 - Janela do software CProPep