

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 Volpato¹, Alexon do Prado Conde², Jackson Antonio Barbosa³, Nilson Salvador⁴

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

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

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

³Doutor em Engenharia Agrícola – Departamento de Engenharia/DEG – Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 – 37200-000 – Lavras, MG – jackson_barbosa@hotmail.com

⁴Doutor 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 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⁻¹ 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 cm³, 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⁻³). 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).

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

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_e = 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_r = potência reduzida (kW);

H_e = potência efetiva (kW);

P₁ = pressão atmosférica, por ocasião da prova (mm Hg);

P₂ = pressão atmosférica padrão (760 mm Hg);

T₁ = temperatura absoluta por ocasião da prova (K);

T₂ = 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_e = consumo específico de combustível [g.(kW.h)⁻¹];

C_h = consumo horário de combustível (g.h⁻¹);

H_e = 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.

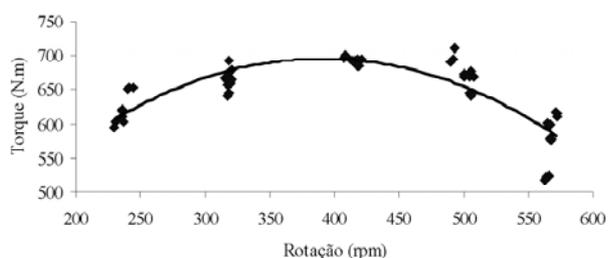


Figura 2 – Curva de tendência do torque para óleo diesel.

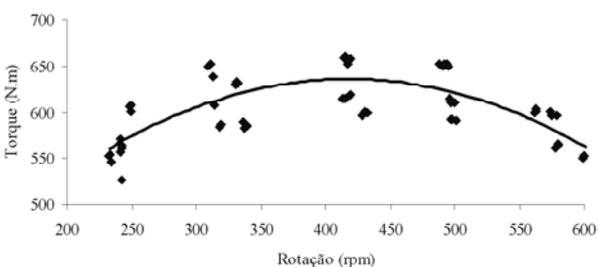


Figura 3 – Curva de tendência do torque para B100 soja.

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).

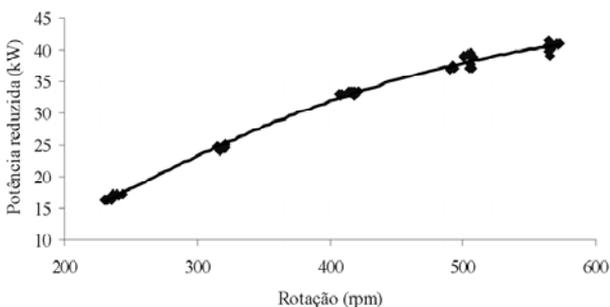


Figura 4 – Curva de tendência da potência reduzida para óleo diesel.

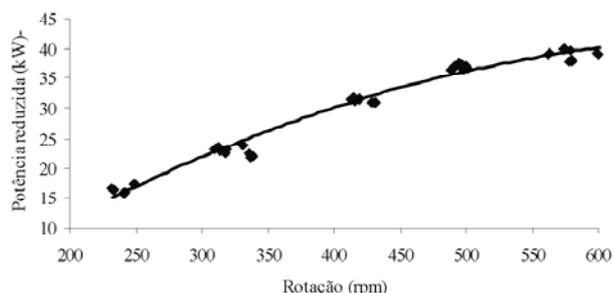


Figura 5 – Curva de tendência da potência reduzida para B100 soja.

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 ⁻¹)
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 ⁻¹)
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)⁻¹. O biocombustível B100 soja apresentou o melhor resultado, 224,32 g.(kW.h)⁻¹, 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.

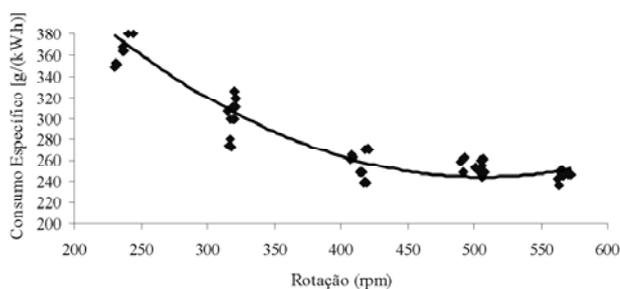


Figura 6 – Curva de tendência do consumo específico para óleo diesel.

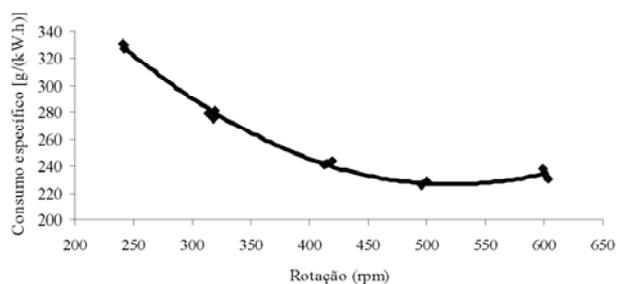


Figura 7 – Curva de tendência do consumo específico para B100 soja.

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>. 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>. 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.