

ALEXON DO PRADO CONDE

**DESEMPENHO DE MOTOR CICLO DIESEL
ALIMENTADO COM BIODIESEL DE ÓLEO DE SOJA E OLIVA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Máquinas e Automação Agrícola, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Dr. Carlos Eduardo Silva Volpato

LAVRAS

MINAS GERAIS – BRASIL

2007

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Conde, Alexon do Prado.

Desempenho de motor ciclo diesel alimentado com biodiesel de óleo de soja e
oliva / Alexon do Prado Conde. – Lavras : UFLA, 2007.

66 p. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2007.

Orientador: Carlos Eduardo Silva Volpato.

Bibliografia.

1. Motor diesel. 2. Combustível. 3. Biodiesel. 4. Óleo de soja. 5. Óleo de oliva.
I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 621.436

ALEXON DO PRADO CONDE

**DESEMPENHO DE MOTOR CICLO DIESEL
ALIMENTADO COM BIODIESEL DE ÓLEO DE SOJA E OLIVA.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Máquinas e Automação Agrícola, para a obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 27 de julho de 2007

Prof. Dr. Jackson Antônio Barbosa

UFLA

Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva

UFLA

Prof. Dr. Carlos Eduardo Silva Volpato

UFLA

(Orientador)

**LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL**

DEDICATÓRIA

A DEUS, pois a verdadeira “lâmpada para meus pés e luz para o meu caminho é a tua Palavra” (Sl.118-105).

A minha esposa, Tatiana A. Mangiapelo Conde, pelo apoio, carinho, amor e dedicação.

Aos meus pais, José Alamiro Conde e Geralda A. do Prado Conde, pelo apoio, carinho, amor e dedicação.

A minha irmã, Alessandra do Prado Conde, pelo apoio e carinho.

Ao meu grande amigo Paulo Henrique Gontijo de Lima, pelo companheirismo, apoio e dedicação.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo amparo, proteção e pela vitória.

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Departamento de Engenharia, pelo apoio e pela oportunidade de realizar o mestrado.

Aos professores Dr. Carlos Eduardo Silva Volpato, Dr. Fábio Moreira da Silva, Dr. Pedro Castro Neto e Dr. Nilson Salvador, pela orientação, amizade e valiosos ensinamentos.

Aos professores Dr. Jackson Antônio Barbosa, Dr. Tomás de Aquino Ferreira e Dr. Alberto Colombo, pela amizade e valiosos ensinamentos.

Aos professores Dr. Roberto Alves Braga Júnior e Dr. Giovanni Rabelo, pela amizade e valiosos ensinamentos na área de automação, eletricidade e eletrônica.

Ao professor Dr. Antônio Moreira, da Escola de Engenharia de São Carlos-USP, pela gentileza nas análises dos combustíveis utilizados.

Ao engenheiro Tiago Brito de Almeida, pela gentileza nas análises do poder calorífico dos combustíveis utilizados.

Ao professor Dr. Alexandre Simões, da Faculdade de Engenharia de Varginha, que gentilmente cedeu o laboratório de química para as análises dos combustíveis utilizados.

Aos senhores Joadilson Barra e Hugo Castro, que gentilmente cederam as instalações da usina de Biodiesel de Varginha, enquanto a administração era municipal, para a fabricação do B100 de soja.

Ao químico Jean Roger Guimarães, pela amizade, apoio e gentileza em fabricar e pelas análises físico-químicas dos combustíveis utilizados.

À Ambra Energética e Ambiental Ltda., que forneceu o combustível B100 de oliva, por meio do professor Dr. Pedro Castro Neto.

Ao meu tio Mateus Massaru Shida, pela amizade e valiosos ensinamentos técnicos.

À secretária da Pós-Graduação, Ana Daniela dos Santos, pela amizade, pela gentileza, pela simpatia e pelos excelentes trabalhos prestados.

Aos amigos Paulo Henrique Gontijo de Lima, Ronald Leite Barbosa e Ezequiel de Oliveira, pelo apoio e agradável convívio.

Aos operadores de máquinas André (Juma), Isidoro, Antônio, Roberto e Adão, pela amizade e auxílio na montagem dos equipamentos.

Aos graduandos Eduardo Oliveira de Moraes, Thiago Castro Vidal dos Santos, Lúcio Fabiano Guimarães e Luiz de Gonzaga Ferreira Júnior, pelo auxílio na condução dos ensaios.

À concessionária Mátia Massey Ferguson, em especial ao Sr. Wagner Gonçalves, gerente de marketing, por disponibilizar o trator MF 275 Compacto, para a realização deste trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

“Quando podes medir sobre o que dizes, expressando-o em números, tu conheces alguma coisa a respeito; mas, quando não podes medi-lo, quando não podes expressá-lo em números, teu grau de conhecimento é fraco e insatisfatório: ele poderá ser o início do conhecimento, mas em tuas idéias, estás com dificuldade em avançar ao estágio de Ciência.”

Lord Kelvin

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	i
ABSTRACT	ii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo geral	3
2.2 Objetivos específicos	3
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
3.1 Motor diesel.....	4
3.1.1 Histórico do motor diesel.....	4
3.1.2 Ciclos de um motor diesel	4
3.2 Combustão	7
3.3 Combustível.....	8
3.3.1 Óleo diesel	9
3.3.2 Biocombustíveis.....	11
3.3.3 Biomassa.....	11
3.3.4 Poder carburante de óleos vegetais.....	11
3.3.5 Biodiesel	16
3.3.6 Obtenção do biodiesel de óleos vegetais	16
3.4 Avaliação de máquinas motoras	18
3.5 Aspectos ambientais na utilização do biodiesel.....	22
3.6 Aspectos econômicos da utilização do biodiesel.....	23
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	24
4.1 Material.....	24
4.1.1 Combustíveis utilizados.....	24
4.1.2 Trator	26

4.1.3 Dinamômetro	27
4.1.4 Medidor de consumo de combustível	28
4.1.5 Tubo de Pitot.....	30
4.2 Métodos	31
4.2.1 Determinação do poder calorífico inferior.....	31
4.2.2 Determinação dos níveis de rotação para ensaio	32
4.2.3 Determinação da potência teórica ou motora – H_t	33
4.2.4 Determinação da potência efetiva – H_e	34
4.2.5 Determinação da potência reduzida – H_r	35
4.2.6 Determinação do torque – τ	35
4.2.7 Determinação do consumo específico de combustível – C_e	35
4.2.8 Determinação do consumo energético de combustível – C_{en}	36
4.2.9 Determinação da eficiência termomecânica – E_{tm}	36
4.2.10 Determinação da eficiência volumétrica – E_v	37
4.3 Delineamento experimental	39
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
5.1 Torque (N.m)	41
5.2 Potência efetiva (kW)	44
5.3 Potência reduzida (kW)	45
5.4 Consumo horário de combustível ($L.h^{-1}$).....	48
5.5 Consumo específico de combustível [$g.(kW.h)^{-1}$].....	49
5.6 Consumo energético ($kJ.h^{-1}$)	51
5.7 Eficiência termomecânica.....	53
5.8 Eficiência volumétrica	55
6 CONCLUSÃO	58
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
ANEXOS	63

RESUMO

CONDE, Alexon do Prado. **Desempenho de motor de ciclo diesel alimentado com biodiesel de óleo de soja e oliva**. 2007. 66 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG*.

Este trabalho foi realizado com o objetivo de testar o desempenho de um motor ciclo diesel utilizando biodiesel de óleo de soja (B100) e oliva (B100), em comparação ao óleo diesel. Foram analisados os parâmetros: potência efetiva e reduzida, torque, consumo específico e energético de combustível, eficiência termomecânica e volumétrica. Foi instalado um ensaio com delineamento inteiramente casualizado (DIC) em esquema fatorial, realizada análise de variância e aplicado teste de Tukey, a 5%. Foram pesquisados cinco níveis de rotação em quatro repetições. Os testes realizados mostraram a viabilidade de operação de um motor ciclo diesel com combustíveis substitutivos, B100 soja e oliva. O trabalho foi realizado nas dependências do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, Minas Gerais, Brasil, em maio de 2007.

* Comitê Orientador: Dr. Carlos Eduardo Silva Volpato (Orientador) – DEG-UFLA; Dr. Nilson Salvador – DEG-UFLA; Dr. Fábio Moreira da Silva – DEG-UFLA; Pedro Castro Neto – DEG-UFLA.

ABSTRACT

CONDE, Alexon do Prado. **The performance of diesel engine fed with biodiesel of soy oil and olive.** 2007. 66 p. Dissertation (Master in Agricultural Engineering) – Federal University of Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brazil.

The objective of this work was to compare the acting of a diesel engine using biodiesel of soy oil (B100) and olive (B100), in comparison with the diesel oil. The parameters were analyzed: effective power and reduced power, rise, specific and energy consumption of fuel, efficiency term-mechanics and volumetric. An experiment was installed entirely with delineate accidentally (DIC) in factorial diagram, accomplished variance analysis and applied test of Tukey at the level of 5%. They were researched five rotation levels in four repetitions. The accomplished tests showed the viability of operation of a motor cycle diesel with fuels substitute, B100 soy and olive. The work was accomplished in the dependences of the Department of Engineering of the Federal University of Lavras (UFLA), in Lavras, Minas Gerais, Brazil, in May of 2007.

* Guidance Committee: Dr. Carlos Eduardo Silva Volpato (Adviser) – DEG-UFLA; Dr. Nilson Salvador – DEG-UFLA; Dr. Fábio Moreira da Silva – DEG-UFLA; Pedro Castro Neto – DEG-UFLA.

1 INTRODUÇÃO

O cenário das emissões atmosféricas mundiais caracterizou-se, nos últimos anos, devido a uma série de fatores técnicos, econômicos e políticos, pela necessidade de redução do consumo dos derivados de petróleo. Nesse contexto, os combustíveis alternativos têm se apresentado como importantes componentes para a redução dos gases que provocam o efeito estufa.

Vinculados às questões ambientais, os altos preços atingidos pelo diesel mineral, aliados à grande queda nos preços da soja, do milho e de outros produtos agrícolas, em alguns estados brasileiros, elevam o custo operacional do produtor rural, dificultando a continuidade do seu negócio. Alguns produtores rurais estão abastecendo seus tratores e máquinas em geral com óleo vegetal *in natura* ou misturado ao diesel mineral, como forma de reduzir custos com combustível. Muitos não conhecem o quanto essa prática prejudica o motor e compromete o bom funcionamento do maquinário, a longo prazo.

A retomada de estudos sobre o uso de óleos vegetais como combustível, apoiada pelo governo federal por meio do Programa Brasileiro de Biocombustíveis, visando reduzir a dependência do país em derivados de petróleo e a emissão de poluentes, foi o principal incentivo para a elaboração deste trabalho.

Biodiesel é um combustível renovável derivado de óleos vegetais, como girassol, mamona, soja, babaçu e demais oleaginosas, ou de gorduras animais, usado em motores de ciclo diesel, em qualquer proporção com o diesel mineral, ou puro. É produzido por meio de processos químicos, normalmente por transesterificação, no qual é removida a glicerina.

Tal como o álcool está para a substituição da gasolina nos motores de ignição por centelha, o biodiesel substitui o diesel nos motores de ignição por compressão, ciclo diesel, com a vantagem de não requerer adaptações

mecânicas. Enquanto o uso de outros combustíveis limpos, como o gás natural ou biogás e o álcool etílico, requer adaptação, a combustão de biodiesel pode dispensá-la, configurando-se em uma alternativa técnica capaz de atender a toda a frota já existente movida a óleo diesel, além de apresentar alto rendimento energético.

Quando se fala em biodiesel, existem dois tipos de posicionamento diante da questão. Primeiro há a facção dos ponderados, que acredita pouco no assunto e avalia o setor numa posição ainda de início, sem grandes repercussões para qualquer tipo de negócio. Mais a frente, existem aqueles que já participam desse mercado e convivem com a grandeza e a potencialidade do setor. Esses são os responsáveis pelo crescimento e o desenvolvimento do biodiesel no Brasil.

Em outubro de 2005, haviam sido anunciados cinco projetos de implantação de usinas para a produção de biodiesel. Em abril de 2006, esse número chegou a quase 40 unidades. Em pouco mais de seis meses, a força econômica desse biocombustível já está clara e a oportunidades de negócio também.

Este trabalho vem solidificar a idéia de que o biodiesel apresenta excelente desempenho em motores e é de grande importância para o país. Desse modo, rebate algumas reportagens veiculadas em jornais e revistas de grande influência no cenário nacional, que trazem posições equivocadas com relação ao seu uso, distorcendo e confundindo a opinião pública acerca dos benefícios desse combustível alternativo e, principalmente, colocando em “xeque” o desempenho e o comportamento dos motores.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho foi realizado com o objetivo geral de avaliar o desempenho de um motor ciclo diesel sem alteração mecânica, utilizando como combustível o biodiesel de rota metilíca do óleo de soja (B100) e de oliva (B100) em substituição ao óleo diesel.

2.2 Objetivos específicos

Especificamente, buscou-se:

- avaliar a potência equivalente do motor na TDP ao utilizar diesel e o biodiesel de soja e de oliva (B100);
- avaliar o torque equivalente do motor na TDP ao utilizar diesel e o biodiesel de soja e de oliva (B100);
- avaliar o consumo energético do motor ao utilizar diesel e o biodiesel de soja e de oliva (B100);
- avaliar as eficiências termomecânica e volumétrica do motor ao utilizar diesel e biodiesel de soja e de oliva (B100);
- a caracterização físico-química dos combustíveis.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Motor diesel

3.1.1 Histórico do motor diesel

Desde os tempos de universitário, no final do século XIX, em Munique, Alemanha, Rudolf Diesel tinha o sonho de construir um motor que utilizasse totalmente a energia do combustível. Depois de desenvolver vários projetos e adquirir experiência com eles, Diesel conseguiu patentear sua idéia em 22 de fevereiro de 1893, após correções e ajustes. O motor foi oficialmente apresentado ao mercado em 1898, com 10 cv de potência. Rapidamente, o motor ficou conhecido e começou a ser fabricado em toda a Alemanha, tendo as primeiras aplicações sido feitas em empresas geradoras de energia. Uma das primeiras empresas a produzir motores Diesel foi a Benz & Cia (Carvalho, 2000).

