

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA  
CURSO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

HEVANDRO COLONHESE DELALIBERA

UTILIZAÇÃO DE ÓLEO DE GIRASSOL COMO COMBUSTÍVEL EM UNIDADE DE  
POTÊNCIA MONOCILINDRO CICLO DIESEL

PONTA GROSSA  
2009

HEVANDRO COLONHESE DELALIBERA

UTILIZAÇÃO DE ÓLEO DE GIRASSOL COMO COMBUSTÍVEL EM UNIDADE DE  
POTÊNCIA MONOCILINDRO CICLO DIESEL

Dissertação de Mestrado submetida a banca examinadora para obtenção de título de Mestre em Agronomia, na Área de Concentração de Agricultura, pela Universidade Estadual de Ponta Grossa - PR.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique Weirich Neto

PONTA GROSSA  
2009

Ficha Catalográfica Elaborada pelo Setor de Processos Técnicos BICEN/UEPG

D335u Delalibera, Hevandro Colonhese  
Utilização de óleo de girassol como combustível em unidade de  
potência monocilindro ciclo diesel. / Hevandro Colonhese  
Delalibera. Ponta Grossa, 2009.  
70f.  
Dissertação (Mestrado em Agronomia ), Universidade  
Estadual de Ponta Grossa.  
Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique Weirich Neto

1. Óleo vegetal combustível. 2. Carbonização. 3. Motor.  
I. Weirich Neto, Pedro Henrique. II.T

CDD: 662.6



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA  
Coordenação de Colegiado de Curso de Mestrado em Agronomia

## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: “UTILIZAÇÃO DE ÓLEO DE GIRASSOL COMO COMBUSTÍVEL EM UNIDADE DE POTÊNCIA MONOCILINDRO CICLO DIESEL”.

Nome: Hevandro Colanhese Delalibera

Orientador: Pedro Henrique Weirich Neto

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Pedro Henrique Weirich Neto

Prof. Dr. Cláudio Bianor Sverzut

Prof. Dr. Sérgio Rodrigues dos Santos

Prof. Dr. Jaime Alberti Gomes

Data da Realização: 31 de março de 2009.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Mauricio Delalibera Domingos e Eliesibe Colonhese Delalibera, a meus irmãos Leandro Colonhese Delalibera e Hérica Vanessa Colonhese Delalibera, e a minha família Clarissa de Souza Mudry, Solange Oliveira Delalibera, Maria Bassanelo Colonhese e demais, por acreditarem em minha capacidade, e oferecerem todo o apoio.

Ao amigo e orientador Pedro Henrique Weirich Neto, pela confiança depositada, conhecimento técnico e por estar sempre presente.

Aos amigos do Laboratório de Mecanização Agrícola (Lama), Paulo William Garbuio, Marcelo José Colet, Cláudio Bianor Sverzut, Sérgio Rodrigues dos Santos, Johnny Martini, Carlos Hugo Rocha, Inajara Van Engelenhoven, Kassio Okuyama, Mário Bitencourt Wiesinieski, Diogenes Raphael Soares Ribeiro, Maurício da Costa Feldaus, Nátili Maidl de Souza, Adriana Schimandei, Khetlen Leitão, Daiana Almeida, Ariadne Waureck, pela força nos momentos de tristeza, e pelos muitos momentos de alegria.

Ao Centro de Ensino Superior dos Campos Gerais (CESCAGE), a Retificadora de Máquinas (Retimaq), a Retificadora de Sistemas de Injeção Diesel (ALDISA), ao Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), ao Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR).

Ao professor Jaime Albert Gomes (CESCAGE); ao Sr. Leonides Degraf, ao Paulo Roberto Ehlke Cordeiro Junior, Roberto e demais profissionais da retificadora Retimaq; ao Toninho da Aldisa; ao José Alamino, ao Lauro Nunes de Siqueira, ao Furkin do SENAI; a Maria de Fátima Ribeiro (IAPAR), onde sem a colaboração e apoio destes, o presente estudo não teria sido concluído com o mesmo êxito.

A coordenação de aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão do auxílio financeiro de estudo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro ao desenvolvimento do trabalho.

A todos aqueles que não foram citados, mas não menos importantes.

## UTILIZAÇÃO DE ÓLEO DE GIRASSOL COMO COMBUSTÍVEL EM UNIDADE DE POTÊNCIA MONOCILINDRO CICLO DIESEL

**RESUMO:** As diversas crises do petróleo ocorridas nas últimas décadas, a dependência da matriz energética brasileira dos combustíveis fósseis e os problemas ambientais causados pela utilização destes têm forçado e, de certo modo, viabilizado o avanço das pesquisas na busca de combustíveis alternativos, principalmente com relação a aqueles que podem substituir o petrodiesel, como os derivados dos óleos vegetais, pois este é o combustível líquido mais consumido. Mesmo com a existência de problemas no funcionamento dos motores quando utilizados combustíveis derivados dos óleos vegetais, até o surgimento de novas soluções o cenário da matriz energética mundial tende a seguir este rumo. Neste trabalho realizaram-se dois ensaios de 50 h de duração, em um micro-tractor monocilíndrico de injeção direta, utilizando 100% de óleo de girassol como combustível. No primeiro ensaio (E-1) utilizou-se óleo vegetal entrando a temperatura ambiente no sistema de injeção do motor e no segundo ensaio (E-2) aqueceu-se o óleo a uma temperatura de aproximadamente 90 °C. No primeiro ensaio após 50 h foi constatada a queima da junta de cabeçote. Para os dois ensaios foi encontrado um aumento da pressão de compressão. Para a carbonização do bico injetor, a do E-2 foi 81,5% menor que a do E-1. A carbonização do sistema de admissão do E-2 foi 51,7% menor que do E-1 e a carbonização do sistema de exaustão do E-2 foi 33,4% menor que a do E-1. Para a câmara de combustão a carbonização do E-1 foi praticamente igual ao do E-2. Com relação ao consumo de combustível do E-1 e do E-2 foram respectivamente de 2,3% e 0,7% maiores que o petrodiesel. No caso do óleo lubrificante, houve contaminação por óleo vegetal combustível nos dois ensaios. No geral o E-2 mostrou-se melhor que o E-1.

**Palavras-chave:** Óleo vegetal combustível, carbonização, motor.

USE OF CRUDE SUNFLOWER OIL AS FUEL IN A DIESEL CYCLE  
MONO-CYLINDER ENGINE

**ABSTRACT:** The many oil crises that have occurred in the past decades and the dependence of the Brazilian energy matrix on fossil fuels, as well as the environmental problems caused by their use, have pressed for advances in the search for new alternative fuels and, in a way, also made them possible. Fuels made from vegetable oils are particularly interesting, as they may substitute the diesel, the most consumed liquid fuel. The global energy matrix tends to follow in this direction until new solutions arise, despite existing problems in the functioning of the engines, particularly when using vegetable oils. For this study, two 50-hour tests were done on a direct injection, mono-cylinder micro-tractor fueled with 100% crude sunflower oil. The vegetable oil was at room temperature in the first test (E-1), and heated to an approximate temperature of 90 °C in the second test (E-2). The cylinder head gasket burned after running for 50 hours in the first test. An increase of the compression ratio was observed in both tests. The carbonization of the injection system in the E-2 test was 81.5% lower than E-1. The carbonization of the intake system in the E-2 test was 51.7% lower than E-1, and the carbonization of the exhaust system in E-2 was 33.4% lower than in E-1. The carbonization in E-1 was about the same as in E-2 in the combustion chamber. Compared to diesel, the fuel consumption was 2.3% higher in E-1 and 0.7% higher E-2. The lubricant oil was contaminated with vegetable oil in both tests. Generally, E-2 was better than E-1.

**Key-words:** vegetable oil fuel, carbonization, engine

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	3
2.1.. GERAIS .....	3
2.2.. ESPECÍFICOS .....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1.. HISTÓRICO .....	4
3.2. BIOSÍNTESE DE LIPÍDIOS DE RESERVA NAS PLANTAS .....	8
3.3.. ÓLEOS VEGETAIS COMO FONTE RENOVÁVEL DE ENERGIA .....	14
3.4. UTILIZAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS À BASE DE ÓLEOS VEGETAIS.....	18
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	29
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	64
7. CONCLUSÃO .....	65
8. REFERÊNCIAS.....	66

## 1. INTRODUÇÃO

A elevação do preço do petróleo e de seus derivados, ocorrida devido às crises das últimas décadas, os problemas ambientais, como o aumento do efeito estufa, causado pela sua queima e a dependência da matriz energética brasileira com relação a estes combustíveis fósseis têm forçado e, de certo modo, viabilizado o avanço de pesquisas pela busca de combustíveis alternativos. A maior procura é por combustíveis que possam pura e simplesmente substituir os derivados do petróleo sem alterações onerosas nos projetos das máquinas térmicas já existentes. Com avanço reconhecido da tecnologia do álcool, o Brasil tenta atualmente encontrar substituto para o petrodiesel, derivado do petróleo que pela sua qualidade é indicado para altas potências, sendo o Brasil um importador de tal combustível, e ainda é oferecido no mercado nacional de forma subsidiada.

Com relação aos combustíveis renováveis que podem substituir o petrodiesel, a pesquisa tem voltado suas atenções para uma antiga opção, os derivados dos óleos vegetais. Observa-se que estes, transformados (biodiesel) ou não, estão sendo largamente utilizados em tratores agrícolas e caminhões (motores ciclo Diesel) sem critério algum, principalmente sem transformação, por ser de mais fácil aquisição e menor custo. Porém os trabalhos com relação à utilização destes sem a tomada de parâmetros têm mostrado algumas desvantagens, como perda de potência, aumento de consumo, redução da vida útil do motor, entre outras.

O que se desenha praticamente são estudos de caso, onde a combinação de diferentes matérias primas, isto é, oleaginosas que possuem composição físico-química do óleo distinta, somados aos processamentos de purificação, resultam em uma infinidade de especificações de óleos combustíveis. Por isso, no caso dos óleos vegetais, ainda não estão bem definidos os efeitos de sua utilização nos motores, principalmente em testes de durabilidade que enfoquem a qualidade do combustível.

Considerando que estes combustíveis alternativos são utilizados em projetos de motores do tipo ciclo Diesel, 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 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 e entre em ignição praticamente todo a uma mesma temperatura. No caso do petrodiesel e dos óleos vegetais, possuem a última propriedade, 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 muitas vezes maior, o processo de atomização feito pelo bico injetor não ocorre adequadamente. Sendo assim a redução da viscosidade pode mitigar este problema. Esta pode ser obtida de várias formas, como a utilização de aditivos, misturas de óleo com o petrodiesel, ou o aquecimento do óleo vegetal.

Neste trabalho realizou-se um ensaio para analisar se a redução da viscosidade, por aquecimento, do óleo vegetal utilizado como combustível apresenta diferença no desempenho e nos danos causados ao motor. Este considerando que após 50 h de trabalho com óleo vegetal aquecido, os danos causados ao motor serão menores do que a utilização de óleo vegetal a frio.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1.. GERAIS**

Analisar a utilização de óleo vegetal como combustível em unidade de potência monocilíndrica de ciclo Diesel.

### **2.2.. ESPECÍFICOS**

Comparar as diferenças na carbonização e na contaminação do óleo lubrificante, entre utilização de óleo vegetal combustível sem e com pré-aquecimento, levando em consideração a qualidade físico-química deste.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1.. HISTÓRICO

O interesse em utilizar óleos vegetais como combustível é conhecido desde a criação do motor de ignição por compressão por Rudolf Diesel (1858-1913†), idealizador da máquina que veio a receber seu nome. Porém a história do começo da utilização dos combustíveis derivados dos óleos vegetais, muitas vezes é apresentada de forma inconsistente com fatos que não são compatíveis com as idéias e argumentos de Rudolf Diesel. A idéia da invenção da máquina Diesel partiu da tentativa de realizar a isoterma do teorema de Carnot na prática. O objetivo deste seria tentar desenvolver uma máquina mais eficiente, quando comparado com a máquina a vapor, que possuía eficiência térmica, isto é, a capacidade de converter o poder calorífico do combustível em trabalho, de 6 a 10%. Segundo o princípio termodinâmico estudado, durante a mudança isotérmica de um gás, todo calor transferido poderia ser convertido em trabalho. Portanto a afirmação comumente encontrada de que Diesel desenvolveu “sua” máquina para utilizar óleos vegetais é incorreta (KNOTHE, 2006).

O que muitas vezes confunde a história é o fato em que durante o desenvolvimento da máquina Diesel, a companhia francesa Otto apresentou na exposição de 1900 em Paris, junto com outros motores Diesel, um pequeno motor Diesel funcionando com óleo vegetal de amendoim. Este ocorreu por solicitação do governo Frances à companhia, pois o amendoim era produzido em grandes quantidades nas colônias francesas na África e, este poderia ser utilizado para a produção de energia para as indústrias das colônias, empregando recursos próprios, e com isso não dependendo da importação de combustíveis líquidos. Os ensaios com óleo vegetal foram acompanhados por Rudolf Diesel, porém não evoluíram devido mudanças no ministério Frances (KNOTHE, 2006).

O interesse na utilização de combustíveis a base de óleos vegetais ressurgiu

durante o período da segunda guerra mundial e pós-guerra, onde estimulado pela escassez de petróleo, problemas com exportação e falta de recursos, países como Alemanha, estudaram tal utilização. Alguns fabricantes como a “Elsbett Co.”, desenvolveu nesse período motores específicos para funcionar com óleo vegetal combustível, porém por uma questão de economia de escala, este acabou não sendo difundido (DER ELSBETT-MOTOR, 1956).

Outros países como França e Bélgica, no mesmo período também investiram recursos no estudo da utilização de combustíveis a base de óleos vegetais, principalmente com relação à produção de biodiesel por rota metfílica, porém com o aumento da extração de petróleo e principalmente o preço baixo, desestimulou os estudos nesta área. Somente com a crise do petróleo da década de 70, procurou-se novamente novas fontes de energia, cujo desafio principal era que o custo fosse compatível com o referencial imposto pelo petróleo (TEIXEIRA, 2005a). Embora, mundialmente as décadas de 30 e 40 tenham sido muito produtivas no assunto, no Brasil, os estudos na produção e utilização de biocombustíveis mais progrediram na década de 80, junto com explosão mundial sobre o assunto bioenergia, contudo muitos avanços já feitos no período de segunda guerra e pós-guerra acabaram não sendo lembrados e, foram refeitos. No mesmo período o aumento da produção de petróleo acarretou queda no preço, levando diversos países, que tinham projetos de desenvolvimento e uso de energias alternativas, a desativá-los (TOLMASQUIM, 2003).

No final da década de 90 uma nova crise do petróleo voltou a preocupar, agora com dois agravantes, estudos indicando o fim e/ou inviabilidade de exploração das reservas e a influência dos gases e demais substâncias provenientes da queima do mesmo no aumento do efeito estufa e conseqüente aquecimento global.

Os problemas ambientais gerados pela emissão de gases que favorecem o efeito estufa são reflexos de um longo período de alterações antropogênicas da paisagem. A queima de combustíveis fósseis entra como agravante importante, pois tem novamente

liberado o carbono que foi retirado da atmosfera e, armazenado por longo tempo em grandes profundidades, aumentando assim sua concentração na forma principalmente de CO<sub>2</sub>. Estima-se que em 1850 (início da Revolução Industrial) a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera era de 270 ppm. Em 2000, essa quantidade já era de aproximadamente 360 ppm (RAVEN et al., 2001).

A produção de biomassa vem sendo focada como uma fonte alternativa e sustentável de energia, uma vez que é um recurso renovável e fixa CO<sub>2</sub> atmosférico através da fotossíntese. Neste caso, o CO<sub>2</sub> emitido pela queima da biomassa pode ser compensado pelo CO<sub>2</sub> fixado pela fotossíntese (McKENNDRY, 2002). Também a queima destes combustíveis tem menor teor de enxofre do que combustíveis fósseis, sendo mais limpos e menos poluentes (CHURIN & DELMON, 1989; PUTUN, 2002).

Em 2004 foi assinado o decreto, transformado em 2005 na Lei nº 11.097, que autoriza a utilização do biodiesel no Brasil, cuja intenção é diminuir a dependência do petrodiesel importado, que na época estava em torno de 10% do consumido (BRASIL, 2006). Inicialmente, está decretado a mistura de 2% de biodiesel no petrodiesel (B2), obrigatória a partir de 2008, passando esse percentual para 5% (B5) a partir de 2013. Estima-se que serão necessários 900 milhões de litros a partir de 2008 e 2,65 bilhões de litros de biodiesel em 2013 (MIRAGAYA, 2005).

Mesmo com alguns relatos de problemas no funcionamento dos motores (alta viscosidade e custo, por exemplo), principalmente quando se utilizam diretamente os óleos vegetais como combustível, o cenário da matriz energética mundial tende a tomar este rumo, devido principalmente a questão ambiental e a inclusão de novas jazidas onde fatores como localização e profundidade, torna os custos de exploração elevados.

Contudo, muito há de ser estudado para que a utilização de combustíveis à base de óleos vegetais (óleo vegetal combustível e/ou biodiesel) possa ser recomendada. O

que se desenha praticamente são estudos de caso, onde a combinação de diferentes matérias primas e processos resultam em uma infinidade de óleos combustíveis. Somando-se a isso, alterações no projeto dos motores ciclo Diesel podem ser consideradas.

Outro fator relevante, que pode realmente viabilizar este tipo de combustível renovável, é com relação às fontes de extração ou matérias-primas que darão origem aos combustíveis à base de óleos vegetais. Há uma grande quantidade de plantas consideradas oleaginosas, mas que têm sido pouco estudadas com relação à viabilidade para a produção de combustível, isto é, com relação às características físico-químicas e seu balanço energético. É importante considerar também as pesquisas para aumento de rendimento.

A utilização de co-produtos na alimentação, com os diferentes conteúdos de óleos remanescentes, a qualidade da glicerina resultante da transesterificação, a exploração racional de culturas nativas em reservas legais e até em áreas de preservação permanente de propriedades familiares são exemplos de questionamentos que devem ser considerados paralelamente aos estudos de processos de obtenção e utilização dos combustíveis à base de óleos vegetais.

O enfoque dado pelo programa Probiodiesel, do Governo Federal considera dois modelos de inserção dos agricultores na cadeia de biocombustíveis: um como fornecedor de matéria-prima (grãos) e outro como fornecedor de óleo e com possibilidade de uso ou comercialização da torta.

Considerando esta discussão, o produtor rural, sem considerar classificação econômica, tem pouca ou nenhuma informação científica e/ou tecnológica para utilização de tais variações. Hoje, seria utópico considerar a utilização de combustíveis oriundos de culturas e processos realizados na própria propriedade, ou ainda considerando peculiaridades regionais, tais como cooperativas e seus processos já utilizados.

### 3.2. BIOSÍNTESE DE LIPÍDIOS DE RESERVA NAS PLANTAS

Com relação à produção de óleos e gorduras (lipídios) pelas plantas, existem dois tipos de biossíntese, os glicerolipídeos polares que formam as bicamadas lipídicas das membranas celulares, e os triacilgliceróis que são as gorduras e óleos de estocagem, os quais serão enfocados neste estudo (TAIZ & ZEIGER, 2004).

Os lipídios de reserva são formas importantes de armazenamento de carbono em muitas sementes. Quando comparado com os carboidratos, os lipídios apresentam-se como uma forma mais reduzida de armazenamento de carbono, tanto que a oxidação completa de 1 g de lipídios, que contém cerca de 9,3 kcal de energia e pode produzir mais ATP do que a oxidação da mesma quantidade de amido (2,8 kcal). Na maioria das sementes, os triacilgliceróis são armazenados no citoplasma das células do cotilédone ou endosperma, em organelas chamadas de oleossomos, também conhecidas como esferossomos ou corpos lipídicos (TAIZ & ZEIGER, 2004).

Os lipídios constituem um grupo de compostos que, apesar de quimicamente distintos entre si, são, do ponto de vista químico, compostos altamente reduzidos, derivados dos ácidos graxos e estes hidrocarbonetos são tão reduzidos como 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 contém uma ou mais duplas ligações (insaturações), como mostra a tabela 1 (LEHNINGER et al., 1995).

Os ácidos graxos e os triacilgliceróis não são transportados na planta, sendo sintetizados nos locais de acúmulo. A síntese ocorre a partir de carboidratos, fundamentalmente sacarose transportada a partir das folhas (fotossíntese), a qual é substrato

para a glicólise e formação de piruvato, que irá dar origem ao acetil-CoA (CASTRO et al., 2005).

TABELA 1. Ácidos graxos comuns em plantas

Nome comum do ácido	Esqueleto carbônico	Ponto de fusão (°C)
Láurico	12:0	44,2
Mirístico	14:0	53,9
Palmítico	16:0	63,1
Esteárico	18:0	69,6
Araquídico	20:0	76,5
Behênico	22:0	80,0
Lignocérico	24:0	86,0
Palmitoléico	16:1 ( $\Delta^9$ )	-0,5
Oléico	18:1 ( $\Delta^9$ )	13,4
Linoléico	18:2 ( $\Delta^{9,12}$ )	-5,0
Linolênico	18:3 ( $\Delta^{9,12,15}$ )	-11,3
Erúcido	22:1 ( $\Delta^9$ )	35

$\Delta$  - posição da insaturação na cadeia carbônica

Fonte. Adaptado de LEHNINGER et al. (1995), CASTRO et al. (2005) e RAMOS (2004)

Os ácidos graxos sintetizados pelas plantas normalmente tem número par de átomos de carbono em cadeias não ramificadas de 12 a 24 átomos de carbonos. Na biossíntese dos ácidos graxos, uma enzima com 3 átomos de carbono chamada de 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 (origem de um carboidrato) (CASTRO et al., 2005).

A acetil-CoA é catalisada pela acetil-CoA carboxilase e convertida em malonil-CoA, ocorrendo esta reação em dois passos, envolvendo a biotina e consumo de ATP, fornecida principalmente pela fase fotoquímica da fotossíntese. O grupo biotínico funciona como um transportador temporário de CO<sub>2</sub>, transferindo-o para o acetil-CoA no segundo passo, liberando o malonil-CoA (LEHNINGER et al., 1995). Estas reações ocorrem nos plastídios (CASTRO et al., 2005).

A montagem dos carbonos no substrato malonil-CoA consiste em uma sequência 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 CO<sub>2</sub>. Esta reação utiliza como agente redutor o NADPH, fornecido principalmente pela fase fotoquímica da fotossíntese. 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 como ácido graxo livre. Os ácidos graxos saturados de cadeia longa (maior que 16 átomos de carbono) são sintetizados a partir do palmitato, onde a alongação ocorre por adição de grupos acetila através da ação do sistema 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 alongação da cadeia carbônica. A dupla ligação é introduzida na cadeia do ácido graxo por uma reação oxidativa, catalisada pela acil-graxo-CoA dessaturase. Para esta reação ocorrer é necessário a entrada de um acil-graxo-CoA saturado (ácido graxo ligado a um grupo CoA), uma molécula de oxigênio e dois átomos de hidrogênio, onde dois substratos diferentes, o ácido graxo e o NADPH, sofrem simultaneamente oxidação por dois elétrons. Todo esse processo também ocorre no retículo endoplasmático liso como mostra a figura 1 (LEHNINGER et al., 1995).

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 menores temperaturas do ponto de fusão que os ácidos graxos saturados análogos (CASTRO et al., 2005). Este fenômeno ocorre devido à forma da cadeia carbônica, onde esta sofre uma curvatura no ponto da dupla ligação, não permitindo que as moléculas se agrupem de forma tão estreita e organizada, diminuindo as forças de atração entre as moléculas (LEHNINGER et al., 1995).

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  $O_2$  em águas frias, a qual funciona como transportadora de oxigênio para o sistema de dessaturação (CASTRO et al. 2005). Este fenômeno da maior concentração de ácidos graxos poli-insaturados foi observado no girassol quando cultivado em regiões de latitude diferenciada (ROBERTSON, apud BETTIS et al., 1982).

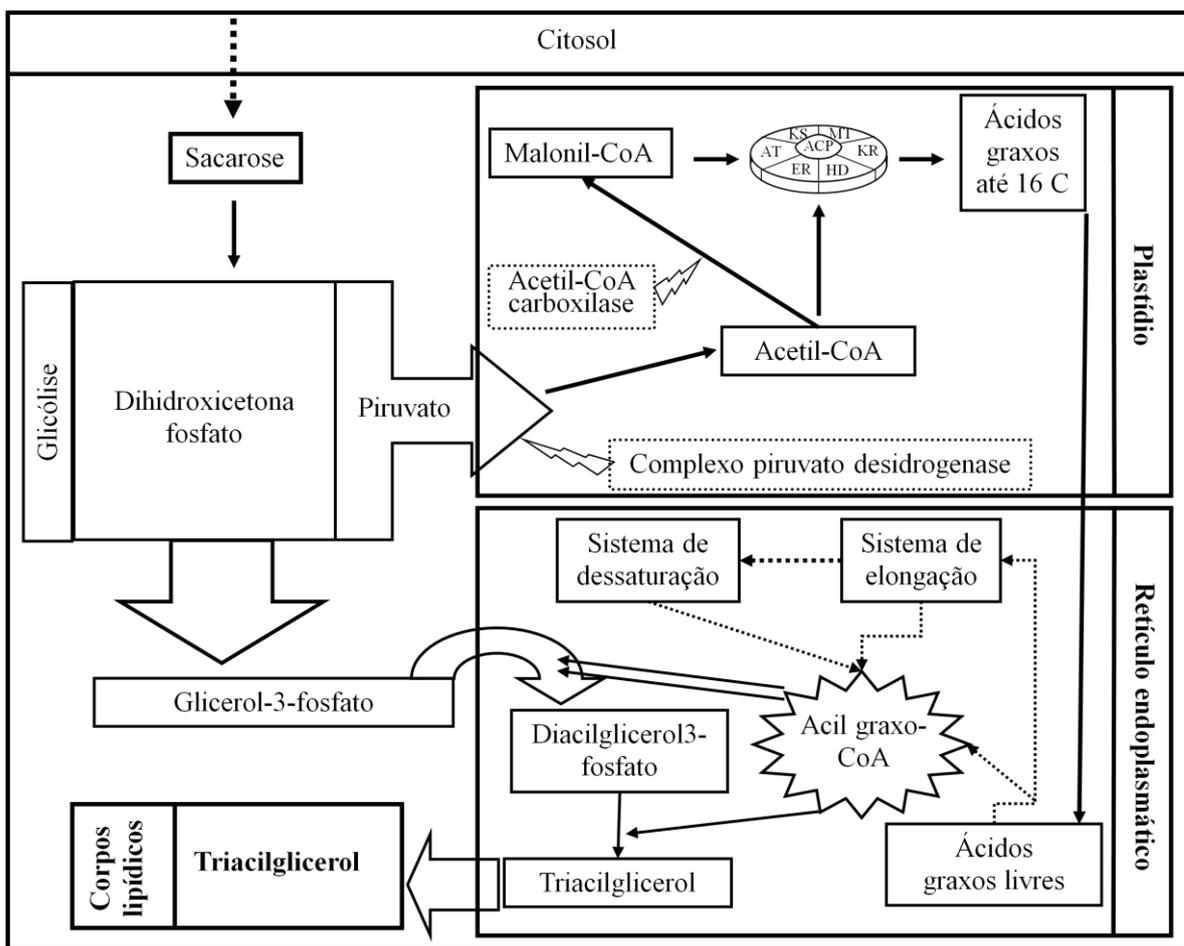


FIGURA 1. Compartimentalização simplificada da síntese de triacilgliceróis em uma célula vegetal. As linhas pontilhadas são rotas determinadas por fatores ambientais e/ou genéticos (adaptado de CASTRO et al. (2005), LEHNINGER et al. (1995) e TAIZ & ZEIGER (2004))

Para os ácidos graxos serem convertidos em triacilgliceróis, necessita-se de dois precursores, os acil-graxos-CoA e o glicerol-3-fosfato, junto a vários passos enzimáticos em suas respectivas vias de biossíntese. O glicerol-3-fosfato é formado a partir da

dihidroxicetona fosfato que surge durante a glicólise pela ação do glicerol-3-fosfato desidrogenase citosólica ligada ao NAD. Os outros precursores são os acil-graxos-CoA, formados dos ácidos graxos livres no retículo endoplasmático pelas acil-CoA sintases (LEHNINGER et al., 1995).

O primeiro estágio na biossíntese dos triacilgliceróis é a acilação dos dois grupos hidroxila livres do glicerol-3-fosfato por duas moléculas de acil-graxo-CoA para liberar o diacilglicerol-3-fosfato (fosfatidato), o qual é convertido em triacilglicerol. Para isso, o fosfatidato é hidrolisado pela fosfatidato-fosfatase para formar um 1,2-diacilglicerol, o qual posteriormente é convertido em triacilglicerol por transesterificação com um terceiro acil-graxo-CoA (LEHNINGER et al., 1995). O resumo dos processos explicados acima pode ser visualizado na figura 1.

Dependendo da composição química do óleo como os tipos de ácidos graxos, tamanho da cadeia carbônica e a existência de insaturações, podem ser suscetíveis níveis diferenciados de degradações do tipo oxidativas e/ou hidrolíticas. As transformações oxidativas ocorrem em lipídios que contém ácidos graxos insaturados. Estas degradações resultam em hidrocarbonetos voláteis como aldeídos, cetonas, ácidos carboxílicos, alcoóis e também produtos não voláteis como hidrocarbonetos cíclicos, não cíclicos e compostos de alta massa molecular. As transformações oxidativas normalmente não ocorrem nos ácidos graxos saturados porque, neste caso, a formação de um radical livre é desfavorável, a não ser que ocorram condições drásticas de temperatura, pois para ocorrer à ruptura de uma ligação carbono-hidrogênio (C-H) de uma cadeia carbônica saturada, é necessário aproximadamente  $100 \text{ kcal mol}^{-1}$ . Para o caso da cadeia insaturada, ou a dupla ligação existente na molécula, são necessários aproximadamente  $60 \text{ kcal mol}^{-1}$ . Esse tipo de degradação provoca alterações na cor do óleo, na viscosidade, bem como na sua composição (BOBBIO & BOBBIO, 1992).

As condições de armazenamento podem favorecer a ocorrência deste tipo de

degradação. Ainda podem ocorrer degradações hidrolíticas, esse tipo de transformação, pode ser provocado por enzimas ou por agentes químicos, como ácidos ou bases, junto com a água. Esta alteração é importante para aqueles lipídios que contém glicerídeos de ácidos graxos de baixo peso molecular, os quais possuem volatilidade suficiente para serem perceptíveis pelo seu cheiro. O aumento do conteúdo de ácidos graxos livres produz um efeito importante, que corresponde à redução do ponto de fulgor do óleo, refletindo na inflamabilidade do mesmo. Na presença de água pura, as transformações hidrolíticas ocorrem, mas é um processo muito lento, já quando existe a presença de contaminantes, como ácidos ou bases, estes catalisam as reações, principalmente quando existe a entrada de calor no sistema. O efeito da degradação hidrolítica por enzimas pode ser minimizado por inativação térmica. Outro fator importante na inibição dos processos de degradação hidrolítica é a eliminação da água existente no lipídio (BOBBIO & BOBBIO, 1992).

As reações descritas afetam a composição química qualitativa e quantitativa das sementes, e conseqüentemente o acúmulo de óleo nas mesmas. E é nesse ponto que o melhoramento genético entra como ferramenta importante na seleção de materiais com composição química específica (MARCOS FILHO, 2005). A soja, por exemplo, é selecionada para obtenção de sementes com elevados teores de óleo e proteínas.

A posição da semente em relação à inflorescência ou ao fruto também tem papel importante, como no caso do girassol, onde se relata que as sementes formadas na região mediana e na periferia do capítulo, em geral, apresentam teores maiores de óleo e proteínas em relação às da região central, as quais são malformadas em virtude de nutrição deficiente (MARCOS FILHO, 2005). O suprimento deficiente de água para as culturas acelera a senescência foliar e reduz o período de acúmulo de reservas. Estudos relatam que houve redução do teor de óleo das sementes na cultura do girassol quando as plantas, a partir do início do florescimento ou no enchimento de aquênios, sofreram estresse hídrico

(CASTRO et al., 2006). Em relação à nutrição da planta-mãe e à fertilidade do solo, trabalhos mostram que existe influência positiva da adubação verde associada à adubação mineral no teor de óleo comestível, para a cultura do girassol (WENDT et al., 2005).

### 3.3.. 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 óleo vegetal e/ou biodiesel, como pode ser visualizado na tabela 2.

Para a extração de óleo dos vegetais, existem basicamente, por via mecânica, dois processos, prensagem a frio e a quente, onde o óleo extraído contém de 1 a 12 % de material turvo, necessitando de purificação, a qual acontece por meio da sedimentação, filtragens ou centrifugação (FUCHS, 2006).

TABELA 2. Culturas oleaginosas com potencial para produção de óleo vegetal e biodiesel, e referência média de produtividade de óleo por hectare

Matéria Prima	Rendimento (L ha <sup>-1</sup> )	Matéria Prima	Rendimento (L ha <sup>-1</sup> )
Milho	170 a 200	Castanha de caju	170 a 220
Caroço de algodão	280 a 340	Dendê	3700 a 6000
Soja	440 a 550	Café	450 a 500
Semente de abóbora	500 a 600	Semente de coentro	530 a 570
Mostarda	550 a 600	Gergelim	600 a 800
Arroz	700 a 900	Girassol	720 a 940
Mamona	740 a 1000	Cacau	800 a 1000
Amendoim	900 a 1100	Azeitona	1200 a 1500
Carnaúba	1300 a 1700	Noz pecã	1430 a 1520
Jojoba	1640 a 2000	Pinhão manso	1800 a 3000
Macadâmia	1920 a 2240	Castanha-do-Pará	2000 a 2500
Abacate	2200 a 2800	Coco	2100 a 2900

Os números consideram a produtividade média da cultura

Fonte. JAKUBASZKO (2006)

Um dos problemas dos óleos vegetais, quando utilizados como combustível, é a alta viscosidade, quando comparados com o pertodiesel, daí um dos motivos para transformação em biodiesel (TEIXEIRA, 2005a). Para isso, estes devem ser filtrados e passar

por processos de degomagem, que se constituem na retirada de fosfolipídios ou fosfatídeos hidratáveis (gomas) do óleo vegetal, para este se utiliza água como via do processo de retirada, a qual é feita por diferença de densidade. Esse processo é básico quando os óleos são extraídos por processos mecânicos (DORSA, 1995).

Quando os grãos passam por um período de armazenamento muito longo, ou armazenagem de grãos danificados e úmidos, ou ainda se foi utilizado processos químicos, isto é, solventes (hexana) para a extração do óleo, são necessários ainda outros tipos de degomagem. Processo também conhecido como refino, tem o objetivo de extrair fosfatídeos não hidratáveis, ou complexos metal/fosfatídeos, fazendo parte destes metais o ferro, o sódio e o magnésio, que por ação de ácidos e bases são cindidos em sais insolúveis em óleo, também faz parte dos fosfatídios não hidratáveis o ácido fosfatídico. Estes constituintes também causam baixa estabilidade dos óleos, tornando-os mais susceptíveis a processos de degradação (DORSA, 1995).

Os fosfolipídios ou gomas são classificados como lipídios compostos, pois possuem outros grupos na molécula além de ácidos graxos e alcoóis, e são divididos em três categorias, sendo estas os fosfatídios, as ceras e os sulfolipídios:

Os fosfatídios também conhecidos como ésteres fosfóricos de diglicerídios, são ácidos graxos que possuem na molécula, ácido fosfórico e um composto nitrogenado. Estes compostos apresentam influência negativa na estabilidade dos óleos, principalmente quando este é destinado como alimento, pois causam problemas na cor e no sabor (BOBBIO & BOBBIO, 1985).

As ceras são ésteres de ácidos graxos e mono-hidroxicólicas de ácidos graxos carboidratos de alto peso molecular, com uma base nitrogenada. Estes compostos possuem alto ponto de fusão, são altamente resistentes a decomposição e são insolúveis em água (BOBBIO & BOBBIO, 1985). Dependendo da quantidade presente no óleo, quando

estes são submetidos a baixas temperaturas, causam turbidez, pois possuem tendência de se cristalizarem. Algumas culturas como girassol, milho e arroz necessitam ser decerados. O processo consiste em manter-los 24 h a zero °C e mais três dias a temperatura ambiente, para a retirada completa das ceras (DORSA, 1995).

Ainda existem os sulfolípidios que são compostos de estrutura pouco conhecida, os quais contêm enxofre na molécula (BOBBIO & BOBBIO, 1985).

Um dos processos para a transformação do óleo vegetal em biodiesel, e o mais conhecido, é a transesterificação, a qual foi muito estudada durante o período da segunda guerra mundial e pós-guerra, na França e Bélgica. A transesterificação é definida como a reação de um triacilglicerol (óleo ou gordura), com um álcool (etanol, metanol, propanol, etc.), catalisada por ácidos, bases ou enzimas (TEIXEIRA, 2005a).

Existe também um processo denominado de pirólise ou craqueamento catalítico, que se dá pela ação física do calor, o que dispensa a utilização de catalisadores, este é basicamente o mesmo processo que é utilizado na refinação 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 pelo processo de transesterificação (JAKUBASZKO, 2006).

Quanto à transesterificação há duas rotas alcoólicas para tal, sendo uma delas a metílica e a outra a etílica. Enquanto a metílica é a mais estudada e tem a vantagem da recuperação facilitada do álcool excedente, ou álcool de aceleração da reação, na etílica a separação da glicerina dos ésteres é mais complexa, onde o álcool recuperado não poderá ser reutilizado devido ao teor de água adquirido durante a reação, onde a água entra como redutor da velocidade de reação (TEIXEIRA, 2005a). Com a rota etílica, pode-se chegar a até 92% de rendimento médio em ésteres sobre o óleo utilizado (girassol) sendo que rendimento é afetado pela temperatura de reação, tipo e concentração do catalisador e, o mais significativo é a razão

molar etanol/óleo vegetal (PIGHNELLI et al., 2006). A figura 2 mostra o processo de transesterificação.

Os co-produtos resultantes da transesterificação são representativos. O principal é a glicerina, normalmente com grau de pureza inferior ao ideal de comercialização. Esta é comum a todas as rotas de transesterificação para a produção de biodiesel, independente da oleaginosa utilizada. Os demais co-produtos (tortas e fibras) possuem dependência qualitativa da oleaginosa processada.

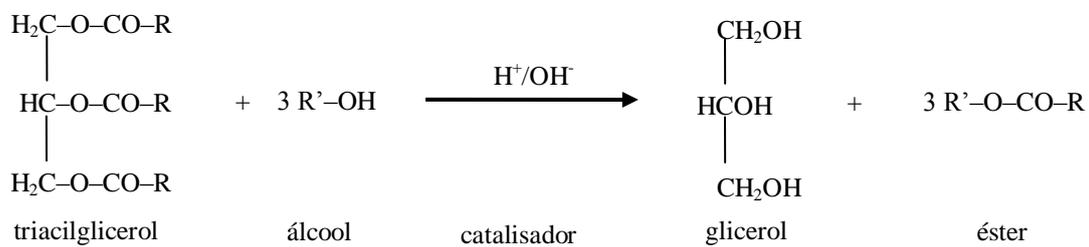


FIGURA 2. Reação química do processo de transesterificação (GERPEN & KNOTHE, 2006)

Os custos do biodiesel dependem da cultura utilizada na produção e do nível tecnológico empregado na construção da refinaria. O preço comercial no Paraná em 2006 estava próximo de R\$ 1,68 o litro do biodiesel puro, produzido a partir de óleo de soja (preço em Rolândia – PR, Biolix, 2006), porém nos últimos leilões de biodiesel feitos pela ANP, o biocombustível alcançou preço médio de R\$ 2,69 o litro, tendo ainda previsão de aumento no seu preço por pressão das usinas de biodiesel (VEDANA, 2008). Outro fator que também regula o preço é o fato de que algumas culturas já têm demanda para o seu óleo, um exemplo é a mamona, lubrificante especial que alcança preços elevados (óleo tipo A, R\$ 2,17 kg<sup>-1</sup>) e tem seu preço regido por mercado internacional, outro exemplo é o óleo de soja (TEIXEIRA, 2005b).

### 3.4. UTILIZAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS À BASE DE ÓLEOS VEGETAIS

O desafio atual é encontrar combustíveis alternativos que possam ser utilizados de modo que nenhuma ou o mínimo possível de alterações sejam necessárias nos projetos de unidades de potência existentes (ENGLER et al., 1983). O setor agrícola, no qual o petrodiesel é a principal fonte de energia, está voltando suas atenções para os combustíveis à base de óleos vegetais como substituto direto, pois este está ocupando parcelas representativas no custo, onde levantamentos apontam percentuais entre 7 a 20% (JAKUBASZKO, 2006). Dados dos Campos Gerais – PR indicam custos com petrodiesel para a lavoura de soja e de milho de 8,9% e 7,2% respectivamente (GIMENEZ, 2006).

Embora existam muitos relatos de motores ciclo Diesel operando com combustíveis à base de óleos vegetais, puro ou misturado com petrodiesel, ainda não estão claras quais as características e definições dos óleos vegetais combustíveis e dos ésteres (biodiesel) são as mais adequadas. Muitos estudos não têm incluído a caracterização físico-química destes combustíveis, as quais são variáveis dependentes da cultura e de fatores ambientais, como comentados no tópico anterior. Sendo assim, não fica claro como os diferentes óleos (combustíveis), processamentos de purificação ou transformações como as rotas de transesterificação e pirólise (craqueamento) podem afetar o desempenho dos motores (ENGLER et al., 1983).

Como caracterização dos combustíveis, pode-se adotar a descrição das propriedades destes e posterior comparação com os limites do petrodiesel propriamente dito. A tabela 3 relaciona alguns itens interessantes, bem como alguns limites.

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. Estes encontraram problemas como formação de depósitos pela queima incompleta do óleo, baixo poder calorífico, aumento do consumo, desgaste elevado 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 & PEREIRA, 2004), tendo potencial para destruir as fibras elásticas e irritar as mucosas gastrintestinais e nasais (NEW JERSEY DEPARTMENT OF HEALTH AND SENIOR SERVICES, 1998).

TABELA 3. Resumo de limites de algumas normas da ASTM (Associação Norte Americana de Ensaio de Materiais) e ANP (Agência Nacional do Petróleo) para caracterização do combustível petrodiesel

Propriedade	Unidade	Limites ASTM	Limite ANP 255
Viscosidade cinemática 40° C	mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	1,9 – 4,1	ANP 310
Ponto de fulgor (FP)	°C	≥ 52	≥ 100
Água e sedimentos	% volume	≤ 0,05	≤ 0,02
Cinzas	% massa	≤ 0,01	≤ 0,02
Enxofre	% massa	≤ 0,05	≤ 0,001
Número de cetano (NC)	-	≥ 40	≥ 45

Fonte. Adaptado de DUNN (2006)

Atualmente no Brasil existem alguns trabalhos isolados, com a utilização de óleos vegetais, sem serem transformados em biodiesel, diretamente como combustíveis, puros ou misturados com petrodiesel, em motores de ignição por compressão. Em ensaios de curta duração, encontra-se semelhança com o petrodiesel, em relação ao consumo e potência. Porém em um ensaio com duas horas de duração em potencia máxima, utilizando óleo de girassol puro como combustível, e este entrando na bomba injeta em torno de 34 °C, mostram perda de potência de 8% e aumento de consumo de 9,3% em média. Segundo o autor isso já era esperado, pois o poder calorífico do óleo vegetal de girassol é menor que do petrodiesel, e a viscosidade é aproximadamente 12 vezes maior que do petrodiesel, influenciando diretamente na injeção do combustível na câmara de combustão (MAZIERO et al., 2007).

Em ensaios com 400 horas de duração, tendo como unidade experimental um grupo de geradores com motores Diesel do fabricante MWM modelo D229.6, utilizando

óleo de dendê como combustível, e este entrando na bomba injetora a temperatura de 55 °C, foi observado queda de 10% na potência e aumento de 15% no consumo. Foi observado também problemas como necessidade de troca mais frequente de óleo lubrificante e carbonização de câmara de combustão e bico injetor, todavia reversível com limpeza. Projeções indicaram que, devido aos maiores custos de manutenção, o óleo vegetal seria viável em relação ao petrodiesel, apenas quando o último custasse no mínimo 25% a mais que o óleo vegetal (SOARES et al., 2000).

Em um ensaio com previsão de 200 horas de funcionamento (longa duração), de um motor MWM D229.3 com óleo de girassol como combustível, encontraram-se problemas logo nas primeiras nove horas, onde foi observado um vazamento na junção da tubagem de escapamento com o cabeçote do motor, sendo esse resultado da exaustão de produtos da pirólise do óleo vegetal combustível. Foi encontrado também problemas como obstrução do sistema de lubrificação, por aumento da viscosidade do óleo lubrificante, ocorrida por contaminação por óleo combustível, e acúmulo de carvão nos bicos injetores e pistão. Embora tenha ocorrido carbonização elevada dos bicos injetores, estes se apresentaram mecanicamente e hidraulicamente em ordem. Foi observado também problemas como a emissão de fumaça branca, quando o motor saía da condição de marcha lenta para potência máxima, o que é resultado da queima incompleta do combustível, causada por problemas de injeção. Neste caso específico, o ensaio foi interrompido com 63 horas de funcionamento, pois a temperatura do óleo lubrificante ficou muito acima do recomendado, houve perda de aproximadamente 10,1% de potência e, foi observado ruído elevado no interior do motor (MAZIERO et al., 2007).

Ensaio de curta duração, avaliando o desempenho e as emissões de gases, em motores ciclo Diesel funcionando com óleo de dendê pré-aquecido (85 °C) como combustível, encontraram que é vantajoso principalmente pelo aspecto ambiental. Porém é

necessário adaptações de projeto para um funcionamento regular e compatível com o funcionamento com petrodiesel. As adaptações sugeridas como aumento da taxa de compressão, avanço de injeção e aumento do débito de combustível, foram realizadas tomando como base testes realizados em motor ASTM-CRF Cetano, melhoraram o desempenho do motor e também diminuíram as emissões de gases (hidrocarbonetos, CO, CO<sub>2</sub>) quando comparado com o combustível petrodiesel, onde somente as emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) foram praticamente o dobro que quando utilizado petrodiesel para todos os ensaios. Com relação a potência, quando comparado com o petrodiesel, teve-se que elevar o débito de combustível em torno de 10%. No caso do aumento da taxa de compressão, esta aumentou a potência e a eficiência térmica e diminuíra as emissões de hidrocarbonetos (HC), CO e CO<sub>2</sub>, porém aumentou as emissões de NO<sub>x</sub> para ambos os combustíveis, óleo vegetal e petrodiesel. No caso do avanço de injeção, aumentou a potência, mas também aumentou as emissões de NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub> (PIMENTEL & BELCHIOR, 2002).

Estudos relacionando as características e o desempenho de vários óleos combustíveis (óleo de girassol filtrado; óleo de girassol degomado; óleo de girassol degomado e decerado; óleo de algodão filtrado; óleo de algodão degomado; óleo de algodão refinado), verificaram que o óleo de girassol filtrado apresentou falha de ignição e rápida contaminação do óleo lubrificante. Os óleos degomado e degomado mais decerado de girassol mostraram menor consumo específico (kg kWh<sup>-1</sup>), e maior eficiência térmica. O óleo de algodão filtrado mostrou consumo mais elevado que o petrodiesel, e apresentou também menor eficiência térmica. Quanto ao óleo degomado e ao óleo refinado de algodão, estes mostraram consumo pouco menor e igual quando comparados com o petrodiesel, respectivamente. Para a eficiência térmica mostraram-se um pouco superiores e similares ao petrodiesel. Para todos os óleos testados observou-se deposição de carbono na câmara de ignição, porém de fácil remoção. Outro fato foi que com o tempo, o consumo aumentou e o motor passou a apresentar

maior ruído (ENGLER et al., 1983).

Testes realizados com óleo de amendoim mostraram formação de maior quantidade de depósitos de carvão quando comparados com o petrodiesel (GOODRUM et al., 1996). No entanto, óleos vegetais obtidos por processos de prensagem, degomagem e refino alcalino têm mostrado alguns aspectos positivos em testes de curta duração, como melhor eficiência térmica, consumo ligeiramente menor e menor temperatura dos gases de exaustão. Estes resultados mostraram ser dependentes da composição do óleo, como mostra as tabelas 4 e 5 (PETERSON et al., 1983).

TABELA 4. Composição de ácidos graxos dos óleos vegetais

Combustível	Palmítico	Estearico	Oléico	Linoléico	Linolênico	Erúico
	(16:0)	(18:0)	(18:1)	(18:2)	(18:3)	(22:1)
-----% por massa de ésteres metílicos-----						
Girassol	6,4	4,2	23,9	61,4	3,0	-
Linoléico de açafão	7,1	2,5	13,3	76,6	-	-
Oléico de açafão	5,4	2,1	75,3	16,1	-	-
Nabo	4,4	1,8	59,8	20,6	11,1	0,9
Canola	3,2	1,1	14,8	12,7	-	46,7

Fonte. PETERSON et al. (1983)

As 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. Outro fator observado foi a diferença de potência do motor entre o começo e o fim dos testes, onde o teste de torque inicial com petrodiesel foi feito na unidade de potência, após os testes com os óleos combustíveis, tendo sido consideravelmente menor que o torque inicial (PETERSON et al., 1983).

Testes de longa duração utilizando alguns dos óleos das tabelas 4 e 5 (830 h) mostraram que o desgaste foi quase o dobro para o óleo linoléico de açafão quando comparado com o petrodiesel. Este mesmo óleo apresentou maior carbonização na câmara de combustão e acúmulo de uma espécie de “verniz” (carbonização) no bico injetor. O motor ainda apresentou problemas de ignição (partida) e prendeu os anéis nos canaletes do pistão, por acúmulo de carvão, seguido de perda de pressão de compressão (PETERSON et al.,

1983).

Testes com a mistura de óleo de nabo com petrodiesel (70 e 30% respectivamente) mostraram menor acúmulo de carbono no pistão e na câmara de combustão, bem como melhor desempenho quando comparado com o óleo linoléico de açafraão, mostrando-se então como um combustível mais limpo. A mistura de óleo de nabo com petrodiesel e aditivo (redução da viscosidade) apresentou maior desgaste do motor que o combustível sem aditivo (PETERSON et al., 1983).

TABELA 5. Características físicas e de desempenho de alguns óleos vegetais

Combustível	Viscosidade cinemática (37,8 °C - mm <sup>2</sup> s)	Densidade específica	Teor de cinzas (%)	Eficiência térmica (%)	Consumo (L h <sup>-1</sup> )	Gases de exaustão (°C)
Girassol	34,9	0,92	0,0046	26,6	10,98	660
Linoléico de açafraão	32,3	0,93	0,0074	27,3	10,54	659
Oléico de açafraão	42,1	0,92	-	27,1	10,98	695
Nabo	51,0	0,91	0,0043	26,8	10,66	692
Canola	39,0	0,92	0,0098	26,3	11,19	700
Petrodiesel	2,9	0,85	0,0124	24,3	11,18	681

Fonte. PETERSON et al. (1983)

Testes utilizando óleos vegetais obtidos por processos de filtragem e refino alcalino, sendo a mesma composição dos óleos da tabela 4, mostraram que a viscosidade dos óleos vegetais tem correlação na formação de depósitos de carbono na câmara de combustão, pois alta viscosidade resulta em incompleta atomização. Estes provocaram diferenças no desempenho dos motores, principalmente com relação à eficiência térmica, como mostra a tabela 6 (BETTIS et al., 1982).

TABELA 6. Desempenho dos óleos vegetais combustíveis e do diesel em teste de curta duração e viscosidade do combustível

Combustível	Eficiência térmica (%)	Consumo (kg h <sup>-1</sup> )	Potência (kw)	Viscosidade cinemática a 38 °C (mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
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
Petrodiesel	24,2 c	9,7	29,5	2,9 f

\*As médias seguidas das mesmas letras na coluna não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5% de probabilidade

Fonte. BETTIS et al. (1982)

No caso das análises do óleo lubrificante do motor (viscosidade inicial de  $113,0 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$  a  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ) para cada óleo combustível, encontrou-se um aumento da viscosidade principalmente para o óleo linoléico de açafrão, encontrando uma razão de aumento de 2,6 vezes do inicial ( $291,5 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$  a  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Para o petrodiesel e para as misturas de óleo de nabo com petrodiesel e aditivo, encontraram-se uma razão de 1,6 do inicial. Também as análises do material mostram que o óleo de açafrão causou elevada oxidação dos componentes de aço, alumínio, cromo, molibdênio e ferro. Com estes resultados o autor não recomenda óleos vegetais como combustível (PETERSON et al., 1983).

Em vários trabalhos realizados por fabricantes norte americanos de motores, chegou-se a recomendação de 100 h de utilização para troca do lubrificante, decorrente da queima irregular dos óleos vegetais, o qual provocou aumento da viscosidade do óleo lubrificante (DUNN, 2006).

Os óleos vegetais estudados no trabalho citado possuíam viscosidades de 11 a 17 vezes maior que o petrodiesel, onde se encontrou que grande parte das variações na viscosidade são dependentes do comprimento da cadeia carbônica dos ácidos graxos, do número de ligações insaturadas e da interação entre estes componentes. A utilização de aditivos também pode diminuir a viscosidade e a formação de depósitos de carbono na câmara de combustão e nos bicos injetores (BETTIS et al., 1982).

Ensaio realizados com dois tipos de unidades de potência, uma de sistema de injeção direta e outra indireta, utilizando vários óleos vegetais, incluindo óleo de girassol, onde nestes foram realizados diversos tipos de processamentos de purificação, encontraram que os motores de injeção direta são extremamente dependentes do alto grau de atomização do combustível pelo bico injetor, o que é tão visível nos motores de injeção indireta. Neste, os problemas com injeção e atomização imprópria são decorrentes da alta viscosidade dos óleos vegetais, que causam depósitos no bico injetor, na câmara de combustão, prisão de anéis nos

canaletes do pistão e contaminação do óleo lubrificante. Esta carbonização é decorrente da ocorrência de pirólise, de polimerização e outras reações, proporcionada pela atomização deficiente, a qual não promove mistura adequada do combustível com o oxigênio (RYAN III et al., 1984).

Testes de injeção e verificação da qualidade combustível dos óleos vegetais, (Jet fuel oxidation tester – JFTOT-ASTM-D 3241-77), mostraram que os depósitos de carbono formados, na maioria dos casos diminuem com o aumento do número de processos de purificação do óleo. Neste teste de oxidação térmica, encontrou-se correlação com a composição química do óleo, mais precisamente com relação ao número de insaturações, onde quanto maior a quantidade de ácidos graxos insaturados, principalmente o ácido graxo linolênico (18:3), maior a quantidade de depósitos formados. Outro fator importante foi com relação a temperatura do óleo combustível, onde além da redução da viscosidade e melhora da injeção e atomização do óleo vegetal, encontrou-se também um aumento do número de cetano (36,6 a 38 °C para 39,3 a 145 °C para óleo degomado de soja). Como os resultados de oxidação térmica obtidos com o aumento da temperatura do óleo vegetal combustível, foram melhores, os ensaios com as unidades de potência citados no parágrafo anterior foram realizados com o óleo entrando na bomba injetora a 140° C (RYAN III et al., 1984).

Sendo assim, torna-se interessante realizar estudos das interações e do comportamento fisiológico vegetal com relação à variabilidade condicionada pela genética da planta e pelo meio, quanto à composição de ácidos graxos principalmente de cadeia carbônica curta, com o intuito de reduzir os problemas com a viscosidade. Lembrando que para o consumo humano buscam-se óleos insaturados, o que aparentemente não são interessantes, quando se pensa em aplicação como combustível.

Para o caso dos óleos vegetais transformados, testes de desempenho de curta duração indicaram que as propriedades dos ésteres (biodiesel) foram semelhantes as do

petrodiesel, exceto pelo ponto de inflamabilidade ou ponto de fulgor. Dos biodieseis testados, o único que apresentou algumas características diferenciadas foi o biodiesel de mamona, principalmente com relação à viscosidade (TOLMASQUIM, 2003). Fica claro que nem sempre os processos de transformação resolvem os problemas de herança do material vegetal, onde a soma de novos processos para solução de alguns problemas encarecerá o produto.

Trabalhos realizados com biodiesel filtrado de girassol, produzido nas duas rotas de transesterificação (etílica e metílica) demonstraram que o consumo específico de biodiesel de ésteres etílicos é menor quando comparado com o biodiesel de ésteres metílicos. Quando comparado com o petrodiesel, o incremento de biodiesel no petrodiesel aumentou o consumo específico a partir de 25% de mistura até biodiesel puro, sendo 6,4 e 15,5% respectivamente (LOPES et al., 2006). O fato de o consumo aumentar com a utilização de misturas acima de 25% de biodiesel deve-se ao fato de que os motores existentes foram projetados para o combustível petrodiesel, e estes não possuem eficiência (taxa de compressão) para queimar completamente toda a gama de ácidos graxos existentes no biocombustível, sendo menor a conversão de energia química em energia térmica, o que é compensado com uma entrada maior de combustível.

No caso do aumento de consumo, pode-se comentar que normalmente o número de cetano dos biodieseis é maior quando comparado com o petrodiesel (Tabela 7). O tamanho da cadeia carbônica, que no caso dos óleos vegetais são especificamente lineares, como alcanos (saturado), alcenos (uma insaturação), alcadienos (duas insaturações) e alcatrienos (três insaturações) a existência e o número de insaturações, são maiores que no petrodiesel, requerendo maior energia para a decomposição térmica completa (aproximadamente  $160 \text{ kcal mol}^{-1}$  para romper completamente as duplas ligações carbono-carbono) (BOBBIO & BOBBIO, 1992).

Outro fator, é que as cadeias carbônicas saturadas de hidrogênio, são mais

energéticas que as cadeias insaturadas análogas, tendo maior poder calorífico, onde o poder calorífico do hidrogênio é de 28700 kcal kg<sup>-1</sup>, enquanto o do carbono é de 8140 kcal kg<sup>-1</sup>, sendo assim quanto mais rico em hidrogênio for o combustível, maior será o seu poder calorífico, e que é necessário maior energia para a ocorrência da oxidação térmica completa de um óleo com grande quantidade de insaturações nas moléculas, liberando menos energia que um óleo com menos insaturações (SILVA, 2006).

TABELA 7. Propriedades físico-químicas de alguns combustíveis

Propriedades	Óleo combustível			Biodiesel**			Petrodiesel*
	Mamona	Babaçu	Dendê	Mamona	Babaçu	Dendê	
Poder calorífico (kcal kg <sup>-1</sup> )	8913	9049	8946	9046	9440	9530	10824
Ponto de névoa (°C)	10	26	31	-6	-6	6	1
Índice de cetano	nd	38	39	nd	65	60	45
Viscosidade (37,8°C)	285	30,3	36,8	21,6	3,9	6,4	3,04
Ponto de fluidez (°C)	-	-	-	-30	nd	nd	-22
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

Fonte. RAMOS (2004)

Outro problema é que os óleos mais insaturados (ex. girassol) são altamente reativos e tendem a polimerizar-se facilmente, tanto em armazenagem quanto em queima, sendo que o combustível que entra polimerizado pode não ser queimado podendo aderir-se na câmara de combustão, ser expelido com os gases de escape ou passar para o cárter, se acumulando no bloco e nas partes quentes do motor. Por isso, seria mais interessante como combustível a utilização de óleos com menor quantidade de insaturações (RYAN III et al., 1984).

Com relação a estrutura química do petrodiesel, o qual é uma fração da destilação do petróleo chamada de óleos leves, que é uma mistura complexa de hidrocarbonetos e compostos orgânicos, contendo em pequenas quantidades enxofre, nitrogênio, oxigênio, metais etc., onde basicamente é composto por quatro classes de hidrocarbonetos, sendo as parafinas (alcanos), olefinas (alcenos, alcadienos...), naftenos (ciclanos) e cadeias aromáticas como benzênicos e naftalênicos, sendo que a maior parte da

composição é de parafinas, olefinas e aromáticos, com cadeias entre 8 a 40 átomos de carbono (OBERT, 1971).

Pelo fato de grande porcentagem do petrodiesel ser composta por alcanos alcenos e alcadienos, que vem a semelhança dos óleos vegetais com o mesmo, por isso o uso de óleos vegetais sem maiores transformações químicas já foi estudado. Na Alemanha, por exemplo, existem motores com grandes adaptações para utilização deste tipo de combustível. O motor desenvolvido pela Elsbett Company denominado Elko é um exemplo, onde segundo alguns dados de fontes diversas existiriam mais de 30.000 motores destes em uso na Europa. Este projeto utiliza o combustível como meio arrefecedor, suportando funcionar com temperaturas maiores. Sendo a energia retirada do motor aproveitada para pré-aquecimento do combustível. O óleo vegetal aquecido (podendo chegar a 200 °C) facilitaria a “queima” da glicerina, diminuindo depósitos de combustível não queimado e a contaminação do lubrificante. No Brasil, já existem comercialmente “kits” para pré-aquecimento do óleo vegetal combustível, utilizados na adaptação de motores Diesel.

No Brasil também já foram realizados alguns ensaios de curta duração utilizando misturas de óleo vegetal e petrodiesel pré-aquecidas. Os ensaios foram realizados em bancada dinamométrica e as duas misturas testadas em duas temperaturas de pré-aquecimento obtiveram resultados de potência, momento e consumo mais interessantes do que quando da utilização de somente petrodiesel (SCHLOSSER et al., 2007).

#### 4. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Mecanização Agrícola (Lama) da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) em parceria com a Retificadora de Máquinas (Retimaq), o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) e o Centro de Ensino Superior dos Campos Gerais (CESCAGE).

Utilizou-se como unidade experimental um micro-tractor monocilíndrico, ou trator de rabiça conforme descrição da tabela 8, e visualizado na figura 3.

TABELA 8. Especificações do motor

Fabricante	Kubota – Tekko do Brasil
Modelo	Tobatta Diesel – KR - 90
Número de cilindros	1
Diâmetro pelo deslocamento	90 x 90 mm
Volume deslocado	0,570 L
Potência máxima	6,7 kW a 167,5 rad s <sup>-1</sup> (9 cv a 1600 rpm)
Taxa de compressão	20
Sistema de injeção	Direta
Capacidade de óleo lubrificante	2,5 L
Capacidade de água de arrefecimento	4,0 L



FIGURA 3. Micro-tractor Tobatta KR-90 utilizado no ensaio

Utilizou-se como combustível óleo vegetal de girassol (*Helianthus annuus*, L.). Esta se deu pelo fato de ser uma cultura com alto rendimento em óleo, quando comparada com outras culturas como milho, soja e algodão; ser adaptada a região dos Campos Gerais, sendo assim pode entrar como alternativa no sistema de rotação de culturas. Esta cultura é uma boa opção para a agricultura familiar, na qual se enquadra a unidade experimental utilizada (micro-trator). Outro fator que também direcionou a escolha deste óleo como combustível foi a literatura que, segundo Peterson et al. (1983) e Engler et al. (1983), quando utiliza-se o óleo de girassol, sem proceder processamentos de purificação, os problemas causados ao motor aparecem com um número menor de horas de funcionamento, quando comparado com óleos de outras culturas, pois este possui um número maior de substâncias que neste caso, podem ser consideradas impurezas. Este fato é interessante, primeiramente porque o processo de causa de danos ao motor é acelerado, podendo-se reduzir o tempo de ensaio, e segundo que, qualquer melhora que surja de uma metodologia de uso do óleo vegetal combustível para outra, provavelmente esta aparecerá para outros óleos também.

O óleo foi obtido por extração mecânica, ou prensagem a frio dos grãos (grão com pericarpo), utilizando uma extrusora de rosca sem fim. O óleo obtido passou apenas por processo de decantação, para retirada de impurezas grosseiras e material turvo, seguido de filtragem simples, não sendo procedido nenhum tipo de processamento, como degomagem, retirada de ceras, etc.. Este óleo foi extraído e cedido pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), unidade de experimental de Ponta Grossa.

Deste óleo retiraram-se três amostras que foram enviadas para o Instituto de Tecnologia do Paraná (TECPAR), sendo uma amostra de 0,20 L enviada para a Divisão de Análises e Ensaio Tecnológicos (Laboratório de Alimentos), para análise de determinação de ácidos graxos (referência: AOAC – Official Method of Analysis, 18ª Ed. 2005 – 969.33). A segunda amostra de 2,00 L foi enviada para a Divisão de Biocombustíveis para levantamento

de parâmetros de qualidade de combustível do óleo vegetal, como mostra a tabela 9. A terceira amostra foi coletada para a determinação da curva de viscosidade do óleo nas temperaturas de 25, 38, 50, 70 e 90 °C, utilizando um viscosímetro de Ostwald, com tubo capilar de Cannon-Frenske de 150, para líquidos transparentes. A viscosidade do óleo foi determinada em temperaturas menores que 100 °C, por limitação do viscosímetro, o qual utiliza água como condutora de temperatura para o óleo do tubo capilar, isto é, o tubo capilar fica imerso em água a temperatura pré-estabelecida de ensaio. Esta viscosidade foi determinada através da comparação do tempo de escoamento do óleo pelo tubo capilar com o tempo da água no mesmo, sendo a relação feita com base na viscosidade da água, nas mesmas temperaturas estudadas para o óleo, pois a viscosidade da água já é conhecida por referências de tabela (HANDBOOK OF CHEMISTRY AND PHYSICS, 1989 - 1990).

TABELA 9. Parâmetros de qualidade combustível analisadas para o óleo vegetal utilizado

Variáveis	Método
Aspecto e cor	Visual
Corrosividade ao cobre 3h a 50 °C	NBR 14.359
Massa específica a 15 °C ( $\text{kg m}^{-3}$ )	NBR 7.148
Viscosidade cinemática a 40 °C ( $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$ - cSt)	NBR 10.441
Microresíduo de carbono (% massa)	ASTM D 4.530
Índice de iodo ( $\text{gl}_2 \text{100g}^{-1}$ )	EN 14.111
Índice de acidez ( $\text{mg}_{\text{KOH}} \text{g}^{-1}$ )	NBR 14.248
Estabilidade a oxidação a 110 °C (h)	EN 14.112
Poder calorífico superior ( $\text{J g}^{-1}$ )	ASTM D 240
Poder calorífico superior ( $\text{cal g}^{-1}$ )	ASTM D 240
Ponto de fulgor corrigido (°C)	NBR 11.341
Ponto de fluidez (°C)	NBR 11.349
Insolúveis ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	AOCS ca 3a-46
Fósforo - P ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	EN 14.107
Sódio - Na ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	EN 14.538
Potássio - K ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	EN 14.538
Calcio - Ca ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	EN 14.538
Magnésio - Mg ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	EN 14.538

Antes de começar o ensaio, o motor foi retirado do trator e retificado por

completo. No cabeçote, foram trocadas as guias e sedes de válvulas e, colocadas válvulas novas, tanto para admissão (uma) quanto para exaustão (uma), também se retirou deformações da superfície de acoplamento do cabeçote com o bloco.

