



11º Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais
18, 19 e 20 de agosto de 2020

Modelo 1.5D de Câmaras de Combustão Bipropelentes

Erykson Marconny da Silva Costa¹, Fernando de Souza Costa², Márcio Teixeira de Mendonça³

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP, Brasil

Aluno de Mestrado do Curso de Combustão e Propulsão - PCP.

eryksonmarconny@gmail.com

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP, Brasil

Pesquisador LABCP / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

fernando.costa@inpe.br

³Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP, Brasil

marcio_tm@yahoo.com

Resumo. Modelos matemáticos são utilizados no projeto de novos propulsores espaciais, visando a obtenção de soluções ótimas e a redução dos custos de desenvolvimento e de testes experimentais. Este trabalho apresenta um modelo matemático 1.5D de câmaras de combustão a bipropelentes líquidos, considerando os processos de atomização, vaporização e queima de sprays em escoamentos isobáricos unidimensionais ao longo de diferentes elementos de volume concêntricos dentro do propulsor. Admite-se que as reações químicas sejam bem mais rápidas que a convecção e a difusão de reagentes. São considerados o arrasto, o aquecimento e a dilatação das gotas, bem como a troca de calor entre a fase gasosa, as gotas e as paredes da câmara por condução, convecção e radiação. Será investigada a combustão de sprays de hidrazina (N_2H_4) e tetróxido de nitrogênio (N_2O_4), com distribuição de tamanho de gotas seguindo o modelo de Rosin-Rammler.



Palavras-chave: Modelo numérico 1.5D; Combustão de sprays; Câmara de combustão bipropelente; Propulsor espacial.

1. Introdução

Um melhor entendimento dos processos de atomização, vaporização, mistura e combustão de sprays possibilita o desenvolvimento de câmaras de combustão mais eficientes, com maior uniformidade da queima de propelentes, redução das distâncias de vaporização, mistura e queima, redução e homogeneidade das temperaturas das paredes da câmara, controle sobre o empuxo, redução do consumo de propelentes, diminuição da massa do propulsor e outras vantagens.

A formação dos sprays de propelentes ocorre nos injetores que transformam os volumes de líquidos em centenas de milhares de gotículas líquidas em uma curta distância, aumentando a taxa de vaporização, mistura e queima dos propelentes dentro da câmara. Um parâmetro importante na abordagem de sprays é a distribuição do tamanho das gotas. Os métodos de distribuição empíricos consistem, segundo Babinsky e Sojka (2002), em ajustar uma curva de dados obtidos de um conjunto de injetores em várias condições de operação. Segundo Ashgriz (2011), o processo de atomização pode ser descrito de maneira estatística através de funções de distribuição de tamanhos das gotas. Lefebvre e McDonell (2017) mencionam que essas funções para caracterizar o tamanho de gotas surgiram sem o conhecimento de qualquer mecanismo fundamental e/ou modelo para descrever a distribuição do tamanho das gotas.

A função de distribuição de Rosin-Rammler é a expressão mais utilizada dentre os modelos de distribuição empíricos, sendo conhecida também como distribuição de Weibull (Lefebvre e McDonell, 2017). Mugele e Evans (1951) aplicaram esse modelo de distribuição em 1933 para caracterizar a distribuição volumétrica de partículas de carvão. Segundo Babinsky e Sojka (2002) embora o modelo tenha deficiências, ele é muito aplicado devido à sua simplicidade matemática. O modelo de Rosin-Rammler pode ser expresso por:

$$Q = 1 - \exp \left[- \left(\frac{D}{X} \right)^q \right] \quad (1)$$

Na Eq. (1) a variável Q é a fração do volume que tem gotas com diâmetros menores que D . E as variáveis X e q são constantes que caracterizam a distribuição de tamanhos de gotas do spray. Sendo o parâmetro X é um diâmetro representativo enquanto a constante q indica a uniformidade do spray, pois quanto maior for essa constante mais uniforme é o spray, ou seja, as gotas serão de tamanho similar.

