

ATOMIZADOR TIPO “Y-JET” – PROJETO, CRACTERÍSTICAS DO SPRAY E COMBUSTÃO

Pedro Teixeira Lacava

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Departamento de Propulsão
Pça. Mal. Eduardo Gomes 50, São José dos Campos – SP, 12228-900
placava@ita.br

Amílcar Porto Pimenta

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Departamento de Propulsão
Pça. Mal. Eduardo Gomes 50, São José dos Campos – SP, 12228-900
amilcar@ita.br

João Andrade de Cravalho Jr.

¹Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá, Depto. de Energia
Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá –SP, Brasil, CEP: 12500-000
joao@feg.unesp.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório Associado de Combustão e Propulsão,
Rod. Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista – SP, CEP 12700-000

Resumo. O processo de injeção de combustível tem um importante papel em diversos aspectos relacionados com a eficiência da combustão. Para produzir uma elevada razão entre superfície e massa em fase líquida, resultando em elevadas taxas de vaporização, o combustível líquido precisa ser atomizado antes de ser injetado na zona de combustão. De fato, atomização é o processo onde volume de líquido é convertido a pequenas gotículas. Nos atomizadores tipo “Y-Jet”, o combustível líquido é injetado em uma câmara de mistura junto com ar comprimido, ou outro gás auxiliar. Parte de das gotas são formadas pelo impacto do líquido com o escoamento de ar no interior da câmara de mistura, mas a maioria das gotas é gerada pelo filme líquido formado ao longo da parede da câmara de mistura através da deflexão do jato líquido pela alta velocidade do fluxo de ar escoando ao longo da região central da câmara. O presente trabalho apresenta os princípios básicos de projeto para atomizadores tipo “Y-Jet” e um exemplo de projeto e construção de um atomizador para óleo diesel. O artigo ainda apresenta o diâmetro médio de Sauter (SMD), medido através do espalhamento da luz de um feixe de laser; além das condições de combustão em uma fornalha laboratorial, incluindo as medidas de CO e NO_x.

Palavras chaves: atomizador tipo “Y-Jet”, atomização, Combustão de Líquidos, Emissão de Poluentes.

1. Introdução

A queima de combustíveis líquidos se processa nos seguintes estágios sucessivos (Russomano (1987)): 1) atomização, onde o combustível é desagregado, por processos mecânicos, em pequenas gotículas; 2) vaporização, onde o combustível atomizado passa para a fase gasosa, através do calor conduzido da chama para as gotas; 3) mistura, onde o combustível, na fase gasosa, é misturado com o comburente, constituindo a mistura inflamável; 4) combustão, na qual a mistura inflamável queima produzindo reações exotérmicas. Desses estágios, o mais crítico e importante é a atomização, que visa o aumento da superfície específica do combustível facilitando sua vaporização, condição indispensável à sua íntima mistura com o comburente. É considerado, como eficiente, uma atomização que pulverize 1cm³ de combustível em cerca de 10.000.000 gotículas (diâmetro médio de 60µm), aumentando a superfície específica em mais de 200 vezes; contudo; os atomizadores atuais de emprego em combustão industrial são capazes de gerar sprays com diâmetro médio da ordem de 20µm.

Os mais diversos tipos de atomizadores podem ser utilizados para produzir sprays com características adequadas para combustão. Alguns se utilizam apenas da pressão de injeção para produzir o spray. Estes em geral são simples; contudo apresentam difícil controle da qualidade da atomização do líquido, uma vez que variações na vazão produzem variações significativas no diâmetro médio das gotas geradas, pois ambos parâmetros dependem da pressão de injeção. Outros atomizadores utilizam um fluido auxiliar gasoso para produzir o spray. Dentre estes últimos, o atomizador tipo “Y-Jet” encontra bastante espaço em aplicações industriais. Este atomizador, classificado por Lefebvre (1989) como tipo “air-assisted”, pois se imprime uma quantidade mínima de fluido gasoso auxiliar em alta velocidade sobre o combustível líquido, permitindo a variação da vazão de combustível com pequenas alterações nas características do spray, através do ajuste da melhor vazão de fluido auxiliar. A Fig.1 apresenta um esquema desse tipo de atomizador e suas principais dimensões. O fluido auxiliar pode ser o ar comprimido, por facilidades operacionais; contudo, se há disponibilidade de vapor no processo, como em caldeiras, é conveniente utilizá-lo.

O presente trabalho apresenta uma metodologia simplificada para se projetar esse tipo de atomizador, baseada em conceitos da termodinâmica e mecânica dos fluidos, além de um exemplo de projeto de atomizador para queima de óleo diesel. São apresentados ainda, resultados do diâmetro médio Sauter (SMD) do spray para diferentes condições de

operação do atomizador e os resultados da combustão em uma fornalha de escala laboratorial, incluindo valores de CO e NO_x.

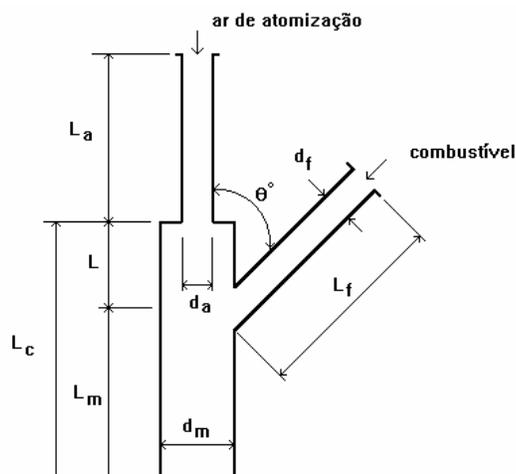


Figura 1. Esquema de um injetor tipo Y-Jet e suas principais dimensões.