Com relação a pistão anéis e camisa (camisa do tipo úmida), foram trocados ficando estes no padrão de medida de fabrica (*stander*). No caso das bronzinas, para mancal de árvore de manivelas, a retífica desgastou 0,25 mm e da biela 0,50 mm do *stander*. A folga de óleo deixada para as bronzinas de mancal da árvore de manivela foi de 0,05 mm e para a bronzina de biela obteve-se duas medidas, uma de 0,05 mm, no sentido longitudinal ao corpo da biela, e outra de 0,08 mm no sentido transversal. Acredita-se que essa deformação ocorreu devido uma possível fusão da bronzina de mancal de biela seguido travamento ocasionada por falta de lubrificação, este foi observado pela cor diferenciada do mancal da biela (azulado).

No caso dos mancais de árvore de manivelas, deixou-se distância lateral de 0,06 mm, não sendo possível medir o espaço de lubrificação entre superfície da árvore de manivelas e bronzinas, pelo fato desta ser em forma de anel, isto é, sem parafusos de aperto. Sendo que quando esta é acoplada no bloco do motor, sofre deformação desigual na superfície de contato com o colo da árvore de manivelas.

O aperto utilizado no mancal da bronzina de biela foi de 6 kgf cm<sup>-2</sup>. A bucha do pino de pistão foi usinada deixando espaço de óleo lubrificante de 0,02 mm. Na montagem do cabeçote não foi possível medir o aperto dos prisioneiros devido à posição das porcas no cabeçote, as quais não permitem o encaixe da chave torquimétrica. Foi utilizado espaçamento de 0,10 mm entre os balancins e as válvulas tanto para admissão quanto para exaustão. Para estas medidas utilizou-se como base recomendações de fabricantes de motores semelhantes, pela falta de informações do utilizado.

Para o sistema de injeção, os elementos de bomba e bico injetor foram

colocados novos, permanecendo os mesmos até o fim dos ensaios. Nas avaliações de bico injetor, foram realizados os testes padrão para sistema mecânico de injeção Diesel, que são: a determinação visual da atomização do combustível, isto é, o bico injetor é colocado para funcionar com pressões maiores que a de abertura, e pressões próximas a de abertura (baixas pressões), onde visualmente é avaliado o grau de pulverização ou atomização do combustível; pressão de abertura, que seria a elevação da pressão de injeção até o ponto que o bico injetor se abra para a saída do combustível, e esta pressão é comparada com a referência de fábrica para pressão de abertura do bico; e por último, o teste de estanquidade ou vedação, que significa a não ocorrência de vazamento pelos orifícios de injeção da ponta, quando se mantém por aproximadamente 5 segundos a pressão no sistema de 15 a 20 kgf cm<sup>-2</sup> menor que a pressão de abertura.

Todos os ensaios foram realizados em bancada, como mostra a figura 4, utilizando fluido de calibração para sistema de injeção Diesel, tendo este como composição química; óleo mineral, hidrocarbonetos alifáticos (estrutura carbônica de cadeia aberta) e aditivos anti-corrosivos (Castrol Ultra seni 4113<sup>®</sup>). O elemento de ponta injetora quando novo foi montado com pressão de abertura de 165 kgf cm<sup>-2</sup>, sendo a pressão de referência do fabricante de 160 kgf cm<sup>-2</sup>. Os 5 kgf cm<sup>-2</sup> adicionados na pressão de abertura de montagem, é indicado por tabela de referência do fabricante para montagem de elementos de ponta injetora novos, devido a queda do valor de pressão de abertura com o ajuste no regime de funcionamento das partes móveis.

Após montado o motor, mensurou-se a pressão de compressão através de um manômetro analógico instalado no lugar do bico injetor como mostra a figura 5. Posteriormente o motor foi acoplado no trator onde passou por um período de dez horas de funcionamento para pré-ajuste das partes móveis, e após esta, o óleo lubrificante foi trocado por um óleo novo para início do ensaio. Neste momento também foram feitas as adaptações

de um sistema de válvulas direcionais, onde o operador pode optar pela utilização de petrodiesel ou óleo vegetal como combustível. Este sistema foi idealizado para proporcionar o funcionamento do motor somente com petrodiesel ou com óleo vegetal puro, não permitindo misturas, sendo o combustível trocado com o acionamento de duas válvulas de esfera.



FIGURA 4. Bancada de ensaio de bicos injetores



FIGURA 5. Manômetro para avaliação de pressão da compressão

A metodologia de trabalho consistiu na ignição do motor sempre com petrodiesel (utilizou-se petrodiesel de classificação PANP N° 310/2001 e RANP N° 15/2006 tipo interior – B) por um período de 10 minutos com a manopla do acelerador em posição de aceleração máxima, para aquecimento do motor, e depois deste período, através de válvulas de direcionamento, alterava-se o combustível, passando o motor a ser alimentado por óleo vegetal. Durante o período de funcionamento, no desenvolvimento dos trabalhos a campo, procurou-se manter sempre a manopla do acelerador do motor em posição de máxima aceleração. Antes de desligar o motor passava-se para alimentação com petrodiesel pelo mesmo período de 10 min., para a bomba e bico injetor voltarem a trabalhar com petrodiesel. Esta metodologia foi utilizada, para evitar problemas com ignição (partida), quando o motor estivesse frio, pelo fato da alta viscosidade do óleo vegetal causar problemas com atomização. Além de evitar problemas de oxidação e corrosão dos elementos do sistema de injeção, por decorrência de possível degradação do óleo vegetal e/ou por impurezas existentes.

O trabalho constituiu-se de dois ensaios com óleo vegetal combustível, onde o no primeiro o óleo combustível não passou por processo de aquecimento antes de entrar no sistema de injeção do motor, chamado de ensaio um (E-1), e o segundo ensaio ou ensaio dois (E-2) onde se utilizou o óleo vegetal entrando aquecido no sistema de injeção. Para o segundo ensaio (E-2) o motor foi desmontado para avaliação do primeiro ensaio, porém não foi retificado. Em análise das bronzinas de mancal de biela, de mancal de arvore de manivela, bucha de pino de pistão, kits (pistão, anéis e camisa) e bomba de óleo lubrificante, mostraram-se em perfeitas condições. O sistema de injeção também foi desmontado e avaliado, neste caso conforme parâmetros de fabricantes, sendo também mantidos para o segundo ensaio.

Para o experimento E-1, confeccionou-se um reservatório para o óleo vegetal, mantendo-se o reservatório original para petrodiesel. Utilizou-se para o circuito de óleo vegetal uma bomba com sistema de bombeamento por membrana vibratória, um filtro com malha de 150 micros, um tubo em “T”, para retorno do excesso de combustível bombeado para o reservatório e, duas válvulas de esfera com acionamento por  $\frac{1}{4}$  de volta para proceder à escolha do combustível, como mostra a figura 6.



FIGURA 6. Sistema para bombeamento, filtragem e conversão para óleo vegetal

Para o experimento E-2 utilizaram-se as adaptações feitas no primeiro ensaio, e adicionou-se um sistema de aquecimento do óleo vegetal utilizado como combustível. O sistema de aquecimento consistiu-se em um conjunto de espirais

confeccionadas com tubo de cobre com 3/8 de polegada de diâmetro, inseridas dentro do tubo de exaustão dos gases, sendo um total de 16 espiras, com diâmetro de 53 mm distribuídos em um espaço de 255 mm, sendo que o tubo de escape possui dimensões de 90 x 290 mm, como mostra a figura 7a. Este foi idealizado, pois a temperatura média máxima (termômetro digital por infravermelho), na superfície externa do escape, foi de aproximadamente 190 °C, e a temperatura média máxima dos gases (termopar com haste de inox, com 80 mm de comprimento), foram de 180 °C, na saída do tubo de escape, sendo as duas medidas realizadas com o motor em aceleração livre (aceleração máxima, sem carga), temperatura suficiente para o aquecimento do combustível.

Para este segundo ensaio (E-2), substituiu-se a bomba de óleo com sistema de bombeamento por membrana vibratória, por uma com sistema de bombeamento por engrenagens (Figura 7b), pois houve desgaste acentuado do sistema de acionamento da primeira, causado pelo excesso de carga proporcionado pelo óleo vegetal à bomba, devido a alta viscosidade, quando comparado com o petrodiesel, e pela falta de lubrificação no sistema de acionamento.



7a. Espiras dentro do tubo de escape



7b. Bomba de óleo vegetal combustível e filtro

FIGURA 7. Sistema de aquecimento confeccionado para o ensaio dois (E-2)

Substituiu-se também o filtro de combustível (Figura 6) por um filtro de óleo lubrificante (Figura 7b), pois o primeiro possuía os elementos filtrantes com partes de polímeros e, com a temperatura alcançada no óleo, estes entraram em fusão.

A linha deste sistema de aquecimento foi montada da seguinte maneira: o óleo vegetal sai do reservatório por sucção, passa pela bomba de engrenagens ou circulação, pelo filtro e pelo sistema de aquecimento e chega às válvulas para escolha de combustível, e destas o excedente em vez de retornar ao tanque como no sistema onde não havia aquecimento (E-1), retorna para a bomba de óleo como mostra a figura 8a. O retorno volta para a bomba de circulação, para não aquecer o óleo no tanque, evitando problemas com a estabilidade térmica do mesmo, isto é, problemas com degradação térmica do óleo no tanque; outro fator seria elevar mais a temperatura do óleo, pois este fica circulando pelo sistema de aquecimento até ser consumido. Toda a parte da tubulação de cobre externa a câmara de escape, do sistema de aquecimento, foi revestida com lã de vidro e papel alumínio como isolamento térmico, tanto para evitar perdas de calor bem como para evitar acidentes com o operador (Figura 8a e 8b).



8a. Detalhe da linha do sistema de aquecimento do óleo vegetal combustível



8b. Detalhe das válvulas de escolha de combustível

FIGURA 8. Sistema de aquecimento confeccionado para o ensaio dois (E-2)

O intuito do aquecimento do óleo vegetal utilizado como combustível no ensaio dois (E-2) foi diminuir a viscosidade do mesmo, pois segundo Ryan III et al. (1984), com a redução da viscosidade, reduz-se o esforço do sistema de injeção e consequentemente o desgaste e melhorar a atomização do combustível pelo bico injetor na câmara de combustão. Com isso espera-se melhoraria a eficiência térmica, o que significa uma melhor queima do

combustível e redução do consumo, com conseqüente redução da emissão de gases poluentes e de hidrocarbonetos para o ambiente, resultando no aumento da vida útil do motor devido à menor carbonização.

A temperatura idealizada para aquecimento do óleo vegetal foi de 150 °C, pois segundo Inoue et al. (2005), até esta temperatura ocorre o maior decréscimo de viscosidade para o óleo de girassol, sendo que após esta, o decréscimo da viscosidade é pequeno. Ryan III et al. (1984), também encontrou valores semelhantes com relação a temperatura do óleo vegetal na entrada da bomba injetora, recomendando uma temperatura de 140 °C, onde encontrou viscosidades em torno de  $5 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$  (viscosidade cinemática, cSt). Já Inoue et al. (2005) encontrou para o óleo de girassol, uma viscosidade de aproximadamente  $9,93 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$  (cSt) a 150 °C, quando comparado com a média do petrodiesel (interior ou tipo B) neste trabalho (3,8 cSt), a temperatura de 38 °C, esta é aproximadamente 2,6 vezes maior. No caso do óleo de girassol a temperatura de 38 °C, tem-se  $32 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$  de viscosidade cinemática, sendo esta aproximadamente 8 vezes maior que a do petrodiesel, a esta mesma temperatura. Para o caso deste experimento, como mostra a Figura 9, a temperatura de 90 °C encontrou-se uma viscosidade de 6,8 cSt, a qual ainda é superior a viscosidade do petrodiesel, porém é bem próximo ao encontrado por Ryan III et al. (1984) e Inoue et al., (2005).

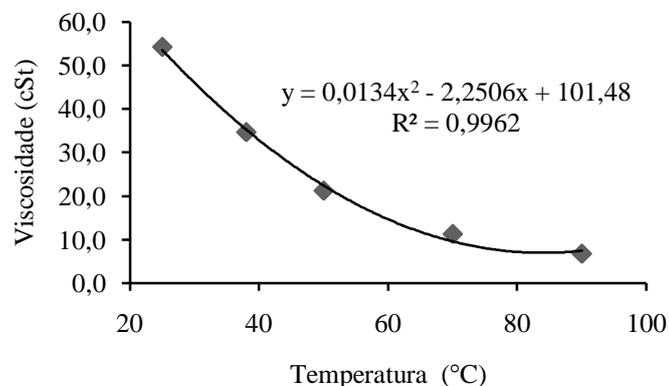


FIGURA 9. Curva de viscosidade determinada para o óleo de girassol utilizado

A temperatura do sistema foi medida com a instalação de sensores do tipo

termopar. Utilizou-se termopares específicos para imersão em líquidos, sendo estes, sensores do tipo “K”, modelo MTK-02<sup>®</sup> (marca registrada Minipa), com faixa de medição de -40 a 250 °C com acurácia de mais ou menos 2,2 °C e comprimento da haste de 80 mm. As leituras dos sensores foram realizadas com um multímetro modelo ET-1400<sup>®</sup> (marca registrada Minipa) como mostra a figura 10a e 10b.

Instalou-se um sensor termopar na entrada da bomba injetora, para medir a temperatura de entrada do combustível como mostra a figura 10a, o qual foi utilizado nos dois ensaios (E-1 e E-2), e para o ensaio dois (E-2) instalou-se também um sensor na linha de aquecimento.

Para manter o motor sobre carga durante o tempo funcionamento com óleo vegetal, foram realizados trabalhos com enxada rotativa em faixa de trabalho de 0,9 m, compondo a área em sua maioria por LATOSSOLO com material de origem de Folhelho Ponta Grossa.



10a. Sensor termopar instalado na entrada da bomba injetora



10b. Multímetro utilizado para a leitura do termopar

FIGURA 10. Equipamento utilizado na mensuração da temperatura do óleo vegetal

Cada ensaio teve duração de 50 horas de trabalho, onde posteriormente foi realizado avaliação do motor. Para isso desmontou-se a unidade de potência por completo, medindo-se principalmente a carbonização para pistão, anéis e cabeçote (câmara de

combustão), para válvula e duto de escape no cabeçote, e válvula e duto de admissão no cabeçote. Esta foi procedida retirando-se com uma ferramenta de corte os materiais aderidos nos componentes e posteriormente suas massas foram medidas em balança digital com acurácia de 0,005 g.

Avaliou-se também a carbonização do bico injetor, bem como o desgaste do elemento de ponta e de elementos da bomba injetora. Foi avaliado também desgaste de componentes móveis, como bronzinas engrenagens de comando, tuchos e bomba de óleo lubrificante. O óleo lubrificante foi trocado por um novo no início de cada ensaio, sendo utilizado uma a quantidade recomendada de 2,5 litros de óleo lubrificante com especificação D SAE 30 (monoviscoso), API – CF/CD (Shell Rimula<sup>®</sup>) sendo composto por óleos básicos minerais mais aditivos detergentes, dispersante, antidesgaste, antioxidante e antiespumante; tendo este a vida útil do ensaio. No final de cada ensaio retirou-se uma amostra, a qual foi enviada para Laboratório especializado da Shell do Brasil, para proceder a avaliação do óleo lubrificante, sendo os parâmetros avaliados listados na tabela 10.

TABELA 10. Variáveis analisadas para o óleo lubrificante

Variáveis	Método	Variáveis	Método
Aparência	Visual	Sódio (Na)	ASTM D 5185
Cor	Visual	Silício (Si)	ASTM D 5185
Viscosidade	ASTM D 445	Cromo (Cr)	ASTM D 5185
Teor de água	ASTM E 203	Chumbo (Pb)	ASTM D 5185
Ponto de fulgor	ASTM D 3828	Alumínio (Al)	ASTM D 5185
FT-IR (Infravermelho) - Oxidação	ASTM E 2412	Molibdênio (Mo)	ASTM D 5185
FT-IR (Infravermelho) - Nitratação	ASTM E 2412	Zinco (Zn)	ASTM D 5185
FT-IR (Infravermelho) - Sulfatação	ASTM E 2412	Cobre (Cu)	ASTM D 5185
FT-IR (Infravermelho) - Glicol	ASTM E 2412	Ferro (Fe)	ASTM D 5185
FT-IR (Infravermelho) - Fuligem	ASTM E 2412	Níquel (Ni)	ASTM D 5185
Cálcio (Ca)	ASTM D 5185	Prata (Ag)	ASTM D 5185
Magnésio (Mg)	ASTM D 5185	Estanho (Sn)	ASTM D 5185
Fósforo (P)	ASTM D 5185	Titânio (Ti)	ASTM D 5185
Boro (B)	ASTM D 5185	Vanádio (V)	ASTM D 5185
Potássio (K)	ASTM D 5185	Bário (Ba)	ASTM D 5185

O consumo de combustível foi estimado pelo número de litros adicionados no tanque (consumido), dividido pelo número de horas de funcionamento, obtendo-se o consumo horário médio ( $L h^{-1}$ ) para os dois ensaios.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 11, apresenta-se a análise de determinação de ácidos graxos que fazem parte da composição do óleo de girassol utilizado.

