

REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM MOTOR AGRÍCOLA COM USO DE DIESEL E BIODIESEL DE SOJA (*GLYCINE MAX*) DA REGIÃO DO MATOPIBA, TOCANTINS, BRASIL¹

Márcio Alves de Aguiar², Marcelo Mendes Pedroza², Juan Carlos Valdés Serra³, Joel Carlos
Zukowski Júnior³, Felipe Soto Pau⁴, João Pedro da Silva Marinho⁵

¹Aceito para Publicação no 4º Trimestre de 2016.

²Instituto Federal do Tocantins, campus Palmas, AE 310 SUL, Av. LO 05, Palmas–TO, Brasil, CEP.: 77.021-090, marcio-alves@ifto.edu.br, mendes@ifto.edu.br.

³Universidade Federal do Tocantins, campus Palmas, Av. NS 15, 109 Norte, Palmas–TO, Brasil, CEP.: 77001-090, juancs@uft.edu.br, zukowski@uft.edu.br.

⁴Universidade Federal de São João del-Rei, campus Santo Antônio, Praça Frei Orlando, 170, São João del-Rei-MG, Brasil, CEP.: 36307-352, sotopauf@hotmail.com.

⁵Centro Universitário Luterano de Palmas, Avenida Teotônio Segurado, 1501 Sul, Palmas-TO, Brasil, CEP.:77019-900, jpmarinho2@gmail.com.

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de um motor diesel, utilizando diesel S-10 e biodiesel B-20, B-50, B-100. A metodologia desenvolvida foi em conformidade com a norma ABNT ISO 1585, em que se baseou no aquecimento do motor a diesel e elevação à carga plena de trabalho na rotação máxima de 2300 rpm e decaimento do giro do motor até a rotação mínima

de 1000 rpm, numa variação de 100 rpm nos catorze níveis rotacionais realizados em três amostras, para todos os combustíveis. Os dados relativos à potência, torque e consumo de combustíveis verificados em todas as repetições foram utilizados para a observação das curvas de desempenho do motor, tanto quanto para a avaliação de rendimento do motor. Os resultados comparativos indicaram que o torque e potência entre B-20 e diesel foram similares, porém o biodiesel nesta proporção a 20% apresentou aumento do consumo de combustível. Já os biodieseis 50% e 100%, apresentaram queda de desempenho e elevação do consumo de combustível, com aumento desta concentração, enquanto que o diesel apresentou melhor rendimento e o B-100 o menor, dentre todos os combustíveis, situação já prevista devido a sua elevada viscosidade. Contudo, pode-se concluir que o uso de biodiesel, em pequenas ou elevadas concentrações na mistura com o diesel e até mesmo a 100% deste combustível renovável garante a independência parcial ou integral do uso de combustíveis fósseis altamente poluentes apresentando-se como uma expressiva justificativa no emprego de combustíveis biodegradáveis em motores a diesel diminuindo-se, inclusive, os impactos ambientais.

Palavras-chave: biocombustíveis, combustível fóssil, rendimento do motor.

**A ENGINE PERFORMANCE ANALYSIS WITH DIESEL AGRICULTURAL USE
AND SOYBEAN BIODIESEL (*GLYCINE MAX*) OF MATOPIBA REGION,
TOCANTINS, BRAZIL.**

Abstract

The aim of this study was to evaluate the performance of a diesel engine, using S-10 diesel and biodiesel B-20, B-50, B-100. The methodology was in accordance with the standard ISO 1585, which was based on the engine heating diesel and elevation to the full workload at maximum speed of 2,300 rpm and engine turning decay to the minimum speed of 1000 rpm, in a range of 100 rpm in rotational fourteen levels performed on three samples for all fuels. Data on power, torque and fuel consumption checked in all repetitions were used for the observation of motor performance curves, as well as for the engine performance evaluation. The comparative results indicated torque and power between B-20 and diesel are similar, but biodiesel this proportion

to 20% showed an increase in fuel consumption. Already biodiesels 50% and 100%, showed drop in performance and increased fuel consumption, increasing this concentration, while diesel showed better performance and the B-100 the lowest, among all fuels, as expected due situation its high viscosity. However, it can be concluded that the use of biodiesel in small or high concentrations in the blend with diesel and even 100% of renewable fuel ensures partial or full independence from fossil fuels highly polluting presenting itself as a significant justification in the use of biodegradable fuels in diesel engines slowing up, including environmental impacts.

Key-words: biofuels, fossil fuel, engine output.

Introdução

A geração e o uso eficiente da energia se apresentam como um dos grandes desafios da sociedade deste século. A atual matriz energética mundial é baseada principalmente em fontes não renováveis, tendo o petróleo como principal matéria-prima. As reservas comprovadas de petróleo do mundo somam 1,14 trilhões de barris, 78% dos quais localizados no subsolo dos países do cartel OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo) (PEDROZA, 2011).

Mantido o atual nível de consumo, tais reservas permitem suprir a demanda mundial por somente 40 anos. Aliado a isso, a emissão de gases de efeito estufa ocasionada pelo uso das fontes de energia não renováveis pode provocar mudanças climáticas globais causando grande impacto ambiental. Assim, a busca de fontes alternativas de energia, principalmente aquelas renováveis, é de fundamental importância para a preservação do planeta (PEDROZA, et al., 2014).

O biodiesel pode ser adquirido através de uma diversidade de plantas oleaginosas encontradas em diversas localidades do planeta, de forma que o torna um biocombustível altamente democrático, disponível em praticamente todos os países. Sendo, portanto, o biodiesel um combustível biodegradável derivado de fontes renováveis, que pode ser obtido por diferentes processos tais como o craqueamento, a esterificação ou pela transesterificação (VIEIRA, et al., 2009).

Este último processo, mais utilizado, consiste numa reação química de óleos vegetais ou de gorduras animais com o álcool comum (etanol) ou o metanol, estimulada por um catalisador. Da transesterificação também se extrai a glicerina, empregada para fabricação de sabonetes e diversos outros cosméticos (LOFRANO, et al., 2013).

Há dezenas de espécies vegetais no Brasil das quais se podem produzir o biodiesel, tais como mamona, dendê (palma), girassol, babaçu, amendoim, pinhão manso e soja, dentre outras (GONÇALVES, et al., 2016).

O Brasil tem um grande potencial para a produção de combustíveis a partir de matéria-prima vegetal, isto devido a sua localização geográfica e sua vocação agrícola, fato que induz o país a buscar o desenvolvimento de tecnologias ambientalmente corretas. Diante disto, surge o Programa Nacional do Biodiesel que tem por objetivo viabilizar a aditivação do diesel com éster de óleos vegetais em valores, a longo prazo, de até 20% (VIEIRA, et al., 2009).

Com adição obrigatória de 2% de biodiesel ao diesel (B-02) em 2008, pesquisas revelam uma diminuição no consumo do diesel equivalente a 800 milhões de litros por ano, gerando desta forma, uma economia anual de US\$ 160 milhões. Além disso, essa adição promoverá a diminuição nas emissões de materiais particulados, óxidos de enxofre (SO_x) e de gases que contribuem para a intensificação do efeito estufa (SEE ALGAE TECHNOLOGY, 2013).

Atualmente o diesel vendido nos postