



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

HEVANDRO COLONHESE DELALIBERA

**DESEMPENHO DE MOTOR DIESEL ALIMENTADO COM
ÓLEO VEGETAL**

Londrina
2014

HEVANDRO COLONHESE DELALIBERA

**DESEMPENHO DE MOTOR DIESEL ALIMENTADO COM
ÓLEO VEGETAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Agronomia da Universidade Estadual de Londrina,
como requisito à obtenção do título Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Ralisch
Coorientador: Prof. Pedro H. Weirich Neto

Londrina
2014

**Catálogo elaborado pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central da
Universidade Estadual de Londrina**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

D335d	<p>Delalibera, Hevandro Colonhese. Desempenho de motor diesel alimentado com óleo vegetal / Hevandro Colonhese Delalibera. – Londrina, 2014. 67 f. : il.</p> <p>Orientador: Ricardo Ralisch. Coorientador: Pedro Henrique Weirich Neto. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2014. Inclui bibliografia.</p> <p>1. Biocombustíveis – Teses. 2. Óleos vegetais como combustível – Teses. 3. Mecanização agrícola – Teses. 4. Motor diesel – Teses. 5. Agricultura e energia – Teses. I. Ralisch, Ricardo. II. Weirich Neto, Pedro Henrique. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 631.3:662.755</p>
-------	---

HEVANDRO COLONHESE DELALIBERA

**DESEMPENHO DE MOTOR DIESEL ALIMENTADO COM
ÓLEO VEGETAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Agronomia da Universidade Estadual de Londrina,
como requisito à obtenção do título Doutor.

BANCA EXAMINADORA

Dr. Anderson de Toledo
IAPAR – Londrina – PR

Dr. Emerson Fey
UNIOESTE – Foz do Iguaçu – PR

Dr. José Miguel Silveira
EMBRAPA – Londrina – PR

Dr. Otávio Jorge Grigoli Abi Saab
UEL – Londrina – PR

Dr. Paulo Roberto de Abreu Figueiredo
IAPAR – Londrina – PR

Dr. Pedro Henrique Weirich Neto
UEPG – Ponta Grossa – PR

Dr. Waldir Nagel Schirmer
UNICENTRO – Irati – PR

Orientador. Prof. Dr. Ricardo Ralisch
UEL – Londrina – PR

Londrina, 28 de fevereiro de 2014

DELALIBERA, Hevandro Colonhese. **Desempenho de motor Diesel a limentado com óleo vegetal**. 2014. 67 f. Tese de doutorado apresentada ao programa de pós-graduação em agronomia - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2014.

RESUMO

No Brasil um grande esforço está voltado para encontrar alternativas renováveis para o petrodiesel. Algumas linhas de estudo estão direcionadas ao desenvolvimento dos óleos vegetais aplicados diretamente como combustível, por serem fonte de menor custo, terem densidade energética maior que o biodiesel e apresentam menor risco de contaminação ambiental. Neste trabalho, foram realizados ensaios de curta duração em motor Diesel com sistema de combustão indireta, alimentado com óleo vegetal, com e sem pré-aquecimento, em comparação com petrodiesel. O objetivo foi avaliar a influência do pré-aquecimento do óleo vegetal no comportamento técnico, desempenho e emissão de material particulado pelo motor. De forma geral, os resultados obtidos neste trabalho, com relação ao efeito do pré-aquecimento no comportamento técnico e no desempenho do motor, apresentaram-se menos interessantes. Porém, a literatura mostra que em ensaios de longa duração, o pré-aquecimento é significativo, por apresentar melhores respostas em variáveis relacionadas diretamente com a vida útil do motor. Assim, para que possa ser recomendada a utilização dos óleos vegetais, é necessário realizar ensaios de longa duração junto a estudos econômicos. Mas, para o caso dos óleos estudados neste trabalho, os óleos de linhaça e de pinhão-manso foram considerados menos adequados. Levando em conta o padrão de obtenção dos óleos avaliados, futuros estudos de longa duração podem ser direcionados aos óleos de crambe e de canola, pois, apresentaram resultados mais interessantes em avaliações de curta duração, comportamento também esperado em ensaios de longa duração. Para linhaça e pinhão-manso, torna-se necessário estudar processos de purificação para melhorar a qualidade destes como combustível.

Palavras-chave: Biocombustível. Opacidade. Potência. Consumo

DELALIBERA, Hevandro Colonhese. **Performance of Diesel engine fueled with vegetable oil**. 2014. 67 p. Doctorate thesis submitted to the post graduate program in agronomy - State University of Londrina, Londrina, 2014.

ABSTRACT

In Brazil, a great effort is turned to finding renewable alternatives to petrodiesel fuel. Some lines of study are directed at the development of vegetable oils applied directly as a fuel, because they are getting lower cost source, have higher energy density than biodiesel and have lower risk of environmental contamination. In this study, short-term trials in diesel engine with indirect ignition system, fed with vegetable oil, with and without preheating, compared to petrodiesel performance. The objective was to evaluate the effect of preheating the vegetable oil in technical behavior, performance and emission of particulate matter from the engine. Overall, the results obtained in this study regarding the effect of preheating the technical behavior and performance of the engine were less interesting. However, the literature shows that in long-term studies, preheating is significant, since it has better responses on variables directly related to the useful life of engine. So, that the use of vegetable oils can be recommended, it is necessary to conduct long-term studies with the economic studies. But, for the case of the oils studied in this work, linseed and jatropha oils were considered less appropriate. Taking into account the standard for obtaining evaluated oils, future long-term studies can be directed to crambe and canola oil, therefore showed more interesting results in assessments of short-term duration, behavior also expected in long-term studies. For linseed and jatropha oil, it becomes necessary to study the purification processes to improve the quality of fuel.

Key words: Biofuel. Opacity. Brake. Power. consumption

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Bancada de ensaio	37
Figura 2 – Sistema de troca, aquecimento e mensuração da temperatura do biocombustível	38
Figura 3 – Sensor de rotação por barreira ótica	39
Figura 4 – Banco de carga resistivo, onde as 6 lâmpadas externas são de 500W e as 3 internas são de 300W.....	40
Figura 5 – Aparato utilizado para mensurar o consumo de combustível.....	43
Figura 6 – Opacímetro (esquerda) e sonda para coleta da amostra de gases na saída do tubo de exaustão de gases (direita)	45
Figura 7 – Box-Plot de médias, máximo, mínimo e desvios para consumo dos ensaios a 1.150 min ⁻¹ (7a) e a 1.800 min ⁻¹ (7b).....	50
Figura 8 – Consumo de combustível sob regime de carga de aproximadamente 66% da nominal do motor	52
Figura 9 – Box-plot de médias e desvios para a rotação de acordo com o tratamento durante o ensaio de perda de potência.....	54
Figura 10 – Curvas médias para retomada de aceleração sequente a entrada da carga e para o regime de aceleração livre dos nove tratamentos estudados.....	55
Figura 11 – Box-plot de médias e desvios para perda de potência relativa dos tratamentos	56
Figura 12 – Box-Plot de medianas e quartis para a opacidade (k) de acordo com o tratamento	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Teor de óleo dos grãos e rendimento médio de óleo para a canola, o crambe, a linhaça e o pinhão-manso.....	13
Tabela 2 – Composição de ácidos graxos dos óleos vegetais e propriedades físico-químicas para os óleos e petrodiesel.....	14
Tabela 3 – Propriedades físico-químicas utilizadas como padrão de qualidade de combustível para motores Diesel.....	18
Tabela 4 – Propriedades físico-químicas de alguns combustíveis	20
Tabela 5 – Desempenho dos óleos vegetais combustíveis e do petrodiesel no teste de curta duração em um motor 4 cilindros, 2,8 dm ³ e viscosidade do combustível.....	28
Tabela 6 – Especificações do motor de acordo com manual do fabricante.....	36
Tabela 7 – Tratamentos aplicados no motor.....	40
Tabela 8 – Correlação entre as temperaturas do ambiente e dos gases de escapamento em relação as variáveis do motor	47
Tabela 9 – Médias das temperaturas e pressões do lubrificante de acordo com o regime de trabalho do motor para os tratamentos estudados.....	48
Tabela 10 – Contrastes utilizados nas comparações dos grupos de médias dos tratamentos para a variável consumo de combustível, de acordo com o regime de trabalho e significância da análise de variância dos contrastes	49
Tabela 11 – Legenda dos contrastes utilizados para comparação do consumo de combustível.....	50
Tabela 12 – Médias de consumo, coeficientes de variação e relações entre o consumo em regime de carga sobre aceleração livre a 1.800 min ⁻¹ (OV/PD) e, consumo em carga dos óleos vegetais (OV) sobre petrodiesel (PD) de acordo com os tratamento e regime de trabalho	53
Tabela 13 – Comparação de médias por contrastes para perda de potência relativa e significância do teste	56
Tabela 14 – Legenda dos contrastes analisados para a perda de potência relativa	56
Tabela 15 – Média das perdas de potência relativa, coeficiente de variação e relação óleo vegetal (OV) petrodiesel (PD).....	57
Tabela 16 – Valores k de opacidade, teste de comparação múltipla e estimativa de emissões em material particulado para o regime de trabalho de 1.800 min ⁻¹	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1	ÓLEOS VEGETAIS COMO FONTE RENOVÁVEL DE ENERGIA	12
2.2	EXTRAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS ÓLEOS VEGETAIS	15
2.3	COMBUSTÍVEIS PARA MOTORES DIESEL	17
2.4	A BIOSÍNTESE DE LIPÍDIOS DE RESERVA PELAS PLANTAS	21
2.5	UTILIZAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS À BASE DE ÓLEOS VEGETAIS	24
3	JUSTIFICATIVA	31
4	OBJETIVOS	32
4.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	32
5	ARTIGO A: DESEM PENHO DE MOTOR DIESEL ALIMENTADO COM QUATRO ÓLEOS VEGETAIS, PRÉ-AQUECIDOS E NA TEMPERATURA DE TRABALHO DO MOTOR	33
5.1	RESUMO	33
5.2	ABSTRACT	33
5.3	INTRODUÇÃO	34
5.4	MATERIAL E MÉTODOS	35
5.4.1	Bancada de Ensaio	36
5.4.2	Tratamentos	40
5.4.3	Variáveis de Comportamento Técnico, Desempenho e Emissões de Material Particulado do Motor	41
5.4.3.1	Temperatura do sistema de arrefecimento e dos gases de exaustão	41
5.4.3.2	Consumo de combustível	42
5.4.3.3	Peda de potência	43
5.4.3.4	Opacidade dos gases de exaustão	44
5.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.5.1	Temperatura do Sistema de Arrefecimento e dos Gases de Exaustão	46
5.5.2	Consumo de Combustível	49

5.5.3	Perda de Potência	53
5.5.4	Opacidade dos Gases de Exaustão.....	57
5.6	CONCLUSÕES.....	59
6	CONSIDERE RAÇÕES FINAIS.....	61
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

A crise do petróleo da década de 1970 desencadeou a primeira grande busca por novas fontes de energia, cujo desafio principal era que o custo fosse compatível ao referencial imposto pelo petróleo. Embora, mundialmente, as décadas de 30 e 40 tenham sido muito produtivas no assunto em países como Alemanha, França e Bélgica, no Brasil os estudos na produção e utilização de biocombustíveis progrediram apenas em meados da década de 80, culminando com a proposta do álcool combustível. No mesmo período, o aumento da produção mundial de petróleo provocou queda no preço, levando diversos países que tinham projetos de energias alternativas a desativá-los.

No final da década de 1990, uma nova crise do petróleo voltou a preocupar, nesse momento, com dois agravantes: estudos indicando o fim das reservas (o que hoje não é uma realidade no Brasil, após a confirmação das reservas do pré-sal) e/ou a inviabilidade econômica de extração e a influência dos gases provenientes de sua queima na poluição do ambiente, com conseqüente alteração climática global. Além dos reflexos provocados pelas alterações antropogênicas da paisagem, a queima dos combustíveis fósseis libera carbono que fora retirado da atmosfera durante as eras geológicas do Paleozoico superior (a partir do período carbonífero) e principalmente do Mesozoico (período cretáceo), provocando o aumento das concentrações de CO₂ e outros gases nocivos no ar. Portanto a produção de biomassa vem sendo focada como fonte alternativa de energia, uma vez que é um recurso renovável e fixa CO₂ através da fotossíntese, “ciclando” o carbono que já está na atmosfera.

O Brasil, com tecnologia e mercado já desenvolvido para o álcool combustível, substituto da gasolina, agora busca alternativas para o petrodiesel. Com a criação do Programa Brasileiro de Biocombustíveis em 2002, aumentaram os investimentos em pesquisa, tendo a premissa de diminuir a dependência do petrodiesel importado, bem como a redução da emissão de gases poluentes. No momento, uma antiga opção, os óleos vegetais e seus derivados, estão novamente sendo estudados, por apresentarem características similares ao petrodiesel, podendo ser aplicados puros, transformados (biodiesel) ou não, ou ainda, misturados ao petrodiesel.

Os parâmetros e procedimentos de qualidade e de utilização, principalmente para os óleos vegetais combustíveis não transformados, ainda não estão bem definidos, como, por exemplo, com relação à durabilidade dos motores e a emissão de gases. Mesmo com os relatos de problemas no funcionamento dos motores, o cenário da matriz energética mundial tende a tomar este rumo e ainda, observa-se que os óleos vegetais não transformados estão

sendo largamente utilizados em motores Diesel sem critério algum, por serem de fácil aquisição e menor custo.

Neste contexto, o produtor rural, sem considerar classificação econômica, tem pouca ou nenhuma informação científico-tecnológica para decidir sobre a utilização de tais variações. Hoje seria utópico considerar a utilização de combustíveis oriundos de culturas e processos realizados dentro da propriedade, ou ainda considerando peculiaridades regionais, tais como cooperativas e seus processos já utilizados, principalmente para os óleos vegetais transformados (biodiesel), pois a classificação e regulamentação destes como combustível, criou uma série de barreiras para obter autorização de produção, além de onerar o processo com impostos, direcionando o controle destes produtos para as grandes corporações, que em sua maioria estão ligadas direta ou indiretamente ao petróleo.

O enfoque deste trabalho segue a linha de pesquisa no desenvolvimento dos óleos vegetais aplicados como combustível, por serem fontes de obtenção mais barata que os óleos vegetais transformados (biodiesel), apresentam menor risco de contaminação ambiental e, talvez, o critério mais significativo, não são classificados como combustível, o que torna favorável em relação ao citado anteriormente. O objetivo deste trabalho foi avaliar através de ensaios de “curta duração”, o desempenho de motor Diesel alimentado com óleos vegetais com e sem pré-aquecimento em comparação com o petrodiesel.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ÓLEOS VEGETAIS COMO FONTE RENOVÁVEL DE ENERGIA

O Brasil, em função de sua biodiversidade, possui uma gama de oleaginosas com potencial para a produção de combustíveis a base de óleos vegetais, como por exemplo, a soja, o girassol, o amendoim, o caroço de algodão, e outras culturas como o dendê, que é comprovadamente a cultura atualmente estudada que mais produz óleo, com estimativas de rendimento de até 6.000 L ha⁻¹ de óleo. Esta se apresenta muito superior, quando comparado com a soja (500 L ha⁻¹ de óleo em média), que hoje é a principal matéria prima na produção de biodiesel no Brasil, abrangendo cerca de 80% do total (OLIVEIRA; REYS, 2009).

Com este, nota-se que existem diversas culturas oleaginosas que em comparação com a soja, apresentam rendimento em óleo superior, porém, acabam não sendo direcionadas para a produção de combustíveis por apresentarem óleo de qualidade alimentícia superior ao óleo de soja, o que agrega valor ao produto, tornando-o pouco competitivo no mercado de combustíveis. Outro fator relevante é questão dos pacotes tecnológicos para produção das culturas, que, vão desde aumento da complexidade de produção, pouco desenvolvidos e até, não estudados, quando comparado com a soja para produção em escala, limitando também sua competitividade.

Um exemplo é o pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.), que também é uma cultura de alto potencial de produtividade, apresentando estimativas de até 3.000 L ha⁻¹ de óleo e, com a possível vantagem sobre o dendê, de se adaptar em quase todas as regiões do país além de começar a produzir mais cedo (JAKUBASZKO, 2006). Porém, não tem sua fitotecnia bem definida, por anteriormente não ser uma cultura de interesse econômico, inviabilizando-a neste momento. Porém estudos mais recentes levando em consideração diversos parâmetros fitotécnicos, mostram valores bem diferentes com relação ao rendimento em frutos, encontrando variações desde 250 até 1.800 kg ha⁻¹ (HORSCHUTZ et al., 2012).

O pinhão-manso é uma espécie pertencente à família das euforbiáceas, sendo considerada uma oleaginosa com potencial para a produção de energia, devido ao alto conteúdo de óleo de suas sementes (ACHTEN et al., 2008). São apontadas como características positivas do pinhão-manso o alto rendimento de grãos, óleo com qualidade adequada para a produção de biocombustível (ABDELGADIR et al., 2008), manejo compatível com o perfil da agricultura familiar (LAVIOLA et al., 2011), adaptação a diferentes regiões climáticas, além de não concorrer, diretamente, com a produção de

alimentos (FREITAS et al., 2011). Outro ponto importante é a qualidade da composição química da torta resultante da extração de óleo, a qual apresenta teores consideráveis de nitrogênio, fósforo e potássio, podendo ser utilizada como biofertilizante (SOUZA et al., 2009). Dentre os diversos fatores limitantes à produção em escala, além da ausência de informações técnicas de manejo e cultivo, podem-se citar o florescimento e a maturação dos frutos desuniformes, o que prejudica o processo (ALAM et al., 2011; BRASILEIRO et al., 2012).

Retomando a questão da competição por alimentos em áreas já utilizadas na produção, pode-se utilizar culturas que preencham períodos onde as áreas acabam ficando subutilizadas, como o inverno, onde normalmente estão em pousio, ou cultivadas com culturas de cobertura. Como opção, pode-se utilizar a canola (colza), que é uma cultura relativamente conhecida na região Sul do País, tendo esta tecnologia de cultivo bem definida. Existem outras culturas menos conhecidas, como a linhaça e o crambe, que também são de inverno, que apresentam potencial de produção interessante, conforme a **Tabela 1**.

Tabela 1 – Teor de óleo dos grãos e rendimento médio de óleo para a canola, o crambe, a linhaça e o pinhão-manso

Cultura	Teor de óleo dos grãos (g kg ⁻¹)	Rendimento de óleo (L ha ⁻¹)	Referência
Canola	350 a 450	550 a 1.100	OFFICE OF THE GENE... (2011)
Crambe	260 a 441	260 a 660	PITOL et al. (2010) e SOUZA et al. (2009)
Linhaça	400 a 440	330 a 370	KOCHHAR (2002);
Pinhão-manso	280 a 370	140 a 2.220	ARRUDA et al. (2004)

A colza (*Brassica napus* L.) foi cultivada por civilizações antigas na Ásia e no Mediterrâneo. Comercialmente, *B. napus* foi primeiramente cultivada no Canadá em 1942, para emprego como lubrificante em navios. Tradicionalmente, em países ocidentais, a colza era considerada imprópria para a alimentação humana ou animal devido às concentrações de ácido erúico e glucosinolatos, os quais são tóxicos. Nos anos 70, intensivos programas de melhoramento genético desenvolveram a canola, termo empregado para se referir àquelas variedades de colza com baixos teores de ácido erúico e glucosinolatos (OFFICE OF THE GENE TECHNOLOGY REGULATOR, 2011).