3.1.2 Ciclos de um motor diesel

Nos motores diesel, a descida do pistão não aspira mistura combustível; somente ar puro entra no cilindro (Figura 1) e, quando o pistão se desloca para cima, apenas esse ar sofre compressão. A compressão interna no cilindro atinge um grau muito mais elevado que nos motores a gasolina - suas taxas de compressão vão de 14:1 a 25:1. Em consequência, a temperatura do ar comprimido eleva-se consideravelmente, chegando a ultrapassar os 700°C. À medida que o pistão se aproxima do limite máximo de seu curso, um fino jato de combustível é impulsionado para o interior do cilindro. Devido à alta compressão, o ar fica tão quente que, ao receber o combustível, faz com que ele entre em combustão espontânea, dispensando a presença da vela de ignição (ou ignição eletrônica).

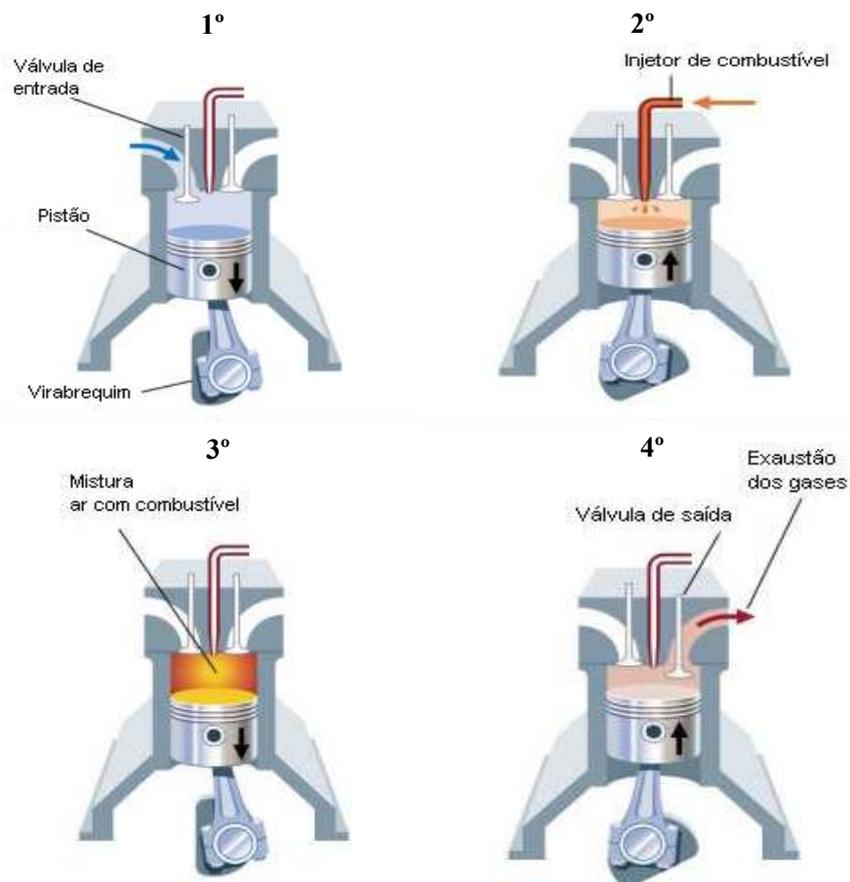


FIGURA 1 Demonstração dos tempos do ciclo diesel.

Fonte: Os segredos do diesel (2006).

Como, no motor diesel, o volume de ar aspirado para o interior do cilindro é sempre o mesmo, a velocidade da máquina é controlada apenas pela quantidade de combustível fornecida pelo injetor. O motor diesel permite adaptações para funcionar com praticamente qualquer tipo de combustível, desde os óleos vegetais, até o gás natural e a gasolina de alta

octanagem; porém, o mais comum e adequado é o óleo diesel destilado do óleo mineral cru (Carros..., 2006).

Antares & Blanca (1980) descreve os processos, que se denominam tempo do motor, da seguinte forma:

1º admissão: estando a válvula de admissão aberta, o pistão desloca do Ponto Morto Superior (PMS) até o Ponto Morto Inferior (PMI), fazendo com que o pistão admita ar pela sucção, até a chegada ao PMI. É dada a primeira meia volta do ciclo na árvore virabrequim.

2º compressão: a válvula de admissão por onde entra o ar, se fecha. O pistão sobe do PMI ao PMS. Como o ar não pode sair pelos orifícios fechados, é comprimido até subir o pistão ao PMS, alcançando uma pressão de 3,43 a 3,92 MPa e uma temperatura de 500°C a 700°C. A árvore virabrequim completa a segunda meia volta do ciclo.

3º expansão (trabalho): ao finalizar a compressão do ar, o bico injetor introduz uma pequena quantidade de diesel, finamente pulverizado que, ao entrar em contato com o ar em alta temperatura, se inflama, produzindo a combustão do mesmo. Devido a essa combustão, a temperatura dos gases se eleva entre 1.500°C a 2.000°C, produzindo um aumento de pressão até chegar aos 5,88 a 7,85 MPa. Ao exercer-se esta pressão sobre a cabeça do pistão, este é empurrado para baixo até o PMI, efetuando o percurso de trabalho. Este é o único tempo em que a árvore virabrequim recebe impulso. A árvore virabrequim completa a terceira meia volta.

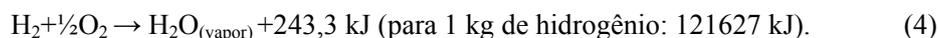
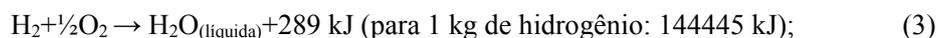
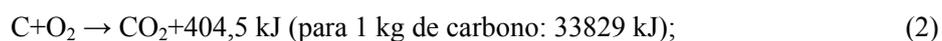
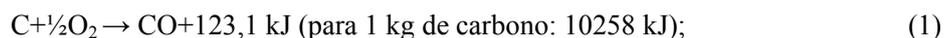
4º escape: finalizado o percurso de trabalho, o cilindro se encontra cheio gases queimados provenientes da combustão, sendo necessário expulsá-los para deixar limpo o cilindro para que possa repetir o ciclo. Para isso, se abre a

válvula de escape e o pistão é empurrado pela árvore virabrequim para cima, expulsando os gases queimados ao exterior. Ao chegar ao PMS se fecha a válvula de escape, se abre a válvula de admissão e volta-se a repetir o ciclo. A árvore virabrequim completa a quarta meia volta do ciclo.

3.2 Combustão

Combustão é o processo químico que ocorre entre as substâncias conhecidas com o nome de combustível (madeira, carvão, petróleo, gás pobre, metano, etc.) e oxigênio do ar (comburente). Já que esse processo é fortemente exotérmico, obtém-se, com efeito, uma notável produção de calor, a qual é normalmente acompanhada pelo fenômeno luminoso da chama que é característico de cada combustão viva. Existem também combustões denominadas lentas, que ocorrem com pequena produção de calor e sem manifestações luminosas. A luminosidade de uma chama depende das partículas sólidas, geralmente de carbono, que se separam com o calor e se tornam incandescentes (Massola et al., 1976).

Os dois elementos úteis de um combustível são o carbono (C) e o hidrogênio (H₂), os quais podem queimar segundo a seguinte reação:



A Reação 1 exprime uma combustão incompleta, porque o carbono não chega ao máximo de oxidação e, portanto, não desenvolve toda a energia que se desenvolve na Reação 2, que representa uma combustão completa. A Reação 3, na qual se considera a água produzida no estado líquido, fornece o denominado poder calorífico superior (o qual se determina com os calorímetros), enquanto a

Reação 4, na qual a água produzida está no estado de vapor, nos dá o poder calorífico inferior (Massola et al., 1976).

Define-se poder calorífico de um combustível como o calor desenvolvido por este durante a combustão. O poder calorífico pode ser superior ou inferior, dependendo de que a água, proveniente da combustão, esteja no estado líquido ou de vapor. Na prática, tem um maior interesse o poder calorífico inferior, já que os produtos da combustão abandonam os aparelhos ainda quentes e, portanto, com a água em estado de vapor (Massola et al., 1976).

3.3 Combustível

Substância capaz de combinar-se com o oxigênio do ar, comburente¹, desenvolvendo calor. Para serem usados como fonte calorífica na indústria, nos transportes, no uso residencial, os combustíveis ideais devem possuir os seguintes requisitos gerais (Massola et al., 1976):

- 1) devem ser disponíveis em abundância e a bom preço;
- 2) devem queimar com facilidade e deixar após a combustão, pouca cinza;
- 3) não devem gerar produtos de combustão que sejam danosos às pessoas, aos fornos e às caldeiras ou a outras partes metálicas das máquinas;
- 4) devem ter elevado poder calorífico.

Os combustíveis são constituídos, geralmente, de carbono livre (os carvões), de carbono e hidrogênio, ou seja, de hidrocarbonetos (o petróleo) e de carbono, hidrogênio, oxigênio (os álcoois, os óleos vegetais, a madeira). Eles,

¹ Comburente: termo com que se indica uma substância ou uma mistura de substância normalmente no estado gasoso, que tenha a propriedade de fornecer a um combustível o oxigênio necessário à sua combustão (Comburente, 1976).

dependendo da sua origem e do seu estado físico, são divididos em três grupos fundamentais: sólidos, líquidos, gasosos.

Os combustíveis sólidos são representados fundamentalmente pela madeira e pelos carvões (carvão de madeira e pelo carvão fóssil e coque). Os combustíveis líquidos oferecem, sobre os sólidos, notáveis vantagens ao uso automotivo: são menos volumosos, não produzem cinza, possuem poder calorífico mais elevado e, especialmente, permitindo o início e a interrupção da combustão mais rapidamente. Os combustíveis gasosos possuem a grande vantagem de poderem ser fácil e rapidamente acesos e apagados; queimam com regularidade e não produzem fumaça e nem cinza (Massola et al., 1976).

Combustível nuclear são todos os materiais que contenham núcleos físseis, ou seja, tais que introduzidos no núcleo do reator nuclear, possam alimentar uma reação em cadeia controlada (Massola et al., 1976).

3.3.1 Óleo diesel

Segundo a Atlantic (1990), citado por Reis et al. (1999), denomina-se óleo diesel uma fração do petróleo que destila 85% do volume numa temperatura máxima de 370°C, compreendendo hidrocarbonetos de cerca de 12 a 20 átomos de carbono. As principais características do óleo diesel são: índice de cetano (IC), ponto de névoa, viscosidade, impurezas e teor de enxofre.

O índice de cetano expressa a maior ou menor facilidade do óleo diesel entrar em ignição. Quanto mais alto o IC, mais fácil será a ignição do óleo diesel, facilitando a partida do motor e proporcionando um aquecimento mais rápido deste.

A determinação do índice de cetano do óleo diesel é feita de maneira análoga à determinação do índice de octano na gasolina. A queima do óleo diesel em teste é comparada com a queima de uma mistura de cetano (IC = 100)

e α -metil-naftaleno (IC = 0) num motor especial. O óleo diesel comercializado pela Petrobrás Distribuidora tem índice de centano 42 (Goux, 2005).

O ponto de névoa é a temperatura na qual as substâncias sólidas presentes no combustível começam a cristalizar-se, formando uma mistura não homogênea, influenciando na partida do motor em situações de baixa temperatura ambiente. Assim, nos meses de inverno, são produzidos óleos com ponto de névoa mais baixos, 9°C para a região Sul do país e, nos meses de verão, ponto de névoa mais alto, em torno de 17°C, também para a região Sul (Petrobrás, 2007).

A viscosidade do óleo diesel deve ser tal que garanta um bom funcionamento do sistema de injeção dos motores. Uma viscosidade muito alta pode gerar pressões demasiadamente elevadas no sistema de injeção de combustível, além de produzir gotículas muito grandes nos bicos injetores, dificultando a queima. Por outro lado, viscosidades muito baixas não lubrificam esse sistema de forma adequada, causando desgastes.

O teor de impurezas (água, sedimentos e cinzas) e o teor de enxofre devem ser mantidos os mais baixos possível, pois índices altos causam desgaste prematuro de todo o sistema de injeção de combustível. No caso do enxofre, além de sua corrosividade, há, durante a combustão, a formação de óxidos de enxofre, que são compostos altamente poluentes; quando em contato com a umidade do ar, podem dar origem ao ácido sulfúrico que compõem as chamadas chuvas ácidas. O enxofre presente no óleo diesel contribui também para o desgaste mais acelerado do motor e para a contaminação do óleo lubrificante. O teor de água e de sedimentos no óleo diesel deve ser inferior a 0,05% em volume, e o teor de cinzas não deve ultrapassar a 0,02% em massa. Quanto ao enxofre, deve se limitar a 1,0% em massa² (Goux, 2005).

² Por razões ambientais, o óleo diesel metropolitano, comercializado nas principais capitais do país apresenta teor de enxofre máximo de 0,05% em massa. (Fonte: Óleo diesel, 2007).

3.3.2 Biocombustíveis

Conforme Lei nº. 9478/97, biocombustível é o combustível derivado de biomassa renovável, para uso em motores a combustão interna ou, conforme regulamento, para outro tipo de geração de energia, que possa substituir, parcial ou totalmente, combustíveis de origem fóssil.

