

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOENERGIA

BRUNA MARTINS BOMFATI

DESEMPENHO DE MOTOR DIESEL COM ÓLEO VEGETAL DE CRAMBE (*Crambe
abyssinica* Hochst) PRÉ-AQUECIDO

PONTA GROSSA

2018

BRUNA MARTINS BOMFATI

DESEMPENHO DE MOTOR DIESEL COM ÓLEO VEGETAL DE CRAMBE (*Crambe abyssinica* Hochst) PRÉ-AQUECIDO

Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre em Bioenergia na Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Área de concentração: Biocombustíveis.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique Weirich Neto

Coorientador: Dr. Hevandro Colonhese Delalibera

PONTA GROSSA

2018

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

Bomfati, Bruna Martins
B695 Desempenho de motor diesel com óleo vegetal de Crambe (Crambe abyssinica Hochst) pré-aquecido/ Bruna Martins Bomfati. Ponta Grossa, 2018.
74f.

 Dissertação (Mestrado em Bioenergia - Área de Concentração: Biocombustíveis), Universidade Estadual de Ponta Grossa.
 Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique Weirich Neto.
 Coorientador: Prof. Dr. Hevandro Colanhese Delalibera.

 1.Combustível. 2.Consumo. 3.Potência. 4.Eficiência térmica. 5.Contaminação do lubrificante. I.Weirich Neto, Pedro Henrique. II. Delalibera, Hevandro Colanhese. III. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Mestrado em Bioenergia. IV. T.

CDD: 662.6

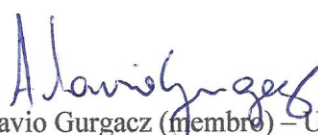
TERMO DE APROVAÇÃO

BRUNA MARTINS BOMFATI

“DESEMPENHO DE MOTOR DIESEL COM ÓLEO VEGETAL DE CRAMBE (*Crambe abyssinica* Hochst) PRÉ-AQUECIDO”

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-graduação em Bioenergia, área de concentração em Biocombustíveis, da Universidade Estadual de Ponta Grossa pela banca examinadora abaixo assinada:


Pqc. Dr. Hevandro Colonhese Delalibera (Co-orientador/presidente) - IAPAR/Londrina - PR


Prof. Dr. Flavio Gurgacz (membro) – Unioeste/Cascavel - PR


Prof. Dr. Éder Carlos Ferreira de Souza (membro) – UEPG/Ponta Grossa – PR

Ponta Grossa, 27 de fevereiro de 2018

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, que guiou meu caminho até aqui, a quem atribuo todas as minhas conquistas.

Aos meus pais, Magali Martins Bomfati e Isac Bomfati, por todo apoio, dedicação e por nunca terem medido esforços para me auxiliar em minha vida acadêmica.

Ao meu namorado, Matheus Müller, por toda ajuda, compressão e paciência nos momentos difíceis.

Aos meus orientadores, Pedro Henrique Weirich Neto e Hevandro Colonhese Delalibera, doutor em agronomia e pesquisador da área de Engenharia Agrícola do Instituto Agrônômico do Paraná (Iapar), que contribuíram com seus conhecimentos e nunca negaram ajuda e orientação. Também à toda equipe do Iapar envolvida na execução do trabalho e ao doutorando Leandro Riyuiti Higashibara, por toda ajuda e colaboração.

Aos meus colegas de mestrado, pelos bons momentos. Em especial, à Anelize Felício Ramos, que mais do que colega se mostrou uma grande amiga e ouvinte, por toda ajuda e incentivo.

Ao Iapar, sede de Londrina, pela disponibilização de instalações, estrutura e equipamentos e pelo apoio econômico ao estudo e à Fundação Araucária pelo apoio financeiro ao desenvolvimento do projeto.

Ao Prof. Dr. Dionísio Borsato, que cedeu seu laboratório para realização de algumas análises.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram com a execução deste trabalho.

RESUMO

Os problemas ambientais decorrentes do uso de combustíveis fósseis têm incentivado o desenvolvimento de fontes renováveis de energia. Neste cenário, em relação à busca por possíveis substitutos ao petrodiesel, os óleos vegetais e seus derivados vêm se revelando a melhor alternativa. Porém, para os óleos vegetais serem utilizados de forma pura como combustível, adaptações devem ser feitas para reduzir sua viscosidade e minimizar a ocorrência de possíveis problemas de desempenho e de danos ao motor. Neste trabalho, foi realizado ensaio de longa duração em motor ciclo Diesel, monocilíndrico e com injeção indireta, utilizando óleo de crambe pré-aquecido a 100 °C como combustível, com o objetivo de avaliar o desempenho do motor alimentado com este óleo vegetal, em comparação ao petrodiesel, assim como observar possíveis contaminações no óleo lubrificante decorrentes da utilização do óleo de crambe. O ensaio teve duração total de 100 horas. Em intervalos de tempo predeterminados, mensurou-se o consumo e a perda de potência relativa para os combustíveis crambe e petrodiesel, e realizou-se retirada de amostra de lubrificante para análise laboratorial, sendo as primeiras avaliações no tempo zero e as subsequentes a cada 15 horas de operação do motor. Também foi calculada a eficiência térmica do conjunto motor-gerador nos dois tratamentos. O consumo de óleo de crambe foi, em média, superior ao de petrodiesel nos quatro regimes de operação do motor, sendo mais evidente a diferença entre os combustíveis nos regimes com carga. A perda de potência relativa do combustível crambe foi superior à do petrodiesel nas avaliações em que se aplicou a carga de 51% da potência nominal do motor sobre a condição de 1.800 rpm de velocidade livre de carga e para a aplicação de carga adicional de 15% sobre a condição de 51% de demanda da potência nominal do motor; porém, para a aplicação de 66% de demanda da potência nominal do motor sobre a condição de 1.800 rpm livre de carga, o combustível crambe apresentou menor perda de potência relativa. Não houve diferença na eficiência térmica do conjunto motor-gerador com os dois combustíveis, comprovando que o maior consumo de óleo de crambe compensa seu menor poder calorífico em relação ao petrodiesel. Nas análises realizadas nas amostras de lubrificante não foram observados indícios de contaminação pelo combustível e nem alterações de suas propriedades, indicando combustão adequada do óleo de crambe, entretanto, observou-se aumento acentuado da concentração de ferro. Em geral, apesar do desempenho inferior, obteve-se bons resultados com o óleo de crambe pré-aquecido como combustível, porém mais estudos são necessários para avaliar a viabilidade técnica e econômica de seu uso.

Palavras-chave: Combustível. Consumo. Potência. Eficiência térmica. Contaminação do lubrificante.

ABSTRACT

The environmental problems arising from the use of fossil fuels have encouraged the development of renewable energy sources. In this scenario, in relation to the search for possible substitutes for petrodiesel, fuels made from vegetable oils are considered an interesting alternative. However, to use pure vegetable oils as fuel, adaptations must be made to reduce the oil viscosity and minimize the occurrence of performance issues and engine damage. In this study, a long-term test was performed in a single-cylinder, indirect injection diesel engine fueled with crambe oil preheated at 100 °C, with the aim of evaluating the performance of the engine with the use of this vegetable oil as fuel, in comparison to petrodiesel, and also possible contaminations in the lubricant due to the use of crambe oil. The essay had a duration of 100 hours. At specific time intervals, consumption and relative power loss for crambe oil and petrodiesel were measured, and lubricant samples were taken for laboratory analysis. The initial evaluations were at time zero and the subsequent at each 15 hours of engine operation. Also, the thermal efficiency was calculated for both fuels. The consumption of crambe oil was, on average, higher than that of petrodiesel for the four engine operating regimes, and the difference between the fuels consumptions was more evident at load conditions. The relative power loss of crambe fuel was higher than that of petrodiesel in the evaluations in which the load of 51% of rated engine power was applied over the condition of 1,800 rpm load-free and for the application of additional load of 15% over the demand of 51% of rated engine power; however, for the application of load of 66% of rated engine power over the condition of 1,800 rpm load-free, crambe oil presented less relative power loss. There was no difference between the fuels in the thermal efficiency of the engine-generator set, proving that the higher consumption of crambe oil compensates its lower heating value in relation to petrodiesel. In the lubricant analyses, there was no evidence of contamination by the fuel and no changes in its properties, indicating adequate combustion of the crambe oil, but it was observed a marked increase in iron concentration. In general, despite the inferior performance, good results were obtained with preheated crambe oil as fuel. However, more studies are necessary to evaluate the technical and economic feasibility of its use.

Keywords: Fuel. Consumption. Power. Thermal efficiency. Lubricant contamination.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Reação de Transesterificação.....	21
Figura 2 - Variação da viscosidade conforme variação da temperatura para vários óleos vegetais.	28
Figura 3 - Viscosímetros capilares do tipo Cannon-Fenske inseridos em banho térmico para análise da viscosidade	33
Figura 4 - Sistema de alimentação de combustível	34
Figura 5 - Válvula de três vias.....	35
Figura 6 - Sistema de aquecimento do óleo de crambe por resistência elétrica	36
Figura 7 - Conjunto motor-gerador	37
Figura 8 - Banco de cargas resistivo composto por lâmpadas halógenas.....	37
Figura 9 - Diagrama representativo da bancada de ensaio	37
Figura 10 - Consumo médio de óleo de crambe e petrodiesel em diferentes regimes de carga a cada 15 horas de ensaio [g h ⁻¹]	48
Figura 11 - Rotação média do motor nos regimes sem carga a cada 15 horas de ensaio [rpm].....	49
Figura 12 - Consumo específico do conjunto motor-gerador com óleo de crambe e petrodiesel nos regimes sob carga a cada 15 horas de ensaio [g kW ⁻¹ h ⁻¹].....	50
Figura 13 - Perda de potência relativa, em número de rotações perdidas em 5 segundos, observada nos tratamentos óleo de crambe e petrodiesel a cada 15 horas de ensaio e em diferentes aplicações de carga	52
Figura 14 - Box-plot de médias, máximo, mínimo e desvios para a perda de potência relativa nas diferentes condições de aplicação de carga	54
Quadro 1 - Laudos das amostras de lubrificante, fornecidos pela Laboroil Ltda.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações do diesel do uso rodoviário e do biodiesel, segundo resoluções da ANP.....	15
Tabela 2 - Tipos de ácidos graxos e sua concentração em diferentes óleos vegetais (em porcentagem).....	17
Tabela 3 - Características de óleos vegetais de diferentes culturas.....	18
Tabela 4 - Perfil de ácidos graxos do óleo de crambe (em porcentagem).....	31
Tabela 5 - Propriedades combustíveis do óleo de crambe.....	31
Tabela 6 - Especificações do motor segundo manual do fabricante.....	33
Tabela 7 - Tratamentos e regimes de carga utilizados nas avaliações de consumo	39
Tabela 8 - Análises realizadas nas amostras de lubrificante, segundo Laboroil Ltda	44
Tabela 9 - Viscosidade cinemática do óleo de crambe obtida experimentalmente, em $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$	45
Tabela 10 - Poder calorífico superior obtido experimentalmente do petrodiesel e do óleo de crambe, em MJ kg^{-1}	46
Tabela 11 - Média dos consumos de combustível ao longo do tempo nos diferentes regimes de operação [g h^{-1}].....	47
Tabela 12 - Perda de potência relativa média, dada em número de rotações perdidas nos 5 s imediatos a entrada da carga, para as condições de carga analisadas	53
Tabela 13 - Potência teórica média fornecida pelos combustíveis nos regimes sob carga, em kW	55
Tabela 14 - Estimativa de eficiência térmica do conjunto motor-gerador nos regimes sob carga para os dois combustíveis	56
Tabela 15 - Resultados das análises das condições das amostras de óleo lubrificante, fornecidos pela Laboroil Ltda	58
Tabela 16 - Resultados das análises de elementos contaminantes presentes nas amostras de óleo lubrificante, fornecidos pela Laboroil Ltda	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
2.1	OBJETIVO GERAL	11
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1	PROPRIEDADES COMBUSTÍVEIS DOS ÓLEOS VEGETAIS	12
3.2	USO DE ÓLEOS VEGETAIS COMO COMBUSTÍVEL EM MOTORES CICLO DIESEL	19
3.2.1	Transesterificação	21
3.2.2	Pirólise	24
3.2.3	Microemulsificação	25
3.2.4	Mistura com petrodiesel	26
3.2.5	Pré-aquecimento de óleos vegetais	27
3.3	O ÓLEO DE CRAMBE	30
4	MATERIAL E MÉTODOS	32
4.1	BANCADA DE ENSAIO	33
4.2	VARIÁVEIS DEPENDENTES	39
4.2.1	Determinação do consumo de combustível	39
4.2.2	Determinação da perda de potência relativa	41
4.2.3	Determinação da potência teórica e eficiência térmica	42
4.2.4	Análise do lubrificante	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1	VISCOSIDADE, PODER CALORÍFICO SUPERIOR E TEMPERATURA DE ADMISSÃO DOS COMBUSTÍVEIS	45
5.2	CONSUMO DE COMBUSTÍVEL	46
5.3	PERDA DE POTÊNCIA RELATIVA	51
5.4	POTÊNCIA TEÓRICA E EFICIÊNCIA TÉRMICA	55
5.5	ANÁLISE DO LUBRIFICANTE	57
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
7	CONCLUSÕES	66
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a poluição gerada pelo uso de combustíveis fósseis, principalmente em decorrência das alterações climáticas, e as crises do petróleo, marcadas por variações nos preços, têm levado ao desenvolvimento cada vez maior de fontes alternativas e sustentáveis de energia, isto é, renováveis e limpas, como a energia eólica, hidráulica, solar e proveniente da biomassa.

No âmbito dos combustíveis utilizados em motores de combustão interna, têm-se a tentativa de substituição dos derivados do petróleo largamente utilizados, a gasolina e o petrodiesel, pelos combustíveis renováveis como o etanol, produzido a partir da fermentação de diversas matérias-primas vegetais, sendo a mais comum a cana-de-açúcar, e o biodiesel, derivado principalmente dos óleos vegetais. Estes exemplos de combustíveis alternativos se tornam favoráveis uma vez que seu uso não requer muitas alterações nos motores convencionais (ENGLER, 1983).

A questão dos biocombustíveis adquiriu tamanha importância que no Brasil foram criados programas para incentivar a produção e o uso dos biocombustíveis: o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), o Plano de Produção de Óleos Vegetais para Fins Energéticos (Proóleo), criados em 1975, e o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), existente desde dezembro de 2004. Atualmente, a gasolina comercializada no país possui adição de 27% de etanol, enquanto ao petrodiesel são adicionados 8% de biodiesel, e até março de 2019 esta adição será de 10%. Estas medidas reduziram o uso e a necessidade de importação dos combustíveis de origem fóssil, gerando vantagens econômicas e ambientais, pois os biocombustíveis são menos poluentes e o balanço da emissão de CO₂ pode ser considerado nulo.

Os óleos vegetais e seus derivados são potenciais substitutos do diesel de petróleo por possuírem características semelhantes a este e necessárias para o funcionamento em motores do ciclo Diesel, como número de cetano e poder calorífico (BALAKRISHNA, 2012). Existem registros do uso de óleos vegetais em motores Diesel desde o final do século XIX, porém o elevado custo de produção, a formação de depósitos e a menor vida útil do motor são empecilhos para sua utilização de forma pura como combustível (TOLMASQUIM, 2003).

Apesar do biodiesel ser a forma mais comum e consolidada do aproveitamento de óleos vegetais como combustível, sua produção implica em maiores custos e gasto energético, além de maior contaminação em relação aos óleos vegetais puros (ESTEBAN et al., 2011), fatos que motivam a utilização de óleos vegetais não transformados em motores Diesel.

O uso dos óleos vegetais puros como combustível se torna interessante e possivelmente vantajoso financeiramente para pequenos produtores rurais, que moram afastados dos centros de distribuição de petrodiesel e podem produzir o próprio combustível para uso em tratores e maquinários (WANDER et al., 2011) e aproveitar os resíduos gerados na extração do óleo para alimentação animal ou como adubo orgânico (INOUE et al., 2008). Em áreas rurais, além da dificuldade de aquisição de petrodiesel, muitas vezes há problemas com a distribuição de energia elétrica. Desta forma, os óleos vegetais podem ser utilizados em motores diesel estacionários acoplados a geradores. Nestes, a utilização dos óleos vegetais tende a causar menos problemas em comparação com o uso em motores automotivos, pois os motores estacionários operam em menores rotações e em regimes de operação mais constantes, com menores variações de carga (SOARES; VIEIRA; NASCIMENTO, 2003).

Os problemas decorrentes da utilização de óleos vegetais não transformados como combustível sem modificações ou adaptações no motor, estão principalmente relacionados à elevada viscosidade dos óleos vegetais, que impede a injeção correta do combustível na câmara de combustão, pois o óleo vegetal não é atomizado de forma adequada, formando gotículas grossas que impossibilitam a combustão completa, causando aumento das emissões e depósitos de hidrocarbonetos nos bicos injetores, na câmara de combustão e nos sistemas de exaustão e admissão (BALAKRISHNA, 2012).

Neste contexto, estudos devem ser realizados a fim de encontrar formas de reduzir a viscosidade dos óleos vegetais e mitigar os problemas decorrentes, avaliando os efeitos sobre o desempenho do motor, emissões, desgaste e carbonização dos componentes internos, contaminação do óleo lubrificante, entre outros. As formas mais usadas para viabilização, devido à facilidade e ao baixo custo, são a mistura com petrodiesel e o pré-aquecimento antes da injeção.

Este trabalho dá continuidade ao estudo realizado por Delalibera (2014) em que o óleo de crambe pré-aquecido apresentou o melhor desempenho entre os óleos vegetais avaliados, em ensaios de curta duração em motor Diesel. Portanto, devido a este, realizou-se ensaio, com total de 100 horas, em motor Diesel estacionário acoplado a gerador, visando avaliar o efeito da aplicação do óleo de crambe pré-aquecido a 100 °C como combustível para ensaio de longa duração.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o desempenho de motor do ciclo Diesel utilizando óleo de crambe puro pré-aquecido como combustível.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Mensurar consumo de combustível, perda de potência relativa e eficiência térmica, ao longo do tempo, de motor Diesel alimentado com óleo de crambe pré-aquecido a 100 °C em comparação com petrodiesel e avaliar a contaminação do lubrificante com o uso do óleo de crambe, em ensaio de longa duração.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROPRIEDADES COMBUSTÍVEIS DOS ÓLEOS VEGETAIS

A primeira utilização de óleos vegetais em motores Diesel que se têm conhecimento ocorreu em 1900, na exposição de Paris, com a demonstração de um pequeno motor Diesel sem modificações, primeiramente concebido para consumir óleo mineral, operando com óleo de amendoim como combustível. Este foi proposto pelo governo francês, que queria utilizar o óleo de amendoim, abundantemente produzido nas colônias francesas localizadas na África, para produção de energia para estas colônias e suas indústrias, sem a necessidade de importação de carvão ou combustíveis líquidos. Os óleos vegetais também foram utilizados durante a Segunda Guerra Mundial como combustível de emergência (KNOTHE, 2006a).

Na década de 1970, a instabilidade política nos países produtores do petróleo e o consequente aumento nos preços motivaram a busca por fontes alternativas e renováveis de energia. Com a estabilização do mercado e redução dos preços, projetos sobre o uso de energias alternativas em diversos países foram desativados (TOLMASQUIM, 2003). Ao longo dos anos, novas discussões sobre o uso do petróleo fizeram ressurgir a percepção da importância de fontes alternativas de energia. Atualmente, têm-se o agravante de problemas ambientais gerados pela emissão de gases oriundos da queima de combustíveis fósseis. Os óleos vegetais e seus derivados, representados principalmente pelo biodiesel, são possíveis biocombustíveis com potencial de substituição, total ou parcial, do petrodiesel em motores de combustão interna de ciclo Diesel.

Dentre as vantagens da utilização de óleos vegetais como combustível, pode-se citar a sua produção por diversos tipos de oleaginosas, comercialmente cultivadas ou não, em diferentes regiões, o potencial energético, muitas vezes desconhecido, e a combustão ambientalmente menos impactante em comparação ao petrodiesel. Neste caso, o balanço na emissão de dióxido de carbono (CO_2) pode ser considerado nulo e a geração de dióxidos de enxofre (SO_2) é negligenciável, pois os óleos vegetais podem possuir baixa quantidade de enxofre em sua composição (FELICI et al., 2009; FRANCO; NGUYEN, 2011).

O motor de ciclo Diesel, ou motor de ignição por compressão, foi idealizado por Rudolf Diesel em 1892 e opera da seguinte forma: ar atmosférico, filtrado, é aspirado para dentro do cilindro e comprimido pelo movimento ascendente do êmbolo, de forma a elevar a temperatura do ar acima do ponto de ignição do combustível; ao fim da compressão o combustível é finamente vaporizado pelo bico injetor dentro da câmara de combustão e sofre

autoignição; a combustão e os gases resultantes deslocam o pistão para baixo, no movimento denominado expansão, e quando o êmbolo retoma o movimento ascendente, os gases são expulsos do cilindro, o êmbolo torna a descer e novo ar é aspirado, recomeçando o ciclo (OBERT, 1971). O movimento vertical e linear do pistão é convertido em movimento rotacional através de um sistema biela/manivela.

Um dos principais requisitos para que um combustível possa ser utilizado em motores do ciclo Diesel é possuir um número de cetano (NC) adequado. O NC indica a facilidade de ignição do combustível e quanto maior seu valor, menor é o atraso de ignição, tempo decorrente entre a injeção de combustível e sua ignição. O valor de referência da escala de cetanagem é o cetano, ou hexadecano, ao qual foi atribuído um NC no valor de 100. Para as demais n-parafinas, que são os hidrocarbonetos, que normalmente possuem a maior cetanagem, o valor de NC varia com o tamanho das cadeias de carbono (OBERT, 1971). As parafinas, primeira designação dada aos alcanos, são hidrocarbonetos saturados, ou seja, compostos formados apenas por átomos de carbono e hidrogênio e que possuem apenas ligações simples entre seus átomos (SOLOMONS; FRYHLE, 2001). O valor de NC decresce com a diminuição do comprimento da cadeia e com o aumento do grau de ramificações (KNOTHE, 2006b). O petrodiesel é composto por hidrocarbonetos com cadeias de 8 a 16 átomos de carbono (BRASIL, 2017). Esta estrutura é formada principalmente por n-parafinas, podendo conter também alcenos e alcadienos, caracterizados pela presença de duplas ligações em cadeia aberta, naftênicos (cicloparafinas de estrutura cíclica e saturada) e aromáticos, que possuem estrutura cíclica insaturada (OBERT, 1971).

Os óleos vegetais podem ser utilizados em motores ciclo Diesel porque os triacilgliceróis (triglicerídeos), encontrados em óleos vegetais, gordura animal e seus derivados, são compostos por ácidos graxos de cadeia longa, linear e não ramificada, quimicamente semelhantes aos n-alcanos do petrodiesel (KNOTHE, 2006b). Os ácidos graxos são ácidos carboxílicos que possuem, como radical, hidrocarbonetos de cadeia longa (SOLOMONS; FRYHLE, 2001), com o comprimento variando de 4 a 36 átomos de carbono e podem ser saturados ou conter uma ou mais duplas ligações; os mais comuns apresentam de 12 a 24 átomos de carbono e cadeia não ramificada (NELSON; COX, 2014). É esta estrutura que confere aos óleos vegetais um NC adequado, porém menor que do petrodiesel. Segundo Balakrishna (2012), isto se deve à menor volatilidade dos óleos vegetais em relação ao petrodiesel, o que dificulta sua vaporização e ignição.

A faixa recomendada de valores de NC para os projetos dos motores é entre 40 e 50. Valores muito elevados de NC fazem a combustão ocorrer antes da mistura ar-combustível estar

adequada, resultando em combustão incompleta e emissão de gases excessiva, enquanto valores baixos podem causar combustão incompleta, e consequente vibração, aumento excessivo da temperatura do ar e aquecimento lento do motor, entre outros (KNOTHE, 2006b).

Outra importante característica que permite que os óleos vegetais sejam utilizados como combustível é seu poder calorífico, ou calor de combustão, definido como a quantidade de energia liberada pelo combustível durante sua combustão (OBERT, 1971). É expresso no Sistema Internacional de Unidades (SI) por J kg^{-1} , ou seja, energia liberada por 1 quilograma de combustível. Os triacilgliceróis armazenados nas sementes das plantas, na forma de óleo, são responsáveis por fornecer energia para a germinação e sua oxidação libera o dobro de energia em comparação aos carboidratos (NELSON; COX, 2014). O poder calorífico dos óleos vegetais, devido ao oxigênio presente nas moléculas deste, é pouco menor que do petrodiesel (BALAKRISHNA, 2012). Em motores com injeção mecânica, em que o combustível é regulado volumetricamente, o menor poder calorífico dos óleos vegetais pode ser compensado pela sua maior massa específica em relação ao petrodiesel, desde que se encontrem à mesma temperatura, sendo assim maior massa de combustível é injetada. Pode ocorrer também aumento da demanda de combustível para que o motor forneça potência equivalente (DELALIBERA, 2015), acontecendo, em balanço final, maior consumo mássico de combustível quando da utilização de óleos vegetais.

Para um combustível ser considerado adequado ao uso em motores ciclo Diesel, alguns requisitos são necessários. Estas características de qualidade para o combustível diesel utilizado em veículos automotivos, máquinas agrícolas, de construção e industriais, são regidas no Brasil por resoluções da ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) (BRASIL, 2017). Algumas dessas características encontram-se listadas na Tabela 1. A resolução ANP 50/2013 (BRASIL, 2013), estabelece especificações para o petrodiesel de uso rodoviário, dos tipos A e B, o primeiro puro e o último com adição de biodiesel, e S10 e S500, determinados pelos teores máximos de enxofre em sua composição. Para fins de comparação, na tabela também estão expostas as especificações do biodiesel, segundo ANP 45/2014, principal combustível derivado dos óleos vegetais (BRASIL, 2014).

A presença de enxofre no combustível pode acarretar desgaste do motor por corrosão ácida e abrasão, depósitos de carvão e deterioração do lubrificante (OBERT, 1971), além da emissão de poluentes, principalmente pela formação de ácido sulfúrico, causador de chuva ácida, e material particulado. Os óleos vegetais e o biodiesel possuem baixa quantidade, ou até mesmo ausência, de enxofre em sua composição (BALAKRISHNA, 2012; FELICI et al., 2009; REIS et al., 2013).

Tabela 1 - Especificações do diesel do uso rodoviário e do biodiesel, segundo resoluções da ANP

Característica	Unidade	Limites		
		Diesel tipo A e B		Biodiesel
		S10	S500	
Enxofre total, máx.	mg kg ⁻¹	10,0	500	10,0
Massa específica a 20 °C	kg m ⁻³	815 a 850	815 a 865	850 a 900
Ponto de fulgor, mín.	°C	38	38	100
Viscosidade Cinemática a 40 °C	mm ² s ⁻¹	2,0 a 4,5	2,0 a 5,0	3,0 a 6,0
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx. ¹	°C	0 a 12	0 a 12	5 a 14
Número de Cetano, mín.	-	48	42	NE
Cinzas, máx.	% massa	0,01	0,01	0,02
Teor de Água, máx.	mg kg ⁻¹	200	500	200
Água e Sedimentos	% volume	-	0,05	NC

1 – valor varia de acordo com a região do país e a época do ano, pois depende das condições climáticas (valores menores em locais e períodos mais frios); NE – valor não estabelecido pela resolução; NC – não consta na resolução.

Fonte: (BRASIL, 2013, 2014)

Já as cinzas são os resíduos da combustão e, assim como o enxofre, também podem causar abrasão aos componentes do motor (OBERT, 1971). A presença de água e sedimentos no combustível tendem a danificar o motor, ocasionando problemas nos filtros e queimadores e corrosão no tanque de combustível (ANP 80/1999) (BRASIL, 1999). Segundo Ryan III; Dodge e Callahan (1984) a quantidade de água presente nos óleos vegetais é maior que no petrodiesel e alguns óleos vegetais possuem maiores quantidades de cinzas, principalmente os com menor quantidade de processamento.

Em relação às temperaturas, o ponto de fulgor é a menor temperatura do combustível em que ocorre a formação de vapores inflamáveis (OBERT, 1971). Os óleos vegetais possuem ponto de fulgor superior ao petrodiesel, e, portanto, seu armazenamento e manuseio são mais seguros (BALAKRISHNA, 2012; FRANCO; NGUYEN, 2011). Alguns trabalhos indicam óleos vegetais com pontos de fulgor superiores a 200 °C (DELALIBERA, 2009; HELLIER; LADOMMATOS; YUSAF, 2015; WANDER et al., 2011).

As propriedades de fluxo do combustível, representadas por temperaturas como de ponto de entupimento de filtro a frio, de ponto de névoa e de fluidez, indicam as propriedades do combustível em baixas temperaturas ambientes, que podem levar à cristalização do mesmo, entupindo o filtro e impedindo o funcionamento do motor. O ponto de névoa é a temperatura na qual se inicia a visualização de névoa no combustível devido à formação de cristais e o ponto de fluidez é a temperatura mínima na qual o combustível pode fluir (DUNN, 2006; GERPEN, 2006). O ponto de entupimento de filtro a frio é a temperatura em que a cristalização do

combustível causa entupimento do filtro (NO, 2017). As temperaturas dos pontos de névoa e fluidez são maiores para os óleos vegetais e biodiesel em comparação com o petrodiesel, como apontam vários autores (DELALIBERA, 2009; RYAN III; DODGE; CALLAHAN, 1984; SONAR et al., 2015), o que torna o uso menos interessante em regiões de clima frio (RAMKUMAR; KIRUBAKARAN, 2016).

A resistência de um fluido ao escoamento tem influência direta na injeção de combustível na câmara de combustão, este deve ser finamente vaporizado e com alta dispersão de partículas para que a combustão ocorra satisfatoriamente. Neste caso, o maior referencial é a viscosidade. Em casos de viscosidade elevada, ocorre baixa atomização do combustível, com formação de gotículas grossas e alta penetração do jato, enquanto viscosidades muito baixas podem acarretar em perda de combustível por vazamentos (OBERT, 1971). A viscosidade cinemática dos óleos vegetais é bem superior à do petrodiesel, cerca de 11 a 17 vezes maior (DELALIBERA, 2015), e é a característica de maior influência e talvez o principal motivo para a não recomendação do uso de óleos vegetais puros como combustível. A injeção inadequada do combustível ocasiona combustão incompleta e, conseqüentemente, problemas operacionais, como depósitos nas partes internas do motor, carbonização dos bicos injetores, contaminação do óleo lubrificante, emissão excessiva de gases e problemas de durabilidade (KNOTHE, 2006a; RYAN III; DODGE; CALLAHAN, 1984).

As características físico-químicas dos óleos vegetais, principalmente em relação ao grau de saturação, ou número de iodo, e ao tamanho da cadeia dos ácidos graxos que os compõem, têm influência sobre as propriedades combustíveis dos mesmos. O aumento do comprimento da cadeia aumenta o poder calorífico dos óleos vegetais (KNOTHE, 2006b) e o aumento no número de duplas ligações (insaturações) aumenta o atraso de ignição, ou seja, os óleos vegetais com ácidos graxos menos insaturados apresentam melhor qualidade de ignição (maior NC) (EMBERGER et al., 2015, 2016; HELLIER; LADOMMATOS; YUSAF, 2015). As duplas ligações afetam principalmente o atraso de ignição química, que corresponde às reações químicas entre combustível e ar até a autoignição (EMBERGER et al., 2015).

O grau de saturação influencia também na quantidade de depósitos nos bicos injetores, pois os óleos com ácidos graxos mais saturados apresentam menor tendência à oxidação térmica e à polimerização, que causam maior carbonização, bem como contaminação do lubrificante (EMBERGER et al., 2015; PAULSEN et al., 2011; RYAN III; DODGE; CALLAHAN, 1984). A oxidação tende a gerar partículas que se depositam no sistema de injeção, prejudicando o funcionamento dos injetores e a combustão, ocasionando aumento de emissões (MIRAGAYA, 2005).

Por outro lado, o aumento de ácidos graxos saturados normalmente provoca aumento da viscosidade dos óleos vegetais (FRANCO; NGUYEN, 2011). Óleos vegetais com maior número de ácidos graxos saturados, como óleo de coco e babaçu, normalmente se encontram no estado sólido à temperatura ambiente (DORSA, 2000). O grau de saturação também tem influência sobre as emissões, pois óleos vegetais insaturados tendem a uma maior emissão de NO_x (EMBERGER et al., 2016; NO, 2017) e de material particulado (HELLIER; LADOMMATOS; YUSAF, 2015). Na Tabela 2, estão expostos os principais ácidos graxos encontrados em óleos vegetais e o teor em que os mesmos estão presentes em alguns tipos de óleos.

Tabela 2 - Tipos de ácidos graxos e sua concentração em diferentes óleos vegetais (em porcentagem)

Ácido graxo	Forma abreviada ¹	Coco	Palma	Colza	Milho	Soja	Girassol
Capróico	C6:0	0,6	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Caprílico	C8:0	7,7	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Cáprico	C10:0	6,0	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Láurico	C12:0	45,4	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Mirístico	C14:0	17,6	0,9	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Palmítico	C16:0	9,0	42,6	4,8	10,9	8,4	6,0
Palmitoleico	C16:1	1,9	0,2	0,3	0,1	0,2	0,1
Esteárico	C18:0	2,6	4,6	1,7	1,9	3,5	3,4
Oleico	C18:1	7,0	39,6	62,2	30,8	37,3	31,6
Linoleico	C18:2	1,6	10,7	20,5	53,3	40,4	56,2
Linolênico	C18:3	<0,1	0,3	7,8	1,3	8,0	1,0
Araquídico	C20:0	0,1	0,4	0,6	0,6	0,5	0,3
Gadoléico	C20:1	<0,1	0,1	1,2	0,3	0,7	0,3
Behênico	C22:0	0,2	<0,1	0,3	0,2	0,5	0,7
Erúcico	C22:1	<0,1	<0,1	0,3	<0,1	0,2	<0,1
Lignocérico	C24:0	0,1	<0,1	0,1	0,2	0,2	0,2

1 – Número de átomos de carbono na cadeia : número de duplas ligações.

Fonte: EMBERGER et al. (2016)

Portanto, diferentes óleos vegetais tendem a fornecer diferentes desempenhos quando utilizados como combustível em motores ciclo Diesel. Em estudo com quatro óleos vegetais: linhaça, crambe, pinhão-manso e canola, como combustíveis em motor estacionário, foram descritas diferenças de desempenho do motor, em relação a consumo, perda de potência relativa e emissão de material particulado (DELALIBERA et al., 2017). Na Tabela 3 é possível

visualizar diferentes características, como combustíveis, dos óleos vegetais citados na Tabela 2.

Tabela 3 - Características de óleos vegetais de diferentes culturas

Característica	Coco	Palma	Colza	Milho	Soja	Girassol
Número médio de átomos de carbono	12,54	17,05	17,94	17,79	17,87	17,91
Número de Iodo	10	56	113	125	127	131
Viscosidade Cinemática a 40 °C [mm ² s ⁻¹]	27,7	41,1	35,5	32,4	32,9	32,7
Número de Cetano	-	42	37,6	37,6	37,9	37,1
Poder Calorífico Inferior [MJ kg ⁻¹]	34,97	36,82	37,06	37,13	37,12	37,11
Massa específica a 15 °C [kg m ⁻³]	926	921	920	922	922	923

Fonte: EMBERGER et al. (2016) ; MONDAL; BASU e BALASUBRAMANIAN (2008)

Além da diferença na composição dos óleos vegetais, estudos indicam que a forma e o local de cultivo, considerando características como latitude, temperatura, data da semeadura e regime de irrigação, podem influenciar no teor de ácidos graxos dos óleos vegetais (KIM et al., 2011; RAMANJANEYULU; REDDY; MADHAVI, 2013; SOUZA, 2016) levando óleos de uma mesma cultura, porém cultivados em condições distintas, a apresentarem diferenças em suas propriedades.

Outro fator de possível influência são os processamentos a que os óleos vegetais são submetidos. Processos como degomagem, refino, deceragem e desodorização não afetam muito as características relacionadas à composição dos óleos, como viscosidade e densidade, porém influenciam na oxidação térmica e, conseqüentemente, no desempenho do óleo como combustível. Os óleos crus, sem processamento, apresentaram maior tendência à carbonização e pior desempenho em motor de injeção direta, em comparação aos óleos submetidos a processamento (RYAN III; DODGE; CALLAHAN, 1984).

O processo de hidrogenação, ou hidrotratamento catalítico, altera o grau de saturação dos óleos vegetais através do uso de hidrogênio na presença de um catalisador, removendo átomos de oxigênio e duplas ligações da estrutura do triacilglicerol e obtendo ao final do processo óleo composto principalmente por hidrocarbonetos parafínicos líquidos (DORSA, 2000; PROKOPOWICZ et al., 2015), com NC muito elevado, viscosidade e poder calorífico pouco maiores que do petrodiesel e menor densidade, portanto possui menor poder calorífico

por volume; como combustível deve ser utilizado em mistura com o petrodiesel (KIM et al., 2014; LAPUERTA et al., 2011).

Os resultados de desempenho de motores alimentados com óleos vegetais também é dependente dos parâmetros e do tipo de injeção do motor utilizado. Alterar o ângulo de injeção (WANDER et al., 2011) ou a pressão de injeção (SONAR et al., 2015) tende a influenciar características como torque, potência, consumo específico, emissões e eficiência térmica.

Em relação ao tipo de injeção, os motores de injeção indireta, em que a injeção de combustível é realizada em pré-câmara, onde a combustão se inicia e depois propaga-se para a câmara de combustão, quando utilizados com óleos vegetais, apresentam menor tendência de carbonização dos injetores e de contaminação do lubrificante e maior durabilidade, comparados com os motores de injeção direta (RYAN III; DODGE; CALLAHAN, 1984). Isto se deve ao fato de os motores de injeção indireta utilizarem maior taxa de compressão e temperatura de combustão, sendo assim apresentam problemas menores quando operam com combustíveis de baixa qualidade ou com problemas de qualidade de injeção (DELALIBERA, 2015).

O uso de biocombustíveis derivados de óleos vegetais é favorável em relação à redução de alguns poluentes emitidos pelos motores ciclo Diesel. Vários estudos indicam que o uso de óleo vegetal reduz o índice de fumaça (opacidade) e material particulado, em comparação com o petrodiesel, devido à presença de oxigênio em suas moléculas, que melhora a combustão e a mistura ar-combustível, além de permitir operação do motor com excesso de ar, diluindo a fumaça (DELALIBERA et al., 2017; MCCORMICK; ALLEMAN, 2006; JAIN et al., 2017; WANDER et al., 2011). Por outro lado, os óleos vegetais podem emitir acroleína e aldeídos (FONTARAS et al., 2011), substâncias tóxicas e nocivas à saúde, comportamento também observado com o uso de biodiesel, pois a maior quantidade de insaturações nos óleos vegetais em comparação com o petrodiesel geram maiores quantidades de aldeídos insaturados (CAHILL; OKAMOTO, 2012). As emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) também tendem a ser maiores com o uso de combustíveis oxigenados, como os óleos vegetais e seus derivados (MCCORMICK; ALLEMAN, 2006; PAULSEN et al., 2011; TOLMASQUIM, 2003), e as altas temperaturas e pressões que a câmara de combustão pode atingir com o uso dos biocombustíveis também favorece a formação destes óxidos.

3.2 USO DE ÓLEOS VEGETAIS COMO COMBUSTÍVEL EM MOTORES CICLO DIESEL

O uso de óleos vegetais como combustível tende a ser prejudicial ao motor em decorrência principalmente de suas propriedades de fluxo, como a viscosidade muito elevada,

que causam problemas de bombeamento e atomização do combustível. Estas impedem a injeção apropriada, ocasionando combustão incompleta com consequente depósitos de hidrocarbonetos na câmara de combustão e emissão de fumaça preta; os óleos vegetais também tendem a causar problemas nos óleos lubrificantes (BALAKRISHNA, 2012). A diluição de óleo vegetal no lubrificante pode levar à polimerização do mesmo (SIDIBÉ et al., 2010) com consequente espessamento (PAULSEN et al., 2011) e formação de sólidos em suspensão (DELALIBERA, 2009), prejudicando a lubrificação.

Além da diluição de combustível, a contaminação do lubrificante pode ocorrer pela presença de água, resíduos da combustão e elementos contaminantes advindos do combustível, de sedimentos presentes no ar (poeira) ou do desgaste das partes móveis do motor (CÔRREA; MAZIERO; STORINO, 2011; DELALIBERA, 2009; HASANNUDDIN et al., 2016). Estas contaminações podem modificar as propriedades e reduzir a vida útil do lubrificante, causando alterações na viscosidade, aumento da oxidação e redução do TBN (do inglês, *total base number*, ou número de basicidade total), que corresponde ao conteúdo de reserva alcalina do lubrificante que neutraliza os ácidos formados durante a combustão (MATHAI et al., 2012). Segundo Almeida et al. (2002) e Inoue et al. (2009), a contaminação causada pelo uso de óleos vegetais como combustível reduz a vida útil do lubrificante, reduzindo o tempo entre as substituições.

Um exemplo de como o uso de óleos vegetais puros podem afetar negativamente o desempenho e a durabilidade do motor é o estudo realizado por Maziero et al. (2007) em que, ao utilizarem óleo de girassol em motor ciclo Diesel sem nenhum tipo de alteração, tiveram que interromper o ensaio com apenas 63 horas de funcionamento do motor. Este apresentou problemas como elevação da temperatura do lubrificante, decréscimo da potência máxima com o decorrer do ensaio, chegando a perda de 10%. Além do comentado, apresentou formação de substância preta e pegajosa no escapamento, depósitos e desgaste nas partes internas do motor e contaminação do lubrificante por substâncias que não sofreram combustão completa, acarretando em aumento de sua viscosidade e entupimento das galerias de lubrificação. A combustão incompleta pode ocasionar aumento da viscosidade do lubrificante e do desgaste do motor devido à formação de substâncias como a fuligem (GEORGE et al., 2007; HASANNUDDIN et al., 2016).

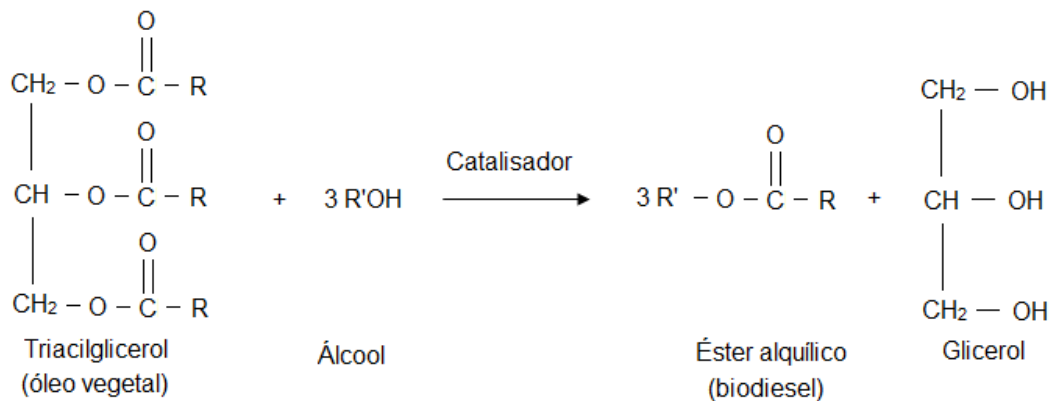
Algumas possibilidades vêm sendo testadas para resolver o problema da elevada viscosidade dos óleos vegetais. Através de modificações no combustível, como transesterificação, diluição ou mistura com petrodiesel e outros combustíveis, pirólise ou craqueamento, microemulsificação e hidrotratamento (BALAKRISHNA, 2012; NO, 2017;

TOLMASQUIM, 2003) ou modificações no motor, como a instalação de sistema de pré-aquecimento do combustível (KNOTHE, 2006a; NO, 2017).

3.2.1 Transesterificação

A transformação de óleos vegetais em biodiesel é a forma mais utilizada para a viabilização de seu uso. O biodiesel é produzido através da transesterificação, processo em que os triacilgliceróis do óleo vegetal ou gordura animal reagem com um álcool, na presença de catalisador, produzindo um éster alquílico (biodiesel) e glicerol (KNOTHE, 2006c). A Figura 1 ilustra esta reação.

Figura 1 - Reação de Transesterificação



Fonte: KNOTHE (2006c)

Os álcoois normalmente empregados são de baixa massa molecular, sendo os mais utilizados o metanol e o etanol, produzindo ésteres metílicos e etílicos, respectivamente. O primeiro é um álcool mineral, derivado do petróleo, e, apesar de tóxico, é o mais empregado pelo menor custo de sua utilização; já o etanol é de origem vegetal e, portanto, renovável, porém seu uso só é viável em países como o Brasil, que possui matéria-prima e tecnologias necessárias para sua produção, que tornam este álcool mais barato (HAAS; FOGLIA, 2006; TOLMASQUIM, 2003). O metanol permite a separação do biodiesel e da glicerina de forma instantânea, dispensa o uso de centrífugas, é recuperado totalmente ao fim do processo e pode ser reutilizado. Pela rota etílica são necessárias mais etapas e uso de centrífugas para separação da glicerina e o álcool recuperado não é reutilizado no processo (TEIXEIRA, 2005).

As principais matérias-primas utilizadas para produção de biodiesel são os óleos vegetais, oriundos de diversos tipos de oleaginosas, como soja, dendê, mamona, babaçu, colza,

algodão, canola, amendoim, palma, etc. Também podem ser utilizadas outras matérias-primas como gordura animal (sebo), óleo de fritura, algas e esgoto (MIRAGAYA, 2005). A viabilidade do uso das matérias-primas está relacionada com a oferta regional, variando com a geografia, clima e economia local, diminuindo assim custos com transporte (HAAS; FOGLIA, 2006; TOLMASQUIM, 2003). No Brasil, predomina o uso de soja na produção de biodiesel.

A transesterificação consegue reduzir a viscosidade e a densidade, aumentar o número de cetano e o poder calorífico da matéria-prima utilizada, de forma que o biodiesel tenha propriedades semelhantes às do petrodiesel (PROKOPOWICZ et al., 2015), mas, ainda é mais viscoso e denso que este (YILMAZ; MORTON, 2011a). Segundo Kale; Kulkarni e Nandi (2014), a qualidade e as propriedades combustíveis do biodiesel são dependentes do óleo vegetal utilizado como matéria-prima.

A mistura de biodiesel e petrodiesel pode ser utilizada em motores de ignição por compressão sem modificações (KALE; KULKARNI; NANDI, 2014) e a adição do biocombustível ao petrodiesel melhora as propriedades lubrificantes deste, perdidas com a redução do teor de enxofre (MIRAGAYA, 2005). Porém, os motores diesel tendem a apresentar maiores problemas de partida a frio e de desempenho quando alimentados com misturas, sendo que o aumento da proporção de biodiesel tende a agravar estes aspectos (DUNN, 2006). Segundo Miragaya (2005), misturas com teores de biodiesel superiores a 30% já podem ocasionar problema de desempenho em baixas temperaturas.

O uso de biodiesel de óleo de colza puro em motor ciclo Diesel, resultou em maior consumo e maiores emissões de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC) em relação às outras misturas com menor concentração de biodiesel, devido à má atomização e vaporização do combustível durante a partida a frio e o aquecimento do motor, consequência da maior densidade e viscosidade que influenciam na mistura ar-combustível e, consequentemente, nas emissões (PROKOPOWICZ et al., 2015).

Ao testar diferentes concentrações de biodiesel de soja no petrodiesel, Reis et al. (2013) observaram que, com o aumento da concentração de biodiesel, houve aumento de consumo e de emissões de oxigênio (O₂) e de óxidos de nitrogênio (NO_x) e redução nas emissões de CO e de SO₂. As emissões de SO₂ foram praticamente anuladas quando foram utilizadas misturas com teores de biodiesel superiores a 80%, devido à ausência de enxofre no biocombustível.

Diferentes misturas de biodiesel de soja e petrodiesel foram testadas por Nietiedt et al. (2011), foi utilizado o diesel comercializado, que possuía 5% de biodiesel (B5), e misturas com teores de biodiesel de 10, 20 e 100% (B10, B20 e B100, respectivamente). O B10 apresentou a

maior potência e menor consumo específico, que não diferiram significativamente do B5. Houve redução da potência para maiores concentrações, sendo que o B100 apresentou potência 2,8% inferior ao B5 e foi o único que apresentou diferença significativa em relação ao consumo específico, 10,9% maior que do petrodiesel utilizado, devido ao menor poder calorífico do biodiesel.

O atual alto custo do biodiesel e de outros combustíveis derivados dos óleos vegetais, maior do que o dos derivados do petróleo, é uma desvantagem para seu uso (HAAS; FOGLIA, 2006). A matéria-prima é a principal componente do custo do biocombustível, representando cerca de 80%; em estudo com diversas fontes, o biodiesel de sebo bovino apresentou o menor custo, seguido da gordura de frango, do óleo de soja e do de girassol (FIORESE et al., 2011). O valor da matéria-prima é influenciado pelo preço do óleo no setor alimentício e são balizados pelo mercado internacional (OSAKI; BATALHA, 2011).

O uso de matérias-primas de menor valor agregado, como o óleo residual de fritura, pode ser alternativa para redução do custo de produção do biodiesel (KNOTHE, 2006c). O uso de óleo residual diminui a poluição hídrica e as emissões de gases do efeito estufa oriundos de seu descarte e tratamento nas estações de esgoto. Porém, este óleo necessita de pré-tratamentos para retirada das impurezas provenientes da cocção de alimentos e, por possuir maior quantidade de ácidos graxos livres, são necessárias maiores quantidades de álcool e catalisador (TOLMASQUIM, 2003). Nesses casos, a elevada acidez do óleo gera maior consumo de catalisadores básicos e o conteúdo elevado de água produz maiores quantidades de sabão, subproduto indesejável da transesterificação (TEIXEIRA, 2005).

Ao testar diferentes concentrações de biodiesel feito a partir de óleo residual no petrodiesel, Yilmaz e Morton (2011a) observaram maior eficiência térmica do biodiesel, menor emissão de CO e grande redução na emissão de HC com o motor trabalhando em cargas parciais. Os autores concluíram que o biodiesel afetou a emissão de HC independente do motor e das condições de operação, porém estes parâmetros influenciam na emissão de outros gases, como CO, O₂ e NO.

Apesar das vantagens de ser renovável e menos poluente, o biodiesel possui estabilidade à oxidação menor que a do petrodiesel, devido à alta porcentagem de insaturações na estrutura de seus ácidos graxos, sendo este um problema para o armazenamento (PROKOPOWICZ et al., 2015).

Frente aos óleos vegetais não transformados, as desvantagens na utilização do biodiesel são relacionadas principalmente ao seu processamento. A produção de biodiesel requer mais processos e insumos, o que implica em maior gasto energético e custos. Os

processos a que os óleos vegetais são submetidos, utilizam derivados de combustíveis fósseis, a exemplo do metanol e do hexano, que podem causar passivos ambientais, tais como poluição de ar, solo e água e gerar ozônio fotoquímico. Há também no processo de transesterificação a formação de glicerina como subproduto, cujo mercado se tornou saturado com a produção de biodiesel em larga escala (ESTEBAN et al., 2011). Segundo os mesmos autores, como os dois biocombustíveis possuem poder calorífico semelhantes, o retorno de energia do investimento, isto é, a razão entre a energia obtida e a consumida no processo de produção, é maior para os óleos vegetais que para o biodiesel.

3.2.2 Pirólise

O craqueamento, ou pirólise, é um processo normalmente realizado nas refinarias de petróleo para produção de combustíveis e consiste no aquecimento de alcanos a temperaturas muito elevadas promovendo a quebra e rearranjo das moléculas em alcanos menores (SOLOMONS; FRYHLE, 2001). No caso dos óleos vegetais, consiste na quebra das moléculas de triacilgliceróis sob altas temperaturas, formando misturas de hidrocarbonetos e compostos oxigenados (SUAREZ et al., 2007). O biocombustível produzido possui menor viscosidade, ponto de fulgor, ponto de fluidez e número de cetano que o diesel convencional e poder calorífico equivalente (BALAKRISHNA, 2012).

Neste caso, o óleo vegetal é submetido a altas temperaturas dentro do craqueador e suas ligações atômicas são rompidas, principalmente as mais instáveis, como as duplas ligações; triacilgliceróis com 50 ou mais átomos de carbono são rearranjados em moléculas orgânicas menores e normalmente lineares, com 17 átomos de carbono ou menos. Os vapores formados pelas novas moléculas passam por uma torre de destilação fracionada, onde, em razão dos diferentes pontos de condensação, ocorre a separação das frações (FELICI et al., 2009). As frações obtidas possuem características semelhantes às obtidas pelo craqueamento do petróleo: gases secos, como H_2 , CO, CO_2 , CH_4 , gás liquefeito de petróleo, gasolina, querosene, diesel, hidrocarbonetos leves, óleos pesados e coque (FELICI et al., 2009; NAM et al., 2011; YIGEZU; MUTHUKUMAR, 2014).

O uso de catalisadores no processo de craqueamento altera a taxa de conversão do óleo vegetal em seus produtos destilados (YIGEZU; MUTHUKUMAR, 2014) e os combustíveis líquidos obtidos e seus poderes caloríficos variam em função do catalisador utilizado (LI et al., 2014). Os principais produtos da pirólise, sem uso de catalisador, são os hidrocarbonetos parafínicos, similares aos encontrados no petrodiesel, e os do craqueamento catalítico são os

hidrocarbonetos aromáticos, com alto número de octano, semelhante à gasolina (NAM et al. 2011).

O craqueamento produz também ácidos carboxílicos, álcool, aldeídos e cetonas que podem afetar as propriedades físicas e o conteúdo de energia do combustível e, portanto, devem ser mantidos em baixa concentração através de otimizações nas condições do processo (YIGEZU; MUTHUKUMAR, 2014).

As principais desvantagens do craqueamento para produção de biocombustíveis são o alto custo do processo e sua difícil operação, pois as altas temperaturas exigidas tornam a operação do reator perigosa e podem ocorrer vazamentos no sistema e emissões de resíduos voláteis inflamáveis que podem provocar incêndios (FELICI et al., 2009).

3.2.3 Microemulsificação

As microemulsões são dispersões, normalmente de óleo em água, estabilizadas por um filme interfacial de surfactante, usualmente combinado com um cosurfactante, resultando em um sistema translúcido, com menor viscosidade e termodinamicamente estável (BOONME, 2006).

Para os biocombustíveis, as microemulsões são normalmente constituídas de misturas de óleo vegetal e petrodiesel com um componente de menor viscosidade, normalmente um álcool de cadeia curta, como o etanol, e mistura de surfactante e cosurfactante, necessários para promover a combinação do álcool, de alta polaridade, com a mistura de diesel e óleo vegetal, apolar (QI et al., 2013). Portanto, o surfactante permite a combinação de maiores quantidades do componente de menor viscosidade com o óleo vegetal e é responsável pela estabilidade da combinação (KIBBEY et al., 2014).

A combinação dos fluidos deve ser feita de acordo com os critérios desejados para o combustível, como viscosidade, estabilidade e emissões (KIBBEY et al., 2014). A quantidade de álcool determina a viscosidade, quanto maior, menor a viscosidade, e o surfactante influi na estabilidade e características como ponto de névoa e de fluidez (NGUYEN et al., 2012).

O uso do etanol é capaz de diminuir a viscosidade e a densidade do combustível híbrido a valores próximos aos do petrodiesel, o que melhora a atomização e a mistura de combustível com o ar, facilitando a combustão completa. Porém, a concentração de etanol deve ser limitada, pois o mesmo possui menor NC que o petrodiesel e sua adição causa maior atraso de ignição (QI et al., 2013). O etanol possui também menor poder calorífico que o petrodiesel, fazendo com que o consumo do combustível híbrido seja maior que o do diesel convencional, pois maior

quantidade de combustível precisa ser injetada para produzir a mesma potência. Portanto, quanto maior a concentração de álcool, maior o consumo. A quantidade de etanol adicionada influencia também as emissões, estudos indicam redução de fumaça devido ao maior conteúdo de oxigênio do combustível, porém maiores emissões de CO e de HC foram observadas quando maiores concentrações de etanol, na ordem de 20 a 30%, foram utilizadas (NGUYEN et al., 2012; QI et al., 2013). Ainda em relação às emissões, segundo No (2017), apesar de os combustíveis derivados de óleos vegetais normalmente causarem aumento das emissões de NO_x , as emulsões com água e álcool tendem a reduzi-las.

3.2.4 Mistura com petrodiesel

A mistura de óleo vegetal com o petrodiesel tem por meta a obtenção de combustível com desempenho semelhante ao deste sem necessidade de modificações nos motores convencionais (TOLMASQUIM, 2003). A viscosidade da mistura diminui com o aumento do volume de diesel (FRANCO; NGUYEN, 2011) e a proporção ideal de mistura varia para cada tipo de óleo vegetal, porém a maioria dos óleos vegetais podem ser misturados ao petrodiesel em concentração de até 20% sem a necessidade de alterações no motor (NO, 2017).

A quantidade de óleo vegetal que pode estar presente na mistura sofre também influência da temperatura ambiente, pois durante o verão e em regiões de clima mais quente é possível a utilização de maior volume relativo de óleo vegetal sem a necessidade, por exemplo, de sistema de pré-aquecimento (WAGNER et al., 2013).

Em motor monocilíndrico de injeção direta alimentado com mistura de 70% de óleo de soja com petrodiesel observou-se maior torque e potência que com o uso simples de petrodiesel; o consumo específico aumentou com o aumento do volume relativo de óleo vegetal, devido ao menor poder calorífico e à maior densidade deste. Foi verificado também que maiores volumes de óleo vegetal diminuem a emissão de fumaça (WANDER et al., 2011).

O efeito da adição de 5% de óleo residual de palma e de coco ao petrodiesel foi estudada por Kalam et al. (2011). A mistura com óleo de coco (C5) apresentou maior poder calorífico que a com óleo de palma (P5) e ambas apresentaram poder calorífico inferior ao petrodiesel, que implicou em redução de potência quando da utilização das misturas, esta redução foi de 0,7% para o C5 e 1,2% para o P5. Em comparação com o uso de petrodiesel puro, os dois óleos vegetais reduziram emissões de CO, HC e opacidade e aumentaram a emissão de O_2 . O P5 apresentou aumento na temperatura dos gases de exaustão e na emissão de NO_x , enquanto para o C5 houve redução destes dois parâmetros. A emissão de HC, O_2 e a

opacidade foi maior para o P5 em relação ao C5, que apresentou maior emissão de CO apenas. Os resultados se devem ao fato do óleo de coco apresentar maior quantidade de ácidos graxos saturados, responsáveis por produzir combustão mais completa, em comparação ao óleo de palma.

A mistura de petrodiesel com 30% de óleo vegetal hidrotratado apresentou indícios de boa atomização e vaporização do combustível mesmo na partida a frio e aquecimento do motor. Observou-se grande redução das emissões de HC comparado ao petrodiesel, assim como houve redução nas emissões de material particulado e CO₂. As emissões de NO_x não apresentaram diferença significativa em relação ao petrodiesel (PROKOPOWICZ et al., 2015).

O óleo vegetal pode ser misturado com outros combustíveis menos viscosos, além do petrodiesel. Wagner et al. (2013) testaram diferentes misturas de óleo de soja residual com petrodiesel e querosene, que possui menor viscosidade que o petrodiesel e NC adequado. As misturas foram pré-aquecidas a aproximadamente 45 °C por aquecedor na linha de alimentação do combustível visando reduzir a viscosidade. As misturas com 15, 30 e 40% de óleo residual apresentaram potência similar ao petrodiesel, com redução, em média, de 1,1%. A maior queda de potência ocorreu com a mistura contendo 50% de óleo vegetal. Os autores concluíram que misturas com mais de 40% de óleo vegetal não seriam indicadas.

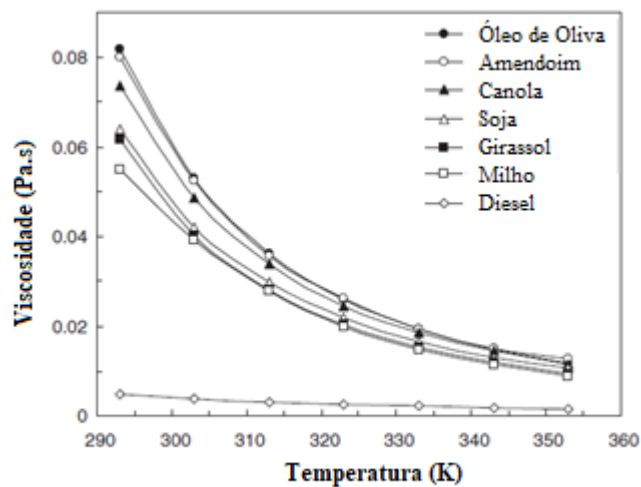
A emissão de material particulado de um motor ciclo Diesel alimentado com misturas ternárias de óleo refinado de soja, biodiesel e etanol hidratado em comparação com o uso de petrodiesel foi utilizada por Borges et al. (2011). Estes observaram grande redução nas emissões quando o motor foi submetido a cargas elevadas, sendo que em cargas menores as emissões pelo uso das misturas ternárias e do petrodiesel foram semelhantes. A mistura contendo a maior porcentagem de etanol, composta por 50% de biodiesel, 40% de etanol e 10% de óleo vegetal, foi a que apresentou menor emissão. Os autores afirmam que o aumento relativo de etanol na mistura favorece a redução de material particulado, pois o petrodiesel, de cadeia carbônica longa e alto ponto de ebulição, é substituído por etanol, de cadeia simples e menor temperatura de ebulição.

3.2.5 Pré-aquecimento de óleos vegetais

O pré-aquecimento dos óleos vegetais, utilizados como combustível, antes dos injetores, melhora a atomização e as características do jato, favorecendo a combustão completa (ESTEBAN et al., 2012; YILMAZ; MORTON, 2011b). Estas alterações são consequência do aumento da temperatura, que reduz a densidade e a viscosidade dos óleos vegetais e aumenta

seu número de cetano, melhorando as características de injeção e evaporação, reduzindo o atraso de ignição e aumentando a taxa de penetração da injeção (PRADHAN; RAHEMAN; PADHEE, 2014; RYAN III; DODGE; CALLAHAN, 1984). Esta ação também reduz o ponto de fulgor dos óleos vegetais (JAIN et al., 2017). A viscosidade decresce não-linearmente com a temperatura, e em maiores temperaturas a diferença de viscosidade entre as variedades de óleos vegetais se torna menos significativa (Figura 2) (FRANCO; NGUYEN, 2011).

Figura 2 - Variação da viscosidade conforme variação da temperatura para vários óleos vegetais



Fonte: FRANCO e NGUYEN (2011)

O uso de óleos vegetais aumenta o consumo de combustível, a carbonização nas partes internas do motor e a contaminação do lubrificante em comparação com o petrodiesel, mas o pré-aquecimento é capaz de reduzir estes aspectos em relação aos óleos vegetais não aquecidos (DELALIBERA, 2009). Neste estudo, realizado em motor monocilíndrico, ao final do ensaio de 50 horas com óleo de girassol na temperatura ambiente, o óleo lubrificante apresentou sólidos em depósito e em suspensão, já no ensaio em que o óleo foi pré-aquecido a 90 °C, não houve tais indicativos.

O ajuste correto da temperatura de pré-aquecimento dos óleos vegetais pode melhorar o desempenho da combustão, influenciar nas emissões e na eficiência do motor (ESTEBAN et al., 2012). A temperatura ideal de pré-aquecimento é dependente da viscosidade inicial do óleo vegetal e, portanto, pode ser diferente para cada tipo de óleo vegetal (NO, 2017). Segundo Esteban et al. (2012), que analisaram diferentes variedades de óleos vegetais, aquecê-los a 120 °C é suficiente para que seus valores de densidade e viscosidade sejam similares aos do petrodiesel e biodiesel, e esta temperatura pode ser menor dependendo do tipo e das

configurações do motor. Tratando do mesmo tema, Inoue et al. (2005) indicam que aquecer os óleos a temperaturas maiores que 150 °C não é economicamente interessante, pois, apesar de reduzir significativamente sua viscosidade, esta decresce relativamente pouco a partir desta temperatura e, mesmo em temperaturas mais elevadas, não se consegue obter viscosidade igual à do petrodiesel.

O uso de óleo de palma apresentou melhor combustão e menor quantidade de depósitos quando aquecido a 100 °C, em comparação ao pré-aquecido a 50 °C. A utilização do óleo vegetal reduziu a vida útil do óleo lubrificante, pois este teve sua viscosidade reduzida, consequência da combustão incompleta causada pela atomização irregular e baixa volatilidade do óleo de palma. Foi observado também aumento nas emissões de CO e HC e redução de NO_x em comparação com o petrodiesel (ALMEIDA et al., 2002).

As misturas de óleos vegetais e petrodiesel também podem ser pré-aquecidas para redução da viscosidade. O aumento da proporção de óleo vegetal na mistura aumenta o consumo de combustível e reduz a eficiência térmica, porém o pré-aquecimento é capaz de melhorar estes aspectos (JAIN et al., 2017; SONAR et al., 2015) e, com o aumento da temperatura, a composição da mistura passa a ter menos efeito sobre sua viscosidade (FRANCO; NGUYEN, 2011).

Ao testar o óleo de soja puro e misturado ao petrodiesel a 30 e a 60 °C, Wander et al. (2011), concluíram que o aumento da temperatura do combustível reduz o torque e a potência, devido à diminuição da densidade, porém reduziu o consumo específico, o que indica melhor eficiência.

As misturas pré-aquecidas de óleo de soja com petrodiesel em motor de injeção indireta apresentaram melhores resultados que o uso do petrodiesel puro (SCHLOSSER; MACHADO; CAMARGO, 2007). Os melhores resultados foram obtidos para mistura com 70% de óleo de soja e 30% de petrodiesel pré-aquecida a 68 °C, pois apresentou os maiores valores de torque e potência e o menor consumo específico. O mesmo motor utilizando óleo de soja puro a 57 °C apresentou consumo específico médio superior ao petrodiesel e torque e potência iguais estatisticamente, mas ao ser aquecido a 68 °C o torque e a potência foram superiores e o consumo específico médio igual ao do petrodiesel.

Por outro lado, Inoue et al. (2009), ao utilizarem mistura de 50% de óleo de soja degomado com petrodiesel aquecida a 90 °C, observaram maiores quantidades de depósitos na câmara de combustão e cabeça do pistão, desgaste nos componentes do sistema de alimentação e contaminação do lubrificante, em comparação com o petrodiesel B2 e com adição de 5% do mesmo óleo vegetal. Segundo os autores, o uso de misturas contamina o lubrificante o que

reduziria o intervalo de troca e, no caso da mistura com maior teor de óleo vegetal, torna necessária a descarbonização da câmara de combustão em intervalos de no máximo 500 horas.

O uso de óleos vegetais puros, em mistura ou pré-aquecidos, tende a aumentar a temperatura dos gases de exaustão, em comparação com o motor operando com petrodiesel (DELALIBERA et al., 2017; JAIN et al., 2017; PRADHAN; RAHEMAN; PADHEE, 2014; SONAR et al., 2015). Há também tendência de redução nas emissões de HC e CO, e o pré-aquecimento tende a reduzir ainda mais o índice dessas emissões quando do uso de óleos vegetais e suas misturas. Por outro lado, o pré-aquecimento pode causar aumento na emissão de NO_x, devido à maior temperatura de combustão (JAIN et al., 2017; SONAR et al., 2015).

Porém, as emissões de motores ciclo Diesel utilizando óleos vegetais e misturas como combustível não é conclusivo, pois os resultados divergem com as características físico-químicas do óleo, com o tipo de motor utilizado e com o regime de trabalho (condições de carga) do mesmo.

3.3 O ÓLEO DE CRAMBE

A cultura do crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) é originária do mediterrâneo e muito tolerante à seca e ao frio. No Brasil, é uma cultura de outono/inverno e as melhores regiões para seu cultivo são o centro-sul do Mato Grosso do Sul, norte e nordeste do Paraná e sul de São Paulo. Seu ciclo de produção dura cerca de 90 dias, a produtividade varia de 1.000 a 1.500 kg ha⁻¹ e o teor de óleo na semente é em torno de 38% (PITOL, 2008).

O perfil de ácidos graxos no óleo de crambe pode ser visualizado na Tabela 4 e algumas de suas propriedades combustíveis na Tabela 5.

Em estudo utilizando o óleo de crambe como combustível em motor ciclo Diesel monocilíndrico, comparando com três outros tipos de óleos vegetais (linhaça, canola e pinhão-mansão) e com petrodiesel, onde todos os óleos vegetais foram submetidos a duas temperaturas: 60 °C (temperatura de funcionamento do motor) e pré-aquecidos a 100 °C, todos apresentaram maior temperatura dos gases de exaustão (DELALIBERA et al., 2017). No mesmo estudo, o óleo de crambe apresentou o menor consumo (em g h⁻¹) entre os óleos vegetais, inclusive menor que do petrodiesel quando o motor operou sem carga, e o óleo de crambe pré-aquecido apresentou menor consumo em comparação ao sem aquecimento.

Os autores observaram ainda que os óleos vegetais apresentaram, de forma geral, maior perda de potência relativa e o crambe apresentou as menores perdas entre os óleos vegetais, sendo que o tratamento a 60 °C foi o único que não apresentou diferença significativa

em comparação com o petrodiesel. O referido trabalho relata que o óleo de crambe apresentou resultados melhores, seguido do óleo de canola.

Tabela 4 - Perfil de ácidos graxos do óleo de crambe (em porcentagem)

Ácido graxo	Demirbas (1998)	Lalas et al. (2012)	Mondal et al. (2008)	Oliveira e Silva (2013)	Silveira et al. (2017)
Láurico (C12:0)	-	-	-	0,03	-
Mirístico (C14:0)	-	-	-	0,1	-
Palmítico (C16:0)	2,1	0,88	2,07	2	2,5
Palmitoleico (C16:1)	-	-	-	-	0,4
Esteárico (C18:0)	0,7	0,53	0,7	0,9	1
Oleico (C18:1)	18,9	15,07	18,86	17,2	21,7
Linoleico (C18:2)	9	13,16	9	8,2	8,4
Linolênico (C18:3)	6,9	-	6,85	5	4,6
Araquídico (C20:0)	2,1	0,63	2,09	1,1	1,1
Gadoléico (C20:1)	-	2,4	-	3,7	3,4
Behênico (C22:0)	0,8	2,14	0,8	2,2	1
Erúico (C22:1)	58,5	63,77	58,51	57,2	54,5
Lignocérico (C24:0)	1,1	0,44	1,12	0,8	0,4
Nervônico (C24:1)	-	0,99	-	-	1

Fonte: DEMIRBAS (1998); LALAS et al. (2012); MONDAL; BASU e BALASUBRAMANIAN (2008); OLIVEIRA e SILVA (2013); SILVEIRA et al. (2017)

Tabela 5 - Propriedades combustíveis do óleo de crambe

Número de Iodo	88 - 99,83
Viscosidade Cinemática a 40 °C [mm ² s ⁻¹]	49,02 - 53,6
Número de Cetano	44,6 - 52,9
Poder Calorífico Superior [MJ kg ⁻¹]	40,5 - 40,62
Ponto de Névoa [°C]	10
Ponto de Fluidez [°C]	-12,2
Ponto de Fulgor [°C]	274
Massa específica [kg m ⁻³]	900 - 911,3
Resíduo de Carbono [%]	0,23
Cinzas [%]	0,04 - 0,05
Enxofre [%]	0,01
Teor de Água [%]	0,5

Fonte: DEMIRBAS (1998); JASPER; BIAGGIONI e SILVA (2013); LALAS et al. (2012); MONDAL; BASU e BALASUBRAMANIAN (2008); WAZILEWSKI et al. (2013)

4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Ensaio de Máquinas, área de Engenharia Agrícola do Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR), localizado em Londrina – PR, e consistiu em avaliar o desempenho de motor ciclo Diesel alimentado com óleo vegetal.

Foram utilizados dois combustíveis como tratamentos, o óleo de crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) puro pré-aquecido a 100 °C e o petrodiesel comercialmente disponível. Este óleo vegetal foi escolhido devido aos resultados obtidos no estudo de Delalibera (2014), em que o óleo de crambe obteve, entre os óleos vegetais estudados, os melhores resultados de desempenho em ensaio de curta duração.

O óleo foi obtido através de extração mecânica com uso de prensa de fluxo contínuo do tipo expeller, com capacidade de 40 kg h⁻¹, seguida de filtragem com filtro padrão para óleo vegetal de granulometria 0,5 µm, procedimentos realizados também no Laboratório de Ensaio de Máquinas. Os grãos utilizados foram misturas de grãos providos da Fundação MS, em Maracaju – MS, e produzidos no próprio IAPAR (Londrina, Paraná). O óleo foi caracterizado quanto à viscosidade e ao poder calorífico superior.

Para fins de comparação, foi utilizado como testemunha o combustível petrodiesel B5 e S500. Isto é, petrodiesel com adição de 5% de biodiesel e concentração de enxofre máxima de 500 ppm. Este combustível foi caracterizado apenas quanto ao poder calorífico superior.

A análise da viscosidade cinemática do óleo de crambe foi realizada no Laboratório de Pesquisa e Análise de Combustíveis, da Universidade Estadual de Londrina (UEL). Para este, foram realizadas duas análises de viscosidade nas temperaturas de 40 °C e de 100 °C, para estimar a magnitude do efeito do pré-aquecimento sobre a viscosidade do mesmo.

Os procedimentos utilizados na análise seguiram norma ASTM D445-06 (ASTM, 2006), utilizando-se de viscosímetro capilar Cannon-Fenske, da fabricante CANNON, e banho térmico, modelo MA, da marca Julabo. Para controle das temperaturas do banho foram utilizados dois termômetros, da fabricante Incoterm, regulamentados pelas normas ASTM 120C-86 e ASTM 121C-86, para as análises a 40 e 100 °C, respectivamente, além de termômetro acoplado ao próprio equipamento, como mostra a Figura 3.

A determinação do poder calorífico superior (PCS) do óleo de crambe e do petrodiesel foi realizada no Laboratório de Energia de Biomassa (LEB), do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR. Foi utilizada bomba calorimétrica Julius Peters e a análise foi realizada conforme ASTM D240-17 (ASTM, 2017).

Figura 3 - Viscosímetros capilares do tipo Cannon-Fenske inseridos em banho térmico para análise da viscosidade



Fonte: A autora

4.1 BANCADA DE ENSAIO

Utilizou-se, como unidade experimental, motor estacionário ciclo Diesel, cujas especificações estão descritas na Tabela 6, acoplado a gerador elétrico com capacidade de 4 kVA (3,2 kW).

Tabela 6 - Especificações do motor segundo manual do fabricante

Fabricante	YANMAR
Modelo	B9C
Número de Cilindros	1
Pressão de Compressão	1,47 a 1,86 MPa
Taxa de Compressão	19,2:1
Diâmetro x curso	90 x 100 mm
Cilindrada	636 cm ³
Ciclo	Diesel, 4 tempos
Potência	5,88 kW@1.800 rpm
Aspiração	Natural
Sistema de Injeção	Mecânica
Tipo de Injeção	Indireta em antecâmara
Pressão de Injeção	13,73 ± 0,49 MPa
Lubrificação	Forçada por bomba de engrenagens
Pressão do lubrificante	0,049 a 0,49 MPa
Volume de lubrificante	1,5 a 2 L
Arrefecimento	Água por condensação
Volume de arrefecimento	2,8 L

Fonte: Yanmar

Os procedimentos de montagem da bancada de ensaios, preparação e instrumentação do motor foram realizados conforme descrito em Delalibera (2014).

Como preparação do motor, realizou-se substituição dos elementos de bomba e bico injetor por novos e aferição da pressão de abertura do injetor para 14,22 MPa (145 kgf cm⁻²). As válvulas de admissão e escape foram reguladas para 0,3 mm e foram realizadas medidas da pressão de compressão, sendo determinado valor médio de 1,52 MPa (15,55 kgf cm⁻²), valor preconizado pelo fabricante (Tabela 6). Realizou-se também adição de 2,1 L de lubrificante mineral multiviscoso, marca Ambra Super Gold, SAE 15W40. Este foi adicionado em volume acima do especificado pelo fabricante devido à retirada das amostras para análise ao longo de ensaio, de forma que após as amostragens o motor não operasse com volume de lubrificante abaixo do mínimo recomendado.

No motor foram adaptados dois reservatórios de combustíveis, um para o óleo vegetal e outro para o petrodiesel, e um sistema que permitia a alternância entre os combustíveis, feito através de válvula manual de duas posições e três vias (duas entradas e uma saída) posicionada próximo ao sistema de alimentação de combustível, o qual era movimentado por gravidade (Figuras 4 e 5). A válvula utilizada é da fabricante MGA, com 9,52 mm (3/8") de diâmetro, em aço inox, do tipo esférica com vedação em teflon.

Figura 4 - Sistema de alimentação de combustível

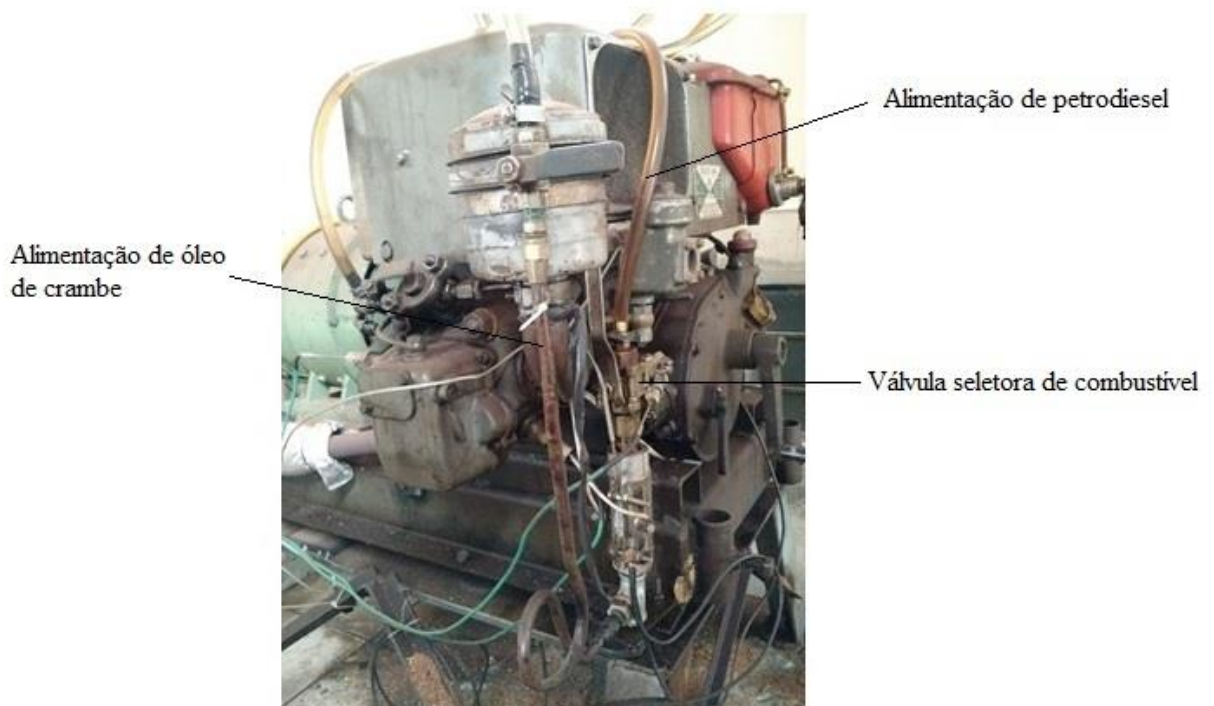


Figura 5 - Válvula de três vias



Fonte: A autora

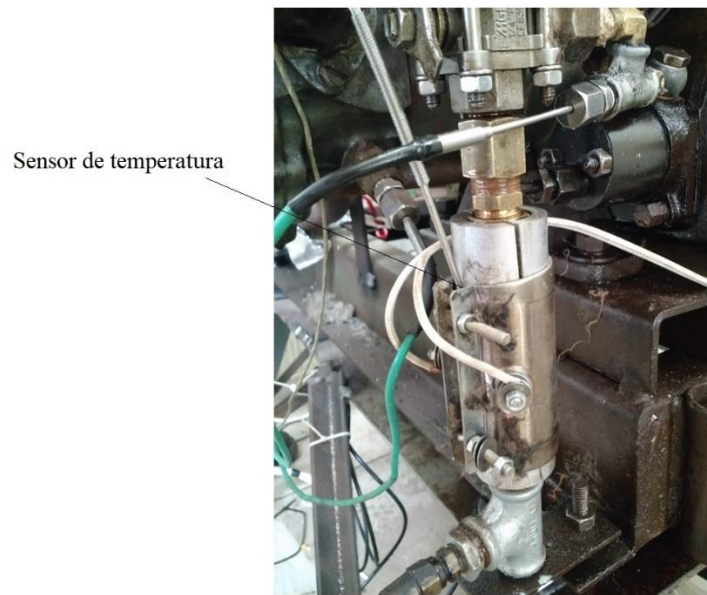
Como o óleo de crambe foi pré-aquecido antes da injeção, a partida do motor foi sempre realizada com petrodiesel, utilizado até o aquecimento do motor. Somente após estabilização da temperatura de arrefecimento (em torno de 90 °C) realizava-se a troca do combustível, fechando a válvula correspondente à entrada de petrodiesel e permitindo a alimentação do motor com o óleo de crambe aquecido. Da mesma forma, antes de desligar o motor, alternava-se a alimentação novamente para o petrodiesel, mantendo-se por aproximadamente 15 minutos para limpeza do motor. Este tinha por objetivo retirar das partes internas do sistema de injeção os resíduos de óleo de crambe que, devido às suas propriedades de fluxo, podem dificultar a partida do motor à temperatura ambiente, além do risco de oxidação de partes do motor constituídas de cobre.

O pré-aquecimento do óleo vegetal foi realizado através de sistema elétrico, localizado junto à válvula descrita anteriormente, e composto por resistência elétrica que envolve massa de alumínio de diâmetro externo de 40 mm e interno de 15,9 mm (5/8”), onde o óleo de crambe circulava e era aquecido. A resistência, do tipo coleira, possuía 40 mm de diâmetro, 120 mm de comprimento e potência de 450 W. Este sistema (Figura 6) foi responsável por aquecer o óleo de crambe a aproximadamente 100 °C. A resistência era ligada manualmente antes de iniciar a alimentação com o óleo de crambe, pois a mesma precisa atingir a temperatura aproximada de 160 °C para aquecer o óleo a temperatura desejada. Este sistema era desligado quando era utilizado o petrodiesel.

Para controlar a temperatura do óleo de crambe foi utilizado sensor de temperatura termopar do tipo K. Este foi inserido dentro do aquecedor e acoplado a termostato digital da

marca Novus, modelo N321, de 10 amperes, que controlava o ligamento e desligamento automáticos da resistência. Esta era ligada automaticamente quando sua temperatura atingia 155 °C e desligada a 165 °C, conforme previamente programado, de forma a manter a temperatura do óleo vegetal a 100 °C na entrada do sistema de injeção (DELALIBERA, 2014).

Figura 6 - Sistema de aquecimento do óleo de crambe por resistência elétrica



Fonte: A autora

Para realização dos ensaios, utilizou-se, acoplado ao motor Diesel descrito, gerador de corrente alternada (Figura 7), da fabricante Bambozzi, trifásico, com capacidade nominal de 4 kVA, rotação de 1.800 rpm, frequência de 60 hertz (Hz) e tensão de saída de 127 – 220V. A energia elétrica gerada alimentava banco de cargas resistivo (Figura 8), composto por 6 lâmpadas halógenas com potência de 500 W e 3 de 300 W, totalizando 3,9 kW de potência a ser absorvida (DELALIBERA, 2014). O referido banco era acionado por interruptores, que permitiam o ligamento/desligamento das lâmpadas e a alternância das cargas.

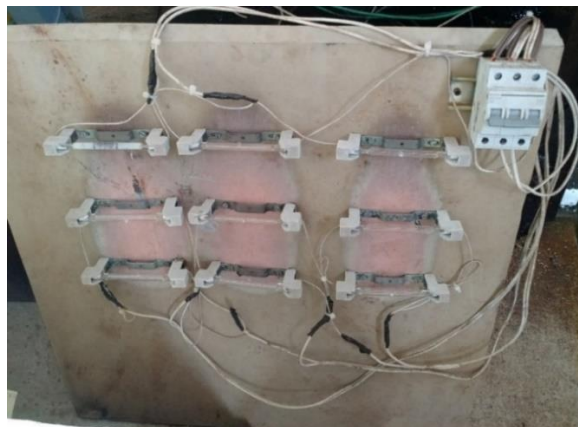
O diagrama representativo da bancada de ensaio está ilustrado na Figura 9.

Figura 7 - Conjunto motor-gerador



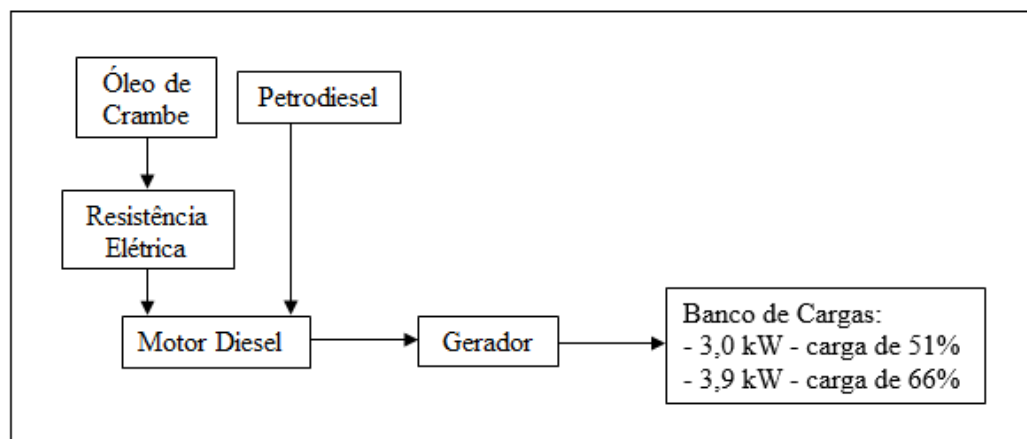
Fonte: A autora

Figura 8 - Banco de cargas resistivo composto por lâmpadas halógenas



Fonte: A autora

Figura 9 - Diagrama representativo da bancada de ensaio



Fonte: A autora

Os ensaios foram realizados em quatro regimes de operação do motor:

- Rotação de marcha lenta, com o motor operando a aproximadamente 1.100 rpm;
- Motor operando a 1.800 rpm sem carga (aceleração livre);
- Motor operando a 1.800 rpm, submetido a 3,0 kW de carga (51% da potência nominal);
- Motor operando a 1.800 rpm, submetido a 3,9 kW de carga (66% da potência nominal).

Foram instalados outros quatro sensores termopar tipo K no motor, para monitoramento e controle das temperaturas: do combustível na entrada do sistema de injeção, do arrefecimento, lubrificação e exaustão. Os demais parâmetros controlados por sensores foram: rotação, temperatura ambiente, pressão do lubrificante, massa de combustível admitida pela bomba injetora e massa de combustível que retornava ao reservatório. O retorno de combustível ocorre devido ao fato de nem todo combustível fornecido pela bomba injetora ser injetado na câmara de combustão, de forma que pequena parcela deste combustível retorna ao reservatório, com finalidade de lubrificar os elementos do bico e da bomba injetora.

As variáveis mencionadas foram monitoradas durante todo o ensaio e registradas em datalogger, modelo CR-5.000, da marca Campbell Scientific. Utilizou-se taxa de aquisição de 0,05 Hz (uma aquisição a cada 20 segundos), e os dados foram transmitidos para computador, onde podiam ser visualizados em tempo real e armazenados.

A temperatura do ambiente foi controlada por túnel de vento, acionado automaticamente em temperatura acima de 25 °C, por controlador de temperatura igual ao descrito anteriormente.

O motor funcionava cerca de 7 a 8 horas diárias, ininterruptas, até totalizarem 100 horas de ensaio, qualificando o ensaio como de longa duração. Conforme descrito por Delalibera (2015), ensaios de longa duração são caracterizados por possuir o período de avaliação superior à vida útil do lubrificante, determinada pelo fabricante, que para o caso do motor utilizado é de 50 horas. Segundo o mesmo autor, neste tipo de ensaio, além da análise do comportamento das variáveis de resposta rápida ao longo do tempo, como consumo e potência, são realizadas, por exemplo, avaliações de desgaste de componentes, vida útil do lubrificante, comportamento da pressão de compressão e carbonização da câmara de combustão.

Foram realizadas avaliações de consumo e perda de potência relativa nos tratamentos óleo vegetal e petrodiesel e retirada de amostra do óleo lubrificante no início do ensaio (tempo zero) e a cada 15 horas de funcionamento do motor. Entre as avaliações, o motor funcionava predominantemente com óleo de crambe sob regime de 51% de carga em rotação de 1.800 rpm.

Ao fim dos ensaios de 30 horas observou-se que os dados registrados no datalogger referentes à temperatura de escape estavam incorretos e foi necessário fazer novo aterramento no sistema antes de continuar com o teste, a fim de reduzir possíveis ruídos e interferências nos sensores de temperatura e melhorar acurácia do proposto.

Ao atingir 50 horas de funcionamento do motor, o ensaio foi interrompido para algumas averiguações. Foi determinada pressão de compressão e realizada a retirada do bico injetor e da bomba injetora, a fim de verificar desgaste nestes elementos. Após verificação do funcionamento e nova aferição da pressão de abertura do injetor, este e a bomba injetora foram reinstalados no motor, realizou-se a troca do óleo lubrificante e prosseguindo-se com as avaliações a cada 15 horas até a finalização do ensaio, em 100 horas. Desta forma, obteve-se sete tempos de avaliações: 0, 15, 30, 45, 65, 80 e 95 horas.

4.2 VARIÁVEIS DEPENDENTES

4.2.1 Determinação do consumo de combustível

As avaliações de consumo foram realizadas nos quatro regimes de funcionamento discutidos anteriormente (Tabela 7) e efetuou-se igual procedimento para os dois combustíveis utilizados. Para determinar o consumo e retorno de combustível procedeu-se da seguinte forma: o motor operava em cada um dos regimes por 10 minutos; ao completar os quatro regimes no combustível analisado, repetia-se o procedimento, porém com apenas 5 minutos de atuação em cada regime, totalizando 15 minutos de operação. Seguiu-se o mesmo procedimento em todas as avaliações realizadas a cada 15 horas.

Tabela 7 - Tratamentos e regimes de carga utilizados nas avaliações de consumo

Codificação	Tratamento	Regime
CR1	Óleo de crambe	Marcha Lenta
PD1	Petrodiesel	
CR2	Óleo de crambe	1.800 rpm livre de carga
PD2	Petrodiesel	
CR3	Óleo de crambe	1.800 rpm com carga de 51% da potência nominal
PD3	Petrodiesel	
CR4	Óleo de crambe	1.800 rpm com carga de 66% da potência nominal
PD4	Petrodiesel	

Fonte: A autora

As mensurações da admissão de combustível pela bomba injetora e do retorno pelo injetor foram realizadas através da construção de sistema de avaliação automatizado, ligado ao sistema de alimentação do motor, capaz de medir as massas (em kg) de óleo de crambe, de petrodiesel e de retorno de combustível, presentes em reservatórios. As aquisições dos dados de massa gerados eram feitas pelo datalogger, com taxa de 0,5 Hz (uma leitura a cada 2 segundos).

Os dados registrados foram transferidos e processados no programa computacional Catman Easy-AP 3.3.5, da fabricante HBM, para serem posteriormente submetidos à análise estatística. Confeccionou-se gráficos da massa de combustível presente em cada reservatório pelo tempo de ensaio e cada avaliação de consumo de combustível foi subdividida em intervalos de 150 segundos; desta forma foi possível obter a massa de combustível (em kg) admitida pela bomba injetora a cada 150 segundos. Obteve-se um total de seis determinações, consideradas como repetições, para cada regime em cada um dos sete tempos de estudo, para os dois combustíveis.

Os valores determinados foram organizados em planilha no Microsoft Office Excel e analisados. As seis repetições obtidas em cada avaliação foram consideradas como blocos e postas em ordem crescente a fim de minimizar possíveis efeitos de fatores não controlados (efeito local de momento), devido a não casualização dos dados, pois as condições do ensaio não permitem a alternância entre os tratamentos a cada repetição.

A análise estatística foi feita com auxílio do programa computacional SisVar 5.6, utilizando análise de variância com delineamento em blocos com esquema de parcela subsubdividida no tempo 2x4x7 (dois combustíveis, quatro regimes e sete tempos), prevendo os erros de não casualização de todos os fatores, e teste de médias para comparação dos tratamentos feita por Tukey.

Os experimentos em parcelas subsubdivididas permitem estudar simultaneamente os efeitos dos três fatores em questão (tipo de combustível, regime de operação e tempo de ensaio) sobre o consumo de combustível pelo motor. Para isso, as interações entre os diferentes fatores decorrentes da análise de variância devem ser consideradas e, caso seja pertinente e se forem significativas, devem ser desdobradas, de forma a avaliar como os fatores influenciam no consumo de combustível (BANZATTO; KRONKA, 2006).

Testou-se a normalidade e a homocedasticidade dos dados, necessárias para aplicação da análise de variância. A normalidade foi testada utilizando o programa computacional BioEstat 5.0 e a homocedasticidade em planilha do Microsoft Office Excel. Os dados obtidos após análise estatística foram convertidos para consumo horário [g h^{-1}].

O consumo específico, razão entre o fluxo de admissão de combustível e a potência efetiva (PRADHAN; RAHEMAN; PADHEE, 2014), dado em $\text{g kW}^{-1} \text{h}^{-1}$, do conjunto motor-gerador pode ser calculado nos regimes sob carga pela equação 1 (HEYWOOD, 1988):

$$C_{esp} = c.P^{-1} \quad (1)$$

Onde ‘P’ é a potência absorvida pelo banco de cargas, em kW, e ‘c’ é o consumo médio obtido em cada avaliação com a carga correspondente, em g h^{-1} .

4.2.2 Determinação da perda de potência relativa

As avaliações de perda de potência relativa foram realizadas conforme método desenvolvido e descrito por Delalibera (2014), que consiste em estimar a perda de potência relativa de forma indireta, através da integral (área) da curva de resposta à retomada da aceleração quando da aplicação de carga. Foram realizadas três avaliações de perda de potência relativa em cada tempo, todas com o motor operando a 1.800 rpm:

- Aplicação de 3,0 kW de carga, ou 51% de demanda da potência nominal, sobre velocidade livre de carga;
- Aplicação de 3,9 kW de carga, ou 66% de demanda da potência nominal, sobre velocidade livre de carga; e
- Aplicação de 0,9 kW de carga, com o motor sob regime constante de 3,0 kW de demanda da potência nominal, isto é, aplicação da carga de 3,9 kW sobre o regime de trabalho de 3,0 kW (aumento de 15% na demanda da potência nominal).

Adotou-se como procedimento para as avaliações de perda de potência relativa dos dois combustíveis, realizadas a cada 15 horas de ensaio: deixava-se a carga menor atuar por 10 segundos e então aplicava-se a carga maior, também por 10 segundos. Repetiu-se este procedimento 10 vezes para as três condições citadas acima.

O monitoramento das rotações foi feito através de transdutor do tipo encoder incremental, com geração de 1.024 pulsos por volta, o qual transformava o movimento mecânico em sinal elétrico. Este foi acoplado ao eixo virabrequim. Para leitura deste sensor e salvamento dos valores, utilizou-se o sistema de aquisição de dados CR-5.000 e, durante os ensaios de perda de potência relativa, a taxa de aquisição dos dados foi de 33,33 Hz (uma leitura a cada 0,03 segundos).

O gráfico da rotação (rpm) pelo tempo de ensaio foi visualizado e processado no programa Catman Easy-AP 3.3.5, no qual foram identificados os pontos de aplicação da carga,

que correspondem a queda abrupta da rotação, em cada avaliação. Para análise, foram selecionados dois intervalos de 5 segundos, um anterior e outro posterior à aplicação da carga, de forma a se obter duas curvas. Este tempo foi escolhido para estabilização da rotação. A subtração das áreas das duas curvas obtidas corresponde a uma nova curva, cujo valor máximo corresponde ao número de rotações (em rpm) perdidas pelo motor em 5 segundos, decorrente da alteração da carga; quanto maior este valor, maior a perda de potência relativa. O cálculo da área sob as curvas (integrais) e as subtrações também foram realizados no mesmo software. Realizaram-se dez repetições em cada avaliação de perda de potência relativa nos sete tempos de ensaio.

Os dados obtidos para a perda de potência relativa foram organizados em planilha no Microsoft Office Excel. Novamente as repetições foram ordenadas crescentemente em blocos, devido à não casualização dos dados. Para análise estatística, utilizou-se o programa SisVar 5.6, realizando-se análise de variância com delineamento em blocos com esquema de parcela subsubdividida no tempo 2x3x7 (dois combustíveis, três avaliações de perda de potência relativa e sete tempos), considerando os erros da não casualização de todos os fatores, e posterior teste de Tukey para comparação das médias dos tratamentos. Realizou-se análise das interações para determinar a influência dos três fatores em questão sobre a perda de potência relativa. Foram testadas a normalidade e a homocedasticidade dos dados, utilizando o programa computacional BioEstat 5.0 e o Microsoft Office Excel, respectivamente.

Após análise estatística, as perdas de potência relativas obtidas foram convertidas através da equação 2:

$$PP = PP' \cdot (60s)^{-1} \quad (2)$$

Onde PP é a perda de potência relativa (em rotações ou número de voltas perdidas em 5 segundos até a retomada da estabilização da rotação) e PP' é o valor de perda de potência relativa obtido na análise estatística (em rpm s).

4.2.3 Determinação da potência teórica e eficiência térmica

A eficiência térmica é a razão entre a potência de saída do motor e a energia fornecida pelo combustível (PRADHAN; RAHEMAN; PADHEE, 2014). Como neste estudo a potência de saída no motor não foi medida, foi calculada a eficiência térmica do conjunto motor-gerador nos regimes com aplicação de carga conhecida, indicando o quanto da potência fornecida pelo

combustível foi convertida em potência elétrica pelo conjunto. A equação 3, sugerida por Wander et al. (2011), fornece a eficiência térmica (η).

$$\eta = (P.(c.PCS)^{-1}).100 \quad (3)$$

Onde:

- P é a potência absorvida no banco de cargas (kW);
- c é o consumo em massa por tempo (kg s^{-1}); e
- PCS é o poder calorífico superior (kJ kg^{-1}) do combustível utilizado.

O denominador da equação corresponde à potência teórica fornecida pelo combustível ao motor durante a combustão, considerando que todo o combustível injetado sofreu combustão, e foi calculado primeiramente. Para tal, os valores de consumo utilizados foram as médias de cada um dos seis blocos dos regimes sob carga para os dois tratamentos analisados. Desta forma, optou-se por diluir o efeito do tempo e simplificar os resultados, pois cálculos realizados nos dados de entrada alteram sua distribuição e as medidas de dispersão do mesmo, inserindo erros não estimáveis. Os consumos médios obtidos foram multiplicados pelo PCS obtido experimentalmente, obtendo-se um total de 6 repetições da potência teórica fornecida pelo combustível nos dois regimes analisados para este caso.

Para comparação das médias obtidas para a potência teórica nos dois tratamentos realizou-se análise pelo teste “t”, utilizando o programa computacional BioEstat 5.0. Com o valor médio da potência teórica calculou-se a eficiência térmica do conjunto motor-gerador nos dois tratamentos em cada regime de trabalho sob carga. Os cálculos e processamento dos dados foram realizados em planilha do Microsoft Office Excel.

4.2.4 Análise do lubrificante

Para analisar as condições e a contaminação do óleo lubrificante com a utilização de óleo de crambe pré-aquecido como combustível, o lubrificante foi amostrado com equipamento e recipiente específicos e sem reposição do volume retirado, a cada 15 horas de funcionamento do motor, tendo como tempo zero a troca do lubrificante. Realizou-se a retirada da amostra sempre ao finalizar as avaliações de consumo e perda de potência relativa nos dois tratamentos e após o desligamento do motor, pois o óleo deveria ser retirado ainda quente do reservatório. Houve substituição completa do óleo lubrificante restante no cárter, por óleo de mesma origem do utilizado inicialmente, com 50 horas de ensaio, conforme indicação do fabricante, e prosseguiu-se com o mesmo método; portanto, a amostragem sequente se deu em 65 horas. Foi

separada também, como testemunha, uma amostra do lubrificante sem uso, obtida diretamente da embalagem do óleo lubrificante, ou seja, sem entrar em contato com o motor, totalizando sete amostras, de 0,2 L cada.

As amostras de lubrificante foram encaminhadas para laboratório específico, para realização das análises, a Laboroil Ltda, em Belo Horizonte – MG; os parâmetros avaliados, assim como o método utilizado pelo laboratório em cada análise, constam na Tabela 8.

Tabela 8 - Análises realizadas nas amostras de lubrificante, segundo Laboroil Ltda

Variável	Norma	Variável	Norma
Fuligem	ASTM D7686	Zinco (Zn)	ASTM D5185
Viscosidade a 40 °C	ASTM D445	Estanho (Sn)	ASTM D5185
Diluição	ASTM D3524	Molibdênio (Mo)	ASTM D5185
Água	Laboroil	Níquel (Ni)	ASTM D5185
Índice de Precipitação	ASTM D91	Cálcio (Ca)	ASTM D5185
T B N	ASTM D4739	Sódio (Na)	ASTM D5185
Insolúveis de Pentano	ASTM D4055	Prata (Ag)	ASTM D5185
Dispersância	ASTM D7899	Boro (Bo)	ASTM D5185
Índice de contaminação	ASTM D7900	Bário (Ba)	ASTM D5185
Perda Ponderada	ASTM D7901	Magnésio (Mg)	ASTM D5185
Oxidação	ASTM D7889	Manganês (Mn)	ASTM D5185
Nitratação	ASTM D7889	Fósforo (P)	ASTM D5185
Sulfatação	ASTM D7889	Titânio (Ti)	ASTM D5185
Alumínio (Al)	ASTM D5185	Vanádio (V)	ASTM D5185
Cobre (Cu)	ASTM D5185	Fuligem/Produtos de Oxidação	ASTM 7684
Cromo (Cr)	ASTM D5185	Óxido de silício	ASTM 7684
Ferro (Fe)	ASTM D5185	Liga Ferrosa >5<15 µm	ASTM 7684
Silício (Si)	ASTM D5185	Liga Ferrosa >15<70 µm	ASTM 7684
Chumbo (Pb)	ASTM D5185	Índice de Partículas Ferrosas (IPF)	Laboroil

Fonte: A autora

Como no ensaio realizado o motor funcionou predominantemente com óleo de crambe, as amostras indicam o impacto sobre o lubrificante com o uso deste combustível e em condições severas de trabalho, devido à operação sob demanda de 51% da potência nominal do motor. Não foi efetuada comparação com amostras de lubrificante utilizando somente petrodiesel como combustível. A discussão dos resultados foi feita com base na literatura existente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 VISCOSIDADE, PODER CALORÍFICO SUPERIOR E TEMPERATURA DE ADMISSÃO DOS COMBUSTÍVEIS

Os valores encontrados na análise de viscosidade do óleo de crambe encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Viscosidade cinemática do óleo de crambe obtida experimentalmente, em $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$

Viscosidade Cinemática do óleo de crambe a 40 °C	49,41 $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$
Viscosidade Cinemática do óleo de crambe a 100 °C	9,96 $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$
Viscosidade Cinemática máxima do Diesel S500 a 40 °C ¹	5,0 $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$
Viscosidade Cinemática máxima do Biodiesel a 40 °C ²	6,0 $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$

1 – Fonte: (BRASIL, 2013); 2 – Fonte: (BRASIL, 2014)

Fonte: A autora

O aquecimento do óleo de crambe, de 40 para 100 °C, proporciona redução de 79,84% da viscosidade cinemática. Apesar de decrescer significativamente, a viscosidade obtida a 100 °C ainda é superior às viscosidades cinemáticas máximas permitidas para o petrodiesel S500 e para o biodiesel, determinadas pelas ANP 50/2013 (BRASIL, 2013) e 45/2014 (BRASIL, 2014), respectivamente. O valor encontrado para a viscosidade cinemática do óleo de crambe a 40 °C está de acordo com os encontrados por Jasper; Biaggioni e Silva (2013) e Wazilewski et al. (2013), que foram de 49,02 e 49,4 $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$, respectivamente, e pouco inferior ao encontrado por Demirbas (1998), que foi de 53,2 $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$.

Em relação à redução da viscosidade cinemática do óleo com o aumento da temperatura, ao trabalhar com óleo de palma, Almeida et al. (2002) observaram alteração na viscosidade do óleo vegetal de 38,23 para 8,064 $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$, ao aquecê-lo de 40 a 100 °C. Já o óleo de pinhão-manso (*Jatropha curcas*) teve sua viscosidade reduzida de 35,98 para menos de 6,0 $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$, aquecido nesta mesma faixa de temperatura (AGARWAL; AGARWAL, 2007). Viscosidades cinemáticas próximas a 6,0 $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$ também foram obtidas por Martini; Delalibera e Weirich Neto (2012), em que o óleo de soja degomado teve sua viscosidade reduzida de 27,4 para 6,2 $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$ ao ser aquecido de 40 a 90 °C, e por Sonar et al. (2015), que observaram redução da viscosidade do óleo de mahua (*Madhuca indica*) de 37,84 para 6,12 $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$ na mesma faixa de temperatura.

Os resultados obtidos na análise do poder calorífico superior (PCS) dos combustíveis utilizados estão expostos na Tabela 10.

Tabela 10 - Poder calorífico superior obtido experimentalmente do petrodiesel e do óleo de crambe, em MJ kg⁻¹

Petrodiesel	45,73 ± 0,72 MJ kg ⁻¹
Óleo de crambe	41,79 ± 0,36 MJ kg ⁻¹

Fonte: A autora

Os coeficientes de variação (CV) para o PCS foram de 1,59% para o petrodiesel e de 0,87% para o óleo de crambe. O óleo de crambe apresentou PCS 8,62% menor que do petrodiesel. O PCS encontrado para o óleo de crambe é pouco superior aos valores apontados por Demirbas (1998) e Mondal; Basu e Balasubramanian (2008): 40,62 e 40,5 MJ kg⁻¹, respectivamente. O valor também é superior aos obtidos para o biodiesel de crambe nos estudos de Jasper; Biaggioni e Silva (2013), Oliveira e Silva (2013) e Rosa et al. (2014), que encontraram PCS de 40,51, 40,56 e 39,569 MJ kg⁻¹, respectivamente. Segundo Heywood (1988), o poder calorífico dos hidrocarbonetos usualmente utilizados como combustível estão na faixa de 42 a 44 MJ kg⁻¹.

Nas avaliações realizadas a cada 15 horas de ensaio, a temperatura máxima de admissão registrada para o óleo de crambe foi de 120,66 °C e a mínima 74,37 °C, sendo seu valor médio igual a 97,45 °C e o CV foi de 15,7%. Já para o petrodiesel, a temperatura máxima registrada foi 47,8 °C, a mínima 30,65 °C, com temperatura média de admissão de 37,2 °C e CV de 13,3%. As maiores temperaturas de admissão do óleo de crambe registradas ocorreram nos regimes com carga, tal fato pode ser atribuído ao maior fluxo de combustível do aquecedor até a bomba injetora, reduzindo a perda de temperatura do combustível durante o trajeto e elevando sua temperatura acima de 100 °C, pois o aquecedor trabalhava em faixa de temperatura de 155 a 165 °C. Já para o petrodiesel, como este não circula pelo sistema de aquecimento, esta tendência não foi observada.

5.2 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Os valores obtidos nas avaliações de consumo apresentaram distribuição normal pelo teste de D'Agostino e homocedasticidade pelos testes de Cochran e Hartley, com 5% de significância. Embora as análises anteriores não indicassem necessidade de transformação dos dados, devido à presença de valores de pequena grandeza (na ordem de 10⁻²), foi realizada

transformação antes de efetuar a análise de variância (ANOVA). Esta transformação consiste em somar uma constante de valor 1, sendo que esta não altera as medidas de dispersão e de tendência central, não tendo efeito sobre a ANOVA. Esta é indicada quando se trabalha com valores menores que 1, pois, neste caso, o coeficiente de variação calculado não demonstra a realidade das variações, sendo interessante a soma da constante. Desta forma, o CV experimental obtido foi de 0,19%. A ANOVA indicou que todos os fatores e as interações foram significativos ($p < 0,001$), ou seja, o consumo apresentou diferença significativa entre o óleo de crambe e o petrodiesel, entre os regimes de carga e ao longo do tempo de ensaio, e as combinações destes fatores também exerceram influência sobre o consumo, agindo de modo dependente sobre este.

Para realizar o desdobramento da interação tripla, fixou-se o tempo e desdobrou-se o consumo dos combustíveis óleo de crambe (CR) e petrodiesel (PD) para cada regime de operação. O desdobramento fixando os regimes de carga não foi realizado, pois já se sabe que os regimes são diferentes, não havendo lógica na comparação entre eles. Portanto, a diferença significativa já era esperada, dado o fato que o aumento da rotação e da carga aumentam o consumo de combustível.

Na Tabela 11 é possível visualizar os resultados médios de consumo obtidos em cada avaliação. As médias foram convertidas após a ANOVA para g h^{-1} , para melhor visualização dos resultados. As notações de regime utilizadas estão de acordo com a Tabela 7.

Tabela 11 - Média dos consumos de combustível ao longo do tempo nos diferentes regimes de operação [g h^{-1}]

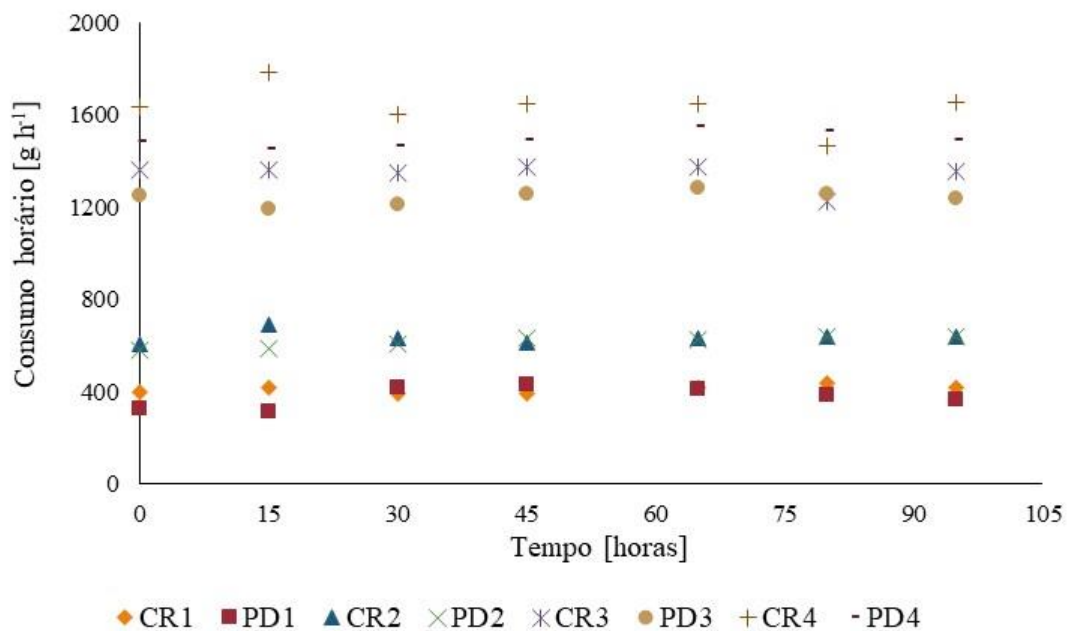
Regime	Consumo de combustível [g h^{-1}]							Média
	0h	15h	30h	45h	65h	80h	95h	
CR1	400,01 b	420,00 b	388,39 a	388,01 a	420,41 a	434,81 a	419,59 b	410,16 b
PD1	325,61 a	314,81 a	415,61 a	429,19 a	408,79 a	381,60 a	362,40 a	376,85 a
CR2	607,99 a	689,21 b	633,60 a	609,60 a	631,61 a	637,99 a	641,21 a	635,88 b
PD2	577,99 a	583,99 a	603,19 a	631,20 a	628,39 a	638,81 a	638,81 a	614,64 a
CR3	1363,99 b	1359,19 b	1347,19 b	1371,60 b	1376,40 b	1222,01 a	1354,39 b	1342,10 b
PD3	1248,00 a	1191,60 a	1209,38 a	1255,20 a	1280,81 a	1260,41 a	1237,20 a	1240,37 a
CR4	1635,34 b	1785,60 b	1604,40 b	1645,20 b	1650,41 b	1468,80 a	1657,61 b	1635,34 b
PD4	1486,01 a	1451,86 a	1468,37 a	1491,82 a	1551,60 a	1530,79 b	1489,20 a	1495,66 a

Letras iguais na coluna para cada regime não apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey, a nível de 5% ($p > 0,05$)

Fonte: A autora

Conforme ANOVA, o consumo de crambe só teve variação significativa no tempo nos regimes com carga ($p < 0,0001$) e para o petrodiesel não houve variação significativa no tempo apenas no regime de aceleração livre ($p > 0,05$). Porém, não foi possível caracterizar tendência dos dados em função do tempo (Figura 10).

