

COEFICIENTES DE DESCARGA DE UM INJETOR CENTRÍFUGO DUAL PARA ATOMIZAÇÃO DE ETANOL E PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO

Fischer, G. A. A., fischer@lcp.inpe.br¹
Andrade, J. C., andrade@lcp.inpe.br¹
Costa, F. S., fernando@lcp.inpe.br¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Rodovia Presidente Dutra, Km 40, Cachoeira Paulista/SP - Brasil

Resumo: Os injetores centrífugos são amplamente utilizados em motores foguete devido à sua alta eficiência de atomização em um volume reduzido. Esse trabalho apresenta os resultados de uma investigação teórico-experimental de um injetor centrífugo dual visando atomização de etanol (C_2H_6O , 95% m/m) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2 , 90% m/m) em um propulsor bipropelente de 100 N. São determinadas as vazões mássicas e os coeficientes de descarga versus a pressão de injeção nas duas câmaras do injetor, utilizando-se água e etanol como fluidos de teste. Os resultados teóricos mostraram boa concordância com os resultados experimentais.

Palavras-chave: injetor centrífugo dual, etanol, H_2O_2 , propulsor

1. INTRODUÇÃO

O injetor é o elemento responsável pela atomização dos propelentes líquidos na câmara de combustão de um motor foguete. Ele possibilita a conversão de energia do líquido, pela queda de pressão, em energia cinética o que resulta na atomização do líquido em pequenas gotas. A atomização ocorre como resultado da ação de forças de inércia, viscosas e de tensão superficial atuando sobre o líquido, algumas atuando na consolidação e outras na desintegração das gotas (LEFEBVRE, 1989).

Além disso, os injetores devem distribuir e misturar os propelentes na proporção prevista. Uma atomização eficiente permite aumentar significativamente as áreas superficiais dos propelentes líquidos garantindo altas taxas de mistura e evaporação.

A escolha do tipo de elemento injetor e seu projeto específico são dependentes de vários fatores: a combinação dos propelentes e o estado dos propelentes na entrada do injetor, a razão de mistura de oxidante e combustível, a pressão na câmara, a queda de pressão do injetor, o diâmetro da câmara, o desempenho e os requerimentos da missão, além da experiência do próprio projetista do motor. Todos estes fatores são geralmente determinados logo antes do início dos testes do injetor, através da modelagem matemática, análises computacionais e experiências precedentes bem sucedidas. Um ótimo projeto de injetor é aquele que atende o desempenho e os requisitos da missão do sistema de propulsão.

O etanol e o peróxido de hidrogênio são dois propelentes que estão sendo investigados em diversos centros de pesquisas e universidades, devido, entre outros, ao baixo impacto ambiental do seu uso, à facilidade de manuseio e armazenamento, ao baixo custo e à disponibilidade no mercado. O etanol e o peróxido de hidrogênio não são hipergólicos, portanto necessitam de um sistema ou processo de ignição adequado, por exemplo, chamas auxiliares, aditivos, catalisadores, centelhadores ou aquecedores.

Esse trabalho compara os coeficientes de descarga teóricos e experimentais de um injetor centrífugo dual para atomização de etanol e peróxido de hidrogênio em um propulsor de 100 N.

2. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS E ANÁLISE DO PROJETO

2.1. Projeto de injetores centrífugos duais

O injetor centrífugo (Fig. 1) é formado por uma câmara de vórtice, canais de entrada tangencial e um orifício de descarga. Os canais de entrada estão localizados na câmara de vórtice e são tangenciais à parede da câmara de vórtice, podendo variar de 2 até 6. O maior número de canais de entrada tangencial fornece uma melhor distribuição de massa. O orifício de descarga geralmente tem um diâmetro menor do que a câmara de vórtice. Na câmara de vórtice, devido ao movimento centrífugo, a pressão decresce a partir da parede para o centro. Numa certa distância radial na superfície do

líquido a pressão torna-se igual à pressão ambiente e forma-se um vórtice de ar. O escoamento através do orifício de descarga é formado por um filme líquido com espessura de apenas alguns décimos de milímetros. Após a saída do orifício, o filme líquido tem a forma de um cone oco truncado. Com o aumento do raio do cone do filme líquido, a espessura diminui e então desintegra-se em gotas de dimensões muito pequenas. Estas gotas têm dimensões muito menores do que as gotas geradas por um jato. Além da vantagem de uma melhor atomização, tais injetores tem a vantagem de que, para uma determinada queda de pressão, as dimensões geométricas podem ser ajustadas em função do parâmetro geométrico característico K , evitando assim possíveis entupimentos e instabilidades no processo de combustão.

