

CARACTERIZAÇÃO DE UM INJETOR JATO-CENTRÍFUGO PARA ATOMIZAÇÃO DE ETANOL E PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO

FISCHER, G. A. A.

fischer@lcp.inpe.br

COSTA, F. S.

fernando@lcp.inpe.br

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LCP – Laboratório Associado de Combustão e Propulsão
Rodovia Presidente Dutra, km 40, CEP 12.630-000
Cachoeira Paulista/SP – Brasil

RESUMO

Os processos de queima nos motores-foguete a propelentes líquidos dependem fortemente da qualidade da atomização. Injetores jato-centrífugos apresentam boa eficiência de atomização, formando um spray de cone sólido em um volume reduzido. Nesses injetores, a interação entre os escoamentos axial e centrífugo permite ajustar as características do *spray* de forma a se obter uma distribuição relativamente uniforme de gotas. Esse trabalho apresenta os resultados de uma investigação teórico-experimental de um injetor jato-centrífugo visando atomização de etanol (C_2H_6O , 95% m/m) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2 , 90% m/m) para aplicação em um propulsor bipropelente de 100 N. São determinadas as vazões mássicas, os coeficientes de descarga e os ângulos de cone dos *sprays* versus a pressão de injeção, utilizando-se água e etanol como fluidos de teste. Os resultados teóricos mostraram boa concordância com os resultados experimentais.

1. INTRODUÇÃO

O injetor é o elemento responsável pela atomização dos propelentes líquidos na câmara de combustão de um motor foguete.

Sabe-se que um dos métodos para melhorar a eficiência de combustão dos propelentes líquidos é reduzir o tamanho das gotas e, conseqüentemente, melhorar a qualidade da atomização. As gotas menores são necessárias para se obter uma rápida ignição e estabelecer uma frente de chama próxima ao cabeçote de injeção. As gotas maiores demoram mais tempo para queimar e, portanto, definem o comprimento da câmara de combustão. No entanto, gotas menores nem sempre são o único requisito desejável. Uma distribuição uniforme do tamanho de gotas é também necessária para produzir uma combustão estável [1].

Além disso, uma atomização eficiente permite aumentar significativamente as áreas superficiais dos propelentes líquidos, garantindo altas taxas de evaporação, mistura e queima.

O etanol e o peróxido de hidrogênio são dois propelentes que estão sendo investigados em diversos centros de pesquisas e universidades [2,3,4,5,6], devido, entre outros fatores, ao baixo impacto ambiental da combustão, à facilidade de manuseio e armazenamento, ao baixo custo, e à boa 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.

Os injetores podem ser classificados com base nos diversos métodos de conversão de energia, por exemplo, aplicação de uma queda de pressão, exposição do líquido a uma corrente de

gás a alta velocidade, aplicação de energia mecânica ou de outras formas de energia.

Os injetores que convertem a energia de pressão em energia cinética do líquido são também conhecidos como injetores por pressão. Estes podem ser do tipo jato, centrífugos ou jato-centrífugos.

Os injetores jato-centrífugos combinam as características dos injetores a jato e dos injetores centrífugos. Uma parte do líquido escoar como um jato axial e a outra parte como um jato com formato anelar em movimento centrífugo. A mistura do jato em uma seção transversal perpendicular ao eixo do jato pode ser arbitrariamente ajustada de acordo com a necessidade. Portanto, é possível obter também uma distribuição uniforme e uma maior eficiência na transferência de calor e massa entre as gotas e o meio ambiente. Esta característica torna os injetores jato-centrífugos vantajosos em muitas aplicações [7,8].

Esse trabalho apresenta, inicialmente, uma extensão do modelo teórico descrito por [7], para o caso de escoamento viscoso em injetores jato-centrífugos. Em seguida é apresentado o projeto do injetor com a nova formulação. Ao final são comparadas características de atomização teóricas e experimentais de um injetor jato-centrífugo para atomização de etanol e peróxido de hidrogênio em um propulsor de 100 N.

2. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS E PROJETO DO INJETOR

Os injetores jato-centrífugos apresentam cerca de 30 diferentes configurações, com ou sem inserto [7]. Os modelos sem inserto são similares aos injetores centrífugos simples, sendo constituídos de uma câmara de vórtice, um setor cônico e um orifício de descarga (Figura 1a). Neles ocorre a entrada de uma parcela de líquido por um orifício na base da câmara de vórtice, formando um jato axial, e a entrada de uma parcela de líquido por orifícios tangenciais, ao redor da câmara de vórtice, formando um jato centrífugo. Este jato com componente tangencial (jato centrífugo), ao entrar na câmara de vórtice, produz rotação no jato axial. Os injetores com inserto apresentam uma pré-câmara, uma seção com inserto, um setor cônico e um orifício de

descarga (Figura 1b). O fluido entra apenas por um único orifício na base do injetor (pré-câmara). Uma parcela do fluido passa por um canal no centro do inserto e outra parcela passa pelas ranhuras inclinadas ao redor do inserto, adquirindo movimento tangencial. O jato central adquire rotação em contato com o fluido em movimento tangencial (jato centrífugo) proveniente das ranhuras.

Os processos de transferência de massa e de quantidade de movimento entre as componentes centrífuga e axial nos injetores jato-centrífugos determinam a distribuição do líquido no orifício de descarga e a qualidade da atomização. Esta característica elimina a distribuição não uniforme típica dos injetores a jato e dos injetores centrífugos.

Isso permite uma maior vazão de líquido para uma mesma geometria, quando comparado a um injetor centrífugo, e garante a existência de gotas por toda a região do *spray*. Porém, os injetores jato-centrífugos tendem a oferecer uma atomização mais grosseira no centro e mais fina na periferia do *spray*.

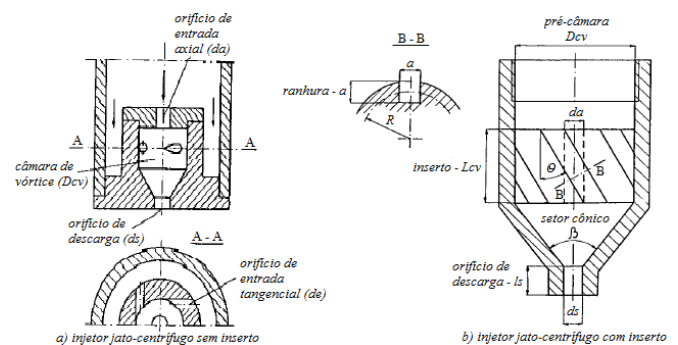


Figura 1. Esquemas de injetores jato-centrífugos (adaptado de [7]).

A Figura 2 apresenta um esquema do escoamento através de um injetor jato-centrífugo sem inserto.

Na saída da seção cônica do injetor, no limite entre os jatos centrífugo e axial, uma camada limite turbulenta desenvolve-se e apresenta significativa tensão de cisalhamento. Nesta região ocorre a equalização das componentes axiais e tangenciais da velocidade de ambos os jatos. O processo turbulento dentro do injetor não causa apenas a troca de quantidade de movimento e de energia, mas também troca de massa entre os jatos. Uma solução teórica não

existe para este processo e então se utilizam soluções empírico-teóricas [7].

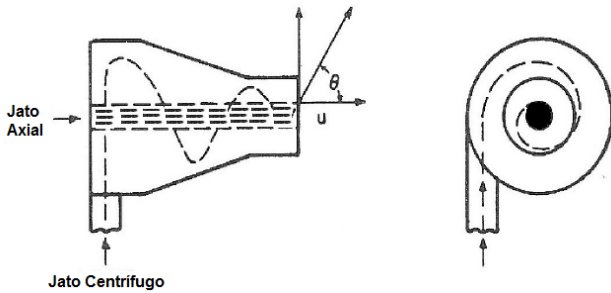


Figura 2. escoamento de líquido através de um injetor jato-centrífugo sem inserto.

As seguintes hipóteses são consideradas para análise do escoamento de líquido ideal dentro de um injetor jato-centrífugo [7]:

- O escoamento estável e axissimétrico;
- Sem efeitos da gravidade;
- Sem componente radial de velocidade;
- Escoamento turbulento dentro do injetor e, portanto, distribuições de velocidade aproximadamente uniformes;
- Uma distribuição de velocidade comum para ambos os jatos desenvolve-se em uma curta distância, equivalente a três vezes o diâmetro do orifício de saída, a partir do ponto onde os jatos se encontram;
- A distribuição da componente tangencial na saída do orifício de descarga satisfaz à equação de uma linha reta (vórtice rígido);

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

$$K = \frac{R}{r_s} \operatorname{sen} \theta \frac{A_s A_t}{(A_t + A_t)^2} \quad (1)$$

onde R é o raio do centro até o canal de entrada tangencial (raio centrífugo), r_s o raio do orifício de descarga, θ é o ângulo das ranhuras do inserto ou dos orifícios laterais ($\theta = 90^\circ$, se forem tangenciais), $A_t = n\pi r_c^2$ a área total dos canais de entrada tangencial e n é o número de canais de entrada tangencial.

Outros parâmetros importantes dos injetores jato-centrífugos são o coeficiente de preenchimento (ε), o coeficiente de descarga (μ) e o ângulo de cone do *spray* (α). Todos esses parâmetros estão relacionados diretamente com K pelas equações [7]:

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

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

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{2\varepsilon K}{2 - \varepsilon} \quad (4)$$

A solução analítica sem efeitos viscosos é apresentada na Figura 3.

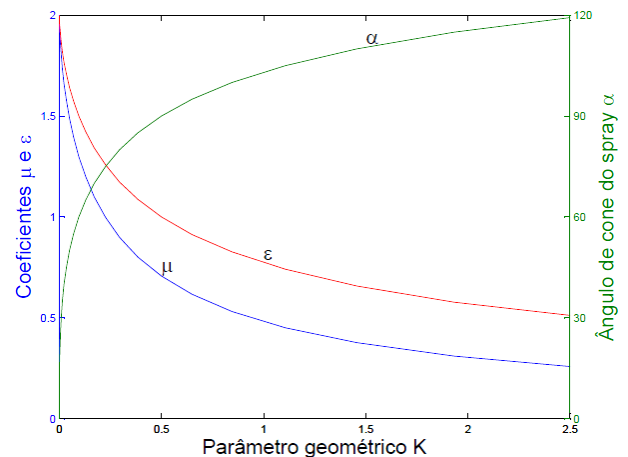


Figura 3. Comportamento do ângulo de cone do *spray* e dos coeficientes de descarga e de preenchimento do injetor em função do parâmetro geométrico (caso ideal, sem efeitos viscosos).

A solução analítica para o escoamento de líquido viscoso dentro de um injetor centrífugo foi formulada por [9] e adaptada para o caso de um injetor jato-centrífugo [10]. Nela o parâmetro geométrico (K) é dado por:

$$K = \frac{R r_s \operatorname{sen} \theta}{\frac{(A_t + A_t)^2}{\pi A_t} + \left(\frac{\lambda}{2}\right) R \operatorname{sen} \theta \frac{(A_t + A_t)}{A_t} (R - r_s)} \quad (5)$$

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

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

Uma vez que não existem dados para coeficientes de atrito em injetores jato-centrífugos, utilizou-se a Equação (6) para injetores centrífugos simples, válida para $Re = 10^3$ - 10^5 . Os valores de λ determinados a partir dessa equação são significativamente maiores do que a partir de outras equações comumente utilizadas em sistemas hidráulicos [11].

3. PROJETO DO INJETOR JATO-CENTRÍFUGO

Foi projetado um injetor jato-centrífugo sem inserto conforme procedimento de cálculo descrito por [10].

As Figuras 4 e 5 apresentam um desenho esquemático e uma imagem do injetor fabricado, respectivamente.

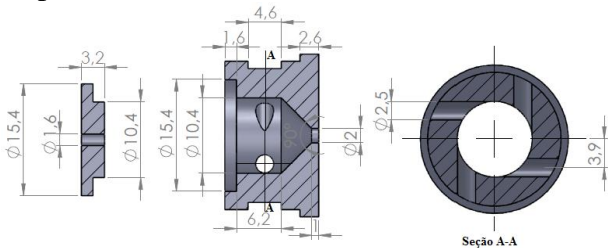


Figura 4. Desenho esquemático do injetor jato-centrífugo (dimensões em mm).

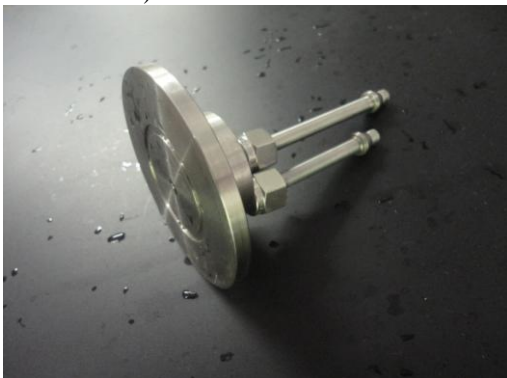


Figura 5. Imagem do injetor jato-centrífugo fabricado.

A Tabela 1 apresenta um resumo geral das dimensões do injetor e a Tabela 2 apresenta um resumo geral das características do injetor.

Tabela 1. Dimensões do injetor jato-centrífugo.

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

Tabela 2. Características do injetor jato-centrífugo.