Outro fator importante no modelo de câmaras de combustão de combustíveis líquidos são as forças de interação entre as gotas atomizadas e o meio circundante. O correto conhecimento entre as forças que interagem no sistema gota-meio é muito importante para análise do



processo. A troca de quantidade de movimento entre o spray e o meio circundante é dada pelo coeficiente de arrasto das gotas (Desantes et al., 2009).

Após o processo de injeção de combustível e oxidante, devido às condições de pressão e temperatura da câmara, as gotas são aquecidas e vaporizadas, fornecendo dessa forma os reagentes para a formação da chama.

A taxa de vaporização dos propelentes pode ser estimada a partir da equação:

$$D^2(t) = D_o - \beta_v t \quad (2)$$

Na Eq. (2) a variável D é o diâmetro instantâneo da gota. E a variável D_o representa o diâmetro inicial da gota. E a variável β_v é a constante de vaporização e t é o tempo de vaporização. Essa equação é denominada de lei do d^2 e mostra que o quadrado do diâmetro da gota diminui linearmente com o tempo, sendo a inclinação da linha de redução do diâmetro determinada pela densidade do fluido, coeficiente de difusão de massa da gota-meio e fração de massa de vapor (PATHAK; RAESSI, 2018). A lei do d^2 é aproximada, pois verifica-se através de experimentos que a gota aquece inicialmente até atingir o regime estacionário de vaporização.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo numérico 1.5D de uma câmara de combustão bipropelente para simulação de escoamentos reativos de sprays. Para essa finalidade os seguintes passos fazem-se necessários:

- Discretizar a câmara de combustão em volumes de controle anelares e volume de controle circular no eixo do propulsor
- Desenvolver as equações de balanço para cada volume de controle
 - Incluir troca de calor entre elementos de volume em cada seção transversal
 - Incluir resfriamento por filme da parede da câmara
 - Incluir novas equações para arrasto e vaporização das gotas
 - Analisar inclusão da difusão radial
 - Analisar inclusão de novo cálculo da razão de equivalência local
- Analisar efeitos da distribuição de razões de equivalência, das frações iniciais de vaporização, do número de anéis, da distribuição de tamanho de gotas e outros aspectos.



2. Metodologia

A câmara de combustão é inicialmente discretizada em volumes de controle radiais (em forma de anel e um central cilíndrico), conforme mostrado na Figura 1.

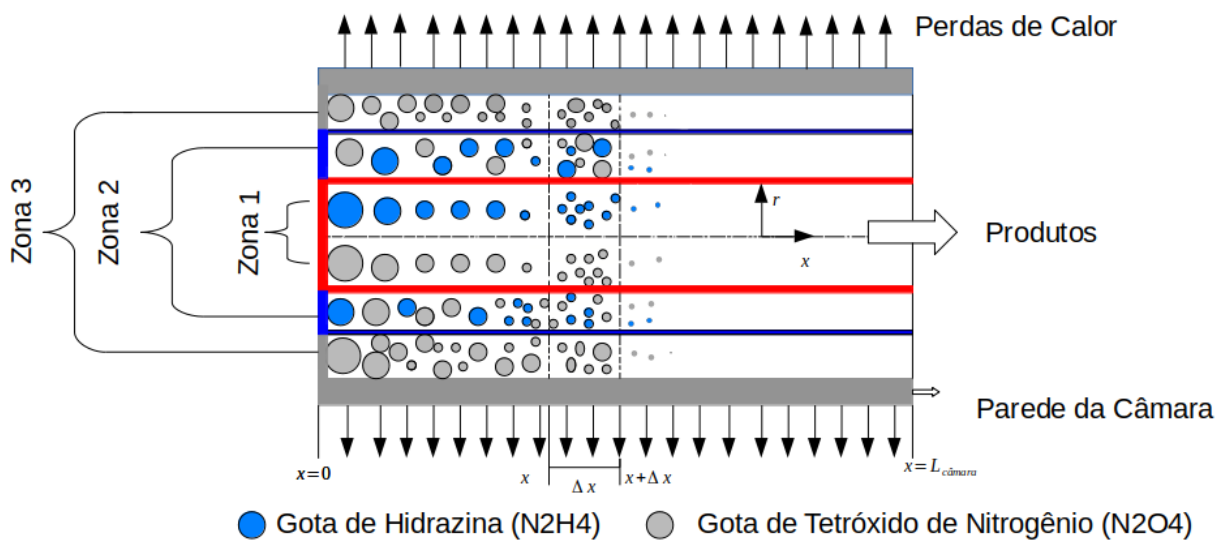


Figura 1 – Volumes de controle na câmara de combustão.

Os propelentes entram na câmara de combustão na fase líquida, porém uma pequena parcela de 1 a 10 % da massa dos propelentes é vaporizada instantaneamente de modo a constituir a fase gasosa na seção inicial da câmara e também a representar a recirculação dos gases.

As gotas de combustível e oxidante entram cada volume de controle com uma função de distribuição de tamanhos de gotas de Rosin-Rammler especificada. O aquecimento das gotas ocorre ao longo do combustor dando ensejo aos processos de vaporização, mistura e combustão entre os reagentes. Admite-se um processo controlado por mistura, ou seja, o tempo de reação é relativamente pequeno comparado ao tempo de mistura. Também considera-se a troca de calor entre a câmara de combustão e o ambiente, pois o combustor não é isolado termicamente.

As hipóteses principais são:

1. Processo em regime permanente;
2. Área transversal da câmara de combustão constante;
3. Escoamento isobárico unidimensional em cada volume de controle;



4. Combustão controlada por mistura;
5. Não há transferência de calor axial na parede do combustor;
6. Não ocorrem colisões de gotas entre si e nem com a parede da câmara;
7. As forças viscosas transientes na camada limite devidas à aceleração das gotas (forças de Basset) são desprezadas;
8. A função distribuição de Rosin-Rammler descreve a distribuição de diâmetro de gotas nos injetores.

2.1 Equações de Balanço

Nessa seção serão apresentadas as equações para os balanços de massa e energia, utilizando elementos de largura Δx ao longo da direção x .

2.1.1 Balanços de Massa

A Figura 2 mostra os fluxos de massa total de combustível e oxidante em um volume de controle onde $\dot{m}_{F,l}$, $\dot{m}_{Ox,l}$ e \dot{m}_g são as vazões mássicas do combustível, do oxidante e da mistura gasosa, respectivamente.

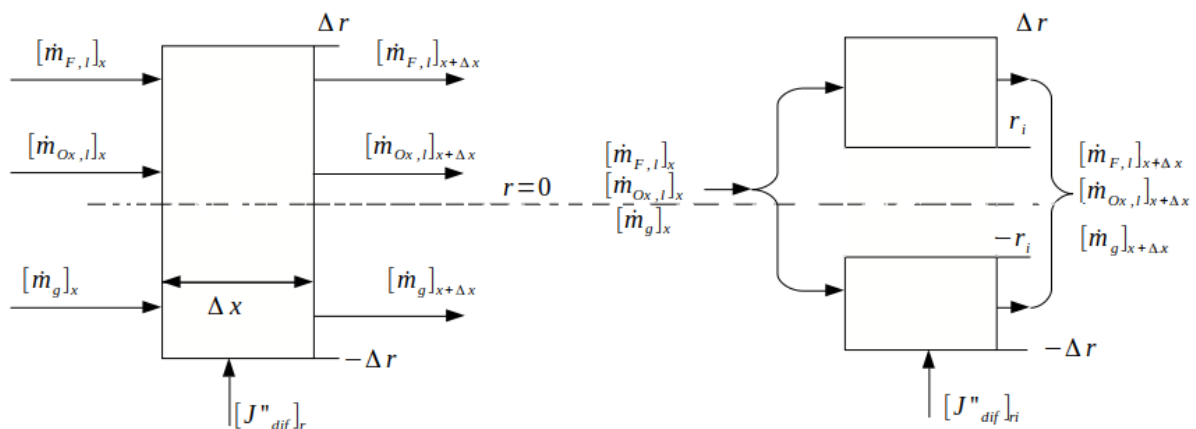


Figura 2 – Fluxos de massa nos volumes de controle.

Fazendo o balanço de massa em cada volume de controle, obtém-se :



$$\frac{d\dot{m}_{Ox,l}}{dx} + \frac{d\dot{m}_{F,l}}{dx} + \frac{d\dot{m}_g}{dx} + \sum (A_L J''_{dif}) = 0 \quad (3)$$

onde $\frac{d\dot{m}_{Ox,l}}{dx}$ é a variação da vazão mássica de oxidante ao longo de x .

$\frac{d\dot{m}_{F,l}}{dx}$ é a variação da vazão mássica de combustível ao longo de x .

$\frac{d\dot{m}_g}{dx}$ é a variação da vazão mássica de gás ao longo de x .

$\sum (A_L J''_{dif})$ é a vazão mássica devido à difusão radial entre as zonas.

A_L é a área lateral de cada zona.

$J'' = -D \frac{dC}{dr}$ é o fluxo difusivo.

D_i é o coeficiente difusivo da espécie i .

C_i é a concentração da espécie i .

O somatório no termo difusivo indica a vazão mássica por difusão vinda das zonas vizinhas. Por exemplo, a zona 1 na Fig. 1 tem apenas uma zona vizinha, logo, ocorre apenas um fluxo difusivo ao redor da zona 1. Já a zona 2 tem duas zonas vizinhas, a zona 1 e a zona 3, logo podem-se identificar duas vazões mássicas difusivas.

2.1.2 Equação de Balanço de Energia

A Fig. (3) e Fig. (4) mostram os fluxos de energia e calor em cada elemento de volume, onde $h_{F,l}$, $h_{Ox,l}$, h_g são as entalpias do combustível, oxidante e gás, respectivamente, e $V_{d,F}$, $V_{d,Ox}$, V_g são, respectivamente, as velocidades das gotas de combustível, oxidante e gás, e ΔQ_{conv} e ΔQ_{rad} são os fluxos de calor por convecção e radiação, respectivamente.

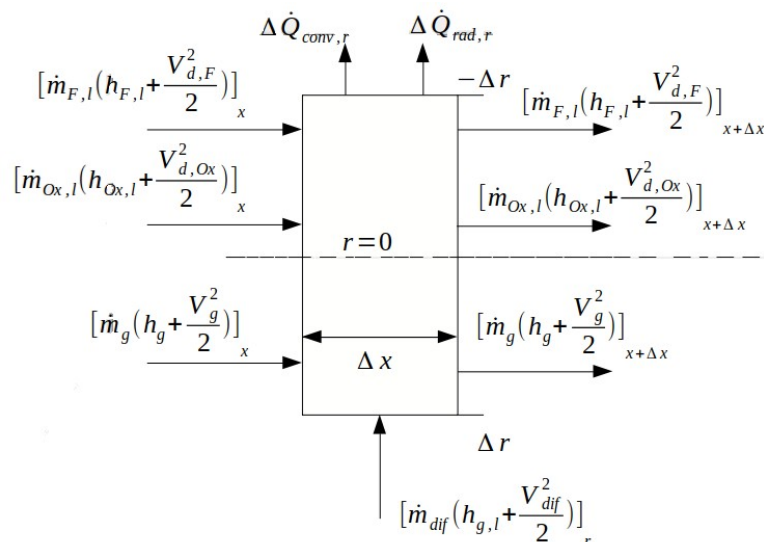




Figura 3 – Fluxos de energia e calor para volume de controle cilíndrico.

