

DESEMPENHO DE N₂H₄, MMH E UDMH EM CÂMARAS DE COMBUSTÃO DE FOGUETES

Cesar Addis Valverde Salvador

Laboratório Associado de Combustão e Propulsão, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Rodovia Presidente Dutra, Km 40, Cachoeira Paulista, São Paulo, Brasil
cesalvador@lcp.inpe.br

Fernando de Souza Costa

Laboratório Associado de Combustão e Propulsão, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Rodovia Presidente Dutra, Km 40, Cachoeira Paulista, São Paulo, Brasil
fernando@lcp.inpe.br

Resumo. Neste trabalho comparam-se os desempenhos de N₂H₄, MMH e UDMH queimando com N₂O₄ (NTO) em uma câmara de combustão de foguete. Considerou-se um propulsor bipropelente com diâmetro de câmara 40 mm, vazão mássica total de 40 g/s e razão de mistura combustível/oxidante de 40 % em massa. Os resultados foram obtidos a partir do modelo matemático desenvolvido por Valverde e Costa (2004). Admite-se um processo de combustão controlado pela vaporização das gotas dos propelentes, seguindo distribuições de tamanhos baseadas no modelo de Rosin-Rammler, e considerando-se o efeito do arrasto, do pré-aquecimento, da dilatação térmica das gotas e das perdas de calor por convecção e radiação do gás para as gotas e paredes. Foram comparadas as influências da pressão interna da câmara, da razão de equivalência, da temperatura do gás na entrada, do número de parcelas ou classes de tamanhos de gotas, do parâmetro q de Rosin-Rammler e do diâmetro médio de Sauter sobre a distância de vaporização completa. São apresentados os perfis do diâmetro adimensional, da temperatura, da velocidade, da taxa de vaporização das gotas, perdas de calor e de outras propriedades do escoamento ao longo da câmara. Resultados para sistemas multipropelentes, usando misturas N₂H₄/UDMH e N₂H₄/MMH com N₂O₄, são também apresentados.

Palavras chave: bipropelente, N₂H₄, MMH, UDMH, NTO, foguete, câmara de combustão.

1. Introdução

Sistemas bipropelentes líquidos são os mais comumente utilizados em câmaras de combustão de foguetes lançadores por fornecerem impulsos específicos elevados e maior segurança no controle do empuxo do que os propelentes sólidos. Dois propelentes diferentes, um oxidante e um combustível, são armazenados em reservatórios separados e posteriormente misturados dentro da câmara de combustão. Alguns pares de propelentes reagem espontaneamente por contato após a mistura, sendo por isso chamados de pares hipergólicos, enquanto outros bipropelentes requerem a utilização de dispositivos de ignição, como ignitores pirotécnicos e ignitores por centelha elétrica. Exemplos de oxidantes usados em foguetes são O₂, N₂O₄, F₂, HNO₃ e H₂O₂, e de combustíveis são N₂H₄ (hidrazina), UDMH (dimetil-hidrazina-assimétrica), MMH (monometil-hidrazina) e JP-4 (querosene).

A hidrazina e seus derivados (UDMH e MMH) e o tetróxido de nitrogênio (NTO) formam pares hipergólicos, apresentando uma boa performance quando comparada a outros combustíveis comuns. Podem ser utilizados em lançadores ou em motores de controle de atitude e de manobras orbitais que precisam ser reiniciados freqüentemente.

Misturas de hidrazina e de seus derivados (N₂H₄/UDMH e N₂H₄/MMH) queimando com NTO são bastante utilizadas. O UDMH é mais estável do que o N₂H₄ e o MMH, particularmente em altas temperaturas, porém fornece um impulso específico menor. O MMH tem uma melhor resistência a choque, melhores propriedades térmicas e maior faixa de temperatura na fase líquida do que a hidrazina.

Em propulsores com resfriamento regenerativo, empregando hidrazina ou misturas de seus derivados, pode-se utilizar aditivos a fim de reduzir o seu ponto de congelamento e aumentar a troca de calor nas paredes da câmara e evitar o congelamento do líquido nos dutos. Utilizam-se misturas de hidrazina com UDMH, chamadas de Aerozinas, em uma proporção de 50 a 70 % em massa de N₂H₄, para diminuir o ponto de congelamento da hidrazina. Propriedades e aplicações da hidrazina e de seus derivados são apresentadas por Schmidt (1984).

Valverde e Costa (2004) e Valverde (2004) desenvolveram um modelo matemático unidimensional de câmaras de combustão bipropelentes líquidos onde o processo de combustão é controlado pela vaporização das gotas, ou seja, os processos de queima e mistura turbulenta são mais rápidos que a taxa de vaporização das gotas dos propelentes. O modelo considera o arrasto sobre as gotas, convecção e radiação sobre as gotas e as paredes da câmara, distribuições de tamanhos de gotas seguindo o modelo de Rosin-Rammler, pré-aquecimento e dilatação térmica das gotas, propriedades variáveis e equilíbrio químico local.

Este modelo é utilizado para comparar o desempenho de hidrazinas e de misturas de hidrazinas queimando com NTO. São analisadas as influências da pressão interna da câmara, da razão de equivalência, da temperatura dos gases na entrada da câmara, do número de parcelas ou classes de tamanho de gotas, do parâmetro q de Rosin-Rammler e do

diâmetro médio de Sauter sobre a distância de vaporização completa das gotas. São apresentados os perfis do diâmetro adimensional, da temperatura, da velocidade, da taxa de vaporização das gotas, perdas de calor e de outras propriedades do escoamento ao longo da câmara.

2. Sistemas bipropelentes simulados

Serão comparados e analisados os sistemas bipropelentes MMH/N₂O₄, N₂H₄/N₂O₄ e UDMH/N₂O₄.

Os parâmetros na entrada da câmara de combustão são:

Comprimento da câmara: $L_c = 80$ mm.

Diâmetro da câmara: $D_c = 40$ mm.

Área total de injeção dos propelentes: Combustível: $A_{F,l,0} = 15$ mm²; Oxidante: $A_{Ox,l,0} = 35$ mm².

Temperaturas de entrada dos propelentes líquidos: Combustível: $T_{F,l,0} = 300$ K; Oxidante: $T_{Ox,l,0} = 300$ K.

Temperatura do gás na entrada: $T_{g,0} = 800$ K.

Espessura da parede da câmara: $t_w = 3$ mm. Adota-se uma câmara de combustão com parede de Inconel 600.

Temperatura do ambiente externo à câmara: $T_\infty = 300$ K. Admite-se que o propulsor seja testado em vácuo e, portanto, não existe transferência de calor por convecção da parede para o exterior, apenas por radiação.

Vazão de massa dos propelentes: A vazão total de massa dos propelentes é de 40 g/s, tendo razão de mistura (comb./oxid.) de 40 % em massa, com vazão de combustível $\dot{m}_{F,0} = 11,43$ g/s e de oxidante $\dot{m}_{Ox,0} = 28,57$ g/s.

Considera-se que frações fixas das vazões iniciais de cada propelente líquido, $\dot{m}_{Ox,g,0} = 0,1\dot{m}_{Ox,0}$ e $\dot{m}_{F,g,0} = 0,85\dot{m}_{Ox,g,0}$, vaporizam instantaneamente ao entrar na câmara, originando um escoamento de gases pré-misturados junto à placa injetora, o que corresponde ao efeito da recirculação dos gases na câmara.

Parâmetros de Rosin-Rammler: Os parâmetros de Rosin-Rammler, $D_{32} = 50$ μm e $q = 2,5$, são os mesmos para todos os sistemas bipropelentes estudados.

