



2023
XXIX **CREEM**

Congresso Nacional de Estudantes de
Engenharia Mecânica

Goiânia - GO



XXIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
12 a 16 de Junho de 2023, Goiânia, Goiás, Brasil

Estudo numérico de uma câmara de combustão de motor foguete de 500N utilizando Etanol e LOX

Luiz Henrique Schaffazick, luiz.schaffazick@acad.ufsm.br¹
César Addis Valverde Salvador, valverde@ufsm.br²

¹Curso de Engenharia Aeroespacial, Universidade Federal de Santa Maria

²Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Maria

Resumo. Redução de emissões de gases de efeito estufa, menor impacto ambiental, segurança e independência energética são alguns dos motivos pelos quais nas últimas décadas vem se tornando cada vez mais presentes os estudos voltados à propulsão verde. Os propelentes verdes são alternativas mais limpas e sustentáveis aos propelentes químicos tradicionais, como aqueles que são baseados em hidrocarbonetos. Neste trabalho apresenta-se um estudo numérico de uma câmara de combustão de motor foguete de 500 N, que utiliza Etanol e LOX como propelentes. O modelo utilizado é 1D, em regime permanente e com o processo da combustão controlado pela vaporização das gotas, uma vez que as taxas de mistura e de reação na fase gasosa são consideradas rápidas em comparação às taxas de vaporização dos propelentes. Foi determinada a distância de vaporização completa para este par bipropelente, bem como a evolução do diâmetro das gotas, velocidade das gotas, temperatura do líquido, velocidade do gás, razão de equivalência e frações molares das espécies envolvidas, ao longo da câmara de combustão. Os resultados encontrados foram comparados com dados já disponíveis na literatura.

Palavras chave: Propelentes verdes, Modelagem, Etanol, Oxigênio, Câmara de Combustão ...

Abstract. Reduction of greenhouse gas emissions, less environmental impact, safety, and energy independence are some of the reasons why in the last decades the studies on green propulsion have become more and more present. Green propellants are cleaner and more sustainable alternatives to traditional chemical propellants, such as those based on hydrocarbons. In this paper, a numerical study of a 500 N rocket engine combustion chamber using ethanol and LOX as propellants is presented. The model used is 1D, steady-state and with the combustion process controlled by the vaporization of the droplets, since the mixing and reaction rates in the gas phase are considered to be fast compared to the vaporization rates of the propellants. The complete vaporization distance of this bipropellant pair was determined, as well as the evolution of droplet diameter, droplet velocity, liquid temperature, gas velocity, equivalence ratio and molar fractions of the species involved, along the combustion chamber. The results found were compared with data already available in the literature.

Keywords: Green propellants, Modeling, Ethanol, LOX, Combustion chamber...

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Sutton and Biblarz (2016), propulsão é o processo de mudança do estado de movimento ou repouso de um corpo em relação a um determinado referencial. Esse processo pode ser feito de diferentes maneiras, usando diferentes fontes de energia, por exemplo, energia das ligações químicas das moléculas, eletricidade armazenada em baterias ou de painéis solares, energia nuclear, entre outros. Na propulsão química, a energia é provida das ligações químicas das moléculas de propelentes, no caso, o combustível e o oxidante. A reação química entre os propelentes transforma a energia contida nas ligações químicas das moléculas dos propelentes em energia cinética da matéria ejetada.

Se tratando de propelentes líquidos, os sistemas bipropelentes são os mais utilizados em lançadores devido ao fato de fornecerem empuxos elevados e um ótimo controle de queima. Sua configuração padrão consiste em dois tanques separados, para o armazenamento do combustível e do oxidante, e a câmara de combustão, que é o local onde ocorre a vaporização, mistura e queima dos propelentes injetados. Ademais, esta configuração permite também a inclusão de diversos sistemas e dispositivos secundários, tais como bombas, turbinas, compressores, válvulas, etc. Muitos propelentes, chamados hipergólicos, entram em combustão espontânea quando colocados em contato, o que simplifica o sistema de partida, já que a ignição ocorre de forma natural. Já os propelentes que não são hipergólicos necessitam de um sistema de ignição separado, comumente acoplado na entrada da câmara (Mishra, 2017).

A maioria dos propelentes, normalmente usados em foguetes, são altamente tóxicos e estão sujeitos a rigorosas precauções de segurança. Assim, torna-se desejável a substituição desses propelentes por uma alternativa "verde". As principais vantagens são um impacto ambiental mínimo e procedimentos de manuseio relativamente simples, ambas conduzindo a

custos menores.

Gottmann (2015) descreve a importância do uso de pares verdes como substitutos das hidrazinas, consideradas altamente tóxicas, e destaca o par Etanol/LOX como uma das alternativas viáveis nessas migrações, devido a sua baixa toxicidade e disponibilidade. Ademais, comenta que, por mais que nos últimos anos estudos na área da propulsão verde vem ganhando lugar nas pesquisas, o uso de Etanol associado ao oxigênio líquido como propelente para foguetes não é novidade. Pode-se citar, por exemplo, o foguete V2 utilizado pelos alemães na Segunda Guerra Mundial.

Bach *et al.* (2016) construíram um motor de 500 N usando Etanol/LOX. O projeto faz parte do *SMART Rocket Projects*, um programa educacional voltado para as universidades. No trabalho foram discutidos métodos para melhorar a segurança no manuseio de motores foguete, quando se trabalha com este par bipropelente. Eles também realizaram testes com um motor de Etanol/LOX de 700 N de empuxo. Ambos motores foram testados, comparados e seus resultados publicados.