2. Procedimento e Exemplo de Projeto

Os parâmetros geométricos do atomizador são obtidos baseados na investigação experimental realizada por Mullinger e Chigier (1974). Entre outras coisas, eles determinaram as condições geométricas necessárias para uma pulverização adequada nos injetores tipo Y-Jet. Essas recomendações estão organizadas na Tab.(1).

Tabela 1. Recomendações para projeto das dimensões de atomizadores tipo Y-Jet, segundo Mullinger e Chigier (1974).

1) Diâmetro de saída do ar (d_a) igual ao diâmetro de saída do combustível (d_f).	$1 < d_f / d_a < 1,6$ *
2) Diâmetro da câmara de mistura (d_m).	$d_m = (1,4 \leftrightarrow 1,8).d_a$
3) Comprimento de pré-mistura (L).	$L = 0,75.d_a$
4) Comprimento de mistura (L_m).	$L_m = (4 \leftrightarrow 5).d_m$
5) Comprimento total da câmara (L_c).	$L_c = L_m + L$
6) Comprimento do canal de alimentação do ar (L_a).	$L_a > 2.d_a$
7) Comprimento do canal de alimentação do combustível (L_f).	$L_f > 2.d_f$
8) Inclinação do canal de alimentação do combustível (θ)	$\theta = 52^\circ$

* Neste intervalo apresentado, d_f/d_a na influência o diâmetro da gota, por conveniência pode-se utilizar $d_f = d_a$.

Além da geometria ideal, Mullinger e Chigier também determinaram a relação entre a vazão mássica do fluido auxiliar de atomização e do líquido, denominada no presente trabalho como razão de atomização (r_{atm}). Desta forma, recomendaram que a vazão de fluido auxiliar seja no mínimo 0,1 vez a vazão do fluido a ser atomizado (Eq. 1).

$$r_{atm} = \frac{m_{ar/atm/f}}{m_f} \geq 0,1 \quad (1)$$

Além das recomendações de Mullinger e Chigier, para o projeto de atomizadores é preciso levar em conta algumas considerações sobre os escoamentos de líquido e gás no seu interior. As considerações feitas no projeto do atomizador estão listadas a seguir.

D) Considerando a passagem do ar de atomização pelo orifício de injeção como um escoamento reversível adiabático unidimensional em regime permanente para gás perfeito, pode-se fazer uso das equações para este tipo de escoamento, facilitando os cálculos de projeto. Foi adotado, ainda, Mach = 1 na passagem do escoamento de ar pelo orifício de injeção e a pressão e a temperatura de estagnação como sendo 3 atm e 27 °C, respectivamente.

II) Equacionamento do escoamento de líquido como sendo unidimensional incompressível em regime permanente e coeficiente de descarga igual a 0,75 (também recomendado por Mullinger e Chigier).

Basicamente, o projeto de atomizadores se resumiu a encontrar o diâmetro do canal para passagem do ar de atomização e, com esse valor, adequar os demais parâmetros geométricos segundo a Tab. 1 e as facilidades de construção.

O projeto de um injetor de diesel foi feito admitindo a vazão de 5g/s para esse fluido. Utilizando igualdade na Eq. 1, a vazão mássica de ar de atomização do combustível é 0,5g/s, e admitindo Mach = 1 a velocidade de injeção fica:

$$\begin{aligned} v_{ar/atm/f} &= Mach \cdot a \\ Mach &= 1 \\ v_{ar/atm/f} &= a = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T} \end{aligned} \quad (2)$$

sendo a a velocidade do som, R a constante de gas ideal = 287 m²/s²K, $\gamma = C_p/C_v$ e T a temperatura do ar no orifício de injeção, que pode ser calculada pela Eq. 3:

$$T = \frac{T_0}{\left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot Mach\right]}, \quad (3)$$

sendo T_0 a temperatura de estagnação, admitida como sendo 300 K. Para Mach = 1 e $\gamma = 1,4$:

$$T = 0,833 \cdot T_0 = 0,833 \cdot 300 = 250 K . \quad (4)$$

Substituindo o resultado da Eq. 4 na Eq. 2:

$$v_{ar/atm/f} = \sqrt{1,4 \cdot 287 \cdot 250} = 316,93 \text{ m/s} . \quad (5)$$

Pressão do ar na saída de injeção:

$$\frac{T_0}{T} = \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, \quad (6)$$

sendo P_0 a pressão de estagnação do ar, admitida como sendo 3atm. Substituindo os valores:

$$\begin{aligned} P &= 0,528 \cdot P_0 = 0,528 \cdot 3 = 1,584 \text{ atm} \\ P &= 160498 \text{ Pa} . \end{aligned} \quad (7)$$

Assim, pode-se calcular a massa específica do ar de atomização do combustível:

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} = \frac{160498,8}{287 \cdot 250} = 2,24 \text{ kg/m}^3 . \quad (8)$$

Finalmente calcula-se o diâmetro do canal de injeção:

$$\begin{aligned} A &= \frac{\pi \cdot d_a^2}{4} \\ m_{ar/atm/f} &= v_{ar/atm/f} \cdot \rho \cdot A \\ d_a &= \sqrt{\frac{4 \cdot m_{ar/atm/f}}{\pi \cdot \rho \cdot v_{ar/atm/f}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0005}{\pi \cdot 2,24 \cdot 316,93}} = 0,0009447 m \\ d_a &\approx 1,0 mm \end{aligned} \quad (9)$$

