

O motor é de corrente contínua de 12 volts e o seu sentido de rotação é controlado pela polaridade. Ele é de baixa rotação e de alto torque e consome normalmente menos de 2 amperes embora suporta até 12 amperes quando submetido a cargas pesadas. Sua fonte pode ser uma bateria de automóvel ou fonte de 12 volts de pelo menos 5 amperes.

O protótipo que construímos já está em uso em nosso laboratório, sendo acionado com pesadas cargas, dezenas de vezes todos os dias sem problemas. Mesmo em uso manual através de uma simples chave de reversão ele proporciona maior estabilidade e facilidade de operação de trabalho

além de tornar o nosso sistema de degasamento menos cansativo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Conselho de Ensino para Graduados e Pesquisa da UFRJ (CEPG) pelo financiamento.

## ARTIGO

### TEMPERATURA FINAL E ENERGIA GLOBAL DE ATIVAÇÃO DA CHAMA: CONCEITOS E MEDIDAS

H.Y.E. Safieh

*Departamento de Química, UFRN; 59.000 – Natal (RN)*

R.M. Branco

*Divisão de Química, IAE/CTA; São José dos Campos (SP)*

(Cópia Revisada, Recebida em 7/7/86)

A chama é uma reação de combustão que se propaga no espaço subsonicamente e que, geralmente, é acompanhada por uma emissão de radiação. A propagação no espaço é o que distingue a chama das outras reações de combustão, sendo ela o resultado da combinação entre a reação química, a difusão de massa, a condutividade térmica e a vazão de fluido. Por outro lado, sendo a chama uma reação de combustão viva, cineticamente heterogênea, é caracterizada por uma zona de reação bem delimitada no espaço que separa os gases reagentes dos gases queimados.

A chama se desenvolve através de uma série de reações em cadeias ramificadas, onde a formação de espécies radiculares é indispensável à sua propagação. A reatividade dos radicais é muito elevada, a passagem de reagentes a produtos se faz muito rapidamente sendo acompanhada por uma importante troca de calor, que aumenta muito a temperatura do sistema.

O estudo macroscópico da combustão (determinação dos parâmetros físicos) permite determinar um certo número de grandezas tais como a velocidade fundamental de propagação, a espessura da zona de reação e a temperatura final. A partir dessas grandezas torna-se possível determinar diversos parâmetros cinéticos tais como a energia global de ativação, as ordens globais ou parciais e a massa molar média dos radicais propagadores de cadeia, utilizando modelos aproximados da chama.

Este trabalho tem por finalidade apresentar um método óptico de medida de temperatura final da chama, bem como

apresentar uma equação para a determinação da energia global de ativação baseada na teoria do reator homogêneo de Van Tiggelen<sup>1</sup>.

## I. CONCEITOS

### I.1 – Temperatura Final da Chama

Denomina-se temperatura final da chama ( $T_f$ ) aquela determinada no vértice de uma chama cônica estabilizada sobre um queimador, sendo este parâmetro característico para uma chama de composição determinada.

O principal método utilizado para sua determinação baseia-se na inversão das linhas do sódio<sup>2-6</sup>.

Quando sódio é introduzido na chama duas linhas amarelas intensas, correspondentes a 5.890 Å e 5.896 Å, aparecem no espectroscópio. Se uma fonte de luz contínua, tal como uma lâmpada de tungstênio, é focalizada na chama, as linhas de sódio aparecerão escuras (absorção) ou claras (emissão) quando comparadas ao espectro contínuo da lâmpada, dependendo se a temperatura da chama for mais baixa ou mais alta que a temperatura da lâmpada. No caso onde a temperatura da chama for igual à temperatura da lâmpada, as linhas do sódio serão invisíveis e neste ponto diremos que se deu a inversão das linhas do sódio.

A figura 1 apresenta o sistema, por nós utilizado, na determinação da inversão das linhas de sódio.

