

DETERMINAÇÃO DO TAMANHO MÉDIO TEÓRICO DE GOTAS GERADAS EM UM INJETOR *BLURRY* PARA DIFERENTES MISTURAS COMBUSTÍVEIS

Gabriel Baldin Nogueira, bngabriel@outlook.com¹

Otávio Mendes da Silva, otaviomendesdsilva@gmail.com¹

Claudia Gonçalves de Azevedo, claudia.azevedo@unesp.br¹

¹ Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Campus Experimental de Rosana – Avenida dos Barrageiros, 1881, Primavera, SP, Brasil.

Resumo: As crescentes preocupações ambientais, bem como o custo dos recursos energéticos, despertam o interesse para a utilização de biocombustíveis, em especial o etanol e o biodiesel, bem como a mistura destes com combustíveis convencionais com o objetivo de reduzir custos, aumentar a eficiência de operação e reduzir a emissão de poluentes. O processo de atomização de um combustível líquido tem papel decisivo em vários aspectos primordiais da combustão. Tal influência é cada vez mais significativa haja vista que sistemas de combustão estão sujeitos a limites cada vez mais rigorosos de emissões poluentes. Na combustão de sprays o líquido é atomizado com o objetivo de aumentar a área de contato entre o combustível e o oxidante, aumentando assim, as taxas de vaporização e de reação. Uma vez que os injetores tem papel fundamental nos sistemas de combustão tem-se a necessidade de realizar estudos que contribuam significativamente no aperfeiçoamento de tais sistemas. Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo determinar as principais propriedades físico-químicas que influenciam as características de um spray: densidade, viscosidade e tensão superficial para diferentes misturas de combustível fóssil convencional (diesel S500) e biocombustíveis (etanol hidratado e biodiesel de soja e sebo bovino), bem como determinar o tamanho médio teórico de gotas produzidas em um injetor *blurry* para as misturas analisadas.

Palavras-chave: injetor *blurry*, biocombustíveis, combustíveis fósseis, diâmetro médio de Sauter

1. INTRODUÇÃO

A atomização de um líquido formando uma nuvem de gotas ou spray é um processo importante em sistemas de geração de energia, combustão, propulsão, e transporte, dentre outros. O processo de atomização ocorre quando um jato, folha ou um filme líquido é desintegrado pela energia cinética do próprio líquido, pela exposição a uma corrente de ar ou de gás em alta velocidade, ou ainda como resultado de energia mecânica externa aplicada através de dispositivos rotativos ou vibratórios (Lefebvre, 1989).

Entretanto, combustíveis líquidos introduzem desafios adicionais relacionados com a dispersão e a vaporização do combustível, bem como a mistura combustível/ar. Estes processos devem ocorrer em um curto tempo de residência, preferencialmente antes da combustão, de modo a minimizar as emissões de fuligem, hidrocarbonetos não queimados (UHC), monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NOx). Uma excelente vaporização do combustível e mistura com o ar são requisitos fundamentais para sistemas de combustão de pequena escala para queima de combustíveis líquidos (Dent, 2012).

Atomizadores ou injetores são dispositivos empregados para a transformação de líquidos em sprays ou nuvens de gotas com o objetivo de maximizar a superfície de contato entre o líquido e o ambiente circundante, com a finalidade de se melhorar os mecanismos de transferência de calor e massa. As gotas formadas no processo de atomização aumentam a área de contato entre o combustível e o oxidante, aumentando assim as taxas de mistura e evaporação do combustível. A redução do tamanho das gotas formadas conduz a uma maior taxa de liberação de calor por unidade de volume, facilita a ignição da mistura, amplia a região de queima e produz menores emissões de poluentes. Sendo assim, uma rápida vaporização do combustível e mistura com o ar, são requisitos fundamentais para sistemas de combustão compactos utilizados para queima de líquidos.

O injetor *blurry* ou injetor *flow blurring* é uma tecnologia de atomização simples, reproduzível e robusta. Apesar da simplicidade no mecanismo de atomização e do design do injetor, obtém-se uma interação gás-líquido de alta eficiência. O injetor requer uma geometria particular, mas simples, que produz uma excelente mistura turbulenta entre os fluxos de líquido e gás, gerando sprays muito finos.

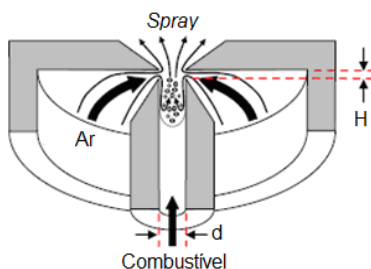


Figura 1. Esquema da geometria de um injetor tipo *flow blurring*.

Fonte: Adaptada de Dent (2012).

A configuração *flow blurring* é caracterizada por um tubo de alimentação de líquido cujo diâmetro interno d é igual ao diâmetro do orifício de saída localizado na placa de orifício à jusante do tubo. Ambas as seções estão perfeitamente alinhadas e separadas por uma distância H . Quando a distância H entre a saída do tubo de líquido e a placa de orifício é pequena, ou seja, $H/d < 0,25$, o escoamento do ar se torna radial, perpendicular ao eixo de simetria, e um ponto de estagnação se desenvolve entre a saída do tubo de líquido e o orifício de saída. Desse modo, parte do ar que passa através da PLC é forçada a escoar para dentro do tubo de líquido (*backflow*) dando origem a uma zona de recirculação dentro do tubo, que resulta em uma interação turbulenta entre as fases.

O ar produz pequenas bolhas no interior do líquido, criando assim uma mistura bifásica no interior do injetor. Ao passar pelo orifício de saída do injetor, a mistura é submetida a uma rápida diminuição na pressão e a queda de pressão através do orifício de saída causa a expansão do gás, gerando forças de bolha acima da tensão superficial. A expansão do gás causa a explosão das bolhas e desintegra o líquido, criando um spray fino. Por se tratar de um novo tipo de injetor são encontrados poucos trabalhos na literatura, dentre os quais, Panchasara *et al.* (2009), Sadasivuni e Agrawal (2009), Simmons e Agrawal (2010), Simmons e Agrawal (2011), Azevedo *et al.* (2013,2016).

O injetor *flow blurring* apresenta várias vantagens sobre os outros tipos de injetores pneumáticos, tais como formação de um spray uniforme, melhor atomização, alta eficiência de atomização, robustez, excelente vaporização do combustível e mistura com o ar, potencial para aplicação em sistemas de combustão compactos, que podem ser usados como fontes de energia portátil, bem como a capacidade de gerar sprays com gotas muito menores com o mesmo consumo de energia ou sprays com o mesmo tamanho de gota, porém com um consumo de energia menor.

Devido à grande importância dos injetores nos sistemas de combustão tem-se a necessidade de realizar estudos que contribuam significativamente no aperfeiçoamento de tais sistemas. Uma vez que as características de um spray são bastante influenciadas pelas propriedades do líquido, o objetivo do presente projeto é caracterizar diferentes misturas de combustíveis fósseis e biocombustíveis que serão atomizadas em um injetor *blurry* para futura aplicação em sistemas de combustão sem chama visível. Serão determinadas as principais propriedades das misturas, bem como os tamanhos médios (SMD) gerados pelo injetor a partir da equação proposta por Azevedo (2013) para diferentes proporções de misturas e diferentes configurações do bocal de saída do injetor blurry.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os principais parâmetros para determinar o diâmetro médio de gota, formado a partir da atomização do jato líquido através do injetor, são a densidade, viscosidade e tensão superficial das misturas em análise, a fim de analisar suas propriedades físico-químicas que influenciam no processo de atomização.

Para as misturas obtidas foram utilizados os seguintes combustíveis: etanol hidratado (E), biodiesel de soja e sebo bovino (B) e diesel S500 (D). As misturas a serem analisadas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Misturas combustíveis.

Amostra	Proporção (%)
E	100
B	100
D	100
B/E	30/70
B/E	50/ 50
B/E	70/30
D/B	30/70
D/B	50/50
D/B	70/30

Para a determinação da massa específica das misturas emprega-se a técnica de picnometria utilizando o picnômetro do tipo Gay-Lussac (Figura 2).

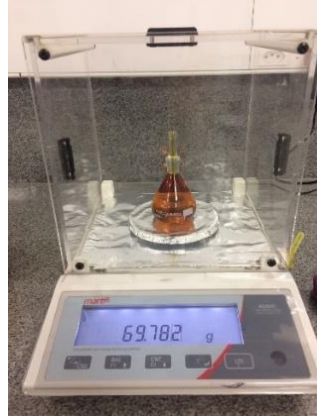


Figura 2. Picnômetro Gay-Lussac.

O procedimento experimental consiste em medir a temperatura do líquido cuja massa específica será determinada, medir a temperatura da água destilada, medir massa de cada picnômetro vazio (m_1), medir a massa de cada picnômetro com o líquido cuja densidade será determinada (m_2), medir a massa de cada picnômetro com água (m_3) e por fim obter a média das massas m_1 , m_2 e m_3 medidas nos três picnômetros. A massa do líquido cuja massa específica vai ser determinada pode ser calculada pela relação $m_{\text{líquido}} = m_2 - m_1$, enquanto a massa da água é dada por $m_{\text{água}} = m_3 - m_1$. Desse modo, a massa específica do líquido (kg/m^3) é determinada pela seguinte equação:

$$\rho_{\text{líquido}} = (m_2 - m_1 / m_3 - m_1) \rho_{\text{água}} \quad (1)$$

sendo $\rho_{\text{água}}$ a massa específica da água à temperatura da água registrada no momento da medição obtida a partir de dados tabelados.

Para a determinação da viscosidade dinâmica das misturas analisadas no presente trabalho será utilizado o viscosímetro de Ostwald Cannon Fenske (Figura 3).



Figura 3. Viscosímetro de Ostwald Cannon Fenske.

Inicialmente o viscosímetro é colocado em um béquer contendo água a uma temperatura conhecida. Em seguida o viscosímetro é preenchido com certa quantidade da mistura analisada no reservatório, até a extremidade de baixo do capilar. Logo em seguida, succiona-se a mistura com uma pêra de borracha até que o nível do líquido esteja acima da marca existente sobre a seção expandida imediatamente acima do capilar. Deixa-se o fluido escoar através do tubo capilar pela ação da gravidade, registrando-se o tempo decorrido pelo escoamento do líquido, até que a superfície livre do líquido no reservatório acima do capilar atinja a marca existente na extremidade de cima do capilar. A partir dos dados de tempo coletado realiza-se uma comparação com o tempo da água destilada. A viscosidade dinâmica é determinada pela seguinte equação:

$$\eta_{\text{líquido}} = \eta_{\text{água}} \left[\left(\rho_{\text{líquido}} \cdot t_{\text{líquido}} \right) / \left(\rho_{\text{água}} \cdot t_{\text{água}} \right) \right] \quad (2)$$

sendo $\eta_{\text{líquido}}$ e $\eta_{\text{água}}$ respectivamente as viscosidades dinâmicas do líquido e da água, $\rho_{\text{líquido}}$ e $\rho_{\text{água}}$ respectivamente as densidades do líquido e da água, $t_{\text{líquido}}$ e $t_{\text{água}}$ respectivamente os tempos de escoamento do líquido e da água.

Para a determinação de tensão superficial das misturas analisadas no presente trabalho será utilizado método do anel (Figura 4), que consiste em mergulhar totalmente um anel metálico no líquido analisado e em seguida retirá-lo, medindo-se a força utilizada. A tensão superficial é determinada pela seguinte equação:

$$\sigma = (F_2 - F_1) / 4\pi r_{\text{anel}} \quad (3)$$

sendo $F_0 = F_2 - F_1$ em que F_1 é o peso do anel e F_2 é a força medida no momento da quebra da película a partir da utilização de um dinamômetro de precisão.



Figura 4. Medição da tensão superficial.

Em virtude da natureza aleatória do processo de atomização, o spray produzido por um injetor é composto por gotas e gotículas com grande variabilidade de diâmetros. Sendo assim, para se caracterizar um spray com um único valor de diâmetro de gota é necessário ter alguma função estatística dos tamanhos das gotas medidas.

O diâmetro teórico a ser determinado a partir de equações propostas na literatura é o diâmetro médio de Sauter (SMD), definido como o diâmetro de gota característico cuja relação de volume - área de superfície é proporcional à relação volume - área de superfície de todo o spray, $SMD = D_{32} = \sum N_i D_i^3 / \sum N_i D_i^2$.

No presente trabalho serão determinados os diâmetros médios de Sauter (SMD) para cada mistura analisada utilizando como referência o injetor *blurry* desenvolvido por Azevedo 2013 apresentado na Figura 5.

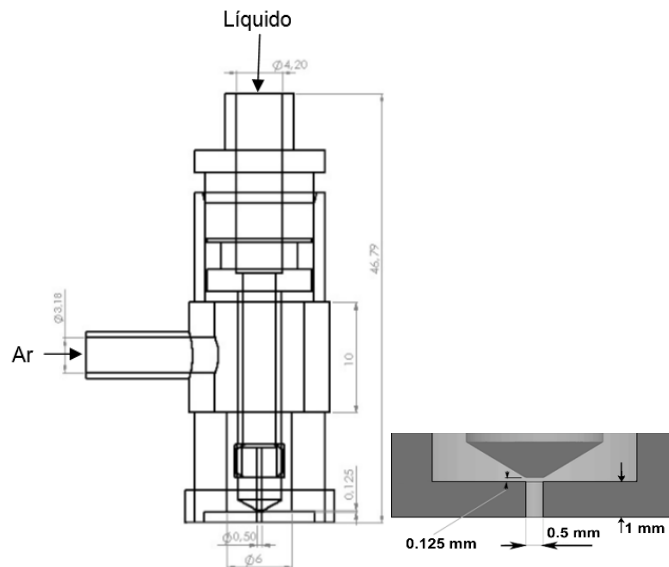


Figura 5. Geometria do injetor e bocal de saída do injetor blurry.
Fonte: Azevedo, 2013.

O modelo a ser adotado para a determinação do tamanhos de gotas foi obtido por Azevedo, 2013 a partir técnica de análise dimensional:

$$SMD/d = 0,07 \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0,14} \left(\frac{v_g}{v_l} \right)^{0,02} (ALR)^{-0,40} (We)^{-0,18} (Re)^{-0,03} \quad (4)$$

sendo $We = \rho_g v_g^2 d / \sigma_l$ o número adimensional de Weber, $Re = \rho_l v_l d / \mu_l$ o número adimensional de Reynolds, $ALR = \dot{m}_g / \dot{m}_l$, d o diâmetro do orifício de saída do injetor, ρ_g a densidade do ar, ρ_l a densidade do líquido, v_g a velocidade do ar e v_l a velocidade do líquido.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para as propriedades físico-químicas das misturas analisadas são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades das misturas analisadas.

Amostra	Densidade, ρ , (kg/m ³)	Viscosidade, η , (cP)	Tensão superficial, σ , (N/m)
Diesel	832,58	3,63	0,0363
Biodiesel	882,51	5,79	0,0354
Etanol	812,62	1,40	0,0239
B/E (30/70)	809,78	2,10	0,0230
B/E (50/50)	845,48	2,54	0,0265
B/E (70/30)	861,70	3,54	0,0274
B/D (30/70)	859,44	4,37	0,0363
B/D (50/50)	866,72	4,75	0,0309
B/D (70/30)	869,87	5,10	0,0292

Verifica-se que um aumento na porcentagem de biodiesel nas misturas com etanol e diesel conduz a um aumento na densidade e viscosidade das misturas. Verifica-se ainda que para a mistura B/E a maior tensão superficial obtida foi para a mistura que contém uma maior proporção de biodiesel, B/E (70/30), e para a mistura B/D a maior tensão superficial obtida foi para a mistura que contém uma maior proporção de diesel, B/D (30/70). Maiores densidades, viscosidades e tensões superficiais conduzem a uma maior resistência de escoamento do combustível, o que pode dificultar o processo de atomização.

As Figuras 6, 7 e 8 mostram o efeito da ALR no SMD para diferentes vazões de combustíveis puros e misturas e a Tabela 2 mostra as faixas de vazão de líquido, ALR e diâmetros médios teóricos obtidos.

Os resultados obtidos mostram que o tamanho da gota é fortemente influenciado pela ALR. Observa-se nas figuras uma redução aproximadamente exponencial dos diâmetros médios com ALR. Quanto maior for ALR, maior será a vazão de ar, então mais energia pode ser fornecida para a atomização do líquido. Portanto, o tamanho de gota diminui à medida em que se aumenta ALR. O aumento na ALR conduz a um aumento nas velocidades de saída e da turbulência no interior do injetor, resultando em uma atomização mais eficiente.

À medida que ALR aumenta a área efetiva ocupada pelo líquido diminui e a área efetiva ocupada pelo ar aumenta. O aumento da área ocupada pelo ar é benéfico para a atomização porque reduz a área disponível para o escoamento do líquido, isto é, o ar comprime o líquido transformando-o em filmes mais finos e ligamentos à medida que escoam através do orifício do injetor, até a formação das gotas. Observa-se ainda que um aumento na vazão mássica de líquido conduz a uma diminuição na razão ar-líquido (ALR) levando a um aumento no tamanho médio das gotas.

Verifica-se que os maiores tamanhos de gotas são obtidos para as misturas que possuem as maiores densidades, viscosidades e tensões superficiais. Sabe-se que o aumento na densidade conduz a um aumento no tamanho das gotas, uma vez ocorre uma interação menor com o fluxo de ar de atomização sendo necessário uma quantidade maior de ar para se obter uma boa atomização.

Do mesmo modo, o aumento da viscosidade provoca um aumento do tamanho das gotas, haja vista que aumentando-se a viscosidade ocorre um aumento no comprimento da folha de líquido não perturbada e na penetração do jato, impede-se a formação de ondas, reduz-se a turbulência, e, conseqüentemente, tem-se a produção de spray com gotas maiores.

Sabe-se ainda que um aumento na tensão superficial também conduz a um aumento no tamanho das gotas, haja vista ocorre um aumento na resistência do fluido a uma força cisalhante e um aumento na tensão superficial também provoca um aumento do tamanho das gotas, haja vista que uma alta tensão superficial representa uma força de consolidação, e, durante o processo de atomização, contraria qualquer distorção da superfície do líquido de modo que ao se aumentar a tensão superficial ocorre um atraso na formação de ligamentos e gotas, resultando em tamanhos maiores de gotas.

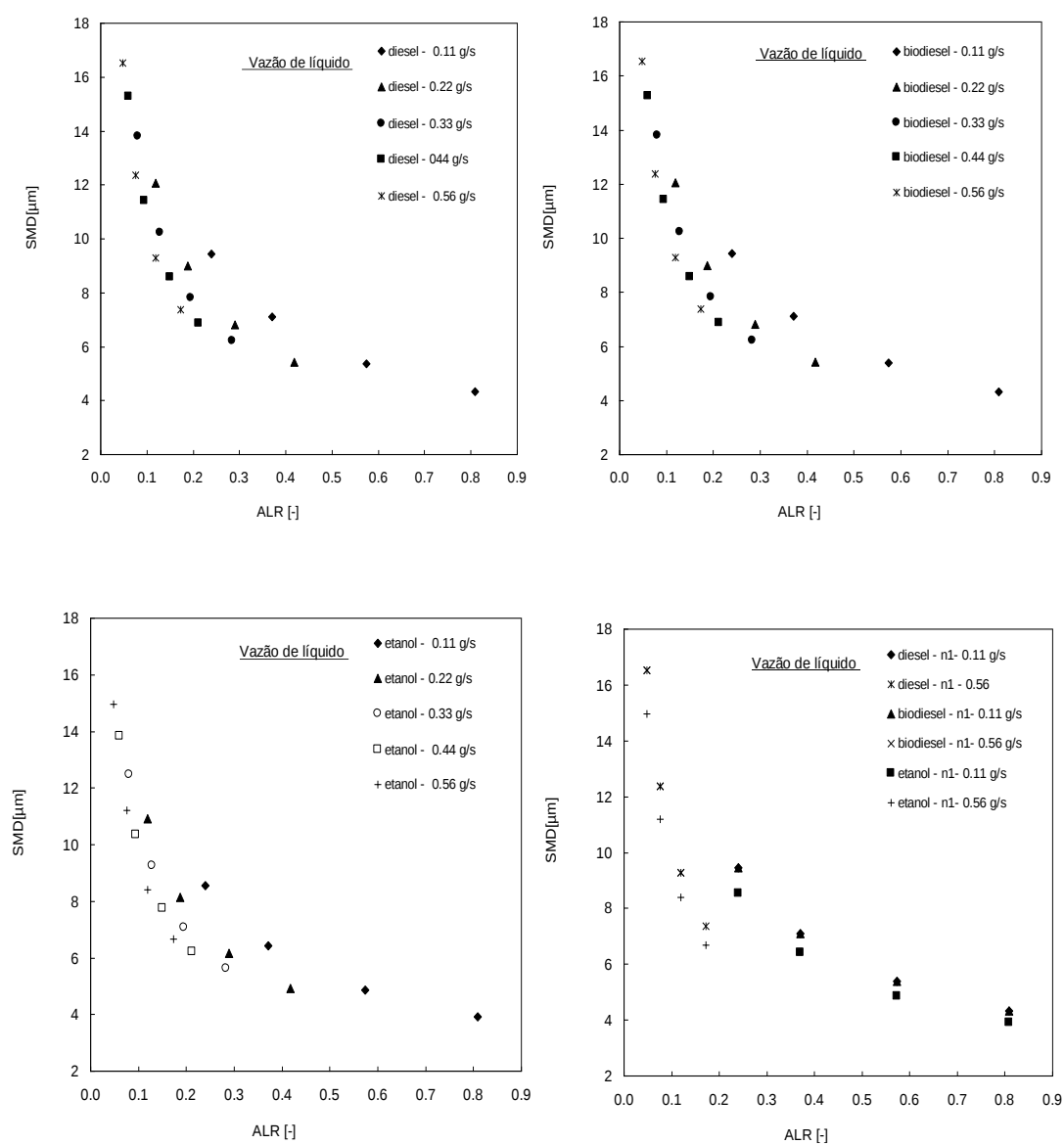


Figura 6. SMD teórico para os combustíveis puros.

Tabela 3. Faixa de vazão de líquido, ALR e diâmetros médios teóricos.

Amostra	$\dot{m}_l$ (g/s)	ALR (-)	SMD (μm)
Diesel	0,11 - 0,56	0,05 - 0,81	4,32 - 16,54
Biodiesel	0,11 - 0,56	0,05 - 0,81	4,32 - 16,53
Etanol	0,11 - 0,56	0,05 - 0,81	3,91 - 14,97
B/E (30/70)	0,11 - 0,56	0,05 - 0,81	3,94 - 15,06
B/E (50/50)	0,11 - 0,56	0,05 - 0,81	4,03 - 15,43
B/E (70/30)	0,11 - 0,56	0,05 - 0,81	4,09 - 15,62
B/D (30/70)	0,11 - 0,56	0,05 - 0,81	4,33 - 16,53
B/D (50/50)	0,11 - 0,56	0,05 - 0,81	4,21 - 16,09
B/D (70/30)	0,11 - 0,56	0,05 - 0,81	4,17 - 15,95

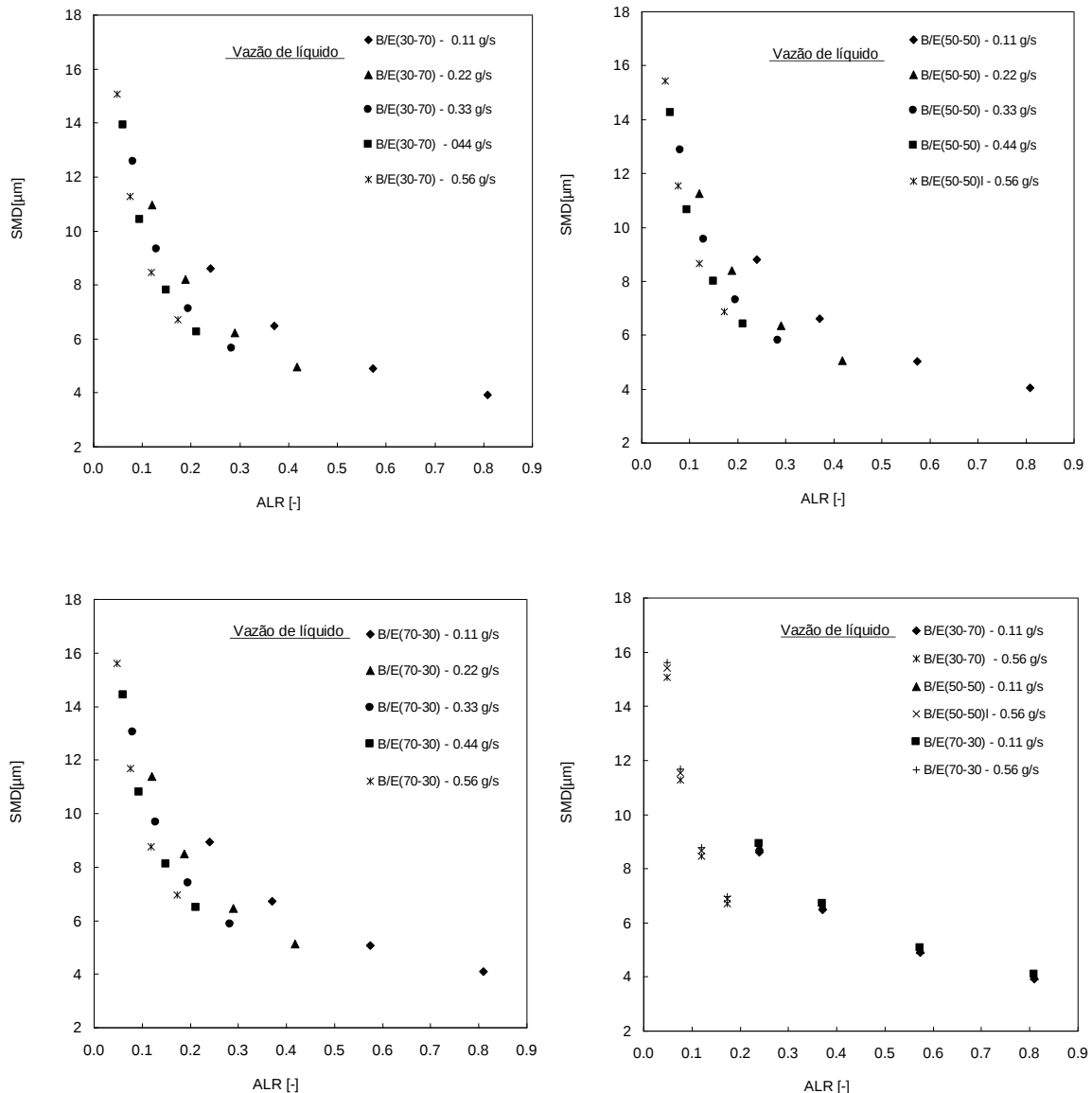


Figura 7. SMD teórico para a mistura B/E.

4. CONCLUSÃO

No presente trabalho foram determinadas as principais propriedades físico-químicas que influenciam as características de um spray: densidade, viscosidade e tensão superficial para diferentes misturas de combustível fóssil convencional (diesel S500) e biocombustíveis (etanol hidratado e biodiesel de soja e sebo bovino), bem como diâmetro médio de Sauter (SMD) teórico.

Para as misturas B/E verificou-se que ao se aumentar a porcentagem biodiesel ocorre um aumento na densidade, viscosidade e tensão superficial. Para as misturas B/D verificou-se que ao se aumentar a porcentagem de biodiesel ocorre um aumento na densidade e viscosidade, haja vista que biodiesel apresenta maior densidade e viscosidade, entretanto ao se aumentar a porcentagem de diesel ocorre um aumento na tensão superficial, haja vista que o diesel apresenta maior tensão superficial.

Para todos os combustíveis puros e todas as misturas analisadas verificou-se que um aumento na razão ar-líquido, ALR, conduz a uma diminuição no tamanho de gotas, uma vez que o aumento na ALR conduz a um aumento nas velocidades de saída e da turbulência no interior do injetor, resultando em uma atomização mais eficiente.

Verifica-se que os maiores tamanhos de gotas são obtidos para as misturas que possuem as maiores densidades, viscosidades e tensões superficiais, uma vez que para densidades maiores ocorre uma interação menor com o fluxo de ar de atomização sendo necessário uma quantidade maior de ar para se obter uma boa atomização, viscosidades maiores conduzem a um aumento no comprimento da folha de líquido não perturbada e na penetração do jato, impedindo a

formação de ondas, reduzindo a turbulência, e, tensões superficiais maiores conduzem a um aumento na resistência do fluido a uma força cisalhante causando um atraso na formação de ligamentos e gotas, resultando em tamanhos maiores de gotas.

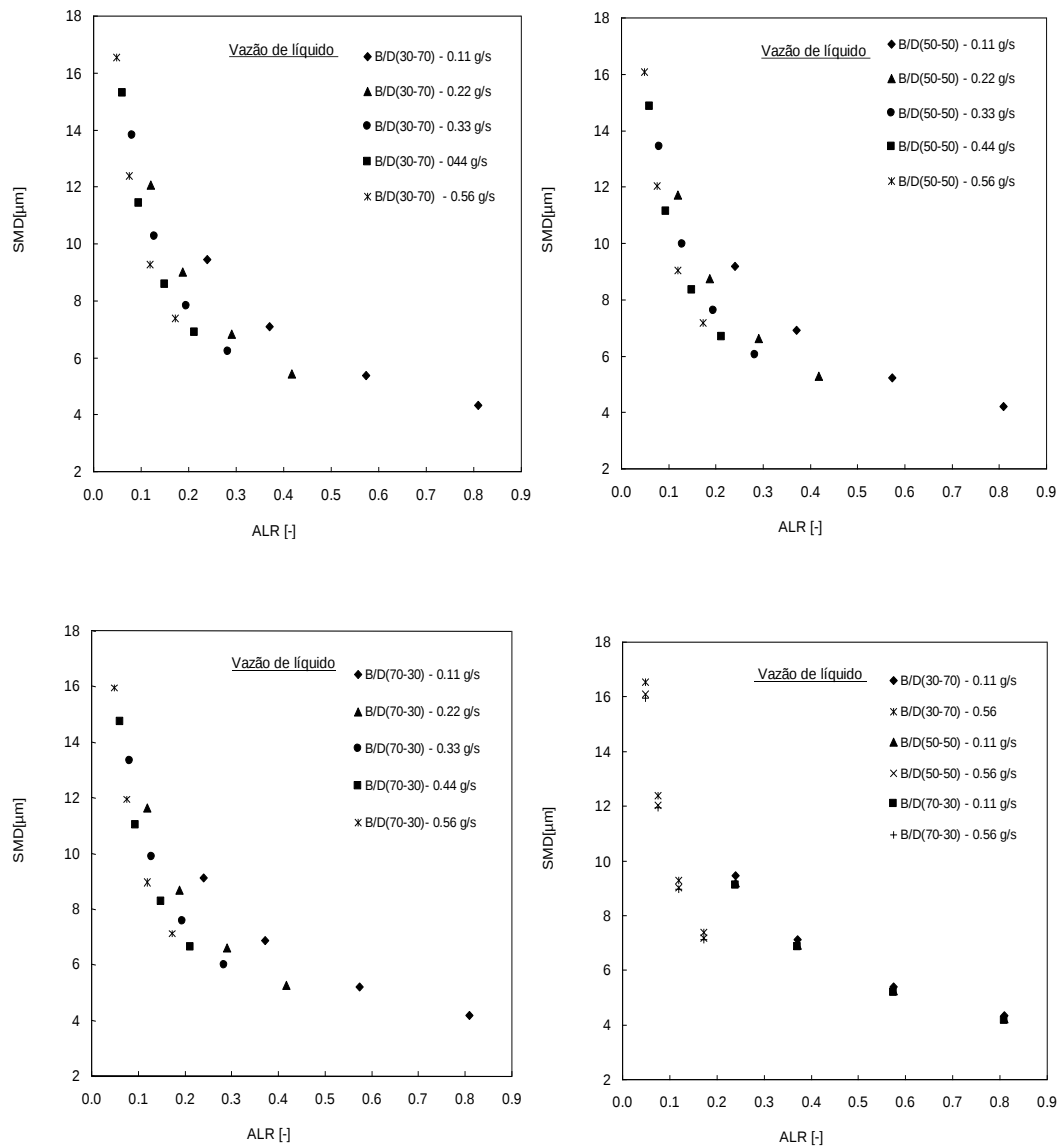


Figura 8. SMD teórico para a mistura B/D.

5. REFERÊNCIAS

- Azevedo, C. G.; Andrade, J. C. ; Costa, F. S. . Effects of injector tip design on the spray characteristics of soy methyl ester biodiesel in a blurry injector. *Renewable Energy* , v. 85, p. 287-294, 2016.
- Azevedo, C.G., Andrade, J.C., Couto, H.S.C. E Costa, F.S., Experimental valuation diagnostics of hydrous ethanol sprays formed by a blurry injector, *Journal of Aerospace Engineering Sciences and Applications*, v. 23, 3, pp. 193–209 (2013).
- Azevedo, C.G., Desenvolvimento de um sistema compacto de combustão sem chama visível utilizando um injetor blurry para queima de biocombustíveis. Tese de doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (2013).
- Dent JR, T. J. Mesoscale power generation incorporating heat-recirculation, porous inert media, and thermoelectric modules. 2012. Dissertation (Doctor of Philosophy) – School of the University of Alabama, Department of Mechanical Engineering, 2012.
- Gañán-Calvo, A. M. Enhanced liquid atomization: from flow-focusing to flow-blurring. *Applied Physics Letters*, v. 86, 2005.
- Lefebvre, A.H. Atomization and Sprays. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1989.

- Panchasara, H. V.; Sequera, D. E.; Schreiber, W. C.; Agrawal, A. K. Emissions reductions in diesel and kerosene flames using a novel fuel injector, *Journal of Propulsion and Power*, v. 25, n. 4, p. 984-987, 2009.
- Sadasivuni, V., Agrawal, A. K., (2009) A novel meso-scale combustion system for operation with liquid fuels, *Proceedings of the Combustion Institute*, 32 (2), pp. 3155–3162.
- Simmons, B., Agrawal, A. K., (2010) Spray characterization of a Flow-Blurring Atomizer, *Atomization and Sprays*, 20, pp. 821–835.
- Simmons, B., Agrawal, A. K., (2011) Drop size and velocity measurements in bio-oil sprays produced by the Flow Blurring Injector, *Proceedings of ASME Turbo Expo 2011*, GT2011-46832, ASME Turbo Expo 2011, Vancouver, British Columbia, Canada.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DETERMINATION OF DROPLETS THEORETICAL MEAN SIZE GENERATED BY A BLURRY INJECTOR FOR DIFFERENT FUEL BLENDS

Gabriel Baldin Nogueira, bngabriel@outlook.com¹

Otávio Mendes da Silva, otaviomendesdsilva@gmail.com¹

Claudia Gonçalves de Azevedo, claudia.azevedo@unesp.br¹

¹ Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Campus Experimental de Rosana – Avenida dos Barrageiros, 1881, Primavera, SP, Brasil.

Abstract. Growing environmental concerns, such as the energy resources cost, arouse the interest in the use of biofuels, especially ethanol and biodiesel, such as mixing them with conventional fuels in order to reduce costs, increase operating efficiency and reduce the emission of pollutants. The atomizing process of a liquid fuel plays a decisive role in several combustion primordial aspects. Such influence is increasingly significant since combustion systems are subject to increasingly stringent emission limits. In sprays combustion the liquid is atomized in order to increase the area of contact between the fuel and the oxidant, thus increasing the vaporization and reaction rates. Since injectors have a fundamental role in combustion systems, it is necessary to carry out studies that significantly contribute to the improvement of such systems. Thus, the present work aims to determine the main physico-chemical properties that influence the spray characteristics: density, viscosity and surface tension for different blends of conventional fossil fuel (S500 diesel) and biofuels (hydrous ethanol and soybean and bovine tallow biodiesel), such as to determine the droplets theoretical mean size produced by a blurry injector for the analyzed blends.

Keywords: blurry injector, biofuels, fossil fuels, Sauter mean diameter