

## Relatório Final

**Título do projeto de pesquisa:** Medição da Velocidade de Chama Adiabática utilizando Queimador de Chama Plana com pré-mistura de  $CH_4/ar$ .

**Bolsista:** Kevin Luiz Turibio

**Orientador(a):** Wladimir Mattos da Costa Dourado

**Período do relatório:** Março de 2017 a Agosto de 2017

### Resumo

Ao longo desses seis meses, foram realizados a validação do método de cálculo propostos na literatura para a medição de velocidade de chama laminar adiabática. Os dados usados para a realização dos cálculos foram extraídos de ensaios realizados a partir da montagem do experimento de medição da velocidade de chama laminar plana com o queimador do tipo McKenna; e a medição de velocidade de chama adiabática foi realizada com mistura de metano/ar e razão de equivalência igual a 1. Este ensaio teve como objetivo comparar os resultados com os disponíveis na literatura com a finalidade de validar o método a ser adotado na Divisão de Propulsão Espacial do IAE.

Palavras chave: Combustão; Metano; Queimador; Velocidade laminar de chama adiabática; McKenna

## 1 INTRODUÇÃO

Uma característica importante no processo de combustão é a velocidade de chama laminar adiabática ( $S_{l0}$ ). Algumas características importantes de chama pré-misturadas tal como forma da chama, a faixa de estabilidade e os fenômenos de retorno (flashback) e assopramento (blow-out) da chama estão relacionados com a velocidade da chama. Esse parâmetro, juntamente com a temperatura de chama adiabática, é uma característica única de cada mistura com-

combustível/comburente. Por este motivo, a velocidade de chama também desempenha um papel importante como dado de referência em simulações computacionais. Os mecanismos cinéticos detalhados ou globais devem ser capazes de reproduzir  $S_{l0}$  dentro das suas faixas de validação (COELHO, 2014).

De acordo com Francisco Jr. (2014), além de ser um parâmetro importante no projeto de câmaras de combustão, a velocidade de chama laminar é também utilizada para validação de mecanismos de cinética química. Ao longo deste trabalho será descrito o método do queimador de chama plana para a obtenção da velocidade laminar de chama adiabática.

De acordo com Chong e Hochgreb (2015), no método de chama plana a chama é estabilizada via perda de calor em um disco de metal poroso. A taxa de perda de calor é controlada pela vazão da mistura dos gases. A mistura de gases é queimada com alta velocidade e é ajustada até a chama ficar plana. O diâmetro da chama é medido e dividido pelo volume de gás não queimado para determinar a velocidade da chama. Entretanto, o método de chama plana é apenas aplicado em processos com baixas velocidades de queima. Um sistema de arrefecimento foi utilizado por Botha e Spalding (1954) para realizar medições de chama com alta velocidade. A utilização do sistema faz com que diminua a perda de calor, ajudando a estabilizar a chama.

Objetivo geral deste trabalho é organizar os cálculos matemáticos e o processo de tratamento dos dados de forma a aferição do método de medição da velocidade de chama laminar adiabática com a mistura de metano/ar, para posteriormente ser usado com metano/ $O_2$ . Os resultados das misturas com ar serão comparados com os resultados já existentes na literatura para validar a metodologia adotada e as misturas com  $O_2$  servirão para desenvolvimento de projetos de motores foguetes existentes na divisão.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Ao longo do período de estudo do bolsista compreendido neste relatório foram realizadas algumas atividades que permitiram a realização do trabalho, tais como:

- Estudo sobre medição da velocidade da chama: o estudo sobre as técnicas de medição da velocidade chama adiabática foi feito com o objetivo de utilizar no desenvolvimento de projeto de motor foguete dentro da divisão do IAE/APE.

- Análise de dados obtidos com o queimador de chama plana McKenna disponível na APE, experimento realizado pelo bolsista anterior Rafael José Ramos Melo.
- Análise de método de medição de altura da chama da superfície porosas do queimador McKenna.