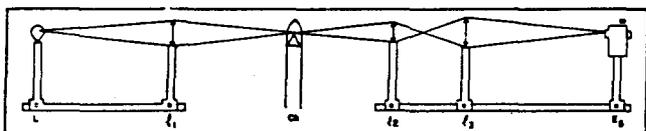


Fig. 1. Sistema utilizado para a determinação da inversão das linhas do sódio – Departamento de Química – UFRN.

- L – Lâmpada de fita de tungstênio Philips Research Lab 1623, 6V – 16A.  
 $l_1$  – Lente convexa com distância focal de 0,25m  
 ch – Chama estabilizada  
 $l_2$  – Lente convexa com distância focal de 0,10m  
 $l_3$  – Lente convexa com distância focal de 0,20m  
 Es – Espectroscópio Karl Kolb D-6072.

A luz proveniente da lâmpada de fita de tungstênio (L) é focalizada na chama (ch) pela lente  $l_1$  de tal modo que uma imagem praticamente igual ao tamanho original da fita seja superposta à chama. As lentes  $l_2$  e  $l_3$  têm a finalidade de formar essa imagem superposta no espectroscópio, de modo que, regulando-se a altura do queimador, tenhamos na fenda do espectroscópio o vértice do cone da chama coincidindo com o ponto da fita da lâmpada aonde foi feita a medida da temperatura.

O sódio introduzido na chama é proveniente de uma célula de vidro contendo uma resistência aquecida, que envolve uma pérola de bórax, na qual se faz passar a corrente gasosa do diluente (Nitrogênio, Argônio, Hélio, etc.). A quantidade de sódio liberada é controlada através da variação da corrente elétrica utilizada no aquecimento da resistência.

A determinação da temperatura da fita da lâmpada de tungstênio pode ser feita através de um micropirômetro ótico de filamento. A calibração da lâmpada deve ser feita ajustando-se o vértice do filamento da lâmpada do pirômetro ao meio da fita da lâmpada de tungstênio, fazendo-se variar a corrente elétrica através de uma fonte de corrente ajustável.

As medidas de temperatura, por este método, são precisas a  $\pm 2\%$  ou seja  $\pm 50$  K. Dentre os fatores que afetam a precisão do método, destacam-se:

- (i) perdas de luz devido a reflexão sobre as lentes;
- (ii) o tungstênio não é um corpo negro perfeito, logo, a temperatura de briho não é igual à temperatura real do filamento;
- (iii) segundo Fristom<sup>3</sup> o sódio estranho à chama acarreta perturbações desde que não seja usado em pequena quantidade.

## 1.2 – Teoria do reator homogêneo

Van Tiggelen<sup>7</sup>, baseado no fato que as reações químicas na frente de chama são realizadas a partir de um mecanismo de reações radicalares, apresenta a zona de reação (combustão) como um reator homogêneo, onde a difusão das espécies ativas em direção ao exterior, corresponde às paredes fictícias que o delimitam. Esse modelo aproximado pode ser justificado pelo fato de a espessura da zona de combus-

tão ser muito pequena, da ordem de 1000 vezes o livre percurso médio das moléculas.

A chama é representada esquematicamente na figura 2, onde os planos I e II representam as perdas fictícias do reator (zona de combustão).

- $U_m$ ,  $T_m$  e  $(X_T)_m$  são os valores médios, na zona de reação, da velocidade de reação, temperatura e fração molar;
- $T_M$  é a temperatura onde a velocidade de reação atinge seu valor máximo ( $U_M$ );
- nos planos I e II a probabilidade de ramificação ( $\delta$ ) é igual à probabilidade de ruptura ( $\beta$ ), devido ao baixo nível térmico no plano I e ao consumo do reagente deficitário no plano II.

