

## TEORIA E EXPERIMENTAÇÃO DE UM ATOMIZADOR TIPO Y PARA ÁLCOOL

Pedro Teixeira Lacava e João Andrade de Carvalho Jr.  
Laboratório Associado de Combustão e Propulsão  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
12630-000, Cachoeira Paulista, SP, Brasil

Mardson Queiroz McQuay  
Mechanical Engineering Department  
Brigham Young University, 242 CB  
84602-4102, Provo, Utah, USA

### RESUMO

Este trabalho discute o projeto de um atomizador tipo Y e apresenta os resultados de sua caracterização com um sistema laser tipo PDPA. Além da determinação dos diâmetros médios dos sprays gerados, com o laser, vazões do fluido de atomização foram medidas experimentalmente. Com os testes, foi possível elaborar recomendações para corrigir a rotina de projeto.

### INTRODUÇÃO

O uso de sprays na combustão de hidrocarbonetos líquidos iniciou-se no final do século passado, quando se descobriu que a nebulização do óleo combustível promovia uma chama auto-sustentável (Williams, 1976).

De um modo geral, a queima de combustíveis líquidos se processa nos seguintes estágios sucessivos:

- atomização: o combustível é desagregado, por processos mecânicos, em pequenas gotículas;
- vaporização: o combustível atomizado passa para o estado gasoso, através do calor conduzido da chama para as gotas;
- mistura: o combustível, na fase gasosa, é misturado com o comburente, constituindo a mistura inflamável;
- combustão: a mistura inflamável queima produzindo uma reação exotérmica.

Dessas etapas, a mais crítica e importante é a atomização, que produz o aumento da área específica do combustível facilitando sua vaporização, condição necessária para a sua íntima mistura com o comburente. É considerada eficiente uma atomização que pulverize 1 cm<sup>3</sup> de combustível em cerca de 10.000.000 de gotículas (diâmetro médio de 60 µm), aumentando a área específica em mais de 200 vezes (Russomano, 1987).

Diversos tipos de atomizadores têm sido utilizados para produzir sprays com características adequadas para a combustão. Alguns utilizam-se apenas da pressão para produzir o spray. Estes em geral são sistemas simples, porém com difícil controle do grau de nebulização do líquido, uma vez que pequenas variações de vazão produzem variações significativas do diâmetro médio das gotículas geradas, pois ambos parâmetros dependem da pressão de injeção. Outros atomizadores utilizam-se de um fluido auxiliar gasoso para produzir o spray. Dentre estes últimos, o atomizador tipo Y é um dos mais utilizados atualmente em aplicações industriais. Este atomizador, do tipo "air-assisted" (Lefebvre, 1980), funciona com a injeção de um gás (ar ou vapor d'água) a alta velocidade sobre o escoamento do líquido e permite que se varie a vazão de combustível sem alterar o diâmetro médio do spray.

O presente trabalho apresenta parâmetros de projeto, fabricação e testes de caracterização de um atomizador tipo Y para álcool etílico. Os diâmetros médios dos sprays foram levantados com um sistema laser tipo PDPA ("Phase Doppler Particle Analyzer"). Comparação entre os resultados experimentais e aqueles previstos pelo projeto é apresentada, o que permitiu elaborar recomendações para corrigir a rotina de projeto.

### PROJETO DO ATOMIZADOR

Um esquema do atomizador tipo Y é mostrado na Figura 1. As informações teóricas quanto ao tamanho médio das gotas são obtidas pela equação de Wigg (1964), que fornece o diâmetro médio de massa (MMD) para atomizadores deste tipo:

$$\text{MMD} = \frac{200 v^{0.5} W^{0.1} \left(1 + \frac{W}{A}\right)^{0.5} h^{0.1} \sigma^{0.2}}{\rho^{0.5} V} \quad (1)$$

onde  $v$  é a viscosidade cinemática do combustível (centistokes),  $W$  a vazão mássica do combustível (g/s),  $A$  a vazão mássica do fluido de atomização (g/s),  $h$  o raio da câmara de mistura (cm),  $\sigma$  a tensão superficial do combustível (dinas/cm),  $\rho$  a massa específica do fluido de atomização (g/cm<sup>3</sup>) e  $V$  a velocidade de injeção do fluido de atomização (m/s). O MMD representa o ponto de 50 % na curva de distribuição de massa acumulada.

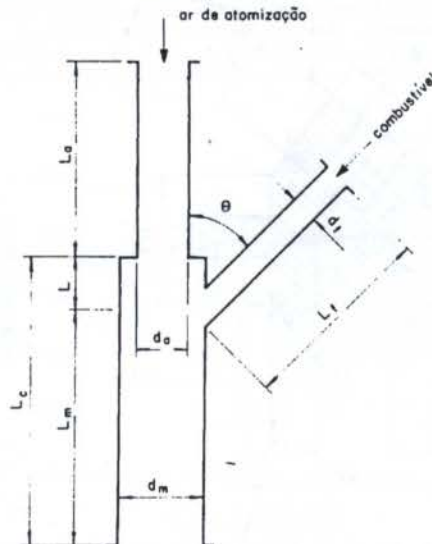


Figura 1: Esquema de um atomizador tipo Y.

Alguns investigadores adotam o diâmetro médio de Sauter (SMD) como o diâmetro médio, o qual é definido por:

$$SMD = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2} \quad (2)$$

onde  $d_i$  é o diâmetro da gota e  $n_i$  o número de gotas com diâmetro  $d_i$ . O SMD representa uma relação entre o volume do líquido atomizado e a área superficial total das partículas. Simmons (1977) mostrou que a razão MMD/SMD é igual a 1,20, para um erro de  $\pm 5\%$ .

Além da equação de Wigg como guia para projeto, Mullinger e Chigier (1974) fornecem as seguintes recomendações para parâmetros geométricos de um atomizador tipo Y:

- diâmetro de saída do ar:  $d_{ar} = d_f$ , onde  $d_f$  é o diâmetro de saída do combustível;
- diâmetro da câmara de mistura:  $d_m = (1,4 \text{ a } 1,8) d_{ar}$ ;
- comprimento de pré-mistura:  $L = 0,75 d_{ar}$ ;
- comprimento de mistura:  $L_m = (4 \text{ a } 5) d_m$ ;
- comprimento total da câmara:  $L_c = L_m + L$ ;
- comprimento do furo de alimentação:  $L_a > 2d_{ar}$ ;
- comprimento do furo de alimentação de combustível:  $L_f > 2d_f$ ;
- inclinação do furo de alimentação:  $\theta = 52^\circ$ .

Como condição inicial de projeto estabeleceu-se que a potência gerada seria de 120 KW. Como o poder calorífico inferior do álcool é cerca de 6400 Kcal/Kg, a vazão mássica de álcool necessária é 4,48 g/s. A relação A/W adotada para projeto foi de 0,1, que está na faixa recomendada por Mullinger e Chigier (entre 0,05 e 0,15).

As seguintes hipóteses foram adotadas para cálculo dos diâmetros de entrada de ar e combustível:

- escoamento isentrópico unidimensional do ar de atomização pelo orifício de injeção;
- número de Mach igual a 1 na saída do orifício de injeção;
- temperatura de estagnação de 300 K;
- coeficiente de 0,75 para a descarga de álcool.

Um esquema do atomizador projetado com base nas considerações deste item é mostrado na Figura 2. O mesmo foi construído em latão. Seus parâmetros de escoamento são apresentados na Tabela 1.

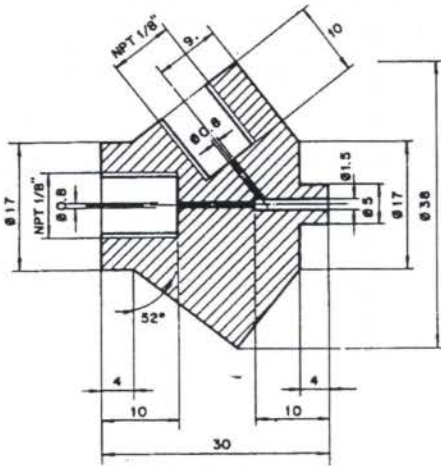


Figura 2: Esquema do atomizador tipo Y construído (dimensões em mm).

Tabela 1: Parâmetros de escoamento do atomizador tipo Y construído (valores de projeto).

Vazão de álcool:	4,48 g/s
Vazão de ar:	0,448 g/s
Velocidade de injeção do combustível:	9,87 m/s
Velocidade de injeção do ar de atomização:	347 m/s
Pressão de injeção do combustível (gage):	0,89 atm

### TESTES DE CARACTERIZAÇÃO

Os sprays gerados pelo atomizador tipo Y deste trabalho foram caracterizados com um sistema laser tipo PDPA. Desta maneira, pode-se avaliar a metodologia empregada para o projeto.