3.3.3 Biomassa

Fonte de energia não poluente, a biomassa nada mais é do que a matéria orgânica, de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada na produção de energia. Na matriz energética brasileira, sua participação responde por um quarto da energia consumida. Assim, todos os organismos biológicos que podem ser aproveitados como fontes de energia, são chamados de biomassa, como a cana-de-açúcar, o eucalipto e a beterraba dos quais se extrai álcool; o biogás produzido pela biodegradação anaeróbica existente no lixo e dejetos orgânicos; a lenha e o carvão vegetal e alguns óleos vegetais, tais como amendoim, soja, dendê, etc. (Bubu, 2007).

3.3.4 Poder carburante de óleos vegetais

A produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel, a partir de óleos vegetais brutos, tem sido alvo de diversos estudos nas últimas décadas. No Brasil, a instituição do Programa Nacional de Óleos Vegetais (OVEG, 1985) permitiu a realização de testes com óleos vegetais de composição química e grau de insaturação variados, cujas características físico-químicas encontram-se parcialmente apresentadas na Tabela 1. Os principais óleos testados nesta investigação foram os derivados de macaúba, pinhão-manso, indaiá, buriti, pequi, mamona, soja, babaçu, cotieira, tinguí e pupunha.

TABELA 1 Especificações de alguns óleos vegetais *in natura* e do óleo diesel segundo Costa Neto (2000).

Características	Tipo de óleo					Óleo
	mamona	babaçu	dendê	soja	pequi	diesel
Poder calorífico (kcal.kg ⁻¹)	8913	9049	8946	9421	9330	10950
Ponto de névoa (°C)	10	26	31	13	26	0
Índice de cetano	nd	38	38-40	36-39	38	40
Massa específica a 25°C (g.cm ⁻³)	0,9578	0,9153	0,9118	nd	0,9102	0,8497
Viscosidade a 37,8°C (cSt)	285	30,3	36,8	36,8	47,0	2,0-4,3
Destilação a 90% (°C)	nd	349	359	370	nd	338
Teor de cinzas (%)	nd	0,03	0,01	nd	0,01	0,014
Cor (ASTM)	1,0	0,5	1,0	nd	2,0	2,0
Resíduo de carbono						
Conradson sobre 10% do resíduo seco (%)	nd	0,28	0,54	0,54	nd	0,35

A avaliação da qualidade carburante de óleos vegetais requer a determinação analítica de, principalmente, seu poder calorífico, índice de cetano, curva de destilação, viscosidade e ponto de névoa. Do poder calorífico do biocombustível depende a potência máxima a ser atingida pelo motor em operação, enquanto o índice de cetano define o poder de auto-inflamação e combustão do óleo. O valor do índice de cetano condiciona o desempenho global do motor, refletindo na partida a frio, ruído e gradiente de pressão. Comparados ao óleo diesel, os óleos vegetais apresentam menor calor de

combustão e índice de cetano similar, ao redor de 40, conforme Tabela 1 (Costa Neto, 2000).

A viscosidade, que é a medida da resistência interna ao escoamento de um líquido, constitui outra propriedade intrínseca dos óleos vegetais. É de considerável influência no mecanismo de pulverização do jato de combustível, ou seja, no funcionamento do sistema de injeção. Essa propriedade também reflete no processo de combustão e sua eficiência afetará a potência máxima desenvolvida pelo motor. Em relação ao diesel convencional, os óleos vegetais apresentam valores de viscosidade bastante elevados, podendo excedê-lo em até 100 vezes, como no caso do óleo de mamona (Costa Neto, 2000).

O ponto de névoa, que corresponde à temperatura inicial de cristalização do óleo, influencia negativamente o sistema de alimentação do motor, bem como o filtro de combustível, sobretudo quando o motor é acionado sob condições de baixas temperaturas. Esta é, portanto, uma propriedade que desfavorece o uso de óleos vegetais *in natura* em motores do ciclo diesel, particularmente em regiões de clima temperado, pois todos os óleos vegetais até hoje investigados apresentam ponto de névoa superior ao do óleo diesel convencional (Tabela 1). Para evitar os efeitos da solidificação parcial de óleos brutos, deve-se realizar o seu pré-aquecimento, que pode ser efetuado com a própria água de arrefecimento do motor. Alternativamente, a utilização de aditivos apropriados no óleo vegetal pode conferir-lhe maior fluidez, diminuindo o ponto de névoa e favorecendo o comportamento físico-químico do biocombustível resultante (Costa Neto, 2000).

Segundo Costa Neto (2000), os óleos combustíveis derivados do petróleo são estáveis à temperatura de destilação, mesmo na presença de excesso de oxigênio. Ao contrário, nos óleos vegetais que contêm triacilgliceróis de estrutura predominantemente insaturada, reações de oxidação podem ser observadas até a temperatura ambiente. O aquecimento a temperaturas próximas

a 250°C ocasiona reações complementares de decomposição térmica, cujos resultados podem, inclusive, levar à formação de compostos poliméricos mediante reações de condensação. A presença de compostos poliméricos aumenta a temperatura de destilação e o nível de fumaça do motor, diminui a viscosidade do óleo lubrificante e acarreta diminuição da potência pela queima incompleta de produtos secundários. Tal comportamento não é observado com derivados metanolizados ou etanolizados (biodiesel), cuja mistura é destilada integralmente, a temperaturas inferiores a 350°C (Tabela 2).

TABELA 2 Características físico-químicas do biodiesel (ésteres etílicos) de várias espécies vegetais e do óleo diesel convencional (tipo C).

Características	Origem do biodiesel					Óleos diesel*
	mamona	babaçu	dendê	algodão	pequi	
Poder calorífico (kJ.kg ⁻¹)	37874	39523	39900	39858	40151	45318
Ponto de névoa (°C)	-6	-6	6	nd	8	1
Índice de cetano	nd	65	nd	57,5	60	45,8
Densidade a 20°C (g. cm ⁻³)	0,9190	0,8865	0,8597	0,8750	0,8650	0,8497
Viscosidade a 37,8° (cSt)	21,6	3,9	6,4	6,0	5,2	3,04
Inflamabilidade (°C)	208	nd	nd	184	186	55
Ponto de fluidez (°C)	-30	nd	nd	-3	5	nd
Destilação a 50% (°C)	301	291	333	340	334	278
Destilação a 90% (C°)	318	333	338	342	346	373
Corrosividade ao cobre	0	0	0	0	0	£2
Teor de cinzas (%)	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,014
Teor de enxofre (%)	0	nd	nd	0	0	0,24
Cor (ASTM)	1,0	0	0,5	1,0	1,0	2,0
Resíduo de carbono						
Conradson sobre 10% do resíduo seco (%)	0,09	0,03	0,02	nd	0,01	0,35

* Diesel do tipo C, cujas propriedades foram determinadas e cedidas pelo Instituto de Tecnologia do Paraná (Tecpar, Curitiba, PR);

** Resíduo de carbono Conradson sobre 10% do resíduo seco (%);

nd = não determinado

3.3.5 Biodiesel

De modo geral, biodiesel foi definido pela “National Biodiesel Board” dos Estados Unidos como derivado monoalquil éster de ácidos graxos de cadeia longa, proveniente de fontes renováveis como óleos vegetais ou gordura animal, cuja utilização está associada à substituição de combustíveis fósseis em motores de ignição por compressão, motores ciclo diesel (Costa Neto, 2000).

Patenteado no Brasil pelo Professor Expedito de Sá Parente, em 1979 e batizado com o nome de Pró-Diesel, em virtude do programa Proálcool, existente naquela época. É um combustível renovável, biodegradável e ambientalmente correto, sucedâneo ao óleo diesel mineral, constituído de uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, obtidos da reação de transesterificação de qualquer triglicerídeo com um álcool de cadeia curta, metanol ou etanol, respectivamente (Parente, 2006).

Conforme a legislação brasileira, em especial a Lei nº. 11097/2005, biodiesel é o biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão ou, conforme regulamento, para a geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil (Brasil, 2006).

É obtido, de algumas formas, tais como:

- craqueamento térmico de óleos vegetais;
- biotransformação (utilizando biocatalizadores – microrganismos vivos íntegros ou materiais biológicos);
- transesterificação ou alcoólise.

3.3.6 Obtenção do biodiesel de óleos vegetais

Para a obtenção de biodiesel, a reação de transesterificação de óleos vegetais com álcoois primários pode ser realizada tanto em meio ácido quanto em meio básico, conforme demonstrado na Figura 2. A reação de síntese,

geralmente empregada na indústria, utiliza uma razão molar óleo:álcool de 1:6 na presença de 0,4% de hidróxido de sódio ou de potássio, porque o meio básico apresenta melhor rendimento e menor tempo de reação do que o meio ácido (Figura 3). Por outro lado, o excesso de agente transesterificante (álcool primário) faz-se necessário devido ao caráter reversível da reação.

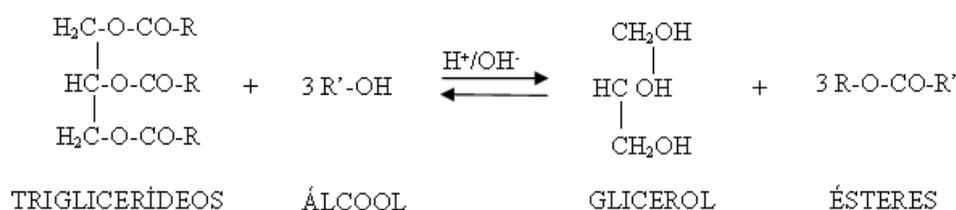


FIGURA 2 Transesterificação de triacilgliceróis³, em que R representa a cadeia carbônica dos ácidos graxos e R', a cadeia carbônica do álcool reagente.

Freedman et al. (1986) demonstraram que a alcoólise com metanol é tecnicamente mais viável do que a alcoólise com etanol, particularmente esse corresponde ao etanol hidratado, cujo teor em água (4-6%) retarda a reação. O uso de etanol anidro na reação efetivamente minimiza este inconveniente, embora não implique em solução para o problema inerente à separação da glicerina do meio de reação que, no caso da síntese do éster metílico, pode ser facilmente obtida por simples decantação.

³ São lipídios formados pela ligação de 3 moléculas de ácidos graxos com o glicerol, um triálcool de 3 carbonos, por meio de ligações do tipo éster. São também chamados de "gorduras neutras", ou triglicerídeos.

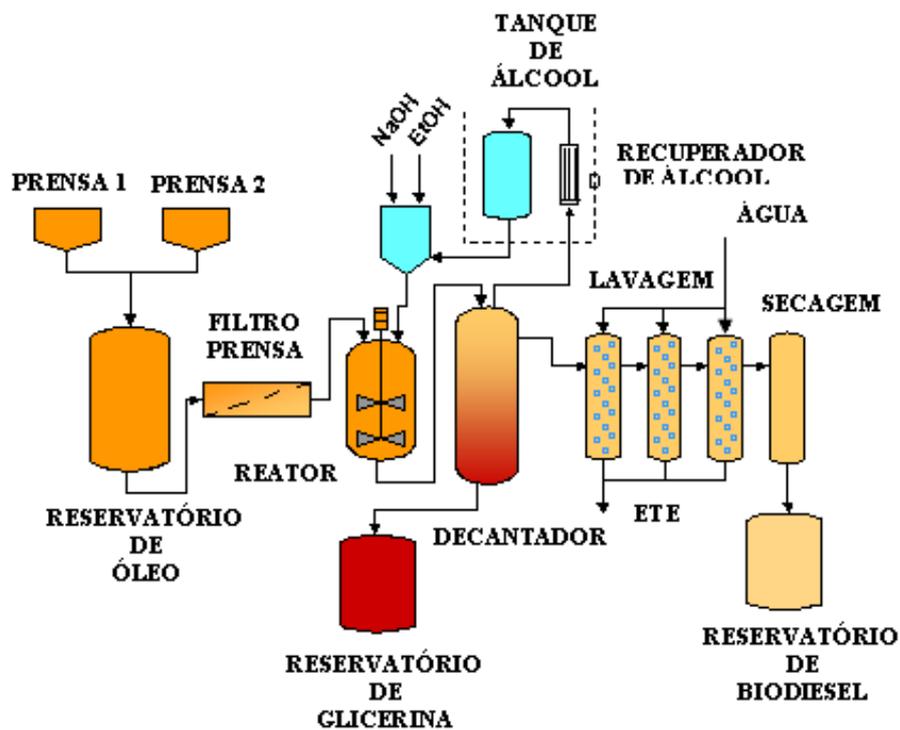


FIGURA 3 Fluxograma de produção do biodiesel por transesterificação.

Fonte: Fluxograma... (2006).

3.4 Avaliação de máquinas motoras

As máquinas motoras de combustão interna de êmbolos apresentam características de funcionamento que, para um mesmo espécime, podem variar significativamente, dependendo das condições em que forem realizadas as mensurações. Daí a importância de uma clara e específica referência à metodologia de ensaio, consubstanciada numa norma técnica (Mialhe, 1996).

A primeira menção de que se tem notícia sobre a possibilidade do uso de óleos vegetais em motores de ciclo diesel foi feita por Rudolf Diesel, ao afirmar, segundo Aguiar, citado por Salvador (1984), que:

o motor diesel pode ser alimentado com óleos vegetais e poderá ajudar consideravelmente o desenvolvimento da agricultura nos países onde ele funcionar. Isto parece um sonho do futuro, mas eu posso predizer com inteira convicção que esse modo de emprego do motor diesel pode, num tempo dado, adquirir uma grande importância.

Já em 1910, ele alimentou um motor com óleo de amendoim, que funcionou bem.