## 2.1 Velocidade de Chama Plana Laminar

De acordo com Coelho (2014), a velocidade laminar da chama plana para uma situação unidimensional (1D) é definida como a velocidade com que os reagentes se movem na direção perpendicular em relação a frente da chama.

A frente da chama, região onde ocorreram as reações e combustão, se propaga com certa velocidade  $S_l$ , perpendicular ao escoamento dos gases de entrada. A chama permanecerá em uma posição fixa no espaço apenas quando o escoamento à montante da chama for laminar. Tem-se, então, a velocidade de queima laminar (COELHO, 2014). De acordo com Coelho (2014), a velocidade de chama,  $S_l$ , é dada pela razão

$$S_l = \frac{\dot{V}}{A}, \quad (1)$$

onde  $\dot{V}$  é a vazão volumétrica do reagentes e  $A$  é a área da seção transversal por onde os reagentes escoam. Em uma situação de perda de calor zero, quando todo o calor gerado pelas reações químicas é integralmente transferido para a mistura de gases queimados, é caracterizada um chama adiabática, onde  $S_{l0}$  é a velocidade laminar da chama adiabática. A velocidade da chama para uma dada composição de gases depende das condições iniciais da mistura, sendo elas a temperatura dos gases não queimados, pressão e a razão de equivalência,  $\phi$  (COELHO, 2014).

## 2.2 Razão de Equivalência

De acordo com Coelho (2014) a razão de equivalência de uma dada mistura é dada por

$$\phi = \frac{\dot{M}_{fu}}{\dot{M}_{Ox}} \Bigg/ \left( \frac{\dot{M}_{fu}}{\dot{m}_{Ox}} \right)_s, \quad (2)$$

onde  $\dot{M}_{fu}$  é a vazão mássica do combustível e  $\dot{M}_{Ox}$  é a vazão mássica do oxidante. O subscrito “s” refere-se à proporção estequiométrica, que é caracterizada por ser a quantidade exata de

oxidante necessária para a combustão completa do combustível. Uma mistura de gases onde  $\phi < 1$  é chamada de mistura pobre, caracterizada pelo excesso de ar, enquanto que mistura com  $\phi > 1$  é chamada de mistura rica, com combustível em excesso. Uma razão de equivalência igual a 1 significa que há uma proporção estequiométrica de combustível e ar.

### 2.3 Poder Calorífico do Combustível

O poder calorífico do combustível é definido como a quantidade de energia liberada na reação de combustão estequiométrica completa, expressa por unidade de massa de combustível. Para combustíveis contendo hidrogênio ( $H$ ) em sua composição, ocorre a formação de vapor de água como produto de combustão. Sendo assim, o poder calorífico pode ser classificado em Poder Calorífico Superior ( $PCS$ ) e Poder Calorífico Inferior ( $PCI$ ), dependendo se a água é assumida no estado vapor ou no estado líquido nos produtos (FRANCISCO JR., 2014). O poder calorífico superior leva em consideração a quantidade de energia liberada pela condensação do vapor presente no combustível, enquanto que o poder calorífico inferior não considera esta parcela de energia (FRANCISCO JR., 2014)

### 2.4 Queimador de Chama Plana

Em um queimador de chama plana, a vazão de pré-mistura é ajustada para que se estabeleça sobre um disco poroso. Desta maneira, a velocidade da chama é determinada pela vazão volumétrica e a área da chama plana (COELHO, 2014), conforme a Eq. (1). O queimador de chama plana é constituído basicamente por um tubo cilíndrico posicionado na vertical e, na sua superfície, um disco de material poroso com diâmetros na ordem de  $1,0 \text{ mm}$  ou menos (FRANCISCO JR., 2014).

Segundo Coelho (2014), a utilização de um arrefecimento adicional por um fluxo de água faz com que a chama se aproxime do disco poroso. Uma das dificuldades do método é quantificar a troca de calor da chama, pois apresenta variações muito pequenas. Segundo Francisco Jr. (2014), o sistema de arrefecimento é utilizado para ampliar a faixa de operação do queimador e obter maiores velocidades de chama.