O sistema se utiliza do volume formado pela interseção de dois raios laser para realizar medidas tanto de velocidade como tamanho de partículas. Quando uma partícula passa pelo volume, ela espalha luz, criando uma estrutura de franjas de interferência. Uma lente receptora projeta uma porção desta estrutura em vários detectores. Cada detector produz um sinal tipo Doppler cuja frequência é proporcional à velocidade da partícula. Por outro lado, diferença de fase entre os dois sinais Doppler de dois detectores diferentes é proporcional ao tamanho da partícula.

**Posicionamento do atomizador.** Os testes utilizaram água e ar como fluidos, por facilidade de trabalho. Os resultados para água podem ser convertidos para álcool, como mostrado posteriormente. Os resultados foram obtidos na forma de SMD e, quando necessário, convertidos pela relação  $MMD = SMD \times 1,2$ .

Para caracterização, o atomizador foi posicionado com sua saída na vertical, para baixo, e os raios laser na horizontal. A posição do atomizador com relação ao laser foi ajustada por um sistema mecânico que move o atomizador em três eixos, vertical, longitudinal e transversal. A posição relativa ideal é dada pelo diâmetro médio mínimo, medido em um spray invariável. Com o atomizador posicionado, então foram variadas as pressões de injeção da água e do ar. A pressão da água alterava a vazão do líquido e a do ar o grau de atomização do spray. As Figuras 3 e 4 apresentam as variações do SMD na horizontal, em direções perpendicular ao Y e no plano do Y, respectivamente.

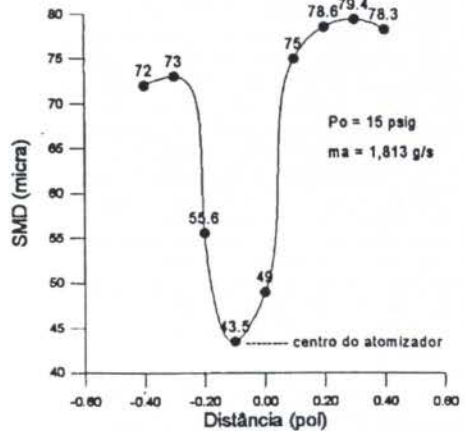


Figura 3: Variação do SMD na horizontal, perpendicular ao plano do Y.

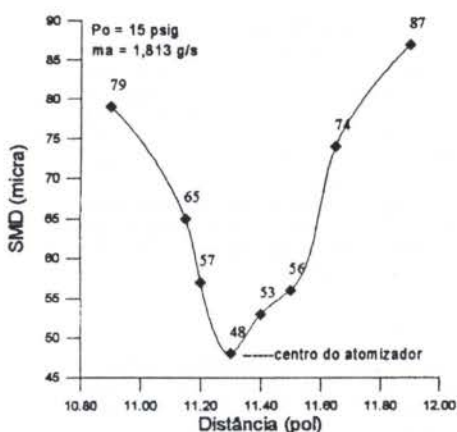


Figura 4: Variação do SMD na horizontal, no plano do Y.

Enquanto variações de posição relativa entre o atomizador e o volume de intersecção dos raios laser nas direções longitudinal e transversal alteravam de maneira significativa o diâmetro médio medido, o mesmo não ocorria para variações de posição na vertical. Para uma vazão de água de 200 ml/min e uma pressão de estagnação do ar de 25 psig, o SMD manteve-se entre 46 e 47  $\mu\text{m}$  para distâncias de 3 a 6", subindo para 52  $\mu\text{m}$  para distâncias de 9". Assim, em todos os testes de caracterização, a saída do atomizador ficou posicionada a 3" do volume de medida.

**Diâmetro médio para diferentes vazões de água e pressões de ar.** Resultados para três diferentes pressões de estagnação,  $P_0 = 25, 15$  e 8 psig, são mostrados na Figura 5. Observa-se que, com o aumento da vazão de ar de atomização, que ocorre com o aumento da pressão de estagnação, a nebulização torna-se mais eficiente, o que era de se esperar em virtude das características de funcionamento do atomizador. Outra observação importante é que, para a pressão de estagnação de 8 psig, para a qual pode-se garantir não se estar mais na condição de Mach = 1 na saída do duto de ar, ainda se consegue obter um SMD razoável para as baixas vazões de água (abaixo de 90  $\mu\text{m}$  para vazões abaixo de 200 ml/min).

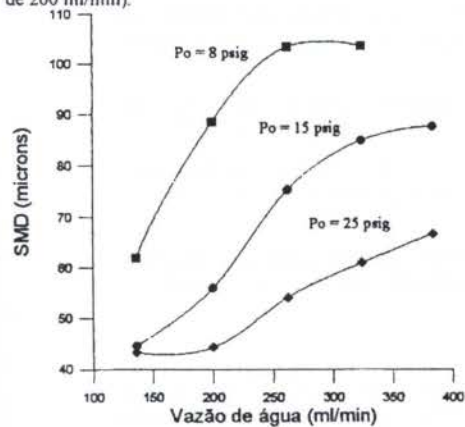


Figura 5: Variação do SMD com a vazão de água.

Quanto à operação do sistema PDPA, deve-se dizer que para valores de SMD acima de 100  $\mu\text{m}$  os resultados tornam-se não confiáveis, pois nesta condição o spray passa a conter muitas gotas com diâmetro da ordem de grandeza do volume de medida, as quais são desconsideradas no cálculo.

**Conversão dos resultados para álcool etílico.** Segundo Johnson (1982),

$$SMD_f = SMD_w \frac{SMD_f^*}{SMD_w^*}, \quad (3)$$

onde  $SMD_f$ ,  $SMD_w$ ,  $SMD_f^*$  e  $SMD_w^*$  são os diâmetros médios de Sauter, medido para o combustível, medido para a água, calculado empiricamente para o combustível e calculado empiricamente para a água, respectivamente. Considerando a relação de Simmons (1977), pela qual  $MMD = SMD \times 1,20$ , tem-se

$$SMD_f = SMD_w \frac{MMD_f^*}{MMD_w^*}, \quad (4)$$

onde  $MMD_f^*$  e  $MMD_w^*$  são os diâmetros médios de massa do combustível e da água, respectivamente, calculados pela equação de Wigg. Considerando-se, então, a vazão do ar de atomização como fixa, tem-se, para mesmas vazões de álcool e de água,

$$SMD_f = SMD_w \left( \frac{v_f}{v_w} \right)^{0,5} \left( \frac{\sigma_f}{\sigma_w} \right)^{0,2}, \quad (5)$$

onde  $v_f$  e  $v_w$  e  $\sigma_f$  e  $\sigma_w$  são as viscosidades cinemáticas e as tensões superficiais do álcool e da água, respectivamente. Seus valores, de acordo com Weast (1970), para 20 °C, são  $v_f = 1,500$  centistokes,  $v_w = 1,002$  centistokes,  $\sigma_f = 22,75$  dynes/cm e  $\sigma_w = 72,75$  centistokes. Substituindo-se os valores, fica-se com a relação simples

$$SMD_f = 0,969 SMD_w. \quad (6)$$

**Influência do escoamento de líquido no escoamento de ar.** Antes de apresentar as variações do SMD com a vazão de álcool, mostra-se na Figura 6 a variação da vazão de ar conforme a vazão de álcool é aumentada. Verifica-se que o aumento da vazão de álcool obstrui a câmara de mistura, causando um aumento da pressão de descarga do ar, o que diminui sua vazão. Assim, embora o procedimento de projeto do atomizador ainda continue adequado considerando descarga do ar em 1 atm, o SMD deve ser corrigido para levar em conta esta diminuição da vazão de ar.

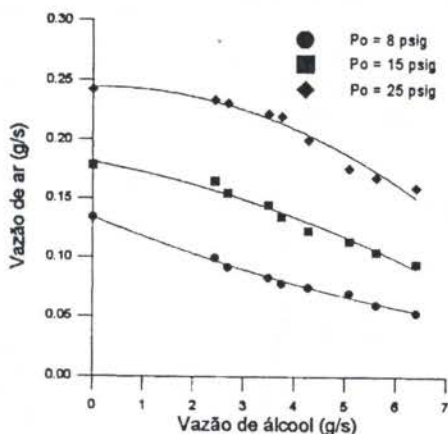


Figura 6: Variação da vazão de ar com a vazão de álcool para três diferentes pressões de estagnação.

**Varição do SMD com a vazão de álcool.** As Figuras 7-9 apresentam as variações do SMD com a vazão de álcool. As três curvas em cada figura correspondem a três condições diferentes: a) equação de Wigg com valores experimentais de vazão, calculando a velocidade de injeção do ar considerando escoamento compressível isentrópico no duto de ar, b) equação de Wigg com valores teóricos, considerando descarga do ar a 1 atm e c) valores experimentais.

