

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE MOTORES DO CICLO DIESEL UTILIZANDO MISTURAS BIODIESEL/DIESEL MARÍTIMO

Luciano Santos Azevedo Souza, luciano.azevedo@fieb.org.br¹
Lílian Lefol Nani Guarieiro, lilian.guarieiro@fieb.org.br¹
Alex Álisson Bandeira Santos, alex.santos@fieb.org.br¹

¹SENAI CIMATEC, Av. Orlando Gomes, 1845 Piatã. CEP 41650-010 Salvador, BA, Brasil.

Resumo: A matriz energética mundial está focada em combustíveis de origem fóssil, contudo as preocupações sócio-ambientais e as restrições das reservas de petróleo (matéria-prima do óleo diesel) remetem a uma busca por combustíveis alternativos. O Brasil tem se apresentado como um dos países mais promissores para produção de combustíveis alternativos, o que pode ser observado por meio do sucesso da utilização do etanol e, mais recentemente, do biodiesel (considerado o biocombustível sucedâneo do óleo diesel). O óleo diesel é muito utilizado no Brasil e sua composição pode apresentar teores de enxofre de até 5.000 ppm (0,5% em massa) a depender de sua finalidade, como é o caso do combustível utilizado em embarcações, o chamado diesel marítimo (DM). Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho (potência, torque e consumo de combustível) de motores do ciclo diesel abastecidos com misturas de diesel marítimo e biodiesel. Os combustíveis avaliados foram as misturas de 5% (B5); 10% (B10); 20% (B20); 40% (B40), 60% (B60) de biodiesel adicionado ao diesel marítimo e o biodiesel puro (B100). Os resultados obtidos para potência demonstram que as misturas de biodiesel tiveram melhor desempenho na rotação em torno de 2500 rpm com 91,4; 91,1; 91,1; 90,2; 89,7; 87,6 kW para B5, B10, B20, B40, B60 e B100, respectivamente. Enquanto que para o diesel marítimo foi obtida uma potência de 85,5 kW, em mesma rotação. Os resultados de torque obtidos para as misturas combustíveis estiveram na faixa de 366 – 374 Nm a 1500 rpm, e para o DM foi obtido o torque de 370 Nm, em mesma rotação. O consumo de combustível o diesel marítimo apresentou os melhores resultados (20,8 kg/h a 1500 rpm) quando comparado aos resultados obtidos para as misturas combustíveis.

Palavras-chave: biodiesel, diesel marítimo, alto teor de enxofre, motor diesel.

1. INTRODUÇÃO

O motor do ciclo diesel é o equipamento mais comum para promover a mobilidade de meios de transportes terrestres e aquáticos. Isso se deve às suas características de ser um equipamento simples, ter bom desempenho, fácil manutenção, ser movido por combustível de baixo custo e consumo e possuir boa durabilidade e eficiência (LIN e HUANG, 2003). Diferentemente dos motores veiculares, os motores do ciclo diesel utilizados em embarcações são projetados de maneira especial no que diz respeito à sua calibração, que presuppõe condições de rotação constante.

Atualmente, existem diferentes tipos de óleo diesel sendo comercializados no Brasil e no mundo e, umas das principais diferenças entre os tipos comercializados é o teor de enxofre presente em sua composição química. Assim, por questões de ordem técnica e ambiental, o diesel com o teor mais elevado de enxofre é direcionado para uso em embarcações, uma vez que este pode emitir gases nocivos para a atmosfera, e devido ao fato do ambiente marinho ser mais distante da população, normalmente adensada em centros urbanos (LIN e HUANG, 2011). Dessa forma, como a maioria dos equipamentos de combustão, os motores marítimos queimam combustível derivado de petróleo para transformar energia química em energia mecânica, e isso representa a oxidação de hidrocarbonetos e, por conseguinte, a emissão de poluentes (EYRING et al., 2005). A reação de enxofre com oxigênio faz surgir o dióxido de enxofre e esse, quando combinando com oxigênio pode gerar na atmosfera compostos precursores da chuva ácida. Cerca de 70 a 80% dessas emissões de embarcações estão num raio de até 400 km da costa, causando a morte prematura de 60.000 pessoas todos os anos em decorrência de doenças cardiopulmonares e câncer de pulmão (CORBETT et al., 2007). Assim, para a redução das emissões um dos pontos que vem sendo destaque no cenário mundial é a melhoria da eficiência do sistema de propulsão e a utilização de combustíveis com menores teores de enxofre (EYRING et al., 2005). Todavia, o enxofre presente em combustíveis de origem fóssil, por si só, traz benefícios para os motores haja vista que reduz o atrito entre as peças devido à sua melhor lubrificidade.

As últimas décadas têm sido marcadas pelas mudanças das características climáticas do planeta, como é o caso do aquecimento global com destaque para a redução de emissões de efeito estufa, conforme estabelecido no protocolo de Kyoto, firmado em 1997. Este protocolo também propõe, dentre outras ações, a substituição de combustíveis derivados de petróleo por outros de menor impacto ambiental. Nesse sentido, a incorporação de combustíveis alternativos à matriz energética mundial tem sido um tema de grande destaque nos últimos tempos. Assim, a elevação e flutuação do preço do barril de petróleo no mercado internacional, as questões ambientais, notadamente voltadas para o aquecimento global causado pela poluição dos grandes centros urbanos, e a necessidade de fixação do homem em zonas rurais têm se apresentado como as principais preocupações para justificar a busca por combustíveis alternativos (GUARIEIRO, TORRES, ANDRADE, 2011).

O uso de óleos vegetais como combustível em motores do ciclo diesel não é assunto recente e data da iniciação do motor diesel por Rudolf Diesel, que apresentou seu invento pela primeira vez no final do século XIX alimentado com óleo de amendoim (WANG et al., 2000). Porém, a alta viscosidade dos óleos vegetais pode gerar sérios problemas no motor. Assim, através de reações químicas, como é o caso da transesterificação (reação de um álcool de cadeia curta, catalisador e óleo vegetal) pode-se obter um óleo menos viscoso denominado de biodiesel, o qual reduz significativamente os danos causados pelo uso de óleos vegetais. Pesquisas têm apresentado resultados importantes na viabilização do uso de biodiesel e suas misturas ao óleo diesel (GUARIEIRO et al., 2008 e 2009; MARTINS et al., 2011).

No caso específico do Brasil, são comercializados três diferentes tipos de diesel (separados por teor de enxofre): diesel metropolitano (menor teor de enxofre), diesel rodoviário (teor intermediário de enxofre) e diesel marítimo (alto teor de enxofre). Tanto o diesel metropolitano como o rodoviário, são comercializados com 5% de biodiesel em sua composição, já o diesel marítimo é o único diesel comercializado no Brasil sem adição de biodiesel. Sua incorporação colaboraria para a redução das taxas de emissão de compostos sulfurados, além de contribuir para redução de processos de refino mais onerosos. Neste contexto, pesquisas focadas no estudo da viabilidade do uso de biodiesel puro ou adicionado ao DM são condições de contorno necessárias à viabilidade da inserção de biocombustíveis no setor aquaviário. Porém, poucos trabalhos vêm sendo realizados objetivando o desempenho de motores diesel de embarcações utilizando misturas de biodiesel e DM. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar experimentalmente o desempenho de motores do ciclo diesel utilizando DM puro, misturas deste com biodiesel em diferentes proporções, bem como com o biodiesel puro.

2. EXPERIMENTAL

Na avaliação do desempenho de motores ciclo diesel foram utilizados dois motores MWM-International, modelo 229-6 específico para finalidade marítima, ciclo diesel, com ignição por compressão, quatro tempos, seis cilindros em linha e aspirado. Os motores foram denominados de motor A (abastecido apenas com DM puro) e motor B (abastecido com as misturas combustíveis e biodiesel puro). É importante destacar que não foram feitas quaisquer adaptações por do uso de biodiesel. Os motores foram montados sob um dinamômetro de bancada, marca Positron Brown Boveri, modelo 8121, com potência nominal 370 kW e rotação máxima de 5.000 rpm.

Nos ensaios foram utilizados DM com alto teor de enxofre, biodiesel comercial sem a preocupação da matéria prima originária (B100) e as misturas deste combustível nas proporções 5, 10, 20, 40, 60% adicionado no DM (Tab. (1)). Ambos os combustíveis foram adquiridos na Petrobrás que emitiu Certificado de Ensaio do DM e Boletim de Conformidade do DM e do B100. As misturas foram feitas em tambores novos com capacidade de 200 litros utilizando B100 e DM nas suas respectivas proporções e suficientes para rodar cada um dos ensaios de desempenho. O percentual de biodiesel em cada mistura foi detectado por infravermelho para verificar a qualidade da mistura.