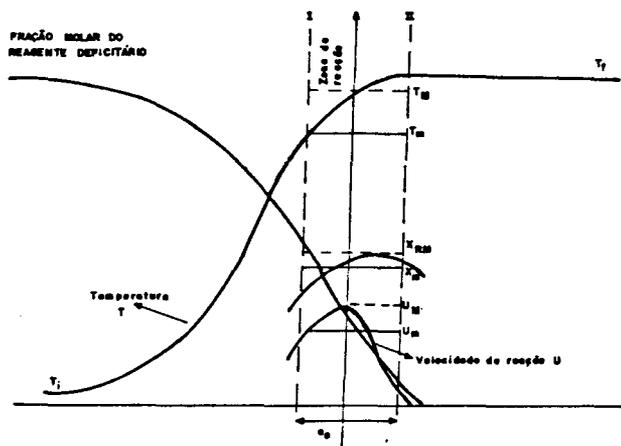


Fig. 2. Esquema representativo da chama.

Esta é uma teoria difusional que considera a ramificação das cadeias como fenômeno indispensável para a propagação da chama.

As principais informações retiradas desta teoria podem ser resumidas nas seguintes equações.

$$V_O = 4T_i/\pi[(2R/3M_T T_m)(\delta - \beta)]^{1/2} \quad (\text{eq. 1})$$

$$V_O e_O = (32\lambda T_i/15\pi)(2R/3M_R T_m)^{1/2} \quad (\text{eq. 2})$$

$$T_m = T_i + 0,74(T_f - T_i) \quad (\text{eq. 3})$$

onde:

- $V_O$  – velocidade fundamental de propagação (m/s)  
 $T_i$  – temperatura inicial (K)  
 $R$  – constante universal dos gases:  $8,31441 \text{ J.mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$   
 $M_R$  – massa molar média dos radicais propagadores de cadeia  
 $T_m$  – temperatura média (K)  
 $\delta$  – probabilidade de ramificação  
 $\beta$  – probabilidade de ruptura  
 $\lambda$  – livre percurso médio (m)  
 $e_O$  – espessura de zona de combustão (m)  
 $T_f$  – temperatura final (K)

As equações 1, 2 e 3 são conhecidas na literatura como as “Equações Van Tiggelen”.

## II – Determinação da energia global de ativação

Quando a temperatura da chama é abaixada artificialmente pela adição de um gás inerte (método da diluição), mantendo-se constante a relação combustível/oxidante e a temperatura inicial, a velocidade fundamental de propagação varia de tal maneira que a relação logarítmica (eq. 4) deduzida por Van Tiggelen<sup>8</sup>, a partir da teoria do reator homogêneo, nos permite calcular a energia global de ativação ( $E_a$ ).

$$\Omega = \log V_0 + (n''/2) \log T_m - (1/2) \log X_0 = K - 0,4343(E_a/2RT_m) \quad (\text{eq. 4})$$

onde,  $n''$  pode ser considerada igual a 1, sendo as únicas exceções nos casos em que processos monomoleculares verdadeiros estão implicados<sup>8</sup>;  $K$  é uma constante para uma dada mistura de composição combustível/oxidante determinada, e o complemento da diluição  $X_0$  é definido por:

$$X_0 = (100 - \% \text{ inerte})/100$$

A equação 4 foi determinada usando parâmetros no sistema de unidades c.g.s., e para expressá-la no sistema internacional de unidades (SI) é necessário colocá-la na seguinte forma:

$$\Omega = \log 100V_0 + 1/2 \log T_m - 1/2 \log X_0 = K' - (0,4343 E_a/2R) (1/T_m) \quad (\text{eq. 5})$$

Colocando-se em gráfico o primeiro membro da equação 5 ( $\Omega$ ) em função do inverso da temperatura, é possível determinar a energia global de ativação a partir do coeficiente angular da reta obtida.

Um exemplo que ilustra este método é mostrado abaixo para dados obtidos em chamas (butadieno 1,3/oxigênio/nitrogênio)<sup>9</sup>. Na tabela I constam os dados experimentais da velocidade fundamental de propagação e da temperatura final da chama para uma proporção fixa combustível/oxidante igual a 0,29, determinados à pressão atmosférica, variando-se a diluição do sistema de 57% a 68%.

Plotando os valores da função logarítmica ( $\Omega$ ) em função do inverso da temperatura média multiplicada por um fator de  $10^4$  (gráfico 1) obtemos uma relação linear, com coefi-

ciente de correlação igual a 0,995, expressa pela seguinte equação:

$$\Omega = -0,3892 (10^4/T_m) + 6,1389$$

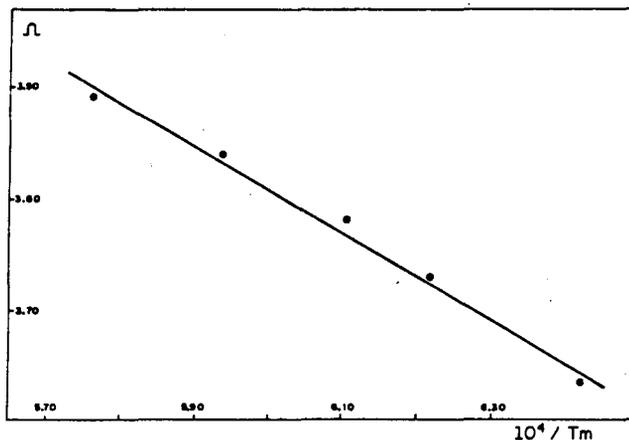


GRÁFICO 1:  $C_4H_6/O_2/N_2 - [C_4H_6] / [O_2] = 0,29$

A partir do coeficiente angular obtido, podemos calcular a energia global de ativação utilizando a equação 5 do seguinte modo:

$$-0,3892 = (-0,4343E_a/R \cdot 2 \cdot 10^4) \\ \text{Portanto } E_a = 148,95 \text{ kJ/mol.}$$

### AGRADECIMENTOS:

Os autores agradecem o auxílio prestado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq, e o Instituto de Atividades Espaciais do Centro Técnico Aeroespacial.

### Bibliografia:

- 1 A. Van Tiggelen, J.C. Balaceanu, J. Burger, G. de Soete, L. Sajus, B. Salé et P.J. Van Tiggelen, "Oxidation et Combustion" Tome I, pp. 447-479 – Edition Technip, Paris (1968).
- 2 A. Van Tiggelen, J.C. Balaceanu, J. Burger, G. de Soete, L. Sajus, B. Salé et P.J. Van Tiggelen, "Oxydation et

TABELA 1

Sistema  $C_4H_6/O_2/N_2$  com  $[C_4H_6] / [O_2] = 0,29$

%N <sub>2</sub>	X <sub>0</sub>	V <sub>0</sub> mS <sup>-1</sup>	T <sub>f</sub> K	T <sub>m</sub> K	10 <sup>4</sup> K T <sub>m</sub>	Ω
57	0,43	1,217	2240	1735,1	5,763	3,899
60	0,40	1,050	2172	1684,8	5,936	3,833
63	0,37	0,888	2110	1638,9	6,102	3,772
65	0,35	0,783	2070	1609,3	6,214	3,725
68	0,32	0,615	2000	1557,5	6,421	3,633