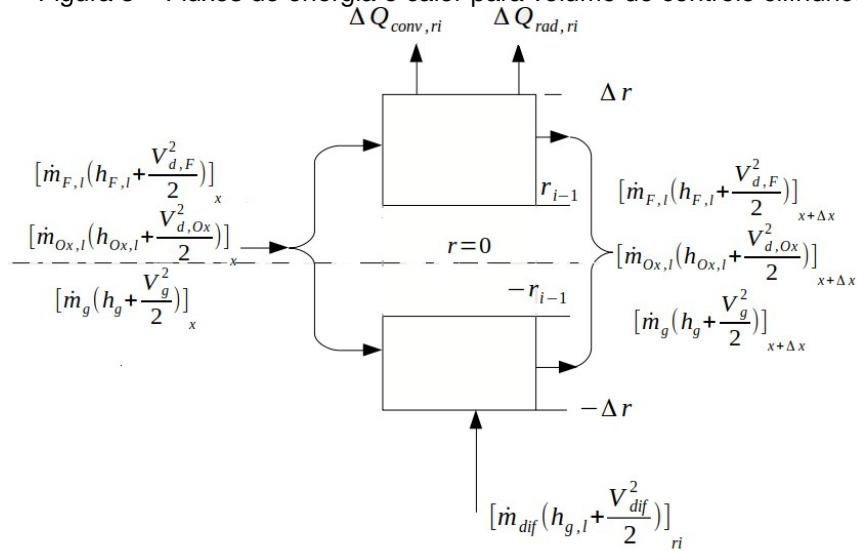


Figura 4 – Fluxos de energia e calor para volume de controle de anéis concêntricos.

Realizando o balanço de energia em cada elemento de volume, obtém-se:

$$\frac{dT_g}{dx} = \frac{a_1 + W_F + W_{Ox} + \frac{d\dot{Q}_{conv}}{dx} + \frac{d\dot{Q}_{rad}}{dx} + \sum \dot{m}_{dif} \left(h_g + \frac{V_{dif}^2}{2} \right)}{a_2} \quad (4)$$

onde $\frac{dT_g}{dx}$ é a variação da temperatura do gás ao longo de x .

$$a_1 = \dot{m}_g v_g^2 \left[\frac{3}{2} \frac{d\dot{m}_g}{\dot{m}_g} - \frac{1}{A_g} \frac{dA_g}{dx} \right] + \left[\dot{m}_g \frac{dh_g}{(d\Phi)} \frac{(d\Phi)}{dx} + h_g \frac{d\dot{m}_g}{dx} \right]$$

$$a_2 = \dot{m}_g \left[\frac{dh_g}{dT_g} - v_g^2 \left(\frac{1}{\bar{M}_g} d \left(\frac{\bar{M}_g}{dT_g} \right) - \frac{1}{T_g} \right) \right]$$



W_F é a energia do combustível.

W_{Ox} é a energia do oxidante.

$\frac{d\dot{Q}_{conv}}{dx}$ é a transferência de calor por convecção.

$\frac{d\dot{Q}_{rad}}{dx}$ é a transferência de calor por radiação.

$\sum \dot{m}_{dif} * \left(h_g + \frac{V_{dif}^2}{2} \right)$ é a transferência de energia devido a difusão de massa para a zona.