TABELA 11. Ácidos graxos que fazem parte da composição do óleo utilizado e referências para via de comparação com o obtido por outros autores para óleo de girassol

Ácido graxo	Utilizado (g kg <sup>-1</sup> )	Ryan III et al. (1984) (g kg <sup>-1</sup> )	Peterson et al. (1983) (g kg <sup>-1</sup> )	Hancsók et al. (2004) (g kg <sup>-1</sup> )
Mirístico (14:0)	-	5,0	-	1,0
Palmítico (16:0)	134,5	58,0	64,0	82,0
Esteárico (18:0)	82,7	48,0	42,0	36,0
Oléico (18:1)	216,7	183,0	239,0	277,0
Linoléico (18:2)	494,6	686,0	614,0	584,0
Linolênico (18:3)	2,9	2,0	30	5,0
Araquídico (20:0)	7,3	-	-	2,0
Eicosenóico (20:1)	7,2	-	-	2,0
Behênico (22:0)	25,0	8,0	-	6,0
Erúcido (22:1)	22,9	5,0	-	-
Lignocérico (24:0)	6,2	5,0	-	2,0

De acordo com a tabela 11, pode-se observar que os resultados da caracterização dos ácidos graxos do óleo utilizado em relação aos resultados obtidos na literatura, que mesmo sendo da mesma cultura, ocorrem grandes variações em sua composição química. Essas variações são decorrentes de uma diversidade de fatores, que podem ser desde intrínsecos a planta, como por exemplo, a genética, que segundo Marcos Filho (2005), o melhoramento genético pode selecionar matérias com composição química específica, a posição da semente em relação ao capítulo também tem papel importante, onde as sementes formadas na região mediana e periferia, em geral, apresentam teores maiores de óleo em relação às da região central, a qual se deve a nutrição deficiente dos frutos, devido a fatores fisiológicos, sendo os frutos da região central os últimos a serem formados, e quando chegam em fase de enchimento, a planta já está em fase de declínio de produção fotossintética.

Existe também a influência de fatores extrínsecos, ou fatores do ambiente, onde segundo Castro et al. (2006), são fatores tão importantes quanto os fatores intrínsecos na determinação da composição dos ácidos graxos, quando dentro de uma mesma cultura. De acordo com Petcu et al. (2001), a fase mais importante da influência do ambiente na composição de ácidos graxos, para o caso de grãos de girassol, é a fase de enchimento. No caso de estresse hídrico, Castro et al. (2006), encontraram que o suprimento deficiente de água acelera a senescência foliar e reduz o período de acúmulo de reservas, causando redução do teor de óleo das sementes.

Trabalhos realizados por Petcu et al. (2001) encontraram que quando há estresse hídrico, as variações nos ácidos graxos, são mais representativas para os ácidos insaturados, onde no caso de déficit hídrico encontraram redução de ácido oléico (18:1) e aumento da quantidade de linoléico (18:2). Para o caso dos ácidos saturados (palmítico (16:0) e esteárico (18:0)), as alterações nas quantidades não foram significantes. Segundo Baldini et al., (2000), Mckeon e Stumpf (1982), e Stymme e Appelqvist (1980), apud Petcu et al. (2001), as condições de estresse hídrico estabelecida até oito dias após o florescimento, período no qual há um crescimento da biossíntese de óleo, promove ativação das enzimas  $\Delta^9$  dessaturase (responsável pela conversão de ácido esteárico (18:0) em oléico(18:1)), e  $\Delta^{12}$  dessaturase, (responsável pela conversão de ácido oléico (18:1) em linoléico (18:2)). Com relação à nutrição, Wendt et al. (2005), comentam que existe influência positiva da fertilidade e da disponibilidade de nutrientes no teor de óleo comestível, para a cultura do girassol.

Para todos os casos demonstrados na tabela 11, pode-se observar que o ácido graxo predominante para a cultura do girassol, é o linoléico seguido do ácido oléico, para o caso do óleo estudado, os dois juntos compõem cerca de 70% dos ácidos graxos do óleo utilizado como combustível. Ryan III et al. (1984), realizando testes de oxidação

térmica em injeção (qualidade combustível dos óleos), encontraram correlação positiva com a quantidade de ácidos graxos insaturados e quantidade de depósitos formados, onde a quantidade e o número de insaturações é fator importante, principalmente com relação ao ácido graxo linolênico (18:3), embora sua quantidade nos óleos em geral, seja muito pequena. Com esta, pode-se dizer que o óleo de girassol utilizado como combustível é propenso a formação de depósitos, pela sua alta relação de ácidos graxos insaturados.

Outro fator importante é com relação a quantidade de ácidos graxos saturados de cadeia carbônica longa, como o ácido araquídico (20:0), behênico (22:0) e lignocérico (24:0), os quais juntos compõem cerca de 3,8% da composição do óleo utilizado. Estes ácidos graxos são importantes, pois de acordo com Bobbio & Bobbio (1985), podem ser enquadrados no grupo das ceras, pois possuem ponto de fusão em torno de 80 °C e são resistentes a todos os tipos de degradação, inclusive térmica; por isso podem sofrer oxidação térmica incompleta ou até pirólise dentro da câmara de combustão, e seus produtos podem ficar aderidos nos componentes como bico injetor, pistão, cabeçote e válvulas.

Com relação aos parâmetros de qualidade combustível, como mostra a tabela 12, o óleo de girassol utilizado possui moderado índice de corrosividade, possui viscosidade cinemática extremamente elevada, comparado com o padrão da *American Society for Testing Material* (ASTM) para petrodiesel, que exige valores dentro do intervalo de 1,9 a 4,1 (DUNN, 2006) e também é considerada elevada até para os padrões de óleo vegetal, onde o máximo aceitável é de  $36 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$  (cSt) (especificação E DIN 51 605). Segundo Ryan III et al. (1984), os valores altos de viscosidade do óleo utilizado como combustível, causa problemas com o sistema de injeção, como oscilação e sobrepressões, e umedecimento da ponta do bico injetor, resultando na formação de depósitos no mesmo. Ainda o mesmo autor comenta que outro fator importante é com relação ao ângulo

do cone de injeção e a taxa de penetração do combustível, onde quanto maior a viscosidade a taxa de penetração aumenta, e o ângulo do cone de injeção diminui, porém o último é fator importante na mistura ar combustível para motores de injeção direta, no qual se enquadra o motor utilizado neste experimento.

TABELA 12. Parâmetros de qualidade combustível analisadas para o óleo de girassol utilizado e especificações recomendadas para óleo vegetal

Ensaio	Resultado	E DIN 51 605
Aspecto e cor <sup>1</sup>	LII/Amarelo	-
Corrosividade ao cobre 3h a 50 °C <sup>3</sup>	1a	-
Massa específica a 15 °C (kg m <sup>-3</sup> )	917,2	900-930
Viscosidade cinemática a 40 °C (mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> - cSt)	37,68	36 (máx)
Microresíduo de carbono (% massa)	0,42	0,4 (máx)
Índice de iodo (gI <sub>2</sub> 100g <sup>-1</sup> )	115	95-125
Índice de acidez (mg <sub>KOH</sub> g <sup>-1</sup> )	12,63	2,0 (máx)
Estabilidade a oxidação a 110 °C (h)	2,7	6,0 (min)
Poder calorífico superior (J g <sup>-1</sup> )	39470	36000 (min)
Poder calorífico superior (cal g <sup>-1</sup> )	9435	-
Ponto de fulgor corrigido (°C)	277	220 (min)
Ponto de fluidez (°C)	-7,0	-
Insolúveis (mg kg <sup>-1</sup> )	0,02	-
Fósforo - P (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>2</sup>	< 2,0	12 (máx)
Sódio - Na (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>2</sup>	< 5,0	-
Potássio - K (mg kg <sup>-1</sup> )	5,6	-
Cálcio - Ca (mg kg <sup>-1</sup> )	2,9	20 (máx)
Magnésio - Mg (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>2</sup>	< 2,0	20 (máx)

1 - Límpido e isento de impurezas

2 - Limite de detecção do equipamento - 2,0 e 5,0 mg kg<sup>-1</sup>

3 - FP (Recentemente polido); 1a (Levemente manchado de laranja claro); 1b (Levemente manchado de laranja escuro) (RYAN III et al. 1984)

Com relação ao resíduo de carbono, este mostra-se normal de acordo com o padrões de qualidade de óleo vegetal; quando comparado com os padrões ASTM (DUNN, 2006) de combustível, o qual exige teores de percentagem em massa inferiores a 0,05%, neste caso (0,42%) pode-se considerar muito elevado.

Para o caso do índice de iodo, Ryan III et al. (1984) encontraram correlação entre índices de iodo e tipo de ácido graxo, na carbonização, onde índices de

iodo elevados em óleos com maiores quantidades de ácidos graxos saturados, causam menor carbonização no motor. O poder calorífico superior segundo Peterson et al. (1983), Engler et al. (1983), Bettis et al. (1982) e Ramos (2004) é inferior a média encontrada para todos os tipos de petrodiesel, sendo isso normal para todos os tipos de óleos vegetais. Essa informação é importante, pois permite um embasamento na determinação da eficiência térmica do equipamento onde esta sendo consumido (BRASIL, 1999).

Os parâmetros para o ponto de fulgor, segundo Brasil (1999), dizem respeito à segurança para o manuseio do produto; quanto menor o valor (graus Celsius), maiores são as possibilidades de ocorrerem acidentes com a inflamação do produto, também indica contaminação do óleo combustível por produtos mais leves, tanto em densidade como em esqueleto carbônico.

Os elementos fósforo, sódio, potássio, cálcio e magnésio, para o caso de óleo combustível, a existência de qualquer quantidade destes elementos pode ser considerada prejudicial ao motor, o qual pode causar desgaste nos elementos, e formação de depósitos.

No primeiro ensaio (E-1), onde se utilizou óleo de girassol como combustível, sem o sistema de pré-aquecimento, o sensor termopar instalado na entrada da bomba injetora indicou que o óleo é aquecido a uma temperatura que variou de 38 °C a 50 °C (após período de 10 minutos para troca de combustível), onde de acordo com a análise de viscosidade, o óleo utilizado acaba entrando na bomba injetora a uma viscosidade de 34,7 a 21,3 cSt, onde comparado com o petrodiesel (3,8 cSt a 38 °C; tipo interior) é de 9,1 e 5,6 vezes maior. Este aquecimento ocorreu devido a temperatura do bloco do motor onde está fixada a bomba injetora e, as temperaturas próximas de 50 °C foram alcançadas com o motor sobre carga após tempo de aproximadamente 45 minutos de trabalho, com temperatura ambiente de aproximadamente 23 °C.

Para o segundo ensaio (E-2), os resultados obtidos com relação ao sistema de aquecimento do óleo de girassol mostraram que as adaptações realizadas foram pouco eficientes, pois, segundo Inoue et al. (2005) e Ryan III et al. (1984), a temperatura que seria ideal com relação à redução da viscosidade seria de 150 e 140 °C respectivamente, porém a temperatura medida na entrada da bomba injetora variou de 85 a 110 °C, dependendo do tempo de funcionamento e da carga condicionada ao motor, sendo que a temperatura, quando trabalhado com enxada rotativa, foi de aproximadamente 90 °C, onde de acordo com a análise procedida no óleo, a viscosidade é de 6,8 cSt, o que é aproximadamente o dobro da viscosidade do petrodiesel, o que de acordo com os dados da literatura, no qual foram utilizadas temperaturas maiores, é um valor interessante. Para o óleo de girassol estudado por Ryan III et al. (1984) encontraram uma viscosidade cinemática de 7,55 cSt a uma temperatura de 100 °C, mostrando que a composição físico-química do óleo realmente exerce influência na viscosidade do óleo.

Ainda com relação a temperatura do óleo na linha do sistema de aquecimento do experimento, esta alcançou de 130 °C após 10 minutos com o motor sobre aceleração livre, até 176 °C quando condicionado carga, mas como o consumo é muito pequeno, o óleo vegetal acaba chegando a bomba injetora a uma temperatura menor. Outro fator interessante é com relação a temperatura em que o combustível chega ao bico injetor, a qual não foi mensurada, pois este é o local onde a viscosidade apresenta maior influencia (melhora na atomização).

Após 50 horas de trabalho o E-1 foi interrompido devido a problemas com vazamento de pressão na junção entre o cabeçote e o bloco, onde após o motor desmontado, a junta mostrou sinais de queima como pode ser visualizado na figura 11, onde as ranhuras na superfície da junta são pontos onde ocorreram vazamentos.

Mesmo com vazamentos na junta de cabeçote do E-1, o motor não

apresentou falhas de ignição e nem passagem de pressão de compressão para os dutos de arrefecimento, porém poderia estar havendo vazamento de pressão para o cárter do motor via canal das hastes de comando de válvulas, embora a última não tenha sido identificada na análise da junta. Se esta situação ocorrer, pode contribuir com a contaminação do óleo lubrificante por combustível. Já para o E-2, após as 50 h de funcionamento, não ocorreram condições especiais de funcionamento.

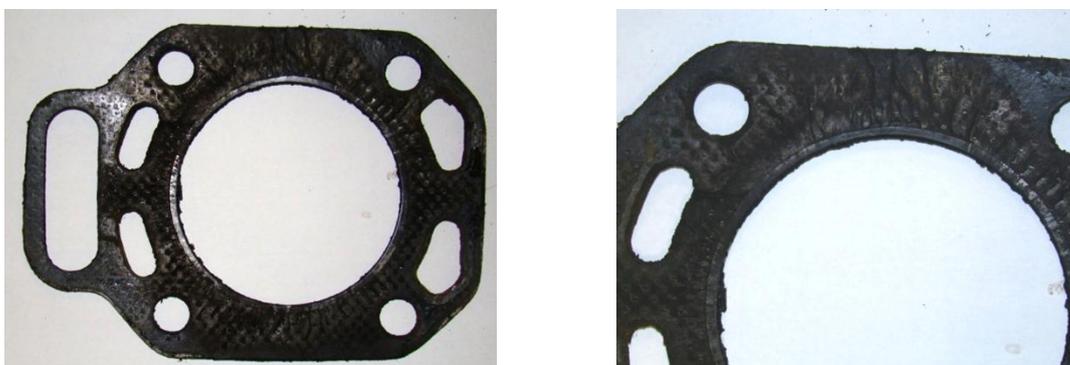


FIGURA 11. Junta de cabeçote com marcas de vazamento ocorrido por queima no E-1

Com relação à pressão de compressão para E-1, antes do motor ser desmontado esta foi novamente mensurada, para via de comparação com a pressão inicial ou a obtida quando o motor foi retificado. Foi constatado neste ensaio (E-1) um aumento da pressão de compressão da ordem de  $1 \text{ kgf cm}^{-2}$  (de  $15 \text{ kgf cm}^{-2}$  para  $16 \text{ kgf cm}^{-2}$ ), mesmo tendo ocorrido vazamentos devido a queima da junta de cabeçote. Observou-se que esta maior pressão ocorreu devido à carbonização excessiva da câmara de combustão, o que provavelmente causou a queima da junta, como mostra a figura 12a e 12c.

O teste da pressão de compressão para o E-2 indicou um aumento de  $0,8 \text{ kgf cm}^{-2}$  sobre a pressão de referencia (de 15 para  $15,8 \text{ kgf cm}^{-2}$ ), também ocasionada pela carbonização ocorrida na câmara de combustão (Figura 12b e 12d), que também promove melhor vedação dos anéis. Este aumento de pressão de compressão, embora tenha

vido próxima a pressão do ensaio anterior (E-1), não ocorreram vazamentos pela junta de cabeçote, mostrando que podem ter ocorridos outros problemas no ensaio anterior que proporcionaram a queima da junta, como por exemplo, a sobre pressão de compressão, a qual pode ter sido sub estimada pelo vazamento, e sobre aquecimento do motor.



12a. Cabeçote do E-1.



12b. Cabeçote do E-2.



12c. Pistão do E-1



12d. Pistão do E-2

FIGURA 12. Carbonização da câmara de combustão para os ensaios E-1 e E-2

Mesmo com estes problemas mencionados para os dois ensaios, até o momento em que o motor foi desmontado (50 h), não foi perceptível ganho e nem perda de potência em trabalho a campo; não ocorreram falhas no funcionamento e nem dificuldade na ignição, porém foi perceptível a emissão de fumaça branca quando funcionando com óleo vegetal, principalmente no caso do E-1, quando alterada a rotação do motor, isto é, elevando bruscamente a injeção de combustível do ponto de marcha lenta para aceleração máxima. Os problemas com ignição, neste caso, com relação a partida, provavelmente não foram observados devido esta ser procedida sempre com o combustível petrodiesel.