3. Sistemas multipropelentes simulados

Devido à falta de dados termodinâmicos completos para as misturas de hidrazinas, elas são simuladas considerando-se os propelentes injetados separadamente.

Os resultados apresentados mostram a influência da percentagem em massa de N₂H₄ nas misturas N₂H₄-UDMH e N₂H₄-MMH sobre a distância de vaporização completa das gotas, x_{vap} .

Os dados e as condições de entrada usadas como padrão nos cálculos são apresentados na Tabela 1. Em casos específicos outros valores são usados e são mencionados no texto ou nas legendas das figuras.

Tabela 1. Dados para a simulação de câmaras de combustão multipropelentes.

$D_c = 40$ mm	$D_{32} = 50$ μm
$T_{F1,l,0} = T_{F2,l,0} = T_{Ox,l,0} = 280$ K	$q = 2,5$
$T_{g,0} = 800$ K	$N = 4$ classes
$A_{F1,l,0} = A_{F2,l,0} = 10$ mm ²	$t_w = 3$ mm
$\dot{m}_{F,l,0} = 30$ g/s	$\dot{m}_{Ox,g,0} = 0,1\dot{m}_{Ox,l,0} = 5$ g/s
$\dot{m}_{Ox,l,0} = 50$ g/s	$\dot{m}_{F,g,0} = 0,85\dot{m}_{Ox,g,0} = 4,25$ g/s

4. Análise e discussão dos resultados obtidos

O cálculo da distância de vaporização completa das gotas, x_{vap} , é importante para a determinação do comprimento da câmara de combustão de um foguete.

Os resultados mostrados nas Figuras 1 a 9 foram obtidos para os sistemas bipropelentes N₂H₄/N₂O₄, MMH/N₂O₄ e UDMH/N₂O₄, enquanto os resultados mostrados nas Figuras 10 a 15 foram obtidos para os sistemas multipropelentes N₂H₄-MMH/N₂O₄ e N₂H₄-UDMH/N₂O₄.

A Figura 1.a compara a influência da pressão interna da câmara, P , sobre a distância de vaporização completa das gotas, x_{vap} . Observa-se do gráfico que quando P aumenta x_{vap} diminui, uma vez que um aumento na pressão causa um aumento na taxa de vaporização do líquido (Chin e Lefebvre, 1985, Lefebvre, 1989).

Os resultados são obtidos na Fig. 1.a para 4 classes de tamanho de gotas (cada classe é representada por um diâmetro característico). A escolha de um número adequado de classes de tamanho de gotas é importante porque o uso de um número grande de classes pode aumentar excessivamente o tempo de cálculo, por outro lado, um número pequeno de classes pode produzir erros grandes na estimativa da distância de vaporização completa das gotas. Aumentando-se o número de classes a distância de vaporização tende a um valor assintótico, dependente da pressão.

Observa-se também que a distância de vaporização completa das gotas do N_2H_4 é maior do que para o MMH e o UDMH, principalmente porque o ponto de ebulição do N_2H_4 ($T_{boil} = 113,5$ °C) é muito maior do que do MMH ($T_{boil} = 90,9$ °C) e do UDMH ($T_{boil} = 63$ °C) e, por conseguinte, o N_2H_4 precisa de tempo maior para atingir a temperatura de equilíbrio, T_{eq} , equivalente a uma temperatura de bulbo úmido T_{bu} , nas mesmas condições de pressão, temperatura e velocidade do gás.

A Figura 1.b compara a influência do número de classes de tamanho de gotas, N , ou diâmetros representativos do spray, sobre a distância de vaporização completa, x_{vap} . Observa-se que o N_2H_4 tem uma maior distância de vaporização completa que as outras hidrazinas.

Observa-se na Fig. 1.b que as distâncias de vaporização tendem a um valor constante à medida que aumenta o número de classes de gotas. Observa-se que para $N \geq 8$ a distância de vaporização não varia significativamente, para uma pressão de 25 atm.

As Figuras 2.a-b comparam a influência dos parâmetros de Rosin-Rammler, D_{32} e q , respectivamente, sobre a distância de vaporização completa, x_{vap} . Os gráficos foram obtidos considerando-se uma distribuição de 8 classes de gotas e uma pressão da câmara de 15 atm. Observa-se que para valores crescentes de diâmetros D_{32} , a distância de vaporização das gotas aumenta. Nota-se também que a medida que q aumenta a distância de vaporização diminui exponencialmente, porque a distribuição do spray é mais uniforme e as gotas tendem a ser todas do mesmo tamanho.

A Figura 3.a mostra a influência da razão de equivalência total, Φ_T , sobre a distância de vaporização completa, x_{vap} , das três hidrazinas. Neste caso a vazão de massa para cada combustível varia de acordo com $\dot{m}_{F,0} = \dot{m}_{F,g,0} + \Phi_T f_s \dot{m}_{Ox,0}$, onde f_s é a razão de mistura estequiométrica e $\dot{m}_{F,g,0} = 0,85\dot{m}_{Ox,g,0}$. Observa-se que ocorre um aumento da distância de vaporização devido ao aumento na vazão de massa do combustível injetado na entrada.

A Figura 3.b mostra a influência da temperatura do escoamento na entrada, T_{g0} , sobre a distância de vaporização completa, x_{vap} . Observa-se que a temperatura do escoamento na entrada não influi significativamente sobre a distância de vaporização, no intervalo de temperaturas de 500 a 2500 K. Isto ocorre porque os gases pré-misturados reagem rapidamente após a entrada na câmara, atingindo a temperatura de combustão que depende basicamente da razão de mistura local e da pressão na câmara.

Os resultados mostrados nas Figuras 4 a 8 foram obtidos para uma pressão de 25 atm e para 4 classes de gotas. Os diâmetros das gotas representativos das classes de gotas são 32, 64, 98 e 133 μm . Apenas as gotas maiores, com diâmetro de 133 μm , foram usadas para comparar a evolução dos vários parâmetros ao longo da câmara de combustão.

A Figura 4.a mostra a evolução do diâmetro adimensional, D/D_0 ao longo da câmara de combustão. Observa-se uma região de pré-aquecimento onde ocorre significativa dilatação térmica das gotas. Tal região aumenta quando aumenta a pressão e diminui quando aumenta a temperatura, concordando com resultados de Chin e Lefebvre (1985) e de Borman e Ragland (1998).

O comprimento da zona de expansão do líquido depende, além da pressão, da temperatura inicial do líquido, isto é, quanto mais próxima for a temperatura de entrada da temperatura de ebulição, menor é a região de pré-aquecimento. As gotas de hidrazina apresentam uma distância de vaporização maior do que as dos outros propelentes devido ao maior tempo de pré-aquecimento, causado pela maior diferença entre a temperatura de ebulição e a temperatura de entrada. Nota-se também para o N_2H_4 um incremento no diâmetro da gota de 18% devido à expansão do líquido, e um incremento de aproximadamente 5% no caso do MMH e do UDMH.

A Figura 4.b mostra a evolução da velocidade do líquido, v_L , ao longo da câmara de combustão. As velocidades na entrada para cada uma das hidrazinas são ligeiramente diferentes devido às suas diferentes densidades na fase líquida. As velocidades finais das gotas das tornam-se iguais à velocidade do gás devido ao arrasto do gás. Nota-se que as velocidades da hidrazina são menores do que as velocidades do MMH e do UDMH, porque a velocidade do líquido é inversamente proporcional à densidade do líquido.