Tabela 1. Características físico-químicas dos combustíveis utilizados no preparo das misturas DM/biodiesel

	DM Puro	Biodiesel (B100)
Enxofre Total (% massa)	0,37	-
Massa Específica a 20 °C, (kg/m ³)	848	889
Ponto de Fulgor (°C)	74	157
Viscosidade a 40 °C (mm ² /s)	4,7	5,8
Índice de Cetano	49	61

Os ensaios de desempenho seguiram as exigências da Norma Brasileira NBR ISO 1585: 1996 - Veículos Rodoviários - Código de Ensaio de Motores - Potência Líquida Efetiva para Veículos de Passageiros ou de Carga, Excluindo-se Motonetas, Tratores e Motocicletas (ABNT, 1996). Todos os resultados de potência e torque apresentados nesse trabalho foram corrigidos segundo esta Norma NBR. Todos os valores obtidos que mantiveram dispersão de mais ou menos 5% foram considerados iguais haja vista que a robustez dos motores e a falta de padrão para teste de motores distintos podem causar certa dispersão.

Antes dos ensaios de durabilidade os motores passaram por um período de 30 horas de amaciamento para acomodação e verificação dos motores. Após o amaciamento, iniciou-se o ciclo de durabilidade de 300 horas quando foram feitas as revisões de 50, 100, 200, e 300 horas, conforme estabelecido pelo fabricante.

Durante os ensaios de durabilidade foram feitas as curvas de desempenho a 30, 50, 100, 200, 300 e 330 horas de decorrido o início dos testes para serem levantadas as curvas de potência, torque e consumo. No caso específico do motor B, para cada levantamento das curvas de Potência, Torque e Consumo foi feita a substituição do combustível a partir do esvaziamento de toda a linha de combustível (inclusive do filtro), reacoplamento da linha, já seca, ao tanque com o combustível com maior concentração de biodiesel. Assim, o motor foi posto em funcionamento após cada troca de combustível objetivando a queima de qualquer resíduo da mistura do ensaio anterior, e somente após alguns minutos foram levantados os novos parâmetros.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os motores A e B abastecidos respectivamente com Diesel Marítimo e com as misturas combustíveis passaram por um ensaio de 330 horas de durabilidade em dinamômetro, sendo que as 30 primeiras horas foram em processo de amaciamento. Durante o ensaio foram medidos potência, torque e consumo de combustível. As médias dos percentuais dos desvios padrões estão apresentados nas Fig. (1 e 2), para potência média, torque médio e consumo médio de combustível, respectivamente. Para discutir os resultados do uso do DM puro e suas misturas com B100, foi selecionada a mistura B5 para ilustrar e comparar o desempenho do uso de DM com biodiesel e DM puro. Em seguida, será apresentado o efeito do aumento do teor de biodiesel no DM nos resultados de desempenho do motor.

Na Fig. (1a), estão apresentados os valores obtidos de potência média *versus* rotação para DM e a mistura B5. Tendo em vista as barras de erros (principalmente aquelas referentes às medidas do motor A), não se percebe diferença dos resultados até 1800 rpm. A partir dessa rotação pode-se afirmar que a potência de B5 é maior do que os resultados de DM chegando ao valor de potência média máxima à 2500 rpm com 93 kW para B5 e de 85 kW para o DM.

O torque médio de cada combustível não seguiu a característica de potência média no que se refere à similaridade da rotação de torque médio máximo para os combustíveis estudados. Foram obtidos torques médios máximos de 374 Nm à 1400 rpm para o DM e 378 Nm à 1600 rpm para B5, Fig. (1b). Apesar disso os valores podem ser considerados equivalentes, não tendo, portanto, diferenciação entre os resultados obtidos. Até 1700 rpm os valores de torque são considerados iguais haja vista estarem dentro da faixa de 5% de dispersão. A partir de 1800 rpm as curvas começam a se afastar e os valores obtidos em cada rotação para os combustíveis não mais coincidem dentro da faixa de erro.