Sieder *et al.* (2017) realizaram estudos de testes estáticos e de voo para um propulsor de 500 N, usando Etanol/LOX. No trabalho descreveram as aplicações deste motor construído. Entre seus resultados apresentados estão: empuxo, impulso específico, velocidade característica e geometria da câmara, entre outros.

Mota *et al.* (2018), desenvolveram o propulsor L75, de 75 kN no Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE). O IAE junto ao *German Aerospace Center* (DLR) trabalharam no motor L75 para que seja usado no estágio superior do veículo lançador brasileiro, VLS-1. A ideia era substituir os dois últimos estágios sólidos do foguete por um único estágio, utilizando Etanol e LOX.

Mayer and Wieling (2018), demonstraram que, os combustíveis verdes têm um impacto menor sobre o meio ambiente do que os combustíveis fósseis tradicionais, como gasolina e diesel. A aplicação e o desenvolvimento dos propelentes verdes têm aumentado nas últimas décadas, tendo em vista a busca por reduções de custos, de riscos de armazenamento e operação, de impacto ambiental e de prejuízos à saúde humana. Cada vez mais projetos como o GRASP (*Green Advanced Space Propulsion*) (Scharlemann, 2011) e o GPIM (*Green Propellant Infusion Mission*) (McLean, 2013) estão surgindo e dando cada vez mais espaço para as pesquisas relacionadas à uma propulsão verde.

O presente trabalho utiliza o modelo numérico 1D desenvolvido por Valverde-Salvador (2004), para a simulação de uma câmara de combustão de motor foguete de 500 N, que utiliza uma mistura de Etanol e LOX como propelentes. Foi determinada a distância de vaporização completa para este par bipropelente, bem como a evolução do diâmetro, velocidade e temperatura das gotas, velocidade e temperatura do gás, razão de equivalência e frações molares dos produtos, ao longo da câmara de combustão.

O modelo utilizado permite determinar de forma qualitativa os efeitos da pressão e de outras variáveis nos comprimentos de vaporização de sprays de Etanol e LOX. Em geral, o projeto das câmaras de combustão de foguetes é baseado em comprimentos característicos, L^* = volume da câmara/área da garganta, derivados de dados experimentais.

Uma característica principal do modelo utilizado é a capacidade de determinar um número apropriado de parcelas de gotas usando a função de distribuição de Rosin-Rammler, permitindo assim obter uma estimativa razoável do comprimento de vaporização de um spray bipropelente para várias condições. O modelo também considera propriedades termodinâmicas variáveis, como calores de vaporização de gotículas dependentes de pressão e temperatura. Isso aumenta a precisão do modelo em comparação com outros modelos, mesmo em pressões supercríticas. O software foi escrito na linguagem MATLAB 6.5 com uma interface simples e versátil que pode ser utilizada para qualquer combinação de propelentes líquidos com propriedades termodinâmicas e de transporte conhecidas.

2. METODOLOGIA

Para as simulações, foi utilizado o modelo matemático desenvolvido por Valverde-Salvador (2004), o qual considera que a reação química seja mais rápida que a vaporização das gotas, de forma que os vapores dos propelentes se misturam e sua reação ocorra instantaneamente. Consequentemente, o processo de combustão é controlado pela vaporização das gotas.

De forma simplificada, o funcionamento se dá pela injeção dos propelentes na câmara na forma de jatos líquidos, que imediatamente se transformam em gotas, se dilatam, vaporizam e se misturam com os produtos da combustão. A mistura derivada queima e forma novos produtos alterando a composição local. A pressão é admitida como uniforme, entretanto a temperatura dos gases varia ao longo da câmara devido a razão de equivalência da mistura. Os gases e as gotas apresentam velocidades diferentes inicialmente, porém à medida em que ocorre a vaporização das gotas a velocidade relativa gás-gota tende para zero.

2.1 Modelo Matemático

Um esquema do processo reativo dentro de uma câmara de combustão bipropelente é apresentado na Fig. 1. O modelo considera nuvens de sprays injetados através de uma placa injetora para dentro da câmara de combustão, na forma de parcelas de gotas esféricas. Cada parcela inclui gotas dentro de uma faixa de diâmetros entrando na câmara de combustão. As faixas de diâmetros têm igual largura, por exemplo: 0-35, 35-70, 70-105, 105-140 μm . A distribuição de tamanhos das gotas de combustível e de oxidante, no spray, e descrita por funções de distribuição de Rosin-Rammler

cujos parâmetros podem ser obtidos experimentalmente e variam com o tipo de injetor.

Admite-se que 10% do total de combustível e oxidante são injetados como gases, para criar um fluxo gasoso próximo à placa de injeção, correspondendo a fluxos recirculantes em sistemas reais. Vários fatores, como recirculação de gás, altas velocidades de gás, configuração de injeção, geometria da câmara, impacto de jatos de líquido e fluxo com diferentes velocidades de fase produzem mistura turbulenta intensa, o que torna as taxas de vaporização das gotas um fator de controle. O modelo também leva em consideração a vaporização transiente, conforme metodologia apresentada por Lefebvre and McDonell (2017).

