

DESENVOLVIMENTO DE UM INJETOR CENTRÍFUGO DUAL PARA BIOCOMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS

Roger Apaza Vásquez
roger@lcp.inpe.br

Fernando de Souza Costa
fernando@lcp.inpe.br

Laboratório de Combustão e Propulsão - LCP
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE,
12630-000, Cachoeira Paulista, SP, Brasil

Resumo: *Os injetores centrífugos duais utilizam duas câmaras concêntricas e são geralmente utilizados para processos de combustão industriais e em motores de foguetes a propelentes líquidos. Estes injetores geram uma boa atomização do líquido combustível em um espaço reduzido comparados a outros tipos de injetores. Este trabalho apresenta uma análise teórica e o projeto de um injetor centrífugo dual para utilização com biocombustíveis líquidos.*

Palavras-chave: *injetor centrífugo dual, atomização, biocombustível*

1 Introdução

A transformação de líquidos em nuvens de gotas (sprays) ou em atmosferas gasosas possui aplicações que vão desde a indústria até a medicina. Vários tipos de dispositivos têm sido desenvolvidos, os quais são denominados atomizadores, nebulizadores, injetores ou bocais.

O processo de atomização é aquele em que um jato, folha ou filme líquido é desintegrado pela energia cinética do próprio líquido, pela exposição a uma corrente de ar ou gás de alta velocidade ou, ainda, como resultado de energia mecânica externa aplicada através de dispositivos rotativos ou vibratórios. Devido à natureza aleatória do processo de atomização, o spray resultante é usualmente caracterizado por um largo espectro de tamanhos de gotas.

A combustão de combustíveis líquidos em motores diesel, motores a ignição por centelha, turbinas, motores foguete e fornalhas industriais são dependentes de uma atomização eficiente para aumentar a área superficial específica do combustível e atingir altas taxas de mistura e evaporação. Na maioria dos sistemas de combustão, a redução do diâmetro médio da gota leva a altas taxas volumétricas de liberação de calor, à facilidade de acendimento e a uma larga faixa de queima e baixa concentração de poluentes.

Existem vários processos básicos associados à maioria dos métodos de atomização. Por exemplo, o escoamento no interior do atomizador governa a turbulência no combustível líquido ejetado. O desenvolvimento do jato ou da lâmina de líquido na saída do injetor e o crescimento de pequenas perturbações conduzem à desintegração em ligamentos e depois em gotas. Estes fenômenos são de importância fundamental para a determinação da forma e da penetração do spray resultante, assim como do número, da velocidade e da distribuição do tamanho das gotas formadas. Todas estas características são bastante afetadas pela geometria interna do atomizador, pelas propriedades do meio gasoso e pelas propriedades físicas do líquido. Por exemplo, uma maior viscosidade do líquido inibe o crescimento de instabilidades hidrodinâmicas e atrasa o início da desintegração do jato líquido saindo do injetor. Na maioria dos casos, a turbulência no líquido, a cavitação no bocal e a interação aerodinâmica com o meio gasoso, que aumenta com a densidade do meio, contribuem para a atomização (Lefebvre, 1989).

Biocombustíveis são fabricados a partir de vegetais tais como milho, soja, cana de açúcar, mamona, canola, babaçu e cânhamo, dentre outros. O lixo orgânico também pode ser usado para a fabricação de biocombustível. Podem ser usados diretamente em câmaras de combustão ou misturados a combustíveis fósseis. Uma vantagem potencial do uso dos biocombustíveis é a redução significativa da emissão de gases poluentes. Os biocombustíveis são uma fonte de energia renovável ao contrário dos combustíveis fósseis como óleo diesel, gasolina, querosene e carvão mineral.

Neste trabalho, projeta-se um injetor centrífugo dual usando biocombustíveis (etanol e biodiesel) como líquidos para o processo de atomização. Algumas características físicas destes líquidos estão resumidas na tabela 1.

Tabela 1. Propriedades físicas dos biocombustíveis.