A primeira solução analítica para o escoamento de líquido ideal dentro de um injetor centrífugo foi formulada por Abramovich (1944). Nela as hipóteses consideradas são:

- O campo de velocidade é potencial em toda a região entre as paredes da câmara e o vórtice de gás;
- Sem efeitos da gravidade;
- O escoamento é estável e axissimétrico;
- Não há componente radial de velocidade;
- O momento angular do fluxo dentro da câmara de vórtice é constante.

O parâmetro geométrico (K) do injetor centrífugo é definido como:

$$K = \frac{A_s R}{A_e r_s} = \frac{\pi R r_s}{A_e} = \frac{R r_s}{n r_e^2} \quad (1)$$

onde R é o raio do centro até o canal de entrada tangencial (raio centrífugo), r_s o raio do orifício de descarga, $A_e = n\pi r_e^2$ a área total dos canais de entrada tangencial e n é o número de canais de entrada.

Outros parâmetros importantes dos injetores centrífugos são: o coeficiente de preenchimento (ε), o coeficiente de descarga (μ), e o semiângulo de cone do *spray* (α). Todos esses parâmetros estão relacionados diretamente com K pelas seguintes equações:

$$K = \frac{(1-\varepsilon)\sqrt{2}}{\varepsilon\sqrt{\varepsilon}} \quad (2)$$

$$\mu = \varepsilon\sqrt{\frac{\varepsilon}{2-\varepsilon}} \quad (3)$$

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{2\mu K}{\sqrt{(1+\sqrt{1-\varepsilon})^2 - 4\mu^2 K^2}} \quad (4)$$

A solução analítica sem efeitos viscosos é apresentada na Figura 2.

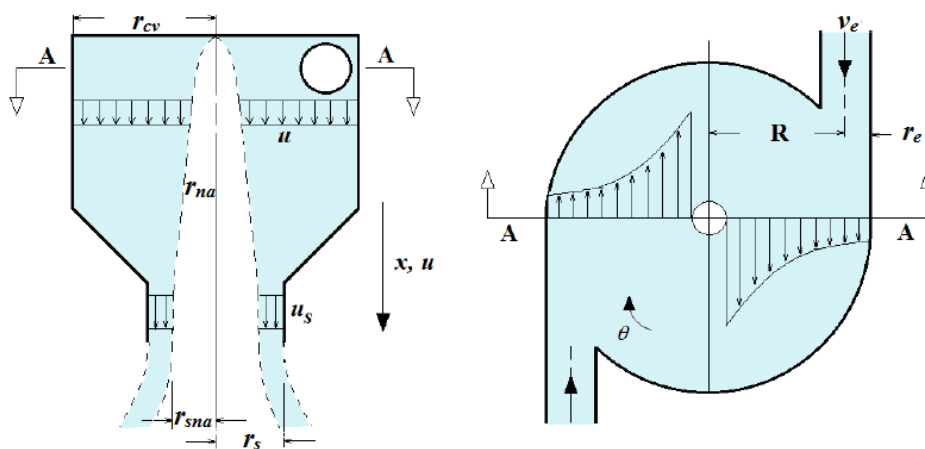


Figura 1. Dimensões básicas de um injetor centrífugo simples.

Fonte: adaptado de Vásquez (2011).

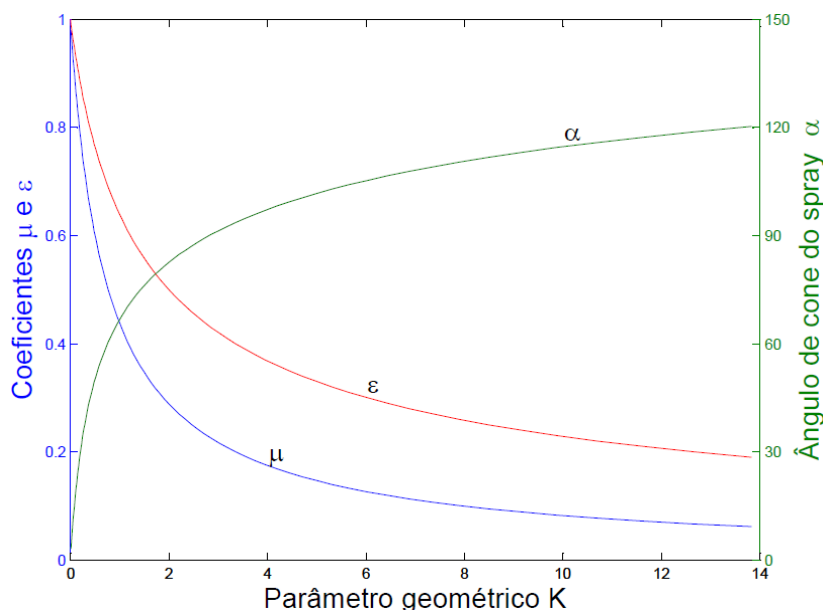


Figura 2. Comportamento do ângulo de cone do spray e dos coeficientes de descarga e de preenchimento do injetor em função do parâmetro geométrico (caso ideal, sem efeitos viscosos).

A solução analítica para o escoamento de líquido viscoso dentro de um injetor centrífugo foi formulada por Kliachko (1962). Nela o parâmetro geométrico (K) é dado por:

$$K = \frac{Rr_s}{nr_e^2 + \left(\frac{\lambda}{2}\right)R(R-r_s)} \quad (5)$$

onde o coeficiente de atrito (λ) é uma função do número de Reynolds dos canais de entrada, obtido a partir da seguinte equação:

$$\log \lambda = \frac{25,8}{(\log Re)^{2,58}} - 2 \quad (6)$$

A Equação 6 foi estabelecida como resultado de extensivas investigações de injetores na faixa de $Re = 10^3$ - 10^5 . Os valores de λ determinado a partir dessa equação são significativamente maiores do que a partir de outras equações comumente utilizadas em sistemas hidráulicos. Isto é devido ao seu alto gradiente transversal no contorno da parede (BAZAROV *et al.*, 2004).

O injetor centrífugo dual tem duas câmaras concêntricas independentes que podem fornecer níveis rotacionais distintos para um único líquido ou dois líquidos diferentes. As duas câmaras são alinhadas concentricamente de modo que seus orifícios de descarga despejem o líquido formando um único spray.

Para a câmara secundária, o cálculo é análogo, mas deve ser levado em conta a espessura do seu filme líquido e o seu vórtice de ar para evitar o contato com a parede do injetor interno. As soluções para o escoamento de líquido ideal e viscoso na câmara secundária são descritas por Fischer (2014). O parâmetro geométrico (K) para os dois casos, respectivamente, são dados pelas equações:

$$K_2 = \frac{A_{s2}R_2}{A_{e2}(r_{s2} - r_{s1})} = \frac{\pi R_2(r_{s2}^2 - r_{s1}^2)}{A_{e2}(r_{s2} - r_{s1})} \quad (7)$$

$$K_2 = \frac{R_2(r_{s2}^2 - r_{s1}^2)}{\frac{A_{e2}(r_{s2} - r_{s1})}{\pi} + \left(\frac{\lambda}{2}\right)R_2(r_{s2} - r_{s1})[R_2 - (r_{s2} - r_{s1})]} \quad (8)$$

onde os subscritos 1 e 2, representam as câmaras primárias e secundárias, respectivamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. O injetor centrífugo dual

O injetor centrífugo dual foi projetado conforme procedimento de cálculo descrito por Fischer (2014).

As Figuras 4 e 5 apresentam um desenho das duas câmaras alinhadas e uma imagem do injetor fabricado, respectivamente.

A Tabela 1 apresenta um resumo geral das dimensões do injetor.

As Tabelas 2 e 3 apresentam um resumo geral das características das câmaras primária e secundária do injetor, respectivamente.