Dados de entrada				
Queda de pressão – ΔP (MPa)	0,253			
Vazão mássica – \dot{m} (g/s)	50,269			
Ângulo de cone do <i>spray</i> – α (°)	90			
Fluido	Etanol / H ₂ O ₂		Água	
Viscosidade dinâmica (cP)	1,144		1	
Densidade (kg/m ³)	1224,7		1000	
Parâmetros geométricos do injetor				
Fluido	Ideal		Viscoso	
Propelente	Etanol / H ₂ O ₂	Água	Etanol / H ₂ O ₂	Água
Coefficiente de atrito (λ)	0	0	0,056	0,054
Número de Reynolds (Re)	0	0	8684,2	9448,5
Ângulo de cone do <i>spray</i> – α (°)	90	90	89,136	89,17
Coefficiente de descarga (μ)	0,707	0,707	0,716	0,716
Coefficiente de preenchimento (ε)	1	1	1,015	1,014
Parâmetro geométrico (K)	0,5	0,5	0,477	0,478
Velocidade de injeção (m/s)	14,381	15,915	14,576	16,025
Vazão mássica \dot{m} (g/s)	50,269	50,269	50,947	50,921

4. COEFICIENTES DE DESCARGA

Em injetores jato-centrífugos, as características dos escoamentos axial e centrífugo são de fundamental importância, pois elas governam a transferência de massa e de quantidade de movimento e determinam a distribuição do líquido na seção transversal do orifício de descarga, bem como o ângulo de cone do *spray* e, em consequência, a qualidade da atomização. Portanto, é de grande interesse prático analisar as relações que existem entre as características internas e externas do escoamento e as variáveis de projeto, tais como o coeficiente de descarga, ângulo de cone do *spray*, tamanho médio das gotas e a constante geométrica do injetor.

O coeficiente de descarga de um injetor é definido como a razão entre a vazão nominal pela vazão mássica teórica máxima:

$$\mu = \frac{\dot{m}_{\text{exp}}}{\dot{m}} \quad (7)$$

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

$$\dot{m} = \pi r_s^2 \sqrt{2\rho\Delta P} \quad (8)$$

Para injetores jato-centrífugos, um coeficiente de perda total, $\sum \delta$, pode ser introduzido na equação do coeficiente de descarga que toma a seguinte forma:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\frac{4K^2}{(2-\varepsilon)^2} + \frac{1}{\varepsilon^2} + \sum \delta}} \quad (9)$$

Segundo [7], para este tipo de injetor o coeficiente de perda total é dado por:

$$\sum \delta = 1,1K^{0,32} \text{Re}^{-0,11} \quad (10)$$

Devido às perdas viscosas no escoamento e por atrito nas paredes do injetor, a vazão mássica real é diferente da vazão mássica teórica. Para determinar a vazão mássica real, em regime

permanente, mede-se a quantidade de volume que sai do injetor mediante o emprego de rotômetros inseridos pouco antes da alimentação do injetor.

As Figuras 6 e 7 mostram um desenho esquemático e uma imagem da bancada testes utilizada nos experimentos, respectivamente.

Os testes foram realizados, inicialmente, com o emprego de água em ambos os orifícios de entrada axial e tangencial (jatos axial e centrífugo) para obtenção dos resultados apresentados nas Figuras 8 e 9. Em seguida, os mesmos testes foram realizados com o emprego de etanol no orifício de entrada axial (jato axial) e água nos orifícios de entrada tangencial (jato centrífugo) para obtenção dos resultados apresentados nas Figuras 10 e 11.

Não foi possível utilizar peróxido de hidrogênio como fluido de teste com o objetivo de simular a condição real devido ao alto grau de oxidação e a condições de segurança.

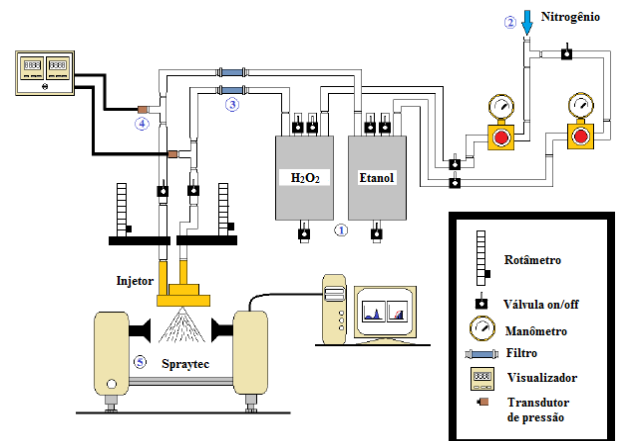


Figura 6. Desenho esquemático da bancada de testes utilizada nos experimentos.



Figura 7. Imagem da bancada de testes utilizada nos experimentos.

