



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

MARIANA PAULINIA BENTO PEREIRA

**ESTUDO DOS EFEITOS OPERACIONAIS DE BIODIESEIS DE SEGUNDA
GERAÇÃO**

FORTALEZA

2016

MARIANA PAULINIA BENTOPEREIRA

ESTUDO DOS EFEITOS OPERACIONAIS DE BIODIESEIS DE SEGUNDA GERAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias renováveis.

Orientador: Prof. Dr. André Valente Bueno.

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- P493e Pereira, Mariana Paulinia Bento.
Estudo dos efeitos operacionais de biodieseis de segunda geração / Mariana Paulinia Bento Pereira. –
2016.
75 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2016.
Orientação: Prof. Dr. André Valente Bueno.
1. Biocombustíveis. 2. Motor diesel. 3. Soja. 4. Sebo bovino. 5. Mamona. I. Título.

CDD 620.1

MARIANA PAULINIA BENTO PEREIRA

ESTUDO DOS EFEITOS OPERACIONAIS DE BIODIESEIS DE
SEGUNDA GERAÇÃO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovada em 28/07/2016

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. André Valente Bueno (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Claus Franz Wehmann
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Daniel Albiero
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Ao meu padrinho.

(In memoriam)

AGRADECIMENTOS

Embora este seja um trabalho individual, sem a ajuda de algumas pessoas que estiveram presentes ao longo dos últimos anos, a sua realização jamais seria possível. Por esse motivo, gostaria de expressar a minha sincera gratidão:

A Deus, por sempre ter me dado forças.

Aos meus pais, pelo suporte financeiro e por terem acreditado em mim em todos os momentos.

A Natália, pela amizade, confiança, conselhos e incentivos. Gostaria de agradecer também por toda paciência, disponibilidade e apoio na realização deste trabalho.

Aos irmãos que a vida me deu, Caio e Desirrê. Pelo amor que nos une, apesar da distância.

Aos companheiros de outra era, Ítalo e Salomão. Por todos os momentos de compreensão da minha ausência.

Ao meu orientador, Prof. Dr. André Valente Bueno, pela confiança no meu trabalho.

Aos professores e funcionários do PPGEM-UFC que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Aos colegas de mestrado, pelos momentos de reflexão e distração.

Aos meus companheiros de pesquisa do LMCI, em especial: Daniel, Igor, Jack, Juan, Piá, Victão e Victim. Por todos os conselhos, dúvidas sanadas, conhecimento fornecido, risadas, companhia e análises realizadas.

Ao Seu Laercio, pelos conselhos que levarei para a vida. A CAPES pela bolsa concedida.

À Raizen Distribuidora S.A pelo combustível doado.

A todos que contribuíram de forma direta e indireta para a realização desse trabalho.

“Dobby é um elfo livre.”

(J. K. Rowling)

RESUMO

Os efeitos da adição dos biodieseis provenientes do óleo de soja, óleo de mamona e sebo bovino sobre o desempenho e as emissões poluentes de um motor diesel turbo-alimentado foram mensurados em ensaios dinamométricos realizados em condições de regime permanente. Já o impacto sobre a variabilidade e a dinâmica da combustão diesel foi determinado aplicando-se a técnica de análise de liberação de energia. Foram avaliadas misturas de 10% e 20% em volume de biodiesel em diesel mineral. Os resultados obtidos indicam que a adição do biodiesel provoca um aumento nos indicadores de desempenho do motor, nas emissões de NO_x, e uma redução nas outras emissões poluentes. O uso do EGR reduziu consideravelmente as emissões de NO_x. Resultados dissimilares obtidos com o biodiesel de mamona são atribuídos ao acréscimo na penetração do jato de combustível devido as suas características inferiores de atomização.

Palavras-chave: Biocombustíveis. Motor diesel. Soja. Sebo Bovino. Mamona.

ABSTRACT

The effects of the addition of biodiesel produced from soybean oil, castor oil and bovine tallow on the performance and pollutant emissions of a turbo-fed diesel engine were measured in dynamometric tests under steady state conditions. The impact on variability and combustion dynamics was determined by applying a heat release analysis technique. Blends of 10% and 20% by volume of biodiesel added to mineral diesel oil were used. The results indicate that adding biodiesel causes an increase in the engine's performance indicators and in NO_x emissions, as well as a decrease in other pollutant emissions. The use of EGR considerably reduced the NO_x emissions. Deviating results obtained with castor oil biodiesel are attributed to an increase in fuel jet penetration due to its inferior atomization characteristics.

Keywords: Biofuels. Diesel engine. Soybean. Beef tallow. Castor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Oferta interna de energia.....	19
Figura 2	– Consumo de Biodiesel	20
Figura 3	– Matérias-primas para a produção de biodiesel	21
Figura 4	– Estrutura molecular do ácido ricinoleico: A – cadeia aberta e B – cadeia com ponte de hidrogênio intramolecular	23
Figura 5	– Reação de transesterificação	24
Figura 6	– Estágios da combustão.....	28
Figura 7	– Resumo da química das espécies envolvidas no mecanismo imediato.....	32
Figura 8	– Bancada dinamométrica.....	37
Figura 9	– Volume de Controle	40
Figura 10	– Cromatograma do biodiesel de mamona	44
Figura 11	– Cromatograma do biodiesel de soja.....	46
Figura 12	– Cromatograma do biodiesel de sebo bovino	47
Figura 13	– Consumo específico de combustível: misturas B10	47
Figura 14	– Consumo específico de combustível: misturas B20	48
Figura 15	– Eficiência térmica: misturas B10	49
Figura 16	– Eficiência térmica: misturas B20	49
Figura 17	– Emissões de NO _x : misturas B10	50
Figura 18	– Emissões de NO _x : misturas B20	50
Figura 19	– Emissões de MP: misturas B10	52
Figura 20	– Emissões de MP: - misturas B20	52
Figura 21	– Emissões de HC: misturas B10.....	53
Figura 22	– Emissões de HC: misturas B20.....	53
Figura 23	– Emissões de CO: misturas B10.....	54

Figura 24 – Emissões de CO: misturas B10.....	54
Figura 25 – Emissões de MP x NO _x : A- Regime de plena carga	55
Figura 26 – Emissões de MP x NO _x : - regime de carga mediana	56
Figura 27 – Emissões de MP x NO _x : -regime de baixa carga	56
Figura 28 – Consumo específico de combustível: taxa de EGR 5 %.....	57
Figura 29 – Consumo específico de combustível: taxa de EGR 10 %.....	58
Figura 30 – Eficiência térmica: taxa de EGR 5 %	58
Figura 31 – Eficiência térmica: taxa de EGR 10 %	59
Figura 32 – Liberação de energia em regime de plena carga: misturas B10.....	60
Figura 33 – Liberação de energia em regime de plena carga: misturas B20.....	60
Figura 34 – Liberação de energia em regime de carga mediana: misturas B10.....	61
Figura 35 – Liberação de energia em regime de carga mediana: misturas B20.....	61
Figura 36 – Liberação de energia em regime de baixa carga: misturas B10.....	62
Figura 37 – Liberação de energia em regime de baixa carga: misturas B20.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Indicadores de desempenho no motor	30
Tabela 2 – Parâmetros operacionais da bancada e métodos de controle.....	38
Tabela 3 – Precisão nas medições e incerteza nas variáveis calculadas.....	38
Tabela 4 – Especificações do motor utilizado.....	39
Tabela 5 – Propriedades físico-químicas do Diesel	43
Tabela 6 – Propriedades físico-químicas dos Biodieseis	43
Tabela 7 – Composição quantitativa do biodiesel de mamona	44
Tabela 8 – Composição quantitativa do biodiesel metílico de soja.....	46
Tabela 9 – Composição quantitativa do biodiesel metílico de sebo bovino.....	46
Tabela 10 – Taxa de liberação de energia máxima dos combustíveis em todos os regimes	63
Tabela 11 – Fração queimada de combustível na combustão pré-misturada	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	Sociedade Americana para Testes e Materiais (<i>American Society for Testing and Materials</i>)
BM	Biodiesel de mamona
BMEP	Pressão efetiva média de frenagem (<i>Break mean effective pressure</i>)
BS	Biodiesel de soja
BSB	Biodiesel de sebo bovino
EGR	Recirculação dos gases de escape
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EN	Comitê Europeu de Normalização (<i>European Standard</i>)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
HC	Hidrocarbonetos não queimados
LMCI	Laboratório de Motores de Combustão Interna
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MME	Ministério de Minas e Energia
MP	Material Particulado
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
NO _x	Soma de monóxido de nitrogênio e dióxido de nitrogênio
OCDE	Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Económico
OH	Radical hidroxila
PCI	Poder Calorífico Inferior
PF	Ponto de Fulgor
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
PNPB	Programa de Nacional de Produção e Uso do Biodiesel
S10	Adição de 10 ppm de enxofre

LISTA DE SÍMBOLOS

θ	Ângulo do virabrequim
χ_b	Fração de massa queimada até o ângulo θ
θ_i	Ângulo do início da liberação de energia
$\Delta\theta$	Duração da combustão
a	Parâmetro de eficiência da combustão
m	Fator de forma da câmara
η_t	Eficiência térmica
U	Energia interna
Q	Calor
W	Trabalho
m_{ad}	Massa na admissão
h_{ad}	Entalpia na admissão
m_e	Massa na exaustão
h_{ex}	Entalpia na exaustão
dm_f	Varição de massa de combustível
h_f	Entalpia do combustível
Q_{liq}	Calor líquido
u	Energia interna específica
c_v	Calor específico a volume constante
γ	Razão de calores específicos
c_p	Calor específico a pressão constante
φ	Ângulo de manivela
cSt	Centistokes
kJ	Quilojoule
\dot{m}_f	Vazão mássica de combustível

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Matriz energética brasileira	19
2.2	Utilização de biocombustíveis no Brasil	19
2.3	Matéria prima para o biodiesel	20
2.3.1	<i>Matéria prima para o biodiesel de soja</i>	21
2.3.2	<i>Matéria prima para o biodiesel de sebo</i>	22
2.3.3	<i>Matéria prima para o biodiesel de mamona</i>	22
2.4	<i>Processo de produção do biodiesel</i>	23
2.5	Propriedades físico químicas dos combustíveis	24
2.5.1	<i>Poder Calorífico</i>	24
2.5.2	<i>Número de Cetano</i>	24
2.5.3	<i>Viscosidade cinemática</i>	25
2.5.4	<i>Índice de iodo</i>	25
2.5.5	<i>Estabilidade Oxidativa</i>	25
2.5.6	<i>Ponto de fulgor</i>	26
2.5.7	<i>Ponto de fluidez</i>	26
2.5.8	<i>Densidade</i>	26
2.6	Motores térmicos	26
2.6.1	<i>Motor diesel</i>	27
2.6.2	<i>Processo de combustão em motores do ciclo diesel</i>	28
2.7	Modelos de combustão	29
2.7.1	<i>Modelo de combustão de Wiebe</i>	29
2.8	Utilização de combustíveis em motores diesel	30
2.8.1	<i>Desempenho no motor</i>	30
2.8.2	<i>Emissões de poluentes</i>	30
2.8.2.1	<i>NOx</i>	30
2.8.2.2	<i>Material particulado</i>	32
2.8.2.3	<i>Monóxido de carbono</i>	33
2.8.2.4	<i>Hidrocarbonetos não queimados</i>	34
2.8.2.5	<i>Utilização do EGR</i>	34

3	METODOLOGIA	36
3.1	Combustíveis utilizados	36
3.2	Configuração da bancada utilizada	36
3.3	Análise da Liberação de energia	39
3.4	Função de Wiebe	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1	Propriedades físico químicas e composição dos combustíveis	43
4.2	Ensaio de desempenho com diesel e misturas	47
4.3	Emissões dos compostos gerados na combustão do diesel e suas misturas	50
4.3.1	Emissões NO_x	50
4.3.2	Emissões MP	51
4.3.3	<i>Emissões HC</i>	53
4.3.4	<i>Emissões CO</i>	54
4.3.5	<i>Emissões EGR</i>	56
4.3.6	<i>Desempenho EGR</i>	58
4.4	<i>Análise de Liberação de Energia</i>	60
5	CONCLUSÃO	66
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

O biodiesel é um combustível alternativo utilizado para a substituição parcial do óleo diesel. Sua aplicação como combustível suplementar do diesel mineral em motores sem modificações significativas pode reduzir a poluição atmosférica, fortalecer a economia agrícola e reduzir a demanda pelo refino de óleo diesel.

Óleos vegetais, como soja e mamona, e gorduras animais aparecem como alternativas para produção de biodiesel através do processo de transesterificação.

A utilização do biodiesel, além de reduzir a dependência externa do Brasil em relação ao seu combustível mais consumido, também diminui a emissão de poluentes, representando assim uma melhora significativa para a saúde pública. Outro fator que contribui para ampliar o seu uso é a melhora das características do óleo diesel aumentando a lubricidade, reduzindo o teor de enxofre e elevando o número de cetano (TEIXEIRA, 2010).

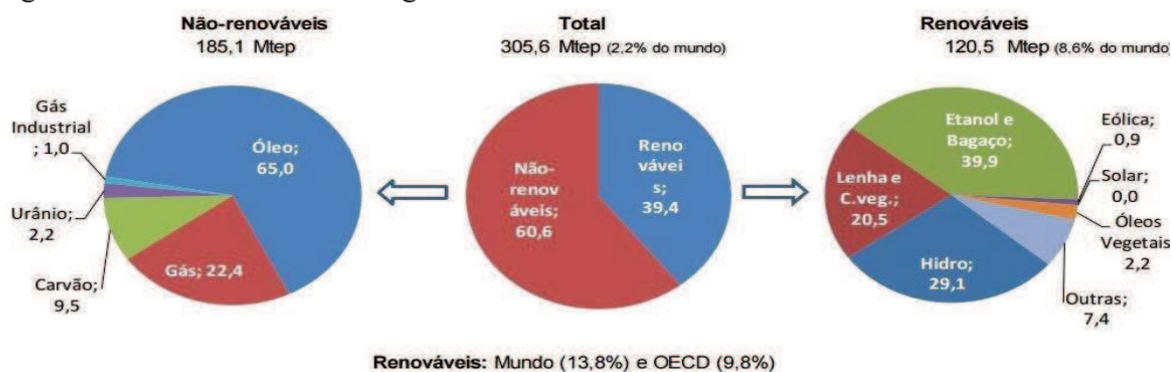
No presente trabalho estudou-se a aplicação de biodieseis obtidos a partir do óleo de soja, do óleo de mamona e do sebo bovino. Utilizaram-se misturas contendo 10 e 20% de biodiesel adicionado ao óleo diesel mineral, em volume. O impacto destes combustíveis sobre o desempenho e as emissões poluentes de um motor diesel turboalimentado foi mensurado em ensaios dinamométricos realizados em condições de regime permanente. Os efeitos dos biodieseis sobre a variabilidade e a dinâmica da combustão diesel foram determinados aplicando-se a técnica de análise de liberação de energia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Matriz energética brasileira

Nos últimos anos, houve uma crescente demanda por energia no Brasil. Esse aumento teve como principais indutores: expansão de 19% nas perdas térmicas devidas à geração termelétrica pública e de autoprodutores (complementação ao baixo desempenho da geração hidráulica); expansão de 6,2% no consumo do transporte de veículos leves; expansão de 9,8% na produção de celulose; expansão média de 6,0% no consumo residencial e comercial de eletricidade; e expansão de 5% no consumo de energia do setor energético (MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA [MME],2015). A Figura 1 mostra a oferta interna de energia de 2014.

Figura 1- Oferta interna de energia



Fonte: MME (2015).

Observa-se, no box abaixo do gráfico, a utilização de 39,4% de fontes renováveis na matriz energética brasileira, contra apenas 9,8% nos países da OCDE (a maioria ricos), e de 13,8% na média mundial.

2.2 Utilização de biocombustíveis no Brasil

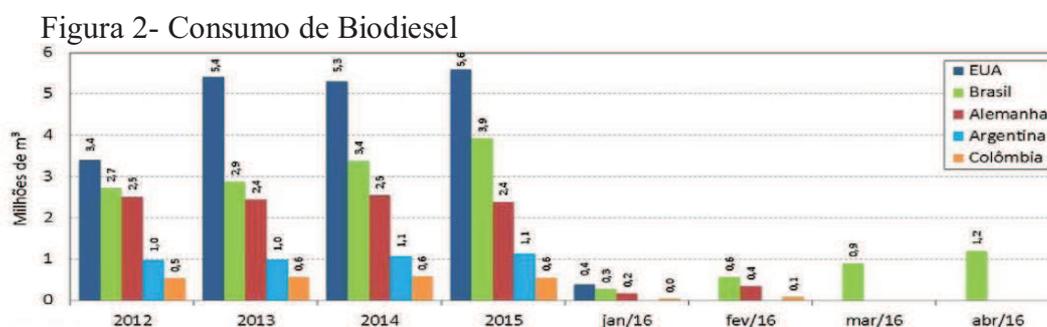
Biocombustíveis são derivados de biomassa renovável que podem substituir, parcial ou totalmente, combustíveis derivados de petróleo e gás natural em motores a combustão ou em outro tipo de geração de energia (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS [ANP], 2015).

Conforme Leite (2007), as principais razões para o interesse pelos biocombustíveis são:

- Diminuir a dependência externa de petróleo;
- Minimizar os efeitos das emissões veiculares na poluição local;
- Controlar a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera.

Os dois principais biocombustíveis líquidos usados no Brasil são o etanol extraído de cana-de-açúcar e o biodiesel, que é produzido a partir de óleos vegetais ou de gorduras animais e adicionado ao diesel de petróleo em proporções variáveis. (ANP, 2015).

Em 2015, foram produzidos 3,9 bilhões de litros de biodiesel no Brasil, o que representa um aumento de 15% sobre 2014. Desde 2005, ano de implantação do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel – PNPB, até dezembro de 2015, já foram produzidos 21,3 bilhões de litros deste biocombustível. Com esses números, o Brasil mantém-se como o segundo maior produtor e consumidor de biodiesel no ranking internacional, antecedido pelos EUA, e sucedido por Alemanha e Argentina (Figura 2). (MME,2016).



Fonte: MME (2016).

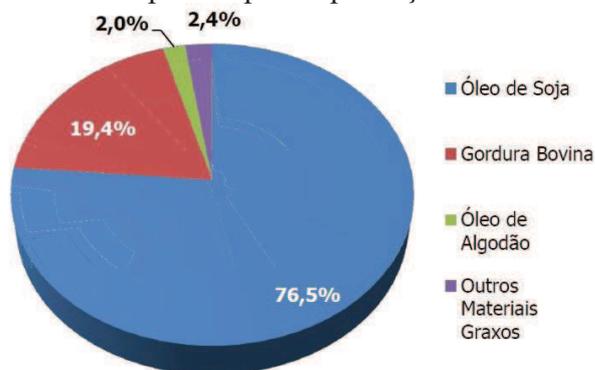
Em 2015, apesar da redução de 2,8 bilhões de litros na demanda de diesel, houve um crescimento de 500 milhões de litros no consumo de biodiesel, devido exclusivamente ao aumento do mandatório para 7% de biodiesel adicionado ao óleo diesel comercializado em 2014. (ANP, 2015).

23 Matéria prima para o biodiesel

De todo o biodiesel consumido em 2015, três bilhões de litros foram produzidos a partir do óleo de soja, quantidade superior àquela de 2014 (2,6 bilhões de

litros). O óleo de soja permaneceu como a principal matéria-prima para biodiesel, com participação de 76,5%, seguido pelo sebo bovino, com 19,4 %. A participação percentual das matérias-primas para obtenção de biodiesel, no ano de 2015, pode ser observada na Figura 3. (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA [EPE], 2016).

Figura 3 – Matérias-primas para a produção de biodiesel



Fonte: EPE (2016).

Embora a produção de soja venha crescendo de forma vigorosa nos últimos anos, fornecendo a matéria-prima mais importante para o PNPB, o processamento desta oleaginosa não segue em mesmo ritmo. Pelo fato da legislação em vigor privilegiar a exportação da soja em grão, essa indústria opera com alguma ociosidade. EPE (2016).

2.3.1 *Matéria prima para o biodiesel de soja*

A participação de óleo de soja no biodiesel do Brasil, o segundo produtor global do biocombustível após os Estados Unidos, atingiu 77 por cento da matéria-prima em 2015, ante 75 por cento em 2014. As dimensões quase continentais das lavouras de soja no país garantiram a essa matéria-prima a liderança entre as oleaginosas utilizadas na produção de biodiesel. Além disso, a venda no mercado interno para a produção de biodiesel garante mercado para o óleo que não é exportado, uma situação vantajosa para os produtores brasileiros (MARIZ, 2016; BIODIESELBR, 2014).

Pesa contra ela, no entanto, a desvantagem de ter uma produção de óleo por hectare baixa e o fato de o biodiesel resultante ter problemas com o alto índice de iodo, o que não atende às especificações europeias.

Além disso, a molécula do óleo tem mais ácidos graxos poli-insaturados do que monoinsaturados. Essa característica contribui para que o produto final seja menos

estável e mais propenso a sofrer alterações, duas características pouco desejáveis em um combustível (BIODIESELBR, 2014).

2.3.2 Matéria prima para o biodiesel de sebo

Como observado na Figura 1 (*Matérias-primas para produção de biodiesel no Brasil*), o sebo bovino é a segunda matéria-prima mais utilizada no Brasil para a produção de biodiesel (ANP, 2016). A pecuária brasileira está entre as maiores do mundo. É o segundo maior rebanho efetivo do mundo, com cerca de 200 milhões de cabeças (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO [MAPA], 2016). A associação entre a ocupação do território nacional e a criação de bovinos remonta a origem do País, pois a bovinocultura está inserida num contexto histórico, geográfico, econômico, natural e cultural que determinara o uso e a propriedade da terra (MIELITZ NETO, 1994).

A carne é considerada o principal produto do abate bovino. Seus subprodutos, porém, são insumos para outros processos, dentre eles podendo-se destacar: a pele que, tratada, transforma-se em couro, destinado principalmente à indústria calçadista; o osso do qual se produz a farinha, utilizada na ração animal; o colágeno vinculado à produção alimentícia; e o sebo utilizado pela indústria de limpeza e higiene, bem como na produção de biodiesel (MARTINS *et al.*, 2011).

O abastecimento, o baixo custo (R\$1,50 por quilo) e a agregação de valor a um subproduto são algumas das principais razões para a utilização deste resíduo para produção de biodiesel. (KRAUSE, 2008; SINCOBESP, 2016).

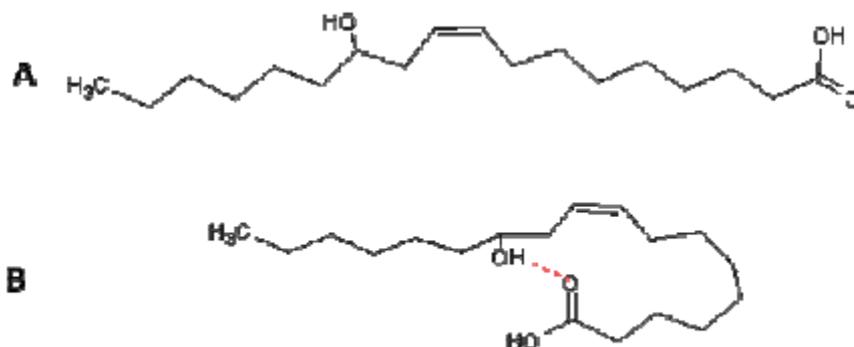
2.3.3 Matéria prima para o biodiesel de mamona

A mamona é uma das principais oleaginosas não comestíveis cultivadas em regiões áridas e semiáridas. O principal produto da mamona é o óleo, também chamado óleo de rícino. O teor médio de óleo varia nas sementes de 50% nas principais cultivares recomendadas (FELIX, 2011). Óleo de mamona é uma importante matéria prima para a indústria química, sendo utilizado na composição de inúmeros produtos como tintas, vernizes, cosméticos, lubrificantes e plásticos.

Na composição de seus triglicerídeos, o ácido graxo ricinoleico é o de maior predominância, cerca de 90%. Por causa da presença de uma hidroxila (OH) na cadeia

carbônica do ácido ricinoleico (C18: 1,12-OH) (Figura 4), o óleo de mamona possui solubilidade em solventes de média polaridade como metanol e etanol, alta viscosidade e propriedades físicas especiais (MEDEIROS, 2016).

Figura 4 - Estrutura molecular do ácido ricinoleico: A – cadeia aberta e B – cadeia com ponte de hidrogênio intramolecular



Fonte: Adaptado de Fereidoon (2005)

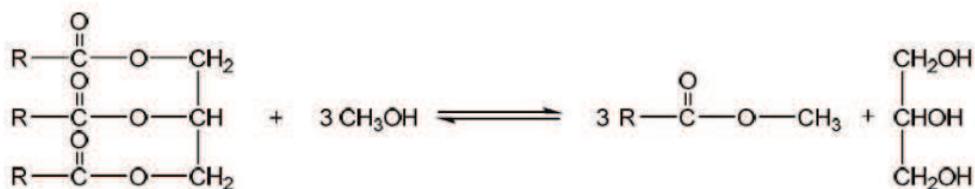
Em todos os países produtores de mamona, esta cultura tem grande importância social por empregar muita mão-de-obra de trabalhadores rurais, principalmente para o plantio, controle de plantas daninhas e colheita. Em média, emprega-se aproximadamente 1 trabalhador rural para cada 4 hectare de plantio de mamona (EMBRAPA, 2016).

2.4 Processo de produção do biodiesel

Biodiesel pode ser obtido por diferentes processos tais como o craqueamento, a esterificação ou a transesterificação. Dentre essas alternativas, a reação de transesterificação utilizando catalisadores básicos é a mais utilizada. (ENCARNAÇÃO, 2008).

O processo de transesterificação de óleos vegetais e gorduras é reação química com álcool catalisada para formar ésteres de ácidos graxos (biodiesel) e glicerol (Figura 5).

Figura 5 – Reação de transesterificação



Fonte: Haertel (2009).

O álcool é adicionado em excesso a fim de permitir a formação de uma fase separada de glicerol e deslocar o equilíbrio para um máximo rendimento de biodiesel, devido ao caráter reversível da reação. Após a reação, a glicerina e o biodiesel são separados por decantação. (ENCARNAÇÃO, 2008; HAERTEL, 2009).

2.5 Propriedades físico químicas dos combustíveis

2.5.1 Poder Calorífico

O poder calorífico de um combustível indica a quantidade de energia desenvolvida pelo combustível por unidade de massa, quando ele é queimado. No caso de um combustível de motores, a queima significa a combustão no funcionamento do motor.

O poder calorífico do biodiesel é muito próximo do poder calorífico do óleo diesel mineral. A diferença média em favor do óleo diesel do petróleo situa-se na ordem de 5%. (PROPRIEDADES...,2016).

2.5.2 Número de Cetano

O número de cetano está relacionado com o atraso de ignição do combustível que corresponde ao período entre o início da injeção de combustível e o início da combustão. (ZUNIGA *et al*,2012). Este atraso é consequência do tempo requerido para que ocorra: pulverização; aquecimento e evaporação do combustível; sua mistura com o ar e finalmente sua autoignição. Quanto maior o número de cetano, menor será o atraso e melhor será a qualidade de ignição do combustível. O número de cetano decresce com o aumento da insaturação e se eleva com o aumento do comprimento da cadeia. (CARACTERÍSTICAS...,2016).

2.5.3 Viscosidade cinemática

A viscosidade indica a facilidade de um material fluir. Devido à viscosidade representar a resistência do fluido ao escoamento, o controle dessa propriedade para o biodiesel é importante para garantir funcionamento adequado dos sistemas de injeção e bombas de combustível. (ZUNIGA *et al*,2012).

A viscosidade também influencia a etapa de combustão, de cuja eficiência dependerá a potência máxima desenvolvida pelo motor. Quanto maior a viscosidade, menor a eficiência do sistema de injeção de combustível, já que na atomização o tamanho das gotículas aumentará levando à redução da área superficial para contato com os gases pressurizados no interior da câmara de combustão. Esse comportamento, por sua vez, inibe a evaporação do combustível e favorece a queima incompleta e geração de particulados. (BHUIYA *et al*,2016; HEYWOOD,1988).

2.5.4 Índice de iodo

O índice de iodo é um indicativo do número de ligações duplas e mede o grau de insaturação da cadeia. A estabilidade oxidativa e a polimerização de glicerídeos são fortemente influenciadas por essa propriedade. (BHUIYA *et al*,2016)

2.5.5 Estabilidade Oxidativa

A estabilidade à oxidação de ésteres metílicos de ácidos graxos é definida como a medida do grau de resistência à oxidação, a qual depende do grau de insaturações e da posição da dupla ligação ao longo das moléculas, podendo ocasionar a formação de depósitos no motor e a deterioração do óleo de lubrificação. Este problema afeta o biodiesel principalmente durante a estocagem. (MORAES, 2008).

2.5.6 Ponto de fulgor

Ponto de fulgor (PF) é a menor temperatura na qual um combustível libera vapor em quantidade suficiente para formar com o ar uma mistura capaz de inflamar.

(GRABOSKI; MCCORMICK, 1998). O PF varia inversamente com a volatilidade do combustível.

Usualmente, biodiesel apresenta PF maior que o diesel convencional. Isso indica que o biodiesel é seguro para fins de transporte, manuseio e armazenamento. (BHUIYA *et al*,2016).

2.5.7 Ponto de fluidez

Ponto de fluidez é a menor temperatura que o líquido escoar livremente. Essa propriedade é usada para caracterizar a operacionalidade do escoamento de combustível em condições de clima frio. O biodiesel apresenta um ponto de fluidez mais elevado devido maior quantidade de ácidos graxos saturados. (ZUNIGA *et al*,2012).

2.5.8 Densidade

Densidade é uma propriedade física dada pela razão entre massa e volume de uma substância. Neste trabalho o volume injetado por ciclo é constante para cada condição operacional do motor e, portanto, a densidade do combustível responde pela massa associada a este volume de injeção. Um combustível mais denso, como o biodiesel de mamona por exemplo, traz maior massa de combustível para dentro do cilindro do motor a cada evento de injeção.

Essa propriedade também afeta a eficiência da atomização do combustível na combustão em sistemas fechados. Em geral, o biodiesel é mais denso e menos compressível que o diesel, o que torna uma das características mais críticas contra o uso extensivo desse biocombustível. (BHUIYA *et al*, 2016).

2.6 Motores térmicos

Os motores térmicos são máquinas que tem por objetivo transformar a entalpia de combustão (através da reação de oxidação de combustíveis) em energia mecânica diretamente utilizável, em outras palavras, estes motores transformam a energia química do combustível em trabalho útil. A forma como a entalpia de combustão é transformada em trabalho depende do tipo de ciclo térmico.

Tradicionalmente os dois ciclos térmicos utilizados em veículos automotores são os ciclos Otto (à gasolina) e Diesel (à diesel). (MENEZES, 2009).

2.6.1 *Motor diesel*

O motor Diesel é composto por cilindros, dentro dos quais se movimentam pistões. A combustão ocorre dentro de uma câmara formada pelo conjunto cilindro-pistão. O pistão desloca-se dentro do cilindro, variando o volume interno da câmara, desde o ponto morto inferior (PMI) – quando o volume interno atinge seu valor máximo – até o ponto morto superior (PMS) – quando o volume interno da câmara atinge seu valor mínimo. O cilindro é dotado de uma ou mais válvulas de admissão, por onde entra o ar necessário à combustão; uma ou mais válvulas de exaustão (ou escape), por onde saem os gases resultantes da queima; e um bico injetor, por onde entra o combustível, injetado sob pressão e atomizado devido ao formato do bico. (MENEZES, 2009).

A principal característica que diferencia o motor Diesel de outros é a injeção de combustível, a qual ocorre sob pressão, próximo ao PMS. O sistema de injeção proporciona pressões elevadas para garantir a fragmentação do líquido com o objetivo de aumentar a área superficial e facilitar a vaporização. Devido à elevada pressão e temperatura da câmara de combustão, decorrente da compressão do ar admitido no primeiro tempo, o combustível queima à medida que penetra na câmara. A expansão dos gases resultantes da queima movimenta o pistão em direção ao PMS, obtendo-se uma expansão a pressão constante, mantida pela pressão na linha da bomba injetora. (HEYWOOD, 1988; GUPTA, 2013).

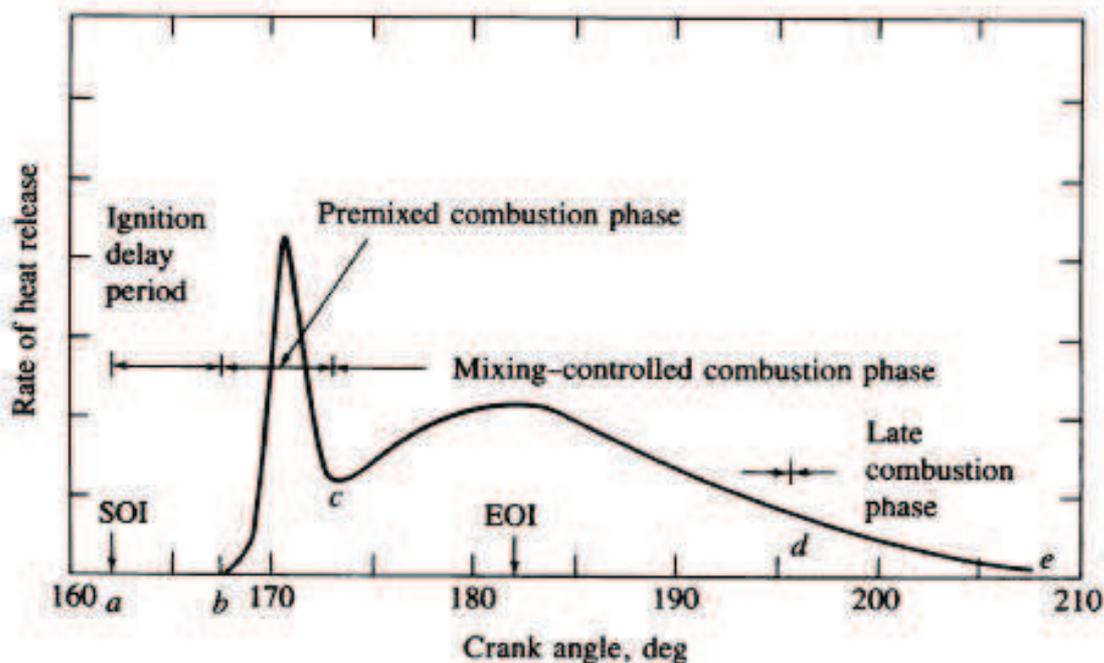
Quando o combustível é injetado na câmara de combustão, ele utiliza o calor sensível do ar para aumentar de temperatura e vaporizar; por isso, a combustão não ocorre instantaneamente, pois existe um intervalo de tempo entre a injeção e o início da ignição, que é determinado pelas características físico-químicas do combustível, expressas pelo número de cetano. O retardo de ignição tem grande importância no processo de combustão nos motores Diesel, pois, além de influenciar no processo, também interfere na partida a frio e nas emissões de exaustão. (HEYWOOD, 1988).

2.6.2 Processo de combustão em motores do ciclo diesel

A combustão nos motores Diesel procede em etapas que envolvem processos físicos e químicos complexos. Os processos físicos são responsáveis pelo aumento da temperatura, obtida através da compressão do ar. Os processos químicos conduzem à autoignição do combustível com liberação de energia para os gases, os quais produzem trabalho através da expansão contra o êmbolo. (HEYWOOD, 1988).

Um típico diagrama de liberação de energia para um motor de injeção direta, identificando as diferentes fases de uma combustão diesel é apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Estágios da combustão



Fonte: HEYWOOD (1988).

O período a-b representa o atraso de ignição. Não há liberação de energia nessa fase. O período b-c representa a rápida fase de combustão pré-misturada. Grande liberação de energia é uma característica dessa fase. O primeiro pico ocorre como resultado da rápida combustão de uma porção do combustível injetado que foi vaporizado e misturado com o ar durante o período de atraso da ignição. A taxa de liberação de energia nessa fase é dependente da carga, uma vez que o atraso de ignição é reduzido com o aumento da temperatura, o que ocorre elevando-se a carga de operação do motor. Assim, quanto maior for o tempo de atraso de ignição disponível

para a preparação de mistura antes da queima, tanto maior será a importância da combustão pré-misturada. O trecho c-d representa a fase da combustão controlada pela mistura. Durante esse período a curva de liberação de energia atinge um segundo pico. O calor liberado nessa fase depende do tempo de duração da injeção. Como a duração da injeção aumenta em condições de altas cargas, a quantidade de combustível injetado se eleva, aumentando assim a magnitude e a duração da liberação de energia. À medida que essa fase avança, a liberação de energia diminui. A cauda da combustão é representada no período d-e, onde a taxa de liberação de energia diminui ainda mais e continua numa taxa decrescente no curso da expansão, podendo perdurar até a abertura da válvula de escape. (GUPTA, 2013).

2.7 Modelos de combustão

2.7.1 Modelo de combustão de Wiebe

Baseando-se na teoria das reações em cadeia proposta por Semenov, a qual explica a combustão de misturas homogêneas, Wiebe deduziu uma expressão semiempírica para que as características de liberação de calor e fração mássica queimada de combustível pudessem ser modeladas a partir de dados experimentais (BUENO, 2011).

Este modelo matemático tem como parâmetros o início e a duração da combustão. O ajuste matemático é exponencial, com coeficientes numéricos a e m , para a fração mássica queimada (χ_b), para um dado ângulo percorrido pelo eixo de manivelas $\Delta\theta$ (MATIAS, 2014). A equação proposta por Wiebe é dada por:

$$\chi_b = 1 - \exp\left(-a \left(\frac{\theta - \theta_i}{\Delta\theta}\right)^{m+1}\right) \quad (1)$$

Na equação acima, θ é o ângulo do virabrequim, χ_b é a fração de massa queimada até o ângulo θ , θ_i é o ângulo do início da liberação de energia (ou início da combustão), $\Delta\theta$ é a duração da combustão e a e m são parâmetros a serem ajustados junto da curva experimental de liberação de calor.

O parâmetro m é o fator de forma da câmara, que condiciona a rapidez da combustão, a é um parâmetro de eficiência da combustão (BUENO, 2011).

A função de Wiebe encontra boa correlação em processos de combustão em motores de ignição por centelha pelo fato que da combustão ser homogênea e possuir somente uma fase.

Em motores dieiseis, o processo de combustão é 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. Tendo isso em vista, uma função simples de Wiebe pode ser usada apenas para modelar a combustão pré-misturada (GHOJEL, 2010).

2.8 Utilização de combustíveis em motores diesel

2.8.1 Desempenho no motor

As metodologias mais utilizadas para a caracterização do desempenho de motores são as curvas de consumo, torque e potência (TULCAN, 2009). Nesse processo podem ser medidas características de desempenho como potência, torque, consumo de combustível, e podem ser calculados os seguintes indicadores:

Tabela 1- Indicadores de desempenho no motor

Consumo específico de combustível (bsfc)	$\frac{1000 \cdot \text{massa de combustível consumida}}{\text{Potência produzida}}$
Eficiência térmica (η_t)	$\frac{3600}{\text{bsfc} \cdot \text{PCI}}$
Pressão efetiva média de frenagem (BMEP)	$\frac{12,56 \cdot \text{Torque}}{\text{Cilindrada}}$

Fonte: TULCAN (2009).

Gopal e Karupparaj (2015) afirmam que o consumo específico das misturas de biodiesel é maior que o do diesel em várias condições de carga e porcentagem de biodiesel no diesel, sendo destacada como possível causa o poder calorífico inferior maior densidade e viscosidade em comparação ao diesel; além disso a eficiência térmica também reduz com o aumento da mistura de biodiesel, influenciado diretamente o consumo específico.

2.8.2 Emissões de poluentes

2.8.2.1. NO_x

NO_x é o termo geral que designa a soma de monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO_2), os dois componentes de nitrogênio mais emitidos em processos de combustão.

O meio mais comum de formação do NO_x é a oxidação do N_2 presente no ar, conhecido como NO_x atmosférico. Para sistemas pré-misturados, uma estimativa de sua taxa de formação pode ser feita pela consideração de equilíbrio químico dado pela reação (1) (GLASSMAN; YETTER, 2008):



No entanto, a formação do NO não surge do ataque do oxigênio molecular sobre o nitrogênio. O N_2 atmosférico reage com átomos de oxigênio provenientes da dissociação do O_2 ou da reação entre H e O_2 , formando os radicais O e OH:



A reação (2) faz parte do mecanismo reacional H_2 - O_2 dentro do processo de combustão dos hidrocarbonetos, considerada uma das reações de iniciação de tal mecanismo (WESTBROOK; DRYER, 1984).

O ataque do O sobre o N_2 inicia o mecanismo reacional conhecido como mecanismo de Zeldovich ou NO térmico, apresentado pelas reações (3), (4) e (5):



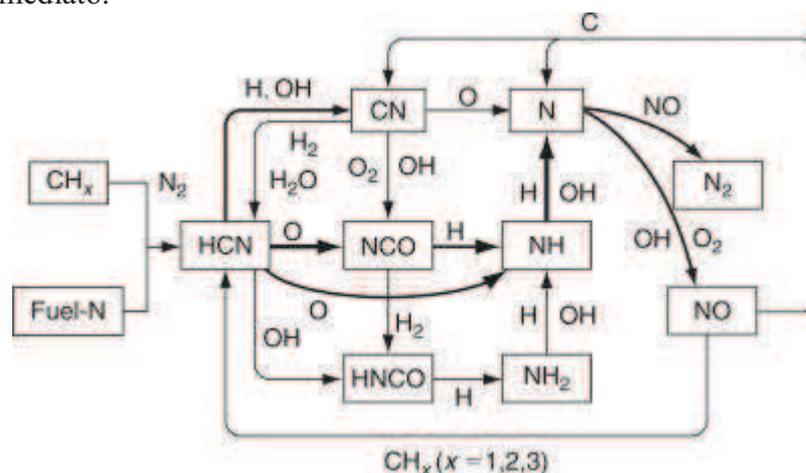
Zeldovich, Sadovnikov e Frank-Kamenetskii (1947) concluíram que a taxa de reação da reação (3), que inicia o mecanismo, é muito mais lenta que a taxa das reações de combustão; sendo assim, a maior parte do NO térmico é formada na região de pós-chama.

A formação do NO é extremamente dependente da temperatura e, em menor importância, das concentrações de O_2 e N_2 . Isso decorre do fato de a reação (3), que inicia o mecanismo de Zeldovich, possuir elevada energia de ativação, 75 kcal.mol^{-1} (GLASSMAN; YETTER, 2008).

Fenimore (1971) observou que o mecanismo de Zeldovich, com a hipótese de equilíbrio para o oxigênio atômico, não consegue prever a taxa de formação do NO na região vizinha à chama. Assim, ele propôs um mecanismo envolvendo os radicais presentes na frente de chama da combustão dos hidrocarbonetos com espécies nitrogenadas, conhecido como NO imediato.

A formação do NO imediato é ilustrado na Figura 7 e mostra os mais importantes caminhos das reações.

Figura 7-Resumo da química das espécies envolvidas no mecanismo imediato.



Fonte: Bowman (1973)

O NO imediato só se sobrepõe ao térmico em condição de combustão rica, caso contrário, o térmico representa mais de 70% de todo NO formado.

Propriedades do biodiesel, tais como maior teor de oxigênio, maior número de cetano, avanço na injeção e combustão, aumentam as emissões de NO_x (XUE, 2013).

2.8.2.2. Material particulado

Material particulado (MP) é formado principalmente na zona primária de chamas difusivas, onde, em geral, a combustão ocorre com falta de oxigênio. No

entanto, sua formação pode ocorrer em qualquer região da chama, desde que não haja uma adequada mistura entre os reagentes. (LEFEBVRE, 1983).

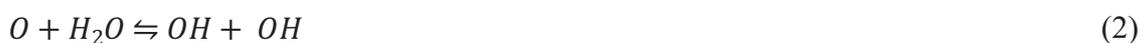
Apesar de as reações de formação de fuligem serem em fase gasosa, ela é observada com maior intensidade em chamas de combustível líquido, principalmente pela maior dificuldade de mistura entre o combustível vaporizado e o oxigênio (CHIGIER, 1981). Em qualquer plano através de uma chama difusiva, há sempre uma extensa variação da razão de equivalência, desde muito rica até muito pobre. Em razão disso, sempre haverá regiões de combustão rica com temperatura elevada, favorecendo a formação de fuligem nesse tipo de chama. Já para as chamas pré-misturadas, por causa da distribuição mais uniforme da razão de equivalência, a formação de fuligem só acontecerá se os reagentes estiverem em proporções com falta de oxigênio. (GLASSMAN, YETTER, 2008; JÚNIOR; LACAVA, 2003).

A maioria dos estudos com biodiesel mostra uma redução nas emissões de MP quando comparado com o diesel. O alto teor de oxigênio no biodiesel é considerado o fator dominante para essa redução, pois melhora a combustão. Além disso, baixo ou nenhum teor de enxofre e aromáticos e pequeno avanço no tempo de injeção também contribuem para uma menor emissão de MP (DI, CHEUNG; HUANG, 2009; OZSEZEN, CANAKCI, 2010; LAPUERTA *et al.*, 2008).

2.8.2.3. Monóxido de carbono

O monóxido de carbono (CO) resulta da combustão incompleta. O mecanismo de formação e destruição do CO em combustão de hidrocarbonetos não pode ser isolado da cinética envolvendo os hidrocarbonetos.

A combustão de hidrocarbonetos pode ser caracterizada como um processo de dois passos: o primeiro envolvendo a quebra do combustível para formar CO e o segundo como a oxidação final do CO para CO₂ (JÚNIOR; LACAVA, 2003). O mecanismo reacional que descreve a oxidação do CO pode ser escrito como (GLASSMAN, YETTER, 2008):





A presença do O_2 na região de reação química é de fundamental importância para o início do mecanismo de oxidação do CO. Dessa forma, além da parte química envolvida, é preciso que o grau de mistura entre os reagentes seja intenso para que todo CO formado seja convertido a CO_2 , principalmente em situações em que o excesso de oxidante é moderado. (JÚNIOR; LACAVA, 2003).

Uma redução nas emissões de CO é esperada ao utilizar biodiesel devido ao maior teor de oxigênio e a uma menor relação C/H no biodiesel em relação ao diesel. Além disso, o biodiesel apresenta um maior número de cetano o que resulta em uma menor possibilidade de formação de zona rica de combustível e, assim, reduzir as emissões de CO (LERTSATHAPORNSUK *et al.*, 2008; XUE, GRIFT, HANSEN, 2011)).

2.8.2.4. Hidrocarbonetos não queimados

Nenhum motor consegue queimar todo o combustível contido na mistura. Isto ocorre quando a frente de chama atinge as paredes do cilindro (sempre mais frias) e esta desaparece deixando uma pequena quantidade de combustível sem queimar (MANAVELLA, 2016).

Os hidrocarbonetos não queimados (HC) incluem parte do combustível em fase gasosa ou na forma de gotículas (combustíveis líquidos), bem como os produtos da degradação térmica do combustível primário em hidrocarbonetos de menor peso molecular, que são descarregados para a atmosfera sem sofrer oxidação completa (LEFEBVRE, 1983).

A maioria dos autores relata que o uso do biodiesel em motores diesel reduz significativamente as emissões de HC devido ao alto número de cetano, alto teor de oxigênio na molécula e avanço no tempo de injeção (GHAZALI *et al.*, 2015; LAPUERTA *et al.*, 2008; XUE, 2013).

2.8.2.5. Utilização do EGR

A recirculação dos gases de escape (EGR) é uma técnica utilizada para reduzir as emissões de NO_x em motores diesel através do controle da concentração de

oxigênio e do pico de temperatura da combustão (AGARWAL; SINGH; AGARWAL, 2011).

Quando o EGR é aplicado, a admissão do motor consiste em ar fresco e ar escape reciclado. O efeito da adição de dióxido de carbono (CO_2), o vapor de água (H_2O), e do nitrogênio (N_2) por meio do uso de EGR reduz a temperatura da chama, aumentando a capacidade térmica total do cilindro de carga. Além disso, a disponibilidade quantidade de oxigênio na mistura de admissão é baixa, devido ao deslocamento do ar pelos gases de escape recirculados. Esses efeitos combinados reduzem a taxa de formação de NO_x (GILL *et al.*, 2012; PALASH *et al.*, 2013).

3 METODOLOGIA

3.1 Combustíveis utilizados

Utilizaram-se nos testes o óleo diesel e misturas entre e combustível base e 10 ou 20% de biodiesel em volume, designados respectivamente Diesel , BX 10 e BX 20. O diesel com baixo teor de enxofre (S10) e sem adição de biodiesel foi doado pela Raizen Distribuidora S.A. Os biodieseis utilizados foram produzidos através de transesterificação alcalina (KOH) no Laboratório de Motores de Combustão Interna (LMCI) da UFC conforme a metodologia descrita em Moura (2008).

3.2 Configuração da bancada utilizada

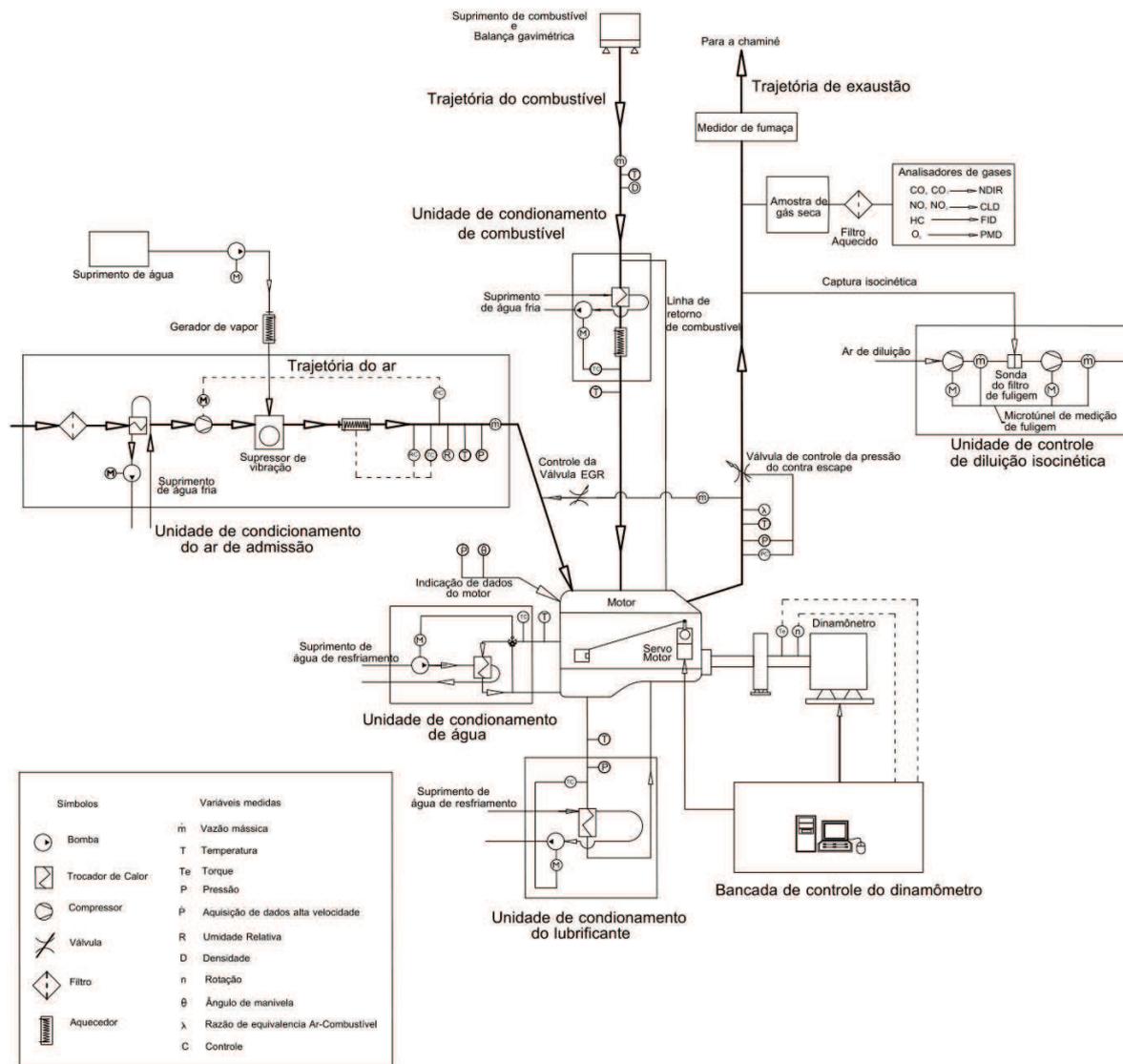
A análise do desempenho operacional do diesel e das misturas diesel-biodiesel foi realizada por meio de experimentos em bancada dinamométrica, mantendo-se os parâmetros de operação do motor sob rigoroso controle.

O motor operou em condições de regime permanente e a uma rotação fixa de 1800 rpm, correspondente ao seu regime de potência máxima de frenagem. Utilizaram-se três condições de carga correspondendo às pressões efetivas médias de frenagem de 750, 500 e 250 kPa.

Dados de emissões, torque, rotação, emissões brutas, consumo específico e eficiência térmica e fluxo de combustível foram adquiridos após 10 minutos de operação do motor em regime permanente e se baseiam na média de duas repetições para cada experimento.

Os principais componentes da bancada são um motor diesel rápido e um dinamômetro de corrente alternada. Para a medição e registro das condições de operação do motor, utilizam-se uma balança gravimétrica de combustível; um tanque de amortecimento com sensor de fluxo de ar; um opacímetro (Dynoptic DSL-220 MkIII), dois analisadores de gases (Fuji Electric e CAI 600 series), uma placa de aquisição de dados equipada com módulos de saída e um microcomputador de controle. Com esse aparato experimental foram realizados experimentos em um motor diesel MWM 229 T6 cujas especificações são dadas na Tabela 3. Uma representação simplificada da bancada disponível no Laboratório de Motores da UFC é apresentada Figura 8.

Figura 8- Bancada dinamométrica



Fonte: Material do LMCI

Os principais parâmetros de operação controlados durante os ensaios, seus respectivos métodos de controle e a precisão nas medições são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 2 - Parâmetros operacionais da bancada e métodos de controle

Parâmetro Operacional	Método de Controle	Precisão
Contrapressão de Escape	Válvula Borboleta Manual + Sensor Indutivo de Pressão	Det. Fabricante ± 5 mbar
Estado do Ar de Admissão	Unidade Fancoil + Banco de Resistências de Aquecimento + Injetores de Água	T: 25 ± 1 °C UR: 50 ± 5 % P: 1 ± 0.005 atm
Temperatura da Água de Arrefecimento	Trocador de Calor Casco-Tubo + Bomba Controlada por Inversor	Ab. Máx. da Termostática ± 1 °C
Temperatura do Óleo Lubrificante	Trocador de Calor Casco-Tubo + Bomba Controlada por Inversor	Det. Fab. ± 1 °C
Temperatura do Combustível	Trocador de Calor Casco-Tubo + Bomba Controlada por Inversor	$40 \pm 0,5$ °C
Carga do Motor	Sinal analógico drive by wire	± 1 °
Torque do Dinamômetro	Controle Eletrônico de Potência	$\pm 1,2$ Nm

Fonte: Material do LMCI.

Tabela 3. Precisão nas medições e incerteza nas variáveis calculadas

Medição	Precisão de Medição em Fundo de Escala
Potência de frenagem	± 0.32 kW
Consumo de combustível	± 192 g/h
Consumo de ar	± 6 m ³ /h
Pressão indicada	± 0.67 bar
Variável Calculada	Incerteza na Variável Calculada
Poder calorífico de combustíveis	± 0.31 %
Relação de equivalência comb/ar global	± 0.0107
Eficiência térmica de frenagem	± 0.0039
Consumo específico de combustível	± 1.84 ml/kWh
Eficiência térmica indicada	± 0.0048

Fonte: Material do LMCI.

Tabela 4. Especificações do motor utilizado

Configuração	4 tempos de injeção direta turbo
Sistema de Injeção	Bomba em Linha
Volume Deslocado [dm ³]	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

Fonte: Material do LMCI.

3.3 Análise da Liberação de energia

A influência da utilização do biodiesel sobre a dinâmica do processo de combustão foi analisada aplicando-se a técnica experimental denominada *heat release analysis*, ou análise de liberação de energia.

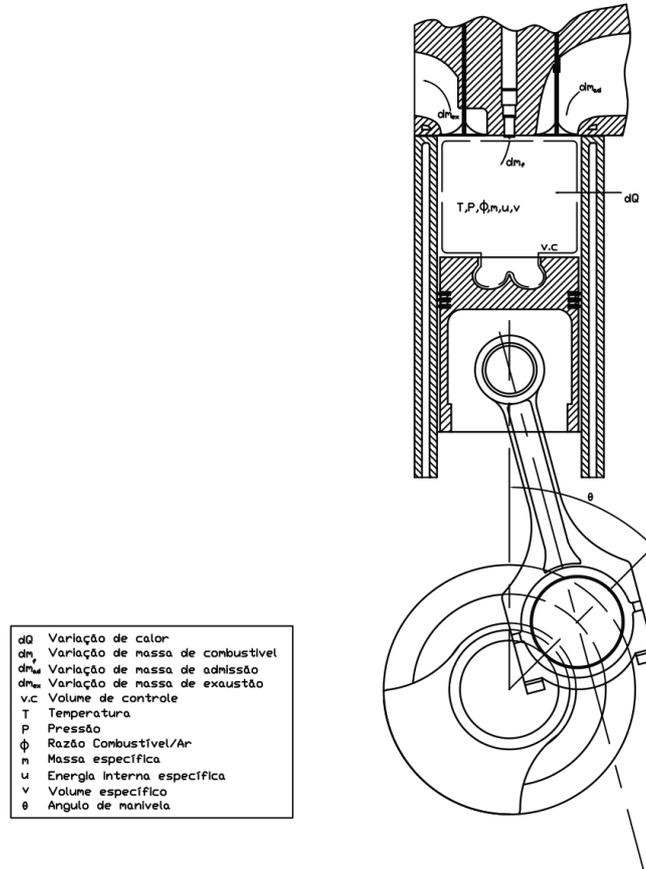
O conceito de taxa aparente de liberação de energia, definida como a razão com a qual a energia química do combustível é convertida através de sua queima, possui papel fundamental para a análise do processo de queima em motores de combustão interna. Seu cálculo costuma ser efetuado a partir do histórico da pressão no cilindro, computando-se a liberação de energia necessária para a obtenção da pressão verificada experimentalmente.

O modelo de uma zona de combustão enunciado por Krieger e Borman (1966), foi utilizado para o processamento dos dados experimentais de pressão, cujas respostas consistem na taxa aparente de queima do combustível e na fração do combustível injetado que foi queimada até um dado instante.

Este modelo considera a carga do cilindro como uma mistura uniforme de gases ideais, composta exclusivamente por ar, combustível não reagido e produtos de combustão. Tal mistura encontra-se em equilíbrio termodinâmico parcial e em condições uniformes de temperatura, pressão e pressão razão de equivalência entre combustível e ar, ajustadas a cada instante da simulação. Dessa forma, as propriedades variam com o tempo, mas não com o espaço. Os efeitos do combustível não queimado sobre as propriedades termodinâmicas são negligenciados e a taxa de injeção costuma ser aproximada pela taxa aparente de queima do combustível ao considerarmos que todo

o combustível é vaporizado e queimado instantaneamente ao adentrar o cilindro. (BUENO, 2003; ROCHA, 2011; CARTAXO, 2016).

Figura 9 - Volume de Controle



Fonte: Material do LMCI

Aplicando a primeira lei da termodinâmica para o volume de controle mostrado na Figura 9, no instante após o fechamento da válvula de admissão, tem-se a Equação (1):

$$dU = \delta Q - \delta W + dm_{ad}h_{ad} - dm_{ex}h_{ex} \quad (1)$$

Sendo que Q , W , m e h são calor, trabalho, massa e entalpia envolvida no sistema, respectivamente. Desconsiderando perdas de massa por folgas e vazamentos no cilindro, e que a única massa alterada é a massa de combustível, tem-se (2):

$$dU = \delta Q - \delta W + dm_f h_f \quad (2)$$

A Equação 2 pode ser simplificada em relação ao modelo proposto por Krieger e Borman (1966) ao combinar os efeitos da entrada de entalpia do combustível com as perdas de calor com a camisa. Dessa forma, o valor líquido da taxa aparente de liberação de calor é dado pela Equação (3):

$$dQ_l = (u - h_f) dm_c - \partial Q \quad (3)$$

Substituindo a Equação (3) em (2) e sendo $du = c_v \cdot dT$, temos a Equação (4):

$$dQ_l = m_c dT - \partial W \quad (4)$$

Em um processo de quase equilíbrio, o diferencial de trabalho é dado por (5):

$$\partial W = P \cdot V \quad (5)$$

Sendo P e V pressão no cilindro e volume do cilindro, respectivamente. Considerando que o fluido de trabalho possui propriedades constantes e que $\gamma = c_p/c_v$, temos a Equação (6):

$$dQ_l = \frac{1}{\gamma - 1} V dP + \frac{P}{\gamma - 1} dV \quad (6)$$

As curvas de dP e P no cilindro foram obtidas em função do ângulo de manivela (φ) através da integração numérica dos dados experimentais da derivada de pressão. V e dV foram calculados em cada φ , considerando o mecanismo formado pelo conjunto biela, pistão e manivela. A resolução numérica da Equação (6) fornece os dados de liberação de energia apresentados nesse trabalho.

3.4 Função de Wiebe

A função de Wiebe foi utilizada para modelar a taxa com que a massa de combustível, admitida no cilindro do motor, foi consumida na reação durante a primeira fase da combustão (combustão pré-misturada).

Diferenciando a Equação (1) em relação à posição angular do eixo de manivelas, temos a taxa de queima expressa por (2):

$$\frac{d\chi_b}{d\theta} = \frac{a(m+1)}{\Delta\theta} \left(\frac{\theta - \theta_i}{\Delta\theta}\right)^m \cdot \exp\left[-a\left(\frac{\theta - \theta_i}{\Delta\theta}\right)^{m+1}\right] \quad (7)$$

Na equação acima, θ é o ângulo do virabrequim, χ_b é a fração de massa queimada até o ângulo θ , θ_i é o ângulo do início da liberação de energia (ou início da combustão), $\Delta\theta$ é a duração da combustão e a e m são parâmetros a serem ajustados junto da curva experimental de liberação de calor.

Utilizando os valores experimentais de liberação de energia na Equação (2), assumindo uma queima de 99% do combustível para que o valor do coeficiente a seja 6,908 e o método de Newton- Raphson para estimar o coeficiente m , obteve-se então a fração queimada de combustível na fase da combustão pré-misturada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Propriedades físico químicas e composição dos combustíveis

A Tabela 4 apresenta as propriedades físico-químicas do diesel utilizado e os valores limites estabelecidos pela resolução n°50 da ANP (ANP,2013) para este combustível. Já a Tabela 5 mostra as propriedades físico-químicas dos biodieseis estudados e os valores limites estabelecidos pela resolução n° 45 da ANP (ANP,2014).

Tabela 5 - Propriedades físico-químicas do Diesel

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)	829,90	820-850
Número de Cetano	48	Mín 48

Fonte: Elaborada pelo autor com dados do NPL e ANP (2015).

Tabela 6 - Propriedades físico-químicas dos Biodieseis

Propriedade	BS100	BSB100	BM100	Limite
Viscosidade cinemática a 40°C (cSt)	4,16	4,79	14,5	3,0-6,0
Umidade (ppm)	184,15	222,90	832,55	500 ppm
Teor de metil éster (%)	99,46	85	76	95,5
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 iodo (gI ₂ .100 g ⁻¹)	121,60	40,60	83,40	Anotar
Fórmula empírica	C _{18,83} H _{34,82} O ₂	C _{18,21} H _{35,44} O ₂	C _{17,96} H _{35,82} O _{2,86}	-
Estabilidade oxidativa (h)	5,30	7,47	31,72	Mín 8
Número de Cetano	52,10	68,77	50	Anotar

Fonte: Elaborada pelo autor com dados do NPL; GRINTEQUI; RAMÍREZ-VERDUZCO; RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ; JARAMILLO-JACOB, 2012; ANP, 2013; ANP, 2014.

Pelas Tabelas 4 e 5, observa-se que os biodieseis são mais densos que o diesel. O peso molecular é um dos fatores que contribui para o aumento da densidade dos biodieseis. Um combustível com uma baixa densidade e viscosidade aumenta a

eficiência da atomização e a formação da mistura ar-combustível. (GHAZALI *et al.*, 2015).

A viscosidade é a principal razão pela qual óleos e gorduras são transesterificados para formarem um biodiesel. A viscosidade do óleo transesterificado é cerca de uma ordem de grandeza menor do que o óleo de origem, o que leva a uma melhor atomização do combustível na câmara de combustão do motor. Por apresentar mais compostos saturados em sua composição, o biodiesel de sebo bovino tem uma maior viscosidade que o biodiesel de soja (Figuras 11 e 12) (DUNN; KNOTHE, 2001; KNOTHE, 2005).

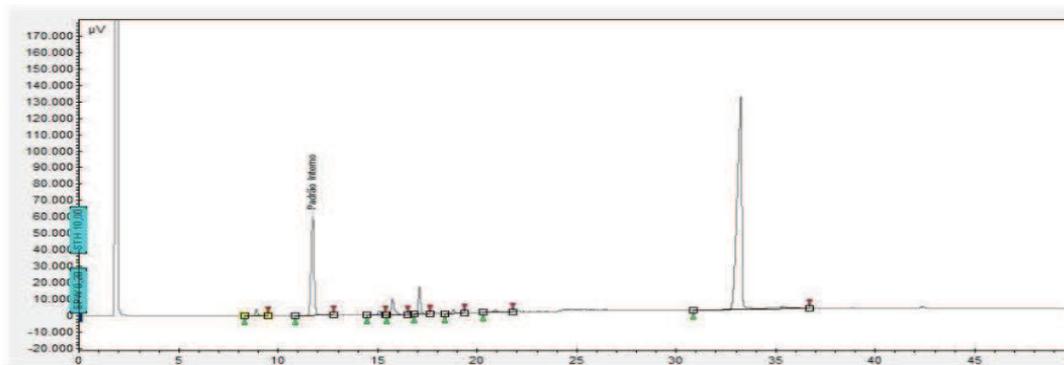
O grupo hidroxila presente no ácido ricinoleico, principal componente do óleo de mamona (Figura 10 e Tabela 6), impacta de forma única as propriedades do óleo de mamona. A alta viscosidade e a alta densidade do éster metílico do ácido ricinoléico excedem os valores estabelecidos pela Resolução n^o 45 da ANP bem como os padrões estabelecidos pela ASTM e EN.

Tabela 7 – Composição quantitativa do biodiesel de mamona

N ^o de Carbonos	Ésteres de ácidos graxos	Composição percentual (%)
C16:0	palmitato de metila	1,99
C18:2	linoleato de metila	7,14
C18:1	oleato de metila	5,17
C18:1-OH	ricinoleato de metila	85,72

Fonte: Elaborada pelo autor com dados do NPL.

Figura 10 - Cromatograma do biodiesel de mamona



Fonte: Elaborada pelo autor com dados do NPL.

O Biodiesel apresenta um PCI cerca de 10% menor que o do diesel. Essa propriedade leva a um maior consumo de biodiesel para atingir o mesmo consumo do

diesel. Dentre os biodieseis estudados, o biodiesel de soja apresenta o maior valor de PCI, pois quanto maior a cadeia de carbono do biodiesel, maior o valor do PCI (OLIVEIRA; Da SILVA, 2013).

Como visto nas Tabelas 4 e 5, o ponto de fulgor do biodiesel sempre é maior do que o do diesel independentemente de o fato do biodiesel ser originário de óleo vegetal de alta qualidade ou de matéria prima de baixo custo, refletindo a natureza volátil do combustível (CANAKCI; VAN GERPEN, 1999).

Biodieseis com grandes quantidades de compostos saturados, como o de sebo bovino, apresentam um maior ponto de fluidez causando um problema para a sua utilização em baixas temperaturas.

O número de cetano dos biodieseis é maior do que o diesel devido a sua maior cadeia de carbono e a presença de saturação na molécula. Entre os biodieseis estudados, o biodiesel de sebo bovino apresenta a maior cadeia e o maior grau de saturação (maior índice de iodo) e por consequência, o maior número de cetano. De acordo com o número de cetano encontrado para os ésteres metílicos de ácidos graxos provenientes de sebo bovino, é possível dizer que o biodiesel puro e suas misturas com o diesel podem proporcionar uma melhor qualidade de ignição do combustível nos motores convencionais.

A estabilidade oxidativa do biodiesel está diretamente relacionada com o grau de insaturação dos compostos presentes, como também, com a posição das duplas ligações na cadeia carbônica. Entre os biodieseis analisados, o de soja apresenta a menor estabilidade, pois cadeias graxas insaturadas são mais propensas à oxidação que as cadeias saturadas.

A Tabela 5 mostra que o biodiesel de origem animal apresenta um baixo índice de iodo quando comparado com os de origem vegetal. Isso ocorre porque a gordura animal possui em sua composição uma maior concentração de ácidos graxos saturados, o que também favorece a sua estabilidade a oxidação.

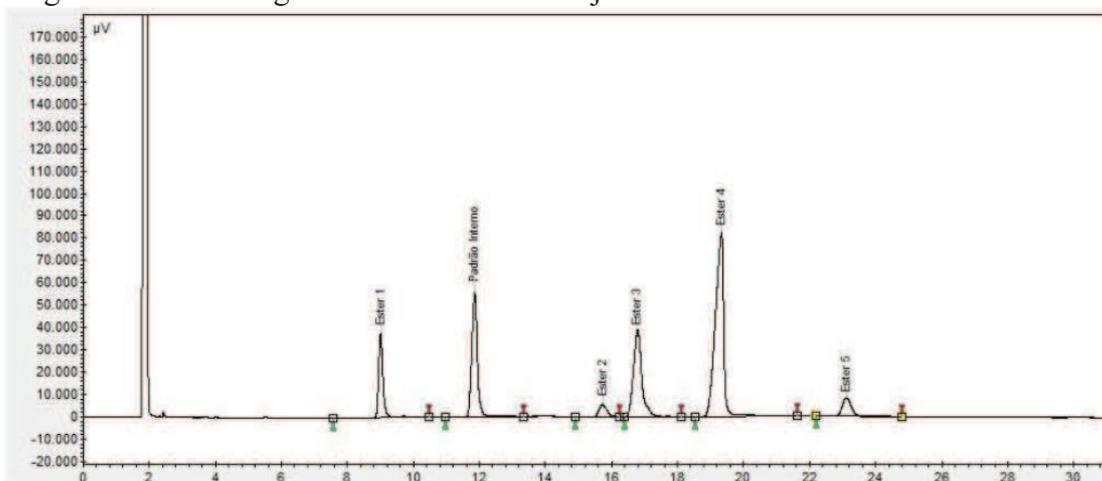
A Tabela 7 mostra o percentual de cada éster metílico encontrado na análise quantitativa do biodiesel de soja, e a Figura 11 apresenta o cromatograma para esta amostra. A análise quantitativa confirmou a presença de uma maior quantidade de compostos insaturados na amostra. O composto predominante foi o éster metílico de ácido linoleico (C18: 2).

Tabela 8- Composição quantitativa do biodiesel metílico de soja

Nº de Carbonos*	Ésteres de ácidos graxos	Composição percentual (%)
C16:0	palmitato de metila	13,46
C18:3	linolenato de metila	5,59
C18:2	linoleato de metila	51,03
C18:1	oleato de metila	24,65
C18:0	estearato de metila	3,34
C24:0	lignocerato de metila	1,92

Fonte: Elaborada pelo autor com dados do NPL

Figura 11- Cromatograma do biodiesel de soja



Fonte: Elaborada pelo autor com dados do NPL

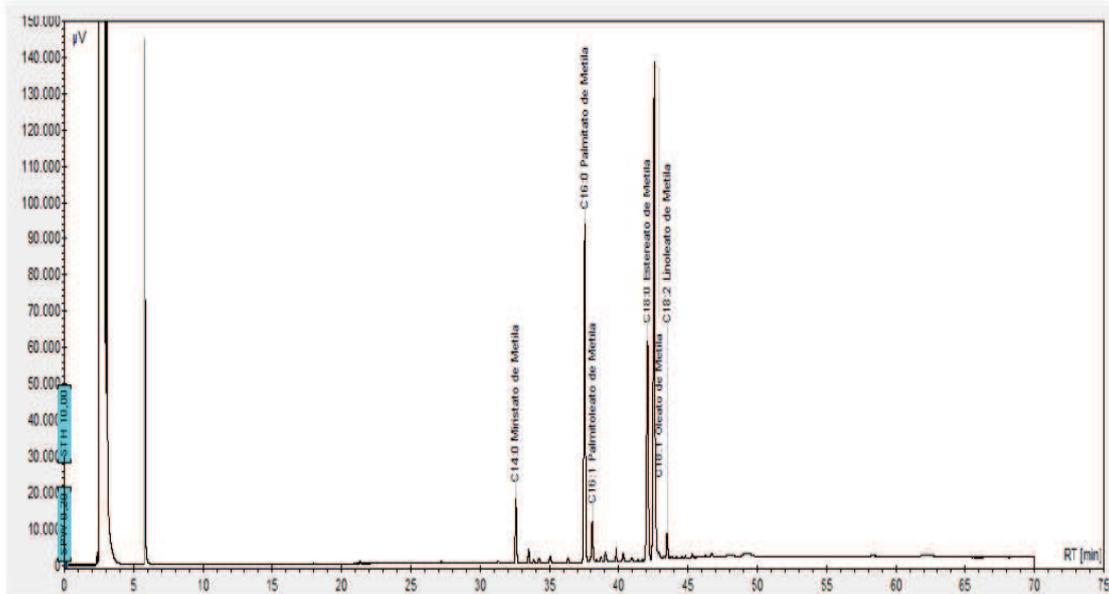
Já a Tabela 8 e a Figura 12 mostram respectivamente a composição percentual e o cromatograma para o biodiesel de sebo bovino. Os ésteres metílicos de sebo apresentam um percentual maior de compostos saturados (C 16:0 e C 18:0).

Tabela 9- Composição quantitativa do biodiesel metílico de sebo bovino

Nº de Carbonos	Ésteres de ácidos graxos	Composição percentual (%)
C14:0	miristato de metila	4,52
C16:1	palmitoleato de metila	2,92
C16:0	palmitato de metila	27,37
C18:2	linoleato de metila	1,78
C18:1	oleato de metila	43,10
C18:0	estearato de metila	20,30

Fonte: Elaborada pelo autor com dados do NPL

Figura 12- Cromatograma do biodiesel de sebo bovino

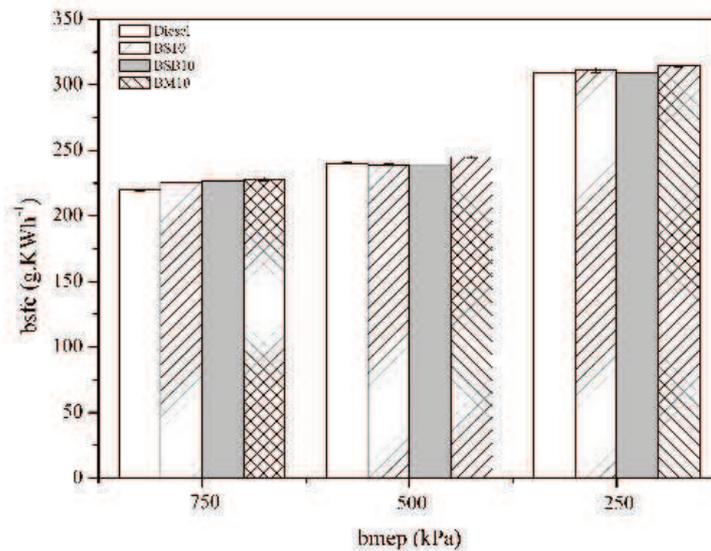


Fonte: Elaborada pelo autor com dados do NPL

4.2 Ensaios de desempenho com diesel e misturas

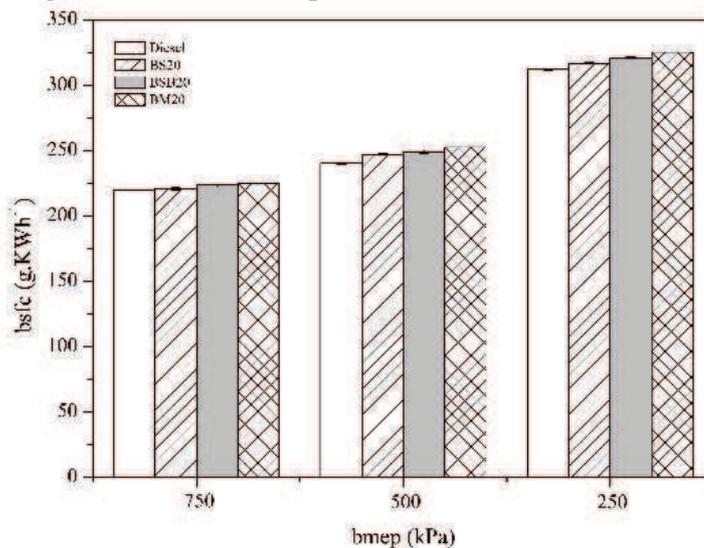
Os resultados de consumo específico de combustível (bsfc) obtidos são apresentados na Figura 13 e 14. Nota-se que a adição de biodiesel resultou em um aumento do bsfc em relação ao óleo diesel. Esse aumento está relacionado, principalmente, aos efeitos combinados da alta viscosidade, da alta densidade e do menor PCI do biodiesel.

Figura 13 - Consumo específico de combustível: misturas B10



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14-Consumo específico de combustível: misturas B20



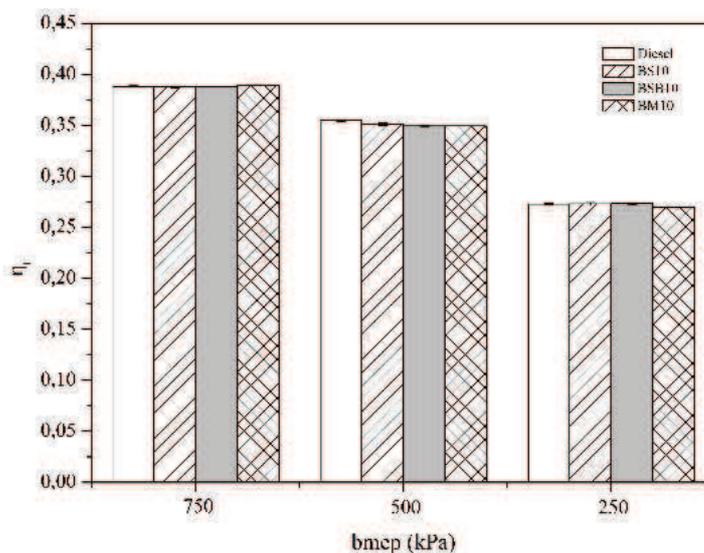
Fonte: Elaborado pelo autor

Para alta carga, o uso da mistura aumentou o bsfc para todas as misturas B10 cerca de 3% e 10% para as misturas B20. Em média carga, houve uma redução de aproximadamente 0,30% para as misturas B10 de biodiesel de soja e de sebo e um aumento de 2% para o biodiesel de mamona. No regime de baixa carga, houve uma pequena redução para as misturas B10 e um aumento para as misturas B20.

Agarwal e Rajamanoharan (2009) relatam que uma maior densidade do combustível leva a um maior fluxo de combustível para o mesmo deslocamento do embolo da bomba injetora. Além disso, há uma redução do conteúdo energético do combustível com a adição do biodiesel fazendo com que uma maior quantidade de combustível seja injetada na câmara de combustão para produzir a mesma potência.

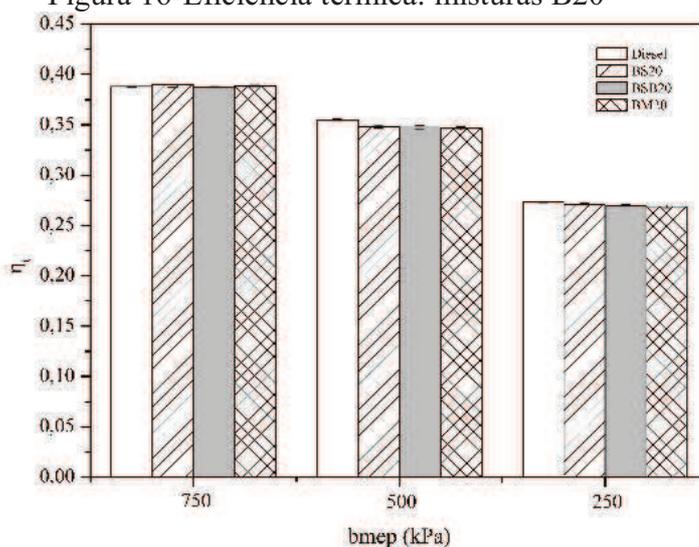
A eficiência térmica é um parâmetro que representa a transformação da energia do combustível em trabalho útil no motor. Os resultados obtidos desse parâmetro encontram-se nas Figuras 15 e 16.

Figura 15-Eficiência térmica: misturas B10



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 16-Eficiência térmica: misturas B20



Fonte: Elaborado pelo autor

Nos ensaios realizados, observa-se uma redução da eficiência térmica para todas as misturas B10 e B20, com exceção da mistura B10 para o biodiesel de soja em média carga e da mistura B20 para o biodiesel de sebo bovino em baixa carga.

A alta viscosidade cinemática conduz a uma menor atomização, menor evaporação e a uma combustão pobre reduzindo, assim, a eficiência térmica. (GHAZALI *et al.*, 2015).

Sendo a eficiência térmica inversamente proporcional ao bsfc e ao PCI, e o aumento no bsfc mais dominante, a eficiência térmica para as misturas de biodiesel diminuem mesmo apresentando um menor PCI (RAHMAN *et al.*, 2013).

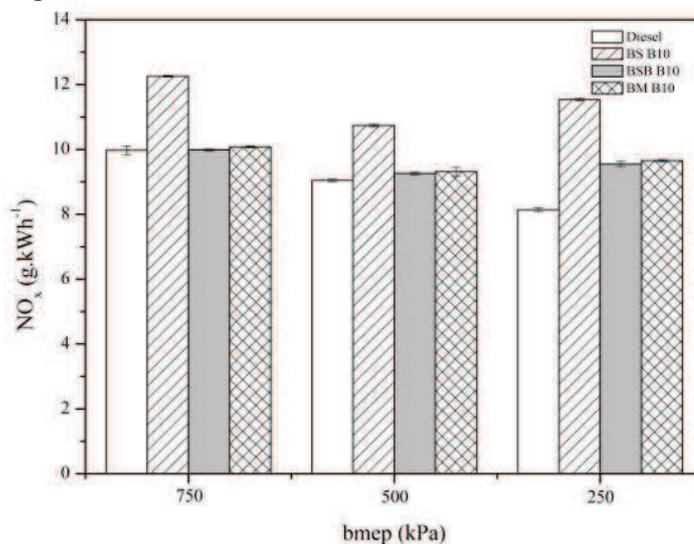
Resultados semelhantes foram obtidos por Sanli *et al.* (2015) em misturas B20, Selvam e Vadivel (2012) em misturas de B5 a B100 e Barrios *et al.* (2014) em misturas de B10 a B50.

4.3 Emissões dos compostos gerados na combustão do diesel e suas misturas

4.3.1 Emissões NO_x

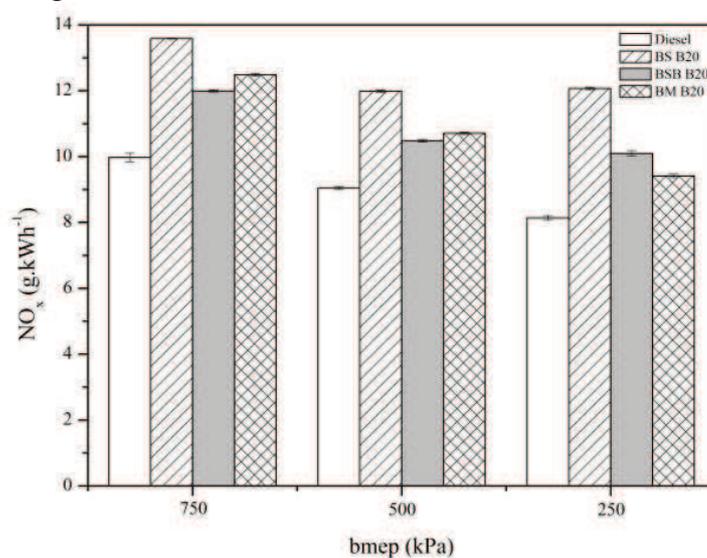
Pelas Figuras 17 e 18, observa-se que maiores emissões de NO_x foram encontradas nas misturas com maiores porcentagens de biodiesel.

Figura 17-Emissões de NO_x : misturas B10



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 18-Emissões de NO_x : misturas B20



Fonte: Elaborado pelo autor

Zhang e Boehman (2007) argumentam que a presença das ligações duplas no biodiesel conduzem a uma formação de radicais livres que aumentam a formação de NO_x . Já Graboski *et al* (2003) ao testarem biodieseis de base etílica e metílica, encontraram que além da insaturação, o tamanho da cadeia também influencia a emissão de NO_x . Compostos com maiores cadeias de carbono e mais insaturados, emitem mais NO_x .

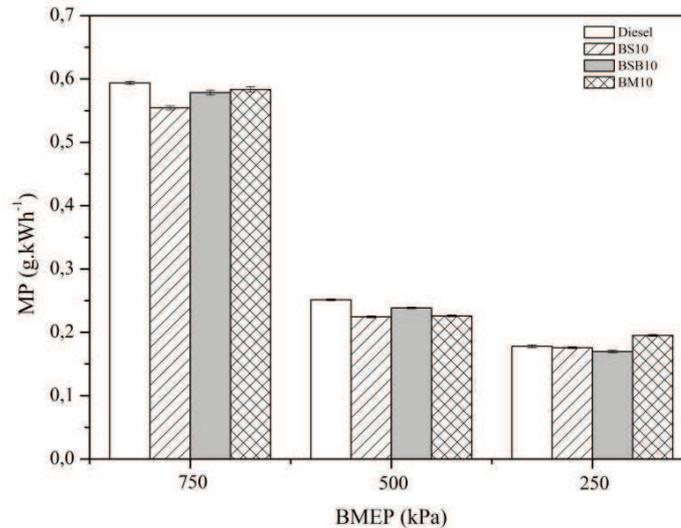
Os resultados apresentados na figura 1 confirmam que a condição para formação de NO_x seria a presença dos ácidos graxos oleicos (C18:1 a C18:3) uma vez que as misturas BS10 e BS20 emitem mais que as outras. Além disso, as ligações duplas do biodiesel aumentam a temperatura adiabática de chama resultando num aumento nas emissões de NO_x (KIM *et al.*, 2008).

A alta porcentagem de oxigênio no biodiesel em relação ao diesel, melhora a combustão, intensifica a temperatura do cilindro, aumentando, assim a formação de NO_x (GHAZALI *et al.*, 2015).

4.3.2 Emissões MP

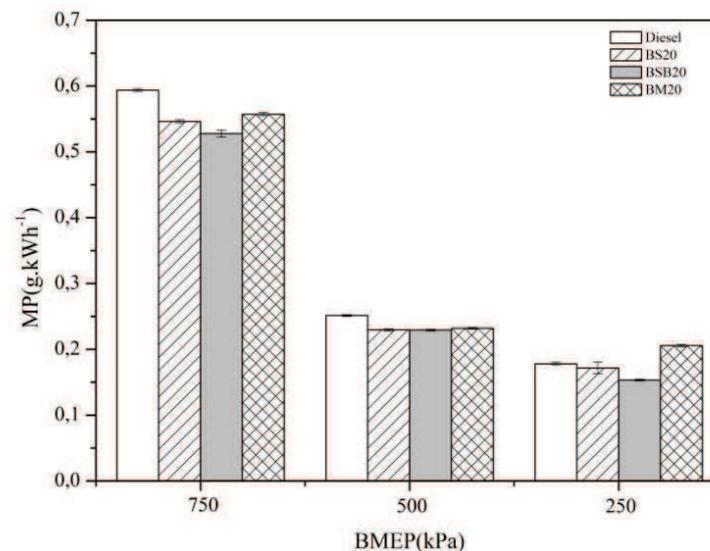
A utilização de biodiesel reduziu as emissões de MP (Figuras 19 e 20). Muitos autores atribuem essa redução ao alto teor de oxigênio no biodiesel que causa uma combustão mais completa e uma maior oxidação da fuligem. A ausência de compostos aromáticos e sulfurados e o alto número de cetano no biodiesel contribuem ainda mais para a redução de MP (LAPUERTA *et al.*, 2008; SONG; ZHANG, 2008; LUJÁN *et al.*, 2009; LABECKAS; SLAVINSKAS, 2006; KARAVALAKIS; STOURNAS; BAKEAS, 2009).

Figura 19-Emissões de MP: misturas B10



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 20-Emissões de MP: - misturas B20



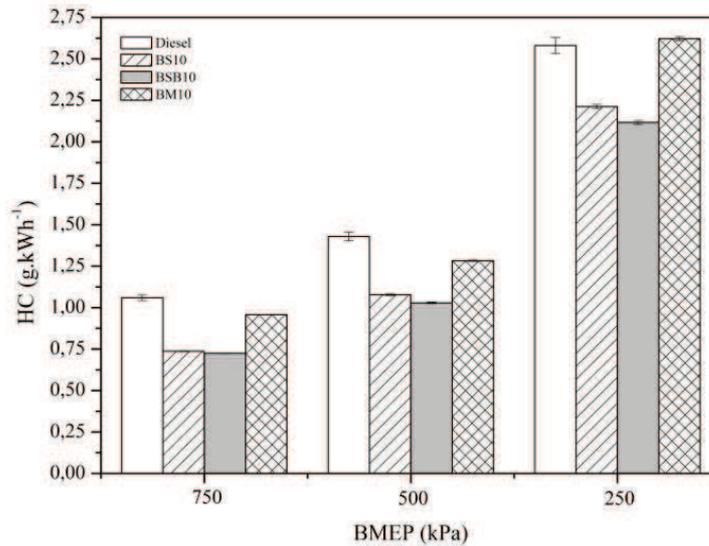
Fonte: Elaborado pelo autor

O aumento nas emissões de MP para as misturas BM10 e BM20 pode ser justificado pela alta viscosidade e a alta densidade do biodiesel que afetar os processos de volatilização e atomização e deteriorar ainda mais a combustão na câmara. Comportamento semelhante foi relatado por Aydin e Bayindir (2010) ao testar misturas com biodiesel de algodão e por Song e Zhang (2008) ao utilizar misturas com biodiesel de soja. Durbin e Norbeck (2002) também encontraram um aumento nas emissões de MP em baixa carga utilizando biodiesel de gordura e óleo de soja.

4.3.3 Emissões HC

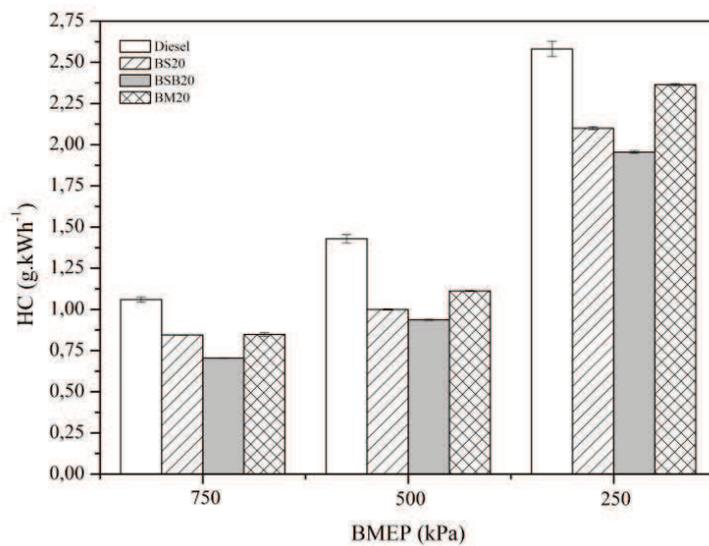
As emissões de HC reduzem com o aumento da porcentagem de biodiesel nas misturas (Figuras 21 e 22).

Figura 21-Emissões de HC: misturas B10



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 22-Emissões de HC: misturas B20



Fonte: Elaborado pelo autor

Graboski *et al* (2003) afirmam que o aumento na cadeia de carbono ou um maior grau de saturação leva a uma maior redução das emissões de HC. Tal fato está em concordância com o que foi exposto na figura 1. As misturas BS10 e BS20 que

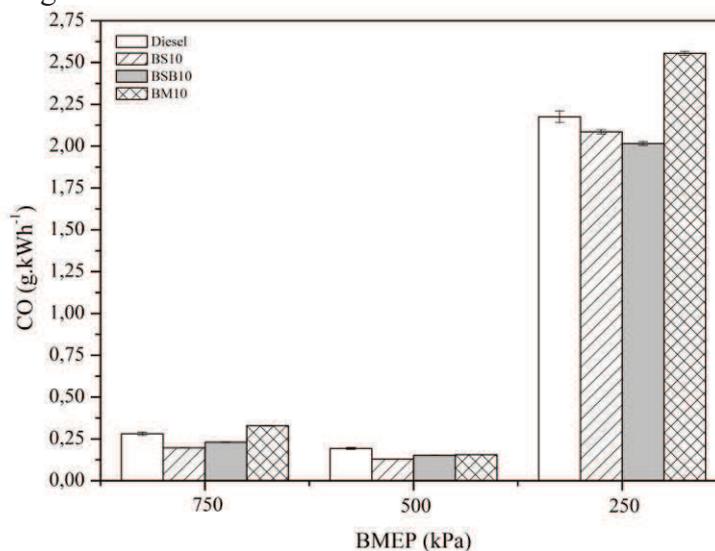
apresentam um maior grau de saturação e uma maior cadeia têm as menores emissões de HC.

De acordo com Buyukkaya (2010), Agarwal, Sinha e Agarwal (2006) e Gumus e Kasifoglu (2010), o maior teor de oxigênio nas misturas com biodiesel leva a uma combustão mais completa e mais limpa, reduzindo assim as emissões de HC.

4.3.4 Emissões CO

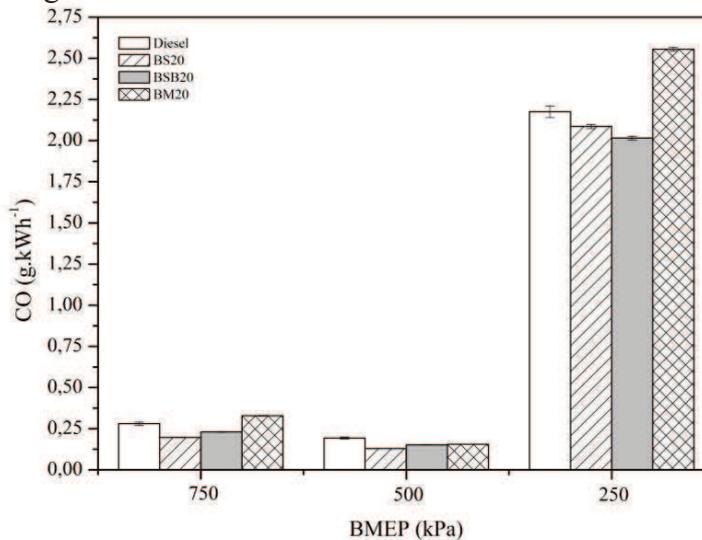
CO é formado durante o processo de combustão, quando a carga queima com fornecimento insuficiente de ar e baixa temperatura.

Figura 23-Emissões de CO: misturas B10



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 24-Emissões de CO: misturas B10



Fonte: Elaborado pelo autor

Pelas Figuras 23 e 24, percebe-se uma maior emissão de CO no regime de alta carga para todas as misturas. A carga do motor tem um impacto significativo nas emissões de CO. De acordo com Gumus e Kasifoglu (2010), Ulusoy, Arslan e Kaplan (2009) e Lertsathapornsuk *et al.* (2008) as emissões de CO aumentam com o aumento da carga. A principal razão para esse aumento é que a razão ar-combustível diminui com o aumento da carga, o que é típico de um motor de combustão interna.

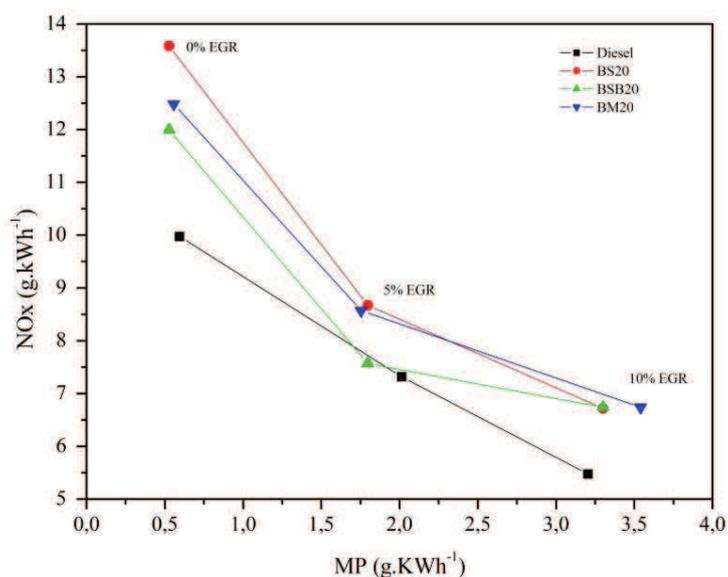
A redução de CO para as misturas BS e BSB é atribuída a quantidade de oxigênio presente nas moléculas que melhora a combustão das misturas (CHAUHAN; KUMAR; CHO, 2012).

A alta viscosidade do biodiesel de mamona leva a uma mistura deficiente ar-combustível, fazendo com que ocorra uma combustão incompleta e assim aumente as emissões de CO.

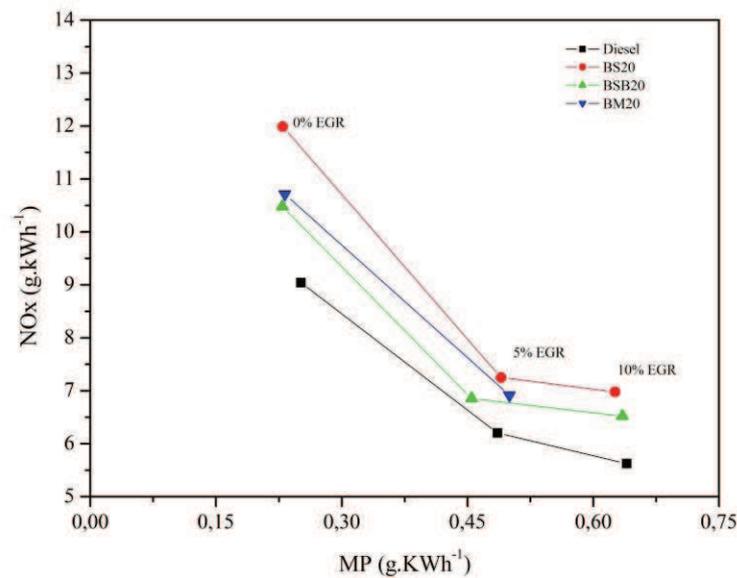
4.3.5 Emissões utilizando-se EGR

Como esperado, o uso do EGR diminuiu as emissões de NO_x e aumentou as emissões de MP (Figuras 25, 26 e 27). Os ensaios conduzidos no regime de alta carga apresentam uma maior redução de NO_x. Comportamento semelhante foi relatado no trabalho de Can *et al.* (2016) ao utilizar misturas B20 de biodiesel de soja.

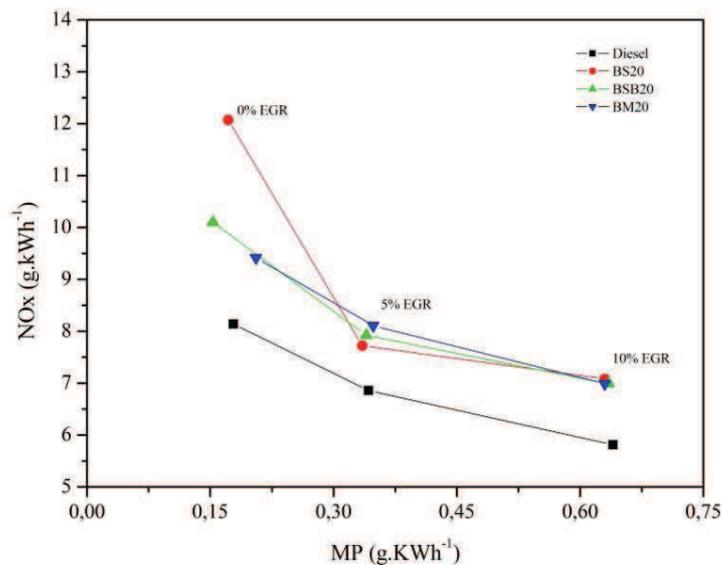
Figura 25-Emissões de MP x NO_x: A- Regime de plena carga



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 26-Emissões de MP x NO_x: - regime de carga mediana

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 27-Emissões de MP x NO_x: -regime de baixa carga

Fonte: Elaborado pelo autor

O efeito supressivo nas emissões de NO_x ao utilizar o EGR pode ser explicado com base na diminuição da temperatura de chama no lado pobre da combustão difusiva. O mesmo sendo associado a redução da fração mássica de oxigênio e a elevação da capacidade térmica específica da carga do cilindro através da diluição do ar de entrada com o conteúdo dos gases tri atômicos (CO₂ e H₂O) do EGR (QI et al., 2011; YOON; SUH; LEE, 2009; GILL *et al.*, 2012).

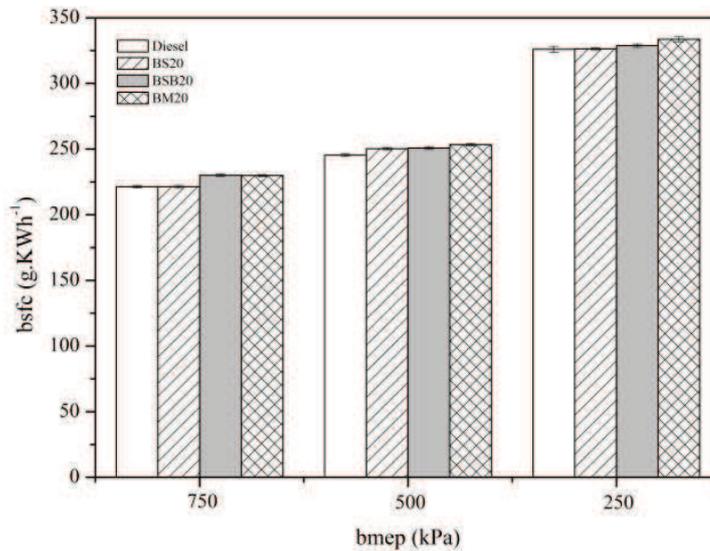
O uso do EGR agrava as emissões de MP. Durante a combustão difusiva os pontos ricos em combustível competem para encontrar oxigênio resultando em um aumento nas emissões de MP. Esse comportamento é intensificado com a adição do EGR (ZHENG; READER; HAWLEY, 2004).

Conforme a carga aumenta, há uma maior geração de fuligem devido ao acesso reduzido ao oxigênio. Esses valores estão em concordância com os trabalhos de Zelenka et al. (1998) e Hawley et al. (1999).

4.3.6 Desempenho EGR

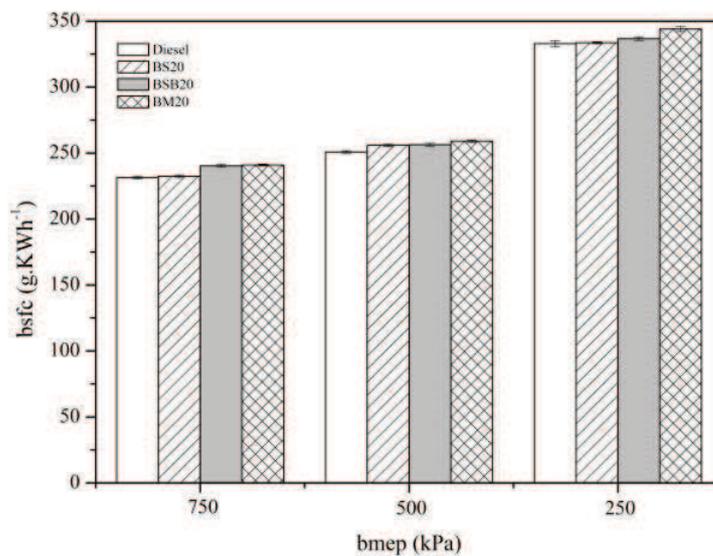
A utilização do EGR é uma das técnicas mais eficazes para a redução de emissões de NO_x em motores de combustão interna. No entanto, observa-se um aumento no bsfc para todos os combustíveis e uma redução na eficiência térmica com o uso do EGR em todas as cargas (Figuras 27, 28,29 e 30).

Figura 28-Consumo específico de combustível: taxa de EGR 5 %



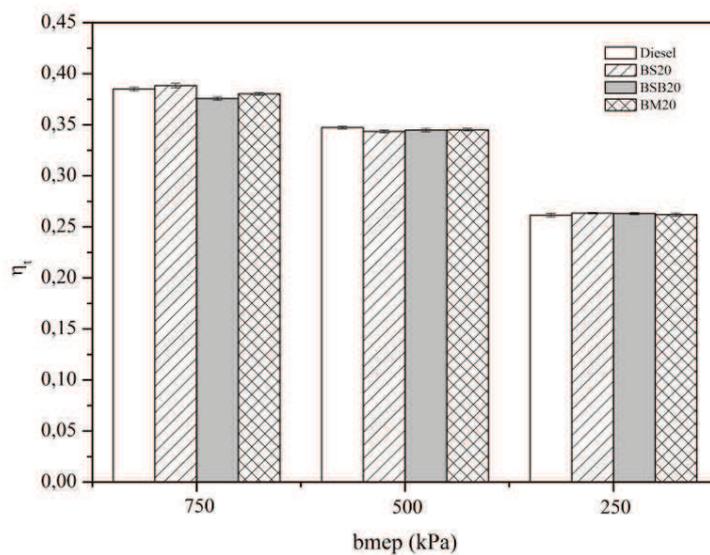
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 29-Consumo específico de combustível: taxa de EGR 10 %



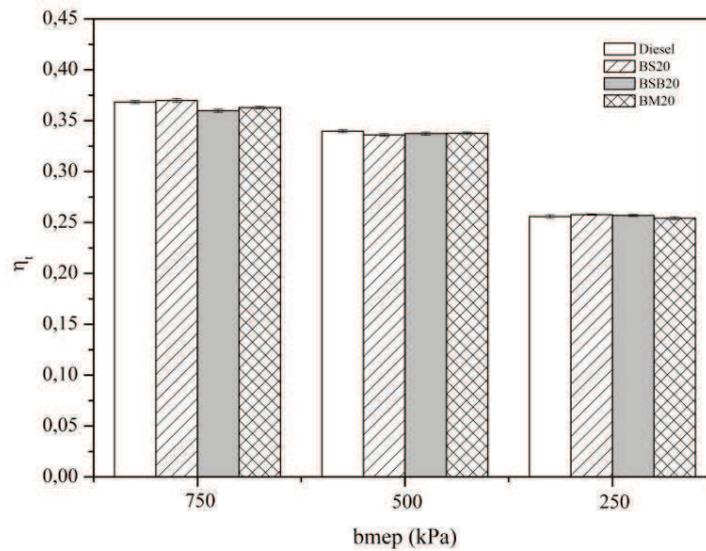
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 30-Eficiência térmica: taxa de EGR 5 %



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 31-Eficiência térmica: taxa de EGR 10 %



Fonte: Elaborado pelo autor

O aumento do bsfc se deve a três fatores: (1) aumento no trabalho de bombeamento (2) aumento da perda de calor para as paredes do cilindro do gás queimado e (3) redução no grau de dissociação nos gases queimados a altas temperaturas (ABD-ALLA, 2002; HEYWOOD, 1988).

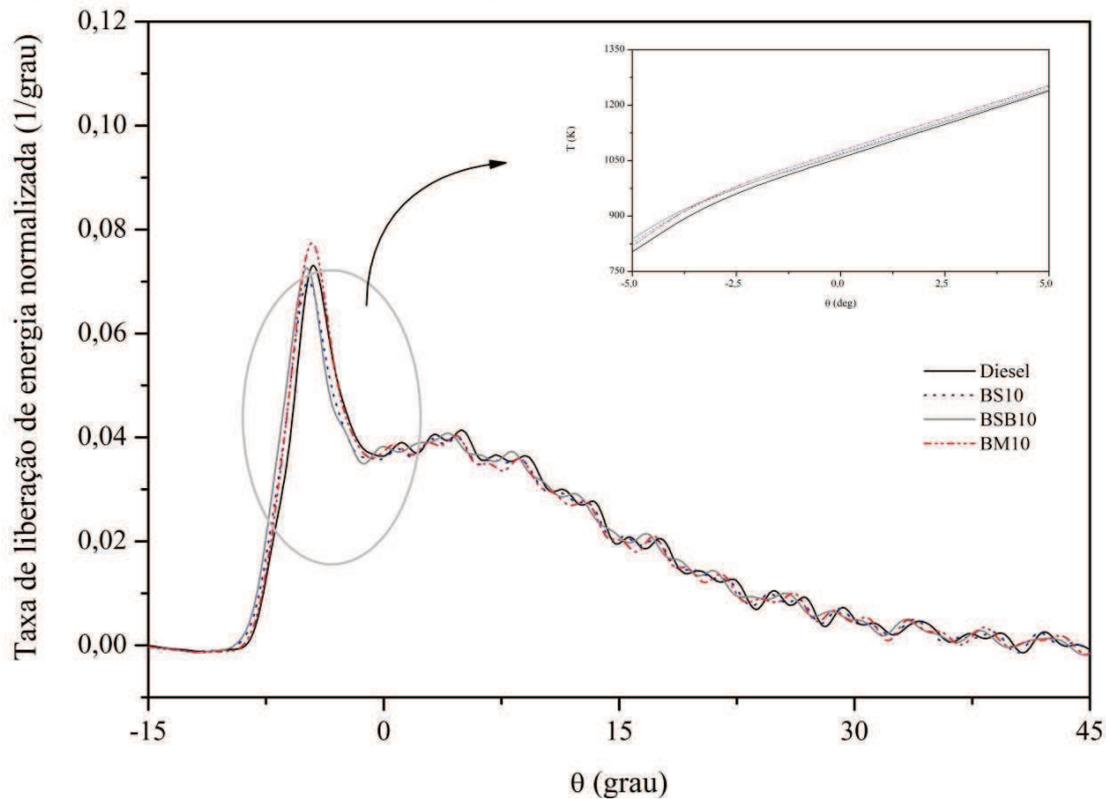
A redução na eficiência térmica pode ser justificada pela menor quantidade de oxigênio disponível para a combustão diminuí devido a substituição do gás de exaustão (RAO; MUTYALU; A RAMAKRISHNA, 2015).

Resultados semelhantes foram encontrados por Can *et al.* (2016) e por RAO; MUTYALU e A RAMAKRISHNA (2015).

4.4 Análise de Liberação de Energia

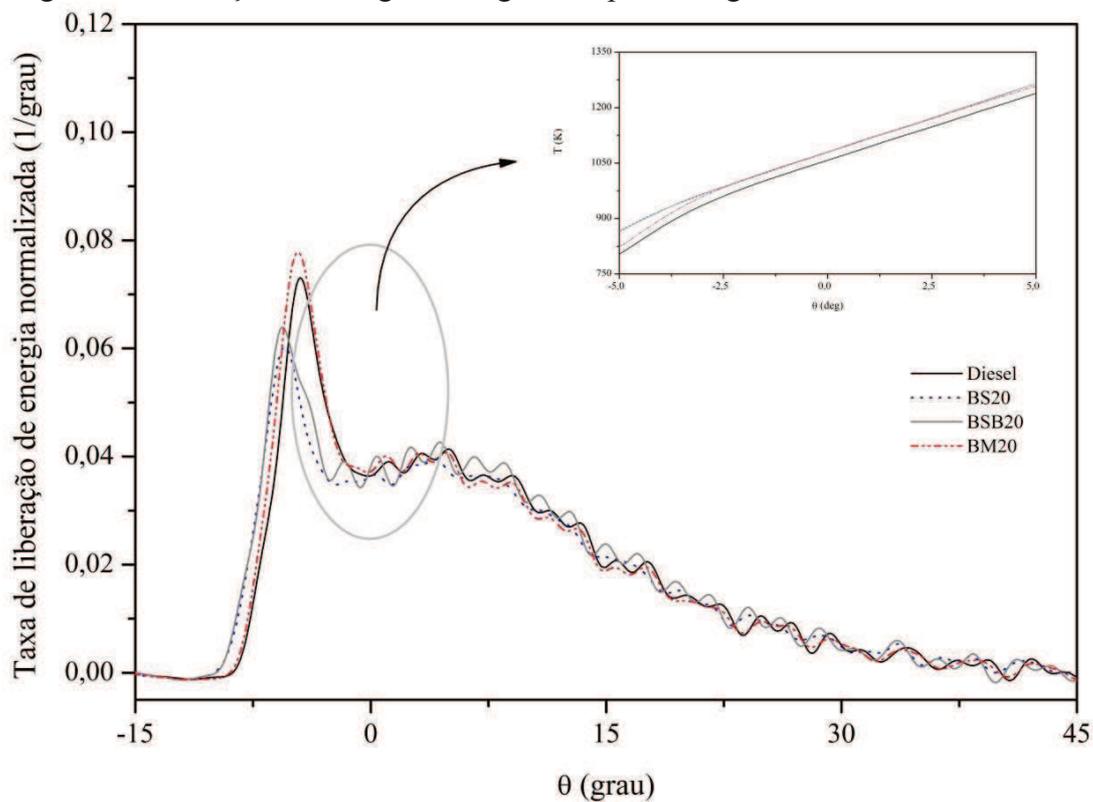
As Figuras de 31 a 36 mostram a taxa de liberação de energia para os combustíveis em todos os regimes de funcionamento do motor.

Figura 32-Liberação de energia em regime de plena carga: misturas B10



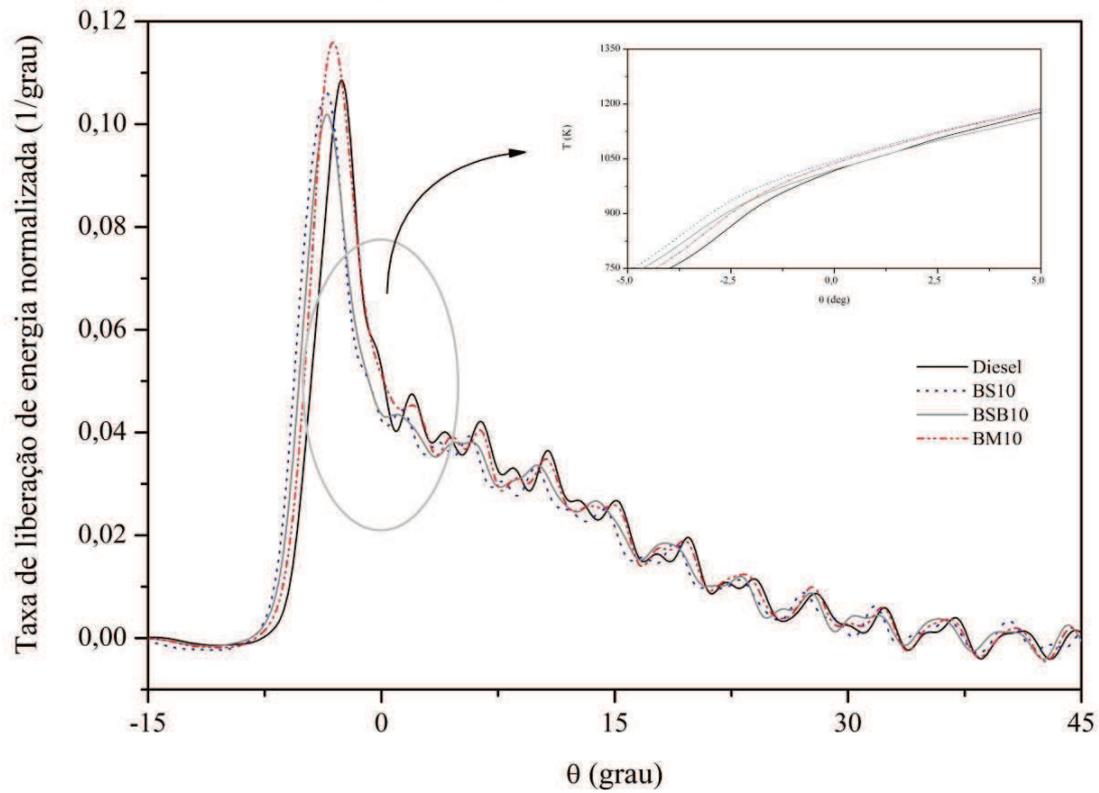
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 33-Liberação de energia em regime de plena carga: misturas B20



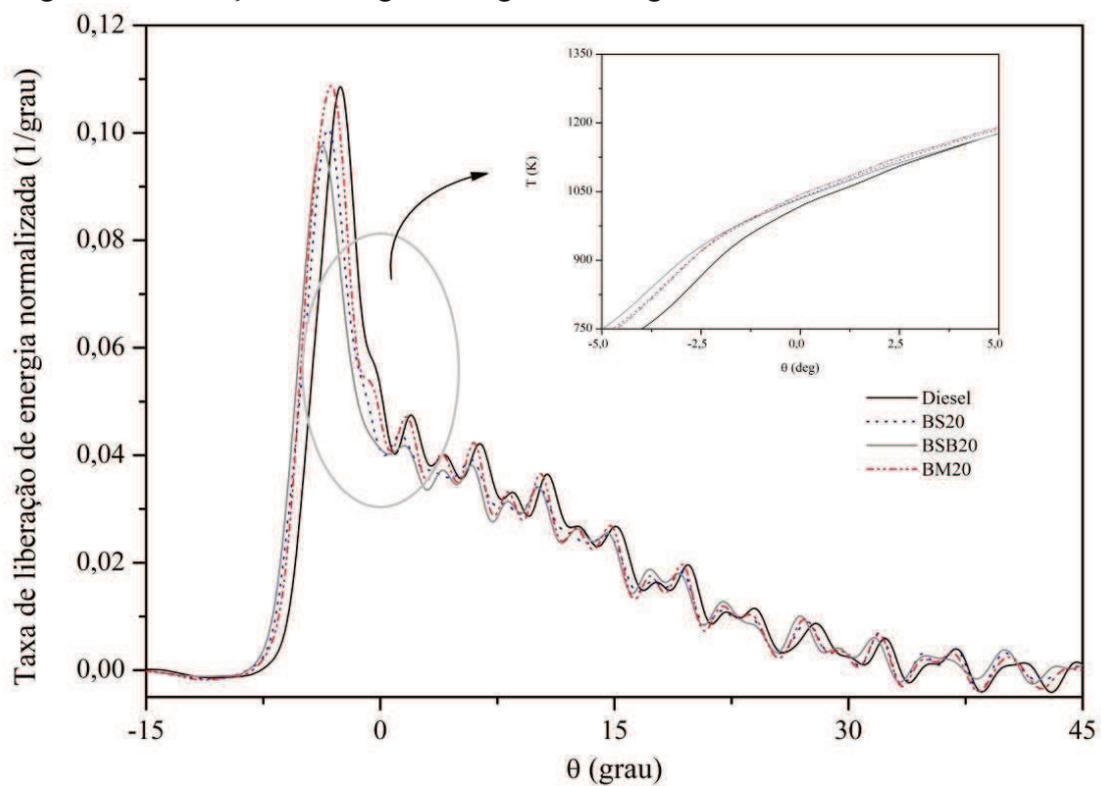
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 34-Liberação de energia em regime de carga mediana: misturas B10



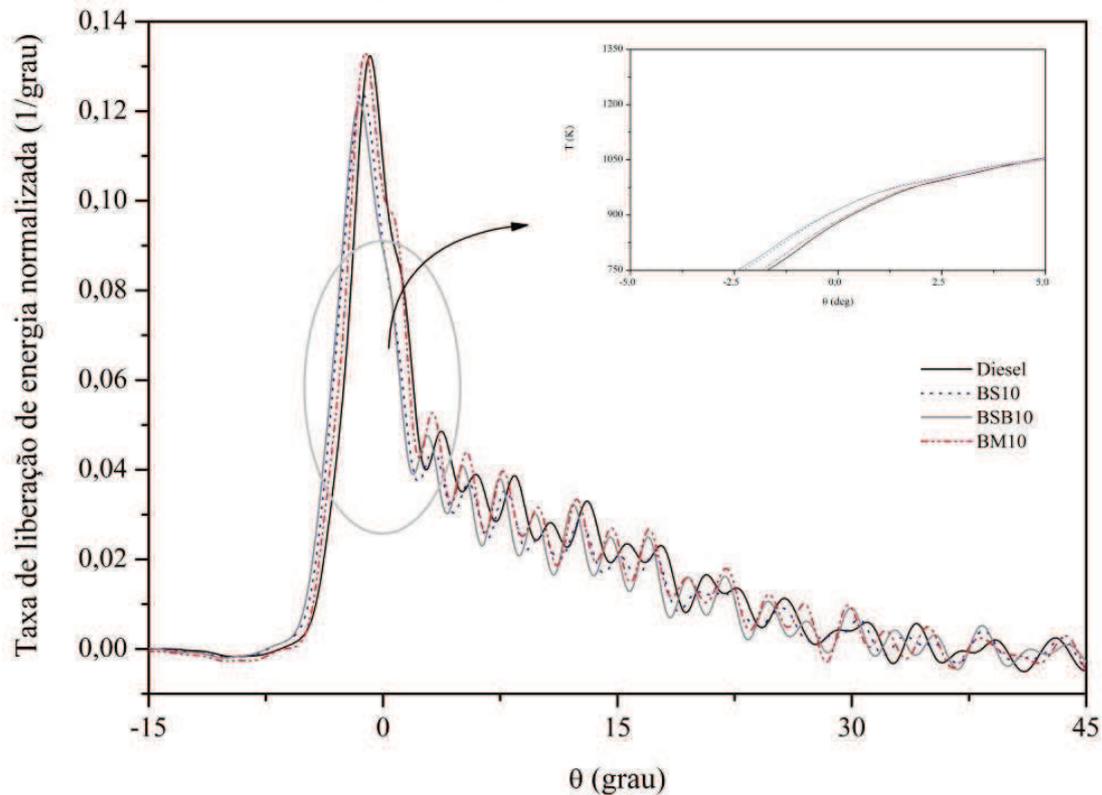
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 35-Liberação de energia em regime de carga mediana: misturas B20



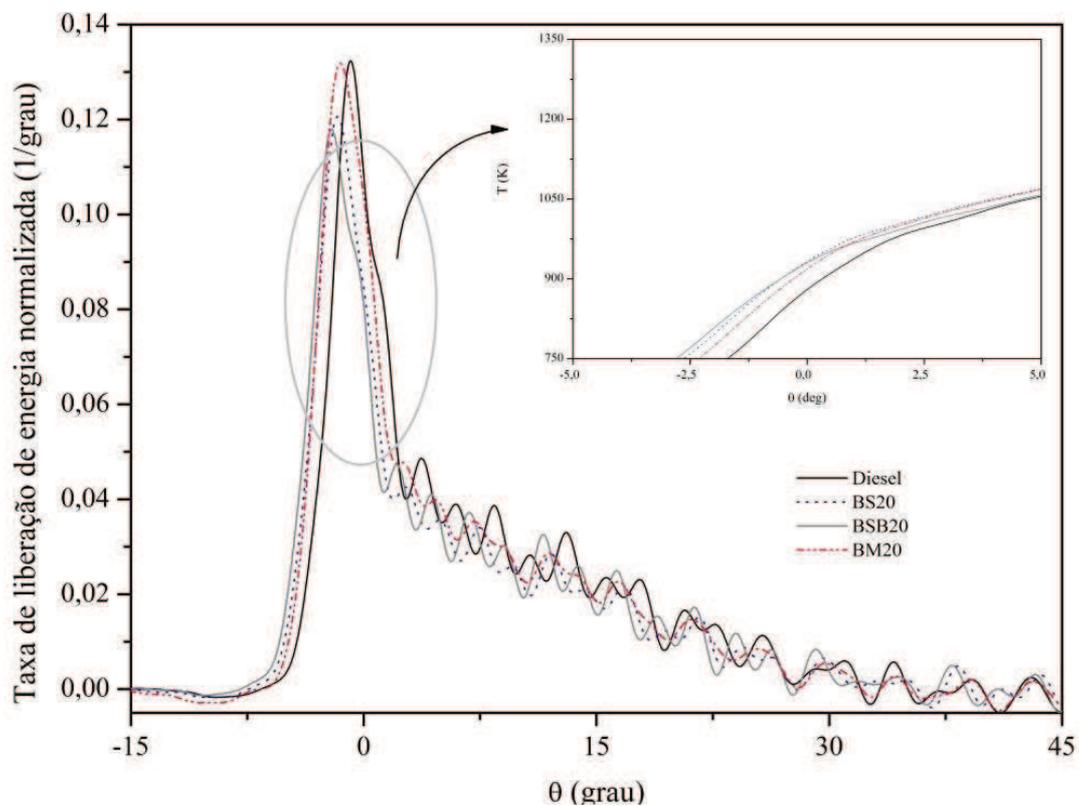
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 36-Liberação de energia em regime de baixa carga: misturas B10



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 37-Liberação de energia em regime de baixa carga: misturas B20



Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que no começo da combustão a taxa de liberação de energia é negativa e em seguida aumenta gradualmente. Esse comportamento pode ser atribuído aos processos químicos e físicos que ocorrem durante a fase de atraso da ignição que tendem a ser endotérmicos (SAHOO; DAS, 2009). Já Muralidharan, Vasudevan e Sheeba (2011) e Kegl e Hribernik (2006) imputam essa característica ao arrastamento do ar combinado a uma menor taxa da mistura ar-combustível.

Devido ao maior valor de PCI, menor viscosidade, menor densidade e melhor formação de spray, o diesel apresenta uma maior liberação de energia quando comparado com os outros combustíveis. A Tabela 9 mostra os valores máximos da taxa de liberação de energia para as misturas B20 e diesel em todos os regimes. Resultados similares foram reportados por Sahoo e Das (2009); Özener *et al.* (2014); Tesfa *et al.* (2013) e Abedin *et al.* (2016).

Tabela 10- Taxa de liberação de energia máxima dos combustíveis em todos os regimes

Combustível	Regime de plena carga	Regime de carga mediana	Regime de baixa carga
Diesel A	130,19 KJ/grau	149,33 KJ/grau	133,56 KJ/grau
BS 20	116,70 KJ/grau	139,82 KJ/grau	125,18 KJ/grau
BSB 20	115,60 KJ/grau	132,35 KJ/grau	118,24 KJ/grau
BM 20	133,92 KJ/grau	142,49 KJ/grau	127,06 KJ/grau

Fonte: Elaborada pelo autor

Nota-se, pelas figuras de 31 a 36 que a combustão começa mais cedo para todas as misturas em todas as condições testadas e torna-se mais proeminente com o aumento da porcentagem de biodiesel nas misturas. As misturas com biodiesel de sebo bovino foram as mais avançaram o ponto de ignição frente aos demais combustíveis sendo seguidas pelas misturas com biodiesel de soja e mamona correspondente ao aumento do número de cetano apresentado na Tabela 2. Tem-se, deste modo, um intervalo de tempo inferior para a preparação de combustível até o instante da ignição, ou seja, para a preparação de combustível disponível para o mecanismo de queima pré-misturada. Isso resulta em uma leve redução na combustão pré-misturada com a elevação da concentração de biodiesel (BUENO, 2006).

Essa redução na queima pré-misturada foi estimada pela função de Wiebe e o processo descrito na seção 3.4. A Tabela 10 mostra a fração queimada na fase pré-misturada para o diesel e as misturas B20.

Tabela 11- Fração queimada de combustível na combustão pré-misturada

Combustível	Regime de plena carga	Regime de carga mediana	Regime de baixa carga
Diesel A	0.2711	0.3979	0.4630
BS 20	0.2266	0.3863	0.4284
BSB 20	0.2286	0.3863	0.4062
BM 20	0.3009	0.4134	0.4602

Fonte: Elaborada pelo autor

5

A viscosidade elevada do biodiesel de mamona afeta a dinâmica do jato, pois combustíveis mais viscosos aumentam a sua quantidade de movimento, penetração e velocidade. Este aumento na quantidade de movimento promovido pelo biodiesel também intensifica a energia cinética turbulenta disponível no jato, o que causa um efeito positivo significativo na taxa de queima durante a combustão controlada pela mistura invés de uma redução (CHMELA; ORTHABER, 1999; ROCHA, 2011).

6 CONCLUSÃO

O desempenho, as emissões e a liberação de energia das misturas B10 e B20 entre o óleo diesel convencional e os ésteres metílicos do óleo de mamona, do óleo de soja e do sebo bovino foram avaliados a partir de ensaios em bancada conduzidos em três regimes distintos. As seguintes tendências foram observadas para as misturas parciais entre diesel e biodiesel, com relação à operação do motor com o óleo diesel convencional:

- Variações no consumo específico em baixa e em média carga. Aumento em carga máxima.
- Leve redução na eficiência térmica para as misturas B10 e B20;
- Aumento nas emissões de NO_x com a adição de biodiesel, principalmente para as misturas com biodiesel de soja;
- Redução nas emissões de material particulado, CO e hidrocarbonetos não queimados;
- Maior liberação de energia para as misturas com biodiesel de mamona;
- Abatimentos na fração queimada na fase pré-misturada para as misturas com biodiesel de soja e sebo e aumento com as misturas com biodiesel de mamona.
- Redução nas emissões de NO_x e aumento nas emissões de material particulado com o uso do EGR.
- Aumento do consumo específico e abatimento na eficiência térmica com o uso do EGR.

Nota-se, portanto, que os biodieseis utilizados podem apresentar um desempenho operacional satisfatório quando adicionado ao óleo diesel convencional em baixas proporções.

REFERÊNCIAS

- ABD-ALLA, G.h.. Using exhaust gas recirculation in internal combustion engines: a review. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 43, n. 8, p.1027-1042, maio 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0196-8904\(01\)00091-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0196-8904(01)00091-7).
- ABEDIN, M.j. et al. Production of biodiesel from a non-edible source and study of its combustion, and emission characteristics: A comparative study with B5. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 88, p.20-29, abr. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.027>.
- AGARWAL, Avinash Kumar; RAJAMANO HARAN, K.. Experimental investigations of performance and emissions of Karanja oil and its blends in a single cylinder agricultural diesel engine. **Applied Energy**, [s.l.], v. 86, n. 1, p.106-112, jan. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.04.008>.
- AGARWAL, Deepak; SINGH, Shrawan Kumar; AGARWAL, Avinash Kumar. Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on performance, emissions, deposits and durability of a constant speed compression ignition engine. **Applied Energy**, [s.l.], v. 88, n. 8, p.2900-2907, ago. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.066>.
- AGARWAL, Deepak; SINHA, Shailendra; AGARWAL, Avinash Kumar. Experimental investigation of control of NOx emissions in biodiesel-fueled compression ignition engine. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 31, n. 14, p.2356-2369, nov. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2005.12.003>.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. **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. 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 n 45, de 25 de agosto de 2014. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 26 ago. 2014. Seção 1, p 68.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. Dispõe sobre as especificações do óleo diesel de uso rodoviário. Resolução n 50, de 23 de dezembro de 2013. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 24 dez. 2013. Seção 1, p 104.
- AYDIN, Hüseyin; BAYINDIR, Hasan. Performance and emission analysis of cottonseed oil methyl ester in a diesel engine. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 35, n. 3, p.588-592, mar. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.009>.
- BARRIOS, Carmen C. et al. Effects of animal fat based biodiesel on a TDI diesel engine performance, combustion characteristics and particle number and size distribution emissions. **Fuel**, [s.l.], v. 117, p.618-623, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.09.037>.
- BHUIYA, M.m.k. *et al.* 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, mar. 2016. Elsevier BV.

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.086>. Disponível em:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115010564>>. Acesso em: 09 maio 2016.
- BIODIESELBR. Soja. 2014. Disponível em:
<<http://www.biodieselbr.com/plantas/soja/soja.htm>>. Acesso em: 15 jun. 2016.
- BOWMAN, Craig T. Kinetics of nitric oxide formation in combustion processes. **Symposium (international) On Combustion**, [s.l.], v. 14, n. 1, p.729-738, jan. 1973. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0082-0784\(73\)80068-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0082-0784(73)80068-2).
- BUENO, André Valente. **Análise da Operação de Motores Diesel com Misturas Parciais de Biodiesel**. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Curso de Departamento de Energia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.
- BUENO, André Valente. **Análise de liberação de energia em motores diesel operando com combustíveis alternativos**. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- BUENO, Juan Pablo Vargas Machuca. **Análise do desempenho de motores diesel utilizando óleo combustível pesado e combustível destilado marítimo**. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- BUYUKKAYA, Ekrem. Effects of biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics. **Fuel**, [s.l.], v. 89, n. 10, p.3099-3105, out. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2010.05.034>.
- CAN, Özer *et al.* Combined effects of soybean biodiesel fuel addition and EGR application on the combustion and exhaust emissions in a diesel engine. **Applied Thermal Engineering**, [s.l.], v. 95, p.115-124, fev. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.056>.
- CANAKCI, M.; VAN GERPEN, J.. BIODIESEL PRODUCTION VIA ACID CATALYSIS. **Transactions Of The Asae**, [s.l.], v. 42, n. 5, p.1203-1210, 1999. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). <http://dx.doi.org/10.13031/2013.13285>.
- CARACTERÍSTICAS DO ÓLEO DIESEL. Disponível em:
<http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/produtos/paraembarcacoes/oleodiesel!/ut/p/c4/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hLf0N_P293QwMLD383A6MgbwNLE0MjAyDQL8h2VAQA9k0JIQ!/?PC_7_9O1ONKG108HOF02RK094120003000000_WCM_CONTEXT=/wps/wcm/connect/portal+de+conteudo/produtos/automotivos/oleo+diesel/caracteristica+do+oleo>. Acesso em: 09 maio 2016.
- CARTAXO, Justino Carvalho. **Análise de liberação de energia para biodieseis de segunda geração**. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- CARVALHO JÚNIOR, João Andrade de; LACAVA, Pedro Teixeira. **Emissões em processos de combustão**. São Paulo: Editora Unesp, 2003. (Edições de Textos de Docentes e Pós-Graduados da UNESP).
- CHAUHAN, Bhupendra Singh; KUMAR, Naveen; CHO, Haeng Muk. A study on the performance and emission of a diesel engine fueled with Jatropha biodiesel oil

and its blends. **Energy**, [s.l.], v. 37, n. 1, p.616-622, jan. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.10.043>.

CHIGIER, N. **Energy, Combustion and Environment**. New York: McGraw-Hill, 1981.

CHMELA, Franz G.; ORTHABER, Gerhard C.. Rate of Heat Release Prediction for Direct Injection Diesel Engines Based on Purely Mixing Controlled Combustion. **Sae Technical Paper Series**, [s.l.], p.152-160, 1 mar. 1999. SAE International. <http://dx.doi.org/10.4271/1999-01-0186>.

DEMIRBAS, Ayhan. Progress and recent trends in biodiesel fuels. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 50, n. 1, p.14-34, jan. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.001>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890408003294>>. Acesso em: 10 abr. 2016.

DI, Yage; CHEUNG, C.s.; HUANG, Zuohua. Experimental investigation on regulated and unregulated emissions of a diesel engine fueled with ultra-low sulfur diesel fuel blended with biodiesel from waste cooking oil. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 407, n. 2, p.835-846, jan. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.09.023>.

DUNN, Robert O.; KNOTHE, Gerhard. Alternative Diesel Fuels from Vegetable Oils and Animal Fats. **Journal of Oleo Science**, [s.l.], v. 50, n. 5, p.415-426, 2001. Japan Oil Chemists' Society. <http://dx.doi.org/10.5650/jos.50.415>.

DURBIN, Thomas D.; NORBECK, Joseph M.. Effects of Biodiesel Blends and Arco EC-Diesel on Emissions from Light Heavy-Duty Diesel Vehicles. **Environmental Science & Technology**, [s.l.], v. 36, n. 8, p.1686-1691, abr. 2002. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/es011231o>.

EMBRAPA. **Cadeia Produtiva - Óleo de Mamona e Biodiesel**. Disponível em: <http://www.cnpa.embrapa.br/produtos/mamona/cadeia_produtiva_biodiesel.html>. Acesso em: 15 jun. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2015**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Petroleo/Documents/An%C3%A1lise%20de%20Conjuntura%20dos%20Biocombust%C3%ADveis%20%20boletins%20peri%C3%B3dicos/An%C3%A1lise%20de%20Conjuntura%20dos%20Biocombust%C3%ADveis%20%20Ano%202015.pdf>>. Acesso em: 30 maio 2016.

ENCARNAÇÃO, Ana Paula Gama. **Geração de biodiesel pelos processos de transesterificação e hidroesterificação, uma avaliação econômica**. 2008. 164 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

FELIX, Poliana Harlanne Dantas. **Avaliação de misturas de óleos vegetais na produção de biodiesel: caracterização físicoquímica e reológica**. 2011. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Centro de Tecnologias e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

FENIMORE, C.P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. **Symposium (international) On Combustion**, [s.l.], v. 13, n. 1, p.373-380, jan. 1971. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0082-0784\(71\)80040-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0082-0784(71)80040-1).

FEREIDOON, S. Bailey's industrial oil and fat products: Chemistry, proprieties and health effects. 6. ed. John Willey e Sons: New York, 2005. Vol.6.

GHAZALI, Wan Nor Maawa Wan *et al.* 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, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.031>.

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. <http://dx.doi.org/10.1243/14680874jer06510>.

GILL, S. S. *et al.* Controlling Soot Formation with Filtered EGR for Diesel and Biodiesel Fuelled Engines. **Environmental Science & Technology**, [s.l.], v. 46, n. 7, p.4215-4222, 3 abr. 2012. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/es203941n>.

GLASSMAN, Irvin; YETTER, Richard A.. Environmental Combustion Considerations. **Combustion**, [s.l.], p.409-494, 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-088573-2.00008-7>.

GOPAL, K. Nantha; KARUPPARAJ, R. Thundil. Effect of pongamia biodiesel on emission and combustion characteristics of DI compression ignition engine. **Ain Shams Engineering Journal**, [s.l.], v. 6, n. 1, p.297-305, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2014.10.001>.

GRABOSKI, M.s. *et al.* **The Effect of Biodiesel Composition on Engine Emissions from a DDC Series 60 Diesel Engine**. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2003. 91 p. (2 in a series of 6).

GRABOSKI, Michael S.; MCCORMICK, Robert L.. Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines. **Progress In Energy And Combustion Science**, [s.l.], v. 24, n. 2, p.125-164, jan. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0360-1285\(97\)00034-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0360-1285(97)00034-8). Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128597000348>>. Acesso em: 24 ago. 2015.

GUMUS, M.; KASIFOGLU, S.. Performance and emission evaluation of a compression ignition engine using a biodiesel (apricot seed kernel oil methyl ester) and its blends with diesel fuel. **Biomass And Bioenergy**, [s.l.], v. 34, n. 1, p.134-139, jan. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.10.010>.

GUPTA, H. N. **Fundamentals of internal combustion engines**. 2. ed. Delhi: Phi Learning Private Limited, 2013. 676 p.

HAERTEL, Paula Lemões. **Desenvolvimento de um novo processo para a produção de biodiesel etílico de mamona**. 2009. 119 f. Dissertação (Mestrado em Química Tecnológica e Ambiental) - Escola de Química e Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2009.

HAWLEY, J.g. *et al.* Reduction of Steady State NOx Levels from an Automotive Diesel Engine Using Optimised VGT/EGR Schedules. **Sae Technical Paper Series**, [s.l.], p.1-14, 1 mar. 1999. SAE International. <http://dx.doi.org/10.4271/1999-01-0835>.

- HEYWOOD, John B.I. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. [s. L.]: Mcgraw-hill, 1988. 930 p. (McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering).
- JAKERIA, M.r.; FAZAL, M.a.; HASEEB, A.s.m.a.. Influence of different factors on the stability of biodiesel: A review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 30, p.154-163, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.024>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113006837>>. Acesso em: 09 maio 2016.
- KARAVALAKIS, George; STOURNAS, Stamoulis; BAKEAS, Evangelos. Light vehicle regulated and unregulated emissions from different biodiesels. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 407, n. 10, p.3338-3346, maio 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.063>.
- KEGL, Breda; HRIBERNIK, Aleš. Experimental Analysis of Injection Characteristics Using Biodiesel Fuel. **Energy & Fuels**, [s.l.], v. 20, n. 5, p.2239-2248, set. 2006. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/ef060285m>.
- KIM, Myung Yoon *et al.* Characteristics of Particulate Emissions of Compression Ignition Engine Fueled With Biodiesel Derived From Soybean. **J. Eng. Gas Turbines Power**, [s.l.], v. 130, n. 5, p.265-271, 2008. ASME International. <http://dx.doi.org/10.1115/1.2906215>.
- KNOTHE, Gerhard. Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. **Fuel Processing Technology**, [s.l.], v. 86, n. 10, p.1059-1070, jun. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.11.002>.
- KRAUSE, Laíza Canielas. **Desenvolvimento do processo de produção de biodiesel de origem animal**. 2008. 147 f. Tese (Doutorado em Química) - Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- KRIEGER, R B.; BORMAN, G.L. The Computation of Apparent Heat Release for Internal Combustion Engines. **ASME paper 66-WA/DGP-4**, 1966.
- LABECKAS, Gvidonas; SLAVINSKAS, Stasys. The effect of rapeseed oil methyl ester on direct injection Diesel engine performance and exhaust emissions. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 47, n. 13-14, p.1954-1967, ago. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2005.09.003>.
- LABECKAS, Gvidonas; SLAVINSKAS, Stasys. The effect of rapeseed oil methyl ester on direct injection Diesel engine performance and exhaust emissions. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 47, n. 13-14, p.1954-1967, ago. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2005.09.003>.
- LAPUERTA, Magín *et al.* Effect of the alcohol type used in the production of waste cooking oil biodiesel on diesel performance and emissions. **Fuel**, [s.l.], v. 87, n. 15-16, p.3161-3169, nov. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2008.05.013>.
- LEFEBVRE, Arthur H.. **Gas Turbine Combustion**. USA: Mcgraw-hill Inc, 1983. (McGraw-Hill series in energy, combustion, and environment).
- LEITE, Rogério Cezar de Cerqueira; LEAL, Manoel Régis L. V. O biocombustível no brasil. **Novos estud.** - CEBRAP, São Paulo, n. 78, p. 15 -21, julho 2007. Disponível

em:<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-33002007000200003&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 30 Maio 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-33002007000200003>.

LERTSATHAPORNUSUK, V. *et al.* Microwave assisted in continuous biodiesel production from waste frying palm oil and its performance in a 100 kW diesel generator. **Fuel Processing Technology**, [s.l.], v. 89, n. 12, p.1330-1336, dez. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.05.024>.

LUJÁN, J.m. *et al.* Comparative analysis of a DI diesel engine fuelled with biodiesel blends during the European MVEG-A cycle: Performance and emissions (II). **Biomass And Bioenergy**, [s.l.], v. 33, n. 6-7, p.948-956, jun. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.02.003>.

MANAVELLA, Humberto José. **Análise de Emissões no Escape**. Disponível em: <<http://www.hmautotron.eng.br/artigos/Gases&EmissoesPM;.pdf>>. Acesso em: 30 jun. 2016.

MARIZ, Cristiano. **Óleo de soja ganha fatia no biodiesel do Brasil**. 2016. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/economia/noticias/oleo-de-soja-ganha-fatia-no-biodiesel-do-brasil>>. Acesso em: 15 jun. 2016.

MARTINS, Renata *et al.* O Biodiesel de Sebo Bovino no Brasil. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 41, n. 5, p.56-70, maio 2011.

MATIAS, Filipe Augusto Serrão. **Simulação computacional da combustão em um motor diesel marítimo de rotação constante**. 128 f. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

MEDEIROS, Everaldo Paulo de. **Óleo de mamona**. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/mamona/arvore/CONT000gzv4dnas02wx7ha07d33641bgedc3.html>>. Acesso em: 15 jun. 2016.

MENEZES, Eliana Weber de. **Produção de trabalho, geração de contaminantes e tratamento pós-combustão em motores ciclo diese**. 2009. 170 f. Tese (Doutorado em Química) - Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MIELITZ NETO, C. G. A. Modernização e diferenciação na bovinocultura de corte brasileira. Tese (Doutorado em Economia) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Bovinos e bubalinos**.2016. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/animal/especies/bovinos-e-bubalinos>>. Acesso em: 30 Maio 2016.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Boletim mensal dos combustíveis renováveis**.2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-combustiveis-renovaveis/publicacoes>>. Acesso em:30 maio 2016.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Resenha energética brasileira**.2015. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/1138787/1732840/Resenha+Ener%C3%A9ti>

ca+-+Brasil+2015.pdf/4e6b9a34-6b2e-48fa-9ef8-dc7008470bf2>. Acesso em:30 maio 2016.

MORAES, Maria Silva Aranda. **Biodiesel de sebo: avaliação de propriedades e testes de consumo em motor a diesel**. 118 f. Dissertação (Mestrado em Química) Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em:

<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/14351/000653546.pdf?...1>>.

Acesso em: 25 out. 2015.

MOURA, Kátia Regina Marques. **Otimização do processo de produção de biodiesel metílico do sebo bovino aplicando um delineamento composto central rotacional (DCCR) e a avaliação da estabilidade térmica**. 2008. 126 f. Tese (Doutorado em Química) - Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2008.

MURALIDHARAN, K.; VASUDEVAN, D.; SHEEBA, K.n. Performance, emission and combustion characteristics of biodiesel fuelled variable compression ratio engine. **Energy**, [s.l.], v. 36, n. 8, p.5385-5393, ago. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.050>.

OLIVEIRA, L. E.; Da SILVA, M. L. C. P. Comparative study of calorific value of rapeseed, soybean, jatropha curcas and crambe biodiesel. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY, 13., 2013, Bilbao. **Renewable Energy & Power Quality Journal**. Bilbao: Ea4epq, 2013. v. 11, p. 411 - 411.

ÖZENER, Orkun *et al.* Effects of soybean biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics. **Fuel**, [s.l.], v. 115, p.875-883, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.081>.

OZSEZEN, Ahmet Necati; CANAKCI, Mustafa. The emission analysis of an IDI diesel engine fueled with methyl ester of waste frying palm oil and its blends. **Biomass And Bioenergy**, [s.l.], v. 34, n. 12, p.1870-1878, dez. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.07.024>.

PALASH, S.m. *et al.* Impacts of biodiesel combustion on NOx emissions and their reduction approaches. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 23, p.473-490, jul. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.003>.

PROPRIEDADES Físicas e Químicas do Biodiesel. 2006. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/biodiesel/especificacoes/biodiesel-propriedades-fisicas-quimicas.htm>>. Acesso em: 09 maio 2016.

QI, Donghui *et al.* Effect of EGR and injection timing on combustion and emission characteristics of split injection strategy DI-diesel engine fueled with biodiesel. **Fuel**, [s.l.], v. 90, n. 5, p.1884-1891, maio 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2011.01.016>.

RAHMAN, S.m. Ashrafur *et al.* Production of palm and Calophyllum inophyllum based biodiesel and investigation of blend performance and exhaust emission in an unmodified diesel engine at high idling conditions. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 76, p.362-367, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.061>.

RAMÍREZ-VERDUZCO, Luis Felipe; RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ, Javier Esteban; JARAMILLO-JACOB, Alicia del Rayo. Predicting cetane number, kinematic viscosity, density and higher heating value of biodiesel from its fatty acid methyl ester composition. **Fuel**, [s.l.], v. 91, n. 1, p.102-111, jan. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2011.06.070>.

RAO, K Srinivasa; MUTYALU, K Bhaskara; A RAMAKRISHNA,. EFFECT OF EXHAUST GAS RECIRCULATION ON PERFORMANCE AND EMISSION CHARACTERISTICS OF DIESEL ENGINE FUELED WITH WASTE COOKING OIL METHYL ESTER. **Arpn Journal Of Engineering And Applied Sciences**, [s.l.], v. 11, n. 10, p.4799-4804, jun. 2015.

ROCHA, Danilo Sousa. **Análise numérica do desempenho de um motor diesel turbo alimentado operando com mistura óleo diesel – biodiesel de mamona**. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

SAHOO, P.k.; DAS, L.m.. 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, jun. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2008.11.012>.

SANLI, H. et al. Effects of waste frying oil based methyl and ethyl ester biodiesel fuels on the performance, combustion and emission characteristics of a DI diesel engine. **Fuel**, [s.l.], v. 159, p.179-187, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2015.06.081>.

SELVAM, D.john Panneer; VADIVEL, K. Performance and Emission Analysis of DI Diesel Engine Fuelled with Methyl Esters of Beef Tallow and Diesel Blends. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 38, p.342-358, 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.043>.

SINCOBESP. **Cotação do sebo bovino recua em junho**. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/sincobesp/noticias/cotacao-do-sebo-bovino-recua-em-junho>>. Acesso em: 15 jun. 2016.

Sindicato Nacional dos Coletores e Beneficiadores de Sub Produtos de Origem Animal - SINCOBESP

SONG, J-t; ZHANG, C-h. An experimental study on the performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with soybean oil methyl ester. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, [s.l.], v. 222, n. 12, p.2487-2496, 1 dez. 2008. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1243/09544070jauto932>.

TEIXEIRA, Geuza Araújo de Albuquerque. **Avaliação do Tempo de Vida Útil de Biodiesel Metílico Obtido a partir da Mistura de Sebo Bovino e Óleos de Soja e Bagaço**. 150 f. Tese (Doutorado em Química) - Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010.

TOFANINI, Aldo José. **Controle de qualidade de óleos comestíveis**. 2004. 40 f. TCC (Graduação em Química) - Departamento de Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/105061/Aldo_Jose_Tofanin_i.pdf?sequence=1>. Acesso em: 20 mar. 2016.

TULCAN, Oscar Edwin Piamba. **Estudo do desempenho do grupo motor-gerador alimentado com diferentes misturas diesel-biocombustíveis e avaliação de emissões**. 232 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2009.

ULUSOY, Y.; ARSLAN, R.; KAPLAN, C.. Emission Characteristics of Sunflower Oil Methyl Ester. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, [s.l.], v. 31, n. 11, p.906-910, 12 jun. 2009. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/15567030802087528>.

WESTBROOK, Charles K.; DRYER, Frederick L.. Chemical kinetic modeling of hydrocarbon combustion. **Progress In Energy And Combustion Science**, [s.l.], v. 10, n. 1, p.1-57, jan. 1984. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0360-1285\(84\)90118-7](http://dx.doi.org/10.1016/0360-1285(84)90118-7).

WILDNER, Fabiano Disconzi. **Análise experimental da velocidade de combustão em motores de combustão**. 164 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

XUE, Jinlin. Combustion characteristics, engine performances and emissions of waste edible oil biodiesel in diesel engine. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 23, p.350-365, jul. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.039>.

XUE, Jinlin; GRIFT, Tony E.; HANSEN, Alan C.. Effect of biodiesel on engine performances and emissions. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 15, n. 2, p.1098-1116, fev. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.016>.

YOON, Seung Hyun; SUH, Hyun Kyu; LEE, Chang Sik. Effect of Spray and EGR Rate on the Combustion and Emission Characteristics of Biodiesel Fuel in a Compression Ignition Engine. **Energy & Fuels**, [s.l.], v. 23, n. 3, p.1486-1493, 19 mar. 2009. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/ef800949a>.

ZELDOVICH, Ya. B., SADOVNIKOV, P. Ya., FRANK-KAMENETSKII, D. A. **Oxidation of Nitrogen in Combustion**. Moscow-Leningrad: Academy of Sciences of USSR, Institute of Chemical Physics, 1947.

ZELENKA, Paul *et al.* Cooled EGR - A Key Technology for Future Efficient HD Diesels. **Sae Technical Paper Series**, [s.l.], p.45-57, 23 fev. 1998. SAE International. <http://dx.doi.org/10.4271/980190>.

ZHANG, Yu; BOEHMAN, André L.. Impact of Biodiesel on NO_x Emissions in a Common Rail Direct Injection Diesel Engine. **Energy & Fuels**, [s.l.], v. 21, n. 4, p.2003-2012, jul. 2007. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/ef070007>

ZHENG, Ming; READER, Graham T.; HAWLEY, J.gary. Diesel engine exhaust gas recirculation—a review on advanced and novel concepts. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 45, n. 6, p.883-900, abr. 2004. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0196-8904\(03\)00194-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0196-8904(03)00194-8).

ZUNIGA, A. D. G. *et al.* REVISÃO: PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO BIODIESEL. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, [s.l.], v.

21, p.55-72, 15 fev. 2012. Universidade Federal do Paraná.
<http://dx.doi.org/10.5380/pes.v21i0.25939>. Disponível em:
<<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs/index.php/pesticidas/article/viewFile/25939/17311>>.
Acesso em: 09 maio 2016.