

ANÁLISE DO ATRASO DE IGNIÇÃO NA COMBUSTÃO DE MISTURAS BIODIESEL-DIESEL

F. A. F. Gomes, f.augustofgomes@gmail.com¹

J.H.B. Silva, jackson.h.b.silva@gmail.com²

F.P.F. Dias, felipe.dias@fanor.edu.br³

D. C. Silva, daniel.carlos@alu.ufc.br²

A. V. Bueno, bueno@ufc.br²

¹ Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, SP, Brasil, Rua Dr. Olímpio da Silva Miranda, nº 646, Cidade Universitária.

² Universidade Federal do Ceará - UFC, CE, Brasil, Campus Universitário do PICI, Bloco 714, CEP 60455-760,

³ Faculdade do Nordeste – Devry, CE, Brasil, Rua Jornalista Nertan Macedo, nº 165, Cocó, CEP 60192-450,

Resumo: Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de se analisar os impactos sobre o atraso de ignição e sobre as características da combustão devido à adição de biodieseis derivados do óleo de soja, do óleo de mamona e do sebo bovino ao diesel mineral. O atraso de ignição foi determinado utilizando-se dados de diferencial da pressão no cilindro de combustão e na bomba de injeção de combustível. As características da combustão foram analisadas através da fração de combustível queimado na fase pré-misturada da combustão, empregando-se os dados experimentais da taxa de liberação de energia com um novo método para função simples de Wiebe. As medições ocorreram em ensaios dinamométricos em três regimes de carga utilizando-se um motor diesel turbo-alimentado de porte médio. Os combustíveis testados foram misturas B20 dos biodieseis e diesel mineral. Os resultados apontam que as misturas com biodiesel apresentam menores atrasos de ignição devido ao maior número de cetano dos biodieseis, sendo o sebo bovino o que apresentou menor atraso. Os valores das frações de combustível queimado para as misturas B20 foram inferiores aos do diesel com exceção da mamona.

Palavras-chave: biodiesel-diesel, liberação de calor, função de Wiebe.

1. INTRODUÇÃO

Devido ao grande número de veículos automotores nos centros urbanos, o consumo de combustíveis fósseis e os poluentes liberados pela sua queima têm chegado a níveis alarmantes. Na Europa a EURO VI está em vigor atualmente com limites de emissão de poluentes mais rigorosos para veículos de passeio e comerciais. Estudos relacionados aos biocombustíveis mostram reduções na geração de poluentes e melhor desempenho do motor (Bhuiya, 2016; Bueno, 2011; Chauhan, 2012 e Rocha, 2011).

A busca por fontes de energia alternativas ao petróleo se intensificou bastante no Brasil no começo da década de 1970, resultado da crise energética internacional da época. Os dois principais biocombustíveis líquidos que passaram a ser usados no Brasil, e que ainda são os mais utilizados, foram o etanol derivado da cana-de-açúcar e o biodiesel derivado de óleos vegetais ou gordura animal. Em 2005, o Programa Nacional de Produção de Biodiesel (PNPB) foi inaugurado gerando incentivo para uma maior produção de biodiesel. Outro fator contribuinte é fato de o país possuir uma área abundante de recursos naturais propícios à produção de biodiesel. Em 2015 a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, divulgou dados mostrando que o Brasil está entre os maiores produtores de biodiesel do planeta.

A legislação continua a incentivar uma maior produção de biodiesel. Em 2008, o comércio de misturas de 2% em volume de biodiesel puro (B100) ao óleo diesel se tornou obrigatório. A porcentagem desde então só aumentou, sendo na legislação atual de 2016, Lei 13.033/2014, mandatório o uso de 7% em volume.

O estudo dos efeitos das misturas biodiesel-diesel em motores de combustão interna cresceu bastante nas últimas décadas. A análise da taxa de liberação de energia e atraso de ignição são parâmetros fundamentais no estudo das características da ignição e combustão em motores diesel (Bhuiya, 2016; Ghazali, 2015 e Oo, 2015). Sabendo da relação direta entre o atraso de ignição e combustão pré-misturada, esse trabalho tem como objetivo analisar o atraso de ignição de misturas biodiesel-diesel e a fração queimada de combustível na combustão pré-misturada.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para os objetivos deste trabalho, as análises foram realizadas com os combustíveis Diesel A S10, cujas propriedades estão na Tab. 1, e misturas de 20% em volume de biodiesel no diesel, sendo analisadas as misturas com três biodieises: de soja (BS20), de sebo bovino (BSB20) e de mamona (BM20), ver Tab. 2.