A linhaça ou linho (*Linum usitatissimum*) tem sido cultivado há vários séculos, mas originalmente para a produção de fibras têxteis. Na sua utilização mais moderna

como fonte de óleo vegetal, as variedades apresentam caules mais curtos (0,60 – 0,80 m) e mais finos além de mais ramificados que as variedades destinadas à produção de fibras (0,80 – 1,20 m). Comumente encontram-se variedades que produzem sementes com teores de óleo entre 400 e 440 g kg⁻¹. O óleo é empregado principalmente para fins não comestíveis, como na produção de tintas, vernizes, linóleo (tecido impermeável) e tintas para impressão. Além disso, devido aos altos teores de ω -3 (ácido linolênico – 18:3) que são superiores a 500 g kg⁻¹ de óleo (**Tabela 2**), o óleo é comercializado em lojas de produtos naturais com reconhecidos benefícios à saúde humana (KOCHHAR, 2002).

Tabela 2 – Composição de ácidos graxos dos óleos vegetais e propriedades físico-químicas para os óleos e petrodiesel

Ácido graxo	Esqueleto carbônico	Linhaça	Crambe	Canola	Pinhão-manso	Petrodiesel
Composição (%)						
Mirístico	14:0				0,1 - 0,79	
Palmitico	16:0	5,1 - 6	2,07	3,2 - 5	13,2 - 19,9	
Esteárico	18:0	2,5 - 4	0,7	1,1 - 2	3,7 - 9,8	
Araquídico	20:0		2,09		0,08	
Behênico	22:0		0,8			
Lignocérico	24:0		1,12			
Palmitoléico	16:1 (Δ^9)	0,3			0,54	
Oléico	18:1 (Δ^9)	13 - 37	18,86	55 - 64,1	34,3 - 45,8	
Linoléico	18:2 ($\Delta^{9,12}$)	5 - 23	9	18,2 - 31	9,28 - 44,2	
Linolênico	18:3 ($\Delta^{9,12,15}$)	26 - 60	6,85	8,2 - 10	0,3 - 0,92	
Erúcido	22:1 (Δ^9)		58,51	1 - 2		
Propriedades físico-químicas						
Viscosidade cinemática a 40 °C (mm ² s ⁻¹)		22,2 - 27	53	37 - 39,0	35,9 - 37,9	2,7-3,6
Densidade específica 20 °C (kg m ⁻³)		920	900	920	910	830 - 870
Teor de cinzas (%)		0,009	0,05	0,0098	0,04	0,0124
Numero de cetano (NC)		34,6	44,6	37,6	45,0	45 - 47
Poder calorífico (kJ kg ⁻¹)		39.307	40.482	39.700	37.500 - 39.636	42.200 - 45.343
Ponto de fulgor (°C)		241	274	246 - 290	229 - 238	52 - 70
Índice de iodo		168 - 204	93		104 -186,0	-

Δ - posição da insaturação na cadeia carbônica

Fonte. ALTIN (2001); KNOTHE et al. (2006); MONDAL et al. (2008); BALAT (2008); CHAUAHAN et al. (2010); KRATZEISEN e MÜLLER (2010).

O crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) é uma espécie pertencente à família das brassicáceas. Indica-se como sua origem a região da Etiópia de transição entre clima

temperado e quente, com precipitação moderada. Sua domesticação ocorreu em regiões secas e frias do Mediterrâneo. Tradicionalmente, o crambe é produzido nos Estados Unidos e Europa, sendo pouco difundido o seu cultivo no Brasil. O óleo, apesar de não comestível, tem ampla utilização na indústria química e atualmente tem sido destinado também à produção de biodiesel (PITOL et al., 2010).

2.2 EXTRAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS ÓLEOS VEGETAIS

Para a extração do óleo dos vegetais, existem por via mecânica, basicamente dois processos, prensagem a frio e com pré-aquecimento da matéria prima, nas quais o óleo extraído contém de 1 a 12 % de materiais turvos (sedimentos) e necessita de purificação, feita por meio da sedimentação, filtração ou centrifugação. Na torta resultante, ainda podem ser somados processos de extração química, como é o caso da indústria da soja e, conforme a matéria prima, a torta (somente extração física) ou o farelo (extração física somada à química ou somente química) podem ser utilizadas como ração animal ou adubo (FUCHS, 2006; DORSA, 1995).

Após a extração, os óleos podem ser submetidos a vários processos de purificação além da filtração, como por exemplo, a degomagem, que se constitui na retirada de fosfolípidios ou fosfatídeos hidratáveis (gomas solúveis). A via de retirada se dá por processo físico, utilizando aquecimento (60 °C) e a água, procedida por diferença de densidade. Quando os grãos passam por um período de armazenamento muito longo, ou armazenagem de grãos danificados e úmidos, ou ainda, se for utilizado solventes (hexano) para a extração química do óleo, como é o caso da indústria de processamento de soja, ainda são necessários outros tipos de degomagem, conhecidos como degomagem química ou refino, com objetivo de extrair fosfatídeos não hidratáveis, e/ou complexos metal/fosfatídeos, podendo fazer parte destes metais, o ferro, o sódio, o magnésio, o potássio e até o enxofre (não metal), que por ação de ácidos e bases são cindidos em sais insolúveis em óleo. Também fazem parte dos fosfatídeos não hidratáveis o ácido fosfático. Estes constituintes também causam baixa estabilidade dos óleos, tornando-os mais susceptíveis a processos de degradação (DORSA, 1995).

Ainda fazem parte dos lípidios compostos ou triacilgliceróis as ceras, que são ésteres de ácidos graxos e mono-hidroxialcoóis de ácidos graxos carboidratos de alto peso molecular, com uma base nitrogenada. Estes compostos tem alto ponto de fusão, são altamente resistentes a decomposição térmica e também são insolúveis em água (BOBBIO;

BOBBIO,1985). Dependendo da quantidade de ceras presente no óleo, quando submetidos a baixas temperaturas, causam turbidez, em função da tendência de cristalização. Óleos de algumas culturas como girassol, milho e arroz necessitam ser decerados, processo que é realizado mantendo-se o óleo 24 horas a 0 °C e mais 3 dias a temperatura ambiente, onde as ceras são separadas por diferença de densidade (DORSA, 1995).

Para a produção de biodiesel, dependendo da matéria prima utilizada, óleos devem passar pelos processos de purificação citados acima (uns por mais processos e outros por menos), e posteriormente estarem adequados a passar pelo processo de transformação química conhecida como transesterificação. Esta é definida como a reação de um triglicerídeo (óleo ou gordura), com um álcool (etanol, metanol, propanol, etc.), catalisada por ácidos, bases ou enzimas, resultando em glicerina e ésteres de ácido-graxo (GERPEN et al., 2006). No caso da rota metílica, a mais estudada, existe a vantagem do álcool recuperado ao final do processo (excesso de álcool utilizado para acelerar a reação) não conter água, podendo ser diretamente reutilizado. No caso da rota etílica, um número maior de etapas é exigido, sendo mais complexa a separação da glicerina dos ésteres, e o álcool recuperado não poderá ser reutilizado diretamente, devido ao teor de água adquirido, que atua como inibidora da reação (KNOTHE et al., 2006).

Ainda existe um processo denominado craqueamento catalítico (pirólise), que é utilizado no refino do petróleo e obtenção do petrodiesel. O craqueamento se dá pela ação física do calor, o que dispensa a utilização de catalisadores e reagentes (caso da transesterificação), tornando o produto final mais similar aos produtos oriundos do petróleo. Para o caso do bioquerosene de aviação, é regulado a utilização deste processo na transformação para garantir a qualidade e a compatibilidade do produto final ao querosene obtido do petróleo. A instalação de um projeto de produção de biodiesel por craqueamento tem custo menor, porém apresenta rendimento menor e produção mais cara que o processo de transesterificação (JAKUBASZKO, 2006).

Os custos do óleo vegetal e/ou biodiesel dependem da cultura utilizada na produção, do nível tecnológico empregado para a produção e nos processos de transformação, sendo que no 33º leilão de 2013 realizado pela ANP, o biocombustível alcançou preço médio de R\$ 1.941,40 o metro cúbico, onde neste já estão inclusos os lucros das indústrias de transformação. Visto que em média 80% do biodiesel Brasileiro é produzido a partir de soja, na qual o preço médio da matéria prima no Paraná é de R\$ 1.158,30 a mega-grama (Mg) de soja grão, R\$ 1.125,0 a Mg do farelo e R\$ 2.203,30 a Mg do óleo (RuralBR Cotação, 2014), quando converte-se o metro cúbico de biodiesel, que possui aproximadamente 0,873 Mg para

a relação 1:1, tem-se que o preço da Mg do biodiesel é de aproximadamente R\$ 2.223,83. Com isto, observa-se que para o preço de mercado do óleo de soja, a conta das indústrias parece não fechar. Para tal conclusão, ainda é necessário fazer um estudo dos abatimentos fiscais que as indústrias de biodiesel possuem ao obter o Selo Social.

2.3 COMBUSTÍVEIS PARA MOTORES DIESEL

A primeira característica de qualidade que pode ser considerada para um combustível destinado a motores de ignição por compressão é a composição e conformação molecular. O petrodiesel é composto basicamente por alcanos (parafinas) que são hidrocarbonetos alifáticos saturados e podem apresentar cadeias carbônicas lineares ou ramificadas. Também fazem parte da composição os hidrocarbonetos mono e policíclicos aromáticos (HPA), cicloalcanos e pode conter alguns alcenos (naftenos), que são hidrocarbonetos alifáticos insaturados lineares ou ramificados (OBERT, 1971).

Em relação à composição química dos óleos vegetais pode-se considerar que são similares ao petrodiesel, onde basicamente são compostos por hidrocarbonetos alifáticos lineares não ramificados saturados (alcanos) e insaturados (alcenos) ligados a um ácido orgânico (ácido carboxílico $R_1\text{-COO-R}_2$), mais conhecidos como ácidos graxos. Ainda estes acidificam uma molécula de 1,2,3-propanotriol, também chamado de glicerol, formando o composto conhecido como triacilglicerol, que são os lipídeos de reserva das plantas (LEHNINGER et al., 1995; TAIZ; ZEIGER, 2004; KNOTHE, 2006b).

Considerando que estes combustíveis alternativos são utilizados em projetos de motores de ignição por compressão, quando se volta aos princípios no qual a máquina de Diesel foi idealizada, isto é, baseando-se no teorema ou ciclo de Carnot, onde o calor da mudança isotérmica e adiabática de um “gás” é convertido em trabalho, sabe-se que o motor de ignição por compressão exige que o combustível esteja na forma, ou o mais próximo, de um gás, para ocupar o ambiente da câmara e misturar-se ao comburente instantaneamente, e entre em ignição praticamente todo a uma mesma temperatura. No caso do petrodiesel e dos óleos vegetais, possuem a última propriedade (relacionada ao número de cetano), resta convertê-los em algo que se assemelhe a um gás, o que é feito pelo sistema de injeção dos motores. Porém como este sistema foi idealizado para funcionar com petrodiesel, quando se usa óleo vegetal, por este possuir viscosidade aproximadamente 10 vezes maior, o processo de atomização feito pelo bico injetor não ocorre adequadamente. Sendo assim a redução da

viscosidade pode mitigar estes problemas operacionais (RYAN III et al., 1984; GERPEN; KNOTHE, 2006b).

Cinco métodos têm sido estudados para resolver o problema da viscosidade dos óleos vegetais visando a utilização como combustíveis em motores Diesel. O uso de misturas binárias com o petrodiesel, microemulsificação (mistura co-solvente), o aquecimento, transformação por pirólise e o mais conhecido e utilizado que é a transesterificação (GERPEN; KNOTHE, 2006b).

Além da viscosidade, existem diversas características físico-químicas que podem ser utilizadas como indicadores da qualidade do combustível, e seus parâmetros são relacionados a propriedades do petrodiesel, utilizado como padrão. A **Tabela 3**, apresenta diversas propriedades que podem ser avaliadas em um combustível Diesel, porém serão comentadas apenas as consideradas mais importantes com relação ao funcionamento dos motores.

Tabela 3 –Propriedades físico-químicas utilizadas como padrão de qualidade de combustível para motores Diesel

Propriedades	Unidade	Limites	Normalização
Numero de Cetano (NC)	-	42 – 48	ASTM/D 613
Viscosidade a 40 °C	cSt/mm ² s ⁻¹	2,5 – 5,5	ABNT/NBR10441
Poder Calorífico	kJ kg ⁻¹	> 36.006	E DIN 51 605
Densidade a 20 °C	kg m ⁻³	820 – 865	ABNT/NBR 14065
Ponto de fulgor	°C	> 38,0	ABNT/NBR 14598
Ponto de névoa	°C	4	ABNT/NBR 14747
Cinzas	%	0,02	ABNT/NBR 9842
Enxofre	%	0,20 – 0,35	ABNT/NBR 14533
Corrosividade	-	1	ABNT/NBR 14359
Contaminantes	%	0,05	ABNT/NBR 14647
Aparência (aspecto e cor)	-	-	ABNT/NBR 14483

Fonte: Machado (2008).

O número de cetano (NC) é um indicativo adimensional da propriedade de ignição de um combustível para motores de combustão por compressão, e como tal, é um excelente indicador de qualidade. Este índice é determinado pelo tempo de retardamento da autoignição do combustível, isto é, pelo tempo que passa entre a injeção do combustível no cilindro e a ocorrência da ignição do mesmo. Quanto menor o tempo de ignição maior o NC e vice-versa. A escala de cetano é baseada na propriedade de combustão de um composto chamado hexadecano (CH₃(CH₂)₁₄CH₃), um hidrocarboneto de cadeia linear e considerado de

alta qualidade de ignição e, a este, foi atribuído NC de 100. No outro lado da escala está o heptametilnonano ($\text{CH}_3[\text{CH}(\text{CH}_3)]_7\text{CH}_3$) hidrocarboneto de cadeia linear altamente ramificado e de péssima qualidade de ignição, sendo atribuído NC de 15. Portanto as ramificações e o comprimento da cadeia carbônica influenciam no NC, com o valor decrescendo com a diminuição do comprimento da cadeia carbônica e com o aumento do grau de ramificações. Assim como as ramificações e cadeias curtas, os compostos aromáticos também apresentam baixo NC, sendo que este valor aumenta com o aumento do comprimento das cadeias carbônicas dos radicais laterais n-alquílicos (KNOTHE, 2006c).

Valores de NC muito altos ou muito baixos podem causar problemas operacionais no motor. Se o NC for muito alto, a combustão pode ocorrer antes do combustível e do ar estarem adequadamente misturados, resultando em combustão incompleta (pirólise), causando carbonização, contaminação do lubrificante e aumento da emissão de gases e partículas. Se o NC for muito baixo, podem ocorrer falhas de ignição a frio, trepidação, aquecimento lento do motor e também fenômenos de combustão incompleta. A maioria dos motores estão projetados para trabalhar com NC entre 40 e 55 (PETERSON et al., 1983; RYAN III et al., 1987; KNOTHE, 2006c).

A viscosidade é uma medida da resistência a vazão ou escoamento de um líquido, associado à fricção ou atrito interno de uma parte do fluido que escoar sobre outra. A viscosidade cinemática (dada em $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$ ou cSt), é relacionada a viscosidade dinâmica, empregando a densidade como fator de estimação, por isso torna-se mais adequada para avaliar combustíveis de motores Diesel. Esta propriedade afeta a atomização do combustível no momento da injeção na câmara de combustão e, em análise, promove deficiência de combustão (pirólise), formação de depósitos e contaminação do lubrificante por produtos da combustão (RYAN III et al., 1984; KNOTHE, 2006c).

O poder calorífico (calor de combustão) é o conteúdo de energia dado em kJ kg^{-1} ou kcal kg^{-1} de um determinado composto. Para os combustíveis de forma geral, a energia é relacionada aos conteúdos de carbono (C) e hidrogênio (H) que estão contidos nas moléculas por quilograma da mesma, onde o poder calorífico do C é igual a $34.080,55 \text{ kJ mol}^{-1}$ ($8.140 \text{ kcal mol}^{-1}$) e o do H é igual a $120.161,16 \text{ kJ mol}^{-1}$ ($28.700 \text{ kcal mol}^{-1}$), sendo que moléculas com cadeias saturadas em hidrogênio apresentam maior poder calorífico que moléculas insaturadas análogas. Ainda existe uma absorção de energia para provocar a quebra da molécula com conseqüente combustão, na qual para ocorrer à ruptura de uma ligação simples C–H exige-se aproximadamente $418,68 \text{ kJ mol}^{-1}$ ($100 \text{ kcal mol}^{-1}$) e, para o caso de uma insaturação C=C, são necessários aproximadamente $669,89 \text{ kJ mol}^{-1}$ ($160 \text{ kcal mol}^{-1}$).

Neste caso além de apresentar menos “H”, existe ainda a maior absorção de energia para ocorrer a oxidação térmica completa (LEHNINGER et al., 1995; BOBBIO; BOBBIO, 1992; KNOTHE, 2006c).

Os tipos de estrutura molecular também influenciam no conteúdo de energia, pois promove alterações na densidade do produto. O óleo Diesel com altas porcentagens de aromáticos tende a ter altos conteúdos de energia por litro (alta densidade), ainda que os aromáticos tenham baixos poderes caloríficos. Sua alta densidade compensa seu baixo conteúdo energético por quilograma. Isto tem importância quando se trata de combustível Diesel, porque o combustível é fornecido volumetricamente pelo sistema de injeção dos motores com comando mecânico de injeção (para o caso dos eletrônicos a dosagem é controlada pelo tempo de abertura do injetor a qual pode ser realizada em várias injeções sequentes por tempo de combustão do ciclo).

Sendo assim, um combustível com baixo conteúdo energético por litro, causará redução na potência máxima desenvolvida pelo motor. Em condições de cargas parciais, o motor fornecerá a potência necessária, mas com uma demanda maior de combustível, resultando em aumento de consumo. Nestes casos, com o aumento do volume injetado, o sistema de injeção pode avançar o ponto de injeção de combustível, e isto pode causar um aumento nas emissões de NO_x . Ainda estes podem ser somados aos efeitos da compressibilidade do combustível, favorecendo a emissão deste gás (GERPEN, 2006). Por isso o baixo poder calorífico dos combustíveis a base de óleos vegetais (**Tabela 4**), quando comparados com o petrodiesel, podem ser compensados pela sua maior densidade, quando a mesma temperatura.

O Ponto de Névoa corresponde a temperatura inicial de cristalização do óleo e, influencia negativamente o sistema de alimentação do motor, como o filtro de combustível, provocando o aumento da restrição e possível entupimento quando trabalhado em baixas temperaturas (COSTA NETO et, al., 2000).

Tabela 4 –Propriedades físico-químicas de alguns combustíveis

Propriedades	Óleo combustível			Biodiesel**			Diesel*
	Mamona	Babaçu	Dendê	Mamona	Babaçu	Dendê	
Poder calorífico (kJ kg^{-1})	37.318	37.886	37.455	37.874	39.523	39.900	45.318
Ponto de névoa ($^{\circ}\text{C}$)	10	26	31	-6	-6	6	1
Número de cetano	nd	38	39	nd	65	60	45
Viscosidade a 40°C ($\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$)	285	30,3	36,8	21,6	3,9	6,4	3,04
Ponto de fluidez ($^{\circ}\text{C}$)	-	-	-	-30	nd	nd	nd
Cinzas (%)	nd	0,28	0,54	0,01	0,03	0,01	0,014
Enxofre (%)	-	-	-	0	0	0	0,24

*Diesel tipo C; **Biodiesel de ésteres etílicos; nd – não determinado.