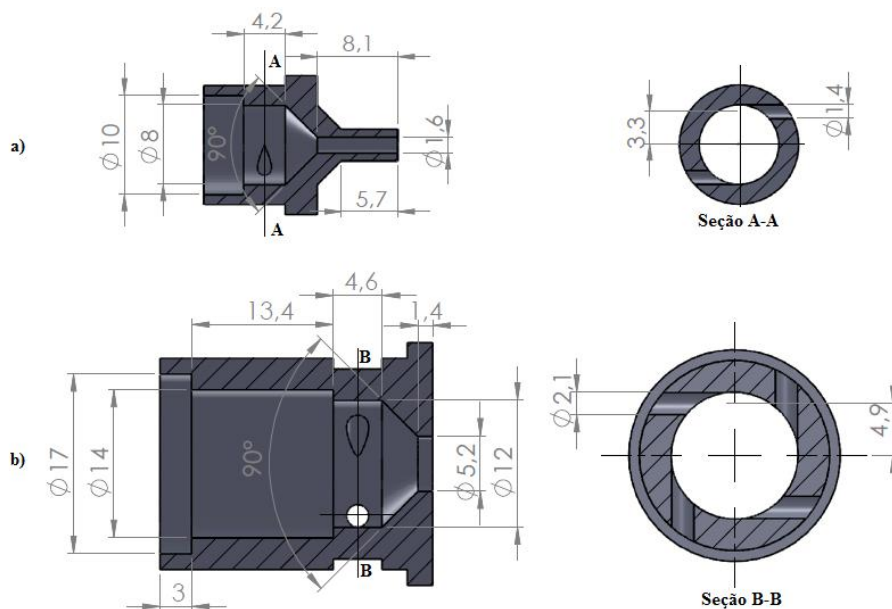


Figura 4. Desenho esquemático das câmaras: a) primária e b) secundária do injetor centrífugo dual.

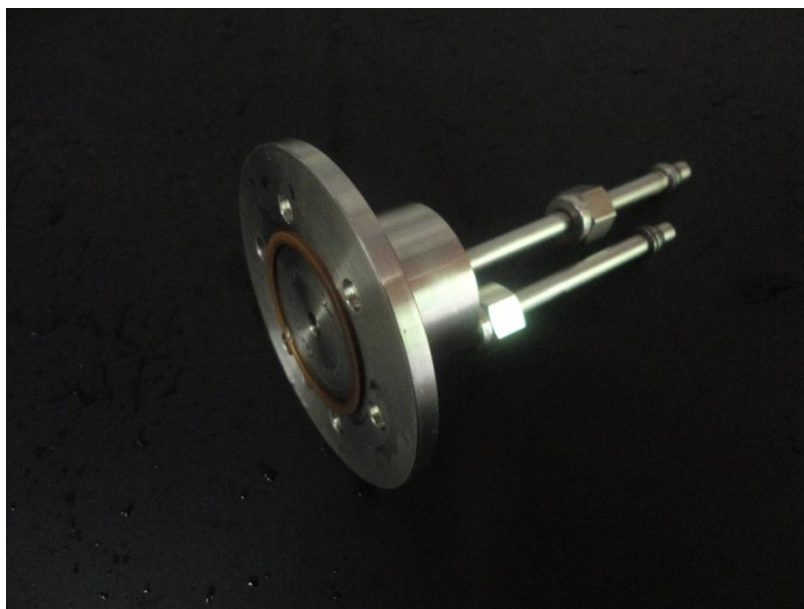


Figura 5. Imagem do injetor centrífugo dual (bipropelente) fabricado.

Tabela 1. Resumo geral das dimensões do injetor centrífugo dual construído.

Injetor	Interno	Externo
Diâmetro do orifício de descarga – d_s (mm)	1,6	5,2
Comprimento do orifício de descarga – l_s (mm)	8,1	1,4
Número de orifícios de entrada tangencial – n	2	4
Diâmetro do canal de entrada tangencial – d_e (mm)	1,4	2,1
Comprimento do canal de entrada tangencial – l_e (mm)	2,8	4,3
Raio do centro até o canal de entrada tangencial – R (mm)	3,3	4,9
Diâmetro da câmara de vórtice – D_{cv} (mm)	8	12
Comprimento da câmara de vórtice – L_{cv} (mm)	4,2	4,6
Ângulo do cone transiente – β (°)	90	90

Tabela 2. Resumo geral das características da câmara primária do injetor centrífugo dual.

Dados de entrada				
Queda de pressão – ΔP (MPa)	0,2533			
Vazão mássica – \dot{m} (g/s)	10,0538			
Ângulo de cone do <i>spray</i> – α (°)	90			
Fluido	Etanol	Água		
Viscosidade dinâmica (cP)	1,2	1		
Densidade (kg/m ³)	809,3	1000		
Parâmetros geométricos do injetor				
	Sem viscosidade		Com viscosidade	
Fluido	Etanol	Água	Etanol	Água
Coefficiente de atrito (λ)	0	0	0,073	0,0638
Número de Reynolds (Re)	0	0	5391,8	6821,6
Ângulo de cone do <i>spray</i> – α (°)	90	90	82,2085	83,1008
Coefficiente de descarga (μ)	0,2226	0,2226	0,264	0,2591
Coefficiente de preenchimento (ε)	0,4271	0,4271	0,4808	0,4747
Parâmetro geométrico (K)	2,9028	2,9028	2,2028	2,2714
Raio adimensional do vórtice de ar (S)	0,8272	0,8272	0,7689	0,7747
Velocidade de injeção (m/s)	5,5683	5,0093	6,6042	5,8321
Vazão mássica – \dot{m} (g/s)	10,0538	10,0538	11,9241	11,7052

Tabela 3. Resumo geral das características da câmara secundária do injetor centrífugo dual.

Dados de entrada				
Queda de pressão – ΔP (MPa)	0,2533			
Vazão mássica – \dot{m} (g/s)	40,2152			
Ângulo de cone do <i>spray</i> – α (°)	114,4947			
Fluido	H ₂ O ₂		Água	
Viscosidade dinâmica (cP)	1,13		1	
Densidade (kg/m ³)	1405		1000	
Parâmetros geométricos do injetor				
	Sem viscosidade		Com viscosidade	
Fluido	H ₂ O ₂	Água	H ₂ O ₂	Água
Coefficiente de atrito (λ)	0	0	0,0509	0,0482
Número de Reynolds (Re)	0	0	10784	12191
Ângulo de cone do <i>spray</i> – α (°)	100,3327	100,3327	95,6415	95,8026
Coefficiente de descarga (μ)	0,155	0,155	0,1649	0,1643
Coefficiente de preenchimento (ε)	0,3415	0,3415	0,3595	0,3585
Parâmetro geométrico (K)	4,6667	4,6667	4,2033	4,2254
Raio adimensional do vórtice de ar (S)	0,8834	0,8834	0,8708	0,8714
Velocidade de injeção (m/s)	2,9425	3,4878	3,1315	3,6985
Vazão mássica – \dot{m} (g/s)	40,2152	40,2152	58,0543	48,8002

3.2. Medições do coeficiente de descarga

O coeficiente de descarga de um injetor centrífugo é inevitavelmente baixo devido à presença do vórtice de ar que bloqueia de forma eficaz a porção central do orifício de descarga (LEFEBVRE, 1989).

O coeficiente de descarga é definido como a razão entre a vazão mássica experimental pela máxima vazão mássica teórica de líquido no injetor:

$$\mu = \frac{\dot{m}_{\text{exp}}}{\dot{m}} \quad (9)$$

onde a máxima vazão mássica teórica, \dot{m} , é definida como:

$$\dot{m} = \pi r_s^2 \sqrt{2\rho\Delta P} \quad (10)$$

Devido às perdas viscosas no escoamento e por atrito nas paredes do injetor, a vazão mássica experimental é diferente da máxima vazão mássica teórica. Para determinar a vazão mássica experimental, em regime permanente, mede-se a quantidade de massa que sai do injetor mediante o emprego de rotâmetros inseridos pouco antes da alimentação do injetor.

Os testes foram realizados com o emprego de etanol na câmara primária. Na câmara secundária os testes foram realizados com água ao invés de peróxido de hidrogênio devido ao alto grau de oxidação.

A Figura 6 mostra o desenho esquemático da bancada de testes utilizada nos experimentos.

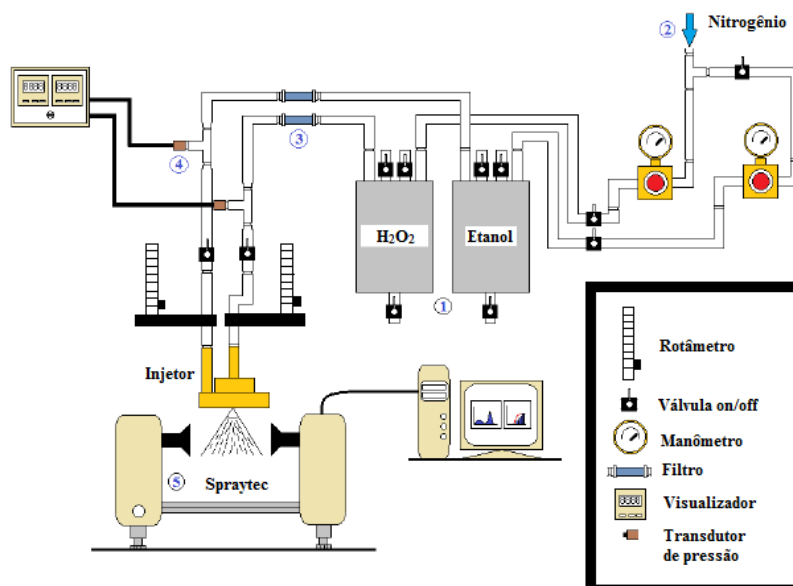


Figura 6. Banca de testes utilizada nos experimentos.