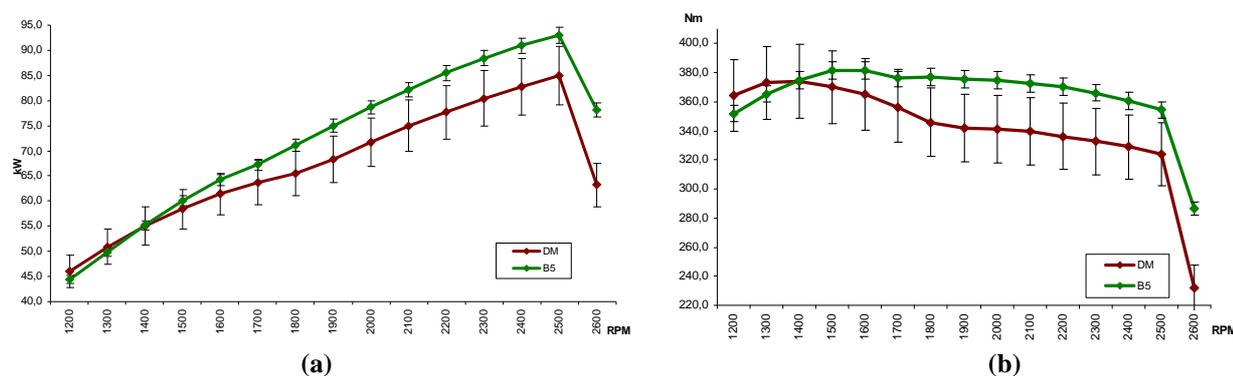


Figura 1. (a) Potência média dos motores utilizando DM; (b) Torque médio dos motores utilizando DM e B5.

Os dados para potência média *versus* rotação, Fig. (1a), onde a mistura de DM com biodiesel apresentou resultados melhores do que aqueles encontrados no DM, provavelmente foram causados pela maior eficiência da combustão do B5, haja vista o maior número de cetano do biodiesel em relação ao DM. Quanto maior o número de cetano de um combustível mais facilmente entrará em combustão num motor de ignição por compressão. O número de cetano médio do biodiesel é da ordem de 60 enquanto do diesel está entre 48 e 50 (PARENTE, 2003).

Outro motivo que fez o B5 apresentar melhores resultados de potência em relação ao DM pode ser explicado a partir do entendimento do funcionamento de um motor diesel e pelas características do diesel e do biodiesel (e suas misturas). Van Gerpen (2006) descreve que existem folgas no sistema de alimentação e injeção de um motor do ciclo diesel. A maior viscosidade do biodiesel e suas misturas com o DM em relação ao DM puro faz com que as perdas de combustível decorrentes destas folgas sejam menores para as misturas de DM e biodiesel do que para o DM puro. A redução da perda faz com que uma maior quantidade de combustível entre na câmara de combustão.

Outra questão que merece destaque é que a bomba injetora e os injetores são construídos para injetar volumes pré-determinados de combustível. Porém, na combustão, o fator mais importante é a relação entre massa de ar e massa de combustível injetado. Como o biodiesel apresenta maior densidade do que o diesel, a quantidade de biocombustível, em massa, que é injetada na câmara de combustão pode ser considerada maior, gerando maior potência e maior consumo em motores alimentados com biodiesel (MACHADO, 2008). Assim, com valores de potência média maior, associados ao menor poder calorífico do B5, seria esperado um maior consumo médio do combustível B5. Porém, isso não se confirma nos resultados encontrados para consumo de combustível dos dois motores, Fig. (2), que apesar de

apresentarem valores médios de 21,8 e 20,8 kg/h para B5 e DM, respectivamente, não se pode afirmar que são resultados diferentes haja vista a barra de erros dos desvios padrão principalmente do motor que utilizou B5.

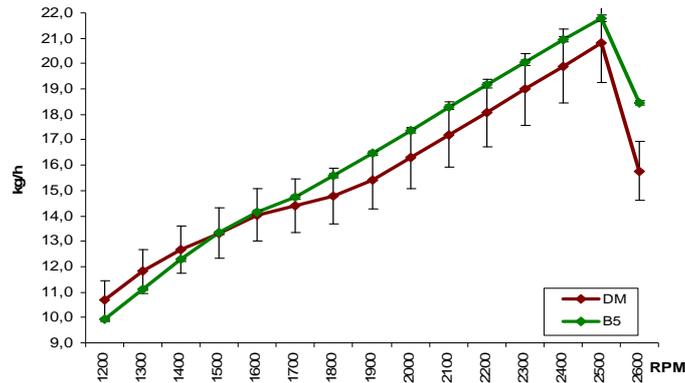


Figura 2. Consumo médio dos motores utilizando DM e B5.

