



21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

DESEMPENHO E EMISSÕES DO BIODIESEL DE MAMONA EM UM MOTOR DIESEL

Aesley Soares Nobre, aesleyn@gmail.com¹
Victor Teixeira Barros, vteixeirabarrosgmail.com¹
Justino Carvalho Cartaxo, justino.cartaxo@yahoo.com.br¹
Matheus Casimiro Monte Farias, matheus.cmf@hotmail.com¹
André Valente Bueno, bueno@ufc.br¹
Célio Loureiro Cavalcante Jr, celio@gpsa.ufc.br¹
Francisco Murilo Tavares de Luna, murilo@gpsa.ufc.br¹

¹Universidade Federal do Ceará, Laboratório de Motores de Combustão Interna, Rua Campus do Pici S/N, bloco 715, CEP 60440-554, Fortaleza, CE.

Resumo: Os impactos ambientais e a diminuição das reservas de petróleo são empecilhos ao uso continuado de combustíveis fósseis na matriz energética do Brasil e de todo o mundo. Embora a diversificação das matérias-primas para a produção de biocombustíveis possa auxiliar na solução deste problema, a maior parte dos estudos de desempenho e emissões de biodiesel tem se concentrado em ésteres metílicos de baixa viscosidade obtidos de óleos vegetais refinados como os de soja, canola e girassol. Uma melhor compreensão dos efeitos da utilização de biodieseis de segunda geração, como o de gordura animal e mamona, faz-se necessária para suprir essa lacuna. Com esse objetivo, estudaram-se no presente trabalho os efeitos da utilização de misturas de biodiesel de mamona (*Ricinus communis* L.) em motores diesel. Os experimentos foram desenvolvidos em um motor diesel, modelo MWM 229T6, com injeção direta e turbo compressor. Utilizaram-se misturas de biodiesel de mamona em 10% e 20% em volume combinados ao diesel, com três regimes de carga. Observou-se uma redução na eficiência térmica de até 5,88%, bem como um aumento no consumo específico de até 9%. Os efeitos da alta viscosidade desse biocombustível, que é de 14,5 cSt a 40° C, ocasionaram uma queda de até 2,71% na potência entregue pelo motor. Além disso, houve um aumento nas emissões de NOx e CO em até 17,43% e 58% respectivamente, em contrapartida, uma redução de 10,85% na produção de material particulado em condições de alta carga.

Palavras-chave: Biodiesel. Mamona. Motores. Combustão.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento do consumo de petróleo devido à expansão da atividade industrial aliado à diminuição das reservas disponíveis tem causado elevação de seu preço no mercado (BHUIYA *et al.*, 2016). O biodiesel pode ser utilizado como substituição parcial do diesel em misturas ou mesmo sem adição de diesel mineral, levando em conta modificações no motor para atender as diferenças de características desses combustíveis (DERMIBAS, 2009).

Os biodieseis obtidos de óleos comestíveis, como os de soja, girassol e milho, são os chamados biodieseis de primeira geração. Os biodieseis de fontes não comestíveis, produzidos a partir de fontes como o óleo de mamona e sebo bovino, não competem com a produção de alimentos e são uma opção atrativa para países com baixa produção de óleos comestíveis (BHUIYA *et al.*, 2016). Os biodieseis de fontes não comestíveis de origem vegetal não requerem solo de alta fertilidade ou condições climáticas favoráveis para cultivo; além disso, a mamoneira é bem aplicável a multicultura por não competir com outras variedades de plantas, sendo possível plantá-la com pouco impacto sobre áreas de vegetação nativa.

Apesar de contar com apoio governamental no início da implantação do programa de biodiesel no Brasil, o interesse inicial pelo uso do óleo de mamona como matéria-prima foi enfraquecido devido ao seu alto custo: um litro de óleo de mamona custa R\$6,20, enquanto o custo de produção do diesel S-10 é de R\$2,04 por litro (SNA, 2016). O preço do óleo de mamona é elevado devido a sua grande aplicabilidade em diversas indústrias químicas, como na produção de plásticos, fibras sintéticas, resinas, lubrificantes, entre diversos outros produtos (EMBRAPA, 2015).

Outro obstáculo é a resolução 07/2008 da ANP, que criou critérios para comercialização de biodiesel. As propriedades físico-químicas do biodiesel de mamona não se enquadram em diversas das estipulações da norma, as de maior impacto são: sua viscosidade de 14,5 cSt e densidade de 924 kg/m³, contra os máximos de 6 cSt e 900 kg/m³ da norma, são exemplos de não-conformidade. Entretanto, em 2015 foi registrada uma tendência mundial de diminuição do preço e aumento da produção de mamona, com a safra brasileira crescendo 52% em relação ao ano anterior (CONAB, 2015; ANP, 2015).

Apesar do cenário econômico desfavorável e de sua pequena participação na produção nacional de biodiesel, o estudo dos efeitos operacionais do biodiesel da mamona apresenta um atrativo singular: suas características físico-químicas extremas e suas dissimilaridades de propriedades com relação aos outros biodieseis realçam os efeitos da adição do biocombustível sobre o comportamento do motor. Esta é a motivação do presente trabalho, que tem por objetivo determinar o impacto da adição do éster metílico de mamona ao óleo diesel mineral sobre o desempenho e as emissões de um motor diesel turbo e, em seguida, discutir estes resultados considerando-se as alterações de propriedades do combustível impostas pelo biodiesel de mamona.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Combustíveis utilizados

O éster metílico do óleo de mamona foi usado como substituto parcial para o combustível diesel em concentrações de 10% e 20% por volume. O combustível base usado foi o óleo diesel mineral de baixo teor de enxofre (50 ppm). Na Tabela 1 estão listadas as propriedades químicas e físicas relevantes do combustível de teste, sendo BM 10 e BM 20 as misturas de biodiesel de mamona em concentração de 10% e 20%. A alta viscosidade do éster metílico de óleo de mamona pode ser atribuída a pontes de hidrogênio dos grupos hidroxila no ácido ricinoleico (Bueno et al., 2009). O biodiesel de mamona utilizado foi produzido pelo processo de transesterificação no Laboratório de Motores de Combustão Interna (LMCI) da UFC. As análises das propriedades físico-químicas do biodiesel foram feitas pelo Núcleo de Pesquisas e Lubrificantes (NPL).

Tabela 1. Propriedades físico-químicas do biodiesel de mamona e do diesel

Propriedades	Combustível		
	Diesel A	Biodiesel de mamona	RANP 45/2014
ρ (kg/m ³)	820	924,4	850 - 900
PCI (MJ/kg)	42,25	37,33	-
Fórmula empírica	C ₁₂ H ₂₃	C _{17,96} H _{35,82} O _{2,86}	-
Viscosidade cinemática a 40°C (mm ² /s)	2,53	14,5	3 - 6
Ponto de fluidez	-15°C	-30°C	-

Tabela 2. Poder calorífico e fórmula empírica das misturas de combustível

Propriedades	BM 10	BM 20
PCI (MJ/kg)	41,76	41,27
Fórmula empírica	C _{12,39} H _{23,84} O _{0,188}	C _{12,82} H _{24,75} O _{0,391}

2.2. Equipamentos utilizados

Os experimentos deste estudo foram desenvolvidos em um motor diesel modelo MWM 229T6 de injeção direta turbo-alimentado. O controle de carga do motor foi efetuado com um dinamômetro AC em uma bancada dinamométrica automatizada. Os gases de escape do motor foram analisados com um opacímetro dynoptic DSL-220 MkIII, analisadores de gases da Fuji Electric e da CAI 600 series. Uma ilustração esquemática da configuração da bancada dinamométrica é mostrada na Figura 1 discriminando-se equipamentos, sensores e atuadores. Na figura aparecem os fluxos de monitorados tais como temperatura e pressão nos fluidos do motor, consumo de ar, consumo de combustível, torque, rotação e as emissões dos gases de escape. O motor foi operado em cargas de 33%, 66% e 100% com relação ao seu torque máximo, que foram controladas pelo dinamômetro. Para os valores de carga estabelecidos a pressão efetiva média de frenagem foi de, respectivamente, 250 kPa, 460 kPa e 720 kPa.

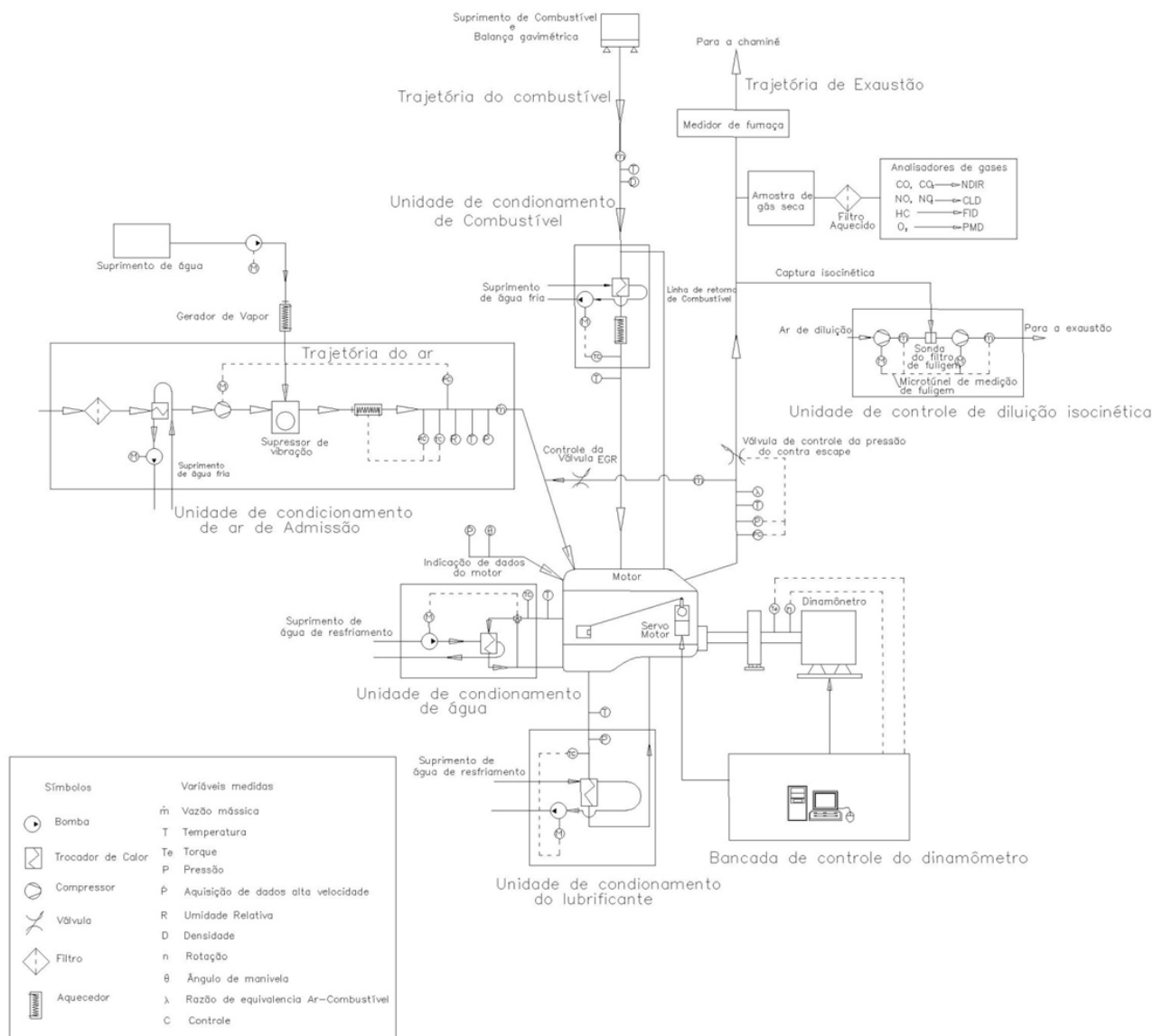


Figura 1. Bancada Dinamométrica

2.3. Equações utilizadas

Os parâmetros utilizados para avaliar o desempenho do motor com o combustível utilizado são o consumo específico de combustível (bsfc), dado pela Equação (1), e a eficiência térmica (η_t) dada na Equação (2). O consumo específico de combustível tem relação direta com poder calorífico inferior (PCI) e a eficiência térmica. Sabendo-se que o poder calorífico inferior do biodiesel é menor devido a presença do oxigênio em sua estrutura, pode-se também concluir que as misturas também possuem um poder calorífico menor.

$$\text{bsfc} (\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}) = \frac{1000 \cdot \dot{m}_f (\text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})}{P_h (\text{kW})} \quad (1)$$

$$\eta_t = \frac{3600}{\text{bsfc} (\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}) \cdot \text{PCI}_m (\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})} \quad (2)$$

O valor da pressão efetiva média de frenagem (bmep), Equação (3), representa a carga em que o motor estava para cada valor de emissões e desempenho.

$$\text{bmep} (\text{kPa}) = \frac{12,56 T_b (\text{Nm})}{V_d (\text{l})} \quad (3)$$

Foram utilizados os analisadores por infravermelho não-dispersivo, ionização de chama e luminescência química para se extrair as emissões CO, HC e NOx. Os valores de material particulado foram colhidos através de um equipamento que media a opacidade percentual. O material particulado total foi mensurado com um aparelho do tipo “smoke meter” obtendo-se sua concentração em unidades de mg/m³.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Consumo específico de combustível

Os testes de desempenho das misturas mostraram um aumento do consumo específico de combustível em relação ao diesel conforme se observa na Tabela 3. O aumento em baixa carga foi de 7,45% e 9% respectivamente para o BM 10 e BM 20, para a média carga houve redução em relação à baixa carga, porém ainda sim houve um aumento no consumo para o BM 10 de 2% e para o BM 20 de 6%. Os resultados de alta carga mostraram uma redução no consumo de combustível em relação aos outros regimes, porém havendo um aumento no consumo em relação ao diesel de 3,76% e 7,76% para as misturas BM 10 e BM 20. Portanto, com a adição de biodiesel de mamona ao diesel observou-se uma elevação do consumo específico. Também foi possível observar que as misturas BM20 possuíam o maior consumo específico comparado com as misturas BM10 que possuíam menor teor de biodiesel.

Estes dados estão em acordo com o observado na literatura. Chen et al., 2008 relatam que as misturas têm maior consumo específico em comparação com diesel mineral devido ao menor poder calorífico, que pode ser atribuído ao oxigênio na formulação do combustível. Da Equação (3) observa-se que mantendo-se um patamar de eficiência térmica o consumo específico de combustível torna-se inversamente proporcional ao poder calorífico do combustível. Na Tabela 2 nota-se que o Poder Calorífico Inferior (PCI) do biodiesel é menor que o do diesel mineral. Bueno (2006) e Valente et al. (2010) relatam que a adição de biodiesel ocasiona uma deterioração do consumo específico devido a redução do seu conteúdo energético.

Tabela 3. Resultados de desempenho e consumo do motor

	Regime de plena carga			Regime de média carga			Regime de baixa carga		
	Diesel A	BM 10	BM 20	Diesel A	BM 10	BM 20	Diesel A	BM 10	BM 20
bsfc (g.kWh⁻¹)	219,61	227,87	236,67	240,03	244,84	254,46	293,11	314,94	319,56
η_t (%)	38,79	37,88	36,94	35,49	35,25	34,36	29,07	27,40	27,36

3.1.1. Eficiência térmica

A Eficiência térmica é um critério usado para analisar a eficiência do motor, sendo definida em função da potência de frenagem com a potência térmica do combustível. Os resultados experimentais para eficiência térmica apresentados na Tabela 3 mostram uma diminuição da eficiência térmica do motor quando utilizadas misturas de biodiesel em relação aos resultados para o diesel de petróleo. A redução em baixa carga foi de 5,74% para a mistura BM

10 e 5,88% para BM 20, em média carga houve uma pequena redução de 0,67% para o BM 10 assim como também para o BM 20 sendo de 2,52%. No regime de alta carga a redução da eficiência térmica foi de 2,34% e 4,76% para as misturas BM 10 e BM 20 respectivamente.

Há pouca disponibilidade de dados para os efeitos do biodiesel de mamona sobre a eficiência térmica do motor. Panwar et al., 2010, afirmaram em seus estudos que a mistura BM 10 apresentou maior eficiência térmica em alta e media carga. Já em baixa carga os autores observam que o biodiesel de mamona apresentou menor eficiência térmica em relação ao diesel.

3.2. Análise de emissões do motor

3.2.1. Emissões de CO

A Tabela 4 apresenta os dados obtidos experimentalmente para emissões de CO. O aumento de emissão de CO do biodiesel de mamona em relação à emissão do diesel de petróleo em baixa carga foi de 9,14% para a mistura BM 10 e de 16,4% para o BM 20, em média carga houve uma redução de 18,92% para BM10 e aumento de 39,76% para o BM20. Para alta carga, houve um aumento de 17,88% e 58,08% para o BM10 e o BM 20 respectivamente.

Valente et al., 2010, observaram que há um aumento na emissão de CO conforme se acrescenta biodiesel ao diesel, também como foi observado uma redução das emissões com o aumento da carga. Esse autor ressalta que a alta densidade das misturas ocasionam um aumento na quantidade de combustível injetado dificultando a atomização do mesmo gerando uma combustão incompleta, favorecendo assim um aumento na emissão de CO

Tabela 4. Resultados das emissões poluentes brutas

	Regime de plena carga			Regime de média carga			Regime de baixa carga		
	Diesel A	BM 10	BM 20	Diesel A	BM 10	BM 20	Diesel A	BM 10	BM 20
NO_x (ppm)	1430,89	1611,45	1680,35	887,10	1009	1027,3	453,06	510,64	497,67
CO (ppm)	43,90	51,75	69,40	20,72	16,80	28,96	135,18	147,54	157,35
Material Particulado (mg.m⁻³)	49,55	48,34	44,17	16,29	14,53	14,66	7,62	7,69	8,88

3.2.2. Emissões de NO_x

Os resultados presentes na Tabela 4 mostram que há um aumento das emissões de NO_x para as misturas de biodiesel de mamona com relação ao diesel. Em baixa carga este aumento foi de 12,70% para o BM 10 e de 9,85% para o BM 20, já em média carga o aumento para o BM 10 foi de 13,74% e para o BM 20 de 15,80%. Em alta carga os aumentos foram de 12,61% e de 17,43% para o BM 10 e BM 20 respectivamente.

Islam et al., 2015 também apontaram resultados de aumento nas emissões de NO_x em 5% para baixa carga e 10% para alta carga para mistura B20, além de reafirmar que o aumento de porcentagem de biodiesel no diesel aumenta as emissões de NO_x, pois o combustível é afetado com o aumento da temperatura de chama adiabática e com o aumento da taxa de combustão pré-misturada.

3.2.3. Emissões de material particulado

Os resultados obtidos para as emissões de material particulado apresentados na tabela 4 para plena carga indicam uma redução em relação ao diesel de petróleo de 2,44% e de 10,85% nas misturas BM 10 e BM 20, respectivamente. Em média carga a redução foi entorno 10% para ambas as misturas BM 10 e BM 20. Para baixa carga, houve um aumento de 0,92% para o BM 10 e de 16,5% para o BM 20. Considera-se provável que este aumento esteja relacionado à difícil atomização do biodiesel de mamona.

Não há resultados disponíveis na literatura com valores para a emissão de material particulado para o biodiesel de mamona, porém pode-se tomar como base estudos com outros tipos de biodiesel. Segundo Xue, Grift e Hansen, 2011 o abatimento das emissões de MP em alta e média carga pode ser atribuído ao elevado teor de oxigênio no combustível, o qual provoca uma combustão mais completa e uma maior oxidação da fuligem. Uma possível explicação para os resultados em baixa carga pode ser vista em He (2016), que relaciona a emissão de material particulado à estrutura do biodiesel e às suas características físico-químicas tais como: viscosidade, tensão superficial, temperatura crítica e pressão de vapor. De acordo com He (2016) estas propriedades influenciam a qualidade da ignição, a atomização do combustível no motor e a própria combustão.

4. CONCLUSÕES

O desempenho das misturas BM 10 e BM 20 entre o óleo diesel e biodiesel de mamona foi avaliado a partir de ensaios em uma bancada dinamométrica para três regimes de carga.

Os resultados obtidos para as misturas de diesel e biodiesel em volume mostram uma redução na eficiência térmica assim como uma elevação no consumo específico tendo como parâmetro o óleo diesel.

Os valores de emissão de material particulado reduzem com a adição de biodiesel de mamona ao diesel já as emissão de óxidos de nitrogênio e monóxido de carbono sofreram um aumento, como era esperado, devido a alta viscosidade.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e ANP pelo apoio financeiro dado à pesquisa apresentada neste trabalho.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis. Rio de Janeiro, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS ANP: Resolução ANP Nº 7, de 19.3.2008 - DOU 20.3.2008.

BAJPAI S., DAS L.M., Experimental Investigations of an IC Engine Operating with Alkyl Esters of Jatropha, Karanja and Castor Seed Oil, Energy Procedia, Volume 54, 2014, Pages 701-717, ISSN 1876-6102, <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.311>.

BHUIYA, M. M. K. et al. Prospects of 2nd generation biodiesel as a sustainable fuel—Part: 1 selection of feedstocks, oil extraction techniques and conversion technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 55, p. 1109-1128, 2015. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115004335> >.

BUENO, A. V. Análise da operação de motores diesel com misturas parciais de biodiesel. Campinas: UNICAMP, 2006

BUENO A. V, VELÁQUEZ J., MILANEZ L. F., A New Engine Indicating Measurement Procedure for Combustion Heat Release Analysis, Applied Thermal Engineering, 29 (2009b) 1657-1675.

CHEN H, WANG J, SHUAI S, CHEN W, Study of oxygenated biomass fuel blends on a diesel engine, Fuel, Volume 87, Issues 15–16, November 2008, Pages 3462-3468, ISSN 0016-2361, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2008.04.034>.

DEMIRBAS A., Progress and recent trends in biodiesel fuels, Energy Conversion and Management, Volume 50, Issue 1, January 2009, Pages 14-34, ISSN 0196-8904, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.001>.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Produtos Agrícolas. Tecnologias de Produção de Soja Região Central do Brasil 2004 Disponível em: <<http://www.cnpso.embrapa.br/producaosoja/SojanoBrasil.htm>> Acessado em 28 mar.2015

He B. H., Advances in emission characteristics of diesel engines using different biodiesel fuels, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 60, July 2016, Pages 570-586, ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.093>.

ISLAM M. A., et al., Combustion analysis of microalgae methyl ester in a common rail direct injection diesel engine, Fuel, Volume 143, 1 March 2015, Pages 351-360, ISSN 0016-2361, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.11.063>.

MONTEIRO, L. de A., et al., Performance impact of the application of castor oil biodiesel in diesel engines. Eng. Agríc., Jaboticabal, v. 33, n. 6, p. 1165-1171, Dec. 2013. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010069162013000600009&lng=en&nrm=iso>. Access on 29 Mar. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162013000600009>

PANWAR N.L. et al.. Performance evaluation of a diesel engine fueled with methyl ester of castor seed oil. Appl Therm Eng 2010, 30, 245 – 9.

VALENTE O.S., et al. Fuel consumption and emissions from a diesel power generator fuelled with castor oil and soybean biodiesel, Fuel, Volume 89, Issue 12, December 2010, Pages 3637-3642, ISSN 0016-2361, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2010.07.041>.

SNA – SOCIEDADE NACIONAL DE AGRICULTURA. Disponível em:
<<http://sna.agr.br/producao-de-biodiesel-cresce-15-no-brasil-em-2015/> Acesso em: 22 Fev. 2016>

XUE J., GRIFT T. E., HANSEN A. C., Effect of biodiesel on engine performances and emissions, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15, Issue 2, February 2011, Pages 1098-1116, ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.016>.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ABSTRACT

Aesley Soares Nobre, aesleyn@gmail.com¹
Victor Teixeira Barros, vteixeirabarro@gmail.com¹
Justino Carvalho Cartaxo, justino.cartaxo@yahoo.com.br¹
Matheus Casimiro Monte Farias, matheus.cmf@hotmail.com¹
André Valente Bueno, bueno@ufc.br¹
Célio Loureiro Cavalcante Jr, celio@gpsa.ufc.br¹
Francisco Murilo Tavares de Luna, murilo@gpsa.ufc.br¹

¹Universidade Federal do Ceará, Laboratório de Motores de Combustão Interna, Rua Campus do Pici S/N, bloco 715, CEP 60440-554, Fortaleza, CE.

Abstract. The environmental impact and the depletion of oil reserves are obstacles to the maintenance of fossil fuel use in the national and global energy supply. Although the diversification of biofuel feedstocks might offer support to solving this problem, most performance and emission studies for biodiesel have been concentrated on low viscosity methyl esters obtained from refined vegetable oils such as soy, canola and sunflower seed. A better comprehension of the effects of using second generation biodiesels, like those produced from castor oil or animal tallow, is necessary to fill that gap. To that end, this work explores the effects of castor bean (*Ricinus communis* L.) biodiesel blends in diesel engines. The experiments in this study were performed in a turbocharged MWM 229T6 direct injection diesel engine. Castor oil biodiesel was mixed to diesel at concentrations of 10% and 20% by volume and tested at three different load conditions. A reduction of thermal efficiency of up to 5.88% was observed, as well as a reduction of up to 2% in specific fuel consumption. The effects of the high viscosity of this biofuel, as high as 14.5 cSt at 40°C, caused a loss of up to 11.1% to the power delivered by the engine. Furthermore, there was an increase in NOx emissions of up to 17.43% and, on the other hand, a reduction of 16.5% in particulate matter production at high load. **Keywords:** Biodiesel, Castor, Engine, Combustion