Propriedade do combustível	Etanol ¹	Biodiesel ²
Densidade, kg/m ³	789,42	870
Viscosidade, mPa - s	1,2	5
Tensão superficial, N/m	0,02203	0,0344

¹Encyclop. of Chemical Processing and Design, Vol 19, pp 446.

²Biodiesel handling and use guidelines Energy Efficiency and Renewable Energy DOE/GO-102006-2358, third edition, September 2006.

2. Considerações teóricas e análise do projeto

2.1. Funcionamento de injetores centrífugos duais

Um injetor centrífugo dual (pressure swirl dual) tem duas câmaras de turbilhonamento separadas, uma para o conjunto primário e a outra para o conjunto secundário de orifícios. Ver figura 1. As duas câmaras são alinhadas concentricamente de forma que suas gargantas despejam o líquido em uma garganta comum. Na operação com apenas um líquido, em baixas vazões, todo o líquido passa através da câmara e da garganta internas. Em altas vazões o líquido continua a fluir pela garganta primária, mas a maioria do líquido passa através da garganta secundária exterior, que é projetada para vazões muito mais altas. Assim como no injetor centrífugo do tipo duplo, quando a válvula abre para o escoamento secundário existe uma faixa de operação em que a atomização é bastante pobre. O atomizador centrífugo dual oferece maior flexibilidade do que um atomizador centrífugo do tipo duplo. Por exemplo, pode-se projetá-lo para que o spray primário e o spray secundário se fundam formando um spray único. Alternativamente pode ser projetado para que o spray primário e o secundário tenham ângulos de abertura diferentes, sendo o primeiro otimizado para baixas vazões e o segundo para altas vazões.

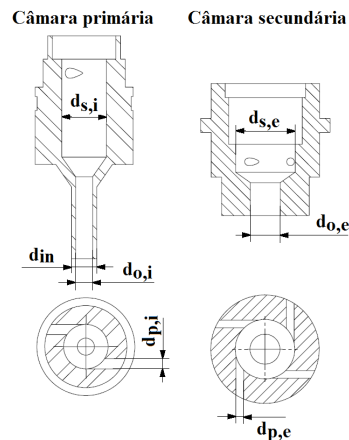


Figura 1. Esquema de um injetor centrífugo dual.

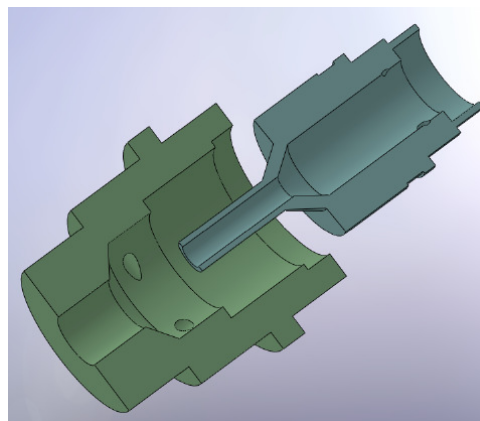


Figura 2. Vista em corte das câmaras do injetor.

2.2. Desenvolvimento teórico

Apresenta-se a seguir um desenvolvimento teórico para projetar injetores centrífugos duais. Os subscritos “i” e “e” indicam o injetor interno e externo, respectivamente. A análise apresentada para a câmara primária baseia-se nos estudos realizados por Lefebvre (1989) para injetores centrífugos simples.

Ritz e Lefebvre derivaram a seguinte relação experimental para o coeficiente de descarga em função dos parâmetros geométricos de injetores centrífugos simples:

$$C_{D,i} = 0,35 \left(\frac{A_{p,i}}{d_{s,i}d_{o,i}} \right)^{0,5} \left(\frac{d_{s,i}}{d_{o,i}} \right)^{0,25} \quad (1)$$

onde $C_{D,i}$ é o coeficiente de descarga, $A_{p,i}$ área total dos furos de entrada tangencial, $d_{s,i}$ diâmetro da câmara de turbulência e $d_{o,i}$ diâmetro interno do orifício de saída para o injetor interno.