A Figura 5.a mostra a evolução da temperatura do líquido, T_L , ao longo da câmara de combustão. Observa-se que a temperatura da gota aumenta até atingir a temperatura de equilíbrio (equivalente à uma temperatura de bulbo úmido) na pressão da câmara. Observa-se que a temperatura de equilíbrio do N_2H_4 é maior do que as das outras hidrazinas.

A Figura 5.b mostra a variação da taxa de vaporização do líquido ao longo da câmara de combustão. A taxa de vaporização aumenta durante o período de pré-aquecimento da gota e é máxima quando atinge a temperatura de equilíbrio nas condições de pressão da câmara e posteriormente diminui até a evaporação completa das gotas. A taxa de vaporização é diretamente proporcional ao diâmetro da gota e também aumenta devido à sua expansão.

As Figuras 6.a-b mostram as perdas de calor por convecção e por radiação do gás para as gotas ao longo da câmara de combustão. Nota-se que a transferência de calor por convecção é aproximadamente 60 vezes maior do que a transferência de calor por radiação. As perdas de calor aumentam durante o período de pré-aquecimento até atingirem um valor máximo quando a temperatura do líquido é próxima da temperatura de equilíbrio e diminuem até a vaporização completa das gotas.

A Figura 7.a mostra a variação da velocidade do gás ao longo da câmara de combustão até a vaporização completa das gotas. Como mencionado na Figura 4.b a velocidade do gás para o N_2H_4 é menor do que para o MMH e UDMH, devido principalmente à diferença de temperaturas das hidrazinas. Nota-se também que a velocidade do gás aumenta até a vaporização completa das gotas.

A Figura 7.b mostra a variação do número de Mach, M , do escoamento gasoso ao longo da câmara de combustão. Observa-se que o número de Mach é diretamente proporcional à velocidade do gás, atingindo um valor máximo quando termina o processo de evaporação das gotas. Nota-se também que o valor máximo é cerca de 0,012 indicando um escoamento subsônico ao longo da câmara.

A Figura 8.a mostra a evolução do diâmetro adimensional das gotas no tempo, D/D_0 . O aumento está determinado pelo pré-aquecimento das gotas, quando as gotas se expandem termicamente. Nota-se também que o período de evaporação com pré-aquecimento é maior que o período de evaporação sem pré aquecimento, o que concorda com o mostrado também por Borman e Ragland (1998).

A Figura 8.b mostra a variação da área superficial das gotas adimensionalizada, D^2/D_0^2 , em função do tempo de vaporização. Observa-se que a lei do D^2 é aproximadamente válida após o pré-aquecimento. Nota-se também que o tempo de vaporização completa é relativamente curto, da ordem de milésimos de segundo.

As Figuras 9.a-b mostram as variações no tempo da temperatura do líquido, T_L , e da velocidade do líquido, v_d . Como mencionado na Figura 5.a a temperatura da gota aumenta até atingir a temperatura de equilíbrio.

As Figuras 10.a-b mostram a influência da porcentagem em massa de N_2H_4 no sistema multipropelente N_2H_4 -MMH/ N_2O_4 sobre a distância de vaporização completa das gotas de N_2H_4 e MMH, respectivamente. Deve-se notar que neste caso, como há dois propelentes diferentes entrando na câmara, existem distâncias de vaporização completa diferentes para cada um dos propelentes. Observa-se que um aumento na pressão diminui a distância de vaporização, devido ao aumento na taxa de vaporização. Um aumento na porcentagem de N_2H_4 também aumenta x_{vap} , visto que $T_{eb-N_2H_4} = 113,5^0 C > T_{eb-MMH} = 90,9^0 C > T_{eb-UDMH} = 63^0 C$. Nota-se também que x_{vap} de N_2H_4 é sempre maior do que x_{vap} de MMH para todos os casos. O fato de que o N_2H_4 seja o propelente que controla o comprimento da câmara não significa que o caso possa ser generalizado para câmaras multipropelentes. Isto dependerá também de outros fatores, por exemplo, da temperatura do N_2H_4 na entrada. Se a temperatura do N_2H_4 na entrada for muito próxima da sua temperatura de ebulição, em comparação com a diferença de temperaturas do MMH, esta poderia controlar a distância de vaporização completa e por conseguinte o comprimento da câmara de combustão.

A Figura 11.a-b mostra a influência da porcentagem de N_2H_4 em massa no sistema multipropelente N_2H_4 -UDMH/ N_2O_4 sobre a distância de vaporização completa das gotas de N_2H_4 e UDMH, respectivamente. Como mencionado anteriormente, o N_2H_4 continua sendo o principal propelente que controla a distância máxima de vaporização completa devido a uma maior temperatura de ebulição.

As Figuras 12.a-b mostram a influência da porcentagem de N_2H_4 em massa das mistura N_2H_4 -MMH e N_2H_4 -UDMH, respectivamente, sobre a temperatura máxima do gás, $T_{g,max}$, em uma câmara de combustão multipropelente. Observa-se que um aumento na porcentagem N_2H_4 produz um aumento na temperatura máxima do gás quando $\Phi_g \approx 1$. Nota-se também que a temperatura máxima aumenta com a pressão.

A Figura 13 compara os resultados mostrados nas Figuras 10.a e 11.a. A Figura 14 compara os resultados mostrados nas Figuras 10.b e 11.b. A Figura 15 compara os resultados mostrados na Figura 12.

5. Conclusões

Foram comparados os desempenhos de hidrazinas (N_2H_4 , MMH e UDMH) queimando com tetróxido de nitrogênio (N_2O_4) em uma câmara de combustão de foguete. Considerou-se um propulsor com diâmetro de câmara 40 mm, vazão mássica total de 40 g/s e razão de mistura combustível/oxidante de 40 % em massa.

Os resultados foram obtidos a partir do modelo matemático desenvolvido por Valverde e Costa (2004) que consideram um processo de combustão controlado pela vaporização das gotas, distribuições de gotas dos propelentes baseadas no modelo de Rosin-Rammler, arrasto e dilatação térmica das gotas.

Foram comparadas as influências da pressão interna da câmara, da razão de equivalência, da temperatura do gás na entrada, do número de classes de gotas, do parâmetro q de Rosin-Rammler e do diâmetro médio de Sauter sobre a distância de vaporização completa das gotas. São apresentados os perfis do diâmetro adimensional, da temperatura, da velocidade, da taxa de vaporização das gotas, perdas de calor e de outras propriedades do escoamento ao longo da câmara.

Observou-se que a distância de vaporização completa calculada pelo modelo diminui quando a pressão aumenta até atingir um valor aproximadamente estável para pressões maiores que 40 atm.

Observou-se também que o N_2H_4 apresenta maior distância de vaporização completa que o MMH e o UDMH para todas as condições de pressão, temperatura, distribuição de tamanho de gotas, razão de equivalência e temperatura de entrada do gás.

Verificou-se que para um número de classes de gotas, representativas do spray, maior ou igual a 8 a distância de vaporização não varia significativamente, para uma pressão de 25 atm.

Conforme esperado um aumento no diâmetro médio de Sauter causa um aumento na distância de vaporização completa assim como um aumento no parâmetro adimensional q produz uma diminuição na distância de vaporização. A distância de vaporização é aproximadamente constante para valores de q maiores que 3,5 e para $D_{32} = 50 \mu m$.

A distância de vaporização completa não é afetada significativamente pela temperatura do gás na entrada no intervalo de temperaturas de 500 à 2500 K para uma pressão 20 atm (verifica-se que isto também ocorre para pressões maiores).

Observou-se que o tempo de pré-aquecimento da gota de N_2H_4 é maior do que para o MMH e o UDMH com uma expansão da gota de N_2H_4 de aproximadamente 18% sobre o diâmetro inicial e um aumento de 5% no caso de MMH e O UDMH.

A velocidade inicial na entrada de cada uma das hidrazinas é aproximadamente a mesma e depende principalmente da temperatura do líquido na entrada. A velocidade final das gotas de N_2H_4 são menores que as velocidades das gotas de MMH e o UDMH.

Após o período de pré-aquecimento a gota atinge uma temperatura de equilíbrio próxima da temperatura de ebulição do líquido nas condições de pressão interna da câmara e após este período a temperatura da gota permanece constante até a vaporização completa.

A taxa de vaporização das hidrazinas aumenta durante o período transiente de pré-aquecimento até um valor máximo quando a gota atinge a temperatura de equilíbrio e após desse período a taxa de vaporização diminui progressivamente até a vaporização completa.

As perdas de calor do gás para as gotas por convecção são aproximadamente 40 vezes maiores do que as perdas de calor por radiação.

Foram obtidos resultados para a queima de misturas de hidrazinas N_2H_4 /UDMH e N_2H_4 /MMH com N_2O_4 . Verificou-se que nestes sistemas multipropelentes um incremento na percentagem de N_2H_4 produz um aumento na distância de vaporização completa, assim como um aumento na percentagem de N_2H_4 aumenta a temperatura máxima do gás. Encontrou-se que a distância de vaporização do N_2H_4 na mistura N_2H_4 /MMH é maior do que a distância de vaporização do N_2H_4 na mistura N_2H_4 /UDMH, e que a temperatura máxima do gás na mistura N_2H_4 /MMH é menor do que a temperatura máxima do gás na mistura N_2H_4 /UDMH.

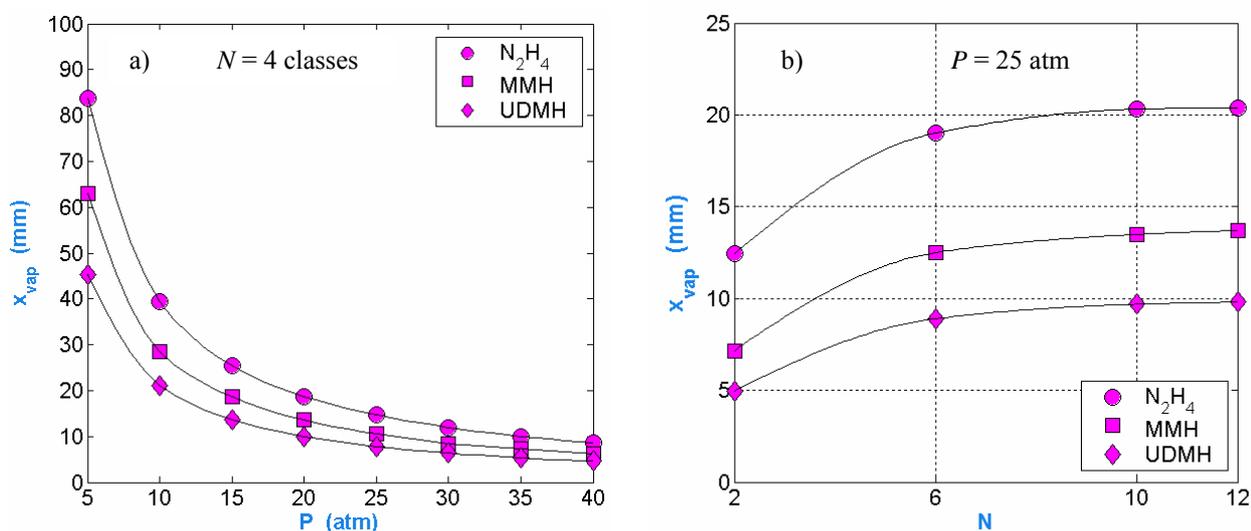


Figura 1. Influência da pressão, P , e do número de classes de gotas, N , sobre a distância de vaporização completa, x_{vap} , da hidrazina e seus derivados queimando com N_2O_4 .

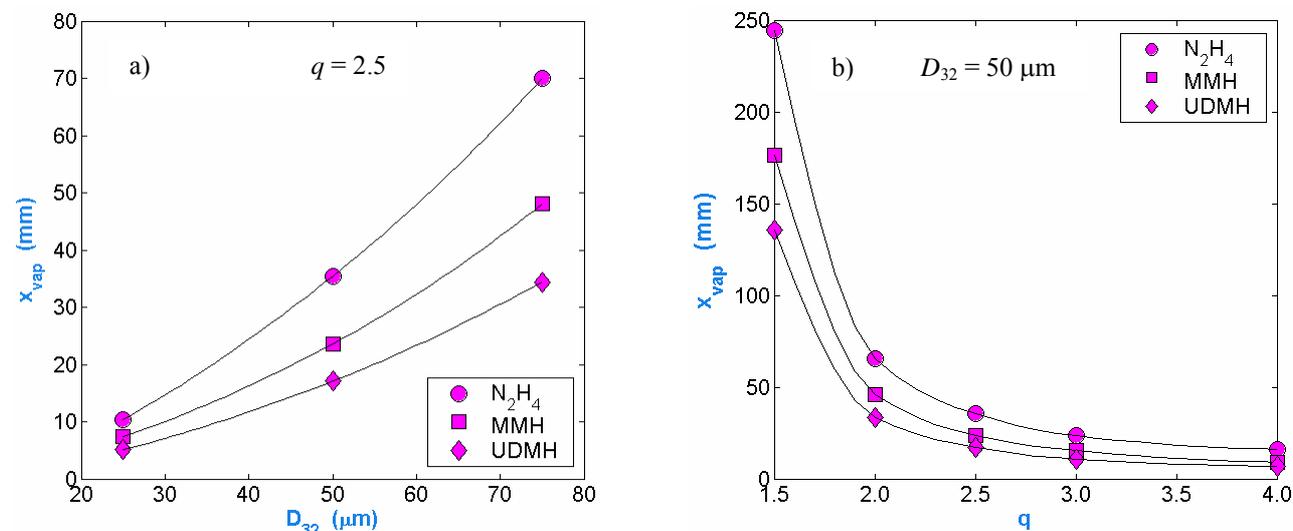


Figura 2. Influência do diâmetro médio de Sauter, D_{32} , e do parâmetro q sobre a distância de vaporização completa, para vários combustíveis e oxidante N_2O_4 . $P = 15$ atm, $N = 8$ classes.

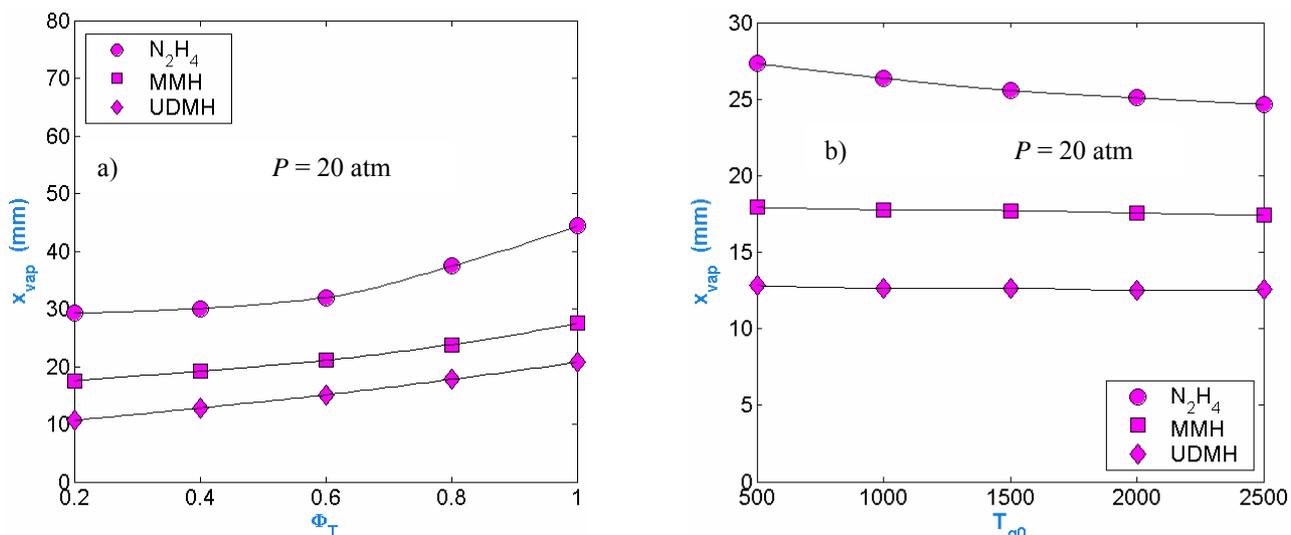


Figura 3. Influência da razão de equivalência total, Φ_T , sobre a distância de vaporização completa, x_{vap} , para vários combustíveis e oxidante N_2O_4 . $N = 8$ classes de tamanho de gotas.

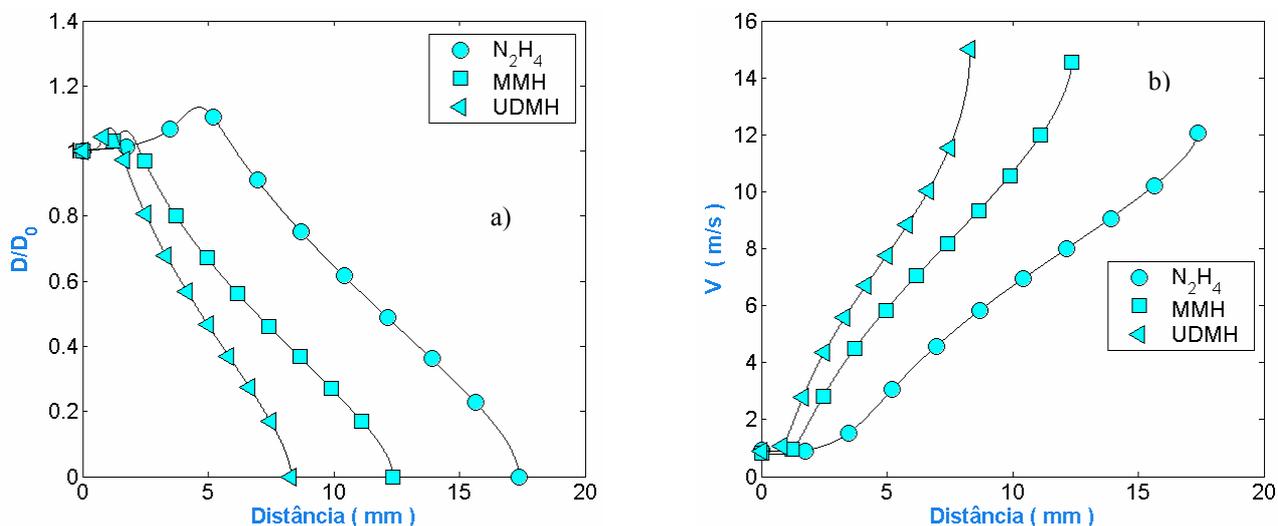


Figura 4. Evolução do diâmetro adimensional, D/D_0 , e da velocidade das gotas, v_d , ao longo da câmara de combustão para vários combustíveis e oxidante N_2O_4 . $N = 4$ classes, $P = 25$ atm, $\phi_{gota} = 133$ μm .

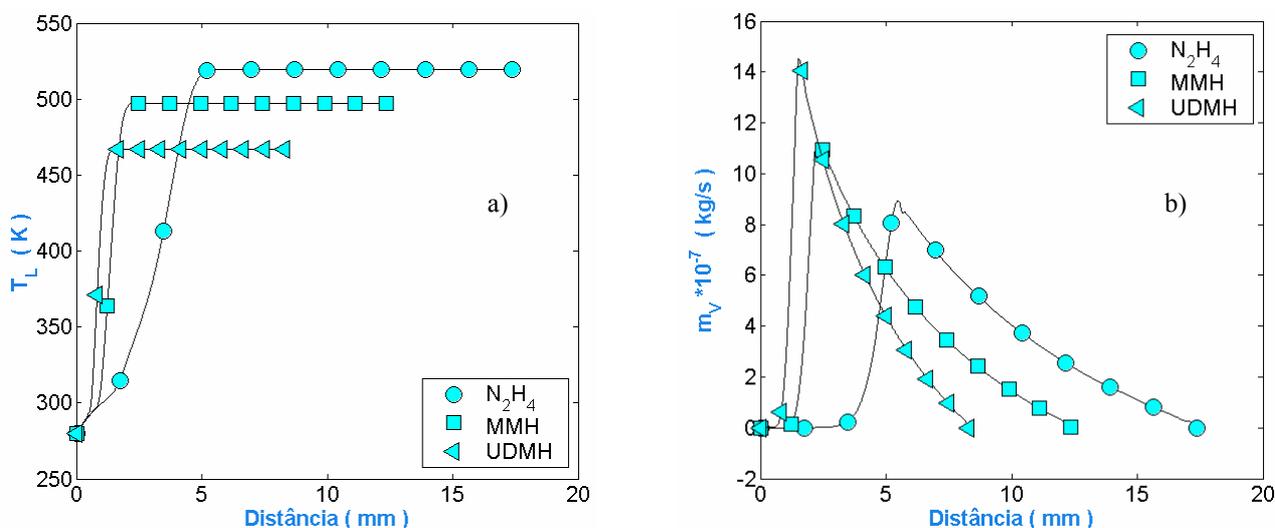


Figura 5. Evolução da temperatura do líquido, T_L , e da taxa de vaporização, \dot{m}_v , ao longo da câmara de combustão para vários combustíveis e oxidante N_2O_4 . $N = 4$ classes, $P = 25$ atm, $\phi_{gota} = 133$ μm .

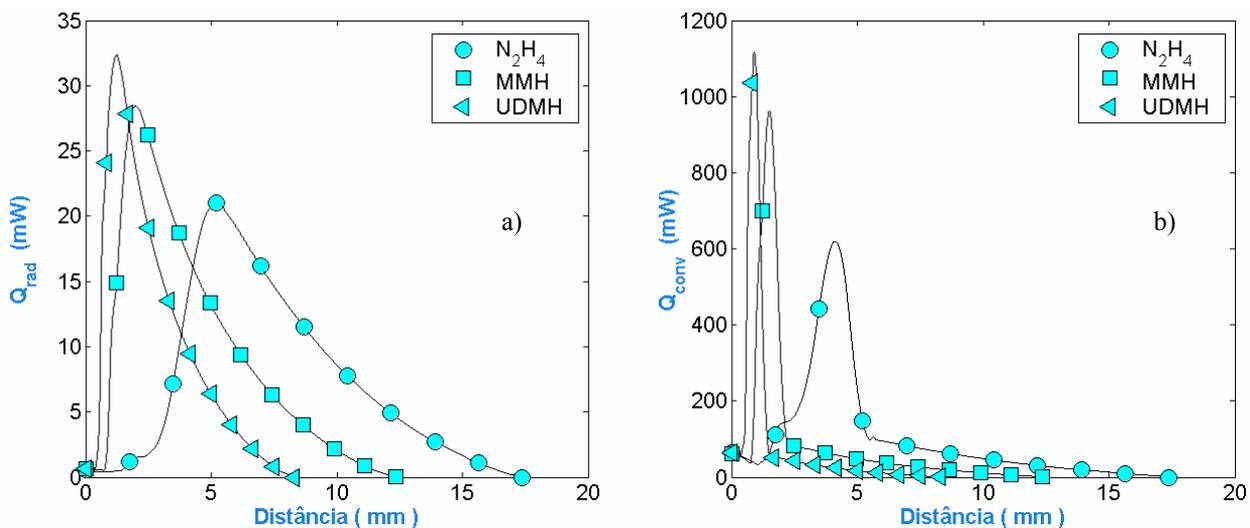


Figura 6. Perdas de calor por radiação, Q_{rad} , e por convecção, Q_{conv} , transferido do gás para as gotas de combustível, ao longo da câmara de combustão para vários combustíveis e oxidante N_2O_4 . $N = 4$ classes, $P = 25$ atm, $\phi_{gota} = 133 \mu m$.

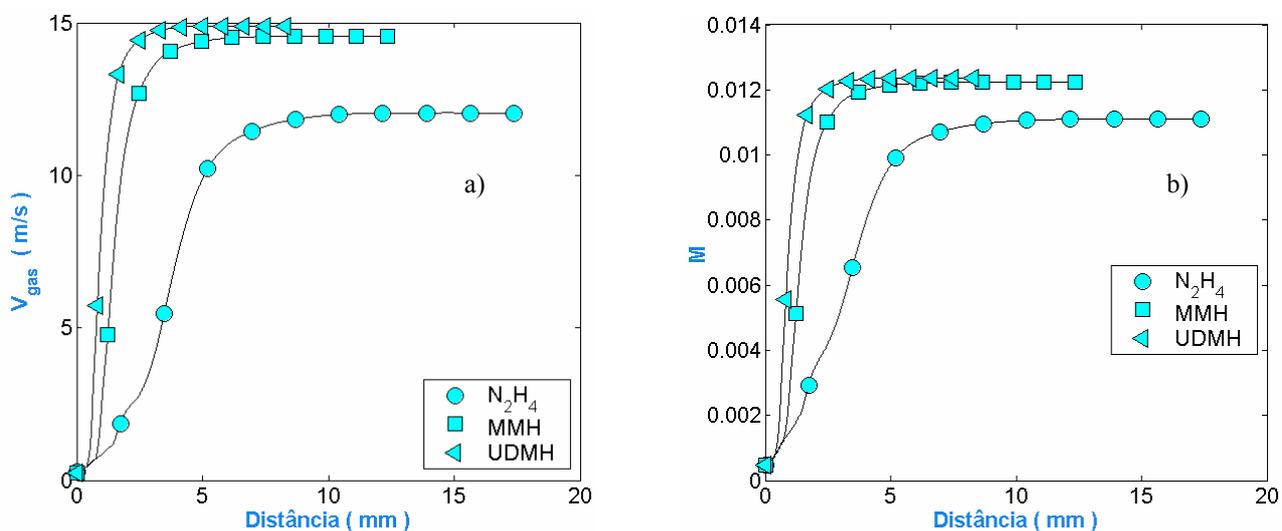


Figura 7. Velocidade do gás, v_g , e número de Mach do gás, M , ao longo da câmara de combustão, para vários combustíveis e oxidante N_2O_4 . $N = 4$ classes, $P = 25$ atm.

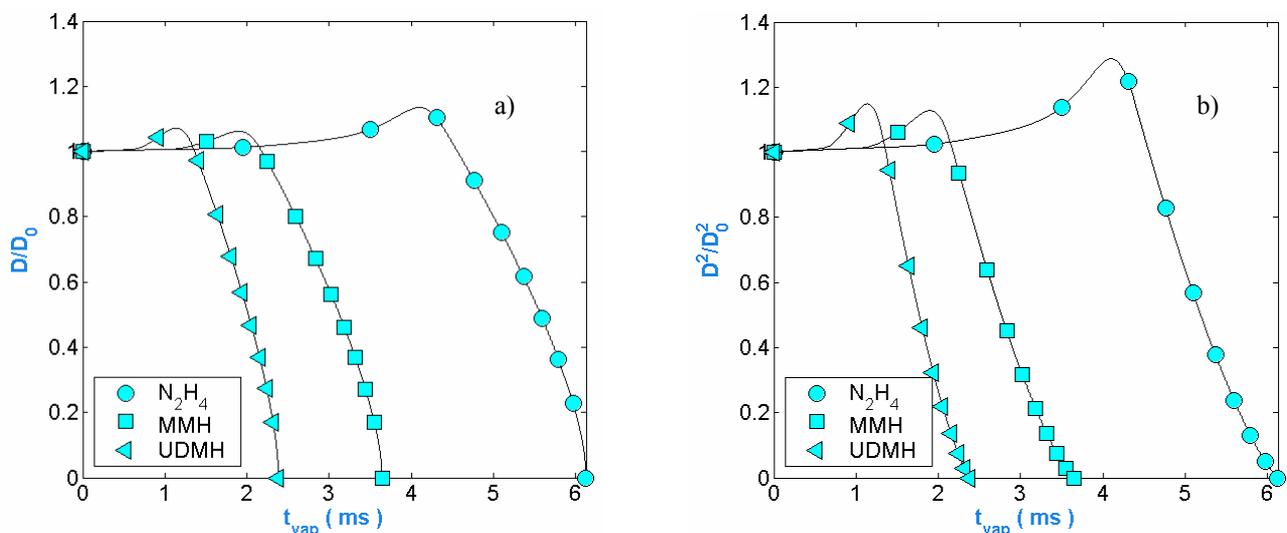


Figura 8. Diâmetro adimensional, D/D_0 , e área superficial adimensional, D^2/D_0^2 , vs. tempo de vaporização, t_v , para vários combustíveis e oxidante N_2O_4 . $N = 4$ classes, $P = 25$ atm, $\phi_{gota} = 133 \mu m$.

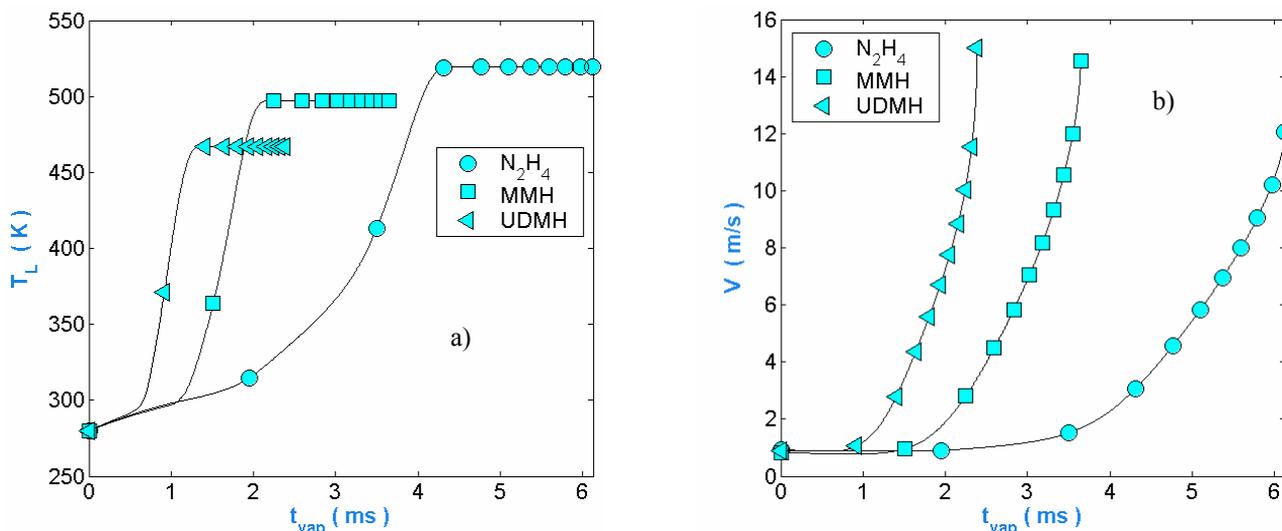


Figura 9. Temperatura do líquido, T_L , e velocidade do líquido, v_d , vs. tempo de vaporização, t_v , para vários combustíveis e oxidante N_2O_4 . $N = 4$ classes, $P = 25$ atm, $\phi_{gota} = 133 \mu m$.

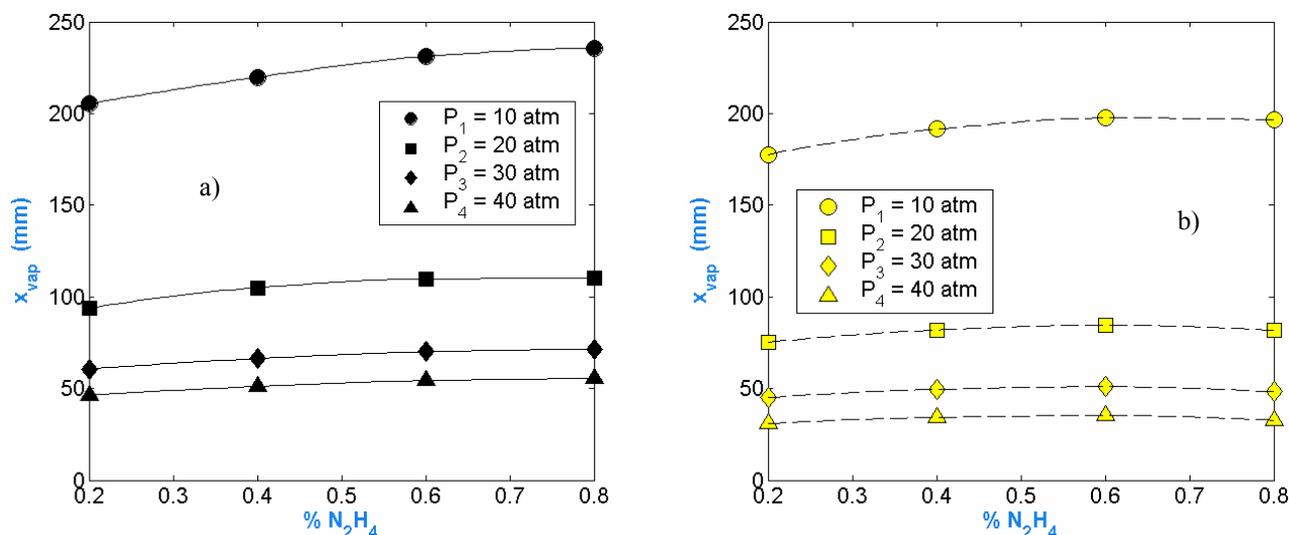


Figura 10. Influência da percentagem de massa de N_2H_4 no sistema N_2H_4 -MMH/ N_2O_4 , sobre a distância de vaporização completa, x_{vap} , em uma câmara de combustão multipropelente. (a) N_2H_4 , (b) MMH.

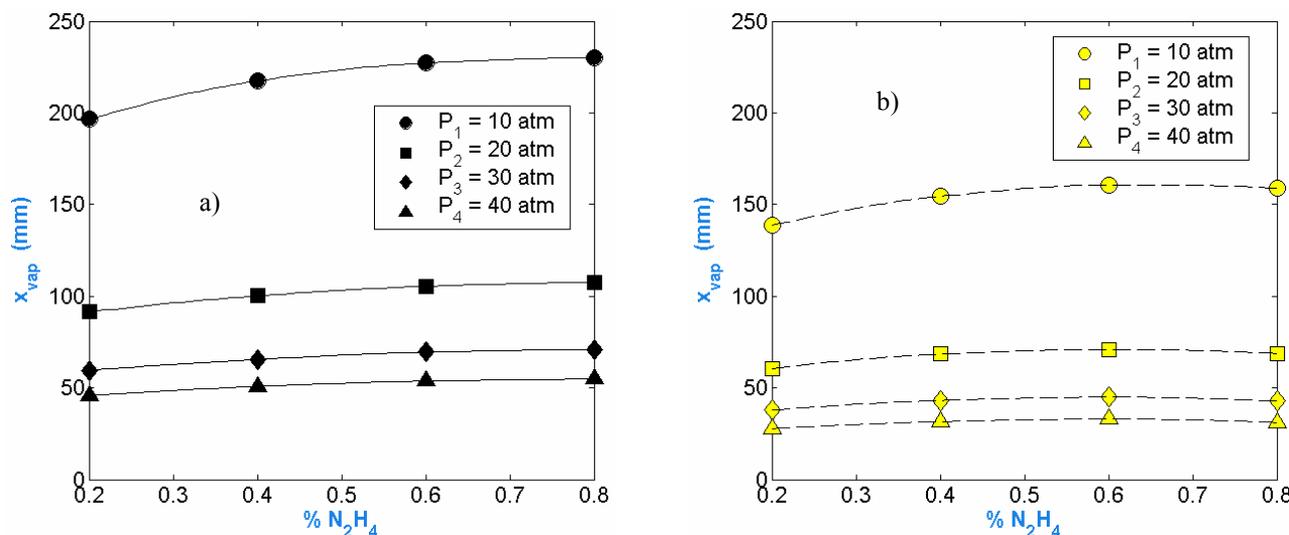


Figura 11. Influência da percentagem de massa de N_2H_4 no sistema N_2H_4 -UDMH/ N_2O_4 , sobre a distância de vaporização completa, x_{vap} , em uma câmara de combustão multipropelente (a) N_2H_4 , (b) UDMH.

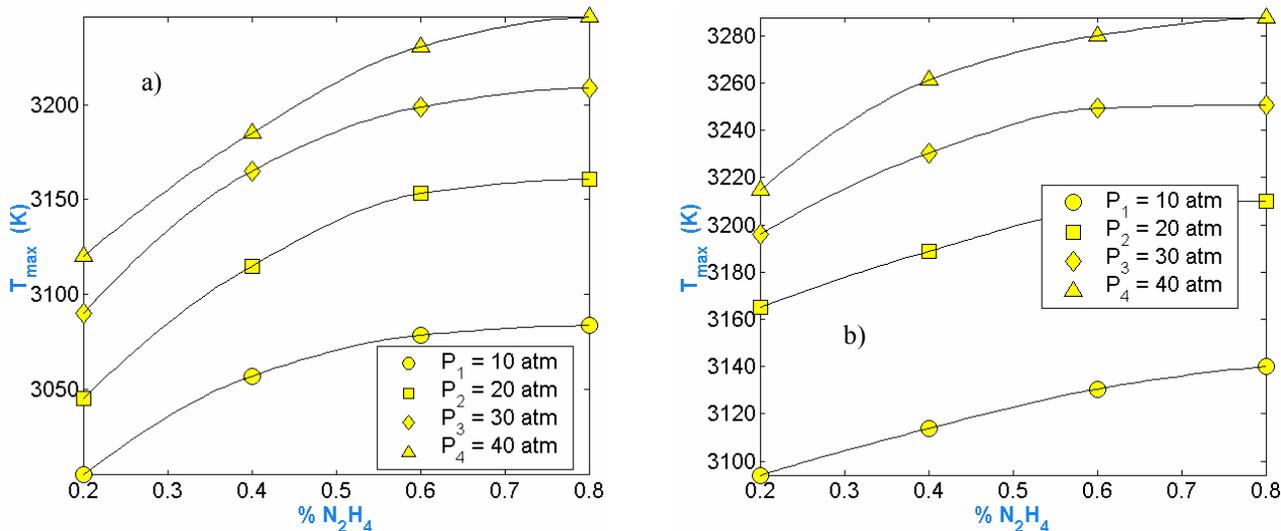


Figura 12. Influência da porcentagem em massa de N_2H_4 , sobre a temperatura máxima do gás, $T_{g,max}$, em uma câmara de combustão multipropelente. Combustíveis: (a) N_2H_4 -MMH, (b) N_2H_4 -UDMH.

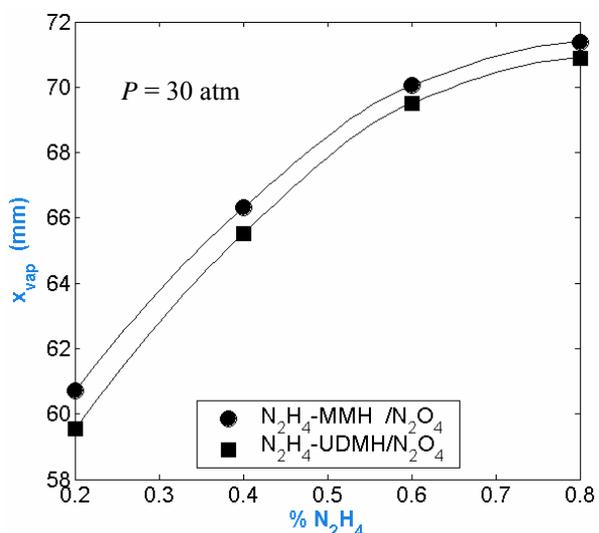


Figura 13. Influência da porcentagem de N_2H_4 em massa sobre a distância de vaporização completa de N_2H_4 .

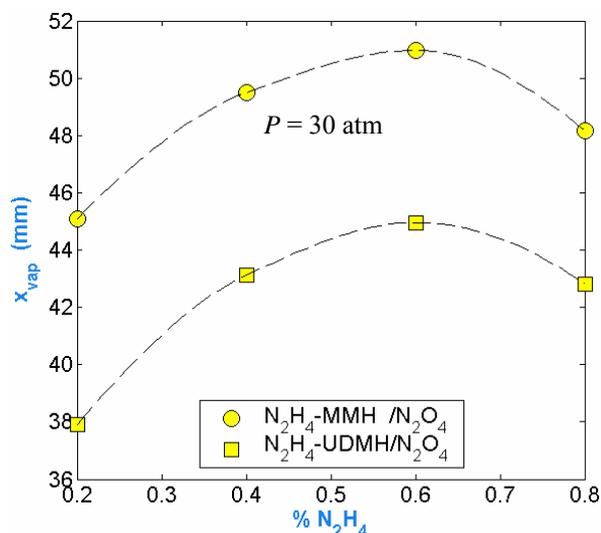


Figura 14. Influência da porcentagem de N_2H_4 em massa sobre a distância de vaporização completa dos combustíveis MMH e UDMH.

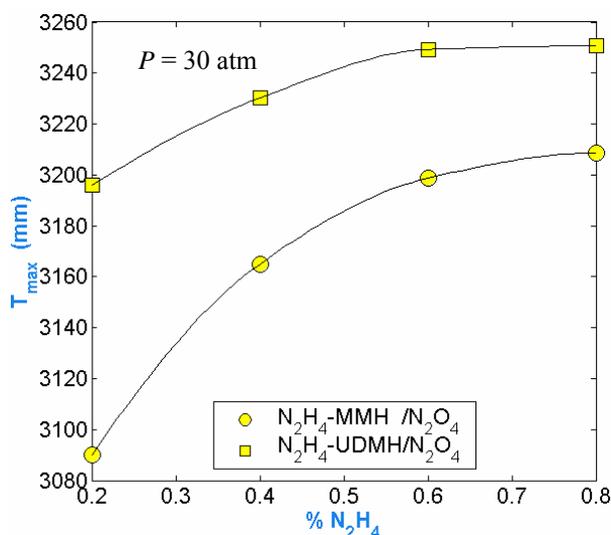


Figura 15. Influência da porcentagem em massa de N_2H_4 em misturas de MMH e de UDMH sobre a temperatura máxima do gás, $T_{g,max}$, em uma câmara de combustão multipropelente.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Governo Brasileiro pela concessão de uma bolsa de mestrado através do CNPq ao primeiro autor.

7. Referências

- Borman, G. L., Ragland, K. W., 1998, "Combustion Engineering", McGraw-Hill Book Company, New York, pp. 323-332.
- Chin, J. S., Lefebvre, A. H., 1985, "Steady-State Evaporation Characteristics of Hydrocarbon Fuel Drops", AIAA Journal, Vol.21, n.10, pp.1437-1443.
- Lefebvre, A. H., 1989, "Atomization and Sprays Combustion", An International Series, Hemisphere Publishing Corporation.
- Schmidt, E. W., 1984, "Hydrazine and its Derivates-Preparation, Properties, Applications", John Wiley & Sons, cd. 2, pp. 117-230.
- Valverde, C. A., Costa, F. S., 2004, "Modelo Matemático de Combustão de Spray Bipropelente", X Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, ENCIT 2004, Paper CIT04-0031, Rio de Janeiro, Brasil.
- Valverde, C.A., 2004, "Mathematical Model of Bipropellant Combustion Chambers", Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP, Brasil.

PERFORMANCE OF HYDRAZINES IN A BIPROPELLANT COMBUSTION CHAMBER

Cesar Addis Valverde Salvador

Laboratório Associado de Combustão e Propulsão, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Rodovia Presidente Dutra, Km 40, Cachoeira Paulista, São Paulo, Brasil
cesalvador@lcp.inpe.br

Fernando de Souza Costa

Laboratório Associado de Combustão e Propulsão, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Rodovia Presidente Dutra, Km 40, Cachoeira Paulista, São Paulo, Brasil
fernando@lcp.inpe.br

Abstract. *This work compares the performance of hydrazine fuels (N_2H_4 , MMH and UDMH) burning with N_2O_4 in a combustion chamber of a rocket. It was considered a bipropellant thruster chamber with a diameter of 40 mm, total mass flowrate of 40 g/s and a mass mixture ratio fuel/oxidizer of 40 %. These results were obtained from a mathematical model developed by Valverde and Costa (2004) which considered a combustion and mixture process controlled by the droplet vaporization rate, distributions of droplet diameters of propellants based on the model of Rosin-Rammler, drag on the droplets and thermal dilatation of the droplets. The influences of the chamber pressure, equivalence ratio, initial gas temperature, number of size classes of droplets, parameter q of the Rosin-Rammler distribution and Sauter mean diameter on the distance for complete vaporization of drops are analysed. The profiles of normalized diameters, temperatures, velocities, heat losses, vaporization rates of the drops and other properties of the flow along the chamber are described. Numerical results for multipropellant systems using mixtures of N_2H_4 /UDMH and N_2H_4 /MMH with N_2O_4 are also presented.*

Keywords: *bipropellant, N_2H_4 , MMH, UDMH, NTO, rocket, combustion chamber.*