Fonte. RAMOS (2004).

Já os teores de cinzas residuais provocam depósitos na câmara de combustão e ductos de escape, e o enxofre promove a formação de material particulado na fumaça, devido às reações de complexação durante o processo de queima, diminuindo a qualidade e formando produtos voláteis que estão relacionados a formação de chuvas ácidas e causam mal a saúde (GERPEN, 2006b).

2.4 A BIOSÍNTESE DE LIPÍDIOS DE RESERVA PELAS PLANTAS

Existem basicamente dois tipos de biossíntese, os glicerolipídios polares ou fosfolipídios (diacilglicerol-3-fosfato), que formam as bicamadas lipídicas das membranas celulares e, os triacilgliceróis, que são os óleos de estocagem (TAIZ; ZEIGER, 2004). Este último será enfocado abaixo.

Os lipídios de reserva são formas importantes de armazenamento de carbono em muitas sementes. Quando comparado com os carboidratos, estes se apresentam como uma forma mais reduzida de armazenamento de carbono, tanto que a oxidação completa de 1g de lipídios (40 kj ou 9,3 kcal) pode produzir mais ATP do que a oxidação da mesma quantidade de amido (12 kj ou 2,8 kcal) (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Os lipídios constituem um grupo de compostos que, apesar de quimicamente distintos entre si, são definidos por sua insolubilidade em água e, do ponto de vista químico, são altamente reduzidos, derivados dos ácidos graxos e, estes são tão reduzidos quanto os hidrocarbonetos derivados do petróleo. Os ácidos graxos são ácidos carboxílicos com cadeias hidrocarbonadas de 4 a 36 átomos de carbono. Em alguns, esta cadeia é totalmente saturada e não ramificada, em outros podem conter uma ou mais duplas ligações (LEHNINGER et al., 1995).

Os ácidos graxos e os triacilgliceróis não são transportados na planta, sendo somente sintetizados nos locais de acúmulo. A síntese ocorre a partir de carboidratos, fundamentalmente sacarose, transportada a partir das folhas (fotossíntese). Este é o substrato para a glicólise e formação de piruvato, que dará origem ao acetil-CoA (CASTRO; KLUGE, 2005).

Na biossíntese dos ácidos graxos, uma enzima com 3 átomos de carbono, malonil-CoA, é o substrato para o início da reação de carboxilação (LEHNINGER et al., 1995). O malonil-CoA é formado pela acetil-CoA, que pode ser produzida diretamente pelo complexo piruvato desidrogenase, a partir do piruvato gerado na glicólise. As reações de

conversão e síntese ocorrem nos plastídios, que são organelas especializadas na síntese de lipídios (CASTRO, KLUGE, 2005).

A montagem dos carbonos no substrato malonil-CoA consiste em uma seqüência ou ciclo fundamental de quatro passos. Cada uma das passagens pelo ciclo aumenta dois átomos de carbono provenientes do acetil-CoA e libera uma molécula de CO₂. Este processo sintético é catalisado por um complexo multienzimático chamado de ácido-graxo-sintase e também ocorre nos plastídios. Quando o comprimento da cadeia atinge 16 carbonos (palmitato), este abandona o ciclo e acumula-se no retículo endoplasmático liso na forma de ácido graxo livre. Os ácidos graxos saturados de cadeia longa (maior que 16 átomos de carbono) são sintetizados a partir do palmitato, onde a elongação ocorre por adições de grupos acetila através da ação dos sistemas de alongamento dos ácidos graxos presentes no retículo endoplasmático liso (LEHNINGER et al., 1995 e TAIZ; ZEIGER, 2004).

A dessaturação dos ácidos graxos pode ocorrer ou não após a fase de elongação da cadeia carbônica. A dupla ligação é introduzida na cadeia do ácido graxo por uma reação oxidativa, catalisada pela acil-graxo-CoA dessaturase. Todo esse processo também ocorre no retículo endoplasmático liso (LEHNINGER et al., 1995).

Os ácidos-graxos insaturados, quando comparados com ácidos-graxos saturados similares (mesma quantidade de carbonos), liberam menor quantidade de energia, quando decompostos. Isto ocorre porque, para romper uma dupla ligação carbono-carbono, é necessário maior entrada de energia ($611,27 \text{ kJ mol}^{-1}/146 \text{ kcal mol}^{-1}$), quando comparado com a ligação simples ($347,5 \text{ kJ mol}^{-1}/83 \text{ kcal mol}^{-1}$). Ainda, as ligações que liberam maior energia quando rompidas são as ligações carbono hidrogênio, onde o poder calorífico do hidrogênio é de $120.161,16 \text{ kJ mol}^{-1}$ ($28.700 \text{ kcal kg}^{-1}$), enquanto o do carbono é de $34.080,55 \text{ kJ mol}^{-1}$ ($8.140 \text{ kcal kg}^{-1}$) (LEHNINGER et al., 1995). Sendo assim, quanto mais rico em hidrogênio for o combustível, maior será o seu poder calorífico.

Este fato da maior quantidade de insaturações na molécula, juntamente com o aumento do número de carbonos na cadeia, pode ser traduzido como aumento no número de cetano, o que pode provocar decomposição térmica incompleta do óleo com conseqüente acúmulo de resíduos na câmara de combustão, causando carbonização, contaminação do lubrificante e emissão de fumaça, provocado pela pré-ignição do combustível antes de ser totalmente misturado ao ar da câmara, como comentado no item 2.2. Ainda, além de necessário maior energia para a ocorrência da oxidação térmica completa de uma molécula com grande quantidade de insaturações, o balanço energético final é menor em relação a uma molécula saturada análoga (SILVA, 2006).

O número de insaturações e a quantidade de ácidos graxos insaturados é fator importante, pois em testes de injeção e verificação da qualidade combustível (Jet fuel oxidation tester – JFTOT-ASTM-D 3241-77) dos óleos vegetais, encontrou-se correlação com a composição química do óleo, mais precisamente com relação ao número de insaturações. Quanto maior a quantidade de ácidos graxos insaturados, principalmente o ácido graxo linolênico (18:3), maior a quantidade de depósitos formados, prejudicando o funcionamento do motor. (RYAN III et al., 1984).

Sabe-se que a composição do óleo de plantas cultivadas em temperaturas baixas apresenta alta concentração de ácidos graxos insaturados. Provavelmente, a planta utiliza este processo contra o meio hostil, pois esses apresentam menor temperatura do ponto de fusão que os ácidos graxos saturados análogos. Deste modo, a planta pode desenvolver-se em temperaturas baixas sem que suas funções sejam afetadas. Acredita-se que o aumento da dessaturação de ácidos graxos em temperaturas baixas seja favorecido pela maior solubilidade do O₂ em águas frias, a qual funciona como transportadora (CASTRO; KLUGE, 2005). Este fenômeno da maior concentração de ácidos graxos poli-insaturados foi observado na cultura do girassol quando cultivado em regiões de latitude diferenciada (ROBERTSON et al., 1979 apud BETTIS et al., 1982).

Para os ácidos graxos serem convertidos em triacilgliceróis, necessita-se de um precursor, o glicerol-3-fosfato, formado a partir da dihidroxicetona fosfato que aparece durante a glicólise. Este produto é ligado aos ácidos graxos livres no retículo endoplasmático através de vários passos enzimáticos junto a acil-graxo-CoA em suas respectivas vias de biossíntese, ocorrendo no último passo a acilação dos grupos hidroxila livres, para liberar o diacilglicerol-3-fosfato (fosfatidato) e, por último, o triacilglicerol (LEHNINGER et al., 1995).

Variáveis de composição do óleo como os tipos de ácidos graxos, tamanho da cadeia carbônica e a existência de insaturações, podem ser mais suscetíveis a ocorrência de degradações. As insaturações nos ácidos graxos são passíveis a degradações oxidativas, nas quais podem ser liberados hidrocarbonetos voláteis como aldeídos, cetonas, ácidos carboxílicos e, também podem ser liberados produtos não voláteis como hidrocarbonetos cíclicos, não cíclicos e compostos de alta massa molecular. Também podem ocorrer degradações hidrolíticas, no contato com umidade, liberando ácidos graxos livres. As condições de armazenamento podem favorecer a ocorrência destes tipos de degradação, como contato com ar, luz solar e temperatura inadequada (BOBBIO; BOBBIO, 1985; LEHNINGER et al., 1995).

Fica claro que estudos de casos são necessários, pois um determinado óleo vegetal pode apresentar características interessantes regionalmente. Aspectos técnicos, econômicos e sociais que envolvem determinada cultura devem ser considerados, pois podem se apresentar distintos em de acordo com a região.

2.5 UTILIZAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS À BASE DE ÓLEOS VEGETAIS

O grande desafio para pesquisa é o de encontrar combustíveis alternativos ao petrodiesel que possibilitem a sua utilização sem modificações ou com as mínimas possíveis nas unidades de potência existentes, devido a sua difusão no mundo (ENGLER et al., 1983). O setor agrícola, cujo petrodiesel é a principal fonte de energia, está voltando suas atenções para os combustíveis à base de óleos vegetais como seu substituto direto. Isto porque estimativas de custos com combustíveis para a produção de grãos, em especial o petrodiesel, representam de 7 a 20% (JAKUBASZKO, 2006) do total. Dados dos Campos Gerais – PR, indicam custos com petrodiesel para produção na lavoura de soja e de milho da ordem de 8,9% e 7,2% respectivamente (GIMENEZ, 2006).

Embora existam muitos relatos de motores Diesel operando com óleos vegetais como combustível puro ou misturado com petrodiesel, ainda não está claro quais as melhores características e definições dos óleos vegetais para a utilização direta como combustível. Muitos estudos não têm incluído os processos de purificação e a caracterização físico-química dos óleos vegetais utilizados como combustível, visto que são variáveis dependentes da cultura e de fatores ambientais. Sendo assim, não fica evidente como o desempenho dos motores pode ser influenciado pelos diferentes combustíveis (ENGLER et al., 1983). Um bom começo seria a caracterização e comparação com os parâmetros de qualidade do petrodiesel, como viscosidade cinemática, ponto de névoa, ponto de fluidez, ponto de fulgor, cinzas, enxofre e número de cetano (DUNN, 2006).

Interpretando diversas publicações sobre o assunto ensaio de motores, estes podem ser classificados como “ensaios de curta e de longa duração”. Estes são diferenciados por duas características básicas, a duração do ensaio em relação à vida útil do lubrificante do motor, de acordo com a recomendação de troca indicada pelo fabricante e, pelo tipo e forma de avaliação das variáveis. Os ensaios de curta duração possuem a característica de avaliarem variáveis de resposta rápida, como por exemplo, o consumo, a potência, o torque, as emissões de gases, e variações pontuais de temperatura e pressão, no qual o tempo de avaliação para cada tratamento aplicado é sempre menor que o estimado para a vida útil do lubrificante

(recomendação de troca do lubrificante por horas de funcionamento ou quilômetros rodados). Estas variáveis são consideradas de resposta rápida, pois normalmente se alteram imediatamente ao tratamento aplicado.

Os ensaios de longa duração são caracterizados por possuir o período de avaliação de cada tratamento igual ou superior à vida útil do lubrificante, de acordo com a recomendação do fabricante, somados a avaliações de desgaste e da vida útil de componentes do motor, através da contaminação do lubrificante por produtos advindos da câmara de combustão e, de traços de metais provenientes do desgaste de partes móveis, bem como outros fatores ligados à vida útil do lubrificante. Normalmente também é avaliado o comportamento de variáveis como pressão de compressão da câmara de combustão, e as variáveis de resposta rápida citadas nos ensaios de curta duração, ao longo do tempo de ensaio. Ainda é necessário relatar que a vida útil do lubrificante pode variar de 50 até 300 horas de trabalho, de acordo com o projeto do motor e o fabricante.

Na década de 80, testes de longa duração realizados no Brasil com biodiesel a partir de óleo de soja e metanol demonstraram resultados positivos. Nesta época também houveram diversos estudos relacionados à utilização de óleo vegetal “*in natura*” como combustível em motores ciclo Diesel. Foram encontrados problemas como carbonização excessiva causada pela queima incompleta, baixo poder calorífico, consumo elevado, desgaste acentuado do motor, odor desagradável dos gases de exaustão e a possibilidade de formação de acroleína, substância tóxica resultante da pirólise de glicerol (TOLMASQUIM, 2003). Tal substância é potencialmente cancerígena (SILVA et al., 2004), podendo também destruir as fibras elásticas e irritar as mucosas gastrintestinal e nasal (NEW JERSEY DEPARTMENT OF HEALTH AND SENIOR SERVICES, 1998). Tais fatos sugerem uma linha de pesquisa para estudos quanto à emissão de gases quando utilizados óleos vegetais combustíveis.

Quanto à emissão de gases poluentes, alguns trabalhos têm demonstrado que os combustíveis a base de óleos vegetais apresentam menor emissão poluentes. Porém, estudos com biodiesel relatam o aumento da emissão de óxidos de nitrogênio, quando comparado com o petrodiesel. Estes óxidos são mais potentes que o monóxido e o dióxido de carbono na indução do efeito estufa (ALTIN et al., 2001 e AGARWAL et al., 2011), apesar de não apresentarem toxidez a saúde humana, como o monóxido de carbono e o material particulado.

Os gases emitidos por motores Diesel são misturas complexas de compostos orgânicos e inorgânicos, na forma de gás, líquidos e sólidos. Destes, as legislações e os órgãos de fiscalização, tem dado maior atenção para à porção sólida, chamada de material

particulado, por ser tóxica a saúde humana, pois contém em sua composição carbono elementar (fração inorgânica sólida insolúvel) e, compostos orgânicos solúveis adsorvidos, como benzeno. O material particulado é composto basicamente por um núcleo de carbono elementar, com vários compostos adsorvidos, podendo ser classificados como orgânicos (solúveis e insolúveis em solventes orgânicos) e inorgânicos como, sulfatos, óxidos de nitrogênio, traços de metais pesados, vapores de óleo lubrificante não queimado, umidade, etc.. Neste incluem-se classes de compostos como aldeídos, alcanos, alcenos (cadeia linear e ramificada) e compostos aromáticos (anéis individuais, substituído, e poli-nuclear) (AGARWAL et al., 2011).

A utilização dos óleos vegetais combustíveis pode ser uma opção para mitigar as emissões de material particulado (MP) e dos gases. Ensaios comparando óleo de Karanja em mistura de 20% com petrodiesel e Karanja puro, contra o petrodiesel, em motor monocilindro com sistema de combustão direta, mostram reduções significativas na emissão de MP, sendo ainda observado efeito do pré-aquecimento na redução do mesmo (AGARWAL et al., 2011). Outras avaliações de emissão realizadas em motor com sistema de combustão direta, alimentado com misturas de óleo de algodão com querosene, apresentam redução de hidrocarbonetos entre 15 a 70%, de acordo com as porcentagens de mistura, quando comparado com o petrodiesel (BAYINDIR, 2010).

Ainda com relação às emissões de MP por motor alimentado com óleos vegetais, existem experimentos mostrando que as emissões podem variar de acordo com a carga aplicada ao motor e a porcentagem de óleo vegetal em mistura com o petrodiesel (PD). Um ensaio com motor alimentado com óleo de *Sapindus mukorossi*, concluem que misturas de até 30% de óleo vegetal no combustível, apresentam menor opacidade dos gases que o petrodiesel, quando em cargas entre 50 e 75% da nominal do motor. Os autores ainda observaram que na carga de 75% da nominal, as misturas com óleo vegetal apresenta eficiência térmica mais próxima do PD (MISRA; MURTHY, 2011). Outro estudo realizado em motor com sistema de combustão direta alimentado com diversas situações de mistura de óleo de farela de arroz e óleo puro pré-aquecido a 100, 110 e 120 °C mostrou aumento das emissões de hidrocarbonetos para os óleos pré-aquecidos, além de, os últimos apresentarem maior temperatura dos gases de exaustão. Como no experimento anterior, os autores encontraram que os óleos e misturas apresentaram melhor eficiência térmica nas cargas em torno de 80% da nominal do motor (ACHARYA et al., 2011).

Ensaios realizados com dois tipos de unidades de potência, uma de sistema de combustão direta e outra indireta, utilizando vários óleos vegetais, demonstraram que os

motores de combustão direta são extremamente dependentes do grau de atomização do combustível pelo bico injetor. Os problemas com injeção e atomização têm correlação direta com a viscosidade dos combustíveis, causando ao decorrer do tempo de utilização, *scuffing* (engripamento ou travamento de partes móveis) de anéis, além de outros já citados anteriormente. Estes efeitos são decorrentes da ocorrência de pirólise, de polimerização e de outras reações causadas pela incompleta combustão do combustível (RYAN III et al., 1984).

Os processos de redução de viscosidade por aquecimento também apresentam uma melhora da qualidade combustível para a característica número de cetano (NC), no qual em teste CRF cetano avaliando óleo de soja degomado, foi observado que, de 38 para 145 °C, o NC subiu de 36,6 para 39,3, aproximando-se da propriedade de combustão do petrodiesel (RYAN III et al., 1984).

Estudos relacionando às características e o desempenho de vários óleos (óleo de girassol filtrado, óleo de girassol degomado, óleo de girassol degomado e decerado, óleo de algodão filtrado, óleo de algodão degomado e óleo de algodão refinado), verificaram que conforme se aumentou o número de processos de purificação para o mesmo óleo vegetal, o desempenho do motor melhorou, conseqüentemente, pode-se dizer que a qualidade do combustível também foi melhorada. Para todos os óleos testados observou-se deposição de carbono na câmara de combustão, porém de fácil remoção. Outro fato é que, com o tempo de funcionamento, o consumo aumentou e o motor apresentou ruído mais elevado (ENGLER et al., 1983).

Os óleos vegetais obtidos por processos de prensagem, degomagem e refinação alcalina têm mostrado alguns aspectos positivos em testes de curta duração, como melhor eficiência térmica, consumo ligeiramente menor e redução da temperatura dos gases de exaustão, estes resultados mostraram ser dependentes da composição físico-química do óleo (PETERSON et al., 1983).

Operações com 100% de óleo de girassol apresentaram redução da rotação do motor, acúmulo de goma nos anéis e nos pistões e imediata perda de potência (PETERSON et al. 1983 e MAZIERO et al. 2005). Após o funcionamento do motor com os óleos vegetais, o teste de torque refeito para o petrodiesel foi consideravelmente menor que o torque inicial (PETERSON et al. 1983), demonstrando que os efeitos da utilização dos óleos vegetais não são diretamente reversíveis.

Testes de longa duração (830 h) utilizando óleo de girassol, linoleico de açafrão, oleico de açafrão, nabo e canola, mostraram que o desgaste foi quase o dobro para o óleo linoléico de açafrão quando comparado com o petrodiesel. O ultimo apresentou maior

carbonização na câmara de combustão e no bico injetor. O motor ainda apresentou problemas de ignição (partida) e *scuffing* (prendimento ou travamento de partes móveis) dos anéis seguido de perda de compressão (PETERSON et al., 1983).

Testes utilizando óleos vegetais obtidos por processos de filtragem e refino alcalino, mostraram que suas viscosidades têm correlação na formação de depósitos de carbono na câmara de combustão, pois o aumento da viscosidade resulta em incompleta atomização do combustível. Estes óleos também apresentaram diferenças no desempenho dos motores, principalmente com relação à eficiência térmica, como mostra a **Tabela 5** (BETTIS et al., 1982).