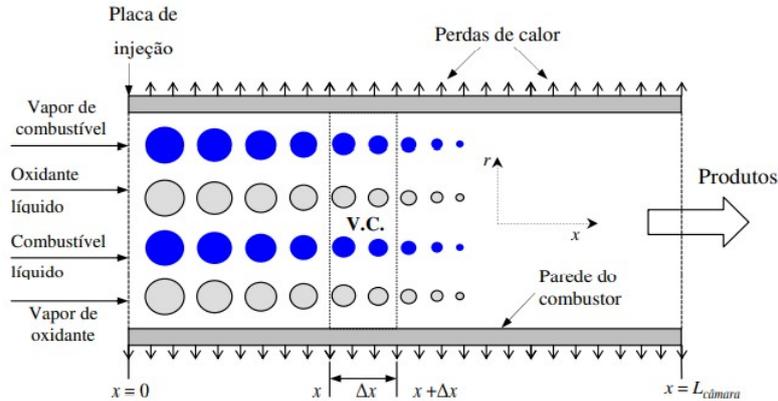


Figura 1. Esquema do processo de vaporização e queima unidimensional em uma câmara de combustão bipropelente

Como a mistura turbulenta e a combustão são rápidas comparadas à vaporização, a composição do gás é calculada em cada seção para um processo de equilíbrio a pressão e temperatura constantes, porém, considerando a transferência de calor da mistura de gases para as paredes da câmara e para as gotas.

A vaporização das gotas durante a fase transiente pode ser significativa e depende das propriedades termodinâmicas da mistura gasosa. A expansão térmica da gota é considerada durante a fase de aquecimento até que a gota atinja uma temperatura de equilíbrio, ou temperatura de “bulbo úmido”, quando o diâmetro da gota começa a diminuir continuamente.

2.2 Distribuição do tamanho das gotas

A função de distribuição Rosin–Rammler foi adotada para descrever a distribuição dos diâmetros das gotas. Este pode ser escrito em termos da fração de volume acumulada, (Chin and Lefebvre, 1983),

$$Q = 1 - \exp[-(D/X)^q] \quad (1)$$

onde Q é a fração de volume do spray contendo gotas de diâmetro menor que D , e q e X são constantes. O parâmetro q mede a uniformidade do spray, quando q aumenta o spray torna-se mais uniforme, e se q for infinito, então todas as gotas possuem o mesmo diâmetro. Segundo Lefebvre (1989), na maioria dos sprays q está entre 1,5 e 4. A constante X representa o diâmetro característico do spray que depende do problema considerado. Para aplicações de combustão, X está ligado ao parâmetro q pela relação, Lefebvre (1989):

$$X = D_{32}[\Gamma(1 - 1/q)] \quad (2)$$

onde Γ é a função gama e D_{32} é o diâmetro médio de Sauter (SMD), definido por:

$$D_{32} = \frac{\sum N_k D_k^3}{\sum N_k D_k^2} \quad (3)$$

onde N_k é o número de gotas com diâmetro D_k no spray. O SMD representa um diâmetro médio de gota, proporcional à razão entre o volume total e a área de superfície total de todas as gotas de spray, e seu valor depende do tipo de injetor, das propriedades do líquido e das condições de saída do spray.

Substituindo a equação (2) em (1) resulta,

$$Q = 1 - \exp[-\Gamma(1 - 1/q)^{-q}(D/D_{32})^q] \quad (4)$$

Esta expressão representa a distribuição de tamanho de gotas em um spray, para constantes q e D_{32} especificadas como condição inicial.

No presente modelo, um número finito de parcelas ou classes de gotas é considerado. Cada parcela inclui gotas dentro de um determinado intervalo de diâmetros, por exemplo, na Fig.2(a) as 4 parcelas de gotas encontradas no spray são,

0–35, 35–70, 70–105 e 105–140 μm . Para simplificar a análise, cada parcela é caracterizada por um SMD representativo. O procedimento para obter o SMD representativo de uma parcela de tamanho de gota é descrito em Valverde-Salvador (2004). Um diâmetro máximo de gota, D_{max} , é calculado para as diferentes distribuições de Rosin-Rammler, do combustível e do oxidante, acima das quais a porcentagem de volume do propelente é inferior a 0,1%. Portanto, gotas com diâmetro maior que D_{max} não são consideradas.