Figura 10 - Consumo médio de óleo de crambe e petrodiesel em diferentes regimes de carga a cada 15 horas de ensaio [g h^{-1}]



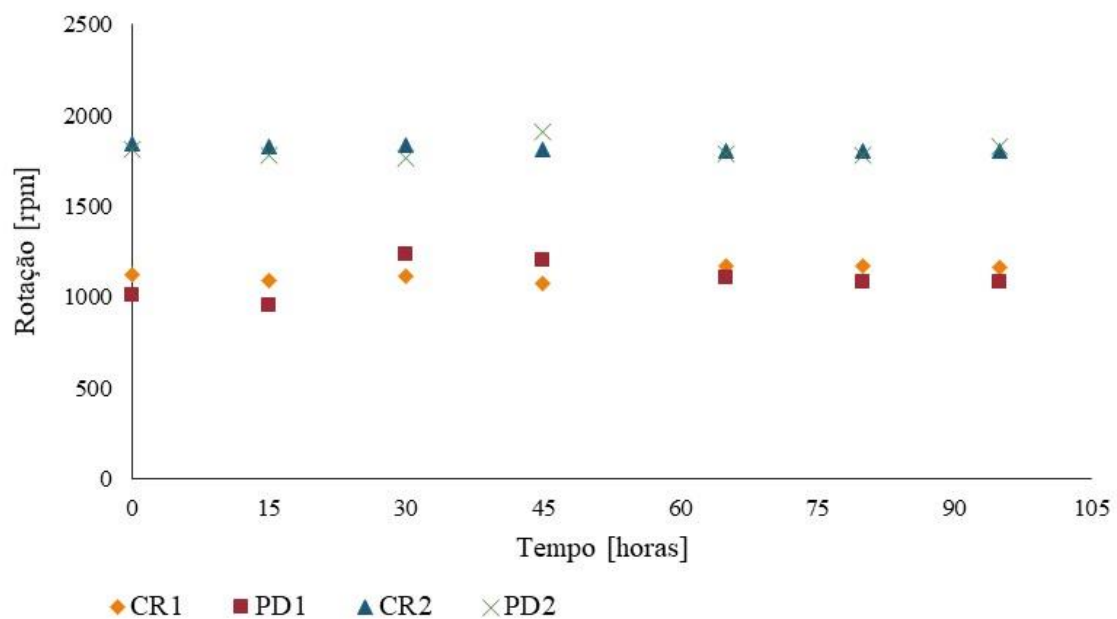
Fonte: A autora

Pode-se observar que o consumo de combustível aumenta com o aumento de carga e aumento da rotação do motor. Nos regimes sem carga, o consumo não apresentou diferença significativa entre os dois combustíveis na maioria das avaliações, principalmente em aceleração livre de carga a 1.800 rpm, em que houve diferença significativa no consumo apenas nas 15 horas, segundo teste de Tukey a nível de 5%. Já nos ensaios com carga houve predominância do maior consumo do óleo de crambe sobre o de petrodiesel, exceto no ensaio de 80 horas, em que provavelmente algum fator externo provocou ruído e interferência na aquisição dos dados. Na média geral dos tempos, em todos os regimes houve diferença significativa entre os consumos para os combustíveis analisados, segundo teste de Tukey, sendo o consumo do óleo vegetal mais elevado que do petrodiesel (Tabela 11). O consumo de crambe foi, em média, 8,84% superior no regime em lenta, 3,46% em 1.800 rpm livre de carga, 8,20% em 1.800 rpm com carga de 51% e 9,34% em 1800 rpm com carga de 66%.

Os resultados são semelhantes aos encontrados por Delalibera et al. (2017) que observaram consumo superior do óleo de crambe pré-aquecido a 100 °C em relação ao petrodiesel em regime sob carga; as médias dos consumos em regime com aplicação de carga de 66% da nominal foram 1.529,06 e 1.472,45 g h⁻¹, respectivamente. Porém, para os regimes em aceleração livre, o consumo de crambe foi menor, sendo a média de seu consumo de 291,94 g h⁻¹ em lenta e 524,28 g h⁻¹ a 1.800 rpm, contra 319,85 e 551,28 g h⁻¹ para o petrodiesel. Da mesma forma, Nwafor (2003) não encontrou diferença significativa entre os consumos de óleo de colza não aquecido e petrodiesel em condições de baixa carga.

As diferenças encontradas entre os consumos dos dois combustíveis analisados nos regimes sem carga podem ser explicadas pela rotação do motor, pois esta era feita através de acelerador manual, sem ajuste fino, podendo ocorrer, portanto, pequenas variações nas rotações entre as diferentes avaliações, mesmo com a manopla do acelerador colocada na mesma posição. As médias das rotações observadas nas avaliações de consumo nos regimes sem carga podem ser visualizadas na Figura 11. Para estes regimes, é possível observar a mesma tendência do consumo, em que maiores rotações correspondem a maior consumo, mais visível na operação em lenta.

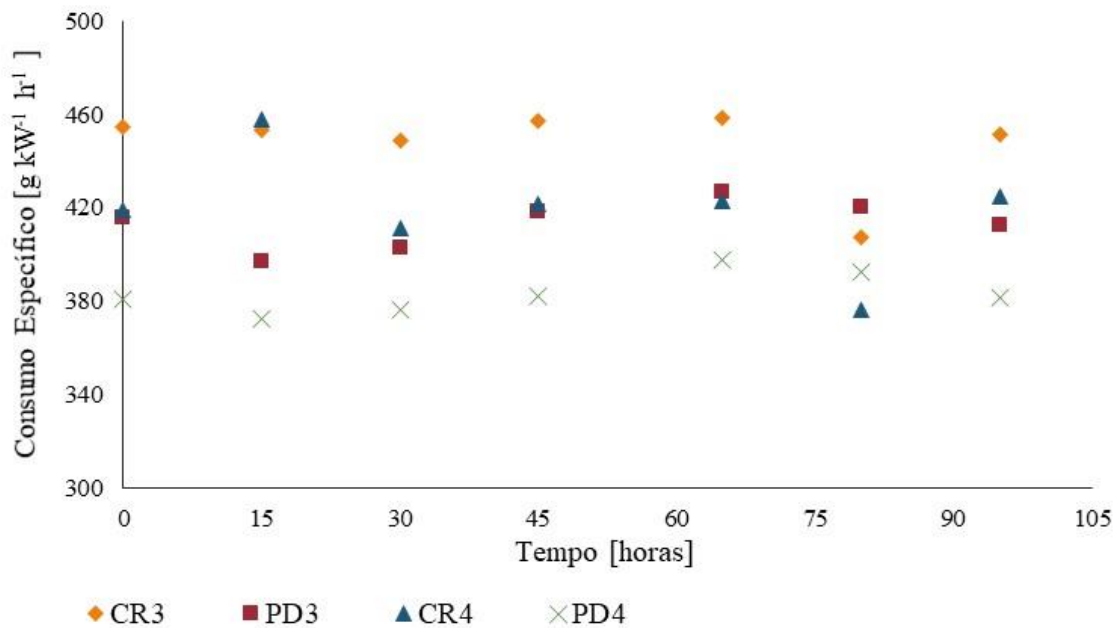
Figura 11 - Rotação média do motor nos regimes sem carga a cada 15 horas de ensaio [rpm]



Fonte: A autora

Os resultados para o consumo específico do conjunto motor-gerador, em $\text{g kW}^{-1} \text{h}^{-1}$, estão representados na Figura 12.

Figura 12 - Consumo específico do conjunto motor-gerador com óleo de crambe e petrodiesel nos regimes sob carga a cada 15 horas de ensaio [$\text{g kW}^{-1} \text{h}^{-1}$]



Fonte: A autora

As médias gerais dos tempos de avaliação dos consumos específicos foram de $447,37 \text{ g kW}^{-1} \text{h}^{-1}$ para o crambe e $413,46 \text{ g kW}^{-1} \text{h}^{-1}$ para o petrodiesel, no regime sob aplicação de carga de 51%, enquanto para a carga de 66% da nominal os consumos médios foram de $419,32 \text{ g kW}^{-1} \text{h}^{-1}$ e $383,50 \text{ g kW}^{-1} \text{h}^{-1}$. É possível observar que o consumo específico é menor para o petrodiesel nos dois regimes analisados e diminui com o aumento da carga nos dois combustíveis. O consumo específico do crambe com carga de 51% da nominal foi, em média, 6,69% maior que o do crambe com aplicação de carga de 66%. Já para o petrodiesel, a diferença no consumo específico entre os dois regimes de carga foi de 7,81%. Esta tendência de redução do consumo específico com o aumento da carga foi relatada por diversos autores (AGARWAL; AGARWAL, 2007; JAIN et al., 2007; PRADHAN; RAHEMAN; PADHEE, 2014; SONAR et al., 2015), que também obtiveram consumo específico do óleo vegetal superior ao do petrodiesel.

Entre os combustíveis, a diferença entre a média de consumo observada foi a mesma do consumo horário nos respectivos regimes de carga: consumo do óleo de crambe 8,20% superior ao do petrodiesel com aplicação da carga de 51% da nominal e 9,34% superior com

carga de 66%. A diferença no consumo se deve ao menor poder calorífico do óleo de crambe em comparação ao petrodiesel, pois maior quantidade de combustível é injetada para manter a entrada de energia no motor (AGARWAL; AGARWAL, 2007). Como pode ser observado na Tabela 10, a diferença entre o conteúdo de energia dos dois combustíveis é próxima à porcentagem do aumento de consumo com a utilização do óleo de crambe.

A diferença observada foi inferior à encontrada por Martini; Delalibera e Weirich Neto (2012), que obtiveram aumento médio de 17% no consumo específico com utilização de óleo de soja degomado pré-aquecido em comparação ao petrodiesel, com aplicação de carga de 60% da nominal. Assim como Wander et al. (2011) encontraram aumento médio de 18,9% no consumo com óleo de soja pré-aquecido a 60 °C. Os resultados obtidos se assemelham mais aos encontrados no trabalho realizado por Pradhan; Raheman e Padhee (2014), cuja diferença entre os consumos específicos do óleo de pinhão-manso (*Jatropha curcas*) pré-aquecido a 70 °C e do petrodiesel foi de 6,53% para carga de 25% e 14,35% para aplicação de carga máxima (100% da nominal). Por outro lado, Almeida et al. (2002) obtiveram aumento máximo no consumo específico de quase 10% em baixas cargas com uso de óleo de palma aquecido, sendo que a diferença em relação ao petrodiesel sofreu pequena redução com o aumento da carga.

Para os dados de retorno não foi realizada análise estatística, pois a incerteza das medidas somadas aos ruídos não permitiu análise. Ao fim do ensaio de longa duração, o reservatório correspondente ao retorno estava com 1,427 kg, cerca de 1% de todo o combustível consumido durante as 100 horas de teste. Portanto, o retorno pode ser considerado desprezível. Também é importante ressaltar que, para o motor utilizado neste trabalho, o retorno para o tanque de armazenamento, ou para o medidor de consumo neste caso, é apenas do bico injetor; o retorno proveniente da bomba injetora volta para sua própria entrada de admissão de combustível, não sendo possível sua coleta para mensuração.

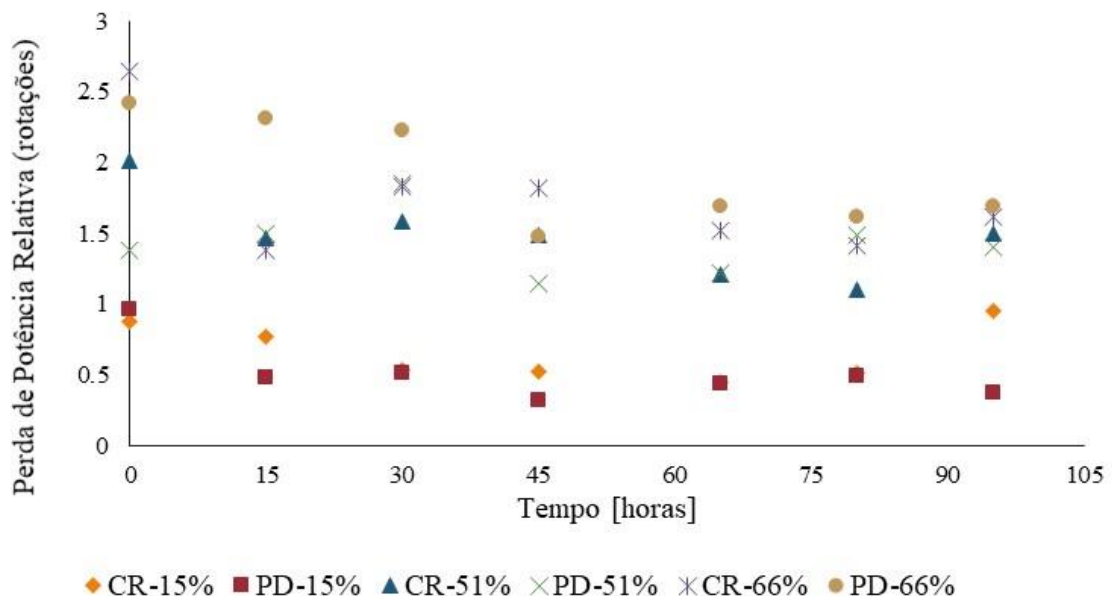
5.3 PERDA DE POTÊNCIA RELATIVA

Os dados obtidos nos ensaios de perda de potência relativa apresentaram distribuição normal pelo teste de d'Agostino-Pearson e homocedasticidade por Cochran e Hartley, com significância de 5%. O CV experimental foi de 11,66%. A ANOVA indicou que todas as interações entre os fatores foram significativas ($p < 0,0001$), ou seja, a perda de potência relativa variou de modo dependente em relação aos fatores combustível, cargas aplicadas e tempo de ensaio.

No desdobramento da interação tripla, fixou-se o tempo e desdobrou-se a perda de potência relativa nos combustíveis óleo de crambe (CR) e petrodiesel (PD) para cada condição de aplicação de carga (Figura 13). Não foi analisado o desdobramento fixando-se a carga, pois já se sabe que as cargas são diferentes, não havendo lógica nesta comparação, sendo realizada na ANOVA apenas para efeito das fontes de variação.

A análise de variância indicou que houveram diferenças significativas na perda de potência relativa ao longo do tempo em todas as condições para os dois combustíveis. Contudo, não foi observado nenhum ajuste de modelo entre a variável com o tempo (Figura 13). A instabilidade dos dados de perda de potência relativa pode ser explicada por fatores não controlados, como o mecanismo de reserva de torque do motor ou fatores ambientais, como umidade e pureza do ar, que podem causar pequenas variações aleatórias no funcionamento do motor, além de efeitos de ruído no sistema de aquisição causados por campos eletromagnéticos do gerador e efeitos de vibração no ambiente de ensaio. Após análise estatística, os dados foram convertidos para número de rotações perdidas em 5 segundos até a retomada da estabilização da rotação.

Figura 13 - Perda de potência relativa, em número de rotações perdidas em 5 segundos, observada nos tratamentos óleo de crambe e petrodiesel a cada 15 horas de ensaio e em diferentes aplicações de carga



CR-15%: óleo de crambe com aplicação de carga de 66% sobre carga de 51%; PD-15%: petrodiesel com aplicação de carga de 66% sobre carga de 51%; CR-51%: óleo de crambe com aplicação de carga de 51% sobre 1.800 rpm livre de carga; PD-51%: petrodiesel com aplicação de carga de 51% sobre 1.800 rpm livre de carga; CR-66%: óleo de crambe com aplicação de carga de 66% sobre 1.800 rpm livre de carga; PD-66%: petrodiesel com aplicação de carga de 66% sobre 1.800 rpm livre de carga.

Fonte: A autora

Devido a esta instabilidade dos dados, discutiu-se somente as médias gerais dos valores obtidos para a perda de potência relativa em cada condição de aplicação de carga, decorrentes do desdobramento da interação dupla entre o combustível e as cargas utilizadas. Os resultados encontram-se na Tabela 12.

Tabela 12 - Perda de potência relativa média, dada em número de rotações perdidas nos 5 s imediatos a entrada da carga, para as condições de carga analisadas

	Carga aplicada		
	15%	51%	66%
Crambe	0,66 b	1,48 b	1,74 a
Petrodiesel	0,51 a	1,43 a	1,92 b

Letras diferentes na coluna apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey, a nível de 5% ($p < 0,05$)

Fonte: A autora

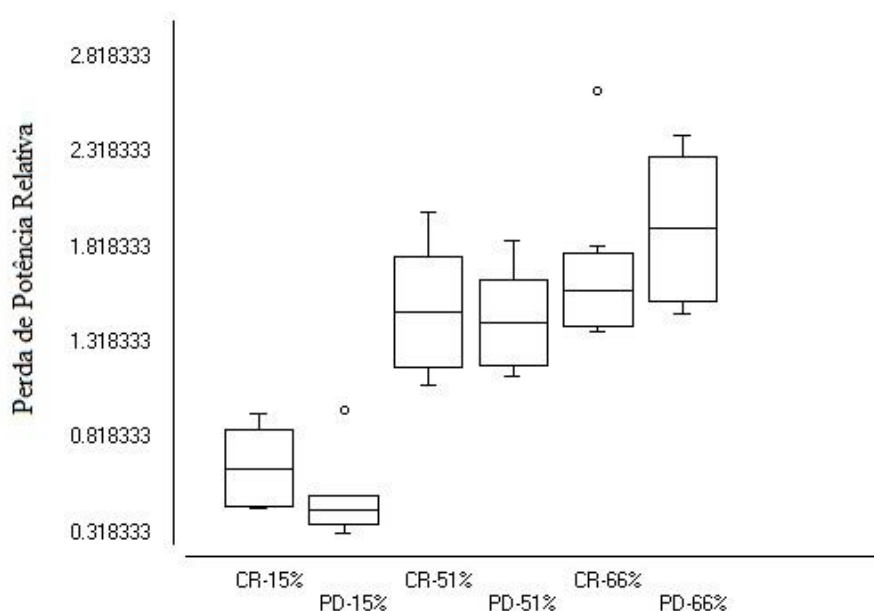
Pode-se observar que a perda de potência relativa aumentou com o aumento da carga aplicada, como era esperado. Em média, houve diferença significativa pelo teste de Tukey a nível de 5% ($p < 0,05$) entre os dois combustíveis em todas as condições de aplicação de carga (Tabela 12). A perda de potência relativa foi maior para o óleo de crambe nas condições em que houve aplicação de carga adicional de 15% sobre carga de 51% da nominal e inserção de carga de 51% sobre regime de 1.800 rpm livre de carga, sendo 29,41% e 3,50% superior à do petrodiesel, respectivamente; já para aplicação de carga de 66% da nominal sobre 1.800 rpm livre de carga, a perda de potência relativa do óleo de crambe foi 9,38% inferior à do petrodiesel (Tabela 12).

Os valores de perda de potência relativa obtidos para o óleo de crambe tiveram maior variação que os obtidos para o petrodiesel nas avaliações em que houve aplicação de carga adicional de 15% e entrada de carga de 51% da potência nominal (Figura 14). A menor variação de perda de potência relativa observada ocorreu para o tratamento petrodiesel na condição em que se aumentou a carga aplicada em 15% e a maior variação ocorreu também para o petrodiesel, quando se aplicou carga de 66% da nominal, condição em que o óleo de crambe apresentou a menor variação dos dados. A maior variação para a perda de potência relativa do óleo de crambe foi para a demanda de 51% da potência nominal. A menor variação dos dados correspondentes ao petrodiesel podem indicar maior estabilidade com o uso deste combustível em alguns regimes de funcionamento.

Os resultados das médias de perda de potência relativa observados diferem um pouco dos resultados obtidos por Delalibera (2014), em que os óleos vegetais estudados apresentaram maior perda de potência relativa que o petrodiesel, em ensaio feito apenas com aplicação de

carga de 66% da potência nominal do motor sobre 1.800 rpm livre de carga. Neste estudo, o tratamento crambe com temperatura de admissão de 60 °C foi o único que não apresentou diferença em comparação ao petrodiesel, sendo que as perdas de potência relativas foram de 1,76 e 1,78 rotações perdidas em 5 segundos (105,53 e 106,7 rpm em 5 s), respectivamente. O pré-aquecimento aumentou a perda de potência relativa, que foi de 1,95 (117,29 rpm em 5s) para o crambe pré-aquecido a 100 °C. Porém, o autor relata que o motor apresentou problemas de funcionamento quando alimentado com os óleos vegetais pré-aquecidos e em regime de carga, o que pode ter ocasionado aumento na perda de potência relativa.

Figura 14 - Box-plot de médias, máximo, mínimo e desvios para a perda de potência relativa nas diferentes condições de aplicação de carga



Fonte: A autora

A utilização de óleos vegetais como combustível usualmente causa redução na potência efetiva fornecida pelos motores em comparação com o petrodiesel. Maziero et al. (2007) observaram redução média de 8,0% na potência do motor com uso de óleo de girassol em ensaio de curta duração à potência máxima. A maior redução de potência observada por Altin; Çetinkaya e Yücesu (2001) foi em torno de 18%, para as operações com óleo de algodão e óleo de soja aquecidos a 80 °C, em comparação com a potência máxima obtida com petrodiesel. Já Wander et al. (2011) encontraram redução de apenas 4% na potência média para óleo de soja a 30 °C, e esta redução diminuiu para 1,7% ao aquecer o óleo a 60 °C.

A redução de potência pode ser ocasionada pela maior viscosidade, que promove problemas de injeção de combustível, e menor poder calorífico dos óleos vegetais (ALTIN; ÇETINKAYA; YÜCESU, 2001). Entretanto, em motor de injeção indireta, o óleo de soja puro aquecido a 68 °C apresentou potência em média 6,7% superior ao petrodiesel, e em altas rotações obteve-se potência 12,7% superior (SCHLOSSER; MACHADO, CAMARGO, 2007).

5.4 POTÊNCIA TEÓRICA E EFICIÊNCIA TÉRMICA

Os resultados médios da potência teórica fornecida pelo combustível durante a combustão nos regimes com carga, necessário para a determinação da eficiência térmica, encontram-se na Tabela 13.