3.3. Coeficiente de descarga da câmara primária

A Figura 7 mostra os valores teóricos e experimentais da vazão mássica na câmara primária do injetor centrífugo dual em função da pressão de injeção, empregando-se etanol como líquido de teste.

A Figura 8 compara os coeficientes de descarga teóricos e experimentais na câmara primária do injetor centrífugo dual, empregando-se etanol como líquido de teste.

Observa-se na Figura 7 que as vazões mássicas coincidem com a solução analítica considerando os efeitos viscosos na faixa de operação (10 g/s). Nota-se ainda que em vazões inferiores a 8 g/s, o coeficiente de descarga experimental é maior do que da solução analítica, conforme Figura 8. Em baixas vazões, as perdas de momento angular são maiores, devido ao fato de que em baixas pressões o número de Reynolds é menor, e conseqüentemente, as componentes tangencial e axial da velocidade são menores e maiores, respectivamente, resultando no aumento do coeficiente de descarga.

Verifica-se ainda que o emprego de água não levou a uma grande divergência dos resultados em comparação com o etanol, pois suas propriedades físico-químicas são muito próximas entre si.

Pode-se notar na Figura 7 que as vazões mássicas teóricas e experimentais dos líquidos na câmara primária aumentam com o incremento de injeção a uma potência de 0,5, conforme mencionado na literatura.

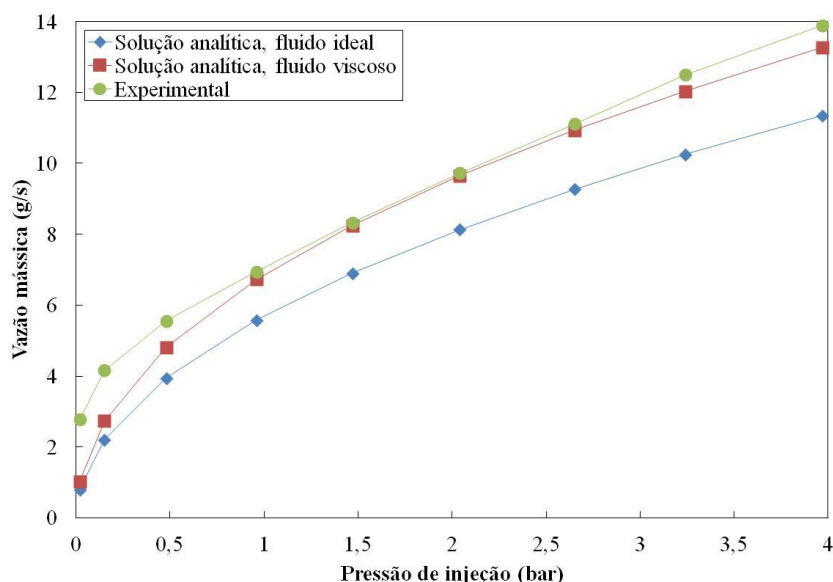


Figura 7. Valores teóricos e experimentais da vazão mássica de etanol em função da pressão de injeção (manométrica) na câmara primária do injetor centrífugo dual.