A transferência de calor da chama para a placa perfurada gera uma redução da temperatura de reação e, conseqüentemente, menores velocidades de chama em relação a um queimador

idealmente adiabático. Por isso, para se obter a velocidade de chama adiabática é necessário medir a transferência de calor da chama para a água do sistema de arrefecimento para diversas velocidades, mantendo-se a razão de equivalência constante. Em seguida, realiza-se uma extrapolação da velocidade de chama para perda de calor igual a zero, obtendo-se, assim, a velocidade de chama adiabática (FRANCISCO JR., 2014; KUO, 1986).

## 2.5 Descritivo do Ensaio

O presente experimento é composto por um queimador de chama plana laminar conectado a um Chiller. Este equipamento está programado para manter a temperatura da água em uma dada temperatura. Nos experimentos realizados no presente trabalho foi mantida a  $298\text{ K}$ , a qual é responsável por arrefecer o queimador. A alimentação do queimador é feita por uma linha de ar comprimido (comburente) e um cilindro de gás metano (combustível), sendo que ambos estão conectados aos respectivos controladores de vazão. Na saída do queimador há um medidor de vazão de efeito Coriolis o qual é responsável por medir a vazão da água de saída do queimador e um sensor de temperatura PTC embutido no equipamento. Desta forma, é possível levantar os dados necessários para a medição da taxa de transferência de calor. A Fig. 1 apresenta o layout do ensaio. Neste experimento foi utilizado o queimador McKenna com uma

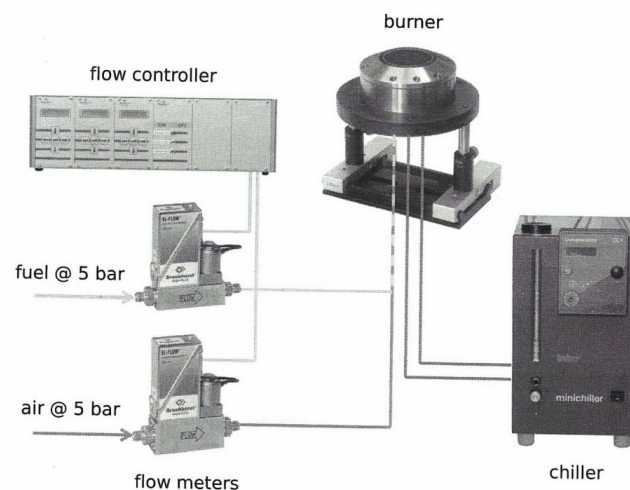


Figura 1: Layout do ensaio.

entrada para gás, sendo a para os reagentes pré-misturados com ar na entrada do queimador.

A região em que ocorre a estabilização da chama é constituída por uma placa porosa com uma área circular de  $2,83 \cdot 10^{-3} m^2$  com cerca de 20 poros de  $0,6\text{ mm}$  de diâmetro por polega. O

queimador possui entrada e saída de água para o sistema de arrefecimento. Este sistema facilita a estabilização da chama, ampliando faixa de operação do queimador e, por consequência, obtendo-se uma maior velocidade de chama.

Como citado no item 2.4, para se obter a velocidade de chama adiabática é necessário medir a transferência de calor da chama para a água do sistema de arrefecimento para diversas velocidades, mantendo-se a razão de equivalência constante. Para medir a transferência de calor em uma dada vazão, parti-se a temperatura de entrada do queimador a  $298\text{ K}$ . Assim, com a diferença entre a temperatura na saída do queimador e a temperatura na entrada, encontra-se a troca de calor. Esse procedimento foi feito para diversas vazões, mantendo-se a razão de equivalência.