As Figuras 8 e 9 mostram os valores experimentais da pressão de injeção em função da vazão mássica do jato axial, mantendo-se fixa a vazão do jato centrífugo na condição de trabalho (40 g/s) utilizando-se apenas água e etanol / água como fluidos de teste, respectivamente.

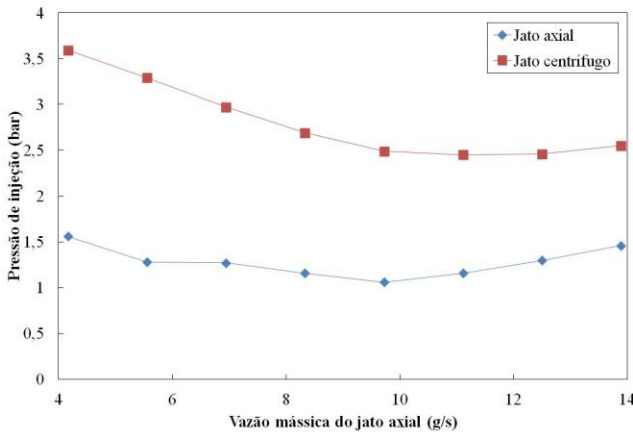


Figura 8. Valores experimentais da pressão de injeção (manométrica) em função da vazão mássica do jato axial no injetor jato-centrífugo utilizando apenas água.

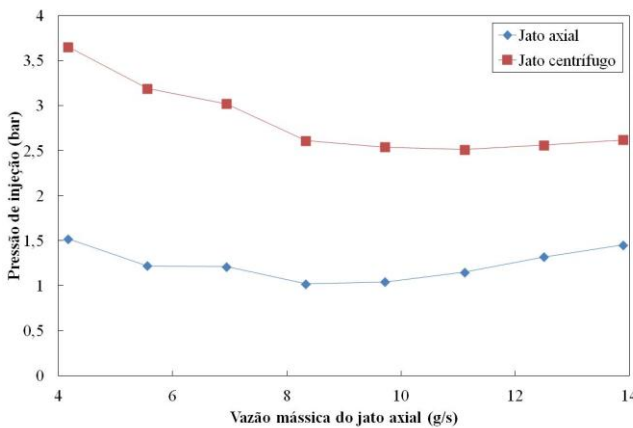


Figura 9. Valores experimentais da pressão de injeção (manométrica) em função da vazão mássica do jato axial no injetor jato-centrífugo.

As Figuras 10 e 11 comparam os coeficientes de descarga teóricos e experimentais em função da vazão mássica do jato axial, mantendo fixa a vazão do jato (fluxo) centrífugo na condição de trabalho (40 g/s), utilizando-se apenas água e etanol / água como fluidos de teste, respectivamente.

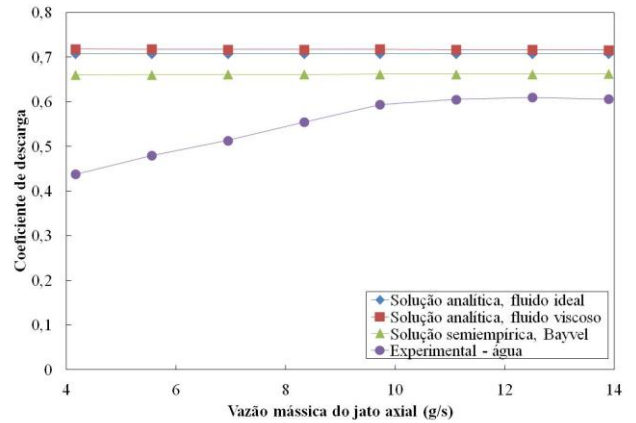


Figura 10. Valores teóricos e experimentais do coeficiente de descarga em função da vazão mássica do jato axial no injetor jato-centrífugo utilizando-se apenas água.

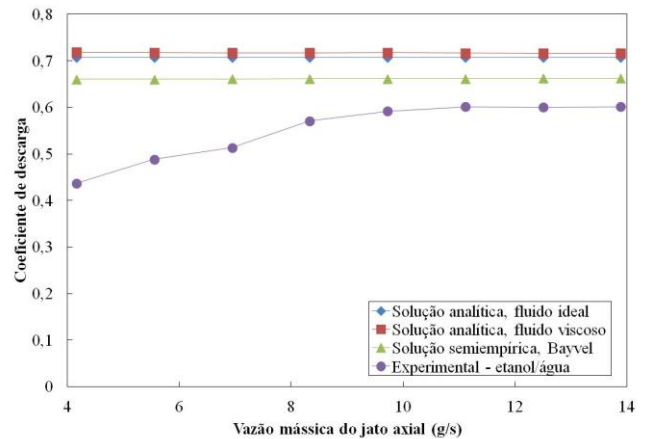


Figura 11. Valores teóricos e experimentais do coeficiente de descarga em função da vazão mássica do jato axial no injetor jato-centrífugo.