Tabela 1 - Propriedades físico-químicas do Diesel A S10

Propriedade	Diesel A	Limite
Viscosidade Cinemática a 40 °C (cSt)	2,53	2,0-4,5
Ponto de Fulgor (°C)	64	Mín 38
Ponto de Fluidez (°C)	-15	-
Poder Calorífico Inferior (MJ.kg-1)	42,25	-
Densidade (kg.m-3) (20 °C)	829,90	815-850
Número de Cetano	48	Mín 48

Tabela 2 - Propriedades físico-químicas dos Biodieises

Propriedade	BS100	BSB100	BM100	Limite
Viscosidade cinemática a 40 °C (cSt)	4,16	4,79	14,5	3,0-6,0
Umidade (mg/kg)	184,15	222,90	832,55	200 mg/kg
Teor de metil éster (%)	99,46	85	76	96,5
Ponto de fulgor (°C)	176,65	101,3	273,1	Mín 100
Ponto de fluidez (°C)	-6	11,3	-30	-
Poder calorífico inferior (MJ.kg-1)	40,48	39,28	37,34	-
Densidade (kg.m-3)	882,90	872,10	924,40	850-900
Índice de saponificação (mg KOH.g-1)	198,47	198,23	181,45	-
Índice de iodo (gI2.100 g-1)	121,60	40,60	83,40	-
Índice de acidez (mg KOH.g-1)	0,80	0,30	0,50	Anotar
Fórmula empírica	C18,83H34,82O2	C18,21H35,44O2	C17,96H35,82O2,86	-
Estabilidade oxidativa (h)	5,30	7,47	31,72	Mín 8
Número de Cetano	52,10	68,77	50	Anotar

Esses combustíveis foram queimados em um motor diesel, modelo MWM 229T6, operando em três regimes de carga; alta, média e baixa com pressão de frenagem de 750, 500 e 250 kPa, respectivamente, controladas em uma bancada dinamométrica.

A medição da pressão no cilindro de combustão foi realizada com um transdutor de pressão piezoelétrico modelo 7061B, localizado acima da cavidade do pistão. Um conversor recebe o sinal de saída do transdutor e produz os dados da derivada da pressão. Esses dados foram colhidos em 100 ciclos consecutivos com intervalos de leitura espaçados de 0,1 grau do ângulo de manivela. Integrando-se numericamente os dados, obtiveram-se os valores da pressão. A posição do ponto morto superior foi determinada via um sensor capacitivo.

O atraso de ignição foi obtido pela diferença entre o ângulo de injeção do combustível e o ângulo de ignição. As curvas de pressão da bomba de injeção possibilitaram encontrar o ângulo de injeção enquanto o ângulo de ignição foi adquirido pelas curvas da derivada da pressão.

A função de Wiebe para a fração queimada e a taxa de queima em função do ângulo de manivela é dada na forma (Heywood, 1989):

$$x = 1 - \exp \left[-6,9 \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_t} \right)^{m+1} \right] \quad (1)$$

$$\frac{dx}{d\theta} = \frac{6,9 \cdot (m+1)}{\theta_t} \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_t} \right)^m \cdot \exp \left[-6,9 \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_t} \right)^{m+1} \right] \quad (2)$$

Onde:

x é a fração de combustível queimada em um ângulo de manivela θ .

θ_t é o ângulo de manivela correspondente à queima de 99% do combustível.

m é o parâmetro de forma da função de Wiebe.

Para a fração de queima pré-misturada, a taxa de liberação de energia da combustão em relação ao ângulo de manivela ($dQ/d\theta$) pode ser escrita em função da taxa de queima como:

$$\frac{dQ_p}{d\theta} = Q_p \cdot \frac{6,9(m+1)}{\theta_p} \left(\frac{\theta}{\theta_p}\right)^m \cdot \exp\left[-6,9\left(\frac{\theta}{\theta_p}\right)^{m+1}\right] \quad (3)$$

Com Q_p sendo a energia total liberada pelo processo de combustão pré-misturada. Utilizou-se um ajuste numérico para se aproximar a função de Wiebe aos dados experimentais de liberação de energia, obtendo-se como resposta os valores de Q_p .

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

3.1 Taxa aparente de liberação de energia

As Fig. 2 a 4 ilustram a taxa aparente da liberação de energia normalizada pela liberação total de energia de cada combustível, em relação ao ângulo de manivela de todos os combustíveis em todos os regimes de operação.

Constatou-se em todos os regimes que no começo da combustão há um leve declínio na taxa aparente de liberação de energia, atingindo valores negativos, seguido de um crescimento repentino até atingir seu valor máximo. Tal queda pode ser atribuída aos efeitos físicos e químicos que ocorrem na fase de atraso da ignição, caracterizados usualmente como endotérmicos (Sahoo, 2009).

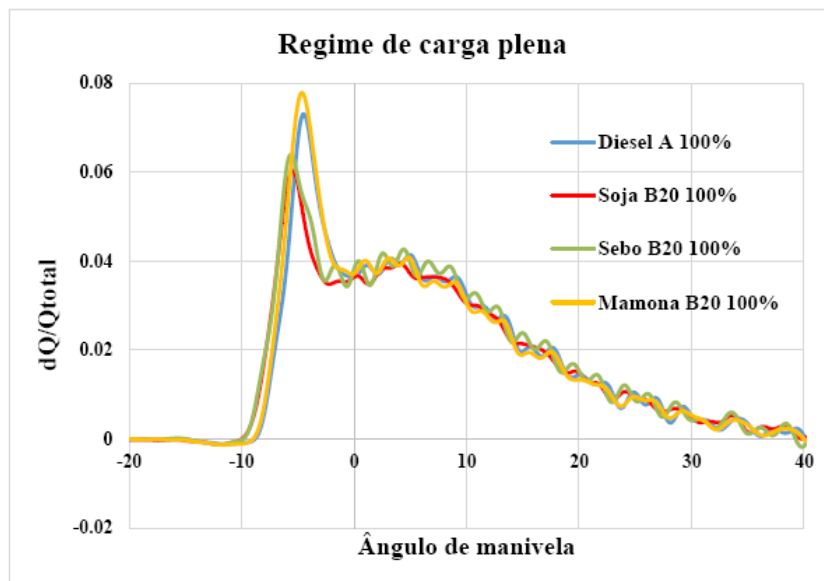


Figura 2 - Taxa de liberação de energia em regime de carga plena.

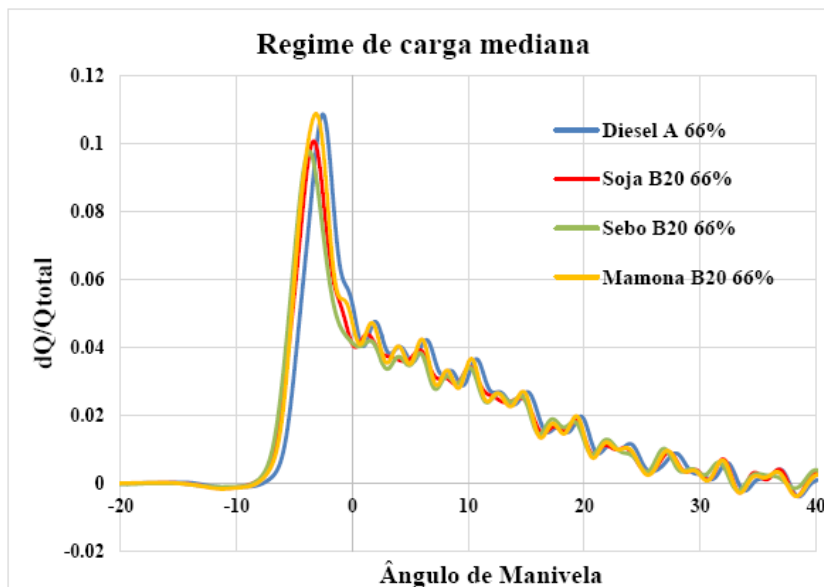


Figura 3 - Taxa de liberação de energia em regime de carga mediana.

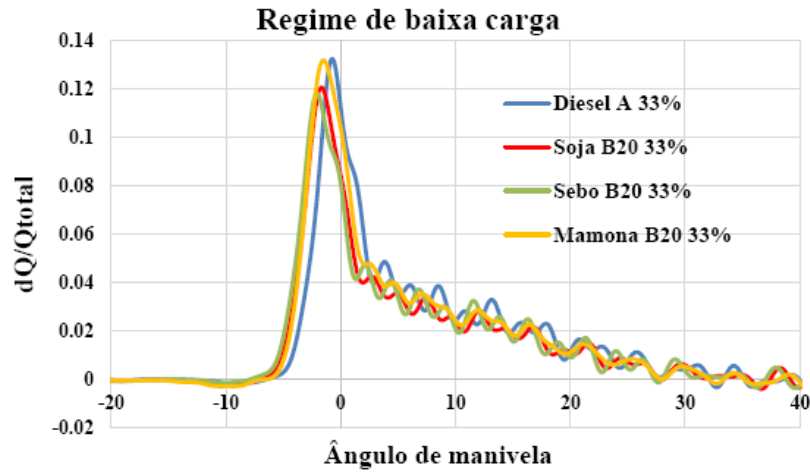


Figura 4 - Taxa de liberação de energia em regime de carga baixa.

3.2 Função Simples de Wiebe na combustão pré-misturada

A taxa de liberação de energia prevista pela função simples de Wiebe para a combustão pré-misturada se assemelha bastante aos dados experimentais, Fig. 5 a 7. O ângulo de manivela foi normalizado em relação ao início da combustão enquanto a taxa de calor liberada foi normalizada pela quantidade de energia total liberada pela combustão. Porém, a partir de um ângulo posterior ao pico da curva, aproximadamente 1 grau, a diferença entre os valores se estende continuamente. Isso acontece devido a crescente influência causada pela combustão difusiva ao longo da combustão, que, subsequente a esse ponto, se torna cada vez mais dominante (Heywood, 1989). Os valores usados para calcular a variância, Eq.(5) levaram em consideração somente os pontos até um grau subsequente ao pico dos diagramas.

$$\text{Variância} = \frac{\sum_{i=0}^n (dQ_{\text{experimental}} - dQ_{\text{wiebe}})^2}{n} \quad (5)$$

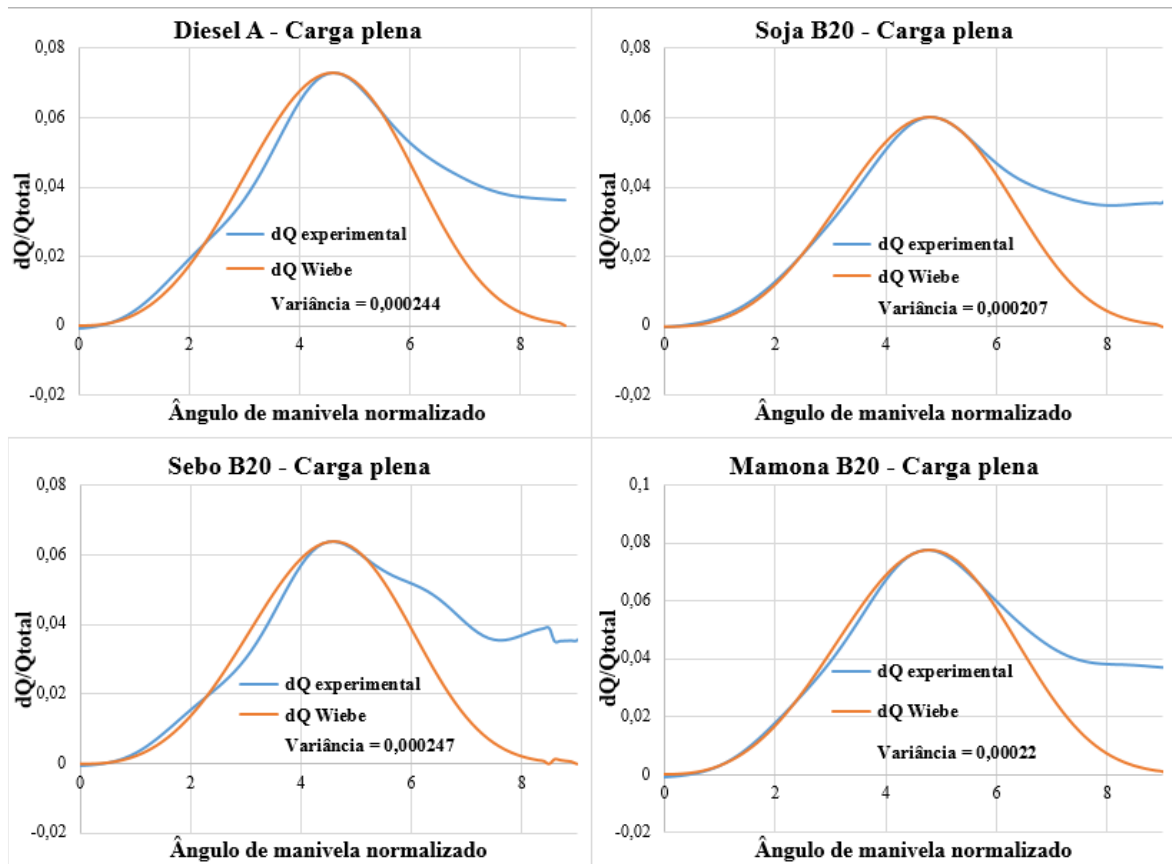


Figura 5 - Comparação da função simples de Wiebe com os dados experimentais em regime de alta carga.

Devido os baixos valores de variância os resultados encontrados para a fração queimada de combustível na combustão pré-misturada, Q_p , podem ser considerados confiáveis.

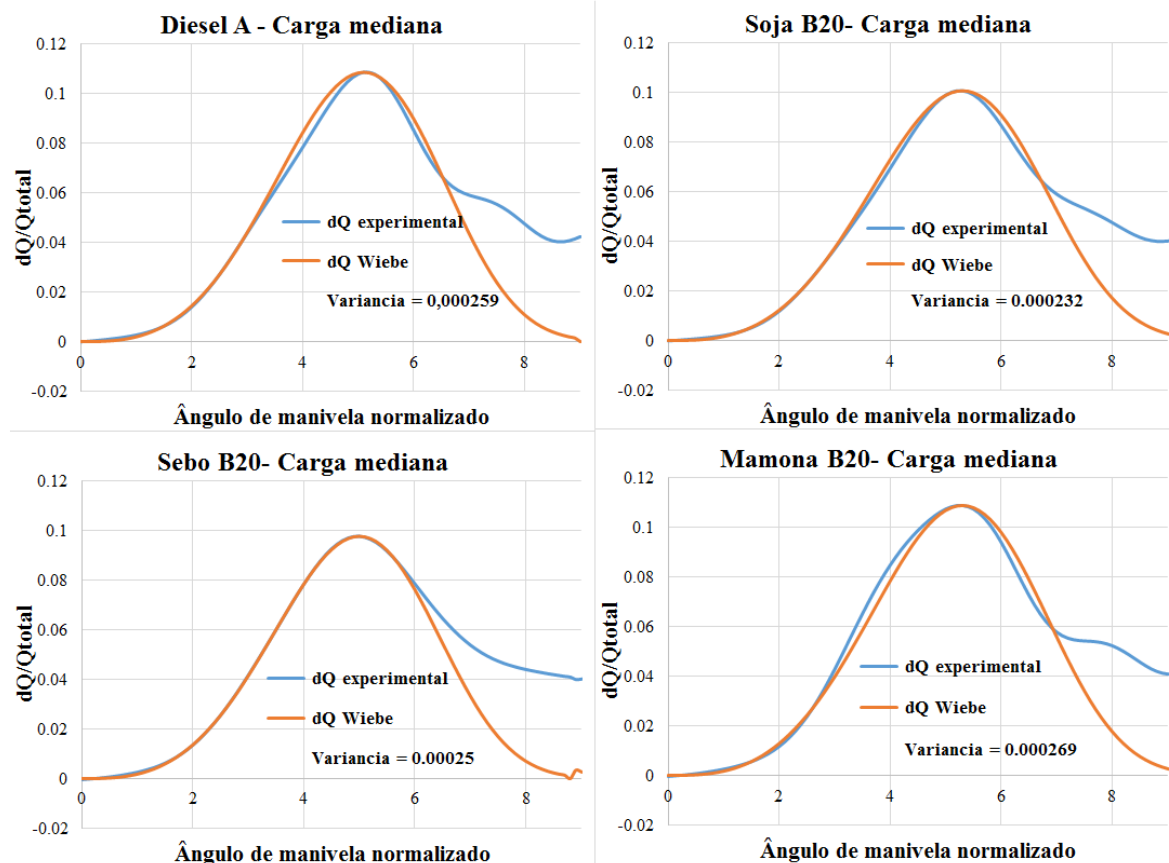


Figura 6 - Comparação da função simples de Wiebe com os dados experimentais em regime de carga média.

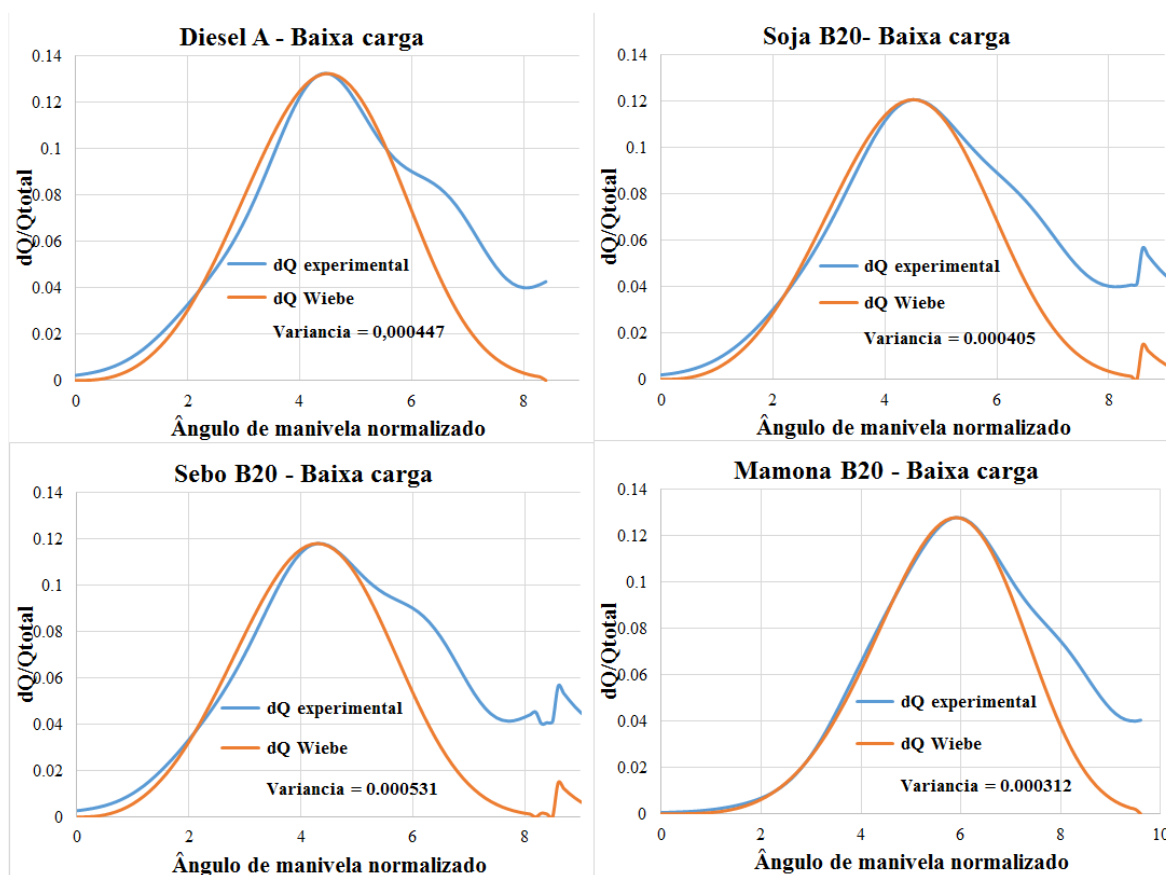


Figura 7 - Comparação da função simples de Wiebe com os dados experimentais em regime de baixa carga.

3.3 Atraso de Ignição e Fração queimada

Na Fig.8, tem-se o diagrama genérico da derivada da pressão, sendo o ponto de inflexão logo após uma leve queda, a qual é resultado da abertura do bico injetor de combustível, o início da combustão.

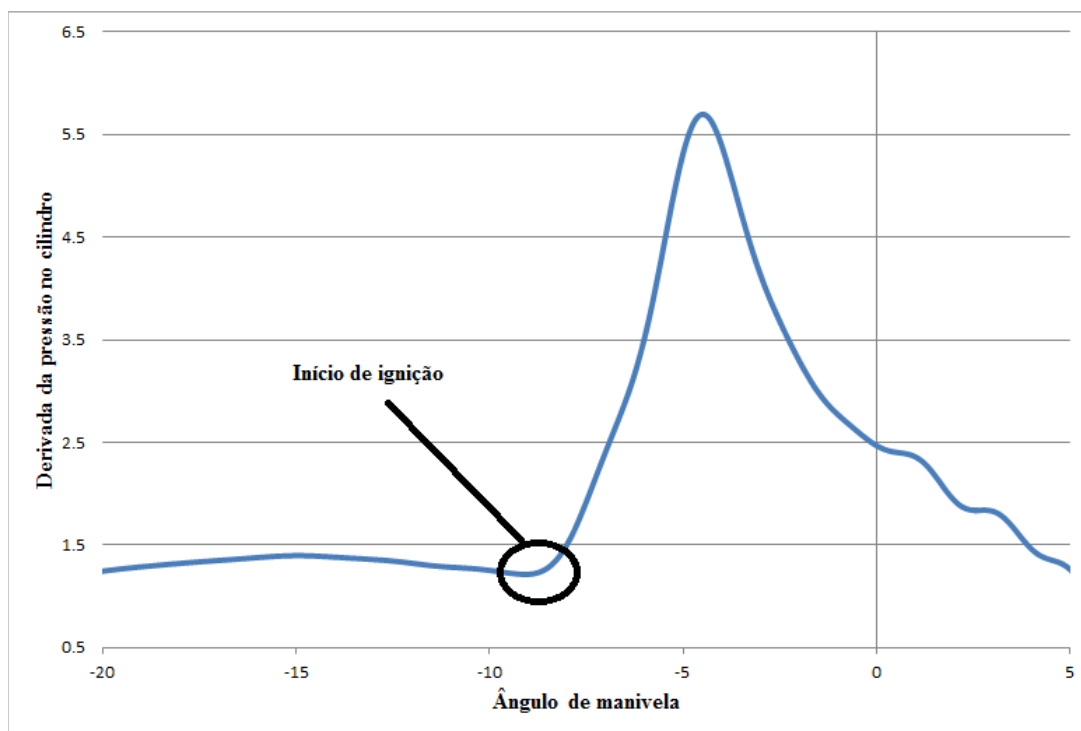


Figura 8 - Diagrama genérico da derivada da pressão.

A fração de combustível queimada na combustão pré-misturada calculada pela função simples de Wiebe e o atraso de ignição são expostos na Tab.3.

Tabela 3 – Fração queimada na fase pré-misturada de combustível / Atraso de ignição (graus).

Combustível	Regime de plena carga	Regime de carga mediana	Regime de baixa carga
Diesel A	0.2711 / 6.4	0.3979 / 7.8	0.4630 / 8.3
BS 20	0.2266 / 5.4	0.3863 / 6.7	0.4284 / 7.1
BSB 20	0.2286 / 5.6	0.3863 / 6.6	0.4062 / 6.9
BM 20	0.3009 / 6.4	0.4134 / 6.9	0.4602 / 7.3

Os regimes de carga alta elevam a temperatura e a pressão interna do cilindro fazendo, assim, com que a autoignição ocorra mais cedo em relação aos regimes de carga inferior. Isso resulta em um menor atraso de ignição e fração queimada em todos os combustíveis. Nota-se que ocorreu uma redução no atraso de ignição em todos os regimes com o acréscimo do biodiesel ao diesel mineral. De forma geral todos os biodieseis apresentaram uma significativa redução no atraso de ignição em relação ao diesel mineral, sendo o biodiesel de sebo o que se destaca seguido da soja e da mamona, respectivamente. (Chauhan, 2012) relatara o decrescimento no atraso de ignição como função de um aumento no número de cetano, como é o caso do biodiesel de sebo bovino e de soja, ver Tab. 2, o mesmo raciocínio também justifica o atraso para o BM20. Nota-se que no regime de alta e média carga os biodieseis de soja e sebo apresentaram atrasos de ignição e fração pré-misturada similares, apesar da diferença em seus índices de cetano ser significativa. Pode-se atribuir este resultado à rápida ignição observada nestes regimes.

A fração queimada na fase de combustão pré-misturada é diretamente dependente do atraso de ignição. Assim, espera-se que para um maior atraso de ignição o valor da fração queimada também aumente. Tal afirmação se mostrou verdadeira para todos os combustíveis com exceção do BM20. Porém, (Rocha, 2011) esclarece que a alta viscosidade e densidade do biodiesel de mamona elevam consideravelmente a quantidade de movimento, a penetração e a velocidade do jato, resultando em uma maior quantidade de combustível injetado. (Oo, 2015) relata que um maior atraso de ignição

e uma maior penetração do spray produzem uma maior taxa de liberação de energia, consequentemente uma maior fração queimada de combustível na combustão pré-misturada, como observado no BM20.

4. CONCLUSÃO

A análise do atraso de ignição e a fração queimada de combustível na combustão pré-misturada foi feita para misturas B20 de biodiesel de soja, sebo bovino e mamona, junto ao óleo diesel em três regimes de operação; alta carga, carga mediana e baixa carga. A função simples de Wiebe foi usada na fase de combustão pré-misturada a fim de calcular a fração queimada dos combustíveis.

Os valores das frações queimadas foram validados devido à baixa variância encontrada, para todos os combustíveis, em todos os regimes. Todas as misturas apresentaram um menor atraso de ignição em relação ao diesel nos devidos regimes. Os atrasos de ignição decrescem do regime de maior carga, carga plena, para o de menor carga. A mistura com biodiesel de sebo demonstrou, de forma geral, a maior redução no atraso, 1º em média. Em carga plena o BS20 exibe um menor atraso de ignição, mesmo o BSB20 possuindo um maior número de cetano.

Constatarem-se valores inferiores das frações queimadas relativos a menores atrasos de ignição. Similar ao atraso de ignição, regimes com menor carga aplicada resultaram em uma maior fração de queima. O BM20 divergiu dos demais resultados, influenciado pelo comportamento atípico do spray ao ser injetado no cilindro.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo Laboratório de Motores de Combustão Interna da Universidade Federal do Ceará. Portanto, deixo registrado aqui o meu agradecimento a essa instituição, por todas as formas de apoio.

6. REFERÊNCIAS

- Araújo, R. P., 2013, “A influência das variáveis operacionais de um motor CFR – Cetano no atraso de ignição para diferentes misturas de biodiesel”, Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- Bhuiya, M. M. K., et al., 2016, “Prospects of 2nd generation biodiesel as a sustainable fuel – Part 2: Properties, performance and emission characteristics”, *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, Elsevier BV 55 (2016) 1129-1146.
- Bueno, A. V., 2003, “Análise de liberação de energia em motores diesel operando com combustíveis alternativos”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), 107 f. - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- Bueno, A. V., Velásquez, J. A., Milanez, L. F., 2011, “Heat release and engine performance effects of soybean oil ethyl ester blending into diesel fuel”, *Energy* 36 (2011) 3907-3916.
- Chauhan, B. S., Kumar, N., Cho, H. M., 2012, “A Study on the performance and emission of a diesel engine fueled with jatropha biodiesel oil and its blends”, *Energy* 37 (2012) 616–622.
- Ghazali, W. N. M. W., et al, 2015, “Effects of biodiesel from different feedstocks on engine performance and emissions: A review”, *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 51 (2015) 585-602.
- Heywood, J. B., 1989, “Internal combustion engine fundamentals”. 1. ed. New York (USA), McGraw-Hill.
- Oo, C. W. et al, 2015, “Ignition and combustion characteristics of various biodiesel fuels (BDFs)”, *Fuel* 158 (2015) 279-287.
- Öner, C., Altun, Ş., 2009, “Biodiesel production from inedible animal tallow and an experimental investigation of its use as alternative fuel in a direct injection diesel engine”. *Applied Energy*, [s.l.], v. 86, n. 10, p.2114-2120.
- Rocha, D. S., 2011, “Análise numérica do desempenho de um motor diesel turboalimentado operando com mistura óleo diesel-biodiesel de mamona”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.
- Sahoo, P. K., Das, L. M., 2009, “Combustion analysis of Jatropha, Karanja and Polanga based biodiesel as fuel in a diesel engine”, *Fuel*, [s.l.], v. 88, n. 6, p.994-999.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ANALYSIS OF THE IGNITION DELAY IN THE COMBUSTION OF BIODIESEL-DIESEL MIXTURES

F. A. F. Gomes, f.augustofgomes@gmail.com¹

J.H.B. Silva, jackson.h.b.silva@gmail.com²

F.P.F. Dias, felipe.dias@fanor.edu.br³

D. C. Silva, daniel.carlos@alu.ufc.br²

A. V. Bueno, bueno@ufc.br²

¹ Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, SP, Brasil, endereço para correspondência,

² Universidade Federal do Ceará - UFC, CE, Brasil, Campus Universitário do PICI, Bloco 714,

³ Faculdade do Nordeste – Devry, CE, Brasil, endereço para correspondência,

Abstract. *This paper was conducted in order to analyze the impact on ignition delay and combustion characteristics due to the addition of biodiesels derived from soybean oil, castor oil and beef tallow to mineral diesel. The ignition delay was determined by using data of the pressure differential in the cylinder and the pressure of the fuel injection pump. The combustion characteristics were analyzed by the fraction of burned fuel in the premixed combustion phase, employing experimental data of the energy release rate with a method for simplified Wiebe function. Measurements were taken in dynamometric tests at three load regimes using a medium-sized turbocharged diesel engine. The tested fuels were B20 mixtures of biodiesel and mineral diesel. The results indicate that blends with biodiesel present lower ignition delay due to biodiesel's higher cetane number, in which beef tallow has the lowest delay. The values for the fraction of burned fuel of B20 mixtures were lower than those for diesel, castor oil being the exception.*

Keywords: *biodiesel-diesel, heat release, Wiebe function.*