A quantidade de energia por unidade de tempo liberada pela chama para o queimador, ou seja, a potência  $\dot{Q}$  é obtida pela 1ª Lei da Termodinâmica, resume-se a

$$\dot{Q}_l = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T, \quad (3)$$

sendo que  $C_p$  em  $(J/kgK)$  é o calor específico da mistura a pressão constante,  $\Delta T$  em  $(K)$  é a variação de temperatura e  $\dot{m}$  a vazão de água  $(kg/s)$ . A temperatura de reação de chama pode ser obtida aplicando o valor de  $S_l$  e  $\dot{Q}_l$  para cada razão de mistura pela equação de balanço de energia global, tal que

$$\dot{m}_{ar} + \dot{m}_c h_c = \dot{m}_g h_{prod} + \dot{Q}_l, \quad (4)$$

onde  $\dot{m}_{ar}$  e  $\dot{m}_c$  representam as vazões mássicas de ar e combustível presentes nos reagentes, enquanto que  $h_{ar}$  e  $h_c$  representam as entalpias específicas do ar e combustível, respectivamente na sequência, com o valor da temperatura de reação e o valor para a energia de ativação aparente,  $E_a$  realizando extrapolações de valores de  $\beta$  e a curva que estiver com menor desvio padrão de velocidades de chamas adiabáticas adota-se seu valor de  $E_a$  de acordo com Eq. (7), determina-se a velocidade de chama adiabática para cada um dos pontos obtidos no experimento.

### 3 RESULTADOS

A validação do ensaio foi baseada no trabalho apresentado por Francisco Jr. (2014). O cálculo estequiométrico para a mistura de  $CH_4$ /ar foi determinado para diversas vazões com a razão de equivalência constante  $\phi = 1$ , conforme a Eq. (2), com temperatura de entrada  $298K$

e pressão de 1 atm. O objetivo deste ensaio foi avaliar os resultados obtidos com os disponíveis na literatura para validar os procedimentos e equipamentos adotados e utilizados na APE. A Fig. 2 mostra os resultados obtidos na literatura e o resultados obtidos no ensaio no escopo do presente trabalho.

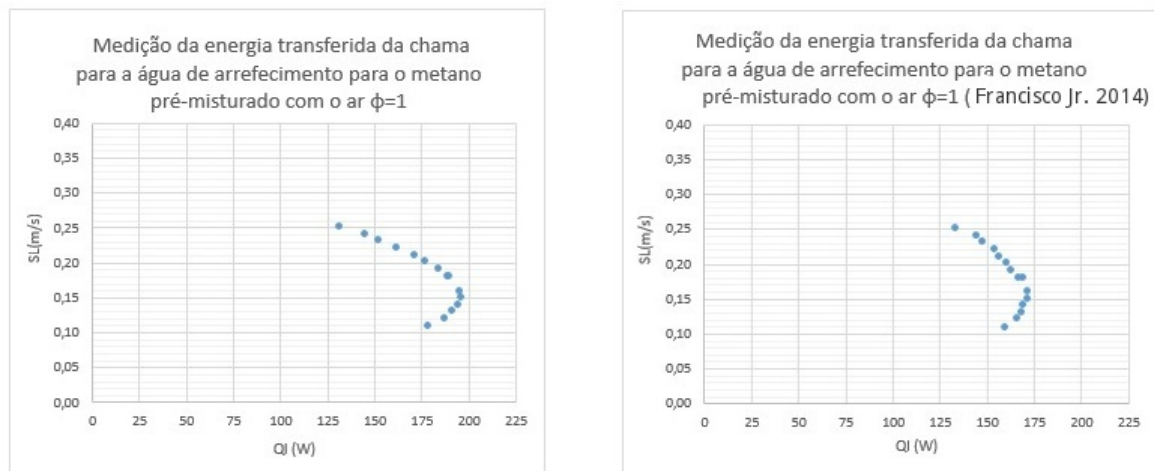


Figura 2: Relação da troca de calor do queimador com a água ( $Q_l$ ) pela velocidade de chama adiabática ( $S_L$ ). A direita estão os resultados disponíveis em Francisco Jr. (2014) e a esquerda os resultados encontrados na medição do presente trabalho.

Observa-se que nos dois gráficos existe uma relação de semelhança entre ambos. Nota-se também que a troca de calor da chama com o queimador é maior na medição feita no presente estudo do que nos resultados disponíveis na literatura. Esta diferença pode ser dada devido a aproximação da chama com o queimador. Além disso, o resultados da medição desta pesquisa tem uma menor dispersão em relação a curvatura imaginária formada pela velocidade para cada vazão.

Para encontrar a velocidade de chama adiabática, foi realizado os cálculos a partir dos dados obtidos na medição. Entretanto, o valor da altura da chama em relação ao queimador não foi extraído do ensaio por não ter sido adaptado completamente o aparato experimental por consequência adotou-se os dados disponíveis no trabalho de Francisco Jr. (2014).

Para o desenvolvimento do modelo matemático foram utilizados balanços de energia em torno da chama conforme Francisco Jr. (2014). Segue o conjunto de equações de Eq. (5) à Eq. (7) a base de cálculo para a obtenção da velocidade de chama adiabática:

• Balanço de Energia da Malha Porosa

$$H_{sl} = 3,66 \cdot \frac{\lambda_l}{d_l}$$

$$H_{sl} = 1116,3 \text{ W/K}$$

$$NUT_l = \frac{H_{sl} \cdot P_{sl} \cdot L_l}{\dot{m}_l \cdot C_{p,l}}$$

$$NUT_l = 2,662$$

$$T_s = \frac{T_{l1} - T_{l0} \cdot \exp(-NUT_l)}{1 - \exp(-NUT_l)}$$

$$T_{l0} = 298 \text{ K}$$

$$T_{gu,l,1} = T_s + (T_{l,0} - T_s) (\exp(-NUT_l)) \quad T_{gu} = (T_s - T_{g0} (1 - \exp(NUT_g)))$$

$$T_{l,1} = 306,8 \text{ K}$$

$$\dot{Q}_l = \dot{m}_l \cdot C_{p,l} (T_{l,1} - T_{l,0})$$

$$\dot{Q}_l = 152,95 \text{ W}$$

$$H_{sg} = 3,66 \cdot \frac{\lambda_g}{d_l}$$

$$H_{sg} = 149816 \text{ W/K}$$

$$NUT_g = \frac{H_{sg} \cdot P_{sg} \cdot L_s}{\dot{m}_g \cdot C_{p,g}}$$

$$NUT_g = 786,53$$

$$T_s = 307,46 \text{ K}$$

$$T_{g0} = 298,020 \text{ K}$$

$$T_{gu} = 303,86 \text{ K}$$

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_g \cdot C_{p,g} (T_{g,1} - T_{g,0})$$

$$\dot{Q}_g = 12,80 \text{ W}$$

(5)

• Balanço de Energia da Frente da Chama

$$Q_{vc} + H_R = H_P$$

$$\dot{Q}_{vc} + \sum_R n_e \bar{h}_e = W_{vc} + \sum_P n_s \bar{h}_s$$

$$\sum_R n_e \bar{h}_e = \sum_P n_s \bar{h}_s$$

$$\sum_R n_e (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_e = \sum_P n_s (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_s$$

$$T_{r0} = 2327 \text{ K}$$

$$\dot{S}_r = \dot{m}_c \cdot PCI$$

$$\dot{S}_r = 2265,7 \text{ W}$$

(6)

$$\sum_R n_e \bar{h}_e = \sum_P n_s \bar{h}_s + Q_{vc}$$

$$T_R = 2179,25 \text{ K}$$

$$\dot{E}_{gu} = \dot{Q}_g + \dot{Q}_l$$

$$\dot{E}_{gu} = 165,75 \text{ W}$$

$$P_e = \rho_{g0} \cdot S_L \cdot C_{p,g} \int_{L_t}^0 \frac{dx}{\lambda_g}$$

$$P_e = 2,22$$



- Velocidade de chama plana laminar

$$\begin{aligned} \frac{S_l}{S_{l0}} &= \left( \frac{T_r}{T_{r0}} \right)^{\frac{5}{4}} \cdot \text{Exp} \left\{ \frac{-E_a}{2R} \cdot \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_{r0}} \right) \right\} & E_a &= 2RT_{r0} \cdot \beta \\ \frac{S_l}{S_{l0}} &= 0,5740 \text{ m/s} & E_a &= 274738,09 \text{ J/mol} \\ S_{l0} &= 0,40 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (7)$$