Os resultados obtidos na avaliação da tendência do desempenho do motor B abastecido com diferentes misturas de biodiesel e DM (B5, B10, B20, B40 e B60) e biodiesel puro estão apresentados nas Fig. (3 e 4) para potência, torque e consumo de combustível, respectivamente.

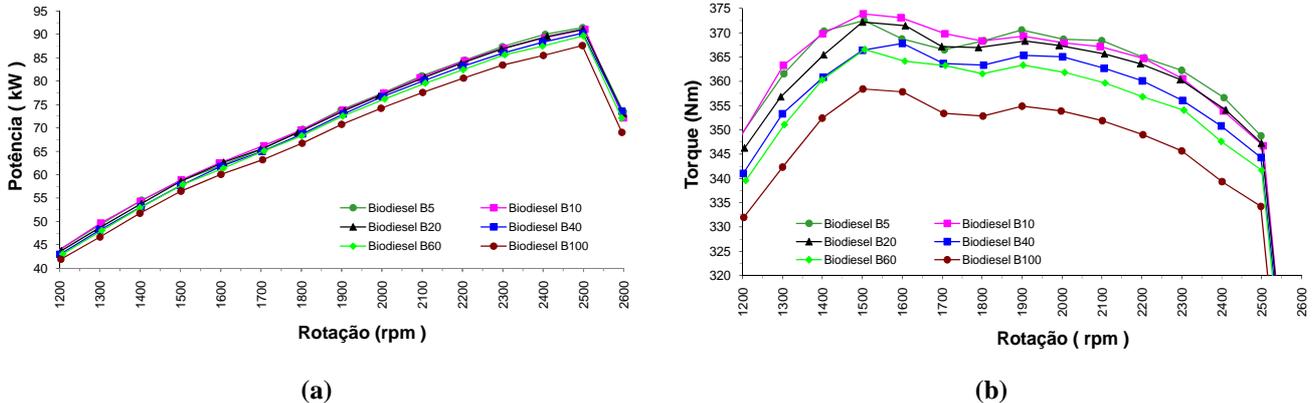


Figura 3. (a) potência das misturas de DM com biodiesel em proporções variadas; (b) Torque versus Rotação das misturas de DM com biodiesel em proporções variadas.

Os dados obtidos para potência, Fig. (3a), apontam para o fato de que o aumento do percentual de biodiesel no DM reduz os valores de potência. Os valores obtidos para potência variaram de 87,6 kW para B100 até 91,4 kW para B5. Porém, todos os valores são considerados iguais quando se trata das misturas com biodiesel haja vista que estão dentro de um erro de 5%.

Os resultados de torque máximo, Fig. (3b), estão relacionados com a rotação em torno de 1500 rpm. O maior valor de torque (373,9 Nm) foi obtido com B10 e o menor (358,4 Nm) foi obtido para B100. Assim, o combustível B100 apresentou o pior desempenho, seguido do B60, B40, B20, B5 e o melhor desempenho foi obtido quando utilizado o combustível B10. Contudo, todos os valores estão dentro de uma margem de 5% de erro e por isso podem ser considerados iguais entre si ficando dentro do valor médio de $366,15 \pm 18,31$ Nm ($347,84 < x < 384,46$).

A Fig. (4) apresenta os resultados das curvas de consumo de combustível utilizadas nos ensaios comparativos de tendência de desempenho com o aumento da concentração de biodiesel no DM. O pico do consumo aconteceu em torno de 2500 rpm para todos os combustíveis. O B100 foi o combustível que apresentou maior consumo (22,51 kg/h) e o B5 foi o que se mostrou mais eficiente (22,04 kg/h).