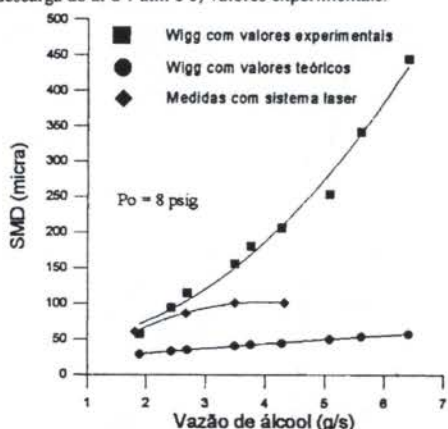


Figura 7: Variação do SMD com a vazão de álcool para  $p_0 = 8$  psig.



Figura 8: Variação do SMD com a vazão de álcool para  $p_0 = 15$  psig.

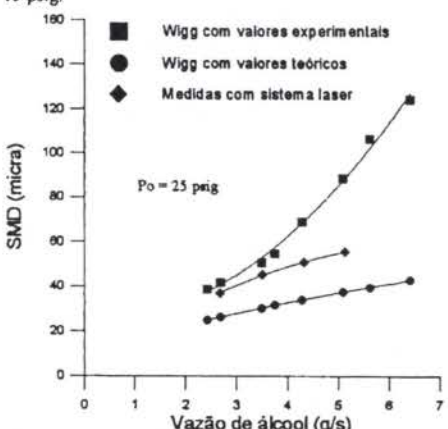


Figura 9: Variação do SMD com a vazão de álcool para  $p_0 = 25$  psig.

Observa-se uma concordância razoável para os primeiros pontos das curvas experimentais e de Wigg com valores experimentais. Acima de uma certa vazão de líquido, o jato inclina-se com relação à vertical e não se pode garantir que as menores gotas ficarão no centro do mesmo. Este fator não foi considerado na caracterização com o sistema laser pois a posição do volume de medida relativa ao atomizador permaneceu inalterada em todos os testes. Adicionalmente, se as curvas de Wigg com valores experimentais forem calculadas considerando fricção no duto de ar, a velocidade de injeção será maior e o SMD calculado decrescerá com relação aos valores aqui plotados.

## CONCLUSÃO

A metodologia de projeto mostrou-se adequada porque os sprays obtidos foram bastante finos. O SMD calculado pela equação de Wigg deve ser corrigido para valores experimentais.

Como continuação do trabalho, recomenda-se medir as pressões de injeção de líquido e determinar, através da vazão de líquido, a pressão na câmara de mistura. Assim, com a pressão de descarga do ar, a velocidade  $V$  poderá ser calculada considerando duto de ar com fricção. Recomenda-se ainda efetuar uma varredura com o sistema laser por ocasião da caracterização dos sprays gerados.

## REFERÊNCIAS

- Johnson, S.M., "Venturi Nozzle Effects on Fuel Drop Size and Nitrogen Oxide Emissions", *NASA Technical Paper 2028*, 1982.
- Lefebvre, A.H., "Airblast Atomization", *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 6, no. 3, pp. 233-261, 1980.
- Mullinger, P. and Chigier, N.A., "The Design and Performance of Internal Mixing Multijet Twin Fluid Atomizers", *Journal of the Institute of Fuel*, vol. 47, no. 393, pp. 251-261, 1974.
- Russomano, V.H., "Introdução à Administração de Energia na Indústria", EDUSP, São Paulo, 1987.
- Simmons, H.: "The Correlation of Drop Size Distributions in Fuel Nozzle Sprays", *Journal of Engineering for Power*, vol. 99, pp. 309-319, 1977.
- Weast, R.C., ed., "Handbook of Chemistry and Physics", 50th edition, Chemical Rubber Co., Cleveland, Ohio, 1970.
- Wigg, L.D., "Drop Size Prediction for Twin Atomizers", *Journal of the Institute of Fuel*, vol. 37, no. 286, pp. 500-505, 1964.
- Williams, A., "Fundamentals of Oil Combustion", *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 2, no. 3, pp. 167-179, 1976.

## ABSTRACT

This paper discusses the design of a Y-type atomizer and presents the results of its characterization with a PDPA laser system. Besides the determination of the spray mean diameters, using the laser, mass flow rates of the atomization fluid were measured experimentally. With the tests it was possible to elaborate recommendations to correct the design procedure.