- Combustion", Tome I, pp. 366-377, Edition Technip, Paris (1968).
- <sup>3</sup> R.M. Fristom and A.A. Westenberg – "Flame Structure" pp. 145-176 – McGraw Hill, Inc. (1965).
- <sup>4</sup> B. Lewis and G. Von Elbe – "Combustion, Flames and Explosions of Gases" pp. 620-638 – Academic Press, Inc. (1961).
- <sup>5</sup> A.G. Gaydon and H.G. Wolfhard – "Flames – Their Structure radiation and temperature" pp. 239-261 – Chapman and Hall, Ltd third edition (1970).
- <sup>6</sup> L.G. Dodge – "Optical Absorption and Emission Measurements in Flames" – Progress in Astronautics and Aeronautics 53, p. 155 (1976).
- <sup>7</sup> A. Van Tiggelen, J.C. Balaceau, J. Burger, G. de Soete, L. Sajus, B. Salé et P.J. Van Tiggelen, "Oxydation et Combustion", Tome I, pp. 500-519, Edition Technip, Paris (1968).
- <sup>8</sup> A. Van Tiggelen, J.C. Balaceanu, J. Burger, G. de Soete, L. Sajus, B. Salé et P.J. Van Tiggelen, "Oxydation et Combustion", Tome I, pp. 526-530, Edition Technip, Paris (1968).
- <sup>9</sup> R.M. Branco – "Estudo das Propriedades Físicas do Sistema C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> e Influência do Inibidor CF<sub>3</sub>Br" Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, (1985).

## ARTIGO

### VELOCIDADE FUNDAMENTAL DE PROPAGAÇÃO E ESPESSURA DA FRENTE DE CHAMA: CONCEITOS E MEDIDAS

H.Y.E. Safieh

*Departamento de Química, UFRN; 59.000 – Natal (RN)*

R.M. Branco

*Divisão de Química IAE/CTA; São José dos Campos (SP)*

(Cópia Revisada  
Recebida em 7/7/86)

A chama é uma reação de combustão viva, cineticamente heterogênea e, sendo assim, caracterizada por uma zona de reação bem delimitada no espaço de pequena espessura ( $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  m à pressão atmosférica) que separa os gases reagentes dos gases queimados. Nesta estreita zona de transição contínua se desenvolvem todos os processos elementares, reações radicalares em cadeias ramificadas, que conduzem a uma transformação química mais ou menos completa e onde existe uma variação de temperatura desde um valor inicial ( $T_i$ ) até um valor final ( $T_f$ ). Portanto, nesta região existem dois gradientes importantes, um para a temperatura ( $\cong 10^5$  K/m) e outro para o consumo do material reagente ( $\cong 10^2$  kg/s).

A chama pode ser caracterizada globalmente, através de estudos macroscópicos, pela determinação de seus parâmetros físicos, tais como, a velocidade fundamental de propagação ( $V_O$ ), espessura da chama ( $e_O$ ) e temperatura global da chama ( $T_{ch}$ ), que são característicos de uma mistura inflamável de composição definida.

Este artigo tem por finalidade introduzir o conceito de velocidade fundamental de propagação e da espessura da frente de chama, bem como um método ótico utilizado para suas determinações experimentais.

## I – CONCEITOS

### I.1 – Velocidade Fundamental de Propagação ( $V_O$ )

Uma vez estabilizada a chama, com uma composição conveniente, ela se propaga com uma velocidade que pode ser denominada "velocidade de deslocamento da chama" ou "velocidade espacial" ( $\vec{V}_s$ ), definida em relação a um sistema de eixos fixos no espaço<sup>1</sup>. Todavia como a mistura gasosa pode estar em movimento, uma grandeza mais representativa é a "velocidade de propagação da chama" ( $\vec{V}_p$ ), definida em relação a um sistema de eixos ligado ao gás em escoamento. De uma maneira mais precisa e generalizada<sup>1</sup>, a velocidade de propagação em um ponto O de um elemento ds da frente de chama, é a diferença vetorial entre a velocidade espacial ( $\vec{V}_s$ ) e a velocidade de escoamento dos gases em O ( $\vec{V}_g$ ).

$$\vec{V}_p = \vec{V}_s - \vec{V}_g \quad (\text{eq. 1})$$

Quando a mistura inflamável está em repouso ( $\vec{V}_g=0$ ), a velocidade de propagação é igual à velocidade espacial sen-