Tabela 5 –Desempenho dos óleos vegetais combustíveis e do petrodiesel no teste de curta duração em um motor 4 cilindros, 2,8 dm³ e viscosidade do combustível

Combustível	Eficiência térmica (%)	Consumo (kg h ⁻¹)	Potência (kW)	Viscosidade cinemática (mm ² s ⁻¹)
Oléico de açafraão	27,0 a*	10,2	30,0	42,1 b*
Linoléico de açafraão	26,0 b	10,4	29,5	32,3 e
Canola	26,6 ab	10,0	29,4	51,0 a
Nabo	26,5 ab	10,2	29,7	39,0 c
Girassol	26,7 ab	10,1	29,5	34,9 d
Diesel	24,2 c	9,7	29,5	2,9 f

*Médias seguidas das mesmas letras na coluna não diferem entre si pelo teste de Duncan p>0,05.

Fonte: BETTIS et al. (1982)

Nestes óleos citados encontrou-se que 99% das variações na viscosidade são dependentes do comprimento da cadeia carbônica do ácido graxo, do número de ligações insaturadas e da interação entre estes componentes e estes, quando comparados com o petrodiesel, possuem viscosidade de 11 a 17 vezes maior (BETTIS et al., 1982).

Experimentos avaliando motor Diesel com sistema de combustão direta alimentado com óleo de farelo de arroz obtiveram que o pré-aquecimento realizado para reduzir a viscosidade do óleo (100 e 120 °C apresentaram viscosidades de 8,4 e 3,6 mm² s⁻¹ respectivamente), não melhorou a eficiência térmica do óleo vegetal. Os autores comentam que este resultado é reflexo das características de combustão ruins do óleo vegetal utilizado, causado não só pela viscosidade elevada, mas também pela baixa volatilidade do biocombustível (ACHARYA, et al., 2011).

Estudos avaliando as características de combustão de motor Diesel com sistema de combustão direta alimentado com óleo de girassol puro e misturas de óleo de jojoba com PD encontraram que o óleo de girassol proporciona maior pressão de combustão e maior temperatura dos gases de exaustão que o PD, porém, a curva de pressão de combustão

do petrodiesel alcança o pico mais rápido em comparação com os óleos vegetais avaliados. Tal fenômeno é influenciado pelo número de cetano (NC) dos combustíveis, que, no caso do PD, por possuir NC maior, este queima mais rápido e causa tal fenômeno (SHEATA; RAZEK, 2011).

Com relação aos ésteres (biodiesel), testes de desempenho de curta duração indicaram que suas propriedades foram semelhantes as do petrodiesel. Dos biocombustíveis testados, o único que apresentou algumas características diferenciadas foi o biodiesel de mamona, principalmente com relação à viscosidade (TOLMASQUIM, 2003). Deste modo, fica claro que nem sempre os processos de transformação são suficientes para adequar o material para o uso e, a soma de novos processos para solução de alguns problemas evidentemente vão acrescentar custo ao produto.

Para o biodiesel os estudos estão mais adiantados. Atualmente pode-se encontrar no mercado fabricantes garantindo seus motores para misturas de 5, 20, 25% de biodiesel no petrodiesel, e até biodiesel puro (B100), como por exemplo, a Agrale, linha 4.000 (garante para B5), a fabricante de motores Perkins, garante os motores da Série 1.100 para B5, e a Massey Ferguson e Valtra a partir de 2007 garante perfeito funcionamento até com biodiesel puro (B100).

Concomitantemente existem estudos mostrando que, quando comparado com o petrodiesel, misturas acima de B25% (25% biodiesel em 75% de petrodiesel) provocam aumento de consumo e perda de potência (LOPES et al., 2006). No caso do aumento de consumo, normalmente o número de cetano do biodiesel é maior quando comparado com o petrodiesel (**Tabela 4**), combustível base dos projetos de motores. O que pode provocar pré-ignição do combustível causando queima incompleta e perda de eficiência térmica, provocando todos os problemas já citados anteriormente. Este efeito pode ser mitigado na utilização de motores com tecnologia de comando eletrônico de injeção que, possui maior velocidade de injeção e, em alguns sistemas eletrônicos podem fornecer até cinco injeções por tempo de combustão do ciclo, favorecendo a mistura combustível comburente, com melhora da queima e da eficiência térmica (DELALIBERA et al., 2012 e DELALIBERA et al., 2013).

O uso de óleos vegetais sem transformação química já foi estudado no período entre a primeira e a segunda grande guerra. Na Alemanha, por exemplo, existem motores, desenvolvidos com grandes modificações de projeto para utilização deste tipo de combustível, como por exemplo, o motor Elko (abreviatura de Elsbett Konstruktion) (SCHWEITZER, 1956 e ELSBETT-MOTORENBAU, 1956). Também existem “kits” para

adaptar a entrada do sistema de alimentação e permitir a troca de combustível petrodiesel para óleo vegetal, os quais estão disponíveis comercialmente, porém sem comprovação técnico-científica de que estes equipamentos/metodologias não comprometam a longo tempo o desempenho e vida útil dos motores.

No Brasil, alguns ensaios de “curta duração” foram realizados em bancada dinamométrica, com utilização de misturas de óleo de soja e petrodiesel pré-aquecidas. Das misturas utilizadas, a que apresentou os melhores resultados com relação a consumo, torque e potência, foi uma mistura com 70% de óleo de soja e 30% de petrodiesel, pré-aquecida a 68 °C na entrada da bomba injetora. Os resultados de desempenho desta mistura foram melhores até que o petrodiesel puro (SCHLOSSER et al. 2007).

Outro fator importante é a manutenção da qualidade do lubrificante. Alguns ensaios com óleo de açafrão observou-se aumento da viscosidade do lubrificante da ordem de 2,6 vezes do inicial, verificada no tempo de troca indicado pelo fabricante. Para o petrodiesel e para as misturas de óleo de nabo com petrodiesel e aditivo (para redução da viscosidade), encontrou-se uma razão e aumento de viscosidade da ordem de 1,6 do inicial. As análises do material mostraram que o óleo de açafrão utilizado causou elevada oxidação dos componentes de aço, alumínio, cromo, molibdênio e ferro (PETERSON et al., 1983). Em vários trabalhos realizados por fabricantes norte americanos de motores chegou-se a recomendação de 100 horas de utilização para troca do óleo lubrificante, para motores onde se recomenda troca com 250 horas (DUNN, 2006).

Avaliações realizadas no Brasil com óleo de soja degomado e refinado, pré-aquecido a 65 °C em mistura de 50% em volume com o petrodiesel, para um motor com sistema de comando eletrônico de injeção (common rail) e combustão direta, não foi observado contaminação do lubrificante, demonstrando que os sistemas eletrônicos favorecem a queima do combustível com conseqüente redução da contaminação do lubrificante, porém observou-se grande redução da vida útil dos injetores (DELALIBERA et al. 2012).

3 JUSTIFICATIVA

A maioria dos trabalhos científicos relacionados a este tema é de bibliografia internacional. No Brasil existem alguns polos trabalhando principalmente com ensaios de motores alimentados com biodiesel, muitas vezes projetos com aporte total da indústria de motores e tratores, onde a informação gerada não é disponibilizada na íntegra. Considerando a regionalidade dos óleos vegetais, bem como falta de dados concretos no caso da utilização destes como combustível, puros ou misturados com petrodiesel, considera-se a necessidade de trabalhos nesta área para determinar aqueles que apresentam melhor desempenho para tal finalidade.

4 OBJETIVOS

Avaliar o desempenho e o comportamento técnico de motor ciclo Diesel em ensaio de curta duração alimentado com diferentes óleos vegetais puros à temperatura de trabalho do motor (± 60 °C) e pré-aquecidos (± 100 °C) em comparação com o petrodiesel.

4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- avaliar a influencia dos tratamentos (biocombustíveis sem e com pré-aquecimento) nas temperaturas do sistema de arrefecimento e do sistema de exaustão de gases;
- observar o efeito do pré-aquecimento do óleo vegetal combustível no desempenho do motor;
- avaliar o consumo do motor para os cinco combustíveis/biocombustíveis;
- avaliar a potência de acordo com o combustível/biocombustível;
- avaliar a emissão de material particulado pelo método da opacidade, para o petrodiesel e para quatro óleos vegetais distintos (Linhaça, Crambe, Canola e Pinhão-manso) com e sem pré-aquecimento;

5 ARTIGO A: DESEMPENHO DE MOTOR DIESEL ALIMENTADO COM QUATRO ÓLEOS VEGETAIS, PRÉ-AQUECIDOS E NA TEMPERATURA DE TRABALHO DO MOTOR

PERFORMANCE OF DIESEL ENGINE FUELLED WITH FOUR VEGETABLE OILS, PREHEATED AND AT ENGINE WORKING TEMPERATURE

5.1 RESUMO

Algumas linhas de estudo estão direcionadas ao desenvolvimento dos óleos vegetais não transformados aplicados como combustível, por serem fonte de menor custo e não serem classificados como combustível pela legislação. Atualmente com as leis rigorosas para emissão de gases de motores Diesel, focando principalmente no material particulado, diversas tecnologias tanto para petrodiesel (PD) quanto para motores tem sido aplicadas, como a redução de enxofre e a utilização de comando eletrônico de injeção, seguido de recirculação de gases ou catalizadores. A utilização dos combustíveis renováveis entra como opção interessante na redução de poluentes. Neste trabalho, realizou-se ensaios de desempenho em curta duração de motor Diesel alimentado com óleos vegetais. As variáveis analisadas foram consumo de combustível, perda de potência relativa e opacidade, para os óleos de linhaça, crambe, canola, pinhão-manso com e sem pré-aquecimento e PD. Verificou-se que os óleos vegetais, na média geral, apresentam menor consumo em aceleração livre que o PD, porém quando sob carga, apresentam consumo maior. Observou-se também que os óleos apresentam maior perda relativa de potência em relação ao PD, porém de forma geral proporcionam menor emissão de material particulado.

Palavras Chave: Consumo. Potência. Opacidade

5.2 ABSTRACT

Some lines of study are directed at the development of vegetable oils applied as a fuel, because they cost less and are not classified as fuel by the law. Currently the strict emission laws for Diesel engines, particulate matter focusing, on different technologies for both petrodiesel (PD) and motor have been applied, such as sulfur reduction and the use of electronically controlled injection, exhaust gas recirculation or catalysts. The use of renewable fuels enters as interesting option for reducing pollutants. This study was conducted performance short tests on Diesel engine fueled with vegetable oils. The variables analyzed were fuel consumption, power relative loss and opacity, for oils of linseed, crambe, rapessed, jatropha with and without preheating and PD. It was found that vegetable oils, on the average, have lower consumption under free acceleration that PD, but when under load, have higher consumption. It was also observed that the oils have a higher relative power loss in relation to PD, but generally emit less particulate matter.

Key-Words: Consumption, Brake power, Opacity

5.3 INTRODUÇÃO

A poluição do ar e o aumento do preço das fontes fósseis tem direcionado o desenvolvimento de pesquisas na busca de combustíveis alternativos aos derivados do petróleo. O Brasil com tecnologia e mercado já desenvolvido para o etanol, como substituto da gasolina, agora busca alternativas para o petrodiesel. Uma das premissas iniciais é de não sugerir alteração nos projetos dos motores já disponíveis. No momento os óleos vegetais e seus derivados, estão em foco, por apresentarem características similares ao petrodiesel, podendo ser aplicados puros ou misturados ao derivado do petróleo.

Porém os parâmetros e procedimentos de qualidade e de utilização para os óleos vegetais, ainda não estão definidos. Apesar de ser favorável do ponto de vista energético e ambiental, a utilização direta de óleos vegetais em motores Diesel é problemática. Estudos efetuados com diversos óleos mostraram que a aplicação direta como combustível provoca excesso de carbonização da câmara de combustão, contamina o lubrificante, alterando suas propriedades, entre outros problemas (MCDONNELL et al., 2000; HAZAR; AYDIN, 2010; DELALIBERA et al., 2012).

Alguns destes problemas podem ser atribuídos à ocorrência de pirólise, polimerização e outras reações que podem ocorrer durante a injeção e combustão, prejudicando o desempenho e a emissão de gases do motor. A alta viscosidade é razão principal, afetando a qualidade da atomização do combustível na câmara de combustão, mas que, esta pode ser mitigada com o aquecimento do combustível. Estudos mostram que, o óleo de soja, quando aquecido à temperatura 145 °C, atinge a viscosidade do petrodiesel, além de aumentar seu número de cetano em 3 pontos. A segunda razão destes problemas pode ser relacionada à qualidade do óleo, que pode ser provinda da genética (composição de ácidos graxos) e/ou processos de purificação, os quais podem favorecer a resistência à oxidação térmica (RYAN III et al., 1984).

Contudo, estudos mostram que a emissão de gases quando utilizado os óleos vegetais puros ou misturados ao petrodiesel, são menores em relação ao petrodiesel puro (CAMPOLINA et al., 2011; BASINGER et al., 2010). Ensaio avaliando as emissões de gases utilizando óleo de dendê pré-aquecido (85 °C), encontraram que para ser vantajoso, são necessárias adaptações de projeto (taxa de compressão, ponto de injeção e demanda de combustível) para obter melhora no desempenho, como consumo, potência e reduzir as emissões de gases pelo motor (hidrocarbonetos, CO, CO₂). Porém, houve aumento das emissões de óxidos de nitrogênio em relação ao petrodiesel (PIMENTEL et al., 2002).

Ensaio realizados com petrodiesel e misturas de petrodiesel com biodiesel de mamona mostraram que os valores de opacidade diminuíram conforme se aumentou o teor de biodiesel na mistura. Os valores de opacidade decresceram até os ensaios com misturas de 75% de biodiesel no petrodiesel, após esta porcentagem os valores de opacidade aumentaram novamente até o ponto de não diferir estatisticamente do petrodiesel (TABILE et al. 2009). Já para um motor com comando eletrônico de injeção, as emissões de opacidade aumentam quando utilizado proporção de 50%, inclusive superando as emissões do petrodiesel, e apresentaram-se menores nas misturas de 30 e 70% de óleo de soja degomado (CAMPOLINA et al., 2011).

Visto que no Brasil já existe legislação específica limitando a emissão de gases poluentes para motores de máquinas agrícolas e rodoviárias, com aplicação para algumas classes de potência a partir de 2015 e após 2019 para as demais (RESOLUÇÃO/CONAMA N° 433, 2011), este trabalho teve como objetivo avaliar, em ensaios de curta duração, o comportamento técnico, o desempenho e a emissão de material particulado de motor Diesel, quando alimentado com quatro óleos vegetais distintos, com e sem pré-aquecimento, em comparação com petrodiesel.

5.4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na Área de Engenharia Agrícola (AEA) do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), na cidade de Londrina – PR. O experimento consistiu em avaliar o desempenho técnico de motor Diesel quando alimentado com óleo vegetal puro com e sem pré-aquecimento do combustível antes do sistema de alimentação, em comparação com o petrodiesel.

Como metodologia para estabilização das variáveis de motor avaliadas, manteve-se o mesmo funcionando em regime de rotação livre a 1.800 min^{-1} sendo alimentado com o combustível/tratamento por um período de 40 minutos, e após este período inicia-se a avaliação do tratamento. Ainda, na passagem de um tratamento para o outro, repetiu-se este procedimento com petrodiesel pelo mesmo período de 40 minutos antes de trocar a alimentação do motor para o tratamento consecutivo. Padronizou-se este tempo, pois, é o necessário para elevar e estabilizar a temperatura do sistema de arrefecimento/lubrificante a temperatura de trabalho, com o motor sob regime de aceleração livre.

Para as análises estatísticas deste experimento utilizou-se os programas computacionais Microsoft Excel 2010, o SisVar 5.3 (FERREIRA, 2011) e o BioEstat 5.3 (AYRES et al., 2007).

5.4.1 Bancada de Ensaio

Para a execução do experimento montou-se uma bancada de testes utilizando o motor descrito na Tabela 6, acoplado a um gerador com capacidade de 4 kVA (Figura 1). Neste, aferiram-se as regulagens de válvula para 0,30 mm de folga entre o balancim e a válvula (mesma regulagem para admissão e escape), verificou-se o estado de desgaste do sistema de injeção (elementos de bomba e bico injetor), que se apresentaram em perfeito estado e para o bico injetor aferiu-se a pressão de abertura para 13,21 MPa (135 kgf cm⁻²). Por último, mensurou-se a pressão de compressão do cilindro, para verificar o estado de desgaste e vedação de anéis, sendo esta igual a 1,64 MPa (16,7 kgf cm⁻²). É necessário relatar que o motor utilizado neste experimento já era amaciado por tempo não determinado, porém todos os sistemas verificados e aferidos estão de acordo com o recomendado pelo fabricante (Tabela 6).

Tabela 6 – Especificações do motor de acordo com manual do fabricante.

Fabricante	YANMAR	Aspiração	Natural
Modelo	B9C	Sistema de injeção	Mecânica
Número de cilindros	1	Sistema de combustão	Antecâmara
Pressão de compressão	1,47 a 1,86 MPa	Pressão de injeção	13,7 ± 0,49 MPa
Taxa de compressão	19,2:1	Lubrificação	Forçada por bomba de engrenagens
Diâmetro x curso	90 x 100 mm	Pressão de lubrificante	0,049 a 0,49 MPa
Cilindrada	636 cm ³	Volume de lubrificante	1,5 a 2 L
Ciclo	Diesel – 4 tempos	Arrefecimento	Água por condensação
Potência	5,88 kW@1.800 rpm	Volume do arrefecimento	2,8 L

Confeccionou-se e adaptou-se próximo à entrada do sistema de alimentação de combustível do motor, um mecanismo de acionamento manual que permite alterar o direcionamento das conexões da entrada de alimentação entre dois reservatórios distintos (petrodiesel e óleo vegetal) com consequente troca do combustível. Este foi constituído por uma válvula de 3 vias (duas entradas e uma saída) com 9,52 mm (3/8”) de diâmetro da passagem, do fabricante MGA, em aço inox com vedação do elemento esférico em teflon,

para resistir a altas temperaturas. Na entrada voltada para cima da válvula, ficou disposto o petrodiesel, e na entrada voltada para baixo o óleo vegetal combustível, favorecendo a convecção do combustível aquecido em direção ao sistema de alimentação, reduzindo as perdas de calor entre o ponto de aquecimento e o sistema de alimentação. Ambos os combustíveis foram alimentados por gravidade, isto é, sem sistema de pré-bombeamento antes do sistema de alimentação.

Figura 1 – Bancada de ensaio



O sistema elétrico de aquecimento foi confeccionado a partir de uma resistência em forma de abraçadeira (coleira) com 40 mm de diâmetro por 120 mm de comprimento, com potência de 450 W e alimentação por 220 V (**Figura 2a**). Esta envolve uma massa de alumínio com diâmetro externo de 40 mm e interno de 15,9 mm (5/8”), por onde passa o óleo vegetal a ser aquecido. Entre o espaço da abertura interna da massa de alumínio e a face externa, confeccionou-se um orifício com 3 mm de diâmetro onde foi inserido um sensor termopar do tipo K, modelo MTK-02 do fabricante Minipa como mostra a **Figura 2b**. Este sensor possui a função de mensurar a temperatura do sistema de aquecimento e enviar a informação para um sistema de aquisição de dados (*datalogger*) modelo CR-5.000 do fabricante Campbell Scientific, que além de armazenar os dados registrados, possui a função de controlar a temperatura do sistema de aquecimento, ligando e desligando a alimentação de energia elétrica da resistência através de um dispositivo do tipo relé, conforme configuração prévia realizada no programa de controle do sistema de aquisição de dados.

Figura 2 – Sistema de troca, aquecimento e mensuração da temperatura do biocombustível



2a – Sistema de aquecimento



2b – Detalhe dos termopares

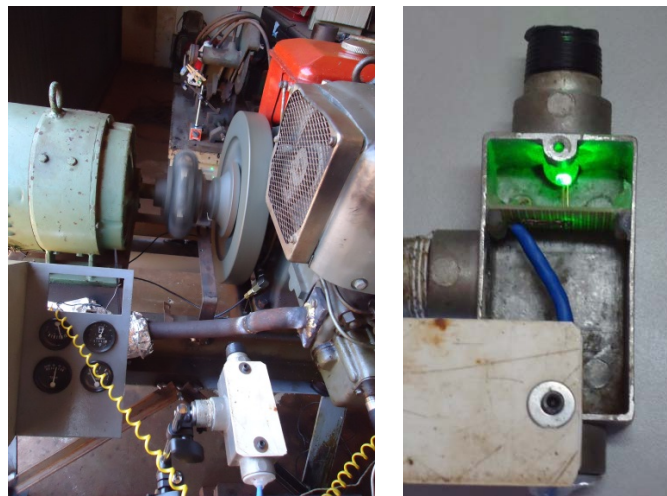
Para mensuração dos valores de rotação, utilizaram-se dois métodos, o primeiro calcula a rotação através do período do semi-ciclo da onda gerada na rede elétrica do conjunto moto gerador e, o segundo, através de um sensor de presença chamado de barreira ótica, confeccionado a partir de um foto transístor “Mel 32” (similar ao Til 78) e uma caneta do tipo apontador laser de cor verde. Ambos os sinais (gerador e barreira ótica) são coletados diretamente em porta específica do datalogger.

Para aquisição dos dados destes sensores utilizou-se um datalogger modelo e-Daq Lite do fabricante HBM, pois como a frequência de interrupção do feixe da barreira ótica foi baixa (4 por volta para o sinal do gerador e 6 por volta para o sinal da barreira), o datalogger CR-5.000 não apresenta a resolução exigida para tal avaliação, pois, o último equipamento utiliza o sistema de contagem de pulsos direta para calculo da variável. O e-Daq Lite foi mais adequado para adquirir os dados dos sensores utilizados, pois este permite adquirir as leituras de rotação de forma indireta, para ambos os sensores (frequência e barreira ótica) em porta específica do sistema de aquisição. O método utilizado consiste em cronometrar o tempo transcorrido entre um pulso e outro na entrada do sistema de aquisição, aumentando a precisão e possibilitando frequências altas de aquisição e resolução de escala mais adequada.

O primeiro sensor foi monitorado através do período do semi-ciclo da forma de onda produzida pelo gerador. Para isso, no primeiro sinal, foi necessário adaptar-se um transformador direto na rede elétrica de saída do gerador, para reduzir de 220 para 9 volts, um

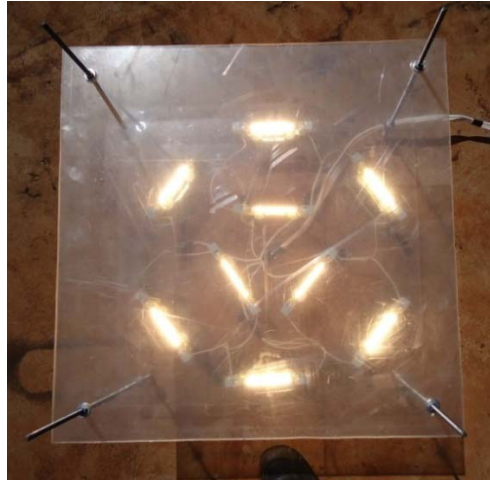
par de diodos retificadores para converter a corrente alternada em corrente contínua, e um acoplador ótico (4N35), para converter o sinal analógico em digital e isolar eletricamente o datalogger do gerador. O segundo sensor (barreira ótica) foi disposto sobre o eixo de acoplamento do motor ao gerador, onde foi adaptado um conjunto de 6 hastes que possuem a função de interromper o feixe de laser, o qual foi direcionado para incidir sobre o foto transístor, como mostra a **Figura 3**. Para estes sensores de rotação utilizou-se taxa de aquisição de 200 Hz.

Figura 3 – Sensor de rotação por barreira ótica



Para os ensaios sob absorção de potência, confeccionou-se um banco de carga constituído de 9 lâmpadas halógenas, sendo 6 de 500 Watts e 3 de 300 Watts, totalizando 3,9 kW de carga resistiva pura, como mostra a **Figura 4**, que resulta em uma demanda de aproximadamente 66% da nominal indicada pelo fabricante do motor. Porém como a carga aplicada excede em torno de 20% da nominal do gerador (aproximadamente 3,2 kW para cargas resistivas e 4 kVA para cargas reativas), os tempos de aplicação da carga não excederam 10 minutos contínuos, sob o risco de danificar o gerador.

Figura 4 – Banco de carga resistivo, onde as 6 lâmpadas externas são de 500W e as 3 internas são de 300W



5.4.2 Tratamentos

Como tratamentos foram utilizados petrodiesel comum S50 (PD), adquirido em posto de combustíveis urbano e, quatro óleos vegetais, sendo que os últimos foram avaliados em duas temperaturas distintas, como mostra a **Tabela 7**.

Linhaça (*Linum usitatissimum*) (L), Crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) (CR), Canola (*Brassica napus* L.) (C) e Pinhão Manso (*Jatropha curcas* L.) (PM). Toda matéria prima foi produzida em áreas experimentais do Iapar no estado do Paraná. Os óleos foram extraídos da matéria prima no Laboratório de Tecnologia de Extração de Óleos Vegetais da Área de Engenharia Agrícola do Iapar/Londrina-PR, sendo utilizado apenas métodos mecânicos de extrusão, seguido de filtragem.

Tabela 7 – Tratamentos aplicados no motor

Tratamento / Combustível		Codificação	Tratamento / Combustível		Codificação
	Petrodiesel	PD			
Sem pré-aquecimento	Linhaça	L60	Pré-aquecidos	Linhaça	L100
	Crambe	CR60		Crambe	CR100
	Canola	C60		Canola	C100
	Pinhão-manso	PM60		Pinhão-manso	PM100

Os óleos vegetais combustíveis foram submetidos à temperatura média de 60 °C, que é a temperatura média normal obtida no corpo da bomba injetora e

consequentemente do combustível na entrada do sistema de injeção, durante o funcionamento do motor, quando este é alimentado com petrodiesel e, a segunda temperatura estudada, foi de aproximadamente 100 °C, somando-se o total de nove tratamentos, sendo quatro com óleos sem pré-aquecimento, quatro com pré-aquecimento e um com petrodiesel. Estas temperaturas foram mensuradas através de um termopar do tipo K, inserido na entrada do sistema de injeção, o qual estava acoplado ao sistema de aquisição CR-5.000, como mostra a **Figura 2**.

Padronizou-se para todos os óleos esta temperatura (100 °C) de entrada no sistema de injeção, de acordo com testes preliminares, onde, com temperaturas superiores o motor apresentou diversas falhas no funcionamento mesmo sob regime de aceleração livre. O óleo de linhaça foi o que apresentou os maiores problemas com relação às falhas, seguido do óleo de pinhão-manso.

Ainda é importante relatar que para atingir a temperatura de 100 °C do combustível na entrada da bomba injetora, o sistema de controle de temperatura no aquecedor trabalhou ligando a resistência em 155 °C e desligando-a em 165 °C, verificando-se ainda temperaturas de até 189 °C, devido à inércia térmica da massa condutora.

5.4.3 Variáveis de Comportamento Técnico, Desempenho e Emissões de Material Particulado do Motor

5.4.3.1 Temperatura do sistema de arrefecimento e dos gases de exaustão

Na saída do sistema de exaustão de gases, a qual fica a aproximadamente 1 metro da janela de escape de gases do cabeçote, foi instalado um sensor termopar do tipo K, o qual mensura e envia as informações de temperatura para o sistema de aquisição de dados (CR-5.000), com o objetivo de monitorar as alterações de temperatura ocorridas de acordo com o tratamento aplicado. Para a temperatura ambiente, utilizou-se o sensor interno do datalogger. Além da instrumentação eletroeletrônica, foram instalados sensores analógicos para mensurar as temperaturas do fluido de arrefecimento e pressão do lubrificante, as quais foram monitoradas manualmente durante o experimento.

Os dados obtidos pelos sensores de temperatura do sistema de arrefecimento e de gases de exaustão do motor foram correlacionados com as variações de temperatura ambiente, tendo como objetivo, verificar se as variações ocorridas na temperatura dos dois sistemas foram influenciadas pela aplicação dos tratamentos, ou se ocorreram devido às variações de temperatura do ambiente, pois o ultimo não foi controlado. Para esta avaliação

separou-se os dados por regime de trabalho, sendo dois regimes sob aceleração livre (1.150 e 1.800 min^{-1}) e um sob regime de carga constante ($3,9 \text{ kW}@1.800 \text{ min}^{-1}$), isto é, neste momento de análise, não separou-se por tratamento, e sim pelo regime de trabalho. Quando houve correlação significativa e positiva entre a temperatura ambiente e as temperaturas dos sistemas de arrefecimento e de gases de exaustão, considerou-se que as variações ocorridas no motor foram influenciadas pela temperatura ambiente e, quando não houve correlação, considerou-se que estas variaram independente da temperatura ambiente, isto é, ocorreram devido á aplicação do tratamento.

Para a correlação dos dados utilizou-se como referência o coeficiente de Pearson, para os que apresentaram distribuição normal e, o de Sperman, para os que não se enquadraram na normalidade. Os testes de normalidade aplicados foram o de D'Agostino (teste bilateral de aderência a normal que compara com valores críticos pré-estabelecidos por uma distribuição teórica), D'Agostino-Pearson (teste de aderência a normal baseado nas medidas de simetria e curtose da distribuição dos dados), Lilliefors (teste não paramétrico de aderência a normal, o qual avalia a distribuição acumulada dos dados a uma distribuição teórica) e de Shapiro-Wilk (teste paramétrico de aderência a normal, o qual avalia o ajuste dos desvios padronizados dos dados a linearidade). Para considerar os dados normais, exigiu-se resultado não significativo para no mínimo três dos testes de normalidade.

Para as variáveis de temperatura avaliadas no motor que não apresentaram correlação, aplicou-se análise de variância seguida de teste de comparação, com o intuito de verificar se houve efeito significativo dos tratamentos nas mesmas.

5.4.3.2 Consumo de combustível

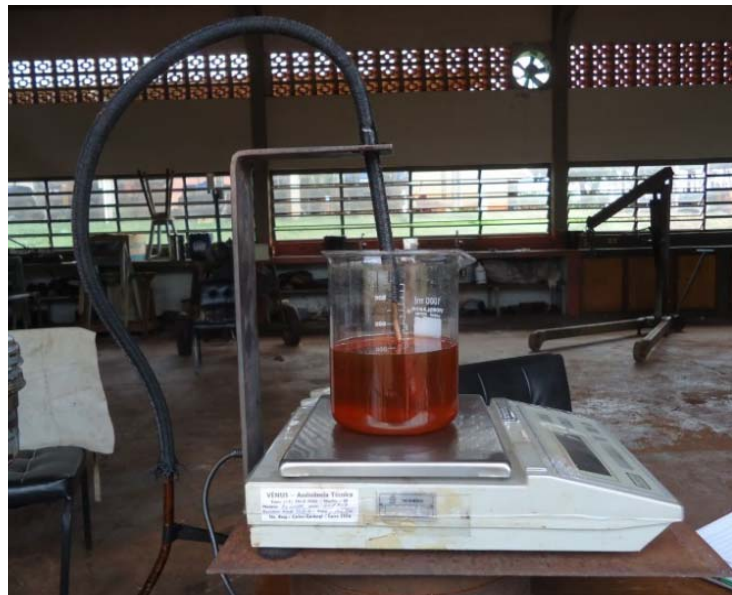
Como variável dependente avaliou-se o consumo de combustível em aceleração livre a 1.800 min^{-1} (rotação de trabalho indicada para o gerador fornecer a voltagem de aproximadamente 220 volts e frequência de 60 Hz), e em rotação de lenta (aproximadamente 1.150 min^{-1}). Posteriormente esta variável também foi mensurado com o motor sob regime de aproximadamente 66% da carga nominal a rotação de 1.800 min^{-1} ($3,9 \text{ kW}@1.800 \text{ min}^{-1}$, dos $5,88 \text{ kW}$ de nominal disponíveis).

O consumo foi mensurado através de uma balança de precisão com capacidade para 2.000 g e precisão de $0,05 \text{ g}$, como mostra a **Figura 5**, por um período de 5 minutos, com 5 repetições, onde acelera-se o motor da rotação de lenta até a rotação máxima por três vezes e segue para avaliação de consumo, sempre alternando entre os regimes de

rotação de 1.800 e 1.150 min^{-1} , para os casos de aceleração livre. Para as avaliações sob regime de carga, aplicou-se a carga pelo mesmo período no momento da avaliação e, entre as mensurações, a carga foi retirada e o regime de aceleração alterado como nas avaliações em aceleração livre.

Os dados de consumo apresentaram distribuição normal de acordo com os testes de Lilliefors e de Shapiro-Wilk, e homocedasticidade pelos testes de Hartley e de Cochran, onde para estes realizou-se análise de variância paramétrica ANAVA, bloqueando o efeito de dependência do motor, seguido de testes de comparação múltipla por contrastes não ortogonais de Scheffé.

Figura 5 – Aparato utilizado para mensurar o consumo de combustível



5.4.3.3 Perda de potência

A perda de potência do motor foi estimada de forma indireta, através do cálculo da área abaixo da curva de resposta à retomada de aceleração (calculada através de integração), quando aplicada a carga de 3,9 kW (aproximadamente 66% da nominal do motor) toda de uma vez, por um período de 10 segundos, sendo o procedimento repetido por 20 vezes. A curva de resposta à retomada de aceleração foi construída através dos valores de rotação mensurados pelo sensor de presença e de frequência instalados no motor, como descrito no item 5.4.1..

O tempo utilizado para estimar a perda de potência foi de 2 segundos após a entrada da carga, pois, é o tempo máximo de resposta à retomada de aceleração e início da

estabilização da rotação, observado nesta condição de carga para todos os tratamentos aplicados a este motor. A área abaixo da curva da variável rotação em aceleração livre consecutiva a retirada da carga, foi utilizada como referência de potência inicial. Esta foi subtraída da área abaixo da curva de retomada de aceleração, obtendo-se um valor adimensional da perda de potência e relativo ao tratamento. Quanto menor o valor obtido desta subtração, menor a perda de potência relativa.

Não foi possível calcular a perda de potência em relação ao petrodiesel, pois ao trocar de tratamento, mesmo com a manopla do acelerador na mesma posição, as rotações médias em aceleração livre mostraram-se estatisticamente diferentes. Para isto, seria necessário ter ajustado a rotação na bomba injetora a cada tratamento para um valor fixo de rotação, como por exemplo 1.800 min^{-1} , em aceleração livre, pois as diferenças entre as rotações em aceleração livre exercem influência neste tipo de avaliação.

Para manipulação e integração dos dados utilizou-se o programa computacional Catman Easy-AP 3.3.5, marca registrada HBM. Os dados obtidos através dos cálculos de diferença de área abaixo da curva de retomada à aceleração foram submetidos aos testes de normalidade e homocedasticidade, já citados anteriormente, e apresentaram-se em condições para aplicação de ANAVA paramétrica, seguido de teste de comparação de médias por contrastes não ortogonais de Scheffé.

5.4.3.4 Opacidade dos gases de exaustão

Por último foi mensurada a emissão de material particulado, utilizando o método indireto da opacidade, de acordo com a norma NBR 13.037 (Gás de Escapamento Emitido por Motor Diesel em Aceleração Livre - Determinação da Opacidade – Método de Ensaio), como prevê as resoluções CONAMA nº 16/95 e 251/99.

O ensaio de opacidade é chamado de “aceleração livre”, pois utiliza a inércia do motor como carga durante o movimento transitório em que o motor, inicialmente em rotação de lenta, é acelerado brusca e totalmente, assegurando que a injeção de combustível seja a máxima permitida pelo sistema de alimentação, até que a rotação atinja a “rotação de máxima livre”, quando o débito de combustível é reduzido automaticamente pelo sistema de avanço e controle da reserva de torque do sistema de injeção do motor. Desta forma, o motor percorre uma sucessão de regimes de trabalho próximos do máximo torque disponível em cada uma das velocidades angulares possíveis (plena carga), sendo que o

resultado do ensaio é dado pela máxima opacidade registrada durante o período de aceleração (BRANCO et al., 2012).

Para a realização deste ensaio, modificou-se a saída de exaustão de gases, retirando-se o silenciador e direcionando-a para baixo, para evitar que o silenciador e a disposição da saída original (voltada para cima), interfiram na avaliação da emissão de material particulado, contaminando e/ou absorvendo parte das emissões durante o processo de amostragem de um tratamento para o outro. Sendo assim, as medidas de opacidade são o mais próximo possível do que é emitido na janela de escape do motor.

Para tal avaliação utilizou-se um Opacímetro de fluxo parcial, modelo TM-133 (homologado pela Portaria Inmetro/Dimel nº 103, de 16/03/2009) (Figura 6) e um tacômetro modelo TM-529 com estimativa indireta da rotação via acelerômetro piezoelétrico, ambos do fabricante TECNOMOTOR, acoplados a um computador portátil, via comunicação serial e programa computacional específico do equipamento (IGOR 2.1).

Figura 6 – Opacímetro (esquerda) e sonda para coleta da amostra de gases na saída do tubo de exaustão de gases (direita)



Os resultados obtidos nos ensaios de opacidade ($k = m^{-1}$) descrito acima, foram convertidos para estimativas de massa de material particulado por hora ($kMP = g h^{-1}$) e em emissão específica ($gh kW^{-1}$), através das equações sugeridas por BRANCO et al. (2012). Onde a “Equação 1” converte opacidade mensurada em $k (m^{-1})$, em uma estimativa de concentração de fuligem ou carbono elementar (CE) que constitui a maior parte do material particulado (65 a 75%) existente na fumaça, para miligrama por normal metro cúbico ($mg Nm^{-3}$) e por fim, a “Equação 2” estima a emissão de material particulado para o motor em uma rotação fixa de trabalho previamente especificada. No caso desta estimativa utilizou-se a rotação de $1.800 min^{-1}$, pois é a rotação exigida para que o gerador atinja a voltagem e a frequência adequada de trabalho da rede elétrica.

$$CE \text{ (mg Nm}^{-3}\text{)} = 147,509 * k \text{ (m}^{-2}\text{)} \quad \text{Eq. 1}$$

$$kMP \text{ (mg s}^{-1}\text{)} = CE \text{ (mg Nm}^{-3}\text{)} * \frac{\text{Cilindrada (L)}}{1.000} * \frac{\text{rpm}}{2 * 60s} \quad \text{Eq. 2}$$

Nesta avaliação foram feitas 20 repetições para cada tratamento. De acordo com os testes preliminares aplicados nesta variável, optou-se por realizar a análise de variância seguida de teste de comparação múltipla não paramétrica de Friedman, pois de acordo com os quatro testes já citados anteriormente, os dados não apresentam distribuição normal e, considerou-se dependência entre os tratamentos, pelo fato de ambos serem feitos no mesmo motor, como já observado por CAMPOLINA et al. (2011) para este tipo de variável.

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.5.1 Temperatura do Sistema de Arrefecimento e dos Gases de Exaustão

Como o experimento não foi realizado em ambiente controlado procurou-se identificar se houve influência da temperatura ambiente nas variações ocorridas na temperatura de trabalho do sistema de arrefecimento e na temperatura dos gases de exaustão do motor, pois como as baterias de ensaio duraram de 8 a 12 horas seguidas, observou-se variações na temperatura média ambiente, de acordo com o tratamento, entre 29,6 a 38,0 °C para os tratamento PD e PM100 respectivamente. O experimento teve duração total de aproximadamente 72 horas, sendo realizada uma troca de lubrificante às 48 horas.

Na **Tabela 8**, observa-se que não houve correlação significativa entre a temperatura ambiente com a temperatura máxima registrada para os gases de escape, no regime de trabalho em aceleração livre a 1.800 min⁻¹, e para a temperatura máxima dos gases de escape, durante os ensaios de opacidade, considerando então que estas variações foram provocadas pelos tratamentos. Para as demais variáveis avaliadas, como houve correlação significativa e positiva, considerou-se que as variações de temperatura do motor foram influenciadas pelo ambiente e não se discorreu análise sequente.

Tabela 8 – Correlação entre as temperaturas do ambiente e dos gases de escapamento em relação as variáveis do motor

Temperaturas correlacionadas		Coefficiente de correlação	Significância	Teste
Ambiente com Arrefecimento em aceleração livre		0,512 (p<	0,01)	Pearson
Ambiente com Arrefecimento sob regime de carga		0,681 (p<	0,01)	Spearman
Ambiente com Gases de escape a 1.150 min ⁻¹	Mínima	0,616 (p<	0,01)	Pearson
	Média	0,687 (p<	0,01)	Pearson
	Máxima	0,537 (p<	0,01)	Pearson
Ambiente com Gases de escape em aceleração livre a 1.800 min ⁻¹	Mínima	0,315 (p<	0,05)	Pearson
	Média	0,484 (p<	0,01)	Pearson
	Máxima	0,180 ns		Spearman
Ambiente com Gases de escape sob regime de carga (1.800 min ⁻¹)	Mínima	0,481 (p<	0,01)	Spearman
	Média	0,648 (p<	0,01)	Spearman
	Máxima	0,711 (p<	0,01)	Spearman
Ambiente com Gases de escape durante o ensaio de Opacidade	Mínima	0,556 (p<	0,01)	Pearson
	Média	0,454 (p<	0,05)	Pearson
	Máxima	0,305 ns		Spearman

ns – não significativo

Para as variáveis, temperatura máxima dos gases de escape, em regime de aceleração livre a 1.800 min⁻¹, e temperatura máxima dos gases de escape, durante o ensaio de opacidade, as quais não apresentaram correlação, foram aplicados testes de normalidade novamente. Porém, nesta segunda fase de análise, considerou-se o efeito de tratamento na distribuição dos dados, obtendo-se para estes a normalidade e homocedasticidade. Devido este resultado aplicou-se teste de análise de variância (ANAVA) paramétrica, seguida do teste de contrastes não ortogonais de Scheffé. Este teste de comparação de grupos de médias foi realizado com o intuito de comparar os óleos vegetais contra o petrodiesel, pois como mostra a **Tabela 9**, os óleos vegetais apresentam tendência da temperatura de escape ser mais elevada que a do petrodiesel.

Para a temperatura máxima de escape em regime de aceleração livre a 1.800 min⁻¹, a ANAVA (p<0,05) e o teste do contraste PD contra os óleos vegetais foram significativos (p<0,01), podendo-se afirmar que em média os óleos vegetais apresentam maior temperatura dos gases de exaustão que o PD. O mesmo não foi encontrado para a temperatura máxima dos gases de escapamento durante os ensaios de opacidade, pois estes não apresentaram significância no teste “F” de Snedecor para avaliação do efeito de tratamento na ANAVA.

Ensaio realizados por HAZAR e AYDIN (2010) e SHEATA e RAZEK (2011), em motores com sistema de combustão direta alimentados com óleo de canola e óleo

de girassol respectivamente, encontraram que os óleos vegetais apresentam temperatura dos gases de exaustão mais elevada que o PD, onde o pré-aquecimento do combustível (100 °C) também apresentou temperatura mais elevada dos gases de exaustão em relação aos não pré-aquecidos, como foi observado neste trabalho para as temperaturas médias máximas dos gases de exaustão no regime de aceleração livre a 1.800 min⁻¹. Em contraposição, ensaios realizados por BAYINDIR (2010) e ACHARIA et al. (2011) encontraram em ensaios realizados em motores com o mesmo sistema de combustão dos autores acima citados, que os óleos vegetais testados apresentaram menor temperatura dos gases de exaustão em relação ao PD. ACHARYA et al. (2011) também comenta que o óleo de farelo de arroz pré-aquecido a 120 °C, apresenta temperatura dos gases de exaustão similar ao PD, como foi obtido neste ensaio para os demais casos estudados.

Tabela 9 – Médias das temperaturas e pressões do lubrificante de acordo com o regime de trabalho do motor para os tratamentos estudados

Variáveis	PD	L60	L100	CR60	CR100	C60	C100	PM60	PM100	
	Motor em lenta (1.150 min ⁻¹)									
Média do ambiente (°C)	29,60	32,66	34,59	37,34	30,90	32,52	29,45	37,58	38,00	
Média do arrefecimento (°C)	84,3	86,1	87,5	84,8	85,9	85,0	85,3	87,5	87,5	
	Mínimo (°C)	57,01	66,94	61,16	65,62	57,45	59,94	56,22	63,03	62,53
Gás de escape	Média (°C)	62,38	68,93	71,15	69,54	62,91	64,48	61,46	69,86	70,65
	Máximo (°C)	61,54	72,75	72,88	82,39	97,00	71,64	63,38	100,42	102,25
Pressão do lubrificante (kgf cm ⁻²)	0,6	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,9	0,7	0,7	
Motor sob regime de trabalho em aceleração livre (1.800 min ⁻¹)										
Média do ambiente (°C)	29,60	32,66	34,59	37,34	30,90	32,52	29,45	37,58	38,00	
Média do arrefecimento (°C)	84,3	86,0	87,5	84,7	85,9	85,0	85,4	87,4	87,5	
	Mínimo (°C)	63,38	59,92	65,36	64,15	60,53	59,74	57,10	66,65	62,37
Gás de escape	Média (°C)	65,23	74,80	74,37	70,22	66,87	65,77	63,05	72,20	71,15
	Máximo (°C)	85,42	99,65	99,80	103,68	103,12	101,38	92,48	97,37	101,77
Pressão do lubrificante (kgf cm ⁻²)	1,9	1,6	1,4	1,9	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9	
Motor sob regime de carga a 1.800 min ⁻¹										
Média do ambiente (°C)	31,50	33,43	37,41	36,33	36,73	34,88	37,86	40,97	39,48	
Média do arrefecimento (°C)	88,3	88,8	90,0	90,0	90,0	88,8	89,7	90,0	90,0	
	Mínimo (°C)	109,49	122,90	130,48	126,81	125,36	125,02	130,53	130,40	131,26
Gás de escape	Média (°C)	125,55	128,00	138,09	133,38	133,09	131,05	136,77	139,26	139,80
	Máximo (°C)	134,35	132,15	144,78	139,10	138,18	135,64	142,03	145,81	145,80
Pressão do lubrificante (kgf cm ⁻²)	1,4	2,0	1,2	1,7	1,3	2,0	1,5	1,3	1,8	
Ensaio de Opacidade										
Média do ambiente (°C)	29,60	32,66	34,59	37,34	30,90	32,52	29,45	37,58	38,00	
	Mínimo (°C)	60,76	64,38	67,49	68,96	56,95	60,91	61,14	65,15	68,78
Gás de escape	Média (°C)	71,21	67,26	89,93	85,35	72,91	82,64	86,42	91,37	89,80
	Máximo (°C)	138,22	133,15	144,43	150,33	141,70	146,88	145,17	142,13	143,30

5.5.2 Consumo de Combustível

O consumo de combustível em regime de aceleração livre, em média geral, apresentou-se menor para os óleos vegetais em relação ao PD como mostra os contrastes 1 e 5, (**Tabela 10** e **Tabela 11**). Porém, quando em situação de carga, os resultados foram contrários aos de aceleração livre, onde todos os óleos apresentaram consumo superior ao PD, de acordo com os contrastes 9 e 10. A Figura 7 e a Figura 8 mostram que as avaliações para o óleo de linhaça (L60 e L100), apresentam comportamento de consumo diferenciado dos outros óleos, o que foi confirmado pelos contrastes 2, 6 e 11. Os tratamentos com linhaça (L60 e L100) apresentaram consumo maior que os demais óleos vegetais para os testes em regime de aceleração livre, e apresenta-se igual ao Pinhão Manso (PM60 e PM100) para o caso dos ensaios sob regime de carga. Porém quando comparado os tratamentos L60 mais L100 contra o PD, este não apresentou diferença significativa apenas para a condição de trabalho sob regime de lenta em aceleração livre (1.150 min^{-1}), como mostra o contraste 3 (**Tabela 10**).

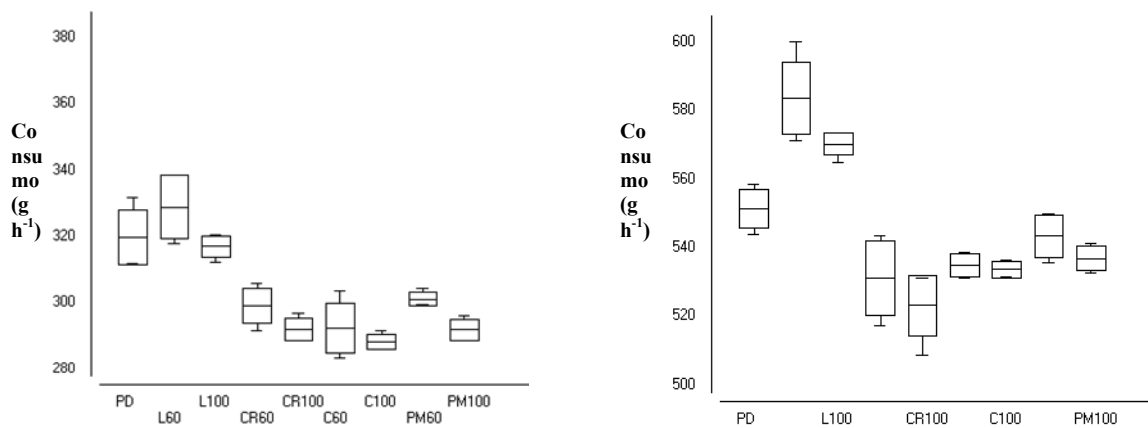
Tabela 10 – Contrastes utilizados nas comparações dos grupos de médias dos tratamentos para a variável consumo de combustível, de acordo com o regime de trabalho e significância da análise de variância dos contrastes

Regime de trabalho	Nº	Sem pré-aquecimento					Pré-aquecidos				Σ	p valor
		PD	L60	CR60	C60	PM60	L100	CR100	C100	PM100		
Aceleração livre em lenta (1.150 min^{-1})	1.	8	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	<0,01
	2.	0	3	-1	-1	-1	3	-1	-1	-1	0	<0,01
	3.	2	-1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0,293
	4.	0	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	0	<0,01
Aceleração livre a 1.800 min^{-1}	5.	8	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	<0,05
	6.	0	3	-1	-1	-1	3	-1	-1	-1	0	<0,01
	7.	2	-1	0	0	0	-1	0	0	0	0	<0,01
	8.	0	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	0	<0,01
Carga	9.	8	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	<0,01
	10.	4	0	-1	-1	0	0	-1	-1	0	0	<0,01
	11.	0	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0	<0,01
	12.	0	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	0	<0,01

Teste de comparação de Scheffé para contrastes não ortogonais

Tabela 11 – Legenda dos contrastes utilizados para comparação do consumo de combustível

Aceleração livre em lenta (1.150 min ⁻¹)	1.	PD em comparação com os óleos vegetais
	2.	L60 + L100 em comparação com os demais óleos vegetais
	3.	PD em comparação com L60 + L100
	4.	Óleos vegetais sem pré-aquecimento em comparação com os óleos pré-aquecidos
Aceleração livre a 1.800 min ⁻¹	5.	PD em comparação com os óleos vegetais
	6.	L60 + L100 em comparação com os demais óleos vegetais
	7.	PD em comparação com L60 + L100
	8.	Óleos vegetais sem pré-aquecimento em comparação com os óleos pré-aquecidos
Carga	9.	PD em comparação com os óleos vegetais
	10.	PD em comparação com CR60 + C60 + CR100 + C100
	11.	L60 + PM60 + L100 + PM100 em comparação com CR60 + C60 + CR100 + C100
	12.	Óleos vegetais sem pré-aquecimento em comparação com os óleos pré-aquecidos

Figura 7 – Box-Plot de médias, máximo, mínimo e desvios para consumo dos ensaios a 1.150 min⁻¹ (7a) e a 1.800 min⁻¹ (7b)7a – Consumo para os ensaios a 1.150 min⁻¹7b – Consumo para os ensaios a 1.800 min⁻¹

Observou-se também que houve efeito do aquecimento no consumo de óleo vegetal, como mostram os contrastes 4, 8 e 12 da **Tabela 10**, pois quando aquecido o consumo de combustível foi menor em relação aos óleos vegetais não aquecidos quando em aceleração livre. Porém quando em regime de carga, o pré-aquecimento do combustível tende, na média geral, a apresentar maior consumo em relação aos não aquecidos (Figura 8). Ensaios realizados por HAZAR e AYDIN (2010), com unidade de potência moncilíndro com sistema de combustão direta e óleo de canola, encontraram resultado similar ao obtido para os ensaios em aceleração livre, onde o pré-aquecimento a 100 °C reduziu o consumo em relação ao óleo de canola não aquecido em até 9,64%. Os autores comentam que este se deve pela redução da viscosidade do óleo de canola pelo aquecimento ($\pm 8 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ a 100 °C), a qual se aproxima da apresentada pelo PD, favorecendo o processo de atomização do mesmo na câmara de

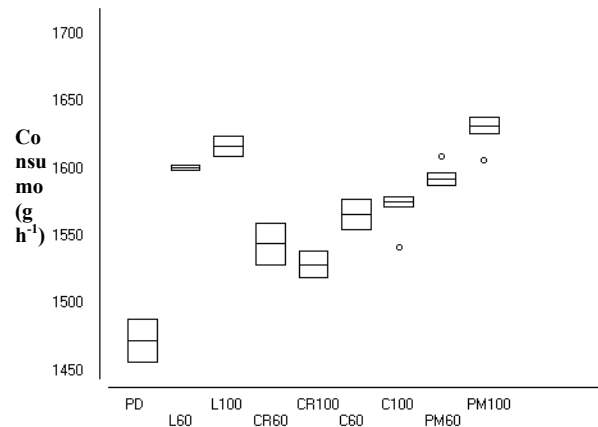
combustão com conseqüente melhora da queima. Porém, ambos os tratamentos com óleo vegetal apresentaram consumo superior ao petrodiesel.

Para o caso dos ensaios em aceleração livre os resultados foram similares ao encontrado por DELALIBERA (2009) e DELALIBERA et al. (2010), que compararam o efeito da utilização do óleo de girassol pré-aquecido a 90 °C e sem pré-aquecimento (temperatura de trabalho do motor), em um motor Diesel de características similares ao utilizado neste experimento, porém com sistema de combustão direta.

Os resultados de consumo sob regime de carga, corroboram com os apresentados por MARTINI et al. (2012), que testaram diversas temperaturas de pré-aquecimento para o óleo de soja em motor multicilíndrico de injeção mecânica com combustão direta, sob regime de 70% da carga nominal, que, apesar de não encontrarem diferença significativa de consumo entre as temperaturas avaliadas, observaram tendência de aumento do consumo de combustível. Além disso, notaram que o pré-aquecimento altera os fluxos de admissão e retorno de combustível pelo sistema de injeção do motor, no qual o mais aquecido não diferiu do fluxo encontrado para o petrodiesel.

Segundo RYAN III et al. (1987), o aquecimento do óleo vegetal, além de reduzir sua viscosidade, favorecendo os processos de injeção e atomização, também aumenta número de cetano (NC), melhorando a qualidade combustível do mesmo, pois de acordo com RAMOS (2004) os óleos vegetais, tendem a apresentar NC menor que o PD. Contudo, o aquecimento altera o volume e a densidade do óleo vegetal, resultando em menor conteúdo energético por volume e, como os sistemas com comando mecânico de injeção aplicam de forma volumétrica a quantidade de combustível na câmara de combustão, o aquecimento pode ter resultado negativo no desempenho do motor, como foi observado nos ensaios sob regime de carga deste experimento. Efeito similar foi relatado por HAZAR e AYDIN (2010), onde o pré-aquecimento do óleo de canola reduziu em 5,18% a densidade em relação a temperatura ambiente, e este fato refletiu no aumento de consumo, pois, a redução da densidade também reduz o poder calorífico do combustível.

Figura 8 – Consumo de combustível sob regime de carga de aproximadamente 66% da nominal do motor



O consumo de combustível em aceleração livre dos tratamentos com pré-aquecimento apresentaram menor variação quando comparados com os tratamentos sem aquecimento (**Figura 7 a e 7b e na Tabela 12**), indicando que o funcionamento para os tratamentos pré-aquecidos foram mais estáveis. Também é possível observar na **Tabela 12** que as relações entre a média do consumo em carga sobre a média de consumo em aceleração livre a 1.800 min^{-1} , tendem a ser maior que para o PD.

Nos ensaios sob regime de carga observou-se falhas de funcionamento, principalmente para o óleo de linhaça (L100) e, com menor ocorrência, para Pinhão Manso (PM100). As falhas de funcionamento são similares às ocorridas quando da entrada de ar no sistema de injeção e, como só ocorreram durante os ensaios em regime de carga com pré-aquecimento. As hipóteses sugeridas para este problema seriam que as temperaturas de pré-aquecimento estariam no limiar de ponto de fulgor dos óleos vegetais ou, o mais provável, a existência de umidade no óleo, pois as temperaturas atingidas no sistema de aquecimento ($189 \text{ }^\circ\text{C}$) são inferiores as relatadas por KNOTHE et al. (2006) e EVANGELISTA et al. (2012) para ponto de fulgor dos óleos estudados, (linhaça, crambe e canola são respectivamente iguais a 241 , 277 e $246 \text{ }^\circ\text{C}$ em vaso aberto e para o Pinhão Manso igual a $204 \text{ }^\circ\text{C}$ em vaso fechado), sendo que a umidade no combustível pré-aquecido gera vapor dentro do sistema de alimentação provocando falhas no funcionamento.

Portanto, seria necessário avaliar o ponto de fulgor e o conteúdo de umidade existente nestes óleos, para tal conclusão. A umidade também pode estar ligada a presença de fosfolípidios (gomas hidratáveis), o que torna a mistura homogênea quando em pequenas proporções, pois os óleos utilizados não passaram por nenhum tipo de processamento, além da filtragem.

Tabela 12 – Médias de consumo, coeficientes de variação e relações entre o consumo em regime de carga sobre aceleração livre a 1.800 min^{-1} (OV/PD) e, consumo em carga dos óleos vegetais (OV) sobre petrodiesel (PD) de acordo com os tratamento e regime de trabalho

	Aceleração livre em lenta		Aceleração livre a 1.800 min^{-1}		Carga			
	Média (g h^{-1})	CV%	Média (g h^{-1})	CV%	Média (g h^{-1})	CV%	OV/PD	Carga/Livre
PD	319,85	2,58	551,28	1,03	1.472,45	1,07	-	2,70
L60	328,92	2,90	581,16	1,11	1.600,78	1,05	1,09	2,75
CR60	299,28	1,76	531,84	1,88	1.544,40	0,99	1,05	2,90
C60	292,25	2,57	534,84	0,61	1.566,99	0,70	1,06	2,93
PM60	301,06	0,68	543,43	1,13	1.596,75	0,59	1,08	2,94
L100	317,11	1,01	570,19	0,56	1.621,92	0,63	1,10	2,84
CR100	291,94	1,13	524,28	1,23	1529,06	0,64	1,04	2,92
C100	288,29	0,78	533,62	0,48	1.569,02	0,98	1,07	2,94
PM100	291,94	1,11	536,88	0,64	1.625,73	0,86	1,10	3,03

Ainda com relação ao consumo em carga, o valor obtido para o petrodiesel neste experimento foi similar ao indicado pelo fabricante para uma carga aproximada de 80% da nominal do motor (4,70 kW), porém a carga aplicada foi de 3,9 kW ou aproximadamente 66% da nominal indicada para a rotação de trabalho utilizada ($5,88 \text{ kW}@1.800 \text{ min}^{-1}$), o que gera incertezas sobre as condições de desgaste do motor ou a informação fornecida pelo manual. Também se torna necessário lembrar que os ensaios não foram conduzidos em ambiente controlado, o que normalmente é utilizado pela indústria de motores. Porém, a diferença de aproximadamente 14%, estimada para esta condição, é considerada elevada mesmo para ensaios realizados em condições consideradas como não ideais.

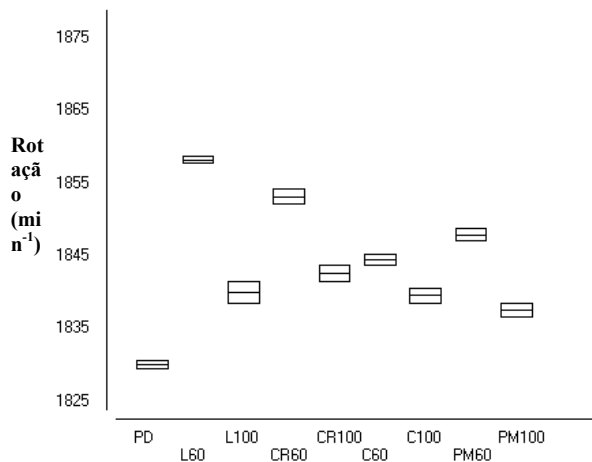
5.5.3 Perda de Potência

A perda de potência, como comentado anteriormente, foi estimada de forma indireta através da curva de retomada de aceleração até o ponto de estabilidade, a qual é ajustada pelo sistema de avanço do comando da bomba injetora. Porém estimou-se apenas a perda relativa ao tratamento, como comentado no tópico 5.4.3.3., pois, as rotações sob regime de aceleração livre apresentaram diferença significativa entre os tratamentos, de acordo com análise de variância. Para o caso do método utilizado para estimar a perda de potência (área abaixo da curva de retomada de aceleração), as diferenças iniciais (em aceleração livre) exercem influência no valor da área estimada e, se calculada entre os tratamentos com óleo vegetal e o PD, os resultados não toarão com a realidade, pois, a rotação inicial não foi

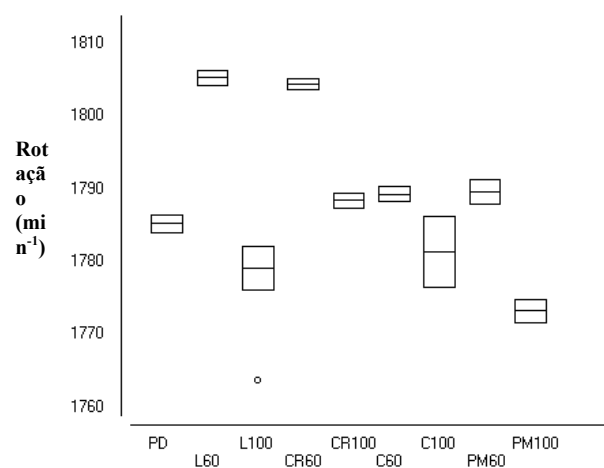
padronizada. O comportamento temporal das variáveis rotação sob regime de aceleração livre e da retomada de aceleração, podem ser observados na **Figura 9** e na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Na Figura 9 e na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é possível observar que os tratamentos com óleo vegetal sem pré-aquecimento, apresentam média de rotação, tanto para o regime de aceleração livre quanto para o regime de carga, superior quando comparado com os mesmos óleos pré-aquecidos. É necessário comentar que a manopla do acelerador permaneceu sempre na mesma posição de aceleração para todos os tratamentos. Este comportamento pode ter sido causado pelo aumento do esforço de injeção, o qual pode ter influenciado o sistema de avanço, que atua sobre o volume de injeção, para controle da reserva de torque do motor.

Figura 9 – Box-plot de médias e desvios para a rotação de acordo com o tratamento durante o ensaio de perda de potência



9a – Rotação sob regime de aceleração livre



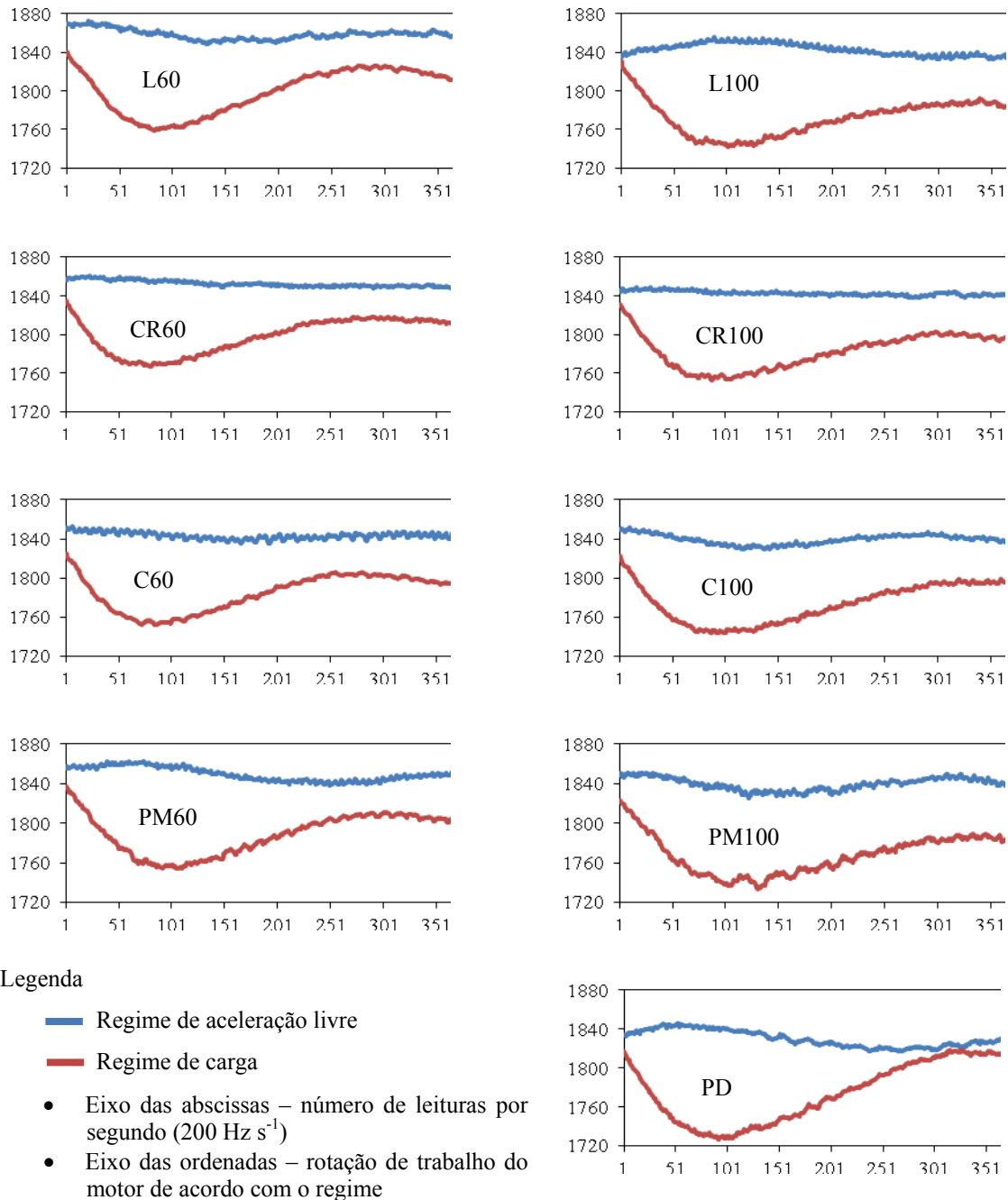
9b – Rotação sob regime de carga

Ainda na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** observa-se que a queda inicial de rotação para o PD, na curva de retomada de aceleração, é maior que para os óleos vegetais, porém, ao final da retomada de aceleração, a rotação se estabiliza muito próximo da rotação obtida sob regime de aceleração livre avaliada durante os intervalos de saída da carga para o mesmo tratamento.

De acordo com as análises realizadas para a perda de potência, os óleos vegetais, de forma geral, apresentam maior perda de potência relativa em comparação com o PD (**Figura 11**), que, no contraste 13 (

Tabela 13 e Tabela 14), comparando os tratamentos com óleo vegetal (OV) contra o PD, apresentaram-se significativamente maior, fato que também pode ser confirmado nas médias apresentadas na **Tabela 15**.

Figura 10 – Curvas médias para retomada de aceleração sequente a entrada da carga e para o regime de aceleração livre dos nove tratamentos estudados.



Ainda é possível observar que o pré-aquecimento do combustível exerce efeito na perda de potência, como mostra o contraste 14 da Tabela 13, onde os tratamentos pré-aquecidos apresentaram em média maior perda de potência relativa, o que pode estar

relacionado aos efeitos de falha de funcionamento comentados anteriormente. Efeito similar foi relatado por HAZAR e AYDIN (2010), em ensaio utilizando um motor com sistema de combustão direta, onde o pré-aquecimento do óleo de canola (100°C) reduziu em 5,18% a densidade em relação a temperatura ambiente, e este fato refletiu na redução da potência, pois, a redução da densidade também reduz o poder calorífico do combustível, porém, a perda de potência observada não foi significativa.

Figura 11 – Box-plot de médias e desvios para perda de potência relativa dos tratamentos

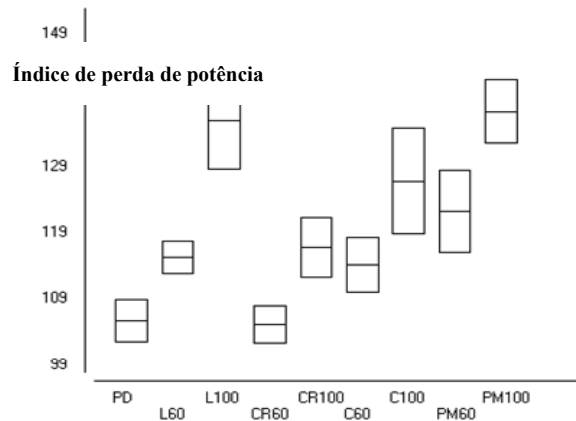


Tabela 13 – Comparação de médias por contrastes para perda de potência relativa e significância do teste

	N°	Sem pré-aquecimento					Pré-aquecidos				Σ	p valor
		PD	L60	CR60	C60	PM60	L100	CR100	C100	PM100		
Perda de potência relativa	13.	8	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	<0,01
	14.	0	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	0	<0,01
	15.	4	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	<0,01

Teste de comparação de Scheffé para contrastes não ortogonais

Tabela 14 – Legenda dos contrastes analisados para a perda de potência relativa

Perda de potência relativa	13.	PD em comparação com os óleos vegetais
	14.	Óleos vegetais sem pré-aquecimento em comparação com os óleos pré-aquecidos
	15.	PD em comparação com os óleos vegetais sem pré-aquecimento

O contraste 15 (Tabela 13) mostra que os tratamentos sem pré-aquecimento apresentam maior perda de potência relativa em comparação com PD. Também é possível observar que apenas o tratamento CR60, não apresenta diferença do PD (Figura 11 e Tabela 15). De forma geral, os testes com crambe apresentaram o funcionamento mais estável dentre os óleos combustíveis testados, seguido do óleo de canola.

Tabela 15 – Média das perdas de potência relativa, coeficiente de variação e relação óleo vegetal (OV) petrodiesel (PD)

	Sem pré-aquecimento				Pré-aquecidos				
	PD	L60	CR60	C60	PM60	L100	CR100	C100	PM100
Média	106,17	115,66	105,53	114,55	122,72	136,38	117,29	127,19	137,74
CV%	3,04	2,09	2,65	3,64	5,03	5,34	3,83	6,25	3,51
OV/PD	-	1,09	0,99	1,08	1,16	1,28	1,10	1,20	1,30

5.5.4 Opacidade dos Gases de Exaustão

As avaliações de opacidade mostram que, de forma geral, os óleos vegetais emitiram menos material particulado em relação ao PD, com exceção do óleo de linhaça sem pré-aquecimento (L60), como pode se observar na **Tabela 16** e na Figura 12. Ainda encontrou-se diferença significativa entre alguns óleos, como por exemplo, o C100, o PM60 e o C60 apresentaram menor opacidade que o CR60, o CR100, o L60 e o L100. Também não foi possível observar de forma significativa o efeito do aquecimento na opacidade dos gases de exaustão, apresentando tendência de que os valores de opacidade estão intrinsecamente relacionados às propriedades físico-químicas de cada óleo, quando neste tipo de sistema de injeção e combustão do motor (injeção mecânica com antecâmara), como é o caso do PD, que a emissão de particulado esta relacionada à quantidade de enxofre presente no mesmo.

De acordo com estudos e experimentos realizados por RYAN III et al. (1984), PETERSON et al. (1983) e ENGLER et al. (1983), os óleos com alta concentração de ácidos graxos com níveis de insaturação 2 e 3, como é o caso do óleo de linhaça, que apresenta em média mais de 50% do ácido graxo linolênico (18:3) em sua composição, tendem a apresentar desempenho inferior em comparação com óleos de composição menos insaturada. Segundo os autores acima citados, os ácidos graxos com alto grau de insaturação podem sofrer pré-combustão, favorecendo a ocorrência de combustão incompleta, formando depósitos de produtos pirolisados, emitem mais fumaça, com alta concentração de hidrocarbonetos e tendem a apresentar maior consumo e menor potência, devido à menor eficiência térmica. Ainda, comentam que óleos com maior concentração de ácidos graxos saturados com cadeia curta, tendem a apresentar maior eficiência térmica, em relação aos demais.

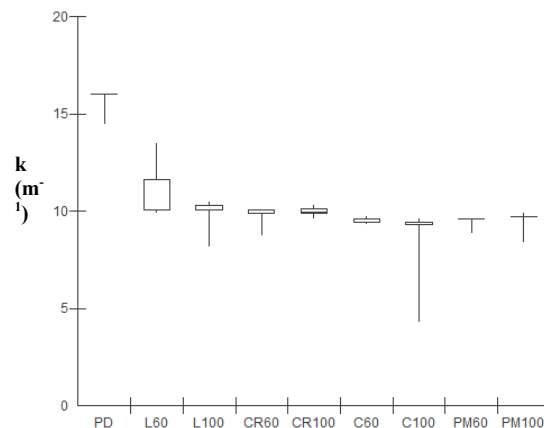
Tabela 16 – Valores k de opacidade, teste de comparação múltipla e estimativa de emissões em material particulado para o regime de trabalho de 1.800 min⁻¹

Tratamento	Opacidade – k (m ⁻¹)		Estimativa de material particulado				
	Mediana	Média	Mediana* (g h ⁻¹)	Média* (g h ⁻¹)	Mediana* (gh kW ⁻¹)	Média* (gh kW ⁻¹)	
C100	9,47	9,11	47,98	46,15	8,15	7,84	a
PM60	9,61	9,55	48,68	48,38	8,27	8,22	a
C60	9,61	9,56	48,68	48,43	8,27	8,23	a
PM100	9,76	9,68	49,44	49,04	8,40	8,33	a b
CR60	10,09	9,96	51,12	50,46	8,69	8,58	b c
CR100	9,94	9,99	50,36	50,61	8,56	8,60	b c
L100	10,09	10,03	51,12	50,81	8,69	8,64	b c
L60	10,09	10,90	51,12	55,22	8,69	9,38	c d
PD	16,05	15,81	81,31	80,09	13,82	13,61	d

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Friedman ($p < 0,05$)

*Valores estimados utilizando as transformações de BRANCO et al. (2012) para a rotação de 1.800 min⁻¹

Figura 12 – Box-Plot de medianas e quartis para a opacidade (k) de acordo com o tratamento



Experimentos realizados por HAZAR e AYDIN (2010), em motor com sistema de combustão direta, alimentado com mistura de óleo de 50% canola no PD pré-aquecido (100 °C), observaram redução de 26,3% na emissão de material particulado em comparação com o PD. AGARWAL et al. (2010) também em motor com sistema de combustão direta, encontraram efeito do pré-aquecimento do óleo vegetal na emissão de material particulado, sendo que os pré-aquecidos emitiram menos que os sem aquecimento e ambos apresentaram-se menores que o PD.

Considerando que este padrão de motor (sistema de injeção mecânica com combustão por antecâmara) ainda é produzido por este fabricante (YANMAR, modelo atual compatível NSB12, com 6,6 kW@1.800 rpm e 631 cm³ de cilindrada) e, considerando os

limites máximos de emissão de material particulado estipulado pela resolução CONAMA nº 433/2011, para o intervalo de potência de 19 a 37 kW igual a $0,6 \text{ gh kW}^{-1}$, que equivalem de 3,2 a 6,3 vezes mais potência que o motor estudado, a emissão estimada foi 22,7 e 13,6 vezes maior para o PD e os óleos vegetais respectivamente, indicando que este motor polui mais que um motor multicilíndrico mais potente que atenda às legislações atuais. Entretanto deve-se lembrar de que as emissões foram avaliadas sem a existência de filtros ou barreiras, que influenciam a emissão de particulados.

A resolução CONAMA nº 226/1997, que é a primeira a comentar e especificar limites máximos de emissões de particulado para motores Diesel, relacionando a cilindrada unitária (menos de 700 cm^3), restringe as emissões em $0,25 \text{ gh kW}^{-1}$, seguida da resolução CONAMA nº 315/2002, que é mais exigente (cilindrada unitária inferior a 750 cm^3), restringindo em $0,13$ a $0,21 \text{ gh kW}^{-1}$ de particulado, são extremamente exigentes em relação as emissões, o que pode limitar a utilização de motores com arranjo construtivo mais simples, acarretando em custo para o consumidor. Porém deve-se citar que estas regulamentações não se aplicam a este tipo de motor pelas especificações de rotação de potência máxima nominal (igual ou superior a 3.000 min^{-1}), sendo estes limites especificados para cilindrada unitária em motores multicilíndricos.

5.6 CONCLUSÕES

Os tratamentos com óleo vegetal não influenciaram de forma significativa a temperatura de trabalho do motor.

Para os testes em regime de aceleração livre os óleos de canola, crambe e pinhão manso apresentaram consumo menor de combustível em relação ao petrodiesel e, o óleo de linhaça apresentou consumo maior.

Para os testes sob regime de carga, todos os óleos avaliados apresentam consumo superior ao petrodiesel.

O pré-aquecimento exerceu efeito no consumo dos óleos vegetais combustíveis, onde sob regime de aceleração livre o consumo foi menor e, quando sob carga, o consumo foi maior que os óleos combustíveis não pré-aquecidos.

Os óleos vegetais apresentam maior perda de potência relativa que o petrodiesel.

Os óleos combustíveis pré-aquecidos apresentam maior perda de potencia relativa que os óleos não pré-aquecidos.

Os óleos de canola (C60 e C100), crambe (CR60 e CR100), pinhão manso (PM60 e PM100) e linhaça pré-aquecida (L100) apresentam opacidade menor que o petrodiesel

Não foi possível observar efeito do pré-aquecimento do óleo combustível na emissão de material particulado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

De forma geral, os resultados obtidos neste trabalho com relação ao efeito do pré-aquecimento no comportamento técnico e no desempenho do motor, em ensaios de curta duração, apresentaram-se menos interessantes. Porém, a literatura mostra que em ensaios de longa duração, o pré-aquecimento é interessante, por apresentar menos carbonização da câmara de combustão e de seus dutos, além da menor contaminação do lubrificante, que são fatores relacionados diretamente com a vida útil do motor.

Ainda é necessário lembrar, que no caso deste estudo, foi utilizado um motor com sistema de combustão indireta (antecâmara). Estes são motores que trabalham com taxas e pressões de compressão maiores quando comparados com os sistemas de combustão direta, obtendo-se maior temperatura no momento da combustão. Este fato reduz a dependência do sistema em exigir melhor qualidade físico-química do combustível e, qualidade de injeção pelo bico injetor (mistura do combustível com o comburente), o que favorece a queima de combustíveis de baixa qualidade.

Os sistemas indiretos também podem apresentar menor eficiência térmica em comparação com os diretos, por apresentarem maior perda de carga durante a expansão dos gases. Este fato pode realçar a perda de potência quando utilizados os óleos vegetais em aplicações de regimes de carga parcial ao motor, além do menor poder calorífico do referido combustível em relação ao petrodiesel.

Por isso, para motores com sistema de combustão direta, que atualmente são mais comuns no Brasil, o desempenho pode ser diferente do obtido, quando utilizado pré-aquecimento do óleo vegetal.

Assim, para que possa ser recomendada a utilização dos óleos vegetais em unidades de potência similares à estudada neste trabalho, é necessário realizar ensaios de longa duração junto a estudos econômicos. Porém, para o caso dos óleos estudados neste trabalho, considerando extração mecânica somada ao mínimo de processamento de purificação no qual estes foram submetidos (somente filtragem simples), os óleos de linhaça e de pinhão-manso foram considerados menos interessantes.

Levando em conta o padrão de obtenção dos óleos avaliados, processos simples e que proporcionam baixo custo de obtenção do combustível, futuros estudos de longa duração podem ser direcionados aos óleos de crambe e de canola, pois, apresentaram resultados mais interessantes em avaliações de curta duração, comportamento também esperado em ensaios de longa duração. Para linhaça e pinhão-manso, torna-se necessário estudar processos de purificação para melhorar a qualidade destes como combustível.

REFERÊNCIAS

- ABDELGADIR, H.A.; JOHNSON, S.D.; VAN STADEN, J. Approaches to improve seed production of *Jatropha curcas* L. **South African Journal of Botany**, v. 74, n. 2, p. 359, 2008.
- ACHARYA, S.K.; SWAIN, R.K.; MOHANTY, M.K. The use of rice bran oil as a fuel for a small horse-power Diesel engine. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v 33, p. 80-88, 2011.
- ACHTEN, W.M.J.; VERCHOT, L.; FRANKEN, Y.J.; MATHIJS, E.; SINGH, V.P.; AERTS, R.; MUYS, B. *Jatropha* bio-diesel production and use. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n.12, p. 1063-1084, 2008.
- AGARWAL, A.K.; GUPTA, T.; KOTHARI, A. Toxic potential evaluation of particulate matter emitted from a constant speed compression ignition engine: a comparison between straight vegetable oil and mineral diesel. **Aerosol Science and Technology**, v. 44, p. 724-733, 2010.
- ALAM, N.C.N.; ABDULLAH, T.L.; ABDULLAH, N.A. Flowering and fruit set under malaysian climate of *Jatropha curcas* L. **American Journal of Agricultural and Biological Sciences**, v. 6, n. 1, p. 142-147, 2011.
- ALTIN, R.; ÇETINKAYA, S.; SERDAR, H.Y. The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel engines. **Energy Conversion and Management** v.42, n.5, p.529-538. 2001.
- AYRES, M.; AYRES JR, M.; AYRES, D.L.; SANTOS, A.A.S. BioEstat 5.3 – Aplicações estatísticas nas áreas das ciências bio-médicas. Universidade Federal do Pará, Belém – Pará, 2007.
- BALAT, M. Modeling vegetable oil viscosity. **Energy Sources, Part A**. v.30 p.1856-1869. 2008.
- BAYINDIR, H. The effects of cottonseed oil-kerosene blends on a diesel engine performance and exhaust emission. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, Philadelphia, v.32, p. 901-908, 2010.
- BASINGER, M.; REDING, T.; WILLIAMS, C.; LACKNER, K.S.; MODI, V. Compression ignition engine modifications for straight plant oil fueling in remote contexts: Modification design and short-run testing. **Fuel**, Nottingham, v. 89, p. 2925-2938, 2010.
- BETTIS, B.L.; PETERSON, C.L.; AULD, D.L.; DRISCOLL, D.J.; PETERSON, E.D. Fuel characteristics of vegetable oil from oilseed crops in the Pacific Northwest. **Agronomy Journal**, 74(2): 335-339. 1982.
- BOBBIO, P.A.; BOBBIO, F.O. **Introdução a química de alimentos**. Campinas, Fundação Cargill, 1985. 306p.
- BOBBIO, P.A.; BOBBIO, F.O. **Química do processamento de alimentos**. Campinas, Fundação Cargill, p. 232, 1992.

BRASILEIRO, B.G.; DIAS, D.C.F.; BHERING, M.C.; DIAS, L.A.S. Floral biology characterization of seed germination in physic nut (*Jatropha curcas* L.) **Revista Brasileira de Sementes**, v. 34, n. 4, p. 556-562, 2012.

BRANCO, G.M.; CROCE, W.; BRANCO, F.C.; SZWARC, A.; NAPOLEONA, J.M. Critérios de avaliação da eficácia do programa de inspeção veicular. 2012. **Disponível em:** <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/chamadas/simea_53_critérios_de_avaliacao_da_eficacia_do_programa_de_inspecao_veicular-v2_1349732008.pdf> Acesso 08/2012.

CHAUHAN, B.S.; KUMAR, N.; CHO, H.M. Performance and emission studies on an agriculture engine on neat *Jatropha* oil. **Journal of Mechanical Science and Technology**. V.24, n.2, p.529-535. 2010.

CASTRO, P.R.C.; KLUGE, R.A.; PERES, L.E.P.. **Manual de fisiologia vegetal: teoria e prática**. Piracicaba: Editora Agronômica Ceres. 650p. 2005.

CAMPOLINA, N.; DELALIBERA, H.C.; WEIRICH NETO, P.H. Material particulado emitido por motor ciclo Diesel alimentado com misturas de diesel com óleo de soja. In: Congresso Internacional de Bioenergia, **Anais...** 2011, Curitiba. 6º Congresso Internacional de Bioenergia, 2011.

COSTA NETO, P.R.; ROSSI, L.F.S.; ZAGONEL, G.F.; RAMOS, L.P. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. *Química Nova*, v. 23, n. 4, p. 531-537, 2000.

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.; WEIRICH NETO, P.H.; MARTINI, J. Using pre-heated sunflower oil as fuel in a Diesel cycle engine. In: Hosted by the Canadian Society for Bioengineering (CIGR), 2010, Québec. **Anais...** XVII th Hosted by the Canadian Society for Bioengineering, 2010.

DELALIBERA, H.C.; CAMPOLINA, N.; WEIRICH NETO, P.H.; RALISCH, R. Performance of a diesel engine fueled with a preheated blend of soybean oil and petrodiesel. **Engenharia Agrícola** (Online), v. 32, p. 1058-1067, 2012.

DELALIBERA, H.C.; MARTINI, J.; WEIRICH NETO, P.H.; FIGUEIREDO, P.R.A.; RALISCH, R. Desempenho de um motor Diesel alimentado com uma mistura de óleo vegetal com petrodiesel. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, **Anais...** 2013, Fortaleza-CE. XLII CONBEA, 2013.

DORSA, R. **Tecnologia de processamento de óleos e gorduras vegetais e derivados**. Coletânea para treinamento interno da Westfalia Separator, para técnicos de engenharia de alimentos. Escola de engenharia de Mauá, São Caetano do Sul, SP. 185p. 1995.

DUNN, R.O. Outros combustíveis Diesel alternativos derivados de óleos vegetais. In: KNOTHE, G.; GERPEN, J.V.; KRAHL, J.; Tradução RAMOS L.P. **Manual de Biodiesel**. 1º ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. cap 10. 269-294p.

ELSBETT-MOTORENBAU. Der Elsbett-Motor. **Sonderdruck aus “MTZ” Motortechnische Zeitschrift**, Franckh’sche Verlagshandlung Stuttgart, jahrgang 17, heft 9, September, 1956

ENGLER, C.R.; JOHNSON, L.A.; LEPORI, W.A.; YARBOUGH, C. M. 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, 1983.

EVANGELISTA, J.P.C.; SARAIVA, M.C.M.; COSTA, B.R.; PEREZ, M.S.; SOUZA, D.R.R.; SOUZA, L.D. Caracterização físico-química e termogravimétrica do óleo e biodiesel de pinhão manso. **Química: ciência, tecnologia e sociedade**, v. 1, n.2, p. 61-69, 2012.

FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia (UFLA)**, v. 35, p. 1039-1042, 2011.

FUCHS, W. (Ed.) **O aproveitamento de oleaginosas**: Fundamentos do aproveitamento descentralizado de oleaginosas e a tecnologia do óleo vegetal. Disponível em: <<http://www.regiooel.de>>. Acesso em: 20 set. 2006.

FREITAS, R.G.; MISSIO, R.F.; MATOS, F.S.; RESENDE, M.D.V.; DIAS, L.A.S. Genetic evaluation of *Jatropha curcas*: an important oilseed for biodiesel production. **Genetics and Molecular Research**, v.10, p.1490-1498, 2011.

GERPEN, J.V.; KNOTHE, G. Produção de biodiesel: Princípios da reação de transesterificação. In: KNOTHE, G.; GERPEN, J.V.; KRAHL, J.; RAMOS, L.P. (Eds.) **Manual de Biodiesel**. Tradução de Luiz Pereira Ramos (CEPESQ/UFPR). São Paulo: Edgard Blücher, cap.4, p. 29-45, 2006.

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: Edgard Blücher, cap.4, p. 5-18, 2006b.

GIMENEZ, L. M. **Diagnóstico da mecanização em uma região produtora de grãos**. 2006. Dissertação (Mestrado) - USP, São Paulo, 2006.

HAZAR, H.; AYDIN, H. Performance and emission evaluation of a CI engine fueled with preheated raw rapeseed oil (RRO)–diesel blends. **Applied Energy**. V. 87, p. 786-790, 2010.

HORSCHUTZ, A.C.O.; TEIXEIRA, M.B.; ALVES, J.M.; SILVA, F.G.; SILVA, N.F. Crescimento e produtividade do pinhão-manso em função do espaçamento e irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande - PB, v.16, n.10, p. 1093-1099, 2012.

JAKUBASZKO, R. Biodiesel: faça você mesmo, e use. **DBO Agrotecnologia**. Ano 3 – n.8, Ag/Set, 2006.

KOCHHAR, S. P. Sesame, rice-bran and flaxseed oils. In: Gunstone, F. D. Vegetable Oils in Food Technology: Composition, Properties and Uses. **UK: Blackwell Publishing Ltd.**, 2008, cap. 11. p. 297-326.

- KNOTHE, G. Produção de biodiesel, princípios da reação de transesterificação. In: KNOTHE, G.; GERPEN, J.V.; KRAHL, J.; Tradução RAMOS L.P. **Manual de Biodiesel**. 1º ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. cap 10. 269-294p.
- 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: Edgard Blücher, cap.4, p. 5-18, 2006b.
- KNOTHE, G. Propriedades do combustível. In: KNOTHE, G.; GERPEN, J.V.; KRAHL, J.; RAMOS, L.P. (Eds.) **Manual de Biodiesel**. Tradução de Luiz Pereira Ramos (CEPESQ/UFPR). São Paulo: Edgard Blücher, cap.4, p. 5-18, 2006c.
- KRATZEISEN, M.; MÜLLER, J. Prediction of deposit formation during combustion of jatropha oil from standard quality parameters. **Fuel**. v.89, p.2769-2774, 2010.
- LAVIOLA, B.G.; BHERING, L.L.; MENDONÇA, S.; ROSADO, T.B.; ALBRECHT, J.C. Caracterização morfo-agronômica do banco de germoplasma de pinhão-mansão na fase jovem. **Bioscience Journal**, v.27, p.371-379, 2011.
- LEHNINGER, A.L.; NELSON, D.L.; COX, M.M. **Princípios de bioquímica**. São Paulo. Editora Savier, 1995.
- LOPES, A. et al. Biodiesel etílico X biodiesel metílico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA (CONBEA), 35. 2006, João Pessoa - PB. **Anais...** . João Pessoa - Pb: Unesp, 2006. CD-ROM.
- MACHADO, P.R.M. **Ésteres combustíveis em motor de ciclo diesel sob condições de pré-aquecimento e variação no avanço de injeção**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Maria
- MAZIERO, J.V.G. et al. Avaliação do desempenho de um motor de ignição por compressão utilizando óleo diesel e éster etílico de óleo de girassol como combustível.. In: II Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras e Biodiesel, 2005, Varginha – MG. **Anais...** . Varginha – MG: Universidade Federal de Lavras, 2005. CD-ROM.
- MARTINI, J.; DELALIBERA, H.C.; WEIRICH NETO, P.H. Consumo de óleo de soja pré-aquecido por motor Diesel. **Revista Brasileira de Agrociencia (UFPEL)**, v. 18, p. 213-220, 2012.
- MCDONNELL, K.P.; WARD, S.M.; MCNULTY, P.B.; HOWARD-HILDIGE, R. Results of engine and vehicle testing of semirefined rapeseed oil. **Transactions of the ASAE**, v. 43, n. 6, p. 1309-1316, 2000.
- MISRA, R.D.; MURTHY, M.S. Performance, emission and combustion evaluation of soapnut oil-diesel blends in a compression ignition engine. **Fuel**, v. 90, p. 2514-2518, 2011.
- NEW JERSEY DEPARTMENT OF HEALTH AND SENIOR SERVICES. **Hoja informativa sobre substancias peligrosas**. 1998. Disponível em:<<http://www.state.nj.us/health/eoh/rtkweb/0021sp.pdf#search=%22acrole%C3%ADna%22>>. Acesso em: 20 set. 2006.

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.

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

OLIVEIRA, S.V.; REYS, M.A. Estruturação e consolidação da produção do biodiesel – Base de soja – no Rio Grande do Sul. **Revista Extensão Rural**, DEAER/PPGExR – CCR – UFSM, Santa Maria, Ano XVI, nº 17, 93-116, Jan–Jun, 2009.

OFFICE OF THE GENE TECHNOLOGY REGULATOR. The Biology of *Brassica napus* L. (canola). Australian Government/Department of Health and Ageing. Versão 2.1, 2011. 72 p. **Disponível em:** <[http://www.ogtr.gov.au/internet/ogtr/publishing.nsf/Content/canola-3/\\$FILE/BiologyCanola2011.pdf](http://www.ogtr.gov.au/internet/ogtr/publishing.nsf/Content/canola-3/$FILE/BiologyCanola2011.pdf)>. Acesso em: 17 dez. 2013.

PETERSON, C.L.; WAGNER, G.L.; AULD, D.L. Vegetable oil substitutes for diesel fuel. **Transactions of the ASAE** 26(2): 322-327. 1983.

PIMENTEL, V.S.B.; BELCHIOR, C.R.P. Análise e Diagnose de Diesel Geradores Operando com Óleo de Dendê in Natura. In: Energia no Meio Rural, 2002, Campinas-SP. **Anais...** Agrener 2002, Energia no Meio Rural, 2002.

PITOL, C.; BROCH, D.L.; ROSCOE, R. Tecnologia e produção: crambe 2010. **Maracaju: Fundação MS**, 2010. 60 p.

RAMOS, L. P. Degradação térmica de óleos comestíveis; Poder carburante de óleos vegetais; Biodiesel de óleo usado em frituras. 2004. **Disponível em:** <http://www.universia.com.br/html/materia/materia_chjj.html>. Acesso em: 12 out. 2006.

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(10): 1610-1619. 1984.

RYAN III, T.W.; STAPPER, B. Diesel fuel ignition quality as determination in constant volume combustion bomb. **SAE Techn. Pap. Ser.** 870586, 1987.

RURALBR COTAÇÃO, 2014. Preço da soja, farelo e óleo. **Disponível em:** <<http://cotacao.ruralbr.com.br/preco/soja.html>>, Acesso: 10 março 2014.

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**, v.37, n.5, p.1329-1335, set-out, 2007.

SCHWEITZER, I.P.H. Eigung des Zweitakt-Dieselmotors für Straßenfahrzeuge. Pennsylvania State University USA, **ATZ**, Jg. 55, Nr. 10, Seite 265-271, 1954.

SHEHATA, M.S.; RAZEK, S.M.A. experimental investigation of diesel engine performance and emission characteristics using jojoba/diesel blend and sunflower oil. **Fuel**, Nottingham, v. 90, p. 886-897, 2011.

SILVA, M.V.I. Efeito do uso do biodiesel sobre propriedades do óleo lubrificante usado em um motor de ignição por compressão. **Dissertação** (mestrado). Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), 2006.

SILVA, T.O.; PEREIRA, P.A.P. Emissão de compostos carbonílicos por óleos de dendê e soja submetidos a aquecimento contínuo a 180°C. IN: Reunião anual da Sociedade Brasileira de Química, 29. **Anais...** Salvador – BA: Sociedade Brasileira de Química. 2004.

SOUZA, A.D.V.; FÁVARO, S.P.; ÍTAVO, L.C.V.; ROSCOE, R. Caracterização química de sementes e tortas de pinhão-mansão, nabo-forrageiro e crambe. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, p.1328-1335, 2009.

TABILE, R.A.; LOPES, A.; DABDOUBE, M.J.; CAMARA, F.T.; FURLANI, C.E.A.; SILVA R. P. Biodiesel de mamona no diesel interior e metropolitano em trator agrícola. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.29, n.3, p.412-423, 2009.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal. Tradução:** Santarém, E. R. [et al.]. 3 ed. Porto Alegre. Editora Artmed, 2004.

TOLMASQUIM, M.T. **Fontes renováveis de energia no Brasil.** Fontes Renováveis de Energia No Brasil: 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).