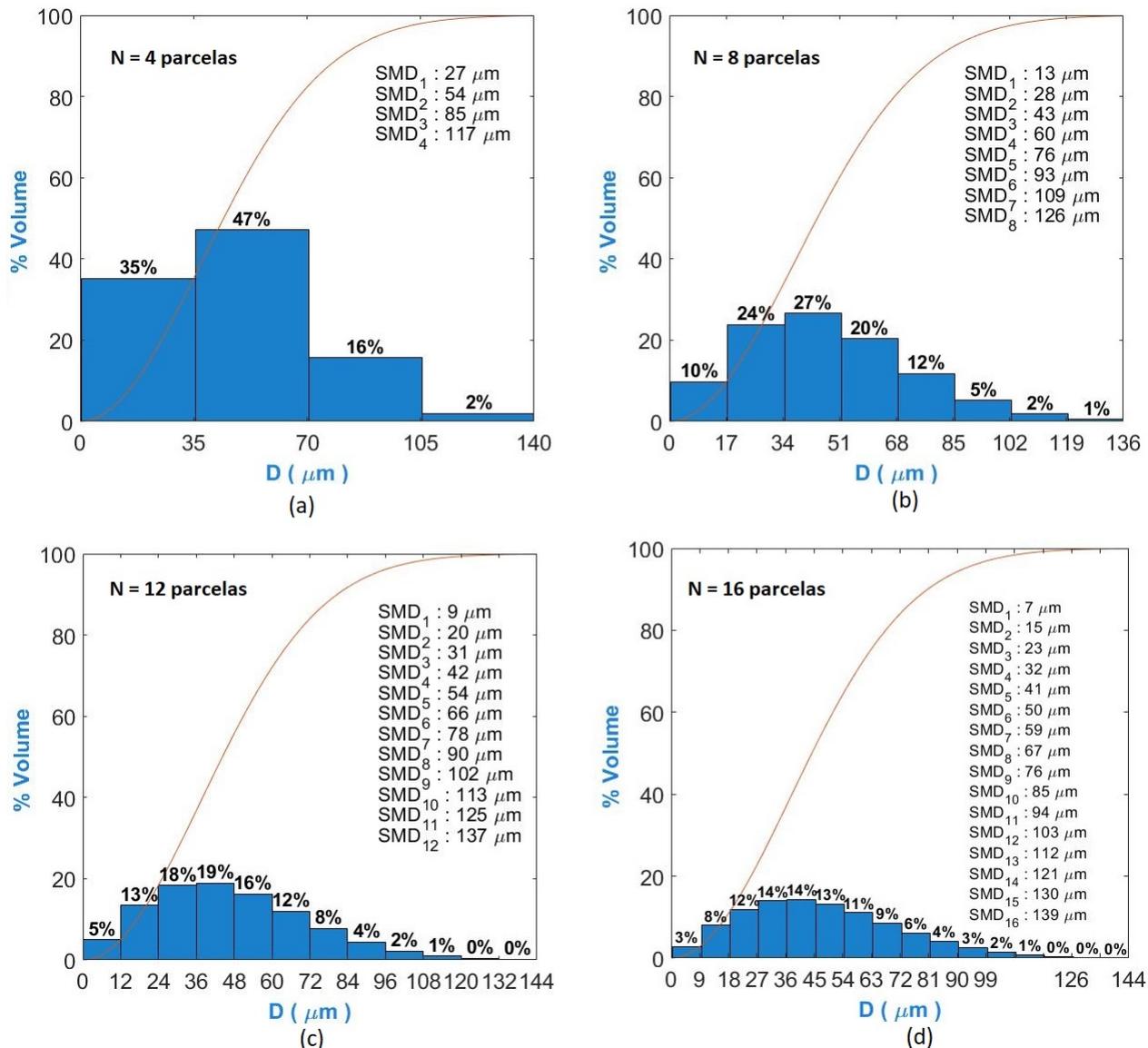


Figura 2. Influência do número de parcelas de gotas na função de distribuição de Rosin-Rammler. (a) $N = 4$ parcelas; (b) $N = 8$ parcelas; (c) $N = 12$ parcelas; (d) $N = 16$ parcelas.

A Figura 2 mostra a influência do número de parcelas de gotas na distribuição de Rosin-Rammler, para $D_{32} = 30 \mu\text{m}$ e $q = 2$, usando Etanol e LOX. Nota-se que um aumento no número de parcelas, para representar a distribuição de diâmetros, pode produzir resultados mais precisos, visto que há uma melhor distribuição dos diâmetros de gotas analisados. No entanto, deve-se considerar que um aumento do número de parcelas aumenta também o tempo de computação.

Na Fig.2(a), por exemplo, mostra-se a distribuição de tamanho das gotas para um total de 4 parcelas, nota-se que, 47% do volume total do spray está formado por gotas de diâmetros compreendidos entre 35-70 μm . Já para a parcela de menor volume, em torno de 2%, as gotas estão distribuídas entre 105-140 μm . Para este caso, como 4 parcelas de gotas de igual volume foram consideradas, os diâmetros representativos de cada volume são, respectivamente: 27, 54, 85 e 117 μm . Em outras palavras, a gota de 27 μm irá representar todas as gotas compreendidas entre 1 e 35 μm , e assim em diante para as demais parcelas.

Já na Fig.2(d), por exemplo, que é o caso de 16 parcelas de gotas distribuídas no spray, pode-se concluir que, quanto maior o número de parcelas adotada maior será a precisão na distribuição dos tamanhos das gotas e mais suave será a curva encontrada, se comparada a uma distribuição com 4 parcelas, por exemplo. Nota-se que os dois maiores volumes

encontrados, ambos de 14% estão representados por gotas entre 27-36 e 37-45 μm , respectivamente. Também pode-se observar que gotas acima de 99 μm possuem um volume inferior a 2 %, podendo, na maioria das vezes, serem desconsideradas no cálculo numérico. Valverde-Salvador (2004) mostrou em seus resultados que, ao considerar acima de 12 parcelas já era possível obter resultados com precisão razoável.

2.3 Sistema bipropelente simulado

Neste trabalho, como combustível foi escolhido o Etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) e como oxidante o LOX (O_2). A escolha de ambos se da pela premissa do trabalho que é focada em propelentes verdes. Como principais razões para a utilização deste par, é possível destacar: (a) alto impulso específico, (b) reações químicas "verdes", (c) o oxigênio é fácil de encontrar porque é altamente abundante em nossa atmosfera e em nossos oceanos, (d) armazenabilidade, versatilidade e menos tóxico quando comparado a outros pares.

2.4 Dimensões da câmara de combustão

Os dados considerados na simulação, para a mistura composta por Etanol e LOX, são os mesmos utilizados por Sieder *et al.* (2017), entre eles: comprimento e diâmetro da câmara, $L_c = 115 \text{ mm}$ e $D_c = 65 \text{ mm}$, respectivamente; pressão interna da câmara, $P_c = 15 \text{ atm}$; temperatura de entrada do combustível e do oxidante, $T_{F_o} = 300 \text{ K}$ e $T_{O_o} = 90 \text{ K}$, respectivamente; razão de oxidante/combustível, $f_x = 1$; vazões de combustível e de oxidante de 0,125 kg/s, empuxo, $F = 500 \text{ N}$; impulso específico, $I_s = 205 \text{ s}$; comprimento característico da câmara, $L^* = 1,5$ e diâmetro da garganta, $D_t = 18 \text{ mm}$.

Entre outros dados de entrada, foram adotados, no presente trabalho, 6 parcelas de gotas para cada um dos propelentes e parâmetros de Rosin-Rammler, $D_{32} = 30 \mu\text{m}$ e $q = 2$, tanto para o combustível quanto para o oxidante.

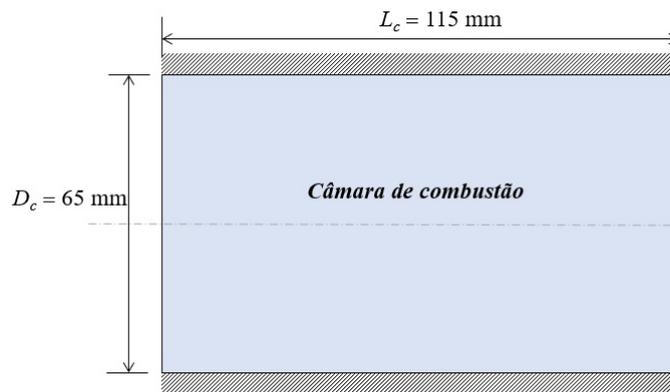


Figura 3. Esquema simplificado de uma câmara de combustão cilíndrica.

2.5 Produtos da combustão

Os produtos da combustão incluem 11 espécies, 6 espécies principais: CO_2 , CO , H_2O , H_2 , O_2 e N_2 e 5 espécies secundárias: H , OH , O , NO e N . Outras espécies secundárias poderiam ter sido consideradas, por exemplo, HO_2 , H_2O_2 , etc., porém verifica-se que a concentração delas é muito baixa em relação às outras 11 espécies consideradas.

3. RESULTADOS

Um dos principais parâmetros para o dimensionamento da câmara é a distancia de vaporização completa, pois ela influencia diretamente na eficiência de combustão.

Na Figura 4(a) mostra-se a variação do diâmetro adimensional da gota, D/D_0 , ao longo da câmara de combustão para 6 parcelas de gotas, tanto para o combustível quanto para o oxidante. Nota-se que, as gotas de combustível vaporizam completamente a uma distância de 86 mm da entrada da câmara, enquanto gotas de oxidante vaporizam completamente a uma distância de 34 mm, isto quando comparadas as gotas de maior diâmetro, de 124 μm . Observa-se que para gotas do mesmo tamanho, a gota de oxidante vaporiza mais rapidamente. Na prática a taxa de vaporização do LOX é maior do que a do Etanol, Sieder *et al.* (2017). Isto poderia ser resolvido adotando um D_{32} maior para o oxidante, por exemplo 50 μm , no lugar de 30 μm , pois gotas maiores demoram mais tempo para vaporizar. Na prática, isto seria equivalente a construir uma placa injetora de LOX, com canais de saída de diâmetro maior, se comparada com a placa injetora de Etanol.

Isto pode ser melhor visualizado na Fig. 4(b), onde foi considerado $D_{32} = 50 \mu\text{m}$ para o oxidante, mantendo-se $D_{32} = 30 \mu\text{m}$ para o combustível. Nesta figura, observa-se que não houve alteração significativa na distância de

vaporização completa das gotas de combustível, e os diâmetros das gotas são os mesmos do que na Fig. 4(a). Já nas gotas de oxidante, a distribuição de tamanhos foi alterada. Assim, as gotas maiores, de $210 \mu\text{m}$, vaporizam completamente na mesma distância das gotas maiores de combustível, de $124 \mu\text{m}$.

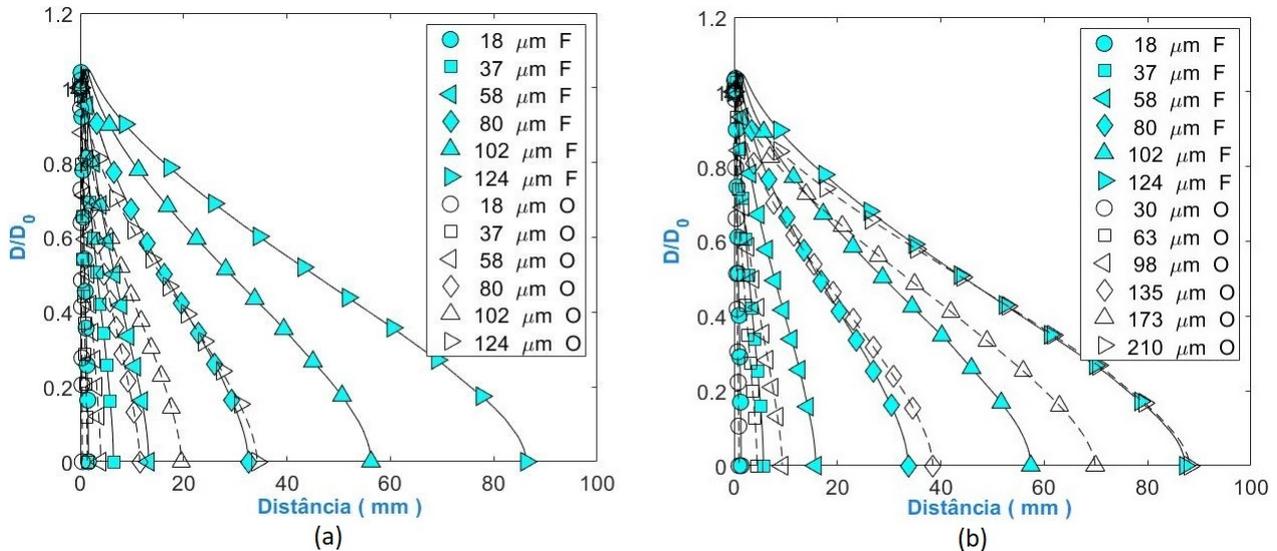


Figura 4. Variação do diâmetro adimensional das gotas para $N = 6$ parcelas, $q = 2$, e $D_{32} = 30 \mu\text{m}$ para o combustível (a) $D_{32} = 30 \mu\text{m}$ para o oxidante; (b) $D_{32} = 50 \mu\text{m}$ para o oxidante

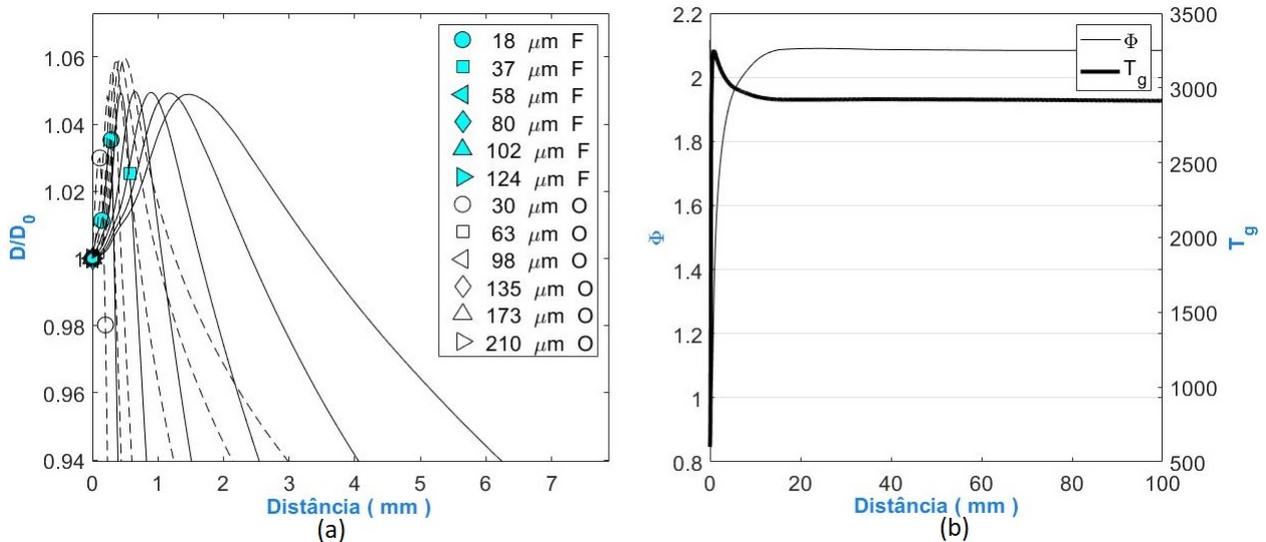


Figura 5. (a) Vista ampliada do diâmetro adimensional das gotas, mostrando detalhes da região de expansão; (b) Evolução da razão de equivalência e da temperatura do gás, ao longo da câmara de combustão.

Outro detalhe importante observado, a respeito da vaporização das gotas, é mostrado na Fig. 5(a). Observe que, no período transiente ou de pré-aquecimento, ocorre a expansão das gotas por dilatação térmica. Tal período aumenta quando aumenta a pressão e diminui quanto aumenta a temperatura, o que foi também comprovado anteriormente por Chin and Lefebvre (1983). Note que o período de dilatação das gotas de oxidante é bem menor do que a do combustível, devendo-se principalmente à temperatura de entrada do LOX, que é muito menor do que a do Etanol, por ser um propelente criogênico.

Já na Figura 5(b) mostram-se os perfis de temperatura e de razão de equivalência dos gases na câmara (produtos da combustão). A temperatura do gás aumenta de 600 K na entrada até atingir a temperatura máxima de 3231 K , quando a razão de equivalência é aproximadamente $\phi = 1,26$. A temperatura de chama adiabática para esta mistura a 15 bar e temperatura dos reagentes de 600 K , é $T_{ad} = 3380 \text{ K}$. A razão de mistura estequiométrica O/C, para este par bipropelente, é $f_s = 2,084$, no entanto o motor proposto por Sieder *et al.* (2017) opera em $f_x = 1$. Nestas condições, as reações de mistura e queima, ao longo da câmara, ocorrem com excesso de combustível, resultando em uma razão de equivalência elevada durante todo o processo de combustão. Ademais, a distância onde o gás atinge T_{max} é cerca de 3 mm a partir da entrada do combustor. Na maioria dos propulsores pequenos, sem refrigeração regenerativa, utiliza-se uma cortina