Conforme os relatórios do Programa Nacional de Óleos Vegetais (Oveg, 1985), os testes realizados somaram milhares de horas de ensaios em laboratórios de motores e mais de um milhão de quilômetros percorridos, avaliando dirigibilidade, desempenho, consumo de combustível, manutenção e desempenho do lubrificante. A apreciação global dos resultados mostrou que todos os veículos que operaram com 100% de éster metílico ou etílico de óleo de soja não apresentaram problemas significativos durante o decorrer do teste de campo. As medições do desempenho dos motores em dinamômetro no final dos ensaios e sua desmontagem completa para verificação de desgaste e depósitos confirmaram os resultados satisfatórios observados durante o ensaio de campo. Em dois ou três tipos de motores testados, foram necessárias modificações no processo de combustão para controlar a ocorrência de diluição do lubrificante pelo combustível. A utilização de 70% de óleo diesel e 30 % de éster etílico de óleo de soja, em motores diesel não modificados, acarretou resultados variados conforme tipo de motor. Nos motores de cilindrada unitária maior, os resultados foram tidos como satisfatórios, enquanto que os demais se caracterizam por problemas de entupimento de bicos injetores e suas conseqüências no conjunto motor-lubrificante. A intensidade dos problemas pode ser correlacionada diretamente com a rotação máxima dos motores. A formação de depósitos nos

bicos injetores parece depender da sua temperatura de funcionamento e da pressão de injeção.

Segundo Torres et al. (2006), testes realizados com motor Agrale, modelo M-85 tipo estacionário, monocilindro, com 7,36 kW de potência; não foram detectadas diferenças significativas quanto à utilização de óleo diesel e de biodiesel (B100), com resultados bem próximos. O consumo específico de combustível com B100 foi, aproximadamente, 20% maior que no óleo diesel; nas emissões CO₂ praticamente não houve alteração; porém, as emissões de CO foram muito maiores para potência de 4 kW. Os resultados mostraram a possibilidade imediata da substituição do óleo diesel pelo biodiesel, como combustível nos motores estacionários de baixa potência.

Salvador (1984) realizou testes em um trator equipado com motor Agrale, modelo M-90-T, monocilindro vertical, com torque de 3,7 kgf.m a 1.800 rpm; utilizando éster metílico de *Joannesia princeps* Vell. a 100% e em misturas ao óleo diesel. Verificou que em proporções de combustível B100, não houve queda de potência no motor e houve pequeno aumento no consumo de combustível na medida em que se aumentou a quantidade de éster na mistura. A eficiência térmica não foi afetada e não foram identificadas irregularidades no funcionamento do motor. Após testes, a câmara de combustão e as adjacências mostraram-se com uma fina camada de resíduos de carbono e o bico injetor mostrou-se desprovido de depósitos de carvão e sem aparência de corrosão.

Ferrari et al. (2007) utilizaram um gerador de energia elétrica e biodiesel de soja obtido por meio da transesterificação do óleo com etanol anidro na presença de catalisador alcalino NaOH, com rendimento de 57% no processo de fabricação. Foram testadas as proporções de 5%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100% ao diesel comercial e o consumo médio, em L/h de funcionamento, do equipamento mantido sob as mesmas condições de operação. Observou-se

diminuição do consumo de combustível em 3,7% para B5, 5,9% para B10, 1,6% para B20 e, nas demais misturas, houve um pequeno aumento no consumo.

Soares et al. (2000) avaliaram o funcionamento de um grupo de gerador diesel convencional com de 60kW (76 kVA) de potência e motor MWM D229-6, utilizando óleo de palma bruto (óleo de dendê) como combustível. Os testes tiveram duração de 400 horas, em que foram encontrados os seguintes problemas: 1) necessidade de troca mais freqüente do óleo lubrificante e 2) acumulação de partículas na bomba injetora e carbonização das câmaras de combustão e bicos injetores, causando perda gradual de potência ao longo dos ensaios, sendo reversível com limpeza. O consumo de dendê, em kg.kWh^{-1} , ficou 10% maior que o diesel. Os teores de CO, CO₂ e NO_x na operação com dendê foram próximos aos da queima com diesel, dentro dos padrões aceitáveis.

Maziero et al. (2005a) realizaram ensaios comparativos de desempenho em um motor MWM modelo 407TCA (92 kW a 3.200 rpm) de injeção direta, utilizando óleo diesel metropolitano e biodiesel (éster etílico de óleo de girassol, ou EEOG) como combustíveis. Com a substituição do óleo diesel por EEOG, ocorreu uma redução média de 7,6 % na potência do motor e um aumento de 9,8% no consumo de combustível. Reduções de 6,0% na potência do motor também foram encontradas por Silva et al. (2004) quando compararam o desempenho de biodiesel (B100) de óleo residual em motor diesel MWM 4TVA. Os maiores desvios foram verificados nas extremidades da faixa de rotação do ensaio, condições que não são utilizadas freqüentemente na operação normal do motor. Isso, entretanto, não afetou a média das diferenças percentuais relativas à faixa operacional entre a rotação de torque máximo e à rotação de potência máxima que, no caso do motor em questão, corresponde a 1.400 rpm e 3.200 rpm, respectivamente. Os desvios percentuais obtidos nesta faixa foram os mesmos: redução de 7,6% na potência e aumento de 9,8% no consumo específico.

3.5 Aspectos ambientais na utilização do biodiesel

Maziero et al. (2005b) determinaram os níveis de emissões realizando ensaio em um motor MWM modelo 407TCA (92 kW a 3.200 rpm) de injeção direta, utilizou óleo diesel metropolitano e biodiesel de EEOG como combustíveis. Os testes foram realizados de acordo com a norma NBR 14489 (ABNT, 2000), utilizando um analisador de gases de escapamento. Com o uso de EEOG, as emissões de CO e HC e material particulado foram reduzidas em 32,2%, 31,0% e 41,0% respectivamente, enquanto que a concentração de NO_x ficou mais elevada em 5,7%. As reduções das emissões específicas de CO e HC podem ser explicadas pela presença de oxigênio na molécula de biodiesel, uma vez que a disponibilidade deste comburente na câmara de combustão desloca a reação de queima do combustível no sentido de produzir maiores quantidades de CO₂. No caso do biodiesel, como simultaneamente se observa redução nas emissões de CO₂, a eficiência de queima pode ter se reduzido, apesar da diminuição observada da concentração de HC nos gases de escapamento. As emissões de HC e CO, reduzidas com o uso de EEOG, podem ter seus valores reduzidos ainda mais com a definição de valores adequados de parâmetros de injeção (por exemplo, ponto de injeção e taxa de dosagem) nas diversas condições de carga e rotação de funcionamento do motor.

Providência dessa mesma natureza pode ser adotada com o objetivo de reduzir as concentrações mais elevadas de NO_x observadas com o uso de EEOG. O aumento das emissões específicas de NO_x deve-se, principalmente, aos pontos de cargas efetivas em que os menores atrasos químicos da combustão do biodiesel, oxigenado e de elevado número de cetano, facilita a liberação de calor. Conseqüentemente, as temperaturas na câmara de combustão atingem valores maiores, o que sabidamente potencializa a formação de óxidos de nitrogênio. A redução do grau de enegrecimento e da emissão específica de material particulado medido são representativas e favoráveis ao uso do EEOG, o

que, em parte, é explicado pela ausência de enxofre no EEOG. O enxofre compartilha o oxigênio disponível na fase tardia da combustão com o carbono resultante da queima parcial em algumas condições de funcionamento do motor, aumentando a produção de material particulado. Apesar da perda na eficiência mecânica do motor, a utilização de EEOG mostrou-se viável na redução dos níveis de emissão (Maziero et al., 2005b).

3.6 Aspectos econômicos da utilização do biodiesel

Barbosa et al. (2005) avaliaram o consumo horário de óleo diesel de um motor estacionário, utilizado no acionamento de um desintegrador de grãos, com proporções de 0%, 2%, 5%, 10% e 20% de biocombustível, oriundo do óleo de mamona, adicionado ao óleo diesel convencional. Os resultados mostraram que valores abaixo de 5% de biocombustível não apresentaram diferenças significativas no consumo de combustível; já a adição de 20% de biocombustível elevou em 3,37% o consumo horário. Ao se fazer uma análise econômica da situação, observa-se que, enquanto mantêm-se proporções de mistura inferiores a 5%, tem-se acréscimo médio no custo operacional (considerando-se somente o consumo de combustível) de 0,56%. Já ao elevar a proporção de mistura para 20%, o acréscimo é da ordem de 3,37%. Para cada tonelada de milho triturado no desintegrador (com demanda de aproximadamente duas horas), tem-se um custo operacional médio de R\$ 2,68, para proporções de mistura inferiores a 5% e de R\$ 2,76, para 20%. Ao se considerar toda a vida útil do conjunto motor-desintegrador (estimada em 10.000 horas de serviço) observa-se que o consumo global de óleo diesel convencional é da ordem de 8.140 litros enquanto que, utilizando-se proporção de mistura de 5%, é de 8.170 litros (R\$ 51,00 de acréscimo); já para a proporção de mistura de 20%, o consumo é de 8.410 litros (R\$ 459,00 de acréscimo).

4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Centro Tecnológico de Máquinas e Mecanização Agrícola do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, na cidade de Lavras, Minas Gerais. Os valores de temperatura, umidade relativa e de pressão atmosférica correspondentes aos dias dos ensaios encontram-se na Tabela 3.

TABELA 3 Dados atmosféricos verificados durante o ensaio.

Dia	Mês	Ano	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura média (°C)	UR (%)	Pressão atmosférica local (mm Hg)
26	maio	2007	23,4	8,1	14,7	71,5	
27	maio	2007	23,0	10,8	15,8	87,5	679,6
28	maio	2007	23,8	13,9	17,4	78,0	

Fonte: Estação Meteorológica da UFLA, Departamento de Engenharia, Setor de Agrometeorologia e Climatologia.

Foram testados três combustíveis sem misturas, sendo o primeiro óleo diesel, o segundo éster metílico de óleo de soja e o terceiro éster metílico de oliva, num motor com sistema de injeção equipado com bomba rotativa, aspiração natural de um trator Massey Ferguson MF 275.

4.1 Material

4.1.1 Combustíveis utilizados

O diesel utilizado nos ensaios foi obtido na rede de abastecimento automotiva local. O biodiesel utilizado é resultante da transesterificação de óleo

de soja e oliva em rota metílica, proveniente da Usina de Biodiesel de Varginha (Figura 4).



FIGURA 4 Amostras dos combustíveis utilizados.

A massa específica e o índice de acidez dos combustíveis foram determinados no laboratório de Química da Faculdade de Engenharia de Varginha, em Varginha, MG. O poder calorífico superior foi determinado no laboratório de análise de óleos na Usina Térmica Igarapé, em Juatuba, MG, de propriedade da Cemig Geração e Transmissão S/A. A viscosidade dinâmica e a cinemática foram obtidas no laboratório de termodinâmica da Faculdade de Engenharia de São Carlos, em São Carlos, SP, conforme Tabela 4.

TABELA 4 Propriedades físico-químicas das amostras.

Propriedades	Diesel	Biodiesel de soja	Biodiesel de oliva
Viscosidade dinâmica μ (mPa.s) a 40°C	3,5	5,8	4,0
Viscosidade cinemática ν (mm ² .s ⁻¹) a 20°C	4,2	6,6	4,6
Massa específica ρ (g.cm ⁻³) a 20°C	0,859	0,887	0,873
Poder calorífico superior (kJ.kg ⁻¹)	42297,15	39100,53	39670,77
Poder calorífico inferior (kJ.kg ⁻¹)	39245,15	36048,53	36618,77
Índice de acidez (IA) (mg KOH.g _{combustível} ⁻¹)	-	0,24	0,25
Teor de enxofre (%)	0,21	0	0

4.1.2 Trator

Para os ensaios, foi utilizado um trator novo (Figura 5) marca Massey Ferguson, modelo 275 Compacto, com motor de ciclo diesel, marca Perkins, modelo A4-4.1, de 4 tempos, sistema de injeção com bomba rotativa, refrigerado a água, com 4 cilindros em linha, cilindrada total de 4.100 cm³, com potência nominal, segundo o fabricante, de 75 cv (56 kW), a 2.200 rpm.



FIGURA 5 Trator utilizado nos ensaios (Fonte: Massey Ferguson, 2007).

4.1.3 Dinamômetro

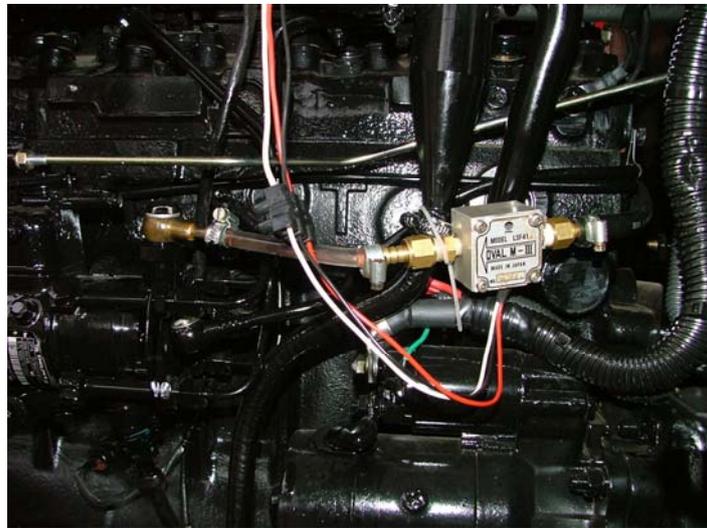
O dinamômetro (Figura 6) utilizado para a obtenção dos valores de torque (N.m), RPM na TDP e potência (kW) foi o modelo NEB 200, marca AW Dynamometer, no qual há a transformação da energia mecânica em calor por meio da utilização de um freio hidráulico. O calor gerado nesse freio é dissipado pela passagem de água de arrefecimento.



FIGURA 6 Dinamômetro e display

4.1.4 Medidor de consumo de combustível

Para medir o consumo de combustível do motor foi empregado um fluxômetro marca Oval, modelo LSN41 (Figura 7a), em conjunto com seu display (Figura 7b), o qual foi aferido para leitura em litros por hora e massa específica do fluido de $0,84 \text{ (g.cm}^{-3}\text{)}$. Pelo fato de o retorno ser pequeno, sendo utilizado para lubrificar e remover calor das partes móveis dos bicos injetores (Pereira, 2007) e por dificuldades mecânicas de montagem de outro fluxômetro, não foi considerado o retorno de combustível neste trabalho.



(a)



(b)

FIGURA 7 Medidor de consumo de combustivel

4.1.5 Tubo de Pitot

Para a determinação do fluxo de ar realmente admitido pelo motor, em $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, usou-se um tubo de Pitot instalado num bocal de 38 mm de diâmetro, instalado na entrada do filtro de ar do motor, conforme Figura 8a. Ao tubo de Pitot (pressão total) e na extremidade da parede do bocal (pressão estática) foi conectada uma mangueira, formando um tubo em “U”, no qual foi colocada água como fluido manométrico. Dessa forma, formou-se um manômetro diferencial, citado por Carlomagno Filho (2004). Para medir a deflexão no manômetro de água, foi utilizada uma trena, conforme indicado na Figura 8b.



(a)



(b)

FIGURA 8 Medição da vazão de ar admitido pelo motor.

4.2 Métodos

Neste trabalho não foram avaliadas as condições internas do motor, por se tratar de um trator novo, com apenas 6 horas de funcionamento. Também não foram realizadas modificações mecânicas, nem amaciamento do motor. A alimentação do motor deu-se pelo tanque do trator e, depois de terminado os ensaios com cada combustível, todo o sistema de alimentação de combustível foi drenado, sendo trocado, inclusive, o filtro de papel. Depois da drenagem e da substituição do filtro, o motor foi colocado em funcionamento por dez minutos, evitando-se a contaminação dos combustíveis.

Para realização dos ensaios foi adotada a norma NBR ISO 1585 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1996), em vigor desde junho de 1996. Por essa norma, aplica-se a avaliação do desempenho de motores de combustão interna, observando, em particular, a apresentação das curvas de potência e de consumo específico de combustível a plena carga, em função da rotação. Apesar de a mesma excluir máquinas agrícolas do seu escopo, é ela que cancela e substitui a norma NBR 5484/1985 (ABNT, 1985) utilizada anteriormente para ensaios dos parâmetros supracitados.

4.2.1 Determinação do poder calorífico inferior

O poder calorífico inferior (PCI) (kJ.kg^{-1}) foi determinado por meio Equação 1, a partir do poder calorífico superior (PCS) (kJ.kg^{-1}), conforme Moreira (2007).

$$PCI = PCS - 3052 \quad (1)$$

4.2.2 Determinação dos níveis de rotação para ensaio

Para a realização dos ensaios e a obtenção dos valores de potência, torque e rotação, o dinamômetro foi devidamente acoplado à tomada de potência (TDP) do trator, como mostrado na Figura 9.



FIGURA 9 Dinamômetro acoplado na TDP do trator.

Para a determinação da potência máxima, acionou-se o sistema de transmissão e, depois, se colocou o trator em máxima aceleração, entre o intervalo de 650 rpm (TDP), valor que representa a nulidade da potência e 230 rpm (TDP), valor que corresponde à paralisação do motor. Foram definidos seis níveis de rotações com intervalo de 80 rpm, para os ensaios que foram de 650,

570, 490, 410, 320 e 240, ou seja, 100%, 88%, 75%, 63%, 49% e 37% da rotação máxima, respectivamente. No display do dinamômetro (Figura 10) foram feitas as leituras de rotação (rpm), de potência (kW) e torque (N.m), todas na TDP do trator.



FIGURA 10 Display do dinamômetro.

4.2.3 Determinação da potência teórica ou motora – H_t

A potência teórica ou motora é a potência que seria obtida se fosse possível a transformação total da energia resultante da combustão em energia mecânica. É obtida analiticamente, a partir de informação sobre o consumo

horário de combustível e do seu poder calorífico, segundo Mialhe (1996), por meio da Equação 2.

$$H_t = \left(\frac{102}{3600 \times 75} \right) \times Q \times c \times 0,736 \quad (2)$$

Em que:

H_t = potência teórica (kW);

102 = equivalente mecânico do calor (kgm.kJ^{-1});

Q = consumo horário de combustível (kg.h^{-1});

c = poder calorífico inferior (kJ.kg^{-1})

4.2.4 Determinação da potência efetiva – H_e

Potência efetiva é que, efetivamente, está disponível no motor para atender às exigências de sua aplicação e é medida pelo dinamômetro. Nesse caso, foi mostrada diretamente no display, porém, ela pode ser calculada com o torque T correspondente à velocidade angular pela Equação 3 (Mialhe, 1996).

$$H_e = T \times N \times \left(\frac{2\pi}{60 \times 1000} \right) \quad (3)$$

Em que:

H_e = potência efetiva (kW);

T = torque (N.m);

N = velocidade angular (rpm).

4.2.5 Determinação da potência reduzida – H_r

Segundo Mialhe (1996), o termo reduzido refere-se aos resultados reais de desempenho que foram obtidos por cálculos, efetuados nos dados dos ensaios, os quais levam em conta as condições atmosféricas consideradas padrão. Os valores de potência obtidos na TDP foram recalculados conforme a Equação 4 (Salvador, 1984).

$$\frac{H_r}{H_e} = \frac{P_2}{P_1} \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{0,5} \quad (4)$$

Em que:

H_r = potência reduzida (kW);

H_e = potência efetiva (kW);

P_1 = pressão atmosférica, por ocasião da prova (mm Hg);

P_2 = pressão atmosférica padrão (760 mm Hg);

T_1 = temperatura absoluta por ocasião da prova (K);

T_2 = temperatura absoluta padrão NBR ISO 1585/1996 (298 K).

4.2.6 Determinação do torque – τ

A mensuração do torque consistiu em determinar a intensidade de uma força que, atuando na extremidade de um braço, tendeu a produzir movimento de rotação. No caso de movimento rotativo contínuo, o torque é medido pelo dinamômetro (Mialhe, 1980).

4.2.7 Determinação do consumo específico de combustível – C_e

Para a determinação do consumo específico, foi transformado o consumo horário, expresso em $L.h^{-1}$ para $g.h^{-1}$, utilizando-se a massa específica

do combustível e, posteriormente, aplicou-se a Equação 5 para o cálculo (Mialhe, 1996).

$$C_e = \frac{C_h}{H_e} \quad (5)$$

Em que:

C_e = consumo específico de combustível [$\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$];

C_h = consumo horário de combustível ($\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$);

H_e = potência efetiva (kW).

4.2.8 Determinação do consumo energético de combustível – C_{en}

Para a determinação do consumo energético de combustível foi multiplicado o consumo horário de combustível pelo poder calorífico inferior (Equação 6).

$$C_{en} = C_h \cdot PCI \quad (6)$$

Em que:

C_{en} = consumo energético de combustível ($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$);

C_h = consumo horário de combustível ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$);

PCI = poder calorífico inferior ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$).

4.2.9 Determinação da eficiência termomecânica – E_{tm}

A razão entre a potência efetiva e a potência teórica, expressos em percentagem, permitiu calcular a eficiência térmica (Equação 7), visto que não

foi considerada a potência de atrito exigida pelo motor para ser acionado (Mialhe, 1996).

$$E_{tm} = \left(\frac{H_e}{H_t} \right) \cdot 100 \quad (7)$$

Em que:

E_{tm} = eficiência termomecânica (%);

H_e = potência efetiva (kW);

H_t = potência teórica (kW).

4.2.10 Determinação da eficiência volumétrica – E_v

A eficiência volumétrica, expressa em percentagem, foi calculada pela relação entre fluxo de ar aspirado por curso de admissão (fluxo de ar realmente admitido) e fluxo de ar necessário para preencher o volume da cilindrada (fluxo de ar teoricamente exigido) de um cilindro, nas condições atmosféricas existentes durante o ensaio, segundo Mialhe, citado por Salvador (Equação 8).

$$E_v = \left(\frac{F_{ra}}{F_{te}} \right) \cdot 100 \quad (8)$$

Em que:

E_v = eficiência volumétrica (%);

F_{ra} = fluxo de ar realmente admitido ($m^3 \cdot s^{-1}$);

F_{te} = fluxo de ar teórico ($m^3 \cdot s^{-1}$).

Para calcular o fluxo de ar teoricamente exigido pelo motor, usou-se a Equação 9 (Salvador, 1984).

$$F_{te} = \frac{V \cdot n}{120} \quad (9)$$

Em que:

F_{te} = fluxo de ar teórico ($m^3 \cdot s^{-1}$);

V = cilindrada do motor (m^3);

n = número de rotações por minuto do motor (rpm).

Para determinação do fluxo de ar realmente admitido pelo motor, em $m^3 \cdot s^{-1}$, utilizou-se o arranjo descrito no item 4.1.6 e, utilizando a equação de Bernoulli (Bastos, 1987) para calcular a velocidade do ar e determinar a vazão, multiplicou-se pelo diâmetro do bocal (Equação 10).

$$V_1 = \sqrt{2g \times \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma} \right)} \quad (10)$$

Em que:

V_1 = velocidade do ar ($m \cdot s^{-1}$);

γ = peso específico do ar ($1,23 \text{ kgf} \cdot m^3$);

P_1 = pressão estática ou efetiva (mm Hg);

P_2 = pressão total ou de estagnação (mm Hg);

g = aceleração da gravidade ($m \cdot s^{-2}$).

Considerando o tubo de Pitot, a equação do manômetro diferencial está representada pela Equação 11.

$$\frac{P_2 - P_1}{\gamma} = h \cdot \left(\frac{\gamma_2 - 1}{\gamma_1} \right) \quad (11)$$

Em que:

γ_1 = peso específico do ar (1,23 kgf.m³);

γ_2 = peso específico da água (999 kgf.m³);

h = diferença de altura na coluna de H₂O (m);

P₁ = pressão estática ou efetiva (mm Hg);

P₂ = pressão total ou de estagnação (mm Hg);

Substituindo-se 11 em 10, obteve-se a Equação 12.

$$V_1 = \sqrt{2gh \cdot \left(\frac{\gamma_2 - 1}{\gamma_1} \right)} \quad (12)$$

Em que:

V₁ = velocidade do ar de admissão (m.s⁻¹);

g = aceleração da gravidade (m.s⁻¹);

h = diferença de altura na coluna de H₂O (m);

γ_1 = peso específico do ar (1,23 kgf.m³);

γ_2 = peso específico da água (999 kgf.m³).

4.3 Delineamento experimental

Foi instalado um experimento com delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 3x6, envolvendo três tipos de combustível e seis níveis de rotação do motor, com quatro repetições. Os tratamentos utilizados foram os óleos diesel comercial, biodiesel de soja (B100) e biodiesel de oliva (B100). Foi feita análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey, a 5%, utilizando o programa computacional Sisvar, nos parâmetros de torque, potência efetiva e consumo horário de combustível, em função da rotação na TDP.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram cancelados os tratamentos que representavam a nulidade da potência, ou seja, quando o freio hidráulico do dinamômetro transmitia pouca carga ao motor. Nesse caso, os valores de potência foram da ordem de 0,1 a 1,8 kW. Dessa forma, foram analisados 5 níveis de rotação na TDP, dos quais todos apresentaram carga significativa no motor.

O resumo das análises de variância, os resultados médios de torque, de potência efetiva e de consumo horário de combustível, em relação à rotação para os combustíveis testados encontram-se na Tabela 5, não apresentando efeito significativo nos parâmetros supracitados.

Para facilitar a visualização e a análise dos resultados, os dados foram dispostos em gráficos e traçadas suas respectivas curvas de tendência para potência reduzida, torque e consumo específico e energético de combustível. Determinou-se, ainda, a eficiência termomecânica e volumétrica do motor, considerando, para isso, o motor trabalhando a plena carga.

TABELA 5 Resumo das análises de variância de torque (N.m), potência efetiva (kW) e consumo horário de combustível (L.h⁻¹) obtido na TDP.

Fontes de variação	Graus de liberdade	Quadrados médios		
		Torque	Potência efetiva	Consumo horário de combustível
Combustível (C)	2	25920,65	48,17	20,42
Rotação (R)	4	20949,93	757,48	20,43
Interação (C x R)	8	3052,67	3,51	0,21
Erro	45	2408,18	1,62	0,24
CV (%)		8,12	4,89	6,50

5.1 Torque (N.m)

As curvas para os três combustíveis apresentaram o mesmo comportamento da curva de torque declarado na NBR ISO 1585 (1996). O teste de Tukey para o torque em relação aos combustíveis (Tabela 6) mostrou que o resultado das médias para os biocombustíveis não diferem estatisticamente, diferindo do óleo diesel.

TABELA 6 Médias de torque em relação aos combustíveis.

Tratamentos	Médias (N.m)
B100 oliva	577,95a
B100 soja	589,3a
Óleo diesel	645,2b

Ao se analisar o efeito do torque em relação às rotações (TDP), conforme Tabela 7, observou-se que os valores médios relativos às rotações de 240 e 570 rpm não diferiram estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade, bem como para os valores médios a 490, 410 e 320 rpm.

TABELA 7 Médias de torque em relação aos níveis de rotação (TDP).

Tratamentos (rpm)	Médias (N.m)
240	559,25a
570	559,58a
490	626,58b
320	626,92b
410	648,42b

Utilizando-se as equações polinomiais expressas nas Figuras 11, 12 e 13, mensurou-se o torque para a rotação de trabalho, 540 rpm (TDP), ou seja, 85% da máxima. Nessa análise, o combustível B100 oliva apresentou melhor

resultado, sendo este de 688,84 N.m. Para óleo diesel, o torque a 540 rpm foi de 635,3 N.m e 608,6 N.m para B100 de soja.

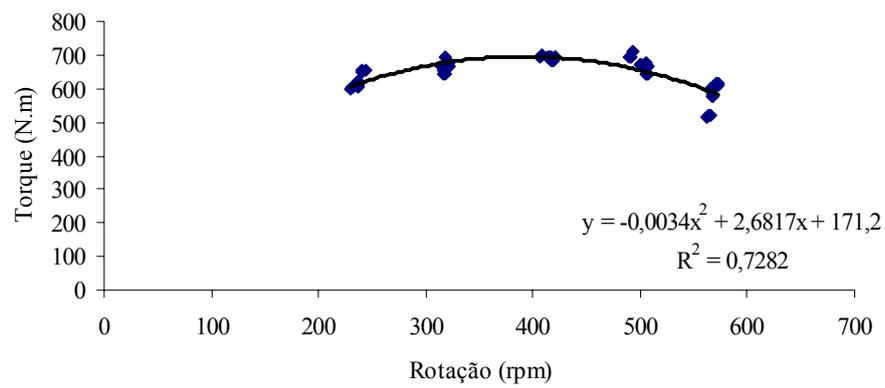


FIGURA 11 Curva de tendência do torque para óleo diesel.

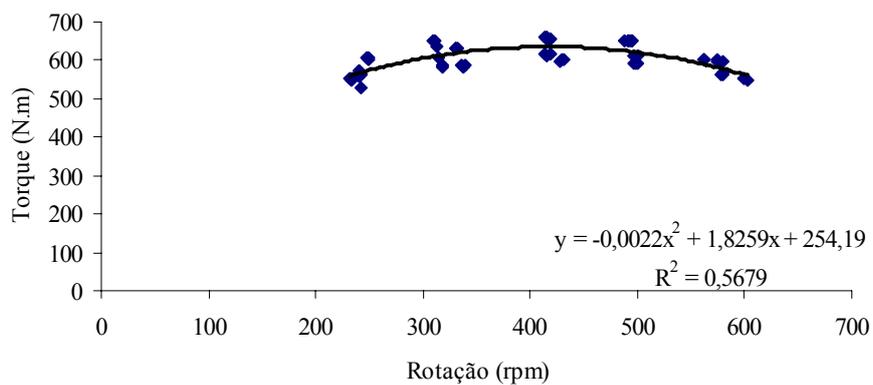


FIGURA 12 Curva de tendência do torque para B100 soja.

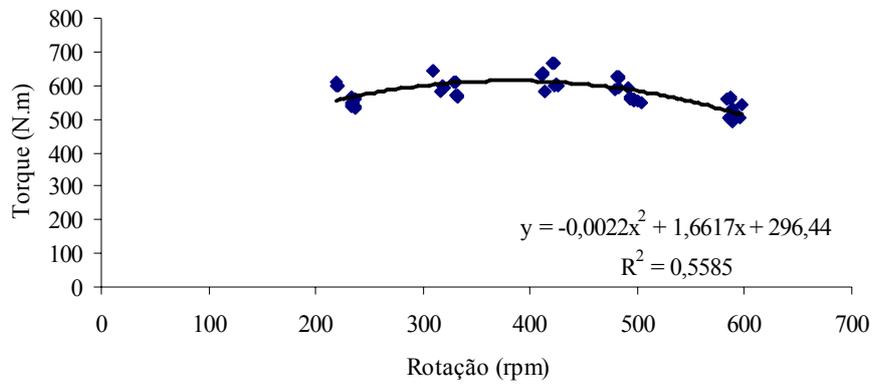


FIGURA 13 Curva de tendência do torque para B100 oliva.

5.2 Potência efetiva (kW)

As médias de potência efetiva em relação aos combustíveis testados estão disponíveis na Tabela 8. Pode-se observar, a 5% de probabilidade, no teste de Tukey, que os valores da potência efetiva em relação aos combustíveis diferiram entre si e com maior valor atribuído ao óleo diesel. Verifica-se, ainda, que os valores médios para potência do B100 soja e B100 oliva foram, respectivamente, de 5,3% e 11,3%, menores comparativamente ao óleo diesel, mostrando que esses combustíveis apresentaram resultados tecnicamente satisfatórios.

TABELA 8 Médias de potência efetiva em relação aos combustíveis.

Tratamentos	Médias (kW)
B100 oliva	24,4a
B100 soja	26,05b
Óleo diesel	27,5c

Ao se analisar o efeito da potência efetiva em relação às rotações (TDP), conforme Tabela 9, observou-se que os valores médios relativos às rotações de 490 e 570 rpm não diferiram estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade, diferentemente dos demais valores médios.

TABELA 9 Médias da potência efetiva em relação aos níveis de rotação (TDP).

Tratamentos (rpm)	Médias (kW)
240	14,83a
320	21,08b
410	27,92c
490	32,42d
570	33,67d

5.3 Potência reduzida (kW)

Analisando-se os resultados da potência reduzida na rotação de trabalho (540 rpm), observou-se que B100 soja apresentou o melhor resultado (39,4 kW). Na mesma rotação, obtiveram-se 37,8 kW e 29,4 kW para B100 oliva e óleo

diesel, respectivamente. Conforme se observa nas Figuras 14, 15 e 16, as curvas de tendência da potência reduzida apresentaram comportamento semelhante àquelas apresentadas por Oveg (1985).

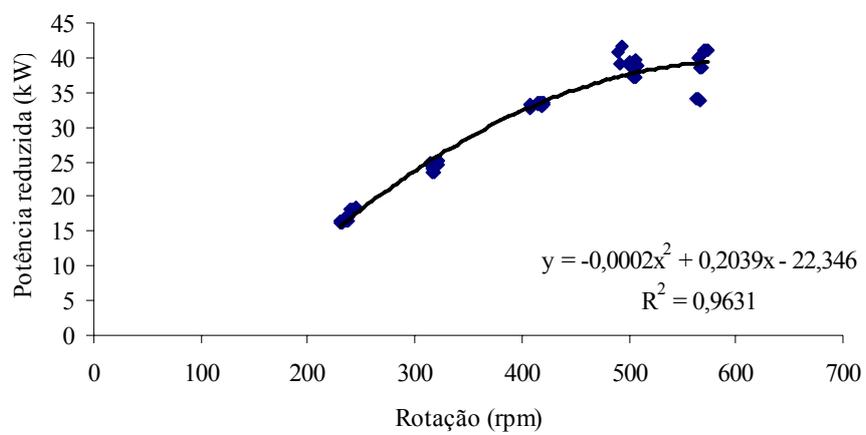


FIGURA 14 Curva de tendência da potência reduzida para óleo diesel.

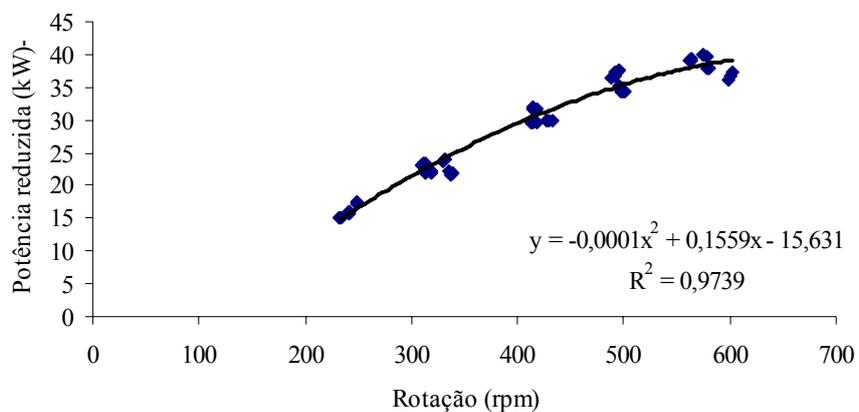


FIGURA 16 Curva de tendência da potência reduzida para B100 soja.

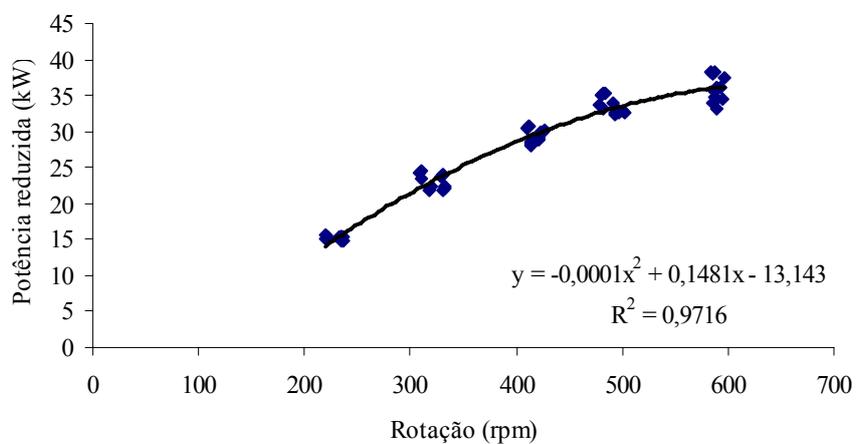


FIGURA 17 Curva de tendência da potência reduzida para B100 oliva.

5.4 Consumo horário de combustível (L.h⁻¹)

Pelos dados da Tabela 10, verifica-se, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey, que os valores médios de consumo horário, em relação aos combustíveis testados, diferiram entre si, com maior valor atribuído ao óleo diesel. Verifica-se, ainda, que os valores médios de consumo horário de B100 soja e B100 oliva foram, respectivamente, 14,53% e 23,26% menores, em comparação ao óleo diesel.

TABELA 10 Médias de consumo horário em relação dos combustíveis.

Tratamentos	Médias (L.h ⁻¹)
B100 oliva	6,60a
B100 soja	7,35b
Óleo diesel	8,60c

Ao se analisar o efeito do consumo horário de combustível em relação às rotações (TDP), conforme Tabela 11, observou-se que os valores médios relativos às rotações de 490 e 570 rpm não diferiram estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade, diferentemente dos demais valores médios.

TABELA 11 Médias do consumo horário em relação aos níveis de rotação (TDP).

Tratamentos (rpm)	Médias (L.h ⁻¹)
240	5,75a
320	6,75b
410	7,58c
490	8,58d
570	8,92d

5.5 Consumo específico de combustível [g.(kW.h)⁻¹]

Analisando-se os resultados de consumo específico de combustível com relação à rotação de trabalho (540 rpm), observa-se que o óleo diesel apresentou maior valor médio, sendo da ordem de 258,84 [g.(kW.h)⁻¹]. O biocombustível B100 soja apresentou o melhor resultado, 224,32[g.(kW.h)⁻¹]. Já B100 oliva apresentou valor intermediário, 229,7 [g.(kW.h)⁻¹]. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Rabelo (2007), quando testou óleo de soja usado em fritura de alimentos. Nas Figuras 18, 19 e 20, observam-se as curvas de tendência referentes ao consumo específico dos combustíveis utilizados.

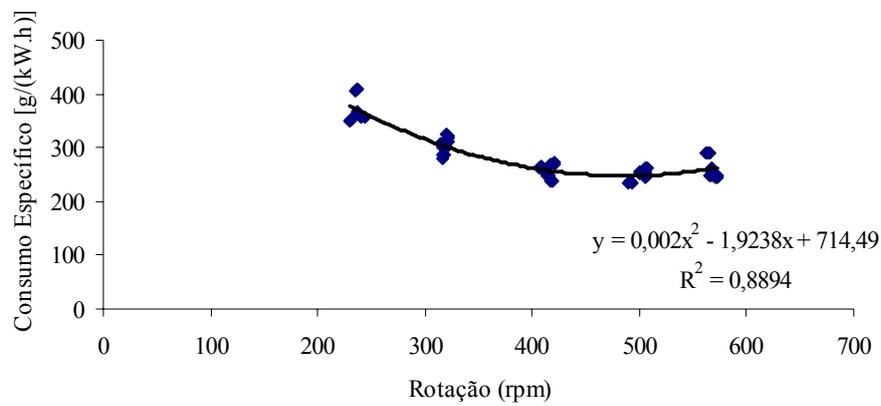


FIGURA 18 Curva de tendência do consumo específico para óleo diesel.

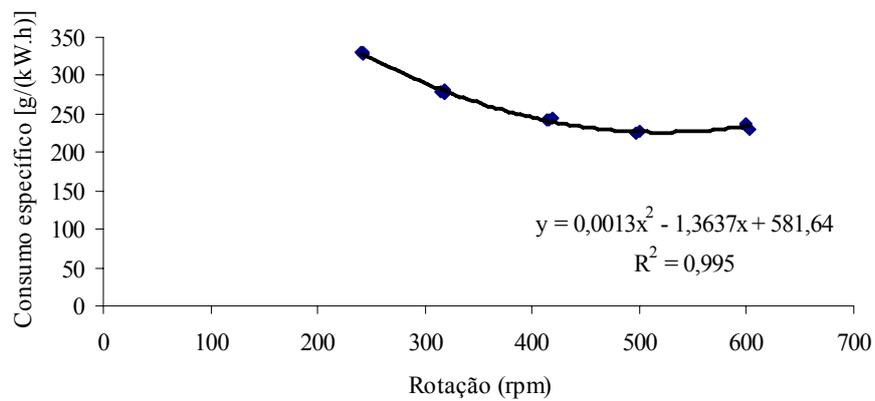


FIGURA 19 Curva de tendência do consumo específico para B100 soja.

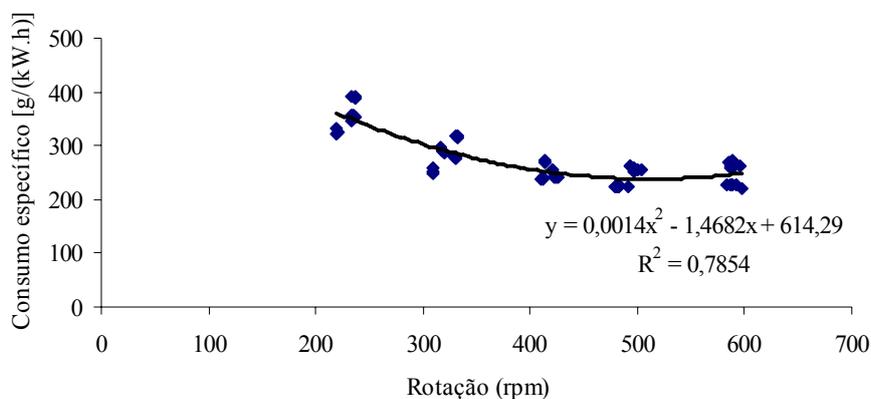


FIGURA 20 Curva de tendência do consumo específico para B100 oliva.

5.6 Consumo energético (kJ.h^{-1})

Analisando-se os resultados de consumo energético de combustível na rotação de trabalho (540 rpm), observa-se que o maior valor médio foi atribuído ao óleo diesel, $342711,04 \text{ kJ.h}^{-1}$, com sua representação gráfica na Figura 21. Na seqüência, o biocombustível B100 oliva apresentou valor médio de $276.022,8 \text{ kJ.h}^{-1}$ e B100 soja, valor médio de $246.837,12 \text{ kJ.h}^{-1}$. Os resultados (Figuras 21, 22 e 23) são proporcionais ao poder calorífico inferior de cada combustível. Quando maior o PCI, maior o consumo energético, sendo isso observado também por Barbosa (2006).

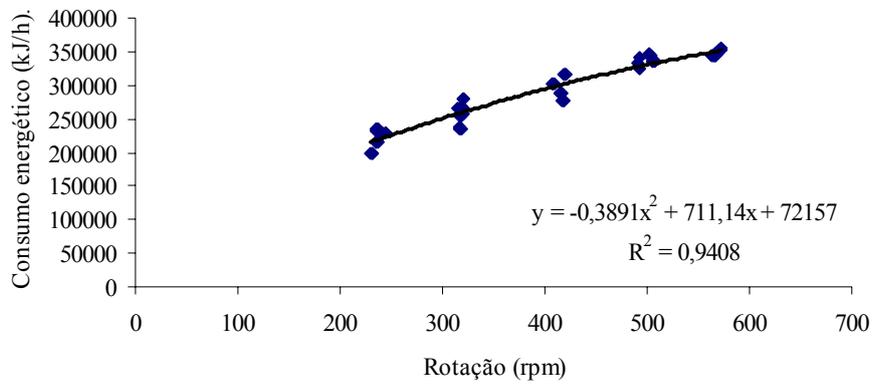


FIGURA 21 Curva de tendência do consumo energético para óleo diesel.

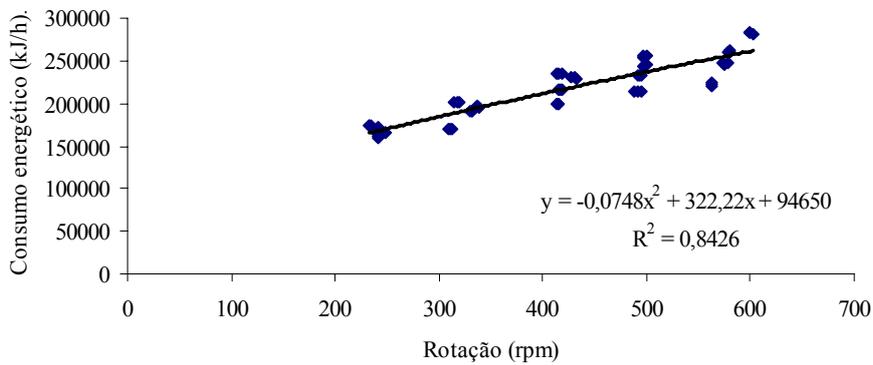


FIGURA 22 Curva de tendência do consumo energético para B100 soja.

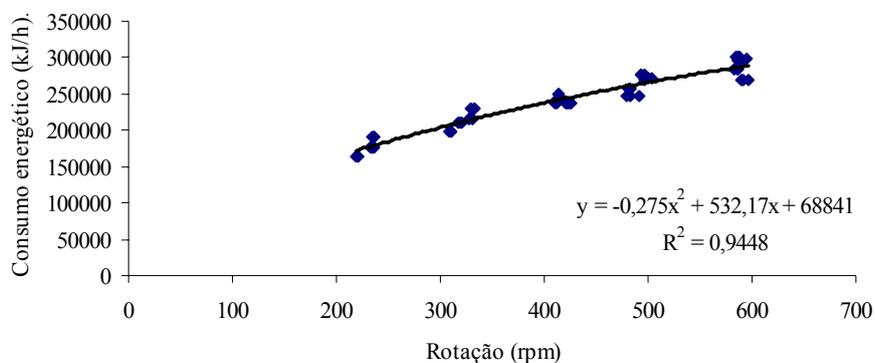


FIGURA 23 Curva de tendência do consumo energético para B100 oliva.

5.7 Eficiência termomecânica

Os valores médios relativos à eficiência termomecânica foram da ordem de 28,9% para óleo diesel, 32,72% para B100 soja e 32,08% para B100 oliva. Os biocombustíveis apresentaram, em média, valor de eficiência termomecânica 12% superior ao óleo diesel. A natureza química do biodiesel em relação ao diesel pode afetar sensivelmente a combustão, devido à razão ar-combustível, temperatura e forma de propagação do combustível (Antares & Blanca, 1980). Maior eficiência termomecânica para biodiesel (Figuras 24, 25 e 26) também foi observada por Barbosa (2006), em torno de 4% em comparação ao óleo diesel.

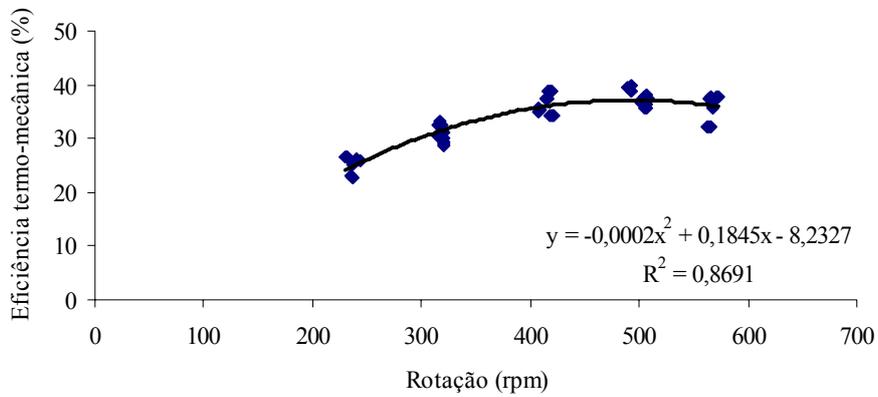


FIGURA 24 Curva de tendência da eficiência termomecânica (%) para óleo diesel.

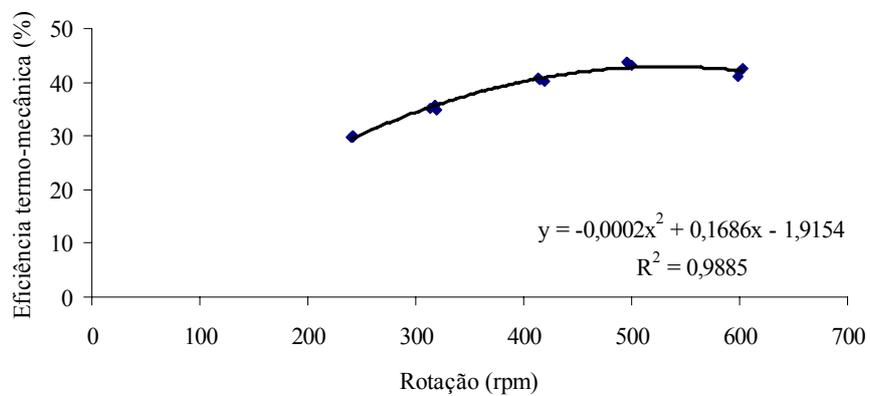


FIGURA 25 Curva de tendência da eficiência termomecânica (%) para B100 de soja.

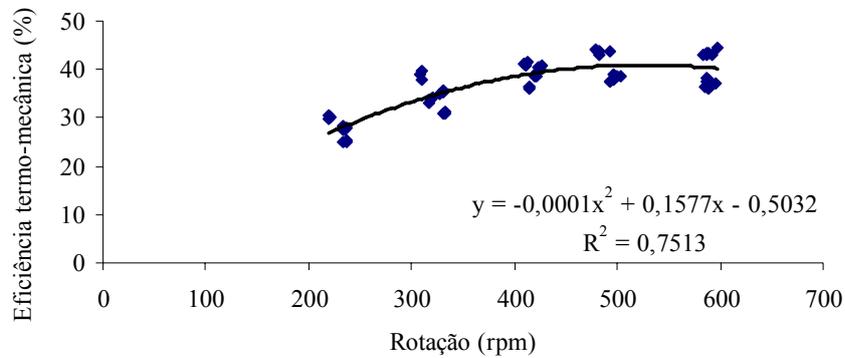


FIGURA 26 Curva de tendência da eficiência termomecânica (%) para B100 de oliva.

5.8 Eficiência volumétrica

Analisando-se os resultados de eficiência volumétrica na rotação de trabalho (540 rpm), observa-se que o maior valor médio foi atribuído ao B100 oliva, 85,32%. Sua representação gráfica encontra-se na Figura 27. Na seqüência, o biocombustível B100 soja apresentou valor médio de 82,51% e óleo diesel, valor médio de 81,21%. Nas altas velocidades, há dificuldade no enchimento dos cilindros, devido ao aumento das perdas de carga e à inércia da massa de ar (Figuras 27, 28 e 29), fazendo cair o rendimento volumétrico (Pereira, 2007). Os valores medidos estão acima dos valores encontrados por Salvador (1984) que foram da ordem de 76% a 79%. Isso se deve à evolução tecnológica dos motores.

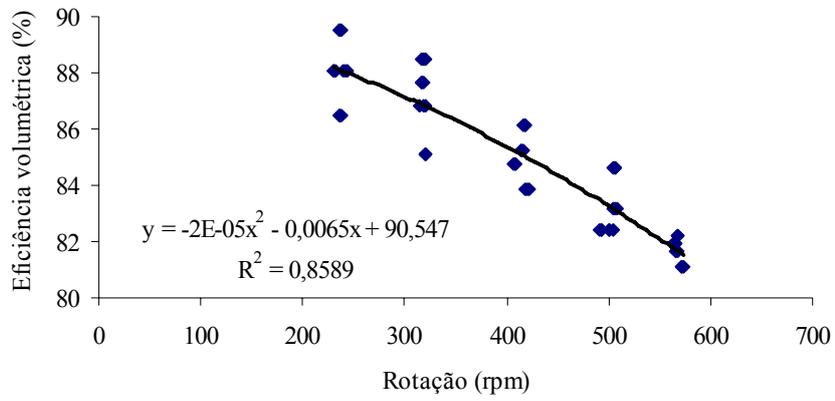


FIGURA 27 Curva de tendência da eficiência volumétrica (%) para óleo diesel.

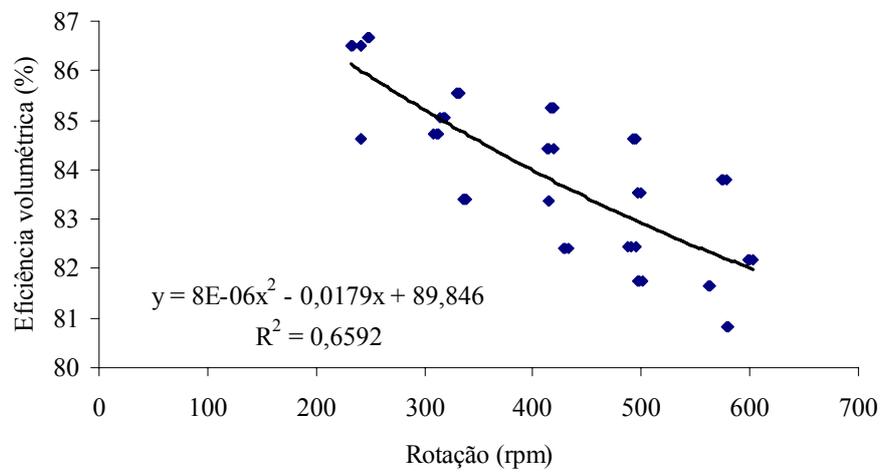


FIGURA 28 Curva de tendência da eficiência volumétrica (%) para B100 de soja.

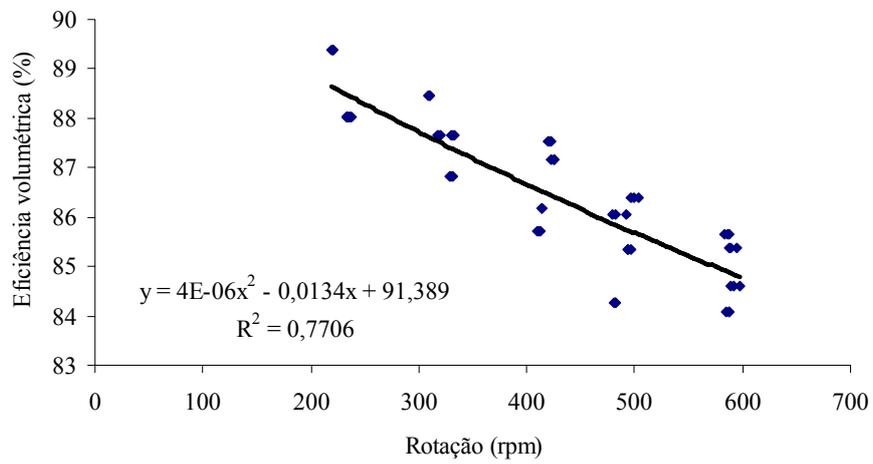


FIGURA 29 Curva de tendência da eficiência volumétrica (%) para B100 de oliva.

6 CONCLUSÃO

Os testes realizados mostraram a viabilidade de operação de um motor ciclo diesel com combustíveis substitutivos, B100 soja e oliva.

Houve perda de torque com a utilização dos biocombustíveis, sendo 10,7% menor ao diesel na rotação de trabalho.

Os melhores resultados de potência reduzida foram obtidos com os biocombustíveis, sendo 30,9% maior ao diesel na rotação de trabalho.

Os biocombustíveis apresentaram melhor consumo específico em relação ao diesel, sendo 13% menor na rotação de trabalho.

O melhor consumo energético foi do B100 soja, devido ao seu menor PCI.

Em média, a eficiência termomecânica dos biocombustíveis foi maior 12,1% em relação ao diesel.

Na rotação de trabalho, a eficiência volumétrica dos biocombustíveis foi maior 3,3% em relação ao diesel.

Os biocombustíveis mostram viabilidade ambiental em relação ao diesel, por não conter enxofre.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTARES, P. V. A.; BLANCA, A. L. Fundamento del motor diesel. In: _____. **Tractores y motores agrícolas**. Madrid: Rivadeneyra, 1980. p. 37-40.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Motor Diesel- Análise e determinação dos gases e do material particulado emitidos por motores do ciclo diesel – Ciclo de 13 pontos: NBR 14489**. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Veículos rodoviários – Código de ensaio de motores – Potência líquida efetiva. NBR ISO 1585**. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Motores alternativos de combustão interna de ignição por compressão (diesel) ou ignição por centelha (Otto) de velocidade angular variável – ensaio: NBR 5484**. Rio de Janeiro, 1985.

BARBOSA, J. A.; FERNANDES, J. S. C.; CUNHA, J. P. A. R.; SALVADOR, N. Uso do biocombustível em um motor estacionário usado no acionamento de um desintegrador de grãos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS VEGETAIS E BIODIESEL, 2., 2005, Varginha. **Anais...** Varginha, MG: UFLA, 2005. p. 900-903. CD ROM.

BARBOSA, R. L. **Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel**. 2006. 55f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

BASTOS, F. A. A. Problemas de mecânica dos fluidos. In: _____. **Equação de Bernoulli para os fluidos ideais**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1987. Cap. 12, p. 274-287.

BUBU, A. **Biomassa: uma energia brasileira**. Disponível em: <<http://ambientebrasil.com.br>>. Acesso em: 01 jul. 2007.

CARLOMAGNO FILHO, C.; MARIA, G. S.; SILVA, J. M. D. A.; NUNES, W. S. Tubo de Pitot. **Relatório de Trabalho de Conclusão...** Porto Alegre: UFRGS, 2004. p. 1 – 9.

CARVALHO, R. D. de; SOUZA, R. U. de; JUNIOR, A. S. C. **Motores Diesel MWM: conceitos básicos.** São Paulo, MWM, 2000. 100 p. (Apostila de Treinamento).

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

COMBURENTE. In: Enciclopédia Tecnológica Planetarium. 1976. v.7, p-414.

FERRARI, R. A.; SCABIO, A.; OLIVIERA, V. S. **Produção e uso de Biodiesel Etilico na UEPG.** Disponível em: <http://uepg.br/propesp/publicatio/exa/2004_6/06.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2007.

FLUXOGRAMA de produção do biodiesel. Disponível em: <<http://www.biodieselbrasil.com.br>>. Acesso em: 04 jan. 2006.

FREEDMAN, B.; BUTTERFIELD, R. O.; PRYDE, E. H. Transesterification kinetics of soybean. **Journal American Oil Chem. Soc.**, v.63, p.1375-1380, 1986.

GOUX, F. E. C. **Óleo diesel Petrobras, pesado e poluente?** Sistema Sul Ambiental Brasil 11.ed. 2005. Disponível em: <<http://www.sulambiental.com.br/art-oleodiesel.htm>>. Acesso em: 18 jan. 2007.

MASSEY FERGUSON. **Especificação:** tratores compactos Série 200. Disponível em : <www.masseyferguson.com.br>. Acesso em: 28 maio 2007.

MASSOLA, A. M. A.; MILA, A.; RANZINI, E.; MARTHA, G. B. **Gambirasio.** In: Enciclopédia Tecnológica Planetarium, 1976. v.7, p-414.

MAZIERO, J. V. G.; CORRÊA, I. M.; TRIELLI, M. A.; BERNADINI, J. A.; AGOSTINI, M. D'. Avaliação do desempenho de um motor de ignição por compressão utilizando óleo diesel e éster etílico de óleo de girassol como combustível. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS VEGETAIS E BIODIESEL, 2., 2005, Varginha. **Anais...** Varginha, MG: UFLA, 2005a. p. 729-733.

MAZIERO, J. V. G.; CORRÊA, I. M.; TRIELLI, M. A.; BERNADINI, J. A.; AGOSTINI, M. D'. Avaliação de emissões poluentes de um motor de ignição por compressão utilizando óleo diesel e éster etílico de óleo de girassol como combustível. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS VEGETAIS E BIODIESEL, 2., 2005, Varginha. **Anais...** Varginha, MG: UFLA, 2005b. p. 723-728.

MIALHE, L. G. **Máquinas motoras na agricultura**. São Paulo: Pedagógica e Universitária/EDUSP, 1980b. v.1, 289 p.

MIALHE, L. G. Ensaio & certificação de máquinas motoras. In: _____. **Máquinas agrícolas: ensaios & certificação**. Piracicaba: FEALQ, 1996. Cap. 7, p. 321-370.

MOREIRA, A. **Combustíveis**. São Carlos: Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. 8p. Apostila. Disponível em: <<http://www.netef.eesc.sc.usp.br/moreira/COMBUSTIVEIS.ppt>>. Acesso em: 28 maio. 2007.

OS SEGREDOS do Diesel. Disponível em: <<http://www.carrosnaweb.com.br/dicasdiesel.asp>>. Acesso em: 9 dez. 2006.

OVEG, I. **Óleos vegetais: experiência de uso automotivo**. Brasília: Ministério da Indústria e do Comércio, Secretaria de Tecnologia Industrial, 1985. 344 p.

PEREIRA, J. C. **Motores e geradores: princípios de funcionamento, instalação, operação e manutenção de grupos diesel geradores**. Disponível em: <<http://www.perfectum.eng.br/pdf/diesel1.pdf>>. Acesso em: 18 jul. 2007.

PARENTE, E. J. de S. **Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado**. Disponível em: <http://www.tecbio.com.br>>. Acesso em: 21 abr. 2006.

PETROBRÁS Distribuidora. **Óleo Diesel**. Disponível em:
<http://www2.petrobras.com.br/produtos_servicos/port/Produtos/Oleo_Diesel/Oleo_Diesel_Rod_Metropolitano.asp>. Acesso em: 18 jan. 2007.

RABELO, I. D.; HATAKEYAMA, K.; CRUZ, C. M. S. **Estudo de desempenho de combustíveis convencionais associados a biodiesel obtido pela transesterificação de óleo usado em fritura**. Disponível em:
<www.cefet.br/revistaeduca&tecnologia>. Acesso em: 10 jun. 2007.

REIS, A. V. et al. Combustíveis e lubrificantes. In: _____. **Motores, tratores, combustíveis e lubrificantes: combustíveis**. Pelotas: UFPel, 1999. Cap 3, p.259-261.

SALVADOR, N. **Desempenho de um motor de ciclo Diesel utilizando o Éster Metílico do óleo de *Joannesia Princeps*, Vell., em substituição e em misturas com o óleo Diesel**. 1984. 54f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SILVA, F. M. da, LOPES, A.; CASTRO NETO, P.; DABDOUB, M.; SALVADOR, N.; SILVA, R.P.da. Desempenho comparativo de motor de combustão alimentado com diesel, B50 e B100. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS, GORDURAS E BIODIESEL, 2004, Varginha. **Anais...** Varginha, MG, UFLA.

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, Agrener, 2000, Campinas. **Anais...** Campinas, SP, UNICAMP.

TORRES, E. A.; SANTOS, D. C.; SOUZA, D. V. D.; PEIXOTO, L. B.; FRANÇA, T. Ensaio de motores estacionários do ciclo diesel utilizando Óleo Diesel e Biodiesel (B100). In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, Agrener, 2006, Campinas. **Anais...** Campinas, SP, UNICAMP.

ANEXOS

ANEXO A	Página
TABELA 1A – Dados observados quando utilizado o óleo diesel como combustível no motor.....	65
TABELA 2A – Dados observados quando utilizado o biodiesel de soja como combustível no motor.....	66
TABELA 3A – Dados observados quando utilizado o biodiesel de oliva como combustível no motor.....	67

ANEXO A

Dados Originais

TABELA 1A – Dados observados quando utilizado o óleo diesel como combustível no motor.

Repe- tição	Rotação TDP (rpm)	Rotação do motor (rpm)	Torque (N.m)	Potência efetiva (kW)	H manômetro (m)	Consumo de combustível (l/h)	Temp. ar (°C)
1	568	2017	578	34,6	0,151	10,31	22
1	505	1800	671	35,2	0,114	9,94	23
1	414	1500	692	29,9	0,092	8,53	25
1	320	1150	664	22,1	0,054	7,57	22
1	237	850	620	15,3	0,030	6,40	22
2	567	2100	599	36,0	0,149	10,25	23
2	505	1550	644	33,6	0,118	9,98	23
2	417	1400	684	29,9	0,094	8,20	19
2	318	1100	650	21,4	0,053	6,99	19
2	232	800	602	14,7	0,029	5,92	19
3	566	1950	521	30,7	0,150	10,2	19
3	490	1700	699	36,5	0,112	9,88	19
3	409	1600	698	29,8	0,091	8,99	19
3	319	1100	679	22,3	0,052	7,90	19
3	240	850	652	16,5	0,029	6,78	18
4	571	2000	615	37,1	0,147	10,48	18
4	501	1800	671	35,5	0,112	10,25	18
4	418	1490	694	30,2	0,089	9,37	19
4	320	1150	662	22,6	0,050	8,29	19
4	237	800	609	14,8	0,028	6,93	18

TABELA 2A – Dados observados quando utilizado o biodiesel de soja como combustível no motor.

Repe- tição	Rotação TDP (rpm)	Rotação do motor (rpm)	Torque (N.m)	Potência efetiva (kW)	H manômetro (m)	Consumo de combustível (l/h)	Temp. ar (°C)
1	563	1950	601	35,4	0,149	6,95	18
1	491	1700	650	33,2	0,112	6,69	18
1	414	1450	660	28,6	0,088	6,24	18
1	313	1090	638	21,0	0,071	5,33	19
1	241	820	557	14,4	0,028	5,03	19
2	574	2000	597	36,0	0,157	7,73	18
2	492	1700	652	33,7	0,118	7,26	19
2	416	1460	657	28,5	0,092	6,79	19
2	330	1120	631	21,5	0,050	5,99	20
2	248	850	606	15,7	0,028	5,18	19
3	578	2000	565	34,1	0,146	8,16	20
3	497	1710	592	31,0	0,110	7,65	20
3	428	1500	600	26,9	0,086	7,19	21
3	336	1100	585	19,6	0,048	6,14	23
3	241	810	561	14,2	0,026	5,35	24
4	599	2100	551	32,9	0,151	8,83	23
4	497	1750	611	31,0	0,115	8,00	23
4	415	1490	615	26,4	0,090	7,35	23
4	318	1100	587	19,7	0,049	6,31	22
4	233	800	551	13,5	0,028	5,45	23

TABELA 3A – Dados observados quando utilizado o biodiesel de oliva como combustível no motor.

Repe- tição	Rotação TDP (rpm)	Rotação do motor (rpm)	Torque (N.m)	Potência efetiva (kW)	H manômetro (m)	Consumo de combustível (l/h)	Temp. ar (°C)
1	589	2150	531	32,7	0,160	8,40	24
1	492	1700	591	30,1	0,122	7,75	24
1	423	1500	596	26,8	0,096	7,42	24
1	320	1140	584	19,9	0,076	6,61	24
1	235	790	546	13,6	0,029	5,57	25
2	585	2050	497	31,3	0,158	9,41	25
2	493	1700	560	29,0	0,120	8,67	25
2	414	1420	582	25,3	0,094	7,82	25
2	330	1110	569	19,7	0,053	7,18	25
2	237	800	535	13,3	0,029	5,93	25
3	583	2020	562	34,0	0,164	8,87	26
3	483	1680	625	31,4	0,117	8,06	26
3	410	1410	633	27,3	0,093	7,46	26
3	328	1110	608	21,3	0,052	6,77	26
3	236	790	564	13,7	0,029	5,54	26
4	587	2060	503	30,4	0,163	9,28	26
4	497	1760	553	29,2	0,123	8,50	26
4	420	1400	667	25,7	0,097	7,45	26
4	310	1090	645	21,5	0,054	6,19	27
4	221	750	601	13,7	0,029	5,11	27