Com o valor obtido para o diâmetro do canal de saída do ar foi possível calcular os demais parâmetros geométricos utilizando as relações apresentadas na Tab. 1. A pressão de injeção do combustível pode ser calculada pela equação geral de descarga de líquidos em bocais:

$$\Delta P_{if} = \left(\frac{m_f}{C_d \cdot A_f} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot \rho_f} = \left(\frac{0,005}{0,75 \cdot \pi/4 \cdot 0,001^2} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot 0,84} ,$$

$$\Delta P_{if} = 42887,27 Pa = 0,42887 \text{ atm} , \quad (10)$$

sendo C_d o coeficiente de descarga, ρ_f a massa específica do combustível e A_f a área do orifício de injeção do combustível (adotando $d_f = d_a$). Com isso é possível calcular a velocidade de injeção do combustível na câmara de mistura:

$$v_{if} = \left(\frac{2 \cdot \Delta P_{if}}{\rho_f} \right)^{1/2} \cdot C_d = \left(\frac{2 \cdot 42887,27}{840} \right)^{1/2} \cdot 0,75 ,$$

$$v_{if} = 7,5788 \text{ m/s} . \quad (11)$$

Com os cálculos dos diâmetros de injeção do ar de atomização e do líquido e levando em conta as facilidades de construção, obtiveram-se os demais parâmetros geométricos do atomizador. A Tab. 2 apresenta esses parâmetros.

Tabela 2. Parâmetros geométricos do atomizador.

d_a	1 mm
d_f	1 mm
d_m	1,8 mm
L	0,75 mm
L_m	9,0 mm
L_c	9,75 mm
L_a	2,0 mm
L_r	8,5 mm
θ	52°

O injetor onde o bico atomizador foi posicionado em sua extremidade foi construído em aço inoxidável com os fluidos escoando em tubos concêntricos. A Fig. 2 mostra um esquema geral do injetor com o bico atomizador acoplado.

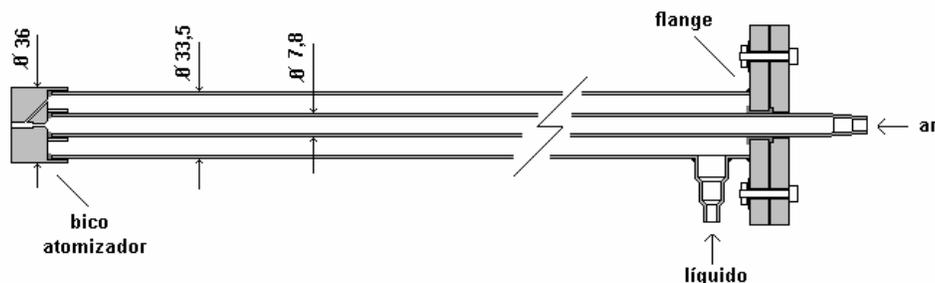


Figura 2. Esquema do injetor construído com atomizador acoplado na extremidade (dimensões em mm).

3. Descrição Experimental

3.1. Obtenção do Tamanho Médio das Gotas

A caracterização dos sprays obtidos pelos atomizadores foi feita através de um sistema não intrusivo a laser Malvern Mastersizer X. Esse sistema mede o espalhamento da luz de um feixe de laser (Hélio – Neônio, 633nm) ao ser atravessado pelas gotas de um spray. A detecção do espalhamento de luz é feita por uma placa circular de detetores de

fotodiodos, onde cada detetor coleta a luz espalhada em setores angulares particulares. Para obtenção da distribuição do tamanho das gotas, o sistema utiliza a teoria de difração de Fraunhofer. Por esse modelo, quando um feixe de luz paralela e monocromática atravessa uma nuvem de gotas, o padrão obtido é o de uma série de discos concêntricos claros e escuros, cujo espaçamento entre eles dependerá da distribuição dos diâmetros das gotas. Esse padrão de difração é proporcionado por uma lente transformadora de Fourier que converge o feixe sobre o sistema de detecção. Esta transformação consiste na conversão do ângulo de espalhamento θ numa distância radial r sobre o detetor plano. Cada detetor faz uma varredura da ordem de 2ms e cada medida é constituída de 2000 varreduras. A Fig. 3 mostra um fotografia do spray de diesel atravessando o feixe de laser do sistema Mastersizer X.

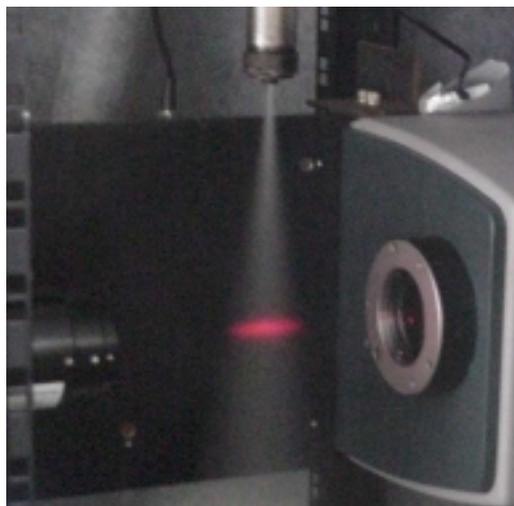


Figura 3. Fotografia do spray de diesel atravessando o feixe de laser de 18mm de diâmetro do sistema Mastersizer X.

Após as medidas, o software Malvern instalado em um computador padrão IBM-PC conectado ao sistema laser, realiza um tratamento estatístico sobre os dados. Para processos de vaporização e combustão, o diâmetro médio mais indicado é o de Sauter (“Sauter Mean Diameter” na língua inglesa, ou simplesmente SMD) por relacionar volume de líquido com a área superficial, sendo definido como:

$$SMD = \frac{\sum_i n_i \cdot d_i^3}{\sum_i n_i \cdot d_i^2}, \quad (12)$$

onde n_i é número de gotas da classe i cujo o diâmetro é d_i . O SMD é definido como sendo o diâmetro de gota que possui a mesma razão volume/área superficial de todo spray, ou pelo menos, da região de amostragem. Desta forma, os resultados dos ensaios são apresentados como SMD.

A Fig. 4 apresenta uma representação da bancada utilizada. O injetor era fixado a um “braço” engastado em uma mesa posicionadora, o que permitiu o movimento tridimensional do injetor e a obtenção da melhor posição para medida. As vazões de líquido e ar foram obtidas por rotâmetros e a alimentação foi realizada por um tanque pressurizado com nitrogênio e um compressor, respectivamente.

O injetor foi posicionado a 15cm do centro do feixe de laser. Valores muito inferiores a esse apresentavam um nível de obscuridade muito alto e saturavam os detetores, em função da densidade de gotas ser elevada nas proximidades da saída do bico atomizador. Para valores muito superiores a 15cm, o diâmetro do cone formado pelo spray na região de medida era suficientemente grande para que gotas acabassem se chocando com as lentes. A distância de 15 cm foi adequada para solução dos dois problemas citados. Além disso, Lacava et al. (1995) mostraram que acima de 7,56 cm de distância praticamente não há alteração nas medidas do tamanho de gota em injetores tipo Y-Jet. Foram realizadas 20 medidas para cada combinação de vazão e cada resultado aqui apresentado é uma média dessas medidas.

3.2. Ensaios com Combustão

Os ensaios com combustão foram realizados em uma câmara vertical, com parede refratária sem refrigeração externa e com o volume total de 1000 litros. A Fig. 5a apresenta o esquema da câmara. Para obtenção da distribuição de temperatura ao longo desta, foram previstos termopares nas posições: 0,18, 0,70, 1,05, 1,40, 1,75, 2,50, 3,00 e 4,20m a jusante do queimador.

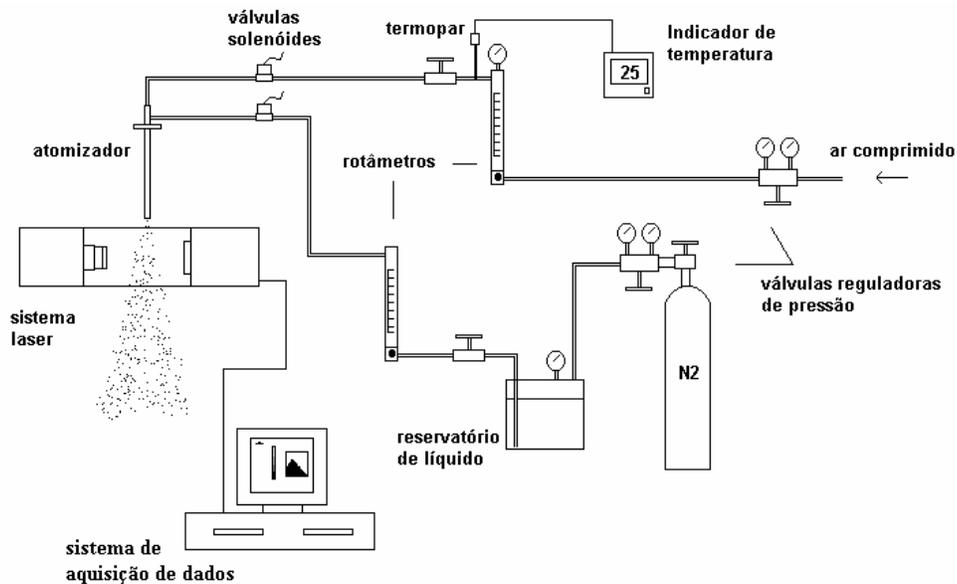


Figura 4. Representação da bancada para análise do spray.

O queimador utilizado possui um *swirler* com o ângulo entre pás variável, permitindo alterar a estrutura da zona de recirculação formada a frente do queimador. Contudo, ao ângulo foi mantido constante nos ensaios, pois a estrutura de recirculação de gases no interior da câmara foi suficiente para manter a chama encorada em todas as condições desejadas. O atomizador descrito na Fig. 3 foi acoplado em uma lança central do queimador, a Fig. 5b apresenta um esquema do queimador com atomizador acoplado.

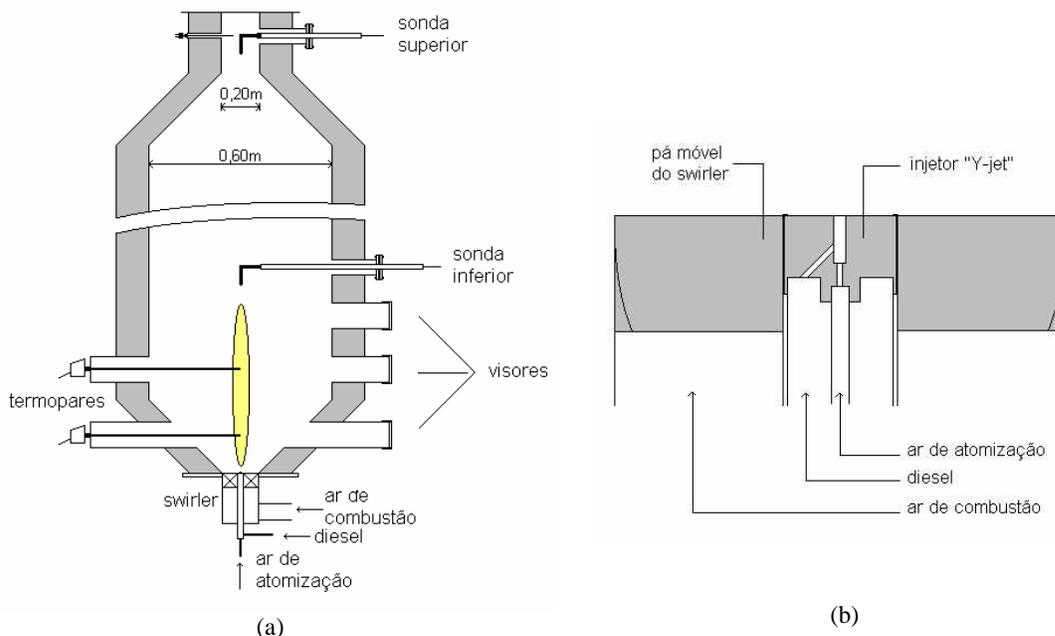


Figura 5. Montagem experimental: (a) esquema da câmara de combustão; (b) queimador.

Em todos ensaios, a vazão de diesel foi mantida constantes em 2,50g/s. Desta forma, a potência gerada pela queima de diesel foi fixada em 110kW. A vazão de ar de combustão foi mantida fixa em 47,7g/s, o que representa um excesso de ar de 29%, ou 5% de O₂ na saída da câmara (em base seca). As vazões mássicas de diesel e ar de atomização foram medidas utilizando rotâmetros e a vazão de ar de combustão um medidor de vazão volumétrica tipo turbina.

As amostragens dos gases de combustão foram feitas por sonda refrigeradas posicionadas a 30cm da saída da câmara, correspondendo ao volume de câmara de 994 litros, e na região de pós-chama, correspondendo ao, volume de câmara de 227 litros. Os gases de amostragem passam por filtros e condensadores antes de chegarem aos analisadores

de CO (infravermelho), CO₂ (infravermelho), O₂ (termomagnético) e NO_x (quimiluminescente). As leituras dos analisadores, juntamente com as dos termopares, foram feitas em um sistema de aquisição de dados HP6554.

4. Resultados

4.1. Tamanho Médio das Gotas

Foram feitos ensaios em duas vazões de combustível, 3,11 e 2,50g/s. A vazão de ar de atomização foi variada, e o SMD é apresentado em função da razão atomização, definida na Eq. 1.

A Fig.6 mostra os resultados do SMD em função da razão de atomização (r_{atm}), repetidos na Tab. 3 para a vazão de 3,11g/s e na Tab. 4 para 2,50 g/s. Os resultados para ambas vazões evidenciam a capacidade dos atomizadores tipo Y-Jet em promover fins sprays e do controle do tamanho das gotas através da vazão do ar de atomização. As curvas obtidas são típicas para esse tipo de atomizador, concordando qualitativamente com o comportamento apontado pela investigação experimental feita por Mullinger e Chigier (1974), ou seja, o SMD diminui acentuadamente com aumento da vazão do fluido auxiliar até um certo ponto, depois praticamente estabiliza em torno de um valor. Esse comportamento surge em função da elevada dependência do SMD com a velocidade relativa entre os fluxos na câmara de mistura do atomizador. Com aumento da vazão do ar de atomização sua velocidade também irá aumentar e, como conseqüência, o SMD diminui.

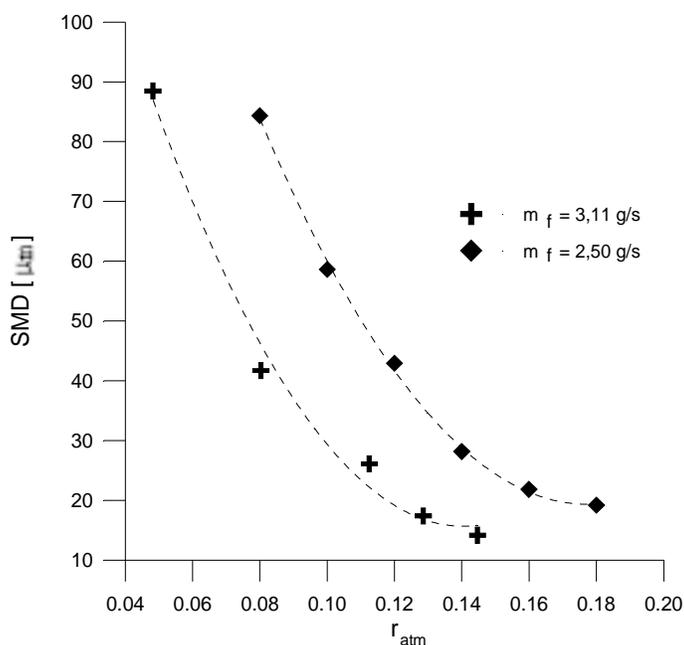


Figura 6. Variação do SMD em função da razão de atomização para as vazões de 3,11 e 2,50 g/s de diesel.

A importância dos parâmetros que afetam o diâmetro das gotas do spray pode ser observada pela equação de Wigg (1964), que calcula o diâmetro mediano de massa (MMD) para assistidos por um fluido auxiliar:

$$MMD = \frac{200 \cdot \delta^{0,5} \cdot m_f^{0,1} \left(1 + \frac{1}{r_{atm}}\right)^{0,5} \cdot h_m^{0,1} \cdot \tau^{0,2}}{\rho_{ar/atm/f}^{0,3} \cdot V_{rel}}, \quad (13)$$

onde δ é a viscosidade cinemática do combustível (centistokes), m_f a vazão mássica do combustível (g/s), $m_{ar/atm/f}$ a vazão mássica do fluido de atomização (g/s), h_m o raio da câmara de mistura (cm), τ a tensão superficial do combustível (dynas/cm), $\rho_{ar/atm/f}$ a densidade do fluido de atomização (g/cm³) no ponto de mistura e V_{rel} a velocidade relativa entre os fluxos (m/s). O MMD representa o ponto de 50% na curva porcentagem de massa acumulada x diâmetro de gota (Marshall, 1954). A equação mostra que os fatores de maior efeito são a razão de atomização, a densidade do ar, a velocidade relativa e a viscosidade do combustível. A razão MMD/SMD é igual a 1,20 com um erro de 5% (Simmons, 1977). O equacionamento para atomizadores tipo Y-Jet proposto por Couto et al. (1999), concorda melhor com resultados experimentais do que a equação de Wigg para atomizadores “Y-Jet”. No entanto, esta última facilita a interpretação da influência de cada parâmetro no processo de atomização.

Tabela 3. Valores de SMD para a vazão de 3,11g/s de diesel.

$m_{ar/atm/f}$ [g/s]	r_{atm}	SMD [μ m]
0,15	0,0482	88,46 \pm 6,56
0,25	0,0803	41,69 \pm 5,13
0,35	0,1125	26,10 \pm 4,69
0,40	0,1286	17,39 \pm 0,97
0,45	0,1447	14,46 \pm 2,46

Tabela 4. Valores de SMD para a vazão de 2,5g/s de diesel.

$m_{ar/atm/f}$ [g/s]	r_{atm}	SMD [μ m]
0,20	0,08	84,33 \pm 4,36
0,25	0,10	58,63 \pm 4,65
0,30	0,12	42,93 \pm 2,59
0,35	0,14	28,16 \pm 2,14
0,40	0,16	21,81 \pm 0,88
0,45	0,18	19,18 \pm 1,73

Em uma primeira análise da Eq. 13, pode-se concluir que o aumento da vazão de combustível, conservando a razão de atomização, causaria um aumento no SMD. No entanto, a Fig. 6 mostra um comportamento contrário. Mullinger e Chigier, que também observaram o mesmo comportamento, atribuíram isso ao fato de que o aumento da vazão de combustível causa uma elevação nas pressões de injeção do combustível e ar, conseqüentemente, aumenta a massa específica do ar no ponto de mistura. Conforme a Eq. 14 o SMD diminui com o aumento de $\rho_{ar/atm/f}$. Outro ponto que pode ser levantado é que se a vazão de líquido aumenta e razão de deseja-se que a razão de atomização permaneça constante, necessariamente a vazão de ar deve ser aumentada; assim, a velocidade relativa entre os escoamentos pode aumentar e como o expoente desta velocidade na equação de Wigg é -1 e o da vazão de combustível é 0,1, o peso da velocidade relativa é bem maior, tendendo a diminuir o diâmetro das gotas.

4.2. Ensaio com Combustão.

A Fig. 7 mostra o comportamento das temperaturas medidas a 18 e 70 cm a jusante do queimador em função da razão de atomização. À medida que r_{atm} aumenta, as gotas formadas pelo spray diminuem e, como conseqüência, passam a ter vaporização completa mais rapidamente. A relação entre o tempo de vaporização de uma gotícula de combustível e seu diâmetro é conhecida como lei “d²”, dada por (Glassman, 1987):

$$d^2 = d_0^2 - \beta_v \cdot t, \tag{14}$$

onde: d é o diâmetro instantâneo da gota, d₀ o diâmetro inicial, β_v o coeficiente de vaporização do combustível e t o tempo. Assim, o tempo de vaporização depende do quadrado do diâmetro; por exemplo, a redução do diâmetro de uma gota de 100 para 30 μ m representa uma diminuição de onze vezes no seu tempo de vaporização.

As características da combustão do spray de combustível podem influenciar a temperatura na região de chama, pois as gotas menores, com tempo de vaporização baixo, misturam rapidamente com o ar, criando na chama regiões de queima que se assemelham à combustão de uma chama pré-misturada, onde, obtêm-se temperaturas mais elevadas (Rink e Lefebvre, 1989). Desta forma, espera-se que com o aumento da razão de atomização a temperatura na região de chama também aumente, tal qual como observado na Fig. 7.

O aumento da razão de atomização pode ter conseqüências negativas para emissão de NO_x, pois, além de propiciar o aumento da temperatura média na zona de chama, pode criar regiões com temperatura extremamente elevada, devido a uma melhora local na qualidade da mistura. Pershing et al. (1978) observaram que a diminuição do tamanho das gotas aumentou o NO_x térmico em chamas de óleo residual. O aumento do NO_x para gotas pequenas foi atribuído ao incremento da intensidade de combustão na região primária da chama (próximo ao queimador). A Fig. 8 apresenta o comportamento da emissão de NO_x em função da razão de atomização para medidas feitas na saída da fornalha.

As Fig. 7 e 8 mostram que os resultados obtidos seguem as observações feitas por Pershing et al., pois com a diminuição do tamanho das gotas incrementou-se a intensidade de combustão, visto o aumento da temperatura na região primária da chama, medida pelo termopar T1, posicionado a 18 cm a jusante do queimador.

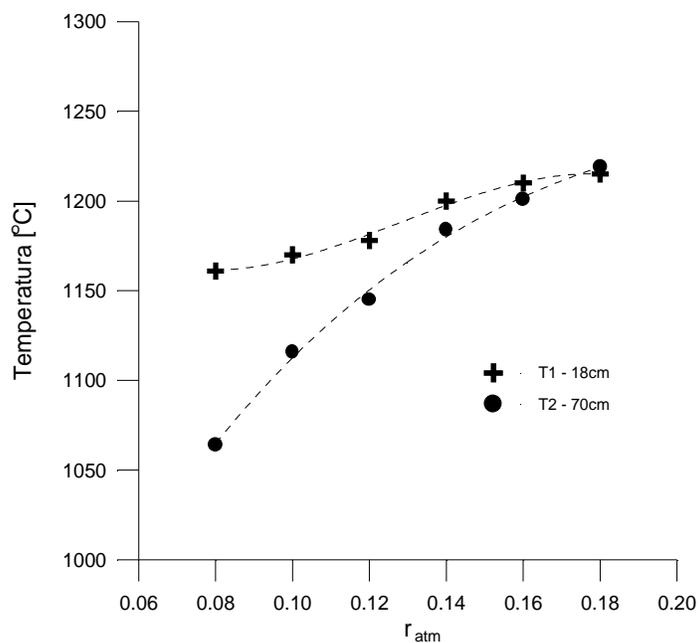


Figura 7. Resultados de temperatura obtidos pelos termopares 1 e 2, posicionados a 18 e 70 cm a jusante do queimador, em função da razão de atomização.

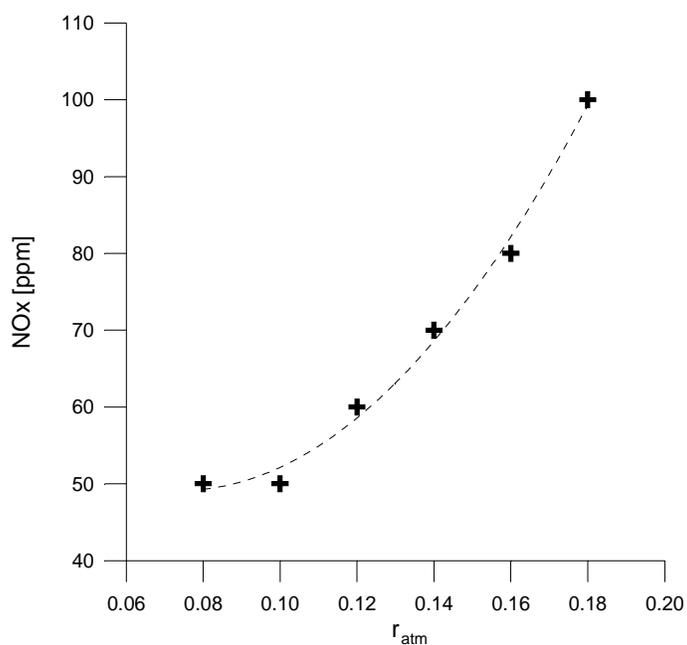


Figura 8. Comportamento da emissão de NO_x (saída da câmara) em função da razão de atomização.

Sarv e Cernansky (1989) confirmaram os resultados de Pershing et al. e apontaram que a situação torna-se mais crítica para emissão de NO_x à medida que se caminha para as condições de estequiométrica ou ligeiramente pobre, devido a facilidade de penetração do oxidante no spray, com a diminuição do tamanho das gotas. Por outro lado, observaram que para condições extremamente pobres o tamanho das gotas tem influência menor na emissão de NO_x, em função da abundância de oxidante na região de chama. Lyons (1982) apresentou resultados teóricos e experimentais sobre a influência da qualidade da mistura na formação de NO_x, para combustão do querosene com ar em diversas razões de equivalência. Os resultados apontaram que para excessos de oxidante abaixo de 33% o aumento da qualidade da mistura propicia maiores emissões de NO_x.

A emissão de CO na saída da câmara permaneceu igual ou abaixo de 0,02% (sensibilidade do analisador) para todas as razões de atomização ensaiadas. No entanto, a conversão completa do CO para CO₂ necessita de um maior volume à medida que se diminui a razão de atomização, pois o tamanho das gotas aumenta, o que aumenta tempo de vaporização destas e dificulta a penetração de oxidante no interior do spray, ocasionando comprimentos de chama superiores. A Fig. 9 apresenta o comportamento da emissão de CO em função da razão de atomização para as medidas feitas pela sonda posicionada no volume de câmara de 227 litros. É evidente que o aumento na qualidade da atomização irá propiciar uma concentração menor de CO na região pós-chama. Assim, para minimizar a emissão de NO_x através do controle da qualidade de mistura é preciso atentar para que haja tempo de residência suficiente para a conversão de CO em CO₂.

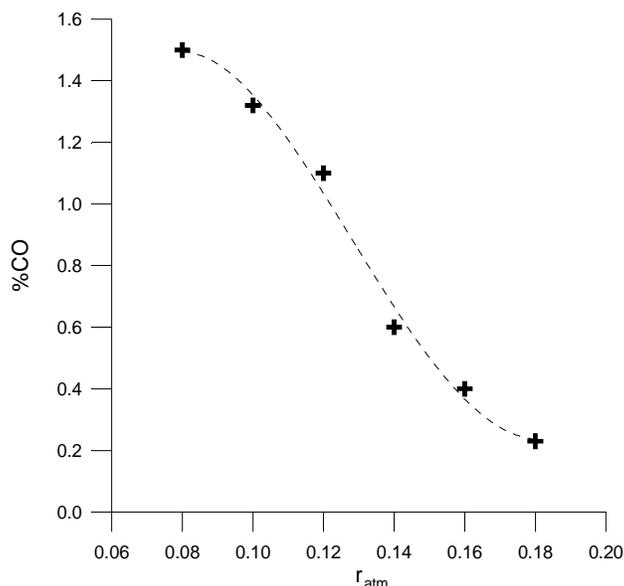


Figura 9. Comportamento da emissão de CO (volume de 227 litros) em função da razão de atomização.

5. Comentários e Conclusões

O presente trabalho apresenta uma metodologia simplificada para projeto de atomizadores tipo “Y-Jet”, além de resultados experimentais para o SMD do spray e algumas características da combustão desse tipo atomizador em uma fornalha de escala laboratorial.

A metodologia para projeto do atomizador foi baseada considerações sobre os escoamentos de gás e líquido no interior do mesmo e por recomendações empíricas do trabalho de Mullinger e Chigier. Contudo, apesar da simplicidade do método de projeto, os resultados experimentais para o SMD mostraram que o atomizador construído é extremamente eficiente para gerar um spray com tamanho médio de gotas que atenda satisfatoriamente uma situação de combustão..

Os resultados para o SMD também mostram que as condições de atomização podem ser facilmente modificadas alterando a razão de atomização, o que demonstra a versatilidade desse tipo de atomizador. Isto pode ser comprovado através dos resultados com combustão no interior de uma fornalha.

A razão de atomização tem influência direta no tamanho das gotas formadas, conseqüentemente, nos processos de vaporização do combustível e mistura deste com o oxidante. Os resultados de temperatura mostraram que, com o aumento da razão de atomização, há uma tendência de maior liberação de energia nas proximidades do queimador. Isto pôde ser confirmado pela redução da emissão de CO na região de pós-chama.

Evidentemente que uma melhor mistura entre os reagentes irá reduzir a emissão dos poluentes decorrentes de oxidação parcial, como CO, fuligem e hidrocarbonetos não queimados. No entanto, isso poderá colaborar para o aumento da formação de NO_x, como apresentado. Contudo, os atomizadores tipo “Y-Jet” são destinados prioritariamente a aplicações industriais, ou seja, para câmaras de combustão cujo tempo de residência é da ordem de alguns segundos. Para a presente situação experimental o tempo de residência médio esteve por volta de quatro segundos e, independente de qual razão de atomização, a emissão de CO na saída da câmara foi inferior a 0,02% (sensibilidade do analisador). Desta forma, para câmaras com elevado tempo de residência, o atomizador não necessariamente precisa operar com razão de atomização elevada, mas o suficiente para manter o NO_x em um nível aceitável e os produtos de oxidação parcial terão tempo e condição suficientes para serem reduzidos.

6. Referências

- Couto, H.S.; Carvalho Jr, J.A.; Bastos-Netto, D.; Mcquay, M.Q.; Lacava, P.T., 1999, "Theoretical Prediction of Mean Droplet Size of Y-Jet Atomizers", Journal of Propulsion Power, 481-485, vol 15, n°3.
- Glassman, I., 1987, "Combustion", second edition, Academic Press Inc.
- Lacava, P.T.; Carvalho, J.A.Jr.; McQuay, M.Q., 1995, "Teoria e Experimentação de um Atomizador Tipo Y para Álcool", Anais do XIII Congresso Brasileiro e VII Congresso Ibero Americano de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, CD: Área de Termociências/Combustão, paper n°. 7.
- Lefebvre, A.H., 1989, "Atomization and Spray", Taylor & Francis, USA.
- Lyons, V.J., 1982, "Fuel/Air Nonuniformity – Effect on Nitric Oxide Emissions", AIAA Journal, 20(5):660–665.
- Marshall Jr., W.R., 1954, "Atomization and Spray Drying", American Institute of Chemical Engineers, Lancaster, PA.
- Mullinger, P.; Chigier, N.A., 1974, "The Design and Performance of Internal Mixing Multijet Twin Fluid Atomizers", Journal of the Institute of Fuel, vol. 47, n. 393, pp. 251-261.
- Pershing, D.W.; Cichanowicz, J.E.; England, G.C.; Heap, M.P.; Martin, G.B., 1978, "The Influence of Fuel Composition and Flame Temperature on the Formation of Thermal and Fuel NO_x in Residual Oil Flames", Proc. of the Seventeenth Symposium (International) on Combustion, p.p. 715-726.
- Sarv, H.; Cernansky, N.P., 1989, "NO_x Formation from the Combustion of Monodisperse n-Heptane Sprays Doped with Fuel-Nitrogen Additives", Combustion and Flame, 76:265-283.
- Simmons, H., 1977, "The Correlation of Drop Size Distribution in Fuel Nozzle Sprays", Journal of Engineering for Power, vol. 99, pp. 309-319.
- Rink, K.K.; Lefebvre, A.H., 1989, "The Influences of Fuel Composition and Spray Characteristics on Nitric Oxide Formation", Combustion Science and Technology, 68:1-14.
- Russomano, V.H., 1987, "Introdução à Administração de Energia na Indústria", EDUSP, São Paulo.
- Wigg, L.D., 1964, "Drop Size Prediction for Twin Atomizers", Journal of the Institute of Fuel, vol.37, n. 286, pp. 500-505.

7. Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo financiamento parcial através dos projetos: 95/4167-7, 96/10310-0 e 97/5511-9.

Y-JET ATOMIZER: DESIGN, SPRAY CHARACTERISTICS AND COMBUSTION

Pedro Teixeira Lacava

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Departamento de Propulsão
Pça. Mal. Eduardo Gomes 50, São José dos Campos – SP, 12228-900
placava@ita.br

Amílcar Porto Pimenta

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Departamento de Propulsão
Pça. Mal. Eduardo Gomes 50, São José dos Campos – SP, 12228-900
amilcar@ita.br

João Andrade de Cravalho Jr.

¹Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá, Depto. de Energia
Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá –SP, Brasil, CEP: 12500-000
joao@feg.unesp.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório Associado de Combustão e Propulsão,
Rod. Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista – SP, CEP 12700-000

Abstract. The liquid fuel injection process plays an important role in many aspects of combustion performance. To produce a high ratio of a surface to mass in the liquid phase, resulting in a very high evaporation rates, the liquid fuel must be atomized before being injected into the combustion zone. In fact, atomization is the process that a volume of liquid is converted into a multiplicity of small drops. In Y-Jet atomizers, the liquid fuel is injected into a mixing chamber with compressed air, or other auxiliary gas. Part of the droplets are formed by the impact of the liquid on the airstream inside the mixing chamber, but the majority of the droplets is generated by the liquid film formed inside the mixing chamber wall through the deflection of the liquid jet by the high-speed gas stream flowing along the center core of the chamber. The present work shows the design basic principles for Y-Jet atomizers and an example of design and atomizer construction for diesel fuel. The article also presents the spray Sauter Mean Diameter (SMD), measured with a laser scattering system, and the experimental combustion conditions in a laboratorial furnace, including the CO and NO_x emissions.

Keywords: Y-Jet Atomizer, Atomization, Liquid Combustion, Pollutant Emissions.