

Efeito do Biodiesel na Atomização do Combustível em Motores Diesel de Injeção Direta

Marcia Dardari Castanheira Faria¹, Ricardo Rodrigues da Cunha Pinto¹, Maria Letícia Murta Valle²

¹PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

² Universidade Federal do Rio de Janeiro/Escola de Química
e-mail: murta@eq.ufrj.br

RESUMO

Neste trabalho, foram analisados os efeitos da utilização de biodiesel de mamona e soja, puros e em misturas com óleo diesel, na qualidade da atomização na câmara de combustão de um motor de ciclo diesel, com sistema de injeção tipo common-rail. Os parâmetros que descrevem as características externas do spray gerado na câmara de combustão foram estimados a partir de modelos conhecidos da literatura. Estes modelos são funções que dependem das propriedades físico-químicas do combustível e das condições operacionais do motor, tais como, pressão do ar na câmara de combustão e perda de carga no injetor. Foi observada uma tendência à redução da qualidade de atomização à medida que o teor de biodiesel nas misturas diesel/biodiesel aumenta. Esta redução da qualidade é expressa por um aumento do diâmetro médio das gotas e do tempo de ruptura e pela redução do alcance do jato. Estes efeitos foram mais pronunciados para o biodiesel obtido a partir de mamona (éster metílico e etílico) se comparado ao biodiesel de soja.

Palavras chaves: biodiesel, diesel, atomização, common-rail

INTRODUÇÃO

O aumento da consciência ambiental e a escassez de energia têm incentivado o uso de combustíveis alternativos, tais como, hidrogênio, etanol, biodiesel, dimetil-éter, em substituição aos combustíveis fósseis⁽¹⁾. Dentre deles, o biodiesel tem recebido especial atenção como um substituto para o petróleo convencional em motores diesel, já que, é produzido a partir de recursos renováveis e é biodegradável. O biodiesel pode ser usado em motores diesel convencionais, sem modificações no motor, e a sua oxigenação e o elevado índice de cetano contribuem para melhorar a eficiência da combustão e a redução de emissões⁽²⁾.

A combustão e o desempenho de um motor a diesel em relação às emissões dependem da qualidade da mistura ar-

combustível e da quantidade de ar injetada. Uma mistura homogênea resulta em uma menor emissão de particulados e numa maior eficiência do motor. A qualidade da mistura ar-combustível é afetada pelas características da atomização (spray) na câmara de combustão e pelas propriedades do combustível, tais como, a densidade, a viscosidade, a tensão superficial e eficiência de mistura entre combustível e ar de admissão^(3,4).

Diversos modelos foram propostos para estimar a qualidade da atomização dentro da câmara de combustão de motores diesel⁽⁵⁻⁹⁾. Com o uso crescente do biodiesel, estudos têm sido realizados com vistas a avaliar o efeito das propriedades de diferentes ésteres e suas misturas com diesel, sobre o desempenho do motor^(4,10-12). Os resultados mostram que o efeito

do biodiesel sobre o processo de atomização na câmara de combustão é função não apenas das condições de operação do motor⁽¹³⁾, como também, do tipo de éster, ou seja, da sua composição química, e do teor de biodiesel na mistura diesel biodiesel.

Este trabalho teve como objetivo, analisar os efeitos do biodiesel combustível na qualidade de atomização no interior da câmara de combustão em um motor diesel equipado com um sistema de injeção tipo *common-rail*. Foram selecionados combustíveis (biodiesel) produzidos a partir de duas matérias-primas nacionais: mamona e soja. A soja foi selecionada por se tratar da maior fonte de produção de biodiesel no Brasil e a mamona por ter na sua estrutura química o ácido ricinoléico. Este hidroxiácido confere aos ésteres derivados da mamona a possibilidade de formar ligações de hidrogênio, resultando em valores de densidade, tensão superficial e viscosidade mais altos do que os das matérias-primas convencionais.

Foram avaliadas misturas biodiesel/diesel com diferentes teores de biodiesel (B2, B5, B10, B15 e B20) nas condições operacionais propostas para o sistema de injeção do tipo *commonrail*. Os parâmetros que definem a qualidade de atomização, tais como, tempo de ruptura, diâmetro médio de gotas, ângulo de cone e alcance, foram estimados a partir de correlações selecionadas na literatura^(4,16).

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Neste trabalho foram utilizados biodiesel de soja (metil éster) e biodiesel de mamona (Amostra A - etil éster e amostra B - metil éster). O biodiesel de soja era um produto comercial e as duas amostras de biodiesel de mamona obtidas em unidade piloto. No preparo das RQI – 2º trimestre 2010

mistura diesel/biodiesel foi usado diesel com características parafínicas.

As misturas volumétricas diesel/biodiesel foram preparadas a partir da determinação da densidade dos componentes em densímetro digital, modelo DMA-48, de acordo com o método ASTM D 4052. Além dos componentes puros, foram avaliadas misturas de B2, B5, B10, B15 e B20. A viscosidade cinemática foi determinada em viscosímetro Cannon Fenske Routine utilizando o método descrito na norma ASTM D445. A tensão superficial foi medida em um tensiômetro Krüss – Modelo: K10ST segundo o método ASTM D971. Os resultados destas determinações encontram-se na Tabela 1. Os valores obtidos para a densidade $d_{40/4}$ do ar e do óleo diesel foram 0,012 e 0,832, respectivamente, e para a viscosidade cinemática e tensão superficial para o óleo diesel a 40°C, foi de 4,2 mm²/s e 25,1 mN/m.

Tabela 1 – Propriedades das Misturas Utilizadas

Misturas	Teor de biodiesel [%v/v]	Soja			Mamona (A)			Mamona (B)		
		$d_{20/4}^{(1)}$	$\mu^{(2)}$	$\sigma^{(3)}$	$d_{20/4}^{(1)}$	$\mu^{(2)}$	$\sigma^{(3)}$	$d_{20/4}^{(1)}$	$\mu^{(2)}$	$\sigma^{(3)}$
B2	2	0,832	4,2	25,1	0,832	4,3	25,1	0,833	4,4	25,3
B5	5	0,833	4,2	25,1	0,834	4,3	25,2	0,835	4,5	25,4
B10	10	0,837	4,3	25,2	0,836	4,3	25,2	0,839	4,6	25,5
B15	15	0,835	4,4	25,2	0,84	4,6	25,3	0,842	4,9	25,6
B20	20	0,838	4,4	25,3	0,843	4,8	25,3	0,846	5,1	25,7
B100	100	0,873	5,6	27,4	0,911	13,9	29,1	0,901	13,5	29,4

(1) Densidade média de três determinações.

(2) Viscosidade cinemática média de três determinações, a 40°C, em mm²/s.

(3) Tensão superficial média de duas determinações, a 40°C, em mN/m.

Estimativa dos parâmetros da atomização

O regime de atomização produz um formato cônico como esquematizado Figura 1. Os parâmetros, ângulo de cone, alcance, comprimento de ruptura (breakup) e distribuição dos diâmetros ao longo da superfície atomizada, caracterizada pelo diâmetro médio de Sauter (SMD), foram estimados por meio de equações

descritas nos itens seguintes. O regime transiente não foi considerado⁽¹⁴⁾. As propriedades do líquido foram determinadas antes da injeção e as propriedades físico-químicas do ar foram definidas nas condições de operação da câmara de combustão.

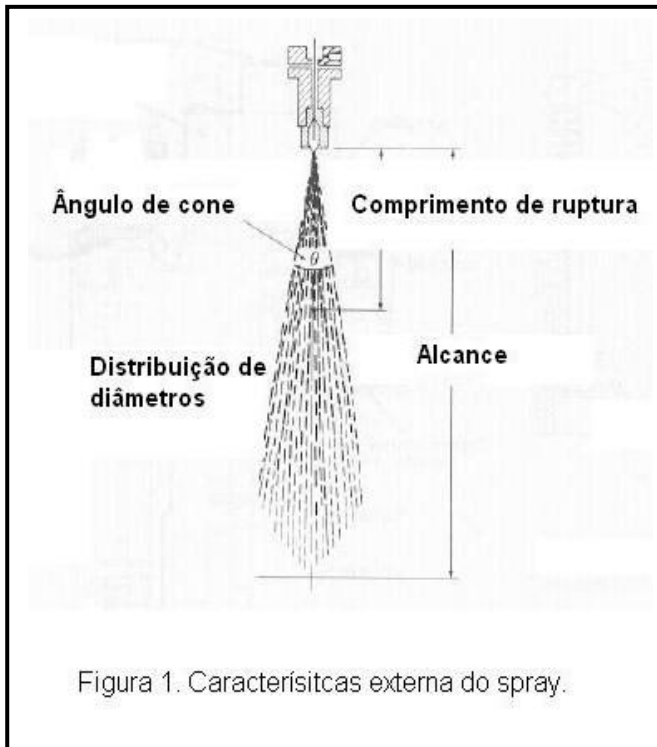


Figura 1. Características externa do spray.

O alcance é definido como sendo a distância máxima atingida pelo spray gerado no interior da câmara de combustão. É função da velocidade do jato e da resistência fornecida pelo ar na câmara de combustão ao escoamento do combustível. Um alcance (S) além do desejado pode levar ao contato direto do combustível com as paredes frias da câmara de combustão aumentando o consumo de combustível. Para as situações operacionais de baixa carga e de carga moderada o alcance foi calculado pela correlação proposta por SITIKI (Equação 1) e para a de plena carga pela correlação de Dent (Equação 2)

(15)

$$S = 0,2d_o \left(\frac{U_L t}{d_o}\right)^{0,48} \left(\frac{U_L d_o}{v_L}\right)^{0,3} \left(\frac{\rho_L}{\rho_a}\right)^{0,35} \quad (1)$$

$$S = 3,01 \left[\left(\frac{\Delta P_L}{\rho_a}\right)^{0,5} d_o t\right]^{0,5} \left(\frac{295}{T_A}\right)^{0,25} \quad (2)$$

O ângulo de cone foi estimado pela equação proposta por Abramovich⁽¹⁴⁾ (Equação 3).

$$\tan \theta = 0,13 \left(1 + \frac{\rho_a}{\rho_L}\right) \quad (3)$$

Devido ao próprio mecanismo de atomização, o spray pode ser considerado como uma distribuição arbitrária de diâmetros de gotas em torno de um determinado valor médio. A distribuição de diâmetros presente no spray pode ser representada como uma função de dois parâmetros: intervalo de diâmetros que o compõe e o diâmetro representativo. Neste trabalho foi utilizado o diâmetro médio de Sauter (SMD), sendo este, o diâmetro da gota que representa a razão entre a área superficial e o volume do spray formado. Para a estimativa do SMD foi utilizada a correlação de ELKOBT⁽⁵⁾ (Equação 4).

$$SMD = d_o (107 Re^{-0,183} We^{-0,442} Cd^{-0,422} \left(\frac{\rho_L}{\rho_a}\right)^{-0,05}) \quad (4)$$

O tempo de ruptura é o intervalo de tempo decorrido entre a injeção do combustível na câmara e o início da desintegração secundária. Quanto maior for este tempo, menor será a velocidade relativa entre o spray e o ar dentro da câmara de combustão, no início da desintegração secundária. Isto poderá dificultar a interação entre o combustível e o ar, o dando origem a gotas de diâmetros maiores. O tempo de ruptura foi calculado utilizando-se a Equação 5 para as condições de carga baixa, moderada e plena.

$$t_b = 28,65 \rho_L d_o (\rho_a \Delta P_L)^{-0,5} \quad (5)$$

As diferenças entre as situações de baixa carga, carga moderada e plena carga foram

caracterizadas pela quantidade de combustível injetado e na quantidade fixa de ar admitido pelo sistema de turbo-compressão. Como limites das faixas de operação para as diferentes cargas foram utilizados os valores reportados por HIGGINS⁽¹⁶⁾ e mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Condições operacionais dos motores diesel de injeção direta⁽¹⁾

Condição operacional do motor diesel	Temperatura [K]	Par [Kg/m ³]
Baixa carga	700	3,6
Carga moderada	1000	14,8
Plena carga	1300	59

⁽¹⁾ Condições típicas reportadas por DESANTES (1988)

Para o cálculo das características do spray, foi utilizada uma velocidade de injeção de combustível igual a 200 m/s e o tempo de injeção de 0,2 ms, segundo ALLOCA. A perda de carga através do furo do injetor foi considerada como sendo a diferença de pressão entre a pressão de injeção (900 bar) e a existente no interior da câmara de combustão no momento da injeção (30 bar), ou seja, 870 bar⁽¹⁷⁾.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores estimados para o diâmetro médio de Sauter (SMD) nas situações operacionais de baixa carga, carga moderada e plena carga encontram-se na Figura 2 onde o

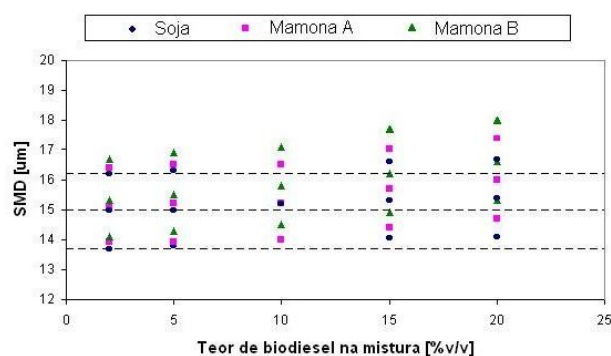


Figura 2. Valores de SMD à baixa carga, moderada e plena carga.

SMD referente ao diesel está indicado por uma linha tracejada. Verifica-se uma tendência ao aumento do SMD à medida que o teor de biodiesel na mistura cresce, em todas as situações operacionais. A Figura 3 é uma comparação entre os valores de SMD para os combustíveis puros observando-se um aumento significativo do valor desta propriedade quando o biodiesel é comparado com o diesel, sobretudo para o biodiesel de mamona.

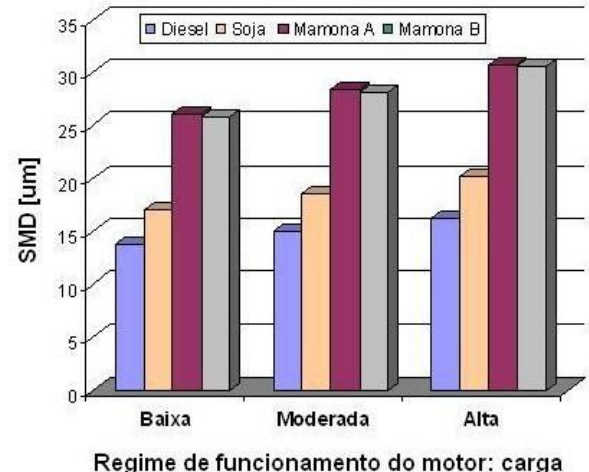


Figura 3. Valores de SMD para o diesel e biodiesel puro: soja, mamona A e mamona B.

O alcance estimado para o regime de baixa carga e de carga moderada é função do teor de biodiesel presente na mistura como mostrado na Figura 4.

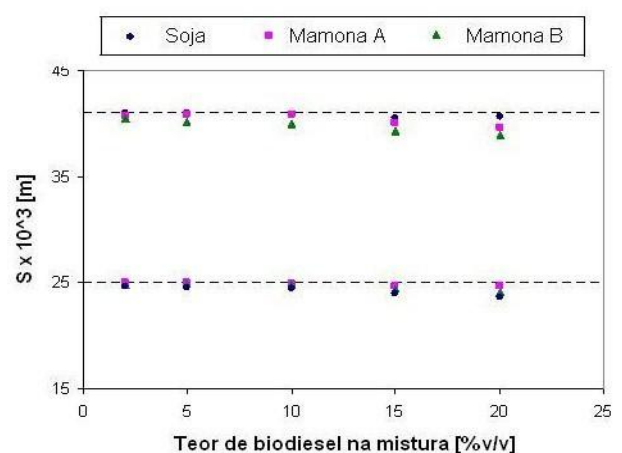
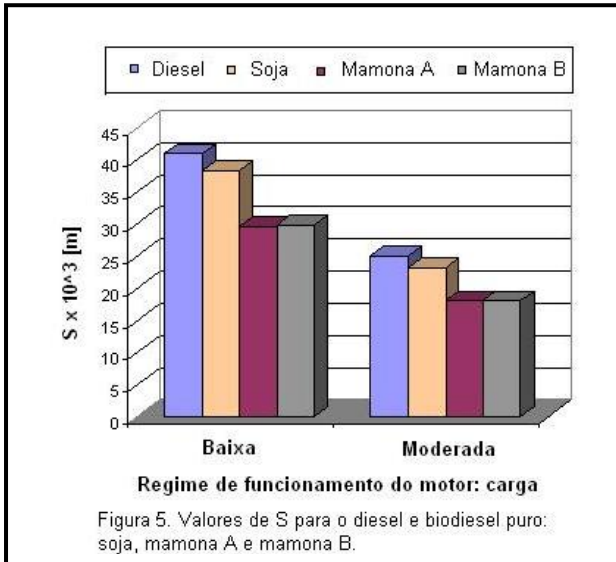


Figura 4. Valores do alcance à baixa carga e moderada.

Há uma redução importante no alcance quando o diesel é substituído pelo biodiesel, como mostrado na Figura 5. Quando o sistema passa de baixa para a plena carga, a massa de ar dentro da câmara de combustão aumenta, acarretando em uma maior resistência ao escoamento do fluxo de combustível. Este fato resulta em uma diminuição do alcance à medida que a potência do motor cresce.



O alcance a plena carga, estimado pela equação proposta por DENT⁽¹⁵⁾, resulta em um valor constante (12,3 mm), já que, pelo modelo proposto este é função das condições operacionais do sistema e não das propriedades físico-químicas do combustível.

Os valores estimados para o tempo de ruptura mostram um aumento deste tempo à medida que a proporção de biodiesel no óleo diesel cresce e uma diminuição deste tempo quando o sistema passa de baixa para plena carga. Entretanto, a variação máxima observada foi cerca de 2%, em relação ao diesel, para misturas até B20. Esta variação é maior para o biodiesel puro conforme Tabela 3.

Não foi observada variação do ângulo do cone em função do combustível empregado. O ângulo de cone calculado para as condições

operacionais de baixa carga, carga moderada e plena carga foi de, respectivamente, 7,5°, 7,6° e 7,9°.

Tabela 3- Tempo de ruptura para o diesel, biodiesel e B20

Combustível	Carga		
	Baixa	Moderada	Alta
	$t_b \times 10^3$ [s]		
Diesel	195	96	48
Soja (B20)	197	97	49
Soja	205	101	51
Mamona A (B20)	198	98	49
Mamona A	214	105	53
Mamona B (B20)	199	98	49
Mamona B	213	105	53

CONCLUSÕES

A adição de biodiesel ao diesel afeta a atomização do combustível em motores com sistemas de injeção tipo *common-rail*. À medida que o teor de biodiesel nas misturas diesel/biodiesel aumenta, observa-se uma redução na qualidade da atomização em decorrência do aumento do diâmetro médio das gotas e do tempo de ruptura e da redução do alcance do jato.

O aumento no diâmetro das gotas (SMD) diminui a transferência de massa no processo de combustão resultando em aumento no consumo e emissões. Da mesma forma, o aumento do tempo de ruptura, reduz a extensão da desintegração secundária o que pode gerar gotas com diâmetros maiores, ou seja, um aumento no SMD.

Além disso, a redução do alcance do spray para os regimes de baixa carga e carga moderada pode ocasionar um motor operando fora dos limites de projeto resultando em uma mistura ar-combustível insatisfatória na câmara de combustão⁽⁴⁾.

Não apenas a oleaginosa de origem do biodiesel (o biodiesel de mamona afeta mais a atomização do que o de soja), como também, o éster usado na transesterificação (o éster metílico

de mamona é menos favorável do que o etil éster).

Estes resultados sugerem que a substituição do diesel por misturas diesel/biodiesel, sobretudo quando são utilizados elevados teores de biodiesel, deve ser acompanhada de ajustes nas condições operacionais do motor com vistas à otimização do seu desempenho.

SÍMBOLOS EMPREGADOS

d_o = diâmetro do furo do injetor [m]
DPL = perda de carga através do orifício [bar]
Re = número de Reynolds
S = alcance [m]
SMD = diâmetro médio de Sauter [μm]
t = tempo decorrido entre a injeção e o instante de tempo considerado [s]
 t_b = tempo de ruptura [s]
 T_A = temperatura do ar no interior da câmara de combustão [K]
 U_L = velocidade de injeção do combustível [m/s]
We = número adimensional de Weber,
 ρ_a = massa específica do ar [kg/m^3]
 ρ_L = massa específica do combustível [kg/m^3]
 μ_L = viscosidade dinâmica do combustível [kg/ms]
 ν_L = viscosidade cinemática do combustível [kg/s^2]
 σ_L = tensão superficial do combustível [kg/s^2]
 θ = ângulo de cone, graus

REFERÊNCIAS

- 1) Bang S H, Lee C S, Fuel injection characteristics and spray behavior of DME blended with methyl ester derived from soybean oil Fuel 89 (2010) 797–800
- 2) SRIVASTAVA, A.; PRASSAD, R. Triglycerides-based diesel fuels, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 4(2000)111-133.
- 3) He C, Ge Y, Tan J, Han X, Spray properties of alternative fuels: A comparative analysis of biodiesel and diesel, International Journal of Energy Research 32(2008) 1329–1338
- 4) Park S H, Kim H J, Suh H K, Lee C S, Experimental and numerical analysis of spray-atomization characteristics of biodiesel fuel in various fuel and ambient temperatures conditions International Journal of Heat and Fluid Flow 30 (2009) 960–970

- 5) ELKOBT, M.M. Fuel atomization for spray modeling. Progress in Energy Combustion Science, 8 (1982) 61-91
- 6) TABATA, M.; ARAI, M.; HIROYASU, H. Effect of fuel viscosity and surface tension on diesel spray drops. In: I CLASS – 85. (1985).
- 7) ALLOCA, L.; BELARDINI, P.; BERTOLI, C. *et al.* Experimental and numerical analysis of a diesel spray, Society of Automotive Engineers, (1992). N° de série: 920576.
- 8) DESANTES, J. M.; ARRÈGLE, J.; PASTOR J.V. Influence of the fuel characteristics on the injection process in a D.I. diesel engine, Society of Automotive Engineers (1998) 1185-1195. N° de série: 980802
- 9) FAETH, G.M.; HSIANG, L.P.; WU, P. K. Structure and breakup of sprays. International Journal of Multiphase Flow, 21 (1995) 99-127.
- 10) GRIMALDI, C.; PROSTRIOTI, L. Experimental comparison between conventional and bio-derived fuels sprays from a common rail injection system. Detroit: SAE International (2000) 13p. SAE Technical Papers
- 11) ALLEN, C.A.W.; WATTS, K.C.; ACKMAN, R.G. *et al.* Predicting the viscosity of biodiesel fuels from their fatty acid ester composition. Fuel, 78, (1999) 1319-1326 Series 2000 –01-1252
- 12) Ejim C E, Fleck BA, Amirfazli A, Analytical study for atomization of biodiesels and their blends in a typical injector: Surface tension and viscosity effects Fuel 86 (2007) 1534–1544
- 13) Kim H J, Su Han Park S H, Sik Lee C S, A study on the macroscopic spray behavior and atomization characteristics of biodiesel and dimethyl ether sprays under increased ambient pressure Fuel Processing Technology 91 (2010) 354–363
- 14) HEYWOOD, J. Internal combustion engine fundamentals. USA: McGraw-Hill, (1988)
- 15) LEFEBVRE, A.H. Atomization and Sprays. Indiana: Taylor & Francis (1988)
- 16) HIGGINS, B. S.; MUELLER, C. J.; SIEBERS, D. L. Measurements of fuel effects on liquid-phase penetrations in DI sprays. Detroit: SAE International, (1999) 13p. SAE Technical Papers Series 1999-01-0519