Observa-se nas Figuras 8 e 9 que a pressão de injeção do injetor diminui com o aumento da vazão do jato axial atingindo o menor valor na condição de trabalho do injetor (50 g/s = 10 g/s jato axial + 40 g/s jato centrífugo) e então volta a subir gradativamente. Verificou-se nos experimentos que o injetor apresentou instabilidades no escoamento na faixa de vazão mássica entre 6 e 10 g/s e esta foi notada de forma acentuada quando empregou-se etanol no jato axial, conforme observado nas pequenas oscilações da pressão de injeção presentes na Figura 9. Essa instabilidade pode ocorrer em faixas de operação distintas que dependem diretamente da vazão do jato centrífugo. Essa instabilidade ocorre sempre próximo ao limite em que ambos os escoamentos unem-se formando

um único jato na saída do orifício de descarga, ou seja, quando $\varepsilon \rightarrow 1$, $\mu \rightarrow 0,7$ e $\alpha \rightarrow 90^\circ$.

Verifica-se nas Figuras 10 e 11, que as soluções analíticas para o coeficiente de descarga não concordam com o experimento. Isso significa que os efeitos viscosos atenuam a quantidade de movimento angular do jato resultante como pode ser observado pela equação semiempírica de Bayvel e Orzechowski. O coeficiente de descarga obtido experimentalmente foi 8,5% menor do que o coeficiente de descarga obtido pela equação de Bayvel e Orzechowski. Os resultados para água e etanol foram semelhantes, pois suas propriedades físico-químicas não são muito diferentes.

Segundo [12], quanto maior for o diâmetro do orifício de entrada axial maior será o coeficiente de descarga. Isso é devido ao fato de que, para uma dada queda de pressão, a maior vazão mássica do jato axial provoca uma diminuição das componentes axiais e tangenciais da velocidade do jato centrífugo. Sob esta situação, a força centrífuga do escoamento no interior do injetor é reduzida com uma subsequente redução na queda de pressão. Isso resulta em um aumento do coeficiente de descarga.

5. ÂNGULOS DE CONE DO SPRAY

Na maioria das aplicações a função do injetor não é meramente desfragmentar o líquido em pequenas gotas, mas também distribuir essas gotas para o ambiente na forma de um *spray* uniforme e simétrico. Nos injetores a jato, o ângulo de cone do *spray* é estreito e as gotas são relativamente uniformes e dispersas por todo o volume do *spray*. O *spray* dos injetores a jato são frequentemente descritos como “sólidos”. Em injetores centrífugos, o *spray* é gerado na forma de um cone oco com amplo ângulo e a maioria das gotas está concentrada na periferia. É possível produzir *spray* “sólido” ou de cone “sólido” combinando as características dos injetores a jato e injetores centrífugos, através dos injetores jato-centrífugos (ver Figura 12).

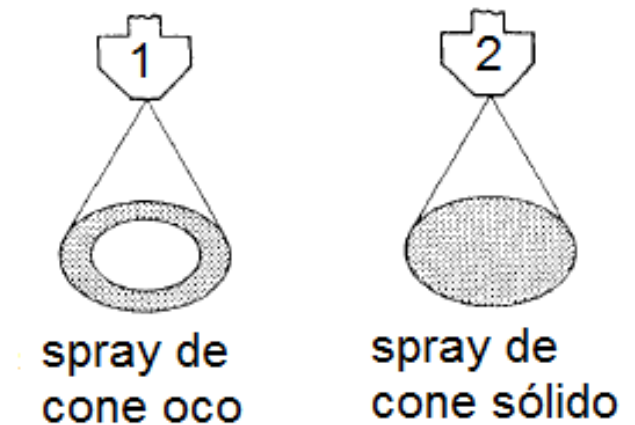


Figura 12. Padrões de *sprays* gerados por injetores: (1) centrífugos e (2) jato-centrífugos.

O arranjo experimental consiste de um suporte com uma haste onde o injetor é fixado através de uma garra de forma a mantê-lo suspenso e alinhado na posição vertical. Essa haste é marcada com uma fita preta para indicar um comprimento de referência para se obter uma relação entre a quantidade de píxeis e o comprimento verdadeiro da imagem, necessário para realizar as medidas do ângulo de cone do *spray* com precisão. A Figura 13 mostra uma imagem do experimento para determinação do ângulo de cone do *spray* através de técnicas fotográficas.