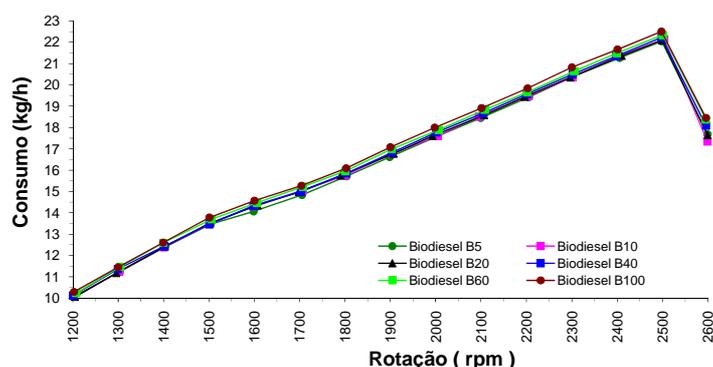


Figura 4. Consumo de Combustível das misturas de DM com biodiesel em proporções variadas.

Segundo Jóvaj (1997), em motores Diesel a qualidade da formação da mistura ar/combustível, depende de vários fatores, sendo os mais importantes: (i) os parâmetros do equipamento de injeção (tempo da injeção do combustível, qualidade da pulverização, profundidade da penetração do jato na câmara de combustão e a forma do jato) e (ii) as propriedades do combustível. Como os motores utilizados não sofreram modificações com vistas a receber os combustíveis utilizados neste trabalho resta a discussão da influência das propriedades do combustível para explicar os resultados encontrados usando biodiesel misturado ao DM em proporções crescentes.

À medida que se aumenta a densidade do combustível, o momento de injeção se adianta devido ao aumento da velocidade de deslocamento da onda de pressão que abre o bico injetor. Também a profundidade da penetração do jato na câmara aumenta com o aumento do teor de biodiesel adicionado ao DM, ou seja, com o aumento da densidade do combustível. O aumento da penetração do jato de combustível pode gerar uma maior quantidade de combustível líquido atingindo as paredes da câmara de combustão. Este fato pode prejudicar os parâmetros termodinâmicos do processo de combustão, como a vaporização do combustível com uma mistura correta com o ar, o que pode provocar uma queda na taxa de aumento da pressão (dp/dt) na fase da combustão rápida, fazendo com que haja uma queda nos resultados de potência e torque.

4. CONCLUSÃO

A utilização de misturas DM com biodiesel mostrou-se vantajosa do ponto de vista dos resultados de potência do motor que ficou 9,4% melhor do que os resultados obtidos com DM puro. Quanto ao torque e o consumo de combustível, do B5 em relação ao DM puro, os resultados de torque ficou melhor em 1,1% e pior em 4,8%, respectivamente, porém em ambos os casos, se considerado o erro de 5%, os valores se tornam iguais àqueles obtidos para DM puro. O aumento do percentual de biodiesel não prejudica o desempenho de potência, torque e consumo de combustível em embarcações, haja vista que os valores encontrados, apesar de apontarem para uma tendência de queda do desempenho, apresentam valores considerados semelhantes.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao SENAI DR Bahia, a FINEP e a Marinha do Brasil pelo apoio a este trabalho.

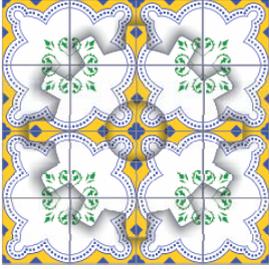
6. REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1996, "NBR ISO 1585: Veículos rodoviários – Código de ensaio de motores – Potência líquida efetiva". Rio de Janeiro, Brasil, 26p.
- Corbett, J.J., Wang, C., Winebrake, J.J. and Green, E., 2007, "Allocation and Forecasting of Global Ship Emissions; Clean Air Task Force and Friends of the Earth International". Boston, MA.
- Eyring, V., Köhler, H.W., Lauer, A., Lamper, B., 2005, "Emissions from international shipping: Impact of Future Technologies on Scenarios until 2050. The last 50 years", *J. Geophys. Res.*, 110, D17306, doi:10.1029/2004JD005620.
- Gökalp, B., Soyhan, H.S., Saraç Halil I, Bostan, D., Sengun, Y., 2009, "Biodiesel Addition to Standard Diesel Fuels and Marine Fuels Used in a Diesel Engine: Effects on Emission Characteristics and Firstand". *Energy and Fuel*, 1849-1857.
- Guarieiro, L.L.N., Pereira, P.A.P., Torres, E.A., Rocha, G.O.da; Andrade, J.B. de, 2008, "Carbonyl compounds emitted by a diesel engine fuelled with diesel and biodiesel–diesel blends - Sampling optimization and emissions profile". *Atmospheric Environment*, 42, p. 8211-8218.
- Guarieiro, L.L.N., 2009, "Emission profile of 18 carbonyl compounds, CO, CO₂, and NO_x emitted by a diesel engine fuelled with diesel and ternary blends containing diesel, ethanol and biodiesel or vegetable oils." *Atmospheric Environment*, 43, p. 2754-2761.
- Guarieiro, L.L.N., Torres, E.A., Andrade, J.B. de, 2011. *Energia Verde. Revista Ciência Hoje*. Vol. 48.

- Jóvaj, M.S. “Motores de automóvel”. Editora MIR. Moscou, 1997.
- Lin, C.Y., Huang, J.C., 2003, “An oxygenating additive improving the performance and emission characteristics of marine diesel engines”.
- Lin, C.Y., Huang, J.C., 2011, “Cost-benefit evaluation of using biodiesel as an alternative fuel for fishing boats in Taiwan”. *Marine Policy*, p. 103-107.
- Machado, P.R.M., 2008, “Ésteres Combustíveis em Motor do ciclo diesel sob Condições de Pré-Aquecimento e Variação no Avanço de Injeção. 2007. 142 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria RS.
- Martins, L.D. Silva Júnior, C.R., Solci, M.C., Pinto, J.P., Souza, D.Z., Vasconcellos, P., Guarieiro, A.L.N., Guarieiro, L.L.N., Sousa, E.T., Andrade, J.B., 2011 Particle emission from heavy-duty engine fuelled with blends diesel and biodiesel. *Environ Monit Assess*, DOI. Springer Science, Business Media, in press.
- Van Gerpen, J., 2006, “Conceitos básicos sobre motores diesel e seus combustíveis”. In: Knothe, G. (Org.); Van Gerpen, J.; Krahl, J. “Manual de Biodiesel”. Tradução: Luiz Pereira Ramos. São Paulo: Editora Blücher, p. 19-28.
- Wang, W.G., Lyons, D.W., Clark, N.N., Gautan, M., Norton, P.M., 2000, “Emissions from nine heavy trucks fueled by diesel and biodiesel blend without engine modifications”. *Environ Sci. Technol.*, vol.34, p.933–939.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



EXPERIMENTAL EVALUATION OF DIESEL ENGINE PERFORMANCE USING BIODIESEL BLENDS / MARINE DIESEL

Luciano Santos Azevedo Souza, luciano.azevedo@fieb.org.br¹
Lílian Lefol Nani Guarieiro, lilian.guarieiro@fieb.org.br¹
Alex Álisson Bandeira Santos, alex.santos@fieb.org.br¹

¹SENAI CIMATEC, 41650-010 Salvador, BA, Brasil.

Abstract: The global energy production is focused on fossil fuels, however the socio-environmental concerns and restrictions of oil reserves (the raw material for diesel) refer to a search for alternatives to petroleum derived fuels. Brazil has been touted as one of the most promising alternative fuel producer, which can be seen through the success of the use of ethanol, and more recently of the biodiesel. The diesel oil is widely used in Brazil and its composition may have until 5000 ppm of sulfur (0.5% by weight) depending on its purpose, such as the fuel used in vessels, called the marine diesel. In this context, this study aimed to evaluate the performance (power, torque and fuel consumption) from diesel engines fueled with mixtures of marine diesel and biodiesel. The studied fuels were 5% (B5), 10% (B10) 20% (B20), 40% (B40), 60% (B60) of biodiesel added to marine diesel and pure biodiesel (B100). The results showed that the power to biodiesel blends performed were better in the rotation around 2500 rpm with 91.4, 91.1, 91.1, 90.2, 89.7, 87.6 kW for B5, B10, B20, B40, B60 and B100, respectively, while for marine diesel was obtained a power of 85.5 kW, at the same speed. The torque results to the fuel blends were in the range 367 to 374 Nm at 1500 rpm and 370 Nm for the same speed using marine diesel. The marine diesel showed the best results being 20.8 kg / h at 1500 rpm.

Keywords: biodiesel, marine diesel, high sulfur content diesel.