Tabela 13 - Potência teórica média fornecida pelos combustíveis nos regimes sob carga, em kW

Potência teórica média fornecida pelo combustível [kW]			
1.800 rpm com 51% de carga	Crambe	15,580	p=0,5524
	Petrodiesel	15,756	
1.800 rpm com 66% de carga	Crambe	18,983	p=0,9599
	Petrodiesel	18,999	

Teste “t” em que $p > 0,05$ não representa diferença significativa entre as médias

Fonte: A autora

Pode-se observar que não houve diferença significativa para as médias de potência teórica fornecida pelos dois combustíveis, segundo teste “t”, sendo a variação média entre as potências teóricas de 1,1% com aplicação de carga de 51% da nominal e 0,08% para a carga de 66% (Tabela 13). Esta semelhança entre os valores de potência teórica se deve à compensação do menor poder calorífico do óleo de crambe através do aumento no consumo, de forma que a combustão dos dois combustíveis em estudo fornece aproximadamente a mesma quantidade de energia.

Como comentado anteriormente, operações com óleo vegetal como combustível normalmente provocam redução na potência de saída do motor. Entretanto, apesar da impossibilidade de determinação, neste estudo, da potência efetiva do motor, mensurada no eixo virabrequim, as diferenças encontradas nas perdas de potência relativas indicam que, mesmo que as energias de entrada do petrodiesel e do crambe sejam similares, há diferença na resposta do motor. É importante ressaltar que o cálculo da potência teórica fornecida pela

combustão corresponde à combustão completa do combustível, e, portanto, não representa necessariamente a realidade, já que nem toda energia fornecida pelo combustível ao motor é aproveitada, uma vez que o processo de combustão é incompleto (HEYWOOD, 1988). Adicionalmente, combustíveis diferentes necessitam de condições diferentes para a combustão completa e apresentarão diferença no comportamento durante a combustão, mesmo quando utilizados no mesmo motor, devido a diferentes viscosidades e composição físico-química do combustível, razão de compressão e mistura ar-combustível ideais, entre outros, gerando consequentemente desempenhos diferentes do motor.

Desta forma, a eficiência térmica calculada corresponde ao conjunto motor-gerador, pois, utilizou-se a potência absorvida pelo banco de carga e não a potência real de saída do motor, isto é, considerou-se que o motor tem a capacidade de fornecer potência máxima de 5,88 kW a 1.800 rpm, segundo dados do fabricante, e o banco de cargas resistivo foi aferido e absorve 3,0 e 3,9 kW de potência do motor, gerando as cargas de 51 e 66%, respectivamente. Também foi considerada a referência de rendimento de fábrica do gerador, portanto, ainda pode haver perdas entre a saída do motor (virabrequim) e a saída do gerador. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 14.

Tabela 14 - Estimativa de eficiência térmica do conjunto motor-gerador nos regimes sob carga para os dois combustíveis

Eficiência térmica		
1.800 rpm com 51% de carga	Crambe	19,26%
	Petrodiesel	19,04%
1.800 rpm com 66% de carga	Crambe	20,54%
	Petrodiesel	20,53%

Fonte: A autora

As eficiências térmicas obtidas, assim como as potências teóricas fornecidas, são muito próximas para os dois tratamentos. A eficiência térmica do conjunto motor-gerador alimentado com óleo de crambe é 1,16% e 0,05% maior que a eficiência com petrodiesel para os regimes com 51 e 66% da carga, respectivamente.

Os valores de eficiência térmica foram próximos aos encontrados para o conjunto motor-gerador utilizado nos trabalhos de Silva et al. (2013) e Rosa et al. (2014). Os primeiros autores observaram aumento de 2% na eficiência térmica com uso de biodiesel: a maior eficiência foi de 18% para o petrodiesel, 19,75% para o biodiesel de girassol e 19,52% para o

biodiesel de soja. Já Rosa et al. (2014) não constataram diferença estatística entre as eficiências do petrodiesel e do biodiesel de crambe, sendo que esta foi em média 0,76% superior à do petrodiesel, e a eficiência térmica máxima obtida também foi em torno de 20%.

O aumento da eficiência térmica com o uso de óleos vegetais também foi observado por Yilmaz e Morton (2011b), que obtiveram aumento na eficiência dos dois geradores diesel testados com a utilização de óleos vegetais pré-aquecidos em comparação ao petrodiesel. Assim como Nwafor (2003), que também encontrou maior eficiência térmica para o óleo de colza em comparação ao petrodiesel, porém o óleo vegetal não aquecido teve maior eficiência que o aquecido a 70 °C e ambos tiveram eficiência maior que o petrodiesel. Em contraponto, a maioria dos autores relata que ocorre aumento da eficiência térmica com o pré-aquecimento do combustível (AGARWAL; AGARWAL, 2007; CHAUHAN et al., 2010; JAIN et al., 2017; SONAR et al., 2015; YILMAZ; MORTON, 2011b).

O aumento da temperatura dos óleos vegetais com o pré-aquecimento aumenta o número de cetano, pois a redução de viscosidade melhora as características do jato e a evaporação do combustível, além das altas temperaturas favorecerem a ocorrência de rápidas reações químicas, reduzindo o atraso de ignição (PRADHAN; RAHEMAN; PADHEE, 2014; RYAN III; DODGE; CALLAHAN, 1984).

Alguns trabalhos relatam redução da eficiência térmica com a utilização dos óleos vegetais. Como Chauhan et al. (2010) que obtiveram eficiência térmica de 28,51% para o petrodiesel e de 27,69% para o óleo de pinhão-mansão, e Pradhan; Raheman e Padhee (2014), que para carga máxima encontraram eficiências de 29,88% para o petrodiesel, 29,15% para o óleo de pinhão-mansão não aquecido e 28,33% para o óleo aquecido, observando reduções de 2,44% e 5,18% na eficiência térmica. As divergências nos resultados comprovam que a composição físico-química dos óleos vegetais e o tipo de motor utilizado no estudo exercem grande influência no desempenho dos motores.

5.5 ANÁLISE DO LUBRIFICANTE

Os resultados obtidos nas análises do óleo lubrificante encontram-se nas Tabelas 15 e 16. Os laudos de cada amostra, dados pelo laboratório especializado, estão reproduzidos no Quadro 1.

O óleo lubrificante sofreu variação na viscosidade de até 4% em relação à testemunha, (Tabela 15). Este é um resultado muito significativo, pois estudos anteriores feitos em motores

diesel alimentados com óleos vegetais e misturas deste com petrodiesel indicam grande variação na viscosidade do lubrificante, seja por espessamento ou diluição.

Tabela 15 - Resultados das análises das condições das amostras de óleo lubrificante, fornecidos pela Laboroil Ltda

Tempo de ensaio	0 h	15 h	30 h	45 h	Troca do óleo lubrificante	65 h	80 h	95 h
Tempo da amostra	0 h	15h	30 h	45 h		15 h	30 h	45 h
Fuligem [%]	0,1	0,1	0,1	0,1		0,1	0,1	0,1
Viscosidade 40 °C (mm ² s ⁻¹)	102,0	105,4	103,1	103,7		106,2	104,4	101,7
Diluição [%]	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0
Água [%]	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00
Ind. Precipitação [%]	0,05	0,10	0,10	0,15		0,05	0,10	0,10
T B N [mgKOH g ⁻¹]	8,23	8,27	8,50	8,95		8,63	8,60	8,03
Insolúveis de Pentano	0,04	0,01	0,02	0,03		0,00	0,03	0,02
Dispersância	100	77	75	83		76	75	74
Índice contaminação	0,1	0,1	0,3	0,2		0,1	0,2	0,3
Perda Ponderada	0	2	8	3		2	5	8
Oxidação [Abs]	5,861	7,054	8,366	9,746		7,177	8,684	10,110
Nitratação [Abs]	5,185	5,647	6,074	6,489		5,660	6,132	6,448
Sulfatação [Abs]	12,461	13,701	14,388	15,421		15,693	14,656	16,086
Fuligem/ Prod. de Ox.	Normal	Normal	Normal	Normal		Normal	Normal	Normal
Óxido de silício	Normal	Traços	Traços	Limite		Normal	Traços	Traços
Lig. Ferrosa >5<15 µm	Normal	Atenção	Atenção	Limite		Traços	Atenção	Atenção
Lig. Ferrosa >15<70 µm	-	-	Traços	Traços		-	-	-
Índice de partículas ferrosas	6	59	103	180		61	95	115

Fonte: A autora

Aumento acentuado na viscosidade do lubrificante foi observado por Maziero et al. (2007) em motor Diesel funcionando com óleo de girassol bruto sem pré-aquecimento, causando danos e entupimento no sistema de lubrificação. Segundo autores, o aumento na viscosidade ocorreu devido à contaminação do lubrificante por substâncias resultantes da combustão incompleta. Por outro lado, Delalibera (2009) observou redução da viscosidade do lubrificante, apesar da presença de sólidos em suspensão, com o uso de óleo girassol com e sem pré-aquecimento como combustível, estas reduções foram de 14,1 e 13,6%, respectivamente. Redução da viscosidade do lubrificante também foi encontrada no estudo de Almeida et al. (2002) com o uso de óleo de palma pré-aquecido como combustível, e nos trabalhos de Inoue et al. (2009) e Delalibera et al. (2012) ao utilizarem misturas de óleo vegetal e petrodiesel pré-

aquecidas. A diluição do lubrificante geralmente é causada por problemas de injeção e combustão, devido à atomização deficiente e baixa volatilidade dos óleos vegetais (ALMEIDA et al., 2002; RYAN III; DODGE; CALLAHAN, 1984).

Tabela 16 - Resultados das análises de elementos contaminantes presentes nas amostras de óleo lubrificante, fornecidos pela Laboroil Ltda

Tempo de ensaio	0 h	15 h	30 h	45 h		65 h	80 h	95 h
Tempo da amostra	0 h	15h	30 h	45 h		15 h	30 h	45 h
Alumínio [ppm]	0,10	3,80	7,62	12,13	Troca do óleo lubrificante	4,96	7,67	11,99
Cobre [ppm]	0,10	3,50	6,24	8,71		3,40	6,21	8,86
Cromo [ppm]	0,10	2,50	4,32	6,56		1,92	3,47	5,97
Ferro [ppm]	0,73	150,0	202,9	256,4		105,2	145,6	182,8
Silício [ppm]	7,47	8,43	10,04	12,60		8,88	9,88	12,38
Chumbo [ppm]	0,10	14,28	19,92	22,79		10,80	14,62	16,68
Zinco [ppm]	1385	1379	1375	1376		1427	1373	1396
Estanho [ppm]	0,10	0,44	1,70	3,19		0,13	1,26	2,54
Molibdênio [ppm]	0,10	0,00	0,10	0,10		0,10	0,10	0,10
Níquel [ppm]	0,10	0,10	0,10	0,10		0,10	0,10	0,10
Cálcio [ppm]	1288	1300	1316	1350		1356	1326	1378
Sódio [ppm]	0,10	0,25	0,58	1,15		0,60	0,78	0,97
Prata [ppm]	0,10	0,10	0,10	0,10		0,10	0,10	0,10
Boro [ppm]	0,51	0,69	0,75	0,84		0,62	0,63	0,71
Bário [ppm]	0,10	0,10	0,10	0,10		0,10	0,10	0,10
Magnésio [ppm]	1067	1076	1087	1106		1118	1088	1118
Manganês [ppm]	0,10	0,10	0,37	0,87		0,10	0,08	0,50
Fósforo [ppm]	1191	1180	1178	1189		1224	1171	1204
Titânio [ppm]	0,10	0,10	0,10	0,10		0,10	0,10	0,10
Vanádio [ppm]	0,10	0,10	0,10	0,10		0,10	0,10	0,10

Fonte: A autora

Outro fator relevante é a não variação do teor de fuligem, produto da combustão incompleta e, portanto, um indicador da eficiência da combustão, cuja presença no lubrificante pode ocasionar aumento da viscosidade e desgaste abrasivo do motor (GEORGE et al., 2007; HASANNUDIN et al., 2016). Juntos, estes resultados indicam a combustão completa do óleo de crambe, fato que pode estar ligado ao pré-aquecimento e à utilização de motor com injeção indireta. Em estudo realizado por Fuls; Hawkins e Hugo (1984) não foram observados

problemas de funcionamento e carbonização em motores com sistema de injeção indireta alimentados com óleo de girassol degomado, se provando mais tolerantes à qualidade do combustível que os motores de injeção direta. Isto se deve ao maior grau de atomização requerido pelos motores de injeção direta (NWAFOR, 2003; RYAN III; DODGE; CALLAHAN, 1984).

Quadro 1 - Laudos das amostras de lubrificante, fornecidos pela Laboroil Ltda

0 h (amostra de óleo sem uso)	O produto encontra-se em condições de uso e as análises indicam desempenho satisfatório do sistema lubrificado.
15 h	A amostra apresentou teor de ferro elevado, além de presença de material metálico em partículas maiores que 5 µm, que podem significar processo de desgaste anormal. Trocar o óleo.
30 h	O produto não se encontra em condições de uso. O teor de ferro voltou a se apresentar elevado. Aconselha-se a troca do óleo. Observada ainda pequena incidência de material de ligas ferrosas.
45 h	A amostra recebida apresentou presença extremamente alta de material abrasivo de granulometria na faixa de 5 a 100 µm e cavacos metálicos com características morfológicas de desgaste anormal no sistema. O teor de ferro está bastante elevado. A contaminação por óxido de silício (areia) pode ter acontecido no momento da coleta da amostra. Trocar o óleo.
Troca do óleo lubrificante	
65 h	Presença de ferro acima do que pode ser considerado normal, pode significar desgaste em anéis de segmento, bomba de óleo, comando de válvulas, cilindro, virabrequim, etc. No entanto, em terrenos ricos em minério de ferro, os teores deste metal podem representar a entrada de sujidades do ambiente externo para o sistema. Neste caso, é necessário inspecionar condições do sistema de admissão de ar.
80 h	A amostra apresentou teor de ferro elevado, além de presença de material metálico em partículas maiores que 5 µm, podem significar processo de desgaste anormal. Trocar o óleo.
95 h	A amostra apresentou teor de ferro elevado, além de presença de material metálico em partículas maiores que 5 µm, podem significar processo de desgaste anormal. Trocar o óleo.

Fonte: A autora

Não foi observada contaminação por água e o índice de precipitação, presença de componentes insolúveis no lubrificante, está abaixo do valor máximo admissível, que é de 1% (MAZIERO et al., 2007).

O TBN, ou número de basicidade total, é um indicativo do conteúdo de reserva alcalina presente no lubrificante e sua capacidade de neutralizar os ácidos formados durante a combustão. O resultado obtido na análise indica boa condição do lubrificante em relação ao

TBN, pois o óleo deve ser rejeitado quando seu valor atingir metade do valor inicial (MATHAI et al., 2012) e as amostras analisadas sofreram pouca variação deste aspecto, sendo que esta foi de no máximo 8,75% em relação à testemunha. Segundo Pereira (2015), a redução do TBN resulta em aumento da oxidação e da viscosidade do lubrificante, sendo um indicador do tempo de vida útil restante.

A oxidação ocorre quando os compostos orgânicos do lubrificante são expostos a altas temperaturas e pressões na presença de oxigênio, reagindo quimicamente e formando compostos que podem ser dissolvidos ou permanecer suspensos devido aos aditivos presentes no óleo. A oxidação pode ocasionar aumento da acidez do óleo lubrificante, causando corrosão, e de sua viscosidade (ROBINSON, 2000).

De forma semelhante, a nitratação ocorre pela formação de óxidos de nitrogênio quando compostos orgânicos são expostos a altas temperaturas e pressões na presença de nitrogênio e oxigênio. Os produtos da nitratação causam espessamento do óleo e são a principal causa de acumulação de verniz ou laca. O aumento da nitratação do óleo pode indicar operação do motor com razão ar-combustível incorreta (ROBINSON, 2000).

Já a sulfatação é causada pela oxidação dos compostos que contém enxofre encontrados nos óleos lubrificantes, formando óxidos de enxofre, que aumentam a produção de verniz e borras e geralmente degradam o lubrificante. Os produtos da sulfatação também podem reagir com a água formada durante a combustão e produzir ácidos inorgânicos, como o ácido sulfúrico (H_2SO_4), que são neutralizados pela reserva alcalina do lubrificante, causando redução do TBN (ROBINSON, 2000).

Portanto, o aumento dos níveis de oxidação, nitratação e sulfatação com o tempo de utilização do óleo lubrificante é um processo normal da operação do motor e só indica problemas se ocorre em taxas elevadas, indicando contaminação ou degradação acentuada do lubrificante.

Para a maioria dos elementos contaminantes houve aumento dos conteúdos (Tabela 16), estes contaminantes podem ser advindos de desgaste do motor ou de contaminantes externos, como o ar atmosférico admitido ou do próprio combustível. Os elementos alumínio, cobre, cromo, ferro, chumbo e estanho são elementos característicos de desgaste das partes internas do motor (HASANNUDDIN et al., 2016; SILVA, 2006), pois estão presentes na composição de vários componentes.

O alumínio também pode ter sua origem em contaminantes externos, pois, juntamente com o silício, presente no ambiente em altas concentrações, são os principais contaminantes provenientes do ar atmosférico, que entram na forma de sedimentos (poeira) através do sistema

de admissão (HASANNUDDIN et al., 2016; RAPOSO JR et al., 2011; SILVA, 2006). No caso de regiões com solo rico em minério de ferro, como é o caso de Londrina, na região norte do Paraná, o ferro também pode ser originário da entrada de poeira pelo sistema de admissão, como foi sugerido em laudo pelo próprio laboratório (Quadro 1). Para o motor utilizado, o filtro de ar do sistema de admissão é a banho de óleo, filtro de baixa qualidade e pouco eficiente, que permite a passagem de poeira, gerando contaminação por ferro, alumínio e silício no lubrificante. Adicionalmente, o sistema de lubrificação do motor não possui filtro de óleo para reter estes contaminantes, que tendem a provocar desgaste nas partes internas do motor.

Considerando as 100 horas de ensaio, a temperatura média do óleo lubrificante foi de 57,46 °C e a maior temperatura registrada foi de 78,17 °C, temperaturas bem inferiores a 120 °C, temperatura crítica em que o óleo lubrificante perde sua capacidade de lubrificação. Portanto, não houve perda de lubricidade decorrente do aumento da temperatura do lubrificante, que reduz sua viscosidade e impossibilita a lubrificação, durante a operação do motor, fator que poderia aumentar a ocorrência de desgaste.

Alguns elementos analisados, além de poderem ser originários de contaminantes, são adicionados ao lubrificante como aditivos, sendo o caso do zinco, cálcio, magnésio e fósforo, que aparecem em grandes concentrações nas análises, acima de 1.000 ppm. Estes elementos são adicionados para melhorar as propriedades do lubrificante, agindo principalmente como protetores das superfícies metálicas contra desgaste e corrosão e como antioxidantes (GEORGE et al., 2007; HASANNUDDIN et al., 2016; PINHEIRO et al., 2017).

Como contaminantes, os elementos fósforo, cálcio e magnésio, assim como o sódio, cuja concentração aumentou com o tempo de operação do motor, podem estar presentes na composição do combustível utilizado e passar da câmara de combustão para o cárter (DELALIBERA, 2009; SILVA, 2006). Para os elementos citados, diminuição nos teores podem indicar consumo de aditivos, porém o aumento pode estar relacionado à combustão do óleo de crumbe, pois, segundo Delalibera (2009), o aumento nos teores dos elementos provenientes do combustível aparece devido à melhor queima deste, mineralizando os elementos e facilitando a passagem para o cárter. Uma análise elementar do óleo de crumbe seria necessária para maiores conclusões.

Segundo laudos do laboratório, as concentrações de todos os elementos analisados estão dentro dos valores aceitáveis em todas as amostras, exceto para o ferro, que apresentou teor muito elevado com apenas 15 horas de operação do motor. O lubrificante apresentou também alta presença de materiais metálicos e ligas ferrosas, sendo recomendada a troca do lubrificante, fato que pode estar relacionado a ausência de filtro de óleo lubrificante. Segundo

Pereira (2015), as partículas de metal podem catalisar a oxidação e o envelhecimento do lubrificante. Portanto, pode-se concluir que, apesar das causas não estarem bem definidas, houve redução da vida útil do lubrificante com a utilização do óleo de crambe como combustível.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar dos resultados serem favoráveis à utilização do óleo de crambe pré-aquecido como combustível, principalmente em relação à eficiência térmica e às análises do óleo lubrificante, apresentando resultados melhores que os encontrados na literatura para a maioria dos óleos vegetais, mais estudos são necessários para corroborar a viabilidade do uso do óleo de crambe em motores do ciclo Diesel.

Para continuidade ao estudo, alguns aperfeiçoamentos ou adaptações são necessários, a fim de evitar que aspectos técnicos do motor afetem os resultados obtidos. Recomenda-se a construção de um sistema para controle da rotação, de forma a minimizar as variações na rotação entre diferentes avaliações em um mesmo regime, garantindo condições de operação do motor mais próximas e maior confiabilidade dos resultados para análise estatística.

Devido à contaminação do óleo lubrificante por ferro, recomenda-se também, em um próximo ensaio, a adaptação de um sistema de filtragem de ar, de forma a reduzir possíveis contaminações por elementos provenientes do ar admitidos pelo motor na forma de poeira. Contaminações estas que podem agravar o desgaste das partes internas do motor como também mascarar reais contaminações que podem ser provenientes do uso de óleo de crambe como combustível.

A contaminação por ferro resultou em redução da vida útil do óleo lubrificante, indicando a necessidade da troca mais frequente do mesmo, caso o motor seja utilizado nas condições ensaiadas, para não haver danos ao motor ou comprometimento da lubrificação. Desta forma, indica-se a realização de ensaio nas mesmas condições, porém utilizando apenas o petrodiesel como combustível, com avaliação das condições do lubrificante, possibilitando a comparação entre os dois combustíveis e a noção real do quanto o óleo de crambe pode contaminar o lubrificante quando é utilizado em substituição ao petrodiesel. Caso seja constatada que a contaminação por ferro tem relação com o uso do óleo vegetal, a viabilidade de seu uso estará condicionada à redução do intervalo de troca do lubrificante.

Sugere-se também em estudos futuros, maiores tempos de ensaio e a utilização do óleo de crambe pré-aquecido em motores com sistema de injeção direta, visto que estes motores são mais susceptíveis a apresentar problemas de desempenho quando alimentados com óleos vegetais. Também podem ser utilizadas maiores temperaturas de pré-aquecimento, de forma a possibilitar maior redução da viscosidade do óleo de crambe, que pode propiciar melhores resultados de consumo de combustível e perda de potência relativa.

A análise da viabilidade econômica da utilização do óleo de crambe como combustível também é recomendada, pois o crambe não é uma cultura comumente encontrada no Brasil e sabe-se que o custo dos óleos vegetais é usualmente superior ao do petrodiesel.

7 CONCLUSÕES

O pré-aquecimento do óleo de crambe a 100 °C reduz significativamente sua viscosidade, porém, esta ainda é superior às viscosidades do petrodiesel e do biodiesel.

Em média, em todos os regimes de trabalho do motor houve diferença significativa entre os consumos, sendo que o consumo de óleo de crambe foi superior ao de petrodiesel e a diferença foi mais expressiva nos ensaios sob carga, devido ao menor poder calorífico do óleo de crambe.

Os valores de perda de potência relativa mostraram grande variação. Em média, a perda de potência relativa do crambe foi superior à do petrodiesel, exceto para a condição de inserção da maior carga, onde o óleo de crambe apresentou desempenho superior.

A eficiência térmica do conjunto motor-gerador foi muito próxima para os dois combustíveis, pois as médias de potências teóricas fornecidas pelo óleo de crambe e pelo petrodiesel não apresentaram diferença significativa, provando que o aumento no consumo compensa o menor poder calorífico do óleo de crambe para fornecer a mesma potência que o petrodiesel.

Os resultados obtidos na análise do lubrificante foram melhores que os encontrados na literatura. O óleo lubrificante sofreu pouca variação de viscosidade e não apresentou presença de fuligem, sinais de degradação e nem redução do TBN, que indicam combustão adequada do óleo de crambe. Porém, o lubrificante sofreu redução de sua vida útil, devido à alta presença de ferro e de materiais metálicos e ligas ferrosas, contaminações decorrentes da ausência de sistemas de filtração de ar e de óleo lubrificante eficientes no motor e, portanto, não estão relacionadas com o uso do combustível.

REFERÊNCIAS

- AGARWAL, D.; AGARWAL, A. K. Performance and emissions characteristics of Jatropha oil (preheated and blends) in a direct injection compression ignition engine. **Applied Thermal Engineering**, v. 27, n. 13, p. 2314-2323, 2007.
- ALMEIDA, S. C. A. de et al. Performance of a diesel generator fuelled with palm oil. **Fuel**, v. 81, n. 16, p. 2097-2102, 2002.
- ALTIN, R.; ÇETINKAYA, S.; YÜCESU, H. S. The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel engines. **Energy Conversion and Management**, v. 42, p. 529-538, 2001.
- ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM D2445-06: Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity)**, West Conshohocken, PA, United States, 2006.
- ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM D240-17: Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter**, West Conshohocken, PA, United States, 2017.
- BALAKRISHNA, B. Vegetable oil as fuel in C.I. engine: problems and possible solutions. **International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)**, v. 4, n. 11, p.4687-4690, nov. 2012.
- BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. do N. **Experimentação Agrícola**. 4. ed. Jaboticabal: Funep, 2006.
- BOONME, P. et al. Characterization of microemulsion structures in the pseudoternary phase diagram of isopropyl palmitate/water/Brij 97: 1-butanol. **AAPS PharmSciTech**, v. 7, n. 2, p. 99-104, maio 2006.
- BORGES, J. L. B. et al. Emissão de material particulado por misturas ternárias compostas de biodiesel, etanol e óleo vegetal: uma comparação com o óleo diesel convencional. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, p. 1667-1676, 2011.
- BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Portaria ANP N° 80, de 30.04.1999**. Anexo 1: Regulamento técnico ANP N° 3/99. 1999.
- BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução ANP N° 50, de 23.12.2013**. Anexo: Regulamento técnico ANP N° 4/2013. 2013.
- BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução ANP N° 45, de 25.08.2014**. Anexo: Regulamento técnico ANP N° 3/2014. 2014.
- BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Óleo Diesel**. 2017. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br/wwwanp/petroleo-derivados/155-combustiveis/1857-oleo-diesel>>. Acesso em: 25 out. 2017.

CAHILL, T. M.; OKAMOTO, R. A. Emissions of acrolein and other aldehydes from biodiesel-fueled heavy-duty vehicles. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 15, p. 8382-8388, jul. 2012.

CHAUHAN, B. S. et al. Performance and emission study of preheated Jatropha oil on medium capacity diesel engine. **Energy**, v. 35, n. 6, p. 2484-2492, 2010.

CÔRREA, I. M., MAZIERO, J. V. G., STORINO, M. Mistura de biodiesel de sebo bovino em motor diesel durante 600 horas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 7, p. 1189-1194, jul. 2011.

DELALIBERA, H. C. **Utilização do óleo de girassol como combustível em unidade de potência monocilindro ciclo Diesel**. 2009. 77 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2009.

DELALIBERA, H. C. et al. Performance of a diesel engine fueled with a preheated blend of soybean oil and petrodiesel. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 6, p. 1058-1067, nov./dez. 2012.

DELALIBERA, H. C. **Desempenho de motor Diesel alimentado com óleo vegetal**. 2014. 67 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2014.

DELALIBERA, H. C. Aplicação dos óleos vegetais como fonte renovável de energia em motores Diesel. In: Melo, G.; Ribeiro, M. F. S. (Coord.). **Processamento de oleaginosas como alternativa de agregação de valor na agricultura familiar**. Irati: IEEP, 2015. p.19-32.

DELALIBERA, H. C. et al. Performance of diesel engine fuelled with four vegetable oils, preheated and at engine working temperature. **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 2, p. 302-314, mar/abr. 2017.

DEMIRBAS, A. Fuel properties and calculation of higher heating values of vegetable oils. **Fuel**, v. 77, n. 9/10, p. 1117-1120, 1998.

DORSA, R. **Tecnologia de processamento de óleos e gorduras vegetais e derivados**. 3. ed. GEA: Westfalia Separator do Brasil Ltda, 2000.

DUNN, R. O. Propriedades do combustível: Propriedades a baixas temperaturas e desempenho do biodiesel. In: KNOTHE, G; GERPEN, J. V.; KRAHL, J.; RAMOS, L. P. (Eds). **Manual de Biodiesel**. Tradução de Luiz Pereira Ramos (CEPESQ/UFPR). São Paulo: Edgar Blücher, 2006. cap. 6.3. p. 91-127.

EMBERGER, P. et al. Ignition and combustion behaviour of vegetable oils after injection in a constant volume combustion chamber. **Biomass and Bioenergy**, v. 78, p. 48-61, 2015.

EMBERGER, P. et al. Emission behaviour of vegetable oil fuel compatible tractors fuelled with different pure vegetable oils. **Fuel**, v. 167, p. 257-270, 2016.

ENGLER, C. R. et al. Effects of processing and chemical characteristics of plant oils on performance of an indirect-injection diesel engine. **Journal of the American Oil Chemists' Society (JAOCs)**, v. 60, n. 8, p. 1592-1596, ago. 1983.

ESTEBAN, B. et al. Is it environmentally advantageous to use vegetable oil directly as biofuel instead of converting it to biodiesel? **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 3, p. 1317-1328, 2011.

ESTEBAN, B. et al. Temperature dependence of density and viscosity of vegetable oils. **Biomass and Bioenergy**, v. 42, p. 164-171, 2012.

FELICI, P. H. N. et al. Mini-usina de craqueamento térmico de óleos vegetais para comunidades isoladas de pequenos produtores: avaliação operacional de um protótipo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 30, n. 4, p. 779-792, out./dez. 2009.

FIORESE, D. A. et al. Metodologia experimental para avaliação de custos de produção e utilização de biodiesel: estudo de caso de quatro ésteres metílicos e óleo diesel comercial. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 11, p. 1921-1926, nov. 2011.

FONTARAS, G. et al. Impact of straight vegetable oil–diesel blends application on vehicle regulated and non-regulated emissions over legislated and real world driving cycles. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 7, p. 3188-3198, 2011.

FRANCO, Z.; NGUYEN, Q. D. Flow properties of vegetable oil–diesel fuel blends. **Fuel**, v. 90, n. 2, p. 838-843, 2011.

FULS, J.; HAWKINS, C. S.; HUGO, F. J. C. Tractor engine performance on sunflower oil fuel. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 30, p. 29-35, 1984.

GEORGE, S. et al. Effect of diesel soot on lubricant oil viscosity. **Tribology International**, v. 40, n. 5, p. 809-818, 2007.

GERPEN, J. V. Conceitos básicos sobre motores Diesel e seus combustíveis. In: KNOTHE, G; GERPEN, J. V.; KRAHL, J.; RAMOS, L. P. (Eds). **Manual de Biodiesel**. Tradução de Luiz Pereira Ramos (CEPESQ/UFPR). São Paulo: Edgar Blücher, 2006. cap. 3. p. 19-28.

HAAS, M. J.; FOGLIA, T. A. Produção de biodiesel: Matérias-primas alternativas e tecnologias para a produção de biodiesel. In: KNOTHE, G; GERPEN, J. V.; KRAHL, J.; RAMOS, L. P. (Eds). **Manual de Biodiesel**. Tradução de Luiz Pereira Ramos (CEPESQ/UFPR). São Paulo: Edgar Blücher, 2006. cap. 4.2. p. 46-62.

HASANNUDDIN, A. K. et al. Performance, emissions and lubricant oil analysis of diesel engine running on emulsion fuel. **Energy Conversion and Management**, v. 117, p. 548-557, 2016.

HELLIER, P.; LADOMMATOS, N.; YUSAF, T. The influence of straight vegetable oil fatty acid composition on compression ignition combustion and emissions. **Fuel**, v. 143, p. 131-143, 2015.

HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. McGraw-Hill, 1988.

INOUE, G. H. et al. Variação da viscosidade cinemática de óleos vegetais bruto em função da temperatura. In: II Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras e Biodiesel, **Anais...** Varginha – MG, 2005.

INOUE, G. H. et al. Viabilidade da utilização de óleos vegetais em motores diesel. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 16, n. 3, p. 329-336, jul./set. 2008.

INOUE, G. H. et al. Nota técnica: avaliação do desgaste de um motor de ciclo diesel alimentado com misturas de óleo vegetal e diesel. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 17, n. 4, p. 294-302, jul./ago. 2009.

JAIN, N. L. et al. Performance and emission characteristics of preheated and blended thumba vegetable oil in a compression ignition engine. **Applied Thermal Engineering**, v. 113, p. 970-979, 2017.

JASPER, S. P.; BIAGGIONI, M. A. M.; SILVA, P. R. A. Caracterização físico-química do óleo e do biodiesel de *Crambe abyssinica* Hochst. **Nucleus**, v. 10, n. 2, p.183-190, out. 2013.

KALAM, M. A. et al. Emission and performance characteristics of an indirect ignition diesel engine fuelled with waste cooking oil. **Energy**, v. 36, n. 1, p. 397-402, 2011.

KALE, P. R.; KULKARNI, A. D.; NANDI, S. Synthesis of biodiesel from low-cost vegetable oil and prediction of the fuel properties of a biodiesel–diesel mixture. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, n. 51, p. 19654-19659, 2014.

KIBBEY, T. C. G. et al. Predicting the temperature-dependent viscosity of vegetable oil/diesel reverse microemulsion fuels. **Fuel**, v. 116, p. 432-437, 2014.

KIM, K. I. et al. Cuphea growth, yield, and oil characteristics as influenced by climate and soil environments across the upper Midwest USA. **Industrial Crops and Products**, v. 33, n. 1, p. 99-107, 2011.

KIM, D. et al. Engine performance and emission characteristics of hydrotreated vegetable oil in light duty diesel engines. **Fuel**, v. 125, p. 36-43, 2014.

KNOTHE, G. A história dos combustíveis derivados de óleos vegetais. In: KNOTHE, G; GERPEN, J. V.; KRAHL, J.; RAMOS, L. P. (Eds). **Manual de Biodiesel**. Tradução de Luiz Pereira Ramos (CEPESQ/UFPR). São Paulo: Edgar Blücher, 2006a. cap. 2. p. 5-18.

KNOTHE, G. Propriedades do combustível: Número de cetano e calor de combustão – por que os óleos vegetais e seus derivados são combustíveis diesel apropriados. In: KNOTHE, G; GERPEN, J. V.; KRAHL, J.; RAMOS, L. P. (Eds). **Manual de Biodiesel**. Tradução de Luiz Pereira Ramos (CEPESQ/UFPR). São Paulo: Edgar Blücher, 2006b. cap. 6.1. p. 83-88.

KNOTHE, G. Introdução. In: KNOTHE, G; GERPEN, J. V.; KRAHL, J.; RAMOS, L. P. (Eds). **Manual de Biodiesel**. Tradução de Luiz Pereira Ramos (CEPESQ/UFPR). São Paulo: Edgar Blücher, 2006c. cap. 1. p. 1-4.

LALAS, S. et al. Full characterisation of *Crambe abyssinica* Hochst. seed oil. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 89, n. 12, p. 2253-2258, 2012.

LAPUERTA, M. et al. Key properties and blending strategies of hydrotreated vegetable oil as biofuel for diesel engines. **Fuel Processing Technology**, v. 92, n. 12, p. 2406-2411, 2011.

LI, L. et al. Liquid hydrocarbon fuels from catalytic cracking of rubber seed oil using USY as catalyst. **Fuel**, v. 123, p. 189-193, 2014.

MARTINI, J.; DELALIBERA, H. C.; WEIRICH NETO, P. H. Consumo de óleo de soja pré-aquecido por motor Diesel. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 18, p. 213-220, 2012.

MATHAI, R. Comparative evaluation of performance, emission, lubricant and deposit characteristics of spark ignition engine fueled with CNG and 18% hydrogen-CNG. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.37, n. 8, p. 6893-6900, 2012.

MAZIERO, J. V. G. et al. Desempenho de um motor diesel com óleo bruto de girassol. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 13, n. 2, p. 249-255, abr-jun. 2007.

MCCORMICK, R., ALLEMAN, T. L. Emissões de exaustão: Efeito do biodiesel sobre a emissão de poluentes de motores Diesel. In: KNOTHE, G; GERPEN, J. V.; KRAHL, J.; RAMOS, L. P. (Eds). **Manual de Biodiesel**. Tradução de Luiz Pereira Ramos (CEPESQ/UFPR). São Paulo: Edgar Blücher, 2006. cap. 7.1. p. 181-192.

MIRAGAYA, J. C. G. Biodiesel: tendências no mundo e no Brasil. **Informe Agropecuário EPAMIG: Produção de Oleaginosas para Biodiesel**, Belo Horizonte, v. 26, n. 229, p. 7-13, 2005.

MONDAL, P.; BASU, M.; BALASUBRAMANIAN, N. Direct use of vegetable oil and animal fat as alternative fuel in internal combustion engine. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining**, v. 2, p. 155-174, 2008.

NAM, L. T. H. et al. Preparation of bio-fuels by catalytic cracking reaction of vegetable oil sludge. **Fuel**, v. 90, n. 3, p.1069-1075, 2011.

NELSON, D. L.; COX, M. C. **Princípios de Bioquímica de Lehninger**. Tradução: Ana Beatriz Gorini da Veiga et al. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2014.

NGUYEN, T. et al. Formulation of canola-diesel microemulsion fuels and their selective diesel engine performance. **Journal of The American Oil Chemists' Society**, v. 89, n. 10, p. 1905-1912, 22 maio 2012.

NIETIEDT, G. H. et al. Desempenho de motor de injeção direta sob misturas de biodiesel metílico de soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 7, p. 1177-1182, jul. 2011.

NO, S. Y. Application of straight vegetable oil from triglyceride based biomass to IC engines – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 69, p. 80-97, 2017.

NWAFOR, O. M. I. The effect of elevated fuel inlet temperature on performance of diesel engine running on neat vegetable oil at constant speed conditions. **Renewable Energy**, v. 28, p. 171-181, 2003.

OBERT, E. F. **Motores de combustão interna**. Tradução: Carraro, F. L. 2. ed. Porto Alegre: Globo, 1971.

OLIVEIRA, L. E.; SILVA, M. L. C. P. da Comparative study of calorific value of rapeseed, soybean, jatropha curcas and crambe biodiesel. In: International Conference on Renewable Energies and Power Quality. **Renewable Energy and Power Quality Journal**, Bilbao (Espanha), v. 1, n. 1, p. 679-682, mar. 2013.

OSAKI, M.; BATALHA, M. O. Produção de biodiesel e óleo vegetal no Brasil: realidade e desafio. **Organizações Rurais & Agroindustriais**, Lavras, v. 13, n. 2, p. 227-242, 2011.

PAULSEN, H. M. et al. Use of straight vegetable oil mixtures of rape and camelina as on farm fuels in agriculture. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 9, p. 4015-4024, 2011.

PEREIRA, F. M. de M. **Estudo da degradação do óleo lubrificante em motores alimentados com biodiesel B100**. 2015. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

PINHEIRO, C. T. et al. An overview of waste lubricant oil management system: Physicochemical characterization contribution for its improvement. **Journal of Cleaner Production**, v. 150, p. 301-308, 2017.

PITOL, C. Cultura do crambe. In: **Tecnologia e Produção: milho safrinha e culturas de inverno**. Maracaju: Fundação MS, p.85-88, 2008.

PRADHAN, P.; RAHEMAN, H; PADHEE, D. Combustion and performance of a diesel engine with preheated Jatropha curcas oil using waste heat from exhaust gas. **Fuel**, v. 115, p. 527-533, 2014.

PROKOPOWICZ, A. et al. The Effects of Neat Biodiesel and Biodiesel and HVO Blends in Diesel Fuel on Exhaust Emissions from a Light Duty Vehicle with a Diesel Engine. **Environmental Science & Technology**, v. 49, n. 12, p. 7473-7482, 2015.

QI, D. H. et al. Preparation, characterization, engine combustion and emission characteristics of rapeseed oil based hybrid fuels. **Renewable Energy**, v. 60, p. 98-106, 2013.

RAMANJANEYULU, A. V.; REDDY, A. V.; MADHAVI, A. The impact of sowing date and irrigation regime on castor (*Ricinus communis* L.) seed yield, oil quality characteristics and fatty acid composition during post rainy season in South India. **Industrial Crops and Products**, v. 44, p.25-31, 2013.

RAMKUMAR, S.; KIRUBAKARAN, V. Biodiesel from vegetable oil as alternate fuel for C.I engine and feasibility study of thermal cracking: A critical review. **Energy Conversion and Management**, v. 118, p. 155-169, 2016.

RAPOSO JR, J. L. et al. Determination of silicon in lubricant oil by high-resolution continuum source flame atomic absorption spectrometry using least-square background correction and internal standardization. **Analytical Letters**, v. 44, n. 12, p.2150-2161, 2011.

REIS, E. F. dos et al. Desempenho e emissões de um motor-gerador ciclo diesel sob diferentes concentrações de biodiesel de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 5, p. 565-571, 2013.

ROBINSON, N. Monitoring oil degradation with infrared spectroscopy. **Technical Bulletin Wearcheck**, issue 18, 2000. Disponível em: < <http://www.wearcheck.co.zm/downloads/bulletins/bulletin/tech18.pdf> >. Acesso em: 19 jan. 2018.

ROSA, H. A. et al. Biodiesel produced from crambe oil in Brazil: A study of performance and emissions in a diesel cycle engine generator. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 651-655, 2014.

RYAN III, T. W.; DODGE, L. G.; CALLAHAN, T. J. The effects of vegetable oil properties on injection and combustion in two different diesel engines. **Journal of the American Oil Chemists' Society (JAOCS)**, v. 61, n. 10, p. 1610-1619, out. 1984.

SCHLOSSER, J. F.; MACHADO, P. R. M.; CAMARGO, M. N. Desempenho de misturas pré-aquecidas de óleo de soja cru e Diesel como combustível para motores agrícolas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.5, p. 1329-1335, set./out. 2007.

SIDIBÉ, S. S. et al. Use of crude filtered vegetable oil as a fuel in diesel engines state of the art: Literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, p. 2748-2759, 2010.

SILVA, M. V. I. **Efeitos do uso do biodiesel sobre propriedades do óleo lubrificante usado em um motor de ignição por compressão**. 2006. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SILVA, M. J. da et al. Comparative analysis of engine generator performance using diesel oil and biodiesels available in Paraná State, Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 17, p.278-282, 2013.

SILVEIRA, E. V. et al. Chromatographic characterization of the crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) oil and modeling of some parameters for its conversion in biodiesel. **Industrial Crops and Products**, v. 97, p.545-551, 2017.

SOARES, G. F. W.; VIEIRA, L. S. R.; NASCIMENTO, M. V. G. Operação de um grupo gerador diesel utilizando óleo vegetal bruto como combustível. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2003, Campinas - SP. **Proceedings online...** Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000200048&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 14 mar. 2018.

SOLOMONS, T. W. G.; FRYHLE, C. B. **Química Orgânica**, vol. 1. Tradução: Whei Oh Lin. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

SONAR, D. et al. Performance and emission characteristics of a diesel engine with varying injection pressure and fuelled with raw mahua oil (preheated and blends) and mahua oil methyl ester. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 17, n. 6, p. 1499-1511, 2015.

SOUZA, N. M. **Variabilidade qualitativa de grãos de soja**. 2016. 75f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2016.

SUAREZ, P. A. Z. et al. Transformação de triglicerídeos em combustíveis, materiais poliméricos e insumos químicos: algumas aplicações da catálise na oleoquímica. **Química Nova**, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 667-676, 2007.

TEIXEIRA, L. C. Produção de biodiesel. **Informe Agropecuário EPAMIG: Produção de Oleaginosas para Biodiesel**, Belo Horizonte, v. 26, n. 229, p. 79-86, 2005.

TOLMASQUIM, M. T. **Fontes renováveis de energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. Centro de Economia Energética e Ambiental do Programa de Planejamento Energético (CENERGIA), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

WAGNER, E. P. et al. Diesel vehicle performance on unaltered waste soybean oil blended with petroleum fuels. **Fuel**, v. 107, p. 757-765, 2013.

WANDER, P. R. et al. Performance analysis of a mono-cylinder diesel engine using soy straight vegetable oil as fuel with varying temperature and injection angle. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 9, p. 3995-4000, 2011.

WAZILEWSKI, W. T. et al. Study of the methyl crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) and soybean biodiesel oxidative stability. **Industrial Crops and Products**, v. 43, p. 207-212, 2013.

YANMAR. **Manual Técnico: Motor Diesel. Série B-NB-BC-NBC**. Yanmar do Brasil S.A, São Paulo.

YIGEZU, Z. D.; MUTHUKUMAR, K. Catalytic cracking of vegetable oil with metal oxides for biofuel production. **Energy Conversion and Management**, v. 84, p. 326-333, 2014.

YILMAZ, N.; MORTON, B. Comparative characteristics of compression ignited engines operating on biodiesel produced from waste vegetable oil. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 5, p. 2194-2199, 2011a.

YILMAZ, N.; MORTON, B. Effects of preheating vegetable oils on performance and emission characteristics of two diesel engines. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 5, p. 2028-2033, 2011b.