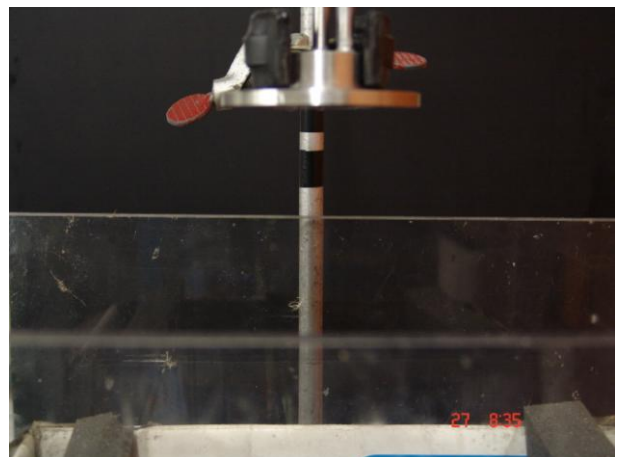


Figura 13. Arranjo experimental para determinação do ângulo de cone do *spray*.

As fotografias são obtidas por meio de uma câmara digital da Sony modelo DSC-F828 que tem uma capacidade de resolução de 8 megapíxeis. Esta câmara consegue gravar imagens no tamanho de até 3264 x 2448 píxeis em formatos RAW, TIFF e JPEG.

As imagens obtidas durante os testes foram tratadas através de um software desenvolvido por [13] para o processamento de imagens. Esse software foi desenvolvido através de uma interface GUI (Graphical User Interface) da linguagem Matlab e as imagens tratadas podem estar nos formatos JPEG, TIFF ou BMP. Após selecionar as imagens, é realizado o seu processamento utilizando um software desenvolvido em linguagem Matlab por [13] para esta finalidade. O software determina o ângulo de cone do *spray* de cada imagem, conforme Figura 14, e então a partir desses dados são construídos gráficos para comparação dos resultados teóricos com os experimentais.

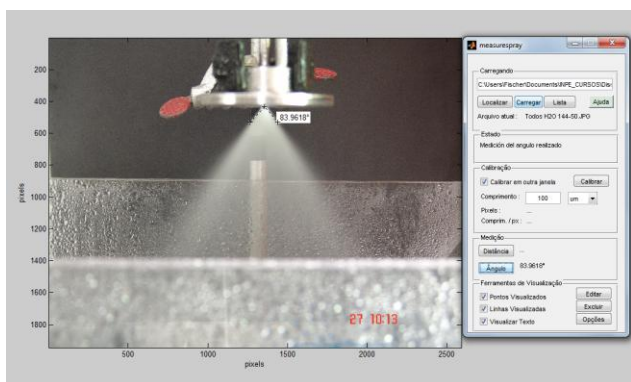


Figura 14. GUI para processamento da imagem.

A Figura 15 apresenta uma imagem do injetor jato-centrífugo operando na condição de trabalho na qual ele foi projetado.

Na Figura 16 são apresentados os valores teóricos e experimentais do ângulo de cone do *spray* resultante obtido a partir da injeção de água e etanol, respectivamente, no orifício de entrada axial (jato axial). Nas duas condições, manteve-se fixa a vazão do jato centrífugo na condição de trabalho (40 g/s).

Observa-se na Figura 16 que o valor teórico obtido para o ângulo de cone do *spray* ficou muito próximo ao valor experimental, sendo este cerca de 10% maior do que o valor calculado na condição de trabalho. Ainda na Figura 16, observa-se que o maior ângulo de cone do *spray* é obtido com o uso de água no jato axial devido à viscosidade da água ser menor que a do etanol.

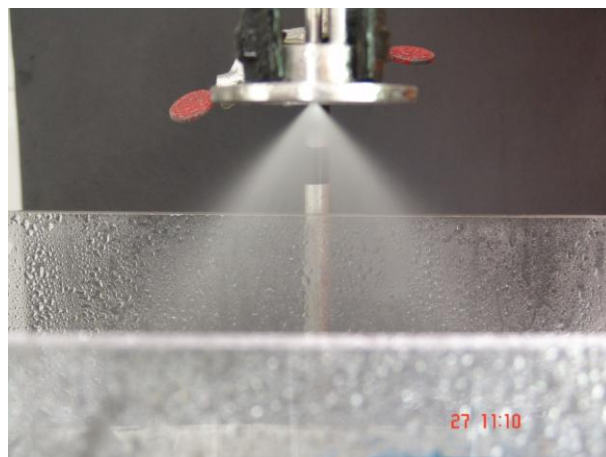


Figura 15. Injetor jato-centrífugo operando na condição de trabalho.