Analisando as equações de conservação, obtém-se a seguinte relação para um injetor centrífugo simples:

$$\Delta P_{L,i} = \frac{1}{2} \rho_{L,i} \left[\left(\frac{\dot{m}_{L,i} r_{s,i}}{\rho_{L,i} A_{p,i} r_{a,i}} \right)^2 + \left(\frac{\dot{m}_{L,i}}{\rho_{L,i} (A_{o,i} - A_{a,i})} \right)^2 \right] \quad (2)$$

onde $\Delta P_{L,i}$ é a diferença de pressão aplicada sobre o líquido injetado na câmara primária, $\rho_{L,i}$ é a densidade do líquido da câmara primária, $r_{s,i}$ e $r_{a,i}$ são os raios da câmara de turbulência e de ar, respectivamente, $A_{o,i}$ e $A_{a,i}$ são a área transversal do orifício interno e a área de passagem do ar, respectivamente, da câmara primária.

A vazão mássica do líquido na câmara primária é dada por:

$$\dot{m}_{L,i} = C_{D,i} A_{o,i} \sqrt{2 \rho_{L,i} \Delta P_{L,i}} \quad (3)$$

Substituindo a Eq. (3) em (2), obtém-se uma relação para o coeficiente de descarga,

$$\frac{1}{C_{D,i}^2} = \frac{1}{K_i^2 X_i} + \frac{1}{(1-X_i)^2} \quad (4)$$

onde $K_i = \frac{A_{p,i}}{\pi r_{o,i} r_{s,i}}$ e $X_i = \frac{A_{a,i}}{A_{o,i}}$.

Aplicando a condição de vazão mássica máxima, $\frac{d}{dX} (1/C_{D,i}^2) = 0$, tem-se

$$C_{D,i} = \left[\frac{(1-X_i)^3}{1+X_i} \right]^{0,5} \quad (5)$$

Giffen e Muraszew observaram que a Eq. 5, fornece valores muito baixos para o coeficiente de descarga em comparação com os dados experimentais. Para ajustar aos dados experimentais eles introduziram uma constante na Eq. 5:

$$C_{D,i} = 1,17 \left[\frac{(1-X_i)^3}{1+X_i} \right]^{0,5} \quad (6)$$

No caso da câmara externa, considera-se uma análise similar à câmara interna, com algumas alterações:

$$\Delta P_{L,e} = \frac{1}{2} \rho_{L,e} \left[\left(\frac{\dot{m}_{L,e} (d_{s,e}/2)}{\rho_{L,e} A_{p,e} r_{a,e}} \right)^2 + \left(\frac{\dot{m}_{L,e}}{\rho_{L,e} (A_{o,e} - A_{a,e})} \right)^2 \right] \quad (7)$$

A vazão mássica na câmara secundária é:

$$\dot{m}_{o,e} = C_{D,e} (A_{o,e} - A_{in}) \sqrt{2 \rho_{L,e} \Delta P_{L,e}} \quad (8)$$

Substituindo a equação 8 em 7, tem-se,

$$\frac{1}{C_{D,e}^2} = \left[\frac{\pi (A_{o,e} - A_{in})^2 (1 + X_e)}{K_e X_e A_{o,e}} + \frac{(A_{o,e} - A_{in})^2 (1 + X_e)^2}{(A_{o,e})^2} \right] \quad (9)$$

onde $K_e = \left(\frac{2 A_{p,e}}{d_{s,e}} \right)^2$ e $X_e = \frac{A_{a,e}}{A_{o,e} - A_{a,e}}$

Novamente, aplicando as condições de vazão máxima, tem -se:

$$C_{D,e} = \frac{A_{o,e}}{(A_{o,e} - A_{in})(1 + X_e)} \frac{1}{\sqrt{2X_e + 1}} \quad (10)$$

Os valores experimentais calculados dos números de Reynolds, Re , e Weber, We , tanto para a câmara interna como externa são calculados de acordo com as definições

$$Re = \frac{\rho_L V L}{\mu} \text{ e } We = \frac{\rho_a V^2 L}{\sigma} \quad (11)$$

onde μ e σ são a viscosidade e tensão superficial do líquido respectivamente, e ρ_a é densidade do ar.

Para o caso do injetor interno o comprimento característico L é igual a seu diâmetro interno de saída, e para o diâmetro externo define-se como $d_{o,e} - d_{in}$, como se ilustra na figura 1. As velocidades características V são iguais as velocidades axiais dos bicos de saída.

Conhecendo a vazão mássica que ingressa na câmara de turbulência, pode-se calcular a velocidade axial do injetor interno:

$$V_{ax,i} = \frac{\dot{m}_{L,i}}{\rho_{L,i}(A_{o,i} - A_{a,i})} = \frac{\dot{m}_{L,i}}{\rho_{L,i} A_{o,i} (1 - X_i)} \quad (12)$$

Para o caso do injetor externo o cálculo da velocidade axial é análogo.

3. Resultados

A Tabela 2 apresenta os dados utilizados para o projeto de um injetor centrífugo dual para atomização de biocombustíveis. Um algoritmo desenvolvido em linguagem Matlab foi utilizado para obter os resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 2. Dados iniciais

	Interno	Externo
Combustíveis	biodiesel	etanol
Vazão mássica [kg/h]	70	150
Diâmetro de saída do injetor [mm]	2	5,8
Diâmetro da câmara de turbulência do injetor [mm]	6	9
Diâmetro do furo de entrada tangencial do injetor [mm]	1,2	1,5
Número de furos tangenciais	2	4
Diâmetro externo do orifício da câmara interna [mm]	3,65	
Temperatura de operação [°C]	20	

Tabela 3. Resultados obtidos.

	Interno	Externo
Velocidade axial, V_{axial} [m/s]	19,59	12,95
Número de Reynolds, Re [-]	6820,2	20181
Número de Weber, We [-]	26,79	19,63
Dif. de Pressão, ΔP [bar]	7,67	2,64
Ângulo de cone, θ [°]	62,18	60

4. Conclusões

Este trabalho apresentou o desenvolvimento um procedimento de cálculo para o projeto de injetores centrífugos duais. Os resultados apresentados foram obtidos através de um programa escrito em linguagem Matlab. Para o biodiesel utilizado na câmara interna o número de Reynolds é relativamente baixo, devido ao valor alto de viscosidade apresentado por este biocombustível.

Os trabalhos futuros para este projeto, seram estudar os tamanos das gotas característicos gerados pelos injetores interno e externo usando variações na vazão mássica e as pressões de operação para os biocombustíveis utilizados.

Referências

- Chen, S. K., Lefebvre, A. H. and Rollbulher, J., Factors influencing the effective spray cone angle of pressure – swirl atomizers, *Journal of Engineering for gas turbines and power*, Vol. 114, pp. 97 – 103, January 1992.
- Lefebvre, A. H., *Atomization and sprays*, McGraw-Hill, New York, NY, 1989.
- Moon, S., Bae, C. and Abo-Serie, E., Estimation of the breakup length for a pressure-swirl spray from the experimentally measured spray angle, *Atomization and Sprays*, Vol. 3, pp. 235 – 246, 2009.
- Omni, F., Hosseinalipour, S. M., Kargar, M. Movahed, E., Nekofar K., Experimental investigation of characteristics of a double-base swirl injector in a liquid rocket propellant engine, *The pacific Journal of Science and Technology*, Vol. 10, Num 1, May 2009.
- Park, S. H., Yoon, S. H., Suh, H. K. and Lee, C. S., Effect of the temperature variation on properties of biodiesel and biodiesel- ethanol blends fuels, *Oil & Gas Science and Technology*, Vol. 63, No. 6, pp. 737-745, 2008.