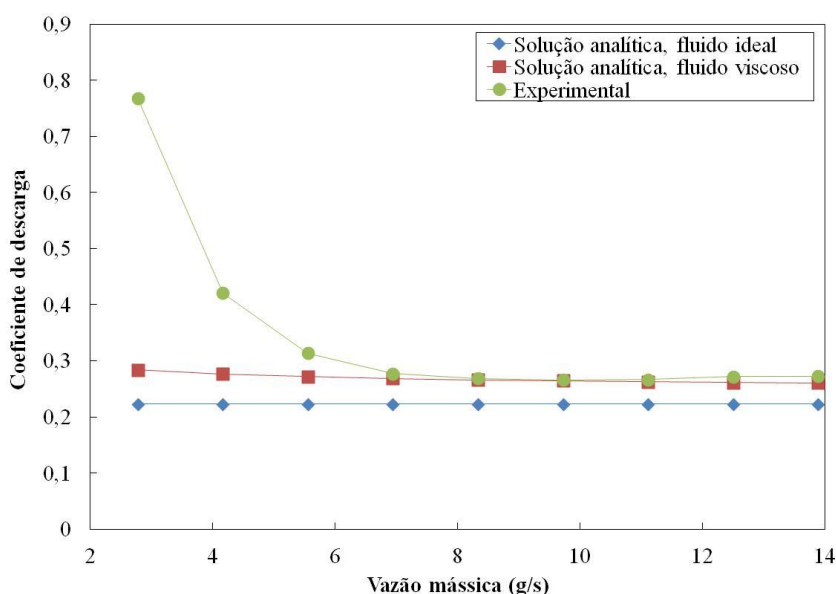


Figura 8. Valores teóricos e experimentais do coeficiente de descarga para injeção de etanol na câmara primária do injetor centrífugo dual.

3.4. Coeficiente de descarga da câmara secundária

A Figura 9 mostra os valores teóricos e experimentais da vazão mássica na câmara secundária do injetor centrífugo dual em função da pressão de injeção, empregando-se água como líquido de teste.

A Figura 10 compara os coeficientes de descarga teóricos e experimentais na câmara secundária do injetor centrífugo dual empregando-se água como líquido de teste.

Observa-se na Figura 9 que a vazão mássica experimental coincide com a solução analítica considerando os efeitos viscosos na faixa de operação (40 g/s). Nota-se ainda que em vazões inferiores a 25 g/s, a pressão de injeção é maior do que o valor teórico, pois de forma semelhante a câmara primária, ocorre uma diminuição do momento angular que resulta num aumento do coeficiente de descarga, como observado na Figura 10. Verifica-se ainda na Figura 9 que após o intervalo de pressões entre 0,2 até 1,7, o desvio da vazão mássica teórica em relação à experimental aumenta de forma acentuada, conseqüentemente, as perdas devido aos efeitos viscosos também aumentam, resultando no aumento do coeficiente de descarga, conforme a Figura 10. Este efeito pode ser devido à geometria do orifício de saída da câmara primária dentro da câmara secundária do injetor.

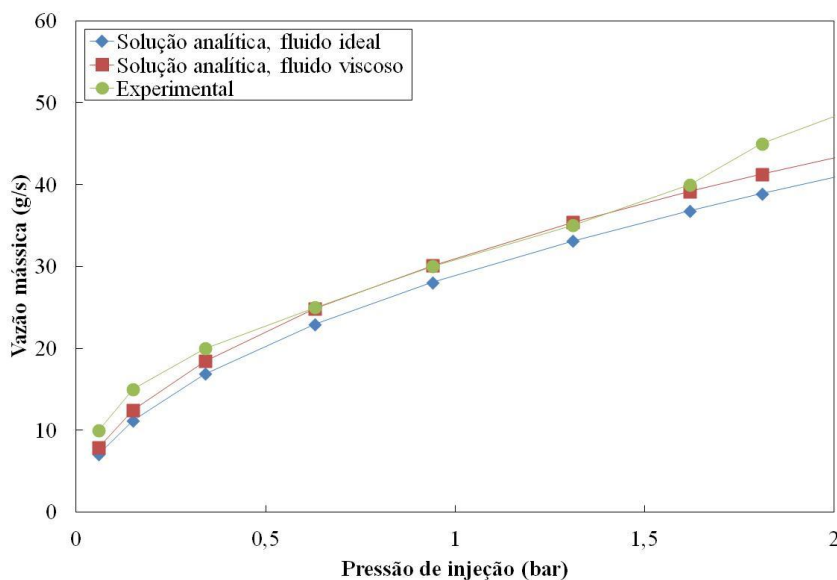


Figura 9. Valores teóricos e experimentais da vazão mássica de água na câmara secundária do injetor centrífugo dual em função da pressão de injeção (manométrica).

