

# DESEMPENHO DE MOTOR DIESEL QUATRO TEMPOS ALIMENTADO COM BIODIESEL DE ÓLEO DE SOJA (B 100)

## Performance of four stroke diesel cycle engine supplied with soybean oil biodiesel (B 100)

Carlos Eduardo Silva Volpato<sup>1</sup>, Alexon do Prado Conde<sup>2</sup>, Jackson Antonio Barbosa<sup>3</sup>, Nilson Salvador<sup>4</sup>

### RESUMO

Objetivou-se, neste trabalho, avaliar o desempenho de um motor de ciclo diesel quatro tempos e quatro cilindros utilizando biodiesel de óleo de soja (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 (650, 570, 490, 410, 320 e 240 rpm). O motor alimentado com biodiesel apresentou torque e potência reduzida um pouco menor que quando alimentado com óleo diesel fóssil, entretanto, os consumos específico e horário, apresentaram resultados mais satisfatórios que o diesel fóssil.

**Termos para indexação:** Combustível alternativo, eficiência energética, motor de combustão.

### ABSTRACT

The aim of this work was to compare the performance of a four stroke diesel cycle engine and a four cylinder using biodiesel made from soy oil (B100), in comparison with the diesel oil. The parameters analyzed were: effective power and reduced power, torque, specific and energetic consumption of fuel, thermal-mechanics and volumetric efficiency. An entirely randomized experiment design was installed (DIC) in a factorial structure, the analysis of variance was carried out and the Tukey test was applied at the level of 5%. Five rotation levels were researched in four replications (650, 570, 490, 410, 320, and 240 rpm). The engine fed with biodiesel presented torque and reduced power a little lower than the engine fed with fossil diesel. However, specific and hourly consumptions presented more satisfactory results.

**Index terms:** Alternative fuel, energy efficiency, combustion engine.

(Recebido em 4 de outubro de 2007 e aprovado em 3 de junho de 2008)

### INTRODUÇÃO

O 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, na qual é removida a glicerina. Tal como o álcool está para a substituição da gasolina nos motores de ciclo Otto, o biodiesel substitui o óleo diesel nos motores de ciclo diesel, com a vantagem de não requererem adaptações mecânicas. Enquanto o uso de outros combustíveis limpos, como o gás natural ou biogás e o álcool etílico, requerem 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.

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.

A produção de biocombustível, 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. Os principais óleos testados nessa investigação foram os derivados de macaúba, pinhão-manso, indaiá, buriti, pequi, mamona, soja, babaçu, cotieira, tinguí e pupunha.

Segundo Costa Neto et al. (2000), a avaliação da qualidade carburante de óleos vegetais requer a determinação analítica de, principalmente, seu poder

<sup>1</sup>Doutor em Engenharia Agrícola – Departamento de Engenharia/DEG – Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 – 37200-000 – Lavras, MG – volpato@ufla.br

<sup>2</sup>Mestre em Engenharia Agrícola – Centrais Elétricas de Minas Gerais/CEMIG – Rua São Paulo, 164 – Centro – 37002-110 – Varginha, MG –alconde@cemig.com.br

<sup>3</sup>Doutor em Engenharia Agrícola – Departamento de Engenharia/DEG – Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 – 37200-000 – Lavras, MG – jackson\_barbosa@hotmail.com

<sup>4</sup>Doutor em Engenharia Agrícola – Departamento de Engenharia/DEG – Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 – 37200-000 – Lavras, MG – salvador@ufla.br

calorífico, índice de cetano, curva de destilação, viscosidade e ponto de névoa.

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 de CO<sub>2</sub> 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<sup>-1</sup> 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.

Maziero et al. (2005) 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.

Barbosa et al. (2008) avaliando o desempenho de um motor alimentado com óleo diesel mineral e misturas deste com biodiesel nas proporções equivalentes a B2 (98% de diesel mineral e 2% de biodiesel), B5 (95% de diesel mineral e 5% de biodiesel), B20 (80% de diesel mineral e 20% de biodiesel) e B100 (100% de biodiesel), concluíram que a potência do motor aumentava respectivamente do B100 ao diesel mineral, entretanto, na ordem inversa, a eficiência térmica diminuía do diesel mineral para as misturas crescentes de biodiesel, sendo 4% menor para o B100. O consumo energético diminuía à medida que se aumentava a quantidade de biodiesel misturada ao diesel mineral.

## MATERIALE MÉTODOS

O trabalho foi conduzido no Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícola do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras. Foi instalado um experimento com delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 2 x 6, envolvendo dois tipos de combustível e seis níveis de rotação do motor, com quatro repetições.

Os tratamentos utilizados foram os óleos diesel comercial e biodiesel de soja (B100) em seis níveis de rotação do motor: 650, 570, 490, 410, 320 e 240 rpm, ou seja, 100, 88, 75%, 63, 49 e 37% da rotação máxima, respectivamente.

Foi feita análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey, a 5%, utilizando-se o programa computacional Sisvar®, nos parâmetros de torque, potência efetiva e consumo horário de combustível, em função da rotação na tomada de potência do trator (TDP).

O diesel utilizado nos ensaios foi obtido na rede de abastecimento automotiva local. O biodiesel utilizado foi obtido na Usina de Biodiesel de Varginha, em base etílica. 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. A viscosidade dinâmica e a cinemática foram obtidas no laboratório de termodinâmica da Universidade de São Carlos - SP.

Foi utilizado um trator novo marca Massey Ferguson, modelo 275 Compacto, com motor de ciclo diesel, marca Perkins, modelo A4-4.1, com aspiração natural de 4 tempos, sistema de injeção com bomba rotativa, refrigerado a água, com 4 cilindros em linha, cilindrada

total de 4.100 cm<sup>3</sup>, com potência nominal, segundo o fabricante, de 75 cv (56 kW), a 2.200 rpm.

Foi adotada a norma NBR ISO 1585 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1996) para determinação dos valores de torque (N.m), RPM na TDP e potência (kW). Esses foram obtidos utilizando-se um dinamômetro, modelo NEB 200, marca AW Dynamometer (Figura 1A). Os respectivos valores de torque, potência e rotação eram acompanhados em um display digital de bancada, conforme Figura 1B.

O consumo de combustível horário do motor foi determinado por um fluxômetro marca Oval, modelo LSN41, em conjunto com seu display, o qual foi aferido para leitura em litros por hora e massa específica do fluido de 0,84 (g.cm<sup>-3</sup>). O poder calorífico inferior (PCI) (kJ.kg<sup>-1</sup>) foi determinado por meio Equação 1, a partir do poder calorífico superior (PCS) (kJ.kg<sup>-1</sup>), conforme Moreira (2007).

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

A potência efetiva foi mostrada diretamente no display, porém, ela pode ser calculada com o torque T, correspondente à velocidade angular pela Equação 2 (MIALHE, 1996).

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

em que:

H<sub>e</sub> = potência efetiva (kW);

T = torque (N.m);

N = velocidade angular (rpm).

A potência reduzida obtida na TDP foi recalculada conforme a Equação 3 (SALVADOR, 1984).

$$\frac{H_r}{H_e} = \frac{P_2}{P_1} \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{0.5} \quad (3)$$

em que:

H<sub>r</sub> = potência reduzida (kW);

H<sub>e</sub> = potência efetiva (kW);

P<sub>1</sub> = pressão atmosférica, por ocasião da prova (mm Hg);

P<sub>2</sub> = pressão atmosférica padrão (760 mm Hg);

T<sub>1</sub> = temperatura absoluta por ocasião da prova (K);

T<sub>2</sub> = temperatura absoluta padrão NBR ISO 1585/1996 (298 K).

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).

Para a determinação do consumo específico, aplicou-se a Equação 4 conforme Mialhe (1996).

$$C_e = \frac{C_h}{H_e} \quad (4)$$

em que:

C<sub>e</sub> = consumo específico de combustível [g.(kW.h)<sup>-1</sup>];

C<sub>h</sub> = consumo horário de combustível (g.h<sup>-1</sup>);

H<sub>e</sub> = potência efetiva (kW).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas para os dois 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 1) indicou que o resultado



(A)



(B)

Figura 1 – Dinamômetro acoplado na TDP do trator (A) e display digital (B)

das médias para os biocombustíveis não diferiram estatisticamente, diferindo do óleo diesel.

Tabela 1 – Médias de torque em relação aos combustíveis

| Tratamentos | Médias (N.m) |
|-------------|--------------|
| B100 soja   | 589,3a       |
| Óleo diesel | 645,2b       |

Ao se analisar o efeito do torque em relação às rotações (TDP), conforme Tabela 2, 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 2 – 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 2 e 3 mensurou-se o torque para a rotação de trabalho, 540 rpm (TDP), ou seja, 85% da máxima. Para óleo diesel, o torque a 540 rpm foi de 635,3 N.m e 608,6 N.m para B100 de soja.

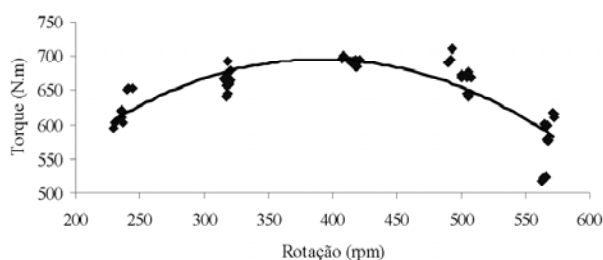


Figura 2 – Curva de tendência do torque para óleo diesel.

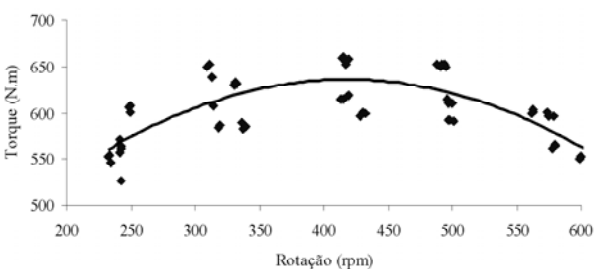


Figura 3 – Curva de tendência do torque para B100 soja.

As médias de potência efetiva em relação aos combustíveis testados estão disponíveis na Tabela 3. Pôde-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 foi 5%, menor, comparativamente ao óleo diesel, indicando que esses combustíveis apresentaram resultados tecnicamente satisfatórios.

Tabela 3 – Médias de potência efetiva em relação aos combustíveis

| Tratamentos | Médias (kW) |
|-------------|-------------|
| B100 soja   | 26,39a      |
| Óleo diesel | 27,78b      |

Ao se analisar o efeito da potência efetiva em relação às rotações na tomada de potência, conforme Tabela 4, 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 4 – Médias da potência efetiva em relação aos níveis de rotação (TDP)

| Tratamentos (rpm) | Médias (kW) |
|-------------------|-------------|
| 240               | 14,56a      |
| 320               | 21,13b      |
| 410               | 27,99c      |
| 490               | 32,74d      |
| 570               | 34,44d      |

Analisando-se os resultados da potência reduzida na rotação de trabalho (540 rpm), observou-se que B100 fóssil apresentou o melhor resultado (39,84 kW). Na mesma rotação, obteve-se 37,53 kW para o B100 soja, ou seja, 6,1%. Conforme se observa nas Figuras 4 e 5, as curvas de tendência da potência reduzida apresentaram comportamento semelhante àquelas apresentadas por Oveg (1985).

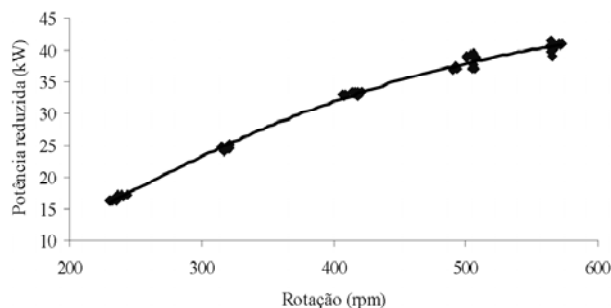


Figura 4 – Curva de tendência da potência reduzida para óleo diesel.

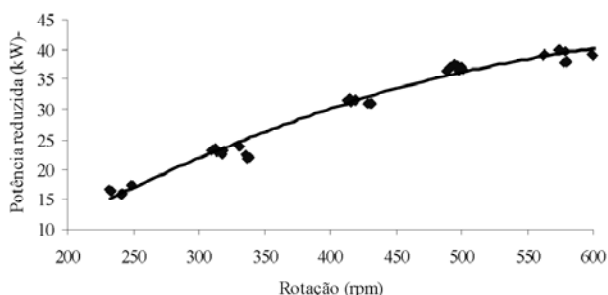


Figura 5 – Curva de tendência da potência reduzida para B100 soja.

Pelos dados da Tabela 5, 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 foi 17% menor em comparação ao óleo diesel. Vale ressaltar a tendência de menor consumo para o biodiesel em motor com aspiração natural devido ao empobrecimento da mistura ocasionada por esse em relação ao óleo diesel fóssil.

Tabela 5 – Médias de consumo horário em relação dos combustíveis

| Tratamentos | Médias (L.h <sup>-1</sup> ) |
|-------------|-----------------------------|
| B100 soja   | 7,35a                       |
| Óleo diesel | 8,60b                       |

Ao se analisar o efeito do consumo horário de combustível em relação às rotações na tomada de potência, conforme Tabela 6, 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 6 – Médias do consumo horário em relação aos níveis de rotação (TDP)

| Tratamentos (rpm) | Médias (L.h <sup>-1</sup> ) |
|-------------------|-----------------------------|
| 240               | 5,75a                       |
| 320               | 6,75b                       |
| 410               | 7,58c                       |
| 490               | 8,58d                       |
| 570               | 8,92d                       |

Analisando-se os resultados de consumo específico de combustível com relação à rotação de trabalho

na tomada de potência (540 rpm), observa-se que o óleo diesel apresentou maior valor médio, sendo da ordem de 257,26 g.(kW.h)<sup>-1</sup>. O biocombustível B100 soja apresentou o melhor resultado, 224,32 g.(kW.h)<sup>-1</sup>, o que equivale a 14,66% menos. Esse resultado é semelhante aos encontrados por Rabelo et al. (2007), quando testaram óleo de soja usado em fritura de alimentos. Nas Figuras 6 e 7, observam-se as curvas de tendência referentes ao consumo específico dos combustíveis utilizados.

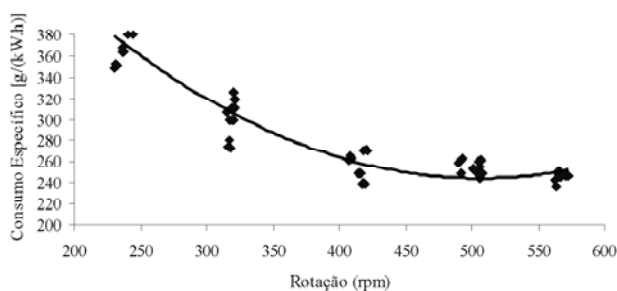


Figura 6 – Curva de tendência do consumo específico para óleo diesel.

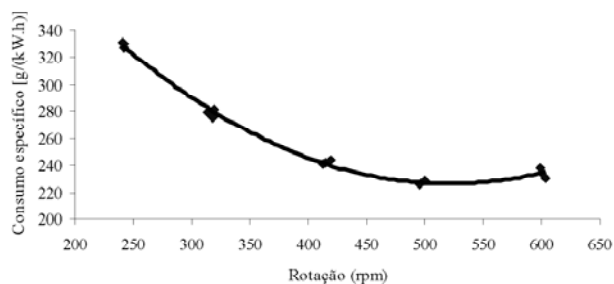


Figura 7 – Curva de tendência do consumo específico para B100 soja.

## CONCLUSÃO

De acordo com as condições operacionais observadas na época da pesquisa, pôde-se obter as seguintes conclusões:

Os testes realizados mostraram a viabilidade de operação de um motor ciclo diesel com biocombustível (B100) soja.

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

O diesel fóssil obteve resultados de potência reduzida melhor que o biodiesel de soja, sendo 6,1% maior ao biodiesel, na rotação de trabalho.

O biodiesel de soja apresentou menor consumo específico e energético em relação ao diesel, sendo 14,66% menor na rotação de trabalho (540 rpm).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 1585**: veículos rodoviários: código de ensaio de motores: potência líquida efetiva. Rio de Janeiro, 1996.

BARBOSA, R. L.; SILVA, F. M. DA; SALVADOR, N.; VOLPATO, C. E. S. Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1588-1593, set./out., 2008.

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**, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 531-537, jul./ago. 2000.

FERRARI, R. A.; SCABIO, A.; OLIVIERA, V. S. **Produção e uso de biodiesel etílico na UEPG**. Disponível em: <[http://uepg.br/prosp/publicatio/exa/2004\\_6/06.pdf](http://uepg.br/prosp/publicatio/exa/2004_6/06.pdf)>. Acesso em: 23 abr. 2007.

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...** Lavras: UFLA, 2005. p. 729-733.

MIALHE, L. G. **Máquinas motoras na agricultura**. São Paulo: Pedagógica e Universitária/EDUSP, 1980. 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: USP-Escola de Engenharia de São Carlos, 2007. Apostila. Disponível em: <<http://www.netef.eesc.sc.usp.br/moreira/COMBUSTÍVEIS.ppt>>. Acesso em: 28 maio 2007.

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

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/revistaeducao&tecnologia](http://www.cefet.br/revistaeducao&tecnologia)>. Acesso em: 10 jun. 2007.

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. 54 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1984.

SILVA, F. M. da; LOPES, A.; CARNEIRO 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...** Lavras: UFLA, 2004. CD-ROM.

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)**. [S.l.]: AGRENER, 2006.