

# DESENVOLVIMENTO DE UM INJETOR CENTRÍFUGO DUAL PARA BIOCOMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS

Roger Apaza Vásquez  
[roger@lcp.inpe.br](mailto:roger@lcp.inpe.br)

Fernando de Souza Costa  
[fernando@lcp.inpe.br](mailto: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 <sup>1</sup>	Biodiesel <sup>2</sup>
Densidade, kg/m <sup>3</sup>	789,42	870
Viscosidade, mPa - s	1,2	5
Tensão superficial, N/m	0,02203	0,0344

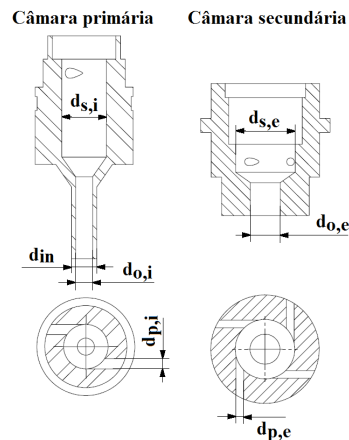
<sup>1</sup>Encyclop. of Chemical Processing and Design, Vol 19, pp 446.

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

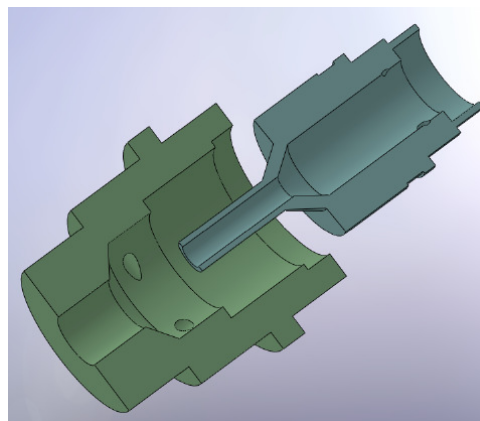
## 2. Considerações teóricas e análise do projeto

### 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  $\mu$  e  $\sigma$  são a viscosidade e tensão superficial do líquido respectivamente, e  $\rho_a$  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, $\Delta P$ [bar]	7,67	2,64
Ângulo de cone, $\theta$ [°]	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.