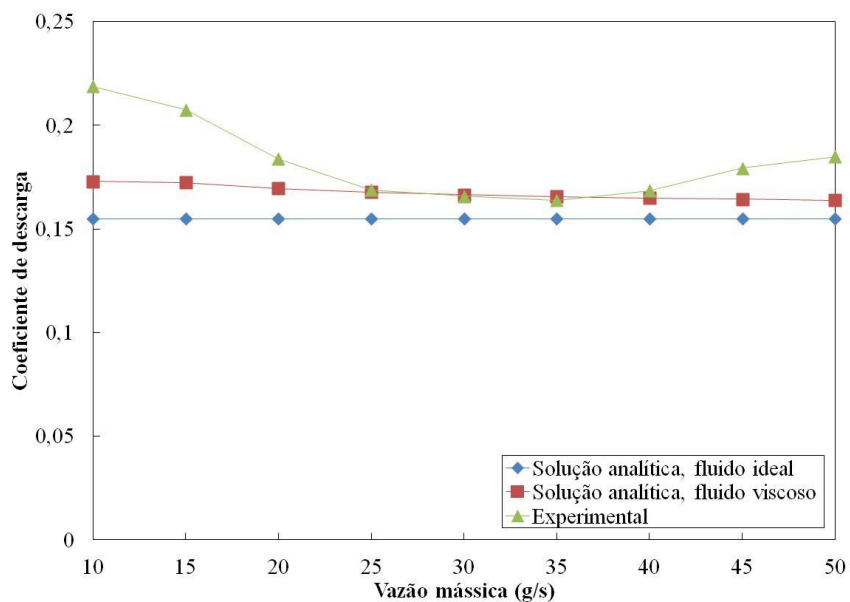


Figura 10. Comparação dos valores teóricos e experimentais do coeficiente de descarga no injetor externo empregando água.

4. CONCLUSÕES

Foram apresentados os resultados de uma investigação teórico-experimental de um injetor centrífugo dual visando atomização de etanol (C_2H_6O , 95% m/m) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2 , 90% m/m) em um propulsor bipropelente de 100 N. Determinaram-se as vazões mássicas e os coeficientes de descarga teóricos e experimentais em função da pressão de injeção nas duas câmaras do injetor, utilizando-se água e etanol como fluidos de teste. Os resultados teóricos tendo em conta os efeitos da viscosidade mostraram uma boa concordância com os resultados experimentais, especialmente nas condições de projeto do injetor.

5. REFERÊNCIAS

- Bayvel, L. and Orzechowski, Z., 1993, Liquid Atomization, Taylor & Francis, Washington, DC.
- Bazarov, V.; Vigor, Y. and Puri, P., 2004, Design and dynamics of jet and swirl injectors, liquid rocket thrust chambers: aspects of modeling, analysis, and design. United States of America: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Borodin, V. A.; Dityakin, Y. F.; Klyachko, L. A. and Yagodkin, V. L., 1967, Liquid Atomization, Mashinostroenie, Moscow.
- Fischer, G. A. A., 2014, Injetores centrífugos duais e jato-centrífugos para aplicação em propulsão de foguetes. Dissertação (Mestrado em combustão e propulsão), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil.
- Giffen, E. and Muraszew, A., 1953, Atomization of Liquid Fuels, Chapman and Hall, London.
- Lefebvre, A. H., 1989, Atomization and Sprays, Hemisphere, New York.
- Vásquez, A. R., 2011, Desenvolvimento de um injetor centrífugo dual para biocombustíveis líquidos. Dissertação (Mestrado em combustão e propulsão), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

DISCHARGE COEFFICIENTS OF A DUAL SWIRL INJECTOR FOR ATOMIZATION OF ETHANOL AND HYDROGEN PEROXIDE

Fischer, G. A. A., fischer@lcp.inpe.br¹

Andrade, J. C., andrade@lcp.inpe.br¹

Costa, F. S., fernado@lcp.inpe.br¹

¹National Institute for Space Research, Rodovia Presidente Dutra, Km 40, Cachoeira Paulista/SP - Brazil

Abstract. *Pressure swirl injectors are widely used in rocket engines due to its high efficiency of atomization in a reduce volume. This paper presents the results of a theoretical and experimental investigations of a dual swirl injector aimed at ethanol (C₂H₆O, 95% m/m) and hydrogen peroxide (H₂O₂, 90% m/m) atomization for a 100 N liquid bipropellant thruster. Mass flow rates and discharge coefficients of both chambers were determined experimentally using water and ethanol as the test fluids. The theoretical results showed good agreement with theoretical results.*

Keywords: *dual swirl injector, ethanol, H₂O₂, thruster.*