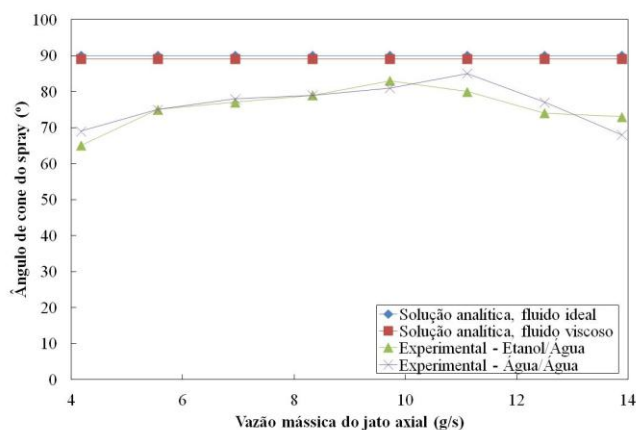


Figura 16. Valores teóricos e experimentais do ângulo de cone do *spray* em função da vazão mássica do jato axial.

Observa-se na Figura 16 que para vazões mássicas do jato axial acima da condição de trabalho (10 g/s), o ângulo de cone do *spray* apresenta uma leve diminuição. A explicação para essa observação é que a uma pressão mais elevada do jato axial leva a menores valores das componentes radial e tangencial da velocidade e, por conseguinte, a película líquida resultante na saída do injetor é contraída e o ângulo de cone do *spray* diminui.

CONCLUSÕES

Foram apresentados os resultados de uma investigação teórico-experimental de um injetor jato-centrífugo 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, os coeficientes de descarga e os ângulos de cone

dos *sprays* teóricos e experimentais em função da pressão de injeção no injetor jato-centrífugo, 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.

REFERÊNCIAS

- [1] KHAVKIN, Y. I., 2004, **Theory and practice swirl atomizers**. New York: Taylor & Francis.
- [2] PLUMLEE, D. and STECIAK J., 2004. **Development of a monopropellant micro-nozzle and ion mobility spectrometer in LTCC**. In: CERAMIC INTERCONNECT TECHNOLOGY WORKSHOP, 27-28 de Abr. de 2004, Denver CO. Proceedings... Denver: [s.n].
- [3] WERNIMONT, E. J., 2006. **Monopropellant hydrogen peroxide rocket system: optimum for small scale** In: AIAA/ASME/SAE/JOINT PROPULSION CONFERENCE & EXHIBIT, n. 42, 9 – 12 de Jun de 2006, Sacramento CA. Proceedings... Sacramento: AIAA.
- [4] LOPES, R., 2010. **Rocket Engine Powered by Ethanol is Already a Reality**. 9 Jun. 2013. <http://www.edgeofspace.org/artigo_revista_aeb.pdf>
- [5] MAIA, F. F., 2012, **Novo catalisador para decomposição de peróxido de hidrogênio em micropropulsores de satélites**. Dissertação (Mestrado em Propulsão e Combustão) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil.
- [6] MATOS, S. C., 2013, **Ensaio em câmara de combustão com injetor centrífugo bipropelente líquido criogênico**. Dissertação (Mestrado em Aerodinâmica, Propulsão e Energia) – Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil.
- [7] BAYVEL, L. and ORZECOWSKI, Z., 1993, **Liquid Atomization**, Taylor & Francis, Washington, DC.
- [8] PRYWER, J., 2008, **Flow Characteristics of Jet-Swirl Atomizers**. *Atomization and Sprays*, v. 18, p. 343 – 361.
- [9] KLYACHKO, L. A., 1962, **The theory of a centrifugal injector**. *Teploenergetica*, n.3, p. 34 – 38. Original em russo.
- [10] FISCHER, G. A. A., 2014, **Injetores centrífugos duais e jato-centrífugos para aplicação em propulsão de foguetes**. Dissertação (Mestrado em Propulsão e Combustão) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil.
- [11] 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.
- [12] HAMID, A. H. A.; ATAN, H., 2009, **Spray characteristics of jet-swirl nozzles for thrust chamber injector**. *Aerospace Science and Technology*, v. 13, p. 192 – 196.
- [13] VÁSQUEZ, A. R., 2011, **Desenvolvimento de um injetor centrífugo dual para biocombustíveis líquidos**. Dissertação (Mestrado em Propulsão e Combustão) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil.