

# **IMPACTO DA MISTURA B20 DO BIODIESEL DE MAMONA NO ATRASO DE IGNIÇÃO E NA FRAÇÃO DE QUEIMA PRÉ-MISTURADA**

**Felipe Augusto Ferreira Gomes** (UNICAMP) - f.augustofgomes@gmail.com

**Mariana Paulinia Bento Pereira** (UFC) - mariana.paulinia@gmail.com

**Andre Valente Bueno** (UFC) - bueno@ufc.br

**Maria Aleksandra de Sousa Rios** (UFC) - alexsandrarios@ufc.br

## **Resumo:**

*O impacto das misturas de biodiesel derivado do óleo de mamona ao diesel mineral sobre o atraso de ignição e características da combustão foi analisado nesse trabalho. O atraso de ignição foi encontrado usando os dados da derivada da pressão no cilindro e da bomba de injeção. A combustão foi analisada através da fração de combustível queimado na fase pré-misturada da combustão empregando os dados experimentais da taxa de liberação de energia com um novo método de 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 de biodiesel e diesel mineral. Os resultados apontam que a mistura com biodiesel apresentou menores atrasos de ignição devido ao maior número de cetano do biodiesel de mamona. Os valores das frações de combustível queimado no modo pré-misturado para a mistura B20 foram superiores aos do diesel, comportamento que também pode ser atribuído à sua longa penetração do spray.*

**Palavras-chave:** *Biodiesel, Liberação de calor, Função de Wiebe.*

**Área temática:** *Outras fontes renováveis de energia*

**Subárea temática:** *Caracterização, análise, equipamentos e sistemas de conversão energética da biomassa*

# IMPACTO DA MISTURA B20 DO BIODIESEL DE MAMONA NO ATRASO DE IGNIÇÃO E NA FRAÇÃO DE QUEIMA PRÉ-MISTURADA

**Felipe Augusto Ferreira Gomes** – f.augustofgomes@gmail.com

Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Energia

**Mariana Paulínia Bento Pereira**– mariana.paulinia@gmail.com

**André Valente Bueno** – bueno@ufc.br

**Maria Alexandra de Sousa Rios** – alexsandrarios@ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica

## **Resumo.**

*O estudo da combustão em motores que operam com misturas entre diesel e biodiesel possibilita a compreensão das alterações impostas ao desempenho e emissões poluentes devido às características deste biocombustível. Boa parte das modificações impostas à combustão pelo biodiesel decorrem de fenômenos que se dão entre o início da injeção de combustível e o evento da ignição, denominado período de atraso da ignição. O impacto das misturas de biodiesel derivado do óleo de mamona ao diesel mineral sobre o atraso de ignição e características da combustão foi analisado nesse trabalho, com o intuito de se aprimorar o conhecimento dos fenômenos associados a esta etapa que antecede a combustão propriamente dita, além de relacioná-los às propriedades do biodiesel. Uma série de técnicas experimentais e ferramentas de diagnóstico em motores de combustão interna foi empregada para isto. O atraso de ignição foi encontrado usando dados experimentais da derivada da pressão no cilindro e da bomba de injeção. A combustão foi analisada através da fração de combustível queimado na fase pré-misturada da combustão empregando os dados experimentais da taxa de liberação de energia com um novo método de função simples de Wiebe. As medições ocorreram em ensaios dinâmométricos em três regimes de carga utilizando-se um motor diesel turbo-alimentado de porte médio. Os combustíveis testados foram misturas B20 de biodiesel e diesel mineral. Os resultados apontam que a mistura com biodiesel apresentou menores atrasos de ignição devido ao maior número de cetano do biodiesel de mamona. Os valores das frações de combustível queimado no modo pré-misturado para a mistura B20 foram superiores aos do diesel, comportamento que também pode ser atribuído à sua longa penetração do spray.*

**Palavras-chave:** Biodiesel, 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 norma 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 et al., 2016; CHAUHAN, KUMAR e CHO, 2012; ROCHA, 2011; BUENO, 2011).

A busca por novas 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 (ANP, 2016) 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 et al., 2016; OO et al, 2015; GHAZALI et al., 2015). Por apresentar características singulares tais como a alta viscosidade e o baixo índice de cetano, o estudo da dinâmica de combustão do biodiesel de mamona e de suas misturas parciais ao óleo diesel apresenta informações mais nítidas que as fornecidas por biodieséis convencionais tais como o de óleo de soja. Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo comparar o atraso de ignição e a fração queimada de combustível obtidos com misturas entre biodiesel de mamona e óleo diesel, em diversos regimes de operação. A partir de técnicas experimentais obtiveram-se dados da derivada da pressão

no cilindro e da pressão da bomba de injeção de combustível, a partir dos quais calcularam-se curvas da taxa de liberação de energia. Também foi desenvolvido um programa da função simples de Wiebe para que se determinasse a fração queimada na combustão pré-misturada com cada mistura combustível.

## 2. CARACTERÍSTICAS DA COMBUSTÃO DIESEL

O processo de combustão nos motores diesel é comumente dividido em quatro fases distintas de acordo com a natureza dos fenômenos físico-químicos que as governam:

- atraso de ignição;
- combustão pré-misturada;
- combustão difusiva, ou controlada pela mistura;
- cauda da combustão.

Todas estas fases podem ser identificadas por diagramas de taxa aparente de liberação de energia (heat-release-rate) tais como o apresentado na Fig. 1. Nestes diagramas a energia química liberada pelo combustível no processo de combustão é expressa em função do ângulo de manivela, tendo sido calculada utilizando-se valores experimentais da pressão dentro do cilindro.

O intervalo de tempo entre o adentrar do combustível no cilindro e o primeiro sinal de chama é o atraso de ignição. Nesse período diversos fenômenos físico-químicos acontecem; o combustível entra no cilindro com alta velocidade, devido a elevada pressão na injeção, e logo se quebra em gotículas formando um spray; as gotículas líquidas do combustível evaporam, consequência da temperatura do ar e pressão no cilindro, e se misturam rapidamente com o ar até as reações químicas de combustão começarem a aparecer.

Na combustão pré-misturada a queima do combustível ocorre rapidamente em apenas poucos ângulos de manivela, vide Fig. 1. A velocidade de queima é controlada pela cinética das reações em cadeia, que caracterizam a queima de uma mistura homogênea. Logicamente, a taxa de combustão a ser queimada nesta fase depende da duração do atraso de ignição e da quantidade de combustível preparado previamente. A velocidade das reações define a taxa de pressão no cilindro, atingindo seu valor máximo nessa fase, ou seja, o valor da pressão máxima na combustão pré-misturada representa a pressão máxima do ciclo, podendo ser utilizado como parâmetro de projeto. Elevando-se a pressão a temperatura também cresce proporcionando assim um aumento das emissões de NOx, da carga térmica no sistema de refrigeração e da temperatura e tensão térmica das paredes do cilindro. Porém, é esperada baixa geração de material particulado (MP) e pouca luminosidade é emitida (HEYWOOD, 1989; GUPTA, 2013).

Logo que toda a mistura combustível-ar produzida na fase do atraso de ignição for consumida pela combustão rápida ou pré-misturada, a temperatura dentro do cilindro alcança valores tão altos que qualquer combustível injetado após esse ponto queima no momento que encontrar oxigênio. Qualquer aumento de pressão subsequente é controlado tanto pela taxa de injeção como pelo processo de mistura do ar com o combustível, ou seja, pela difusão dos vapores e a quantidade remanescente de ar. Esse processo de combustão é chamado de combustão difusiva ou controlada pela mistura (GUPTA, 2013). Na fase da cauda da combustão verifica-se uma taxa de queima bem baixa que continua a decrescer até a reação se completar e acontece durante a fase de expansão do cilindro no motor. Apesar do processo de combustão se tornar cada vez mais lento com a queda de temperatura e pressão durante a expansão, essa fase também é essencialmente controlada pela mistura. Essa última fase não é desejada porque ela reduz a potência gerada e aumenta a produção de fuligem. Entretanto, esses fenômenos podem ser reduzidos com aumento da injeção de ar no cilindro e a turbulência. O uso de 50% de excesso de ar é comumente admitido em motores de ciclo diesel.

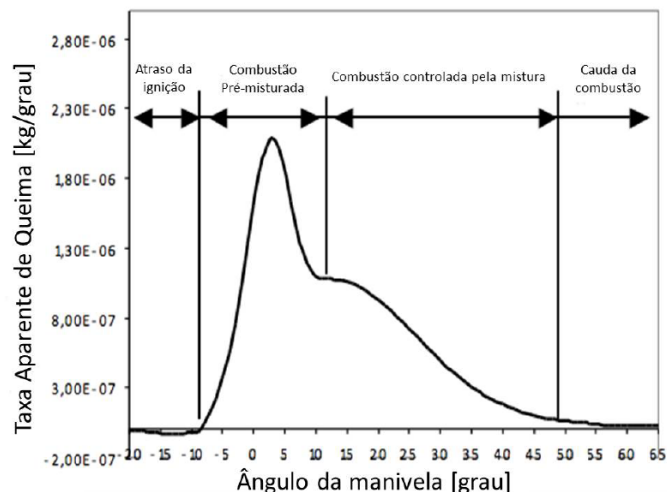


Figura 1 – Diagrama típico de taxa aparente de liberação de energia.

## 2.1 As Funções de Wiebe

Baseando-se nos estudos de Nikolai Semenov (1934) sobre a cinética química e de reações em cadeia, nos quais se descreve a combustão em misturas homogêneas, Wiebe desenvolveu uma equação semi-empírica para a fração de combustível queimada. Wiebe considerou que o aumento no número de moléculas dos principais reagentes na combustão em um intervalo de  $t$  para  $t+dt$  é diretamente proporcional à taxa de formação de radicais ativos (GHOJEL, 2010). A função de Wiebe para a fração queimada e a taxa de queima em função do ângulo de manivela é dada na forma (Equações 1 e 2):

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

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

onde

$x$  é a fração de combustível queimada em um ângulo de manivela  $\theta$ .

$\theta_t$  é o ângulo de manivela correspondente à queima de 99% do combustível.

$m$  é o parâmetro de forma da função de Wiebe.

Apesar da função de Wiebe encontrar boa correlação em processos de combustão em motores de ignição por centelha, pelo fato de a combustão ser homogênea e possuir somente uma fase, estudos mostram que em motores diesel uma simples função de Wiebe difere bastante os valores calculados dos experimentais (GHOJEL, 2010). Isso ocorre devido o processo de combustão ser, usualmente, dividido em duas fases: a fase pré-misturada, a qual é similar ao processo homogêneo e controlada pela taxa de reação, e a difusiva, que é controlada pelo processo de mistura do combustível com o ar (RAMOS, 1989). Diversos modelos baseados no de Wiebe foram propostos para motores diesel como Pugachiu, Ghojel, Watson e Miyamoto (GHOJEL, 2010). Todos possuem a mesma característica de serem funções duplas de Wiebe.

Tabela 1 – Precisão das medidas e incerteza das variáveis calculadas

Medida	Escala completa de medida de precisão
Potência de frenagem	$\pm 0,32$ kW
Consumo de combustível (taxa de fluxo de massa)	$\pm 192$ g/h
Consumo de ar (taxa de fluxo volumétrico)	$\pm 6$ m <sup>3</sup> /h
Pressão indicada	$\pm 0,67$ bar
Variáveis Calculadas	Incerteza das variáveis calculadas
Valor calorífico inferior do combustível	$\pm 0,31\%$
Razão de equivalência ar-combustível	$\pm 0,0107$
Eficiência térmica de frenagem	$\pm 0,0039$
Consumo de combustível volumétrico específico	$\pm 1,84$ ml/kWh
Eficiência térmica de frenagem	$\pm 0,0048$

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados experimentais obtidos neste trabalho foram levantados em uma bancada dinamométrica automática equipada com um dinamômetro de corrente alternada e sistemas para o condicionamento do combustível, ar de admissão e demais fluidos do motor. Detalhes sobre a montagem experimental podem ser encontrados no trabalho de Bueno et al. (2017).

A medição da pressão no cilindro foi feita com um transdutor de pressão piezoelétrico modelo 7061B localizado acima da cavidade do pistão. Um conversor recebeu o sinal de saída do transdutor e produziu os dados da derivada da pressão. O sinal foi medido entre 100 ciclos consecutivos no motor e espaçados com 0,1 grau do ângulo de manivela. Integrando-se numericamente os dados medidos obtiveram-se os valores da pressão. A posição do ponto morto superior foi determinada por meio de um sensor capacitivo. A incerteza mostrada na Tab. 1 para a eficiência térmica foi calculada tendo em vista a incerteza combinada dos equipamentos de medição. A Tab. 2 apresenta as especificações do motor diesel rápido de injeção direta usado nos experimentos.

Todos os processos descritos neste tópico foram aplicados para os combustíveis Diesel A e misturas de 20% em volume de biodiesel de mamona em diesel (BM20). Consideraram-se os regimes de operação de 750, 500 e 250 kPa da carga em termos de pressão efetiva média de frenagem. A Tab. 3 mostra as propriedades físico-químicas do diesel A usado e os valores limites especificados pela resolução nº50 da ANP (ANP, 2013). A Tab. 4 apresenta as propriedades físico-químicas do biodiesel estudado e os valores limites estabelecidos pela resolução nº 45 da ANP (ANP,2014).

Tabela 2 - Especificações do motor utilizado.

Configuração	4 tempos de injeção direta turbo
Sistema de Injeção	Bomba em Linha
Volume Deslocado [dm <sup>3</sup> ]	5,88
Número de Cilindros	6
Válvulas por Cilindro (Admissão/Escape)	1/1
Abertura das Válvulas de Escape	44°30'
Fechamento das Válvulas de Admissão	30
Diâmetro do Pistão [m]	0,102
Curso [m]	0,120
Relação de Compressão	15,9:1
Potência Máxima [kW]	92,0 a 1800rpm
Rotação Máxima Admissível [rpm]	2200

Tabela 3 - 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 4 - Propriedades físico-químicas do Biodiesel.

Propriedade	BM100	Limite
Viscosidade cinemática a 40 °C (cSt)	14,5	3,0-6,0
Ponto de fulgor (°C)	273,1	Mín 100
Ponto de fluidez (°C)	-30	-
Poder calorífico inferior (MJ.kg-1)	37,34	-
Densidade (kg.m-3)	924,40	850-900
Índice de iodo (gI <sub>2</sub> .100 g-1)	83,40	-
Índice de acidez (mg KOH.g-1)	0,50	Anotar*
Fórmula empírica	C <sub>17,96</sub> H <sub>35,82</sub> O <sub>2,86</sub>	-
Estabilidade oxidativa (h)	31,72	Mín 8
Número de Cetano	54	Anotar*

### 3.1 Determinação do atraso de ignição e parâmetros de liberação de energia

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, sendo o ponto de inflexão devido ao início da combustão e ocorreu logo após uma leve queda resultante da abertura do bico injetor de combustível.

A hipótese de homogeneidade da carga no cilindro e o modelo de uma zona de combustão proposto por Krieger e Borman (1966) foram considerados para se calcular a taxa de liberação de energia aparente a partir dos valores experimentais da pressão. Tais considerações assumem a carga no cilindro em equilíbrio termodinâmico e composta de uma mistura uniforme de gases ideais, possuindo temperatura, pressão e concentração para cada substância equivalentes em cada instante na zona de combustão. Adicionalmente, admite-se que o combustível queima imediatamente ao adentrar a câmara. Portanto, efeitos do combustível não queimado são negligenciáveis e a taxa aparente de queima é igual a taxa de injeção de combustível.

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:

$$\frac{dQ}{d\theta} = (PCI)m_{cyc} \frac{dx}{d\theta} \quad (3)$$

sendo:

$PCI$  o poder calorífico inferior do combustível;

$m_{cyc}$  a massa de combustível injetado no cilindro por ciclo.

Substituindo-se a taxa de queima de Wiebe, Eq. 2, na Eq. 9, tem-se.

$$\left(\frac{dQ}{d\theta}\right)_w = Q_t \cdot \frac{6,9(m+1)}{\theta_t} \left(\frac{\theta}{\theta_t}\right)^m \cdot \exp\left[-6,9\left(\frac{\theta}{\theta_t}\right)^{m+1}\right] \quad (4)$$

onde  $Q_t$  representa a energia total liberada pelo processo de combustão.

Nas curvas da taxa aparente de liberação de energia da combustão pré-misturada pode-se notar um pico de liberação de energia, como observado anteriormente na Fig. 1. Portanto, diferenciando a Eq. 4 e igualando a zero tem-se:

$$\theta_p = \frac{\theta_{pmax}}{m+1 \sqrt{\frac{m_p}{6,9(m_p+1)}}} \quad (5)$$

sendo o índice  $p$  correspondente a combustão pré-misturada e  $\theta_{pmax}$  ao ângulo onde a taxa de liberação de energia é máxima.

Utilizando dados experimentais para os valores de  $\theta_{pmax}$  e para o valor de pico da taxa aparente de liberação de calor e adquirindo-se valores de  $m_p$  a partir de estimativas encontradas na literatura calcularam-se  $\theta_p$  e  $Q_t$  da combustão pré-misturada ( $Q_p$ ). Observe que tal método calcula todos os parâmetros da Eq. 4 baseando-se no ponto de máximo da função  $dQ/d\theta$  e apenas um valor de  $m_p$ . Assim sendo, um modelo para estimar o valor de  $m_p$  foi criado comparando-se os valores das taxas de liberação de energia experimental e aproximada pela função de Wiebe em um ângulo de manivela qualquer (adotou-se  $\theta_i = 0,5 \theta_{pmax}$ ). Assumiu-se uma função do tipo:

$$func(m_p) = \left(\frac{dQ}{d\theta}\right)_w - \left(\frac{dQ}{d\theta}\right)_{exp} \quad (6)$$

$$func(m_p) = Q_p \cdot \frac{6,9(m_p+1)}{\theta_p} \left(\frac{\theta_i}{\theta_p}\right)^{m_p} \cdot \exp\left[-6,9\left(\frac{\theta_i}{\theta_p}\right)^{m_p+1}\right] - \left(\frac{dQ}{d\theta}\right)_{exp} \quad (7)$$

O método de Newton-Raphson foi empregado a fim de se obter o valor de  $m_p$  capaz de zerar a função dada pela Eq. 7, assim:

$$m_{pnew} = m_p - \frac{func(m_p)}{func'(m_p)} \quad (8)$$

Com o novo valor de  $m_p$  pode-se novamente resolver as equações 4 e 5 montando, assim, um sistema iterativo seguindo a seguinte ordem de equações 5, 4, 7, e 8. O sistema se repetiu até um valor de  $m_p$  que satisfizesse  $func(m_p) = 0$ . As frações de combustível queimado no modo pré-misturado mostradas nesse trabalho foram geradas segundo a Eq. 4 utilizando tais valores encontrados para  $m_p$ .

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 2 apresenta os valores dos ângulos de início de injeção para os três regimes de carga considerados, sendo 250 kPa correspondente a condições de baixa carga; 500 kPa média carga e 750 kPa plena carga. Observa-se um aumento no avanço de injeção com a carga que para ambos os combustíveis, o que reflete o comportamento esperado do sistema de injeção. Nota-se, ainda, que enquanto a mistura B20 atrasou a injeção nas condições de média e baixa carga, houve um avanço com relação ao óleo diesel apenas em alta carga. Este comportamento é considerado atípico, pois os biodieseis costumam causar um avanço na injeção devido ao maior fator de compressibilidade (Chauhan et al. 2012). Contudo estes dados refletem as propriedades singulares do biodiesel de mamona, cuja viscosidade 2,5 vezes superior ao limite estabelecido pela ANP dificultou a injeção de combustível até a carga mediana, retardando a abertura do bico. Dada a subida abrupta da pressão na linha de injeção em alta carga, acredita-se que nestas condições os efeitos do maior coeficiente de compressibilidade do biodiesel de mamona suplantaram os provenientes de sua viscosidade causando, neste balanço, um avanço na injeção com relação ao óleo diesel mineral.

Os dados apresentados na Fig. 3 demonstram o domínio do índice de cetano na extensão do atraso de ignição, conforme apontado por Chauhan, Kumar e Cho (2012). Por conta do aumento do índice de cetano obtido com a adição do biodiesel de mamona, nota-se uma redução do atraso de ignição da mistura B20 quando comparada ao diesel mineral. Observa-se, ainda, que esta redução no atraso de ignição se acentuou na medida em que a carga do motor foi reduzida, o que torna ainda mais crítica a ignição da mistura combustível. De fato, 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 no menor atraso de ignição e na menor fração queimada em modo pré-misturado observados para todos os combustíveis (Araújo, 2013).

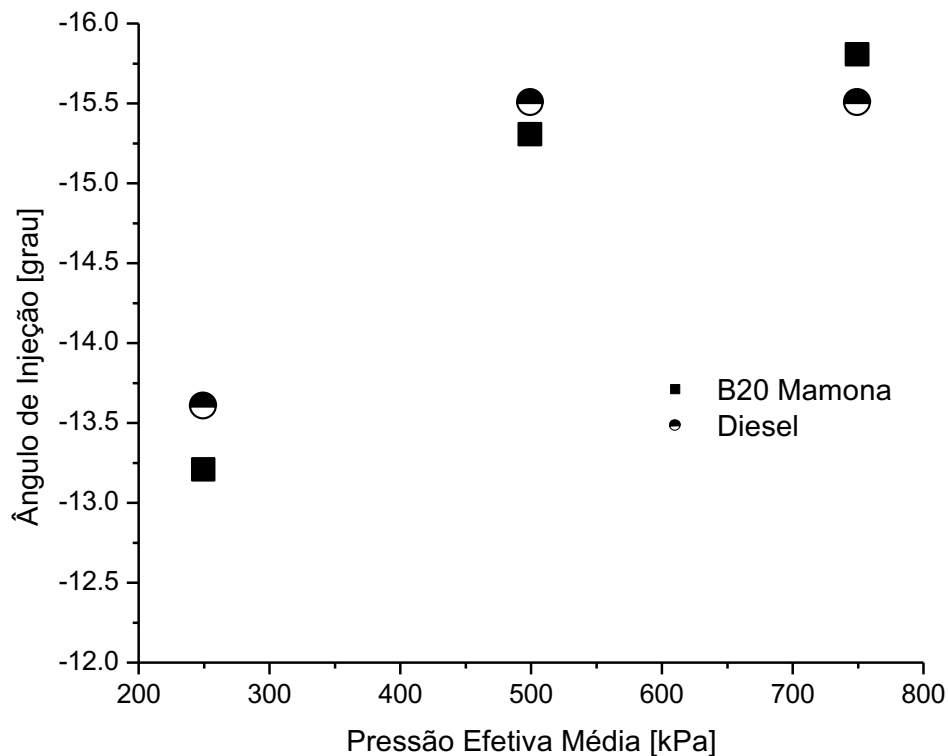


Figura 2 – Diagrama de liberação de energia em plena carga (bmeP = 750 kPa).

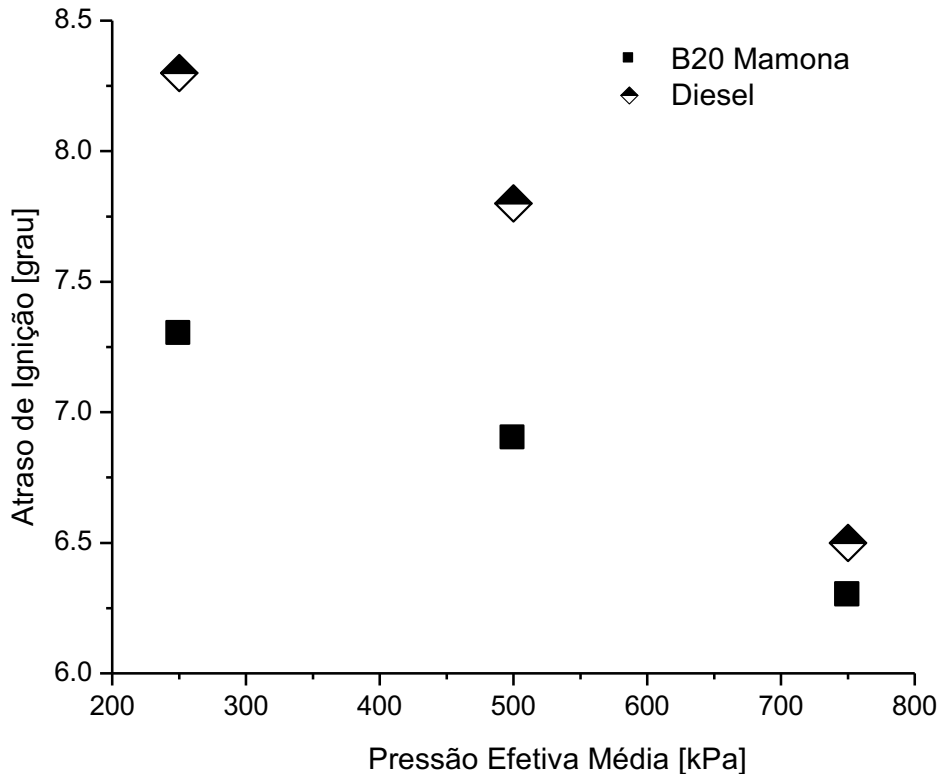


Figura 3 – Atraso de ignição obtido com as misturas combustíveis.

Para combustíveis de propriedades físicas semelhantes, a fração queimada na fase de combustão pré-misturada é diretamente dependente da extensão do atraso de ignição. Assim, em condições similares de propriedades dos combustíveis, espera-se que com um maior atraso de ignição o valor da fração queimada no modo pré-misturado também aumente, pois haveria mais tempo disponível para a mistura combustível ar ser preparada. Isto não foi observado para a mistura B20 de mamona, a qual apesar de reduzir o atraso de ignição acabou elevando a fração do combustível queimada no modo pré-misturado com relação ao diesel mineral, conforme pode ser observado na Fig. 4.

Como ocorreu na questão do ângulo de injeção, no caso do biodiesel de mamona outros fatores também devem ser levados em conta para se compreender este comportamento. Propriedades como a sua alta densidade e sua viscosidade acabam acelerando a preparação da mistura com relação ao diesel mineral, proporcionando maior quebra de gotículas e maior quantidade de movimento no jato combustível. Öner e Altun (2009) e Ghazali et al. (2015) relatam a influência da densidade no consumo específico de combustível, por exemplo, alegando que uma maior densidade resulta em um maior consumo. Utilizando simulações multidimensionais, 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 taxa de mistura combustível ar sendo preparada durante o atraso da ignição. Oo et al (2015) também relatam que uma maior penetração do spray pode produzir uma maior taxa de liberação de energia, conseqüentemente uma maior fração queimada de combustível na combustão pré-misturada. Assim, observou-se que apesar de reduzir a duração do intervalo de tempo disponível para a preparação da mistura no atraso de ignição, o B20 de mamona acelerou a taxa de preparação de mistura devido as suas propriedades singulares. Os dados obtidos indicam que este balanço levou a uma maior quantidade de mistura disponível para a queima no instante da ignição, fazendo com que a mistura B20 intensificasse a combustão pré-misturada com relação ao óleo diesel mineral.

De fato, nota-se que o aumento obtido com a mistura B20 na participação da combustão pré-misturada se intensificou com a carga do motor, ou seja, ele se ampliou conforme a taxa de preparação do combustível também era aumentada. Tem-se, desta forma, maior segurança nos argumentos aqui propostos. Como consequência destes dados, espera-se uma maior emissão de óxidos de nitrogênio e ruídos com o biodiesel de mamona devido a esta característica da combustão pré-misturada, mas, por outro lado, também se tem como consequência deste fato uma redução nos níveis de material particulado (Bueno et al. 2018).



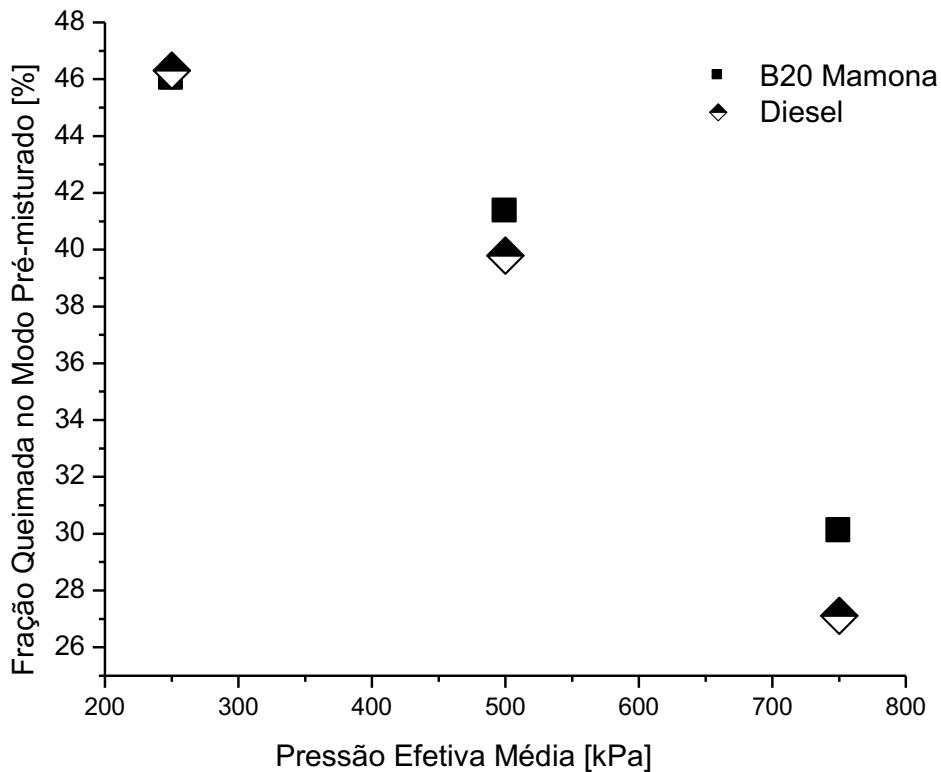


Figura 4 – Frações do combustível injetado que foi queimada no modo pré-misturado.

#### 4. CONCLUSÃO

A análise do atraso de ignição e a fração queimada de combustível na combustão pré-misturada foi feita para as misturas B20 de biodiesel de mamona, junto ao óleo diesel mineral em três regimes: 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.

As propriedades singulares do biodiesel de mamona provocaram modificações expressivas nos processos de preparação e combustão. Em condições de baixa e média carga a viscosidade do biodiesel de mamona fez com que a injeção da mistura B20 fosse atrasada com relação à do diesel mineral, enquanto em alta carga este efeito foi suplantado pelo maior módulo de compressibilidade do biodiesel, que ocasionou um pequeno avanço na injeção da mistura B20. O biodiesel de mamona também reduziu o período de atraso da ignição devido ao seu maior índice de cetano. Os atrasos de ignição decresceram do regime de maior carga, carga plena, para o de menor carga, como esperado.

Contudo, devido às suas características físicas que dificultam a atomização, tais quais a alta viscosidade e maior temperatura crítica, o uso da mistura B20 de mamona também acabou ampliando a fração queimada no modo pré-misturado apesar de seu maior índice de cetano. Este é um dado curioso, pois espera-se que um combustível que reduz o período de atraso de ignição disponibilize uma menor quantidade de mistura para a fase de combustão pré-misturada. Contudo, o biodiesel de mamona apresentou resultados que denotam a influência do comportamento atípico de seu spray ao ser injetado no cilindro, acelerando a preparação de combustível que estava disponível ainda no estado líquido logo após a ignição.

#### REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS, 2016. Biocombustíveis. Rio de Janeiro, maio de 2015. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br/?id=470>>. Acesso em: 30 maio 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS, 2013. Dispõe sobre as especificações do óleo diesel de uso rodoviário. Resolução nº 50, de 23 de dezembro de 2013. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 24 dez. 2013. Seção 1, p. 104.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS, 2014. Dispõe sobre a especificação do biodiesel contida no Regulamento Técnico ANP nº 3/2014 e as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos diversos agentes econômicos que comercializam o produto em todo o território

- nacional. Resolução nº 45, de 25 de agosto de 2014. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 26 ago. 2014. Seção 1, p 68.
- ARAÚJO, Raquel Pinheiro. A influência das variáveis operacionais de um motor CFR – Cetano no atraso de ignição para diferentes misturas de biodiesel, 2013. 60 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- BUENO, André Valente, 2003. Análise de liberação de energia em motores diesel operando com combustíveis alternativos. 2003. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- BUENO, Andre Valente; VELÁSQUEZ, José Antonio; MILANEZ, Luiz Fernando, 2009. A new engine indicating measurement procedure for combustion heat release analysis. *Applied Thermal Engineering*, [s.l.], v. 29, n. 8-9, p.1657-1675, Elsevier BV.
- BUENO, Andre Valente; VELÁSQUEZ, José Antonio; MILANEZ, Luiz Fernando, 2011. Heat release and engine performance effects of soybean oil ethyl ester blending into diesel fuel. *Energy*, [s.l.], v. 36, n. 6, p.3907-3916, Elsevier BV.
- BUENO, André Valente; PEREIRA, Mariana Paulinia Bento ; DE OLIVEIRA PONTES, João Victor ; DE LUNA, Francisco Murilo Tavares ; CAVALCANTE, Célio Loureiro, 2017. Performance and emissions characteristics of castor oil biodiesel fuel blends. *Applied Thermal Engineering*, v. 125, p. 559-566, Elsevier BV.
- 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*, [s.l.], v. 55, p.1129-1146. Elsevier BV.
- CARTAXO, Justino Carvalho, 2016. Análise de liberação de energia para biodieseis de segunda geração. 2016. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- 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*, vol. 37, No 1, p. 616–622. Elsevier BV.
- 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*, [s.l.], v. 51, p.585-602, Elsevier BV.
- GHOJEL, J. I. Review of the development and applications of the Wiebe function: a tribute to the contribution of Ivan Wiebe to engine research. *International Journal Of Engine Research*, [s.l.], v. 11, n. 4, p.297-312, 23 jun. 2010. SAGE Publications.
- GUPTA, H. N., 2013. *Fundamentals of internal combustion engines*. 2. ed. Delhi: Phi Learning Private Limited. 676p.
- HEYWOOD, John B., 1988. *Internal combustion engine fundamentals*. 1. ed. New York (USA), McGraw-Hill.
- KLEIN, M., 2006. Use of tallow in biodiesel as triglycerides, animal fats can be used for biodiesel production just as easily as plant oils. Disponível em: <http://www.hgca.com/publications/documents/UseofTallowinBiodiesel.pdf>.
- KRIEGER, R. B.; BORMAN, G.L., 1966. The computation of Apparent Heat Release for Internal Combustion Engines. ASME paper 66-WA/DGP-4.
- MENEZES, Eliana Weber, 2009. Produção de trabalho, geração de contaminantes e tratamento pós-combustão em motores ciclo diesel. 170 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MIYAMOTO, Noboru et al., 1985. Description and Analysis of Diesel Engine Rate of Combustion and Performance Using Wiebe's Functions. SAE Technical Paper Series, [s.l.], SAE.
- NGUYEN, Dung Ngoc; ISHIDA, Hiroaki; SHIOJI, Masahiro. 2010 Ignition and Combustion Characteristics of Gas-to-Liquid Fuels for Different Ambient Pressures. *Energy & Fuels*, [s.l.], v. 24, n. 1, p.365-374, American Chemical Society (ACS).
- OO, Chit Wityi et al., 2015. Ignition and combustion characteristics of various biodiesel fuels (BDFs). *Fuel*, [s.l.], v. 158, p.279-287. Elsevier BV.
- ÖNER, Cengiz; ALTUN, Şehmus. 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. Elsevier BV.
- ROCHA, Danilo Sousa, 2011. Análise numérica do desempenho de um motor diesel turboalimentado operando com mistura óleo diesel-biodiesel de mamona. 2011. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- 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. Elsevier BV.
- WYATT, V. T.; HESS, M. A.; DUNN, R. O.; FOGLIA, T. A.; HAAS, M. J.; MARMER, W.N., 2005. Fuel properties and nitrogen oxide emission levels of biodiesel produced from animal fats. *Journal of the American Oil Chemists Society*, vol. 82.

## **IMPACT OF THE CASTOR OIL BIODIESEL B20 FUEL BLEND ON THE IGNITION DELAY AND PREMIXED MODE FUEL BURNING FRACTION**

**Abstract.** *The impact of the castor oil biodiesel blends on the ignition delay and combustion characteristic was analyzed within this work. The ignition delay was determined from in-cylinder pressure and needle lift data. The combustion process was studied by applying heat release data and a novel Wiebe function fitting method. Three load conditions were considered in dynamometric bench tests with a high-speed turbocharged diesel engine. The obtained results indicate a reduction in the ignition delay with the use of biodiesel blend due to the higher cetane index. On the other hand, a higher premixed combustion fraction was also observed for the biodiesel blend, a behaviour that can be associated to its longer penetration of the fuel spray.*

**Key words:** *Biodiesel, Heat release, Wiebe function.*