Para encontrar a temperatura de chama adiabática ( $T_{r0}$ ) e temperatura de reação ( $T_r$ ) foram utilizados as entalpias de formação ( $\bar{h}_f^0$ ) para realizar o equilíbrio da equação de sistemas reagentes, assim, buscando a temperatura final de reação em queima perfeita dos reagentes e o mesmo conceito deve ser adotado para  $T_{r0}$  somente descontando o calor transferido para o queimador representado por  $Q_l$ , usando a entalpia de formação de entrada em 298 K para os dois casos.

A energia de ativação aparente ( $E_a$ ), é obtida através da variação do valor de  $\beta$ , quando se faz esta variação obtém-se velocidades de chamas adiabáticas diferentes em um determinado número de pontos medidos no queimador McKenna, através deste pontos criase uma reta em um gráfico onde a reta gerado pela  $E_a$  que tiver o menos desvio padrao das velocidades  $s_{l0}$  em relação ao mesmo  $\beta$ , adotado-se assim está  $E_a$ .

Deste modo, após substituir os parâmetros do ensaio nas equações e realizar os cálculos de acordo com a literatura, chegou-se ao valor da velocidade de chama adiabática igual a 0,40 m/s. Este valor difere 7,5% em comparação com os resultados de Francisco Jr. (2014).

## 4 CONCLUSÃO

Nos resultados experimentais e numéricos pode-se observar que a diferença com a literatura são aceitáveis cerca de 7,5%, principalmente que a distância da chama no queimador não foi medida e sim adotada da literatura. Portanto, o resultados desse experimento confirmam e validam a bancada experimental para as próximas etapas da pesquisa. A compreensão da metodologia teorica e experimental foi atingida tornando, assim, replicável para os ensaios futuros com diferentes tipos de misturas e estequiometria. Para a próxima etapa, será realizado também a medição da altura da chama em relação ao queimador McKenna.

## 5 PRÓXIMA ETAPA

Como os resultados obtidos com a pré-mistura de metano/ar foram próximos aos resultados disponíveis na literatura, o próximo passo da pesquisa é fazer o mesmo ensaio para a pré-mistura de propano/ ar e etanol/ar. Como o etanol encontra-se no estado líquido e o queimador McKenna trabalha apenas com gás, o uso de um sistema de evaporação do etanol será utilizado para dar continuidade ao trabalho. Os resultados obtidos serão usados como base para o ensaio com pré-mistura de metano/ $O_2$ , propano/ $O_2$  e etanol/ $O_2$ . A mistura de etanol/ $O_2$  não encontra-se disponível na literatura, sendo essa a nossa contribuição para a sociedade científica.

## 6 DIVULGAÇÃO DE RESULTADO

Os resultados serão posteriormente divulgados em artigos científicos e congressos.

### Referências

BOTHA, J. P.; SPALDING, D. B. The laminar flame speed of propane/air mixtures with heat extraction from the flame. *The Royal Society*, v. 225, 1954.

CHONG, C. T.; HOCHGREB, S. Fundamental spray combustion characteristics of rapeseed biodiesel, diesel and blend. *Energy Procedia*, v. 75, p. 2394 – 2399, 2015.

ISSN 1876-6102. Clean, Efficient and Affordable Energy for a Sustainable Future: The 7th International Conference on Applied Energy (ICAE2015). Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215009546>>.

COELHO, F. J. Medição da velocidade da chama plana laminar de misturas metano/ar e gás natural/ar utilizando o método de fluxo de calor. Abril 2014.

FRANCISCO JR., R. W. *Desenvolvimento de Métodos de medição simultâneo de velocidade de chama laminar e energia de ativação aparente e aplicação com misturas combustíveis com baixo poder calorífico*. Tese (Doutorado) — UFSC, Florianópolis - SC, Jul. 2014.

KUO, K. *Principles of Combustion*. New York: Wiley-Interscience, John Wiley and Sons, 1986.