Outras equações do modelo são obtidas através da teoria da evaporação transiente de gotas, da variação do diâmetro das gotas e da conservação da quantidade de movimento das gotas. Como visto abaixo, respectivamente.

$$\frac{dT_{F,l}}{dx} = \frac{(\dot{Q}_{rad,F,i} + \dot{Q}_{conv,F,i} - \dot{Q}_{v,F,i})}{dx} \quad (5)$$

$$\frac{dT_{Ox,l}}{dx} = \frac{(\dot{Q}_{rad,Ox,i} + \dot{Q}_{conv,Ox,i} - \dot{Q}_{v,Ox,i})}{dx} \quad (6)$$

$$\frac{dD_F}{dx} = - \left(\frac{2\dot{m}_{v,F}}{\pi \rho_{F,l} v_{d,F} D_F^2} + \frac{D_F}{3\rho_{F,l}} \frac{d\rho_{F,l}}{dT_{F,l}} \frac{dT_{F,l}}{dx} \right) \quad (7)$$

$$\frac{dD_{Ox}}{dx} = - \left(\frac{2\dot{m}_{v,Ox}}{\pi \rho_{Ox,l} v_{d,Ox} D_{Ox}^2} + \frac{D_{Ox}}{3\rho_{Ox,l}} \frac{d\rho_{Ox,l}}{dT_{Ox,l}} \frac{dT_{Ox,l}}{dx} \right) \quad (8)$$

$$\frac{dv_{d,F}}{dx} = \frac{3C_{D,F} \rho_g (v_g - v_{d,F}) [v_g - v_{d,F}]}{4\rho_{F,l} v_{d,F} D_F} \quad (9)$$

$$\frac{dv_{d,Ox}}{dx} = \frac{3C_{D,Ox} \rho_g (v_g - v_{d,Ox}) [v_g - v_{d,Ox}]}{4\rho_{Ox,l} v_{d,Ox} D_{Ox}} \quad (10)$$

As equações diferenciais para cada zona serão resolvidas através da função ODE15s do MATLAB por sua capacidade de integrar sistemas rígidos, isto é, com diferentes escalas de variação.

3. Resultados e Discussão

Um modelo numérico 1.5D para simulação de escoamentos multifásicos reativos em câmaras de combustão de propulsores bipropelentes encontra-se em desenvolvimento. A câmara foi dividida em elementos de volumes radiais, de formatos anelar e cilíndrico. Foram obtidas



equações de balanço de massa e de energia para escoamentos isobáricos unidimensionais de sprays bipropelentes em cada elemento de volume. Será simulada a refrigeração por filme nas paredes, a troca de calor radial entre os elementos de volume e entre estes e as paredes, o aquecimento transiente, dilatação térmica e a vaporização das gotas, bem como a mistura dos vapores de combustível com reação química rápida. Os resultados das simulações serão comparados a dados experimentais e a resultados do modelo de Valverde-Salvador (2004).

***Agradecimentos:** Os autores agradecem ao CAPES/ Brasil pela concessão de uma bolsa de estudos ao primeiro autor.*

Referências

- Ashgriz, N. Handbook of Atomization and Sprays: Theory and applications. London: Springer, 2011.
- Babinsky, E. and Sojka, P. Modeling drop size distributions. Progress in Energy and Combustion Science, v. 28, n. 4, p. 303–329, 2002.
- Desantes, J. M.; Pastor, J. V.; García-Oliver, J. M.; Pastor, J. M. A 1d model for the description of mixing-controlled reacting diesel sprays. Combustion and Flame, v. 156, n. 1, p. 234–249, 2009.
- Mugele, R.; Evans, H. D. Droplet size distributions in sprays. Ind. Eng. Chem, v. 43, n. 6, p. 1317–1324, 1951.
- Lefebvre, A. H. and McDonnell, V. G. Atomization and Sprays. New York: Taylor Francis and CRC Press,, 2017. 301 p.
- Pathak, A. and Raessi, M. Steady-state and transient solutions to drop evaporation in a finite domain: Alternative benchmarks to the d^2 law. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 127, n. A, p.1147– –1158, 2018.
- Valverde-Salvador, C. A. Modelo matemático de câmaras de combustão bipropelentes. 2004. 215 p. (INPE-11599-TDI/963). Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2004.