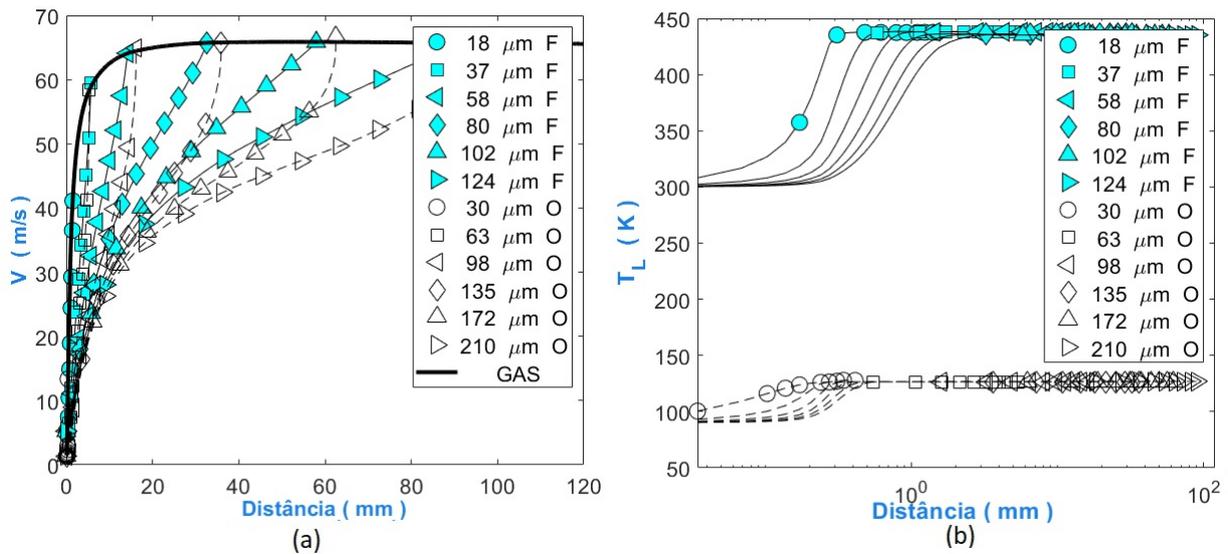


Figura 6. (a) Velocidade das gotas e do escoamento gasoso, ao longo da câmara de combustão; (b) Evolução da temperatura do líquido, ao longo da câmara de combustão

de proteção ou camada de propelente líquido junto à parede a fim de diminuir a temperatura da parede e evitar que esta ultrapasse os limites de temperatura que causam a ruptura do material.

A Figura 6(a) mostra a variação da velocidade das gotas do combustível e do oxidante, com diversos diâmetros iniciais. As velocidades de entrada do combustível e do oxidante líquidos são: $v_F = 5,2$ m/s e $v_O = 1,31$ m/s, respectivamente. A velocidade do gás na entrada é $v_g = 1,41$ m/s e a velocidade máxima atingida pelo gás e pelas gotas é $v_{g,max} = 66$ m/s, a 88 mm da entrada a câmara. A velocidade das gotas aumenta até a velocidade do gás devido à força de arrasto do gás sobre as gotas.

A Figura 6(b) mostra a variação de temperatura das gotas de combustível e de oxidante, com valores na entrada $T_F = 300$ K e $T_O = 90$ K. As temperaturas das gotas aumentam até atingirem a temperatura de equilíbrio (equivalente à uma temperatura de bulbo úmido) na pressão da câmara, indicando o fim do período transiente ou de pré-aquecimento. Como a pressão da câmara é de 15 atm a temperatura de equilíbrio para o combustível é de 439 K e para o oxidante é de 126 K. As gotas de combustível menores, de 18 μm , alcançam a temperatura de bulbo úmido a 1 mm da entrada da câmara, enquanto as gotas de diâmetro maior, de 124 μm , a 6 mm de distância.

Nas Figuras 7(a) e 7(b) são mostradas as variações dos produtos da combustão das espécies principais e secundárias, respectivamente. Nota-se a formação de uma grande quantidade H_2O e CO_2 próximo da entrada, devido à reação entre o Etanol e o LOX. Já a formação de O_2 é insignificante, isto porque o oxigênio reage completamente com o etanol formando água e dióxido de carbono. Na Fig. 7(b), por outro lado, nota-se a formação de moléculas de O, H e OH, alcançando valores máximos a uma distância de 10 mm da entrada da câmara.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo numérico de uma câmara de combustão de foguete de 500 N, usando o modelo 1D desenvolvido por Valverde-Salvador (2004). Os dados de entrada, considerados no modelo, foram extraídos do trabalho de Sieder *et al.* (2017). Foi encontrado que a vaporização completa das gotas ocorre cerca de 90 mm, um valor muito próximo do comprimento da câmara projetada, que foi de 110 mm. A função de distribuição de Rosin-Rammler foi usada para descrever a distribuição de tamanho de gotas na câmara de combustão, adotando-se um total de 6 parcelas de gotas na entrada, tanto para o combustível quanto para o oxidante.

O diâmetro adimensional das gotas, a velocidade das gotas, a temperatura do líquido, a razão de equivalência, a temperatura e a velocidade do gás, foram apresentadas e analisadas.

Observou-se, que a distância de vaporização completa é um parâmetro importante para o dimensionamento da câmara de combustão, isto porque, um correto dimensionamento da câmara permite que todas as gotas vaporizem completamente antes de entrar no bocal, evitando assim uma queda no desempenho do motor. Foi encontrado que um aumento no D_{32} do oxidante permitiria gerar gotas com diâmetros maiores, aumentando a distância de vaporização do oxidante. Desta forma, o vapor de combustível poderia reagir e queimar completamente dentro da câmara, evitando a formação de fuligem, muito comum em misturas ricas.

Encontrou-se que o tamanho da região de expansão da gota depende, além da pressão, da temperatura inicial. Isto

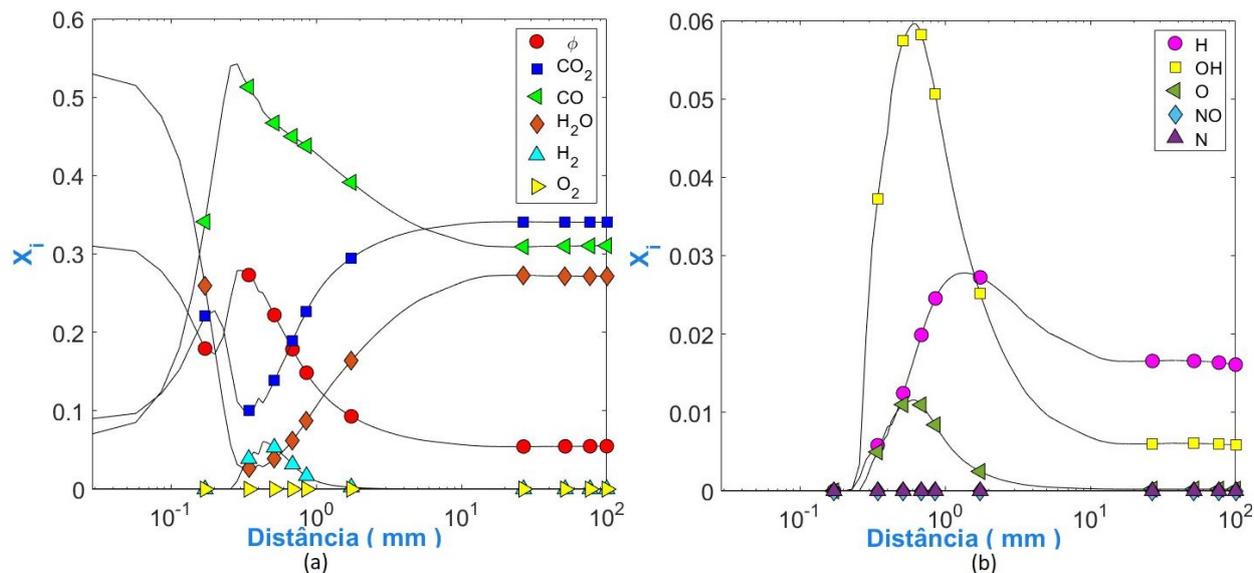


Figura 7. Variação das frações molares dos produtos (a) CO₂, CO, H₂O, H₂, O₂ e N₂; (b) H, OH, O, NO e N

porque, quanto mais próxima for a temperatura de entrada do líquido da temperatura crítica, menor é a duração do período de aquecimento. O período de pré-aquecimento é menor para as gotas de oxidante, do que para o combustível, devido à sua temperatura de entrada mais baixa. Ademais, observa-se que modelos de combustão de sprays devem incluir o período de pré-aquecimento devido à significativa quantidade de massa vaporizada nessa fase.

A composição dos produtos da combustão das espécies encontradas mostram que, de fato, o par Etanol/LOX é um bipropelente verde, apresentando baixa toxicidade e um reduzido impacto ambiental.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) e ao Curso de Engenharia Aeroespacial da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Bach, C., Sieder, J., Weig, F. and Tajmar, M., 2016. "Design boundaries of a liquid-fuelled propulsion system for a 500 n sounding rocket". In *67th International Astronautical Congress, Mexico*.
- Chin, J. and Lefebvre, A., 1983. "Steady-state evaporation characteristics of hydrocarbon fuel drops". *AIAA journal*, Vol. 21, No. 10, pp. 1437–1443.
- Gottmann, C. A., A.W.F.R.J.A.F.F.I.K.G.R.F.B., 2015. "Liquid rocket propellants: Ethanol as fuel".
- Lefebvre, A.H. and McDonell, V.G., 2017. *Atomization and sprays*. CRC press.
- Mayer, A. and Wieling, W., 2018. "Green propulsion research at tno the netherlands". *Transactions on aerospace research*.
- McLean, C.H., 2013. "Green propellant infusion mission program overview". In *49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, p. 3847.
- Mishra, D., 2017. *Fundamentals of rocket propulsion*. CRC Press.
- Mota, F.A.d.S., Hinckel, J.N., Rocco, E.M. and Schlingloff, H., 2018. "Modeling and analysis of a lox/ethanol liquid rocket engine". *Journal of Aerospace Technology and Management*, Vol. 10.
- Scharlemann, C., 2011. "Green advanced space propulsion-a project status". In *47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*. p. 5630.
- Sieder, J., Kleebusch, K., Bach, C. and Tajmar, M., 2017. "Development history and verification of the flight model of a 500 n ethanol/lox rocket engine".
- Sutton, G.P. and Biblarz, O., 2016. *Rocket propulsion elements*. John Wiley & Sons.
- Valverde-Salvador, C.A., 2004. *Modelo matemático de câmaras de combustão bipropelentes*. Ph.D. thesis, Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais . . .

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.