Embora não tenha sido perceptível perda de potência, principalmente

devido o fato de esta não ter sido mensurada com bancada dinamométrica (potência mínima exigida pela bancada disponível é de aproximadamente 35 cv), por ser um motor de baixa potência (9 cv), segundo Maziero et al. (2007) em ensaios com um motor de injeção direta, no qual comparou-se o desempenho utilizando óleo de girassol com petrodiesel, foi observado uma perda de potência de 7,6 %.

Como comentado, outro problema encontrado foi à carbonização excessiva para os dois ensaios. A tabela 13 mostra a comparação entre as carbonizações ocorridas nos componentes avaliados que são: bico injetor, câmara de combustão (cabeçote e pistão), ducto e válvula de admissão e de escapamento. Segundo Porte (2008) a carbonização excessiva pode ser explicada pela maior viscosidade do óleo vegetal, que interfere na atomização do combustível na câmara de combustão, não permitindo a queima completa do mesmo.

TABELA 13. Comparação entre a carbonização ocorrida nos componentes avaliados do motor para os ensaios E-1 e E-2

Componente avaliado	Carbonização E-1 <sup>1</sup> (g)	Carbonização E-2 <sup>2</sup> (g)	Diferença E-1 – E-2 (g)	Razão E-2 E-1
Bico injetor	1,064	0,197	0,867	0,815
Câmara de combustão	7,945	7,582	0,363	0,046
Sistema de admissão	2,281	1,102	1,179	0,334
Sistema de escape	17,697	11,783	5,914	0,517

1 - Ensaio com óleo vegetal sem pré-aquecimento

2 - Ensaio com óleo vegetal pré-aquecido

De acordo com a tabela 13 pode-se observar que o ensaio utilizando óleo de girassol pré-aquecido (E-2), mostrou-se melhor, apresentando menor carbonização para todos os componentes avaliados. Segundo Ryan III et al. (1984), a formação de depósitos, principalmente no bico injetor, é decorrente da alta viscosidade do óleo vegetal, onde os autores encontraram, em ensaios de oxidação térmica em testes de injeção, que combustíveis com alta viscosidade prolongam o fim da injeção, e promove gotejamento após a esta, favorecendo a formação de depósitos tanto no bico injetor como em outros

componentes, por isso o E-2 mostrou-se melhor, principalmente com relação aos depósitos no bico injetor.

No bico injetor do E-1, embora exista uma elevada carbonização como mostra a figura 13a, segundo as análises, a carbonização ocorrida não causou problemas de obstrução dos orifícios de injeção do bico, isto é, quando o bico foi testado em bancada não acusou problemas com injeção e atomização do combustível, lembrando que o equipamento trabalhou somente 50 h. Para os três testes realizados com bicos injetores, que são; atomização do combustível, teste de estanquidade ou vedação e pressão de abertura, nenhum acusou problemas para o caso do E-1.

No caso da pressão de abertura do bico injetor, após E-1 a avaliação mostrou uma queda na pressão de abertura de  $20 \text{ kgf cm}^{-2}$ , isto é, a pressão de abertura do bico injetor diminuiu de 165 para  $145 \text{ kgf cm}^{-2}$ , o que segundo fabricante (tabela de referência de montagem para sistema de injeção BOSCH), é normal queda de até 10% ( $16 \text{ kgf cm}^{-2}$ ) com relação à pressão de referência ( $160 \text{ kgf cm}^{-2}$ ), decorrente do ajuste entre as peças móveis do elemento de bico injetor, e neste caso ocorreu uma queda de pressão de  $15 \text{ kgf cm}^{-2}$ .

No caso da pressão de abertura do bico injetor, após E-2 (Figura 13b), foi utilizado o mesmo sem alteração da pressão de abertura encontrada no final do E-1 ( $145 \text{ kgf cm}^{-2}$ ), por estar dentro do limite aceitável de queda de pressão por ajuste do elemento. Neste encontrou-se uma queda de  $15 \text{ kgf cm}^{-2}$  ( $145$  para  $130 \text{ kgf cm}^{-2}$ ), redução de pressão semelhante a do E-1 com relação a pressão de referência do bico, mesmo encontrando uma carbonização 81,5% menor que a carbonização do E-1. No E-2, também foi perceptível desgaste na ponta injetora e em seu elemento. Esta pode ter sido decorrente de falta de lubrificação, isto é, baixo poder de lubricidade do óleo de girassol ou, provavelmente por impurezas, como resíduos de fósforo (o óleo utilizado não foi degomado) e, resíduos

metálicos como ferro, sódio e magnésio. Estes últimos, segundo Dorsa (1995) também podem existir, complexados na forma de lipídios metálicos.



13a. Bico injetor do E-1



13b. Bico injetor do E-2

FIGURA 13. Carbonização do bico injetor após 50 h para E-1 e E-2

De acordo com a tabela 12, pode-se observar a existência de traços de fósforo ( $P - 2 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (não-metal), sódio ( $Na - 5 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e potássio ( $K - 5,6 \text{ mg kg}^{-1}$ ), metais alcalinos com ponto de fusão inferior a  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  (temperatura média da câmara de combustão no momento da ignição do combustível), e cálcio ( $Ca - 2,9 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e magnésio ( $Mg - 2 \text{ mg kg}^{-1}$ ), metais alcalinos terrosos com ponto de fusão muito superior a  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ ; os traços de ferro não foram determinados no óleo utilizado.

O teste de estanquidade ou vedação para o bico injetor do E-2 não apresentou problemas. Porém ocorreu desgaste da ponta do elemento injetor e de sua sede, demonstrados pelos problemas ocorridos no teste de atomização a baixas pressões de injeção, isto é, quando o motor estiver funcionando sobre muita carga, onde a rotação do motor diminui, junto com as pressões de injeção, porém continuam com o mesmo volume injetado para aceleração máxima; em vez de pulverizar (ocorrer a quebra do mesmo em pequenas gotículas), este é esguichado, isto é, o tamanho das gotas são maiores e fora de especificação. Neste caso não acontece uma mistura adequada de ar e combustível, ocorrendo queima inadequada. Contudo durante os ensaios com óleo vegetal, o motor

praticamente não funcionou com esta quantidade de carga.

Outro problema encontrado no E-2 foi o aumento da vazão no retorno do bico, por onde retorna a parcela de combustível que lubrifica o corpo do elemento, indicando que realmente houve desgaste.

Com relação a bomba injetora no E-2, foi perceptível um pequeno desgaste no elemento (avaliação visual), porém este não causou problemas como dificuldade de ignição (partida) e nem perda de potência, por desgaste da hélice do elemento. Segundo fabricante, os elementos da bomba injetora são peças mais duráveis, por não exigirem muita precisão nas medidas e superfícies, como acontece com o bico injetor. Sendo assim os elementos de bomba injetora duram até três vezes mais que os elementos de bico, isto é, suportam até três trocas de elementos de bico injetor para uma troca dos elementos de bomba injetora.

Na análise de válvula e ducto de admissão para o E-1, acredita-se que a elevada carbonização no ducto ocorreu devido a vazamentos ocasionados por deficiência de vedação entre a válvula e a sede no cabeçote como mostra a figura 14a. Já as avaliações realizadas para sistema de admissão do E-2, o retorno por admissão foi consideravelmente menor quando comparada com E-1, onde a carbonização foi 51,7% maior que E-2 (Figura 14b).

Com relação ao ducto e válvula de escape do E-1, encontrou-se o maior acúmulo, justamente porque o combustível que não é queimado, ou que é parcialmente queimado é expulso da câmara de combustão podendo ficar aderido nas paredes do ducto de escape como mostram as figuras 15a e 15c. No caso do E-2 mesmo encontrando sinais de vazamento, como pode ser visualizado na figura 16, a carbonização foi 33,3% menor que no E-1 figura 15b e 15d. Outro fator interessante foi que na análise visual da

carbonização, tanto para câmara de combustão como sistema de escape dos gases do E-2, mostrou que o material aderido é mais sólido, rígido e seco, sendo também mais difícil de ser removido, quando comparado com a carbonização do E-1.



14a. Válvula de admissão do E-1



14b. Válvula de admissão do E-2

FIGURA 14. Carbonização nas válvulas de admissão para E-1 e E-2



15a. Ducto de escape do E-1



15b. Ducto de escape do E-2



15c. Válvula de escape do E-1



15d. Válvula de escape do E-2

FIGURA 15. Carbonização na válvula e no ducto de escape do cabeçote para E-1 e E-2.

A carbonização da câmara de combustão (pistão e cabeçote) para o E-1 provocou um aumento da pressão de compressão (15 para 16 kgf cm<sup>-2</sup>) e

conseqüentemente da taxa de compressão, embora não tenha sido medida. Este aumento da pressão de compressão pode promover aquecimento excessivo do motor, o que pode ter causado a queima da junta do cabeçote e o excesso de retorno de gases pela admissão.



FIGURA 16. Vazamento de pressão pela válvula de escape do E-2

O aumento da pressão de compressão também pode causar a quebra dos anéis, vazamento de pressão para o cárter do motor (*blow-by*), entre outros problemas. Este excesso de carbonização da câmara de combustão para os dois casos (E-1 e E-2) também provocou travamento parcial do primeiro anel de compressão na caneleta do êmbolo (neste caso existem 3 anéis de compressão), por acúmulo de produtos resultantes da queima irregular do combustível, o qual aderiu-se no arco interno e lateral (principalmente a lateral voltada para o lado do fechamento) do anel, com a caneleta do embolo, onde passam os gases que pressionam os anéis contra as paredes do cilindro. Segundo Tomanik (2000), esse anel está sujeito às maiores cargas de velocidade, pressão e temperatura, proveniente do contato com a queima da mistura ar combustível, fazendo assim gerar um maior acúmulo de resíduos na caneleta e na parte do arco interno do anel, podendo ocorrer o chamado “*scuffing*” ou engripamento.

O travamento dos anéis nas canaletas do pistão causa perda de pressão de compressão, embora isto não tenha sido observado provavelmente por causa dos outros anéis de pressão e por causa da carbonização ocorrida na câmara de combustão, o que

provocou o aumento da pressão de compressão; pode provocar passagem de combustível, parcialmente ou não queimado, para o cárter, contaminando o óleo lubrificante, pode provocar a passagem de óleo lubrificante para a câmara de combustão, causando carbonização e aumento da emissão de fumaça, e ainda pode danificar as paredes do cilindro (as pontas do anel riscam o cilindro, pois com o travamento começam a passar sempre no mesmo lugar).

A queima incompleta do óleo vegetal combustível, a qual provocou os problemas citados, foi ocasionado provavelmente pela atomização deficiente do combustível pelo bico injetor. A atomização inadequada do combustível na câmara de combustão não permite a mistura adequada entre combustível e o oxigênio, ocorrendo queima parcial do mesmo. Isto causa perda de potência, a qual normalmente tende a ser suprida com a entrada de uma quantidade maior de combustível, como foi constatado na avaliação de média de consumo, onde conforme a tabela 14, os ensaios com óleo vegetal combustível mostraram que o consumo é sensivelmente superior que no petrodiesel. O montante de combustível não queimado ou parcialmente queimado pode ser expulso junto com os gases, pode aderir na câmara de combustão, duto de escapamento, partes móveis (anéis, válvulas e pistão), e pode passar os anéis e contaminar o óleo lubrificante.

TABELA 14. Consumo de combustível em litros por hora e diferença percentual com referência ao petrodiesel para E-1 e E-2

Combustível	Consumo (L h <sup>-1</sup> )	Diferença em relação ao petrodiesel (%)
E-1	0,916	+2,3
E-2	0,901	+0,7
Petrodiesel	0,896	-

De acordo com a tabela 14, o aumento de consumo encontrado quando o motor funcionou com óleo de girassol, em relação ao petrodiesel, foi inferior ao consumo encontrado por Maziero et al. (2003) para óleo de girassol (9,3% maior), por Pimentel &

Belchior (2002), onde o consumo foi 10% maior quando comparado com o petrodiesel, utilizando óleo de dendê pré-aquecido a 85 °C e Soares et al. (2000), que encontraram consumo 15% maior que no petrodiesel, com óleo de dendê pré-aquecido a 55 °C, mostrando que o aquecimento do combustível pode ter influenciado na redução do consumo para os dois últimos casos. Porém os valores de consumo encontrados neste trabalho competem com os encontrados por Peterson et al. (1983) e Bettis et al. (1982), que encontraram consumos compatíveis com o petrodiesel.

A contaminação do óleo lubrificante também foi observada para os dois ensaios, porém foi mais visível para E-1, na forma de montantes aglutinados de óleo degradado, com viscosidade muito elevada, comparando-se a um gel, no qual ficam aderidos nas paredes do bloco, do cárter e da peneira da bomba de óleo do motor como se pode visualizar na figura 17, podendo causar obstrução; este também foi visível para o E-2, porém com menor intensidade. O resultado da análise físico-química do óleo lubrificante para os dois experimentos estão descritas na tabela 15.1, 15.2 e 15.3.



FIGURA 17. Borra de óleo lubrificante aderido na peneira da bomba de óleo no E-2

Análises de óleo lubrificante realizadas por Soares et al. (2000) em

motores que passaram por ensaios de longa duração, utilizando óleo de dendê como combustível, concluíram que a contaminação torna-se perceptível quando há aumento do volume do óleo lubrificante no cárter do motor e quando há variação da viscosidade. No caso deste trabalho, onde realizou-se ensaios com 50 h, não foi observado aumento no nível de óleo do cárter, porém como mostra a tabela 15.1, que se refere a análise de viscosidade para o óleo lubrificante novo, e a tabela 15.2, para o óleo usado, observou-se uma redução na viscosidade, podendo ser devido a contaminação por produtos do óleo combustível.

TABELA 15.1. Viscosidade e densidade para o óleo lubrificante no tempo zero para os ensaios E-1 e E-2

Parâmetros avaliados	E-1	E-2
Densidade 20 / 4 °C	0,8902	0,8914
Viscosidade a 40 °C (mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ou cSt)	82,80	83,45
Viscosidade a 100 °C (mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ou cSt)	10,96	11,12

De acordo com Porte (2008), a contaminação do óleo lubrificante por produtos advindos do combustível causa uma perda do poder de lubricidade, o que pode diminuir a vida útil da unidade de potência se o óleo não for trocado com maior frequência.

A tabela 15.2 mostra alguns parâmetros de qualidade de óleo lubrificante avaliados para os ensaios E-1 e E-2, onde se pode observar com relação a aparência e cor do óleo para os ensaios são bem diferentes, como comentado anteriormente, com relação a montantes aglutinados de óleo degradado com alta viscosidade, é novamente evidenciado no resultado da análise físico-química, com relação a sólidos em depósito e em suspensão, e com relação a diferença de coloração.

O caso dos sólidos em suspensão no E-1 é devido contaminação com óleo vegetal combustível, ou produtos de pirólise e oxidação incompleta do mesmo. Em geral, segundo Snook (1968) e Asseff (1975), os óleos lubrificantes possuem aditivos que

dispersam, neutralizam e diluem contaminantes advindos do combustível, para que estes não alterem as propriedades do lubrificante, porém, estes são específicos para contaminantes de combustível petrodiesel, e podem não ser tão eficientes para contaminantes advindos de óleo vegetal. Outro fator é com relação ao poder tampão destes aditivos, o qual podem ter sido ultrapassados pela alta quantidade do contaminante.

TABELA 15.2. Parâmetros de qualidade avaliados para o óleo lubrificante no tempo cinquenta horas para os ensaios E-1 e E-2

Parâmetros avaliados	E-1	E-2
Aparência	Sólido em depósito e em suspensão	Normal
Cor	Castanho escuro	Preto
Viscosidade a 40 °C (cSt)	71,1	72,1
Viscosidade a 100 °C (cSt)	9,9	Nd <sup>1</sup>
Teor de água (%)	0,05	Nd
Ponto de fulgor (°C)	190	Nd
Oxidação (A/0,1mm)	0,44	0,51
Nitratação (A/0,1mm)	0,07	0,12
Sulfatação (A/0,1mm)	1,3	1,46
Glicol (%)	0,08	0,08
Fuligem (A/0,1mm)	0,01	0,14

1 - não determinado

Para o caso da cor, esta é muito influenciada pela quantidade de fuligem diluída no lubrificante, por isso o caso do E-2 (0,14 de fuligem), indicou a cor preta em relação ao E-1 (0,01), pois a quantidade de fuligem diluída no óleo do E-2 é bem maior (tabela 15.2). Segundo Snook (1968), com relação aos teores de água, estes somente começam a ser problemáticos quando ultrapassam 0,1%, o que não ocorreu. Com relação as variações de viscosidade para proceder a troca do lubrificante, existem varias sugestões, alguns autores sugerem a troca quando houver alteração de 1° SAE para mais ou para menos, o que seria aproximadamente alteração de 25 a 35% da viscosidade (SNOOK, 1968), outros sugerem limites bem menores como entre 5 e 10% (ESSO, 1970), porém,

segundo Asseff (1975), esses valores são difíceis de serem estimados, pois são dependentes de muitos fatores, como o tipo do motor, qualidade do óleo lubrificante, tipo de trabalho realizado, ambiente de trabalho, e ainda segundo ESSO (1970), se o óleo é multiviscoso ou monoviscoso. Para o caso deste experimento, onde foi utilizado um lubrificante monoviscoso, para viscosidade do óleo a 40 °C, encontrou-se uma redução de 14,1 e 13,6% para E-1 e E-2 respectivamente, onde pode-se dizer que a redução de viscosidade foi praticamente a mesma. Para o caso da viscosidade do lubrificante usado a 100 °C do E-1 (Tabela 15.2), houve uma redução, quando comparado com o tempo zero (Tabela 15.1) inferior a 10%.

Para o caso dos índices de sulfatação, nitratação e oxidação, não foram encontradas referências indicando valores limites para estes, mas o fato do E-2 apresentar valores maiores para os três casos, pode-se dizer que o segundo ensaio pode ter sido mais rigoroso, isto é, ofereceu maior esforço ao motor, em relação ao primeiro, mesmo quando desempenhado o mesmo trabalho a campo (enxada rotativa), pois embora os dois experimentos tenham sido realizados em solos similares, aconteceram em locais diferentes, onde o segundo ensaio (E-2) ocorreu em área com maior inclinação e em período mais seco, este maior desgaste também pode ser visualizado na tabela 15.3. O caso do glicol, este é um aditivo anti-congelante adicionado ao lubrificante e utilizado também em aditivos do líquido de arrefecimento; é medido para verificar se existe contaminação com líquido de arrefecimento, se neste houver o aditivo, o que não é o caso deste experimento.

A tabela 15.3 mostra a quantificação dos elementos avaliados para o óleo lubrificante, onde segundo as referências citadas, um dos dados mais preocupantes é com relação aos teores de ferro (Fe), estanho (Sn), cobre (Cu) e alumínio (Al) o qual se apresentam elevados para ambos os ensaios. Segundo Snook (1968), Asseff (1975) e ESSO (1970), os elementos ferro, estanho e cobre, são advindos do desgaste do motor, e parte do

conteúdo de alumínio pode ser advindo de contaminação por impurezas do ar de admissão. Como comentado anteriormente o segundo ensaio (E-2), apresentou níveis maiores de contaminação para todos os elementos, devido basicamente as condições de trabalho, que no caso do E-2 foram mais severas, principalmente com relação a admissão de material suspenso no ar, onde ao final das 50 h, o filtro de ar teve que ser substituído.

TABELA 15.3. Elementos avaliados para o óleo lubrificante no tempo 50 h nos ensaios E-1 e E-2

Elementos avaliados (mg kg <sup>-1</sup> )	E-1	E-2	Limites de traços de elementos em óleos de cárter			Origem do contaminante
			Snook (1968)	Asseff (1975)	ESSO (1970)	
Cálcio (Ca)	1567	1648	-	-	-	C <sup>1</sup>
Magnésio (Mg)	0	17	-	-	-	C
Fósforo (P)	490	502	-	-	-	C
Boro (B)	2	6	20	-	10	C, A <sup>2</sup>
Potássio (K)	0	31	50	-	-	C, A
Sódio (Na)	2	8	-	-	-	C, A
Silício (Si)	23	37	20	16,2	25	Ar <sup>3</sup>
Cromo (Cr)	3	15	40	6,4	25	M, A
Chumbo (Pb)	88	95	100	-	200	M, C
Alumínio (Al)	20	70	40	17,3	10	M, Ar
Molibdênio (Mo)	36	45	-	-	-	M <sup>4</sup>
Zinco (Zn)	532	600	-	-	10	M
Cobre (Cu)	26	58	40	19,2	60	M
Ferro (Fe)	286	565	100	69,5	200	M
Níquel (Ni)	0	0	-	-	-	M
Prata (Ag)	0	0	6	-	5	M
Estanho (Sn)	8	9	-	1,0	-	M
Titânio (Ti)	1	2	-	-	-	M
Vanádio (V)	0	0	-	-	-	M
Bário (Ba)	0	0	-	-	-	M

1 - C. Contaminante advindo do combustível

2 - A. Contaminante advindo da água de arrefecimento

3 - Ar. Contaminante advindo de impurezas do ar de admissão

4 - M. Contaminante advindo de desgaste de componentes do motor

De acordo com dados da tabela 15.3, a contaminação por silício (Si), que é advindo da poeira (solo) admitido junto com o ar atmosférico e passou pelo filtro de ar, é 60,8% maior para o caso do E-2, quando comparado com E-1. Neste caso as partículas de

solo, que basicamente são compostas por silício e alumínio, atuam como abrasivo, causando desgaste dos componentes móveis do motor (M), onde na tabela 15.3 inclui do cromo até o bário.

Para os demais elementos, não se pode atribuir somente a contaminação por óleo vegetal combustível, pois segundo Sági et al. (2008), elementos como enxofre (S), cálcio (Ca), fósforo (P), zinco (Zn) e molibdênio (Mo), podem estar presentes no lubrificante fazendo parte da composição de aditivos que desempenham diversas funções dentro do motor, e como a análise do óleo lubrificante no tempo zero (Tabela 15.1) não foi levantado as quantidades destes elementos, não se sabe a origem certa destes. Porém como existe diferença na quantidade dos mesmos entre os ensaios pode-se dizer que existe influência da contaminação por óleo combustível, principalmente com relação aos elementos fósforo (P), sódio (Na), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), os quais foram identificados na análise do óleo vegetal combustível. Destes elementos citados como provável procedência do óleo vegetal combustível, dois chamam a atenção, o potássio (K) e o magnésio (Mg), pois na análise do E-1, não foram identificados traços do mesmo e no E-2, no qual o óleo foi aquecido para entrar no sistema de injeção, foram identificados. Com isso pode-se dizer que estes dois metais alcalinos, com certeza são provenientes do óleo combustível, embora não se sabe ao certo, mas acredita-se que estes apareceram devido a melhor queima do combustível, o qual pode ter-los mineralizado na câmara de combustão, favorecendo a passagem destes para o cárter, onde no caso do E-1, estes poderiam ter sido expelidos com os resíduos de escape dos gases ou ficarem aderidos junto com a carbonização.

Outro ponto importante é que o motor, em seu projeto original, não possui filtro de óleo lubrificante, permitindo que impurezas, como resíduos metálicos do desgaste de ajuste das partes móveis, fiquem circulando pelo sistema de lubrificação do

motor, prejudicando-o. Este fator pode ter sido decisivo na formação dos elevados desgastes demonstrados tanto nos dados da tabela 15.3, quanto o visualizado nas bronzinas de biela, colo de biela da árvore de manivelas e bomba de óleo, pois como comentado esse motor não possui proteção contra estes eventos.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mesmo com a existência de problemas no funcionamento dos motores, principalmente quando utilizados os óleos vegetais, o cenário da matriz energética mundial tende a tomar este rumo, devido aos aumentos do preço, as projeções de esgotamento ou inviabilidade de extração do petróleo e problemas ambientais causados pela queima deste. Sendo assim até o surgimento de novas soluções o caminho do óleo vegetal torna-se um dos mais promissores.

Contudo muito há de ser estudado para que a utilização de óleos vegetais combustíveis possa ser recomendada, o que se desenha praticamente são estudos de caso, onde a combinação de diferentes matérias primas e processos resultam em uma infinidade de óleos combustíveis. Somando-se a isso, alterações no projeto dos motores ciclo Diesel devem ser consideradas.

Outro fator relevante, e o que pode realmente viabilizar este tipo de combustível renovável, é com relação às fontes de extração ou matéria-prima que dará origem a estes combustíveis, pois existe uma grande quantidade de plantas consideradas oleaginosas, mas que têm sido pouco estudadas com relação a viabilidade como combustível, isto é, com relação as características físico-químicas e seu balanço energético. Não se pode esquecer também das pesquisas com relação ao aumento de rendimento, produção em grande escala e na diminuição da dependência de insumos advindos do petróleo.

## 7. CONCLUSÃO

Conclui-se que os problemas encontrados no motor, foram inferiores aos problemas indicados pela literatura, com o óleo de girassol como combustível para o caso dos dois ensaios.

O ensaio com pré-aquecimento do óleo vegetal combustível mostrou-se melhor quando comparado com o ensaio sem aquecimento.

Houve contaminação do lubrificante por óleo vegetal combustível para os dois casos; para o caso do E-2 houve também contaminação por potássio (K) e magnésio (Mg) advindos do combustível.

Ainda não se pode recomendar a utilização do óleo de girassol com as especificações de extração e processamento realizado, pois o número de horas de funcionamento é pequeno perto do número de horas que um motor pode funcionar com petrodiesel.

## 8. REFERÊNCIAS

ASSEFF, P.A. The lubizol corporation ESSO: Analisis de aceite usaso - SU significado. **Instituto Americano del Petróleo Chicago**, Illinois, v. 16, 1975.

BETTIS, B.L.; PETERSON, C.L.; AULD, D.L. *et al.* Fuel characteristics of vegetable oil from oilseed crops in the Pacific Northwest. **Agronomy Journal**, v. 74, n. 2, p. 335-339, 1982.

BRASIL. Agencia Nacional do Petróleo, **Portaria ANP N. 80 de 30.04.99**, Anexo 1: Regulamento técnico ANP N. 3/99. 1999.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balço energético Nacional 2005**. Disponível em: <[http://www.greenpeace.org.br/energia/pdf/dossie\\_energia\\_2004.pdf?PHPSESSID](http://www.greenpeace.org.br/energia/pdf/dossie_energia_2004.pdf?PHPSESSID)>. Acesso em: 25 set. 2006.

BOBBIO, P.A.; BOBBIO, F.O. **Introdução a química de alimentos**. Campinas, Fundação Cargill, p. 306, 1985.

BOBBIO, P.A.; BOBBIO, F.O. **Química do processamento de alimentos**. Campinas, Fundação Cargill, p. 232, 1992.

CASTRO, C; MOREIRA, A.; OLIVEIRA, R.F. *et al.* Boro e estresse hídrico na produção de girassol. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 30, n. 2, p. 214-220, mar./abr., 2006.

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

CHURIN, E., DELMON, B. What can we do with pyrolysis oils? In: Ferrer, G.L., Maniatis, K., Buekens, A. Bridgwater, A.V. (Eds), **Pyrolysis and Gasification**. Elsevier Applied Science, London, p. 326-333. 1989.

DER ELSBETT-MOTOR. Sonderdruck aus "MTZ" motortechnische zeitschrift. **Franck h'sche Verlagshandlung Stuttgart**. jahrgang 17, heft 9, September, 1956.

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., p. 185, 1995.

DUNN, R.O. Outros combustíveis diesel alternativos 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.10, p. 269-293, 2006.

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

ESSO. Boletim de informações técnicas: Limites de uso; Avaliação dos óleos de cárter. **ESSO Brasileira de petróleo S.A**, v. 1, p. 42, 1970.

FREIRE, R.M.M.; SOUSA, R.L.; SALDANHA, L. *et al.* Avaliação da qualidade do óleo de mamona de diferentes genótipos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA, 2., 2006, Sergipe. **Anais...** Sergipe: 2006. Disponível em: <[http://www.cnpa.embrapa.br/produutos/mamona/publicacoes/trabalhos\\_cbm2/index.html](http://www.cnpa.embrapa.br/produutos/mamona/publicacoes/trabalhos_cbm2/index.html)>. Acesso em: 07 ago. 2007.

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.

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.

GIMENEZ, L.M. **Diagnóstico da mecanização em uma região produtora de grãos**. Piracicaba, Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de São Paulo – USP, p. 109, 2006.

GOODRUM, J.W.; PATEL, V.C.; MCCLENDON, R.W. Diesel injector carbonization by three alternative fuels. **Transactions of the ASAE** v. 39, n. 3, p. 817-821, 1996.

HANCSÓK, J.; KOVÁCS, F.; KRÁR, M. Production of vegetable oil fatty acid methyl esters from used frying oil by combined acid/alkali transesterification. **Petroleum & Coal**, v. 46, n. 3, p. 36-44, 2004.

HANDBOOK OF CHEMISTRY AND PHYSICS. **A ready reference book of chemical and physical data**. CRC Press, inc, Boca Raton, Florida, 70 ed, 1989 – 1990.

INOUE, G.H.; LACERDA FILHO, A.F.; VIEIRA, L.B.; RESENDE, R.C. Variação da viscosidade cinemática de óleos vegetais bruto em função da temperatura. IN: II Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras e Biodiesel, **Anais...** Varginha – MG 2005.

JAKUBASZKO, R. Biodiesel: faça você mesmo, e use. **DBO Agrotecnologia**, v. 3, n. 8, 2006.

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, 2006.

LEHNINGER, A.L.; NELSON, D.L.; COX, M.M. **Princípios de bioquímica**. São Paulo. Editora Savier, 1995.

LOPES, A.; CAMARA, F. T. da; DABDOUB, M. J. *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.

MARCOS FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. Piracicaba: Fealq, p. 495, 2005.

MAZIERO, J.V.G; CORRÊA, I.M.; ÚNGARO, M.R.; BERNARD, J.A.; STORINO, M. Desempenho de um motor diesel com óleo bruto de girassol. **R. Bras. Agrociência**, Pelotas, v. 13, n. 2, p. 249-255, 2007.

McKENNDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresources Technology**, v. 83, p. 37-46, 2002.

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

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.

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

PETCU, E.; ARSINTESCU, A.; STANCIU, D. The effect of drought stress on fatty acid composition in some Romanian sunflower hybrids. **Romanian Agricultural Research**, n. 15, p. 39-43, 2001.

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

PIGHINELLI, A.L.M.T.; PARK, K.J.; RAUEN, A.M. *et al.* Rendimento da transesterificação de óleo de girassol. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA (CONBEA), 35., 2006, João Pessoa - Pb. **Anais...** João Pessoa - Pb: Unesp, 2006. CD-ROM.

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

PORTE, F.A. Biodiesel de girassol em microtratores monocilíndricos: emissões, consumo específico e conseqüências de seu uso para o motor. **Dissertação** (Mestrado). Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), 2008.

PUTUN, A.E. Biomass to bio-oil via fast pyrolysis of cotton straw and stalk. **Energy Sources**, v. 24, p. 275-285, 2002.

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](http://www.universia.com.br/html/materia/materia_chjj.html)>. Acesso em: 12 out. 2006.

RAVEN, P.H.; EVERT, R.F.; EICHHORN, S.E. **Biologia Vegetal**. 6ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, p. 906, 2001.

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

SÁGI, R.; MISKOLCZI, N.; BARTHA, L.; HALMOS, P. Elemental analysis of engine oils using energy dispersive x-ray fluorescence spectroscopy (EDXRF) and inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES). **Petroleum & Coal**, v. 50, n. 1, p. 1-10, 2008.

SEVERINO, L.S.; MILANI, M.; MORAES, C.R.A. et al. Avaliação da produtividade e teor de óleo de dez genótipos de mamoneira cultivados em altitude inferior a 300 m. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 37, n. 2, p.188-194, 2006.

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, p. 1329-1335, 2007.

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.

SNOOK, W.A. Uma publicação técnica dedicada a escolha e uso de lubrificantes: Análises de óleos usados de motores. **Texaco Brasil S.A. Lubrificação**, SP., v. 54, n. 9, 1968.

SOARES, G. F. W.; VIEIRA, L. S. R.; NASCIMENTO, M. V. G. Operação de um grupo gerador diesel utilizando óleo vegetal bruto como combustível. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3. **Proceedings...** Campinas – SP. 2000.

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

TEIXEIRA, L.C. Produção de biodiesel. **Informe agropecuário EPAMIG**: Produção de oleaginosas para o biodiesel, Belo Horizonte, v. 26, n. 229, p. 79-86, 2005a.

TEIXEIRA, L.C.. Potencialidades de oleaginosas para produção de biodiesel. **Informe agropecuário EPAMIG**: Produção de oleaginosas para o biodiesel, Belo Horizonte, v. 26, n. 229, p. 18-27, 2005b.

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).

TOMANIK, E. Modelamento do desgaste por deslizamento em anéis de pistão de motores de combustão interna. **Tese** (Doutorado). Universidade de São Paulo (USP), 2000.

VEDANA, M.A.S. **Nem todos gostaram do resultado do leilão de biodiesel**. Revista eletrônica BiodieselBR.com. disponível em: <[HTTP://www.biodieselbr.com](http://www.biodieselbr.com)> Acesso: 17 abril, 2008.

WENDT, V.; BÜLL, L.T.; CORRÊA, J.C. *et al.* Produção de girassol em dois sistemas de semeadura em função da adubação verde de inverno associada a doses de NPK. **Acta Scientia Agronomica**, Maringá, v. 27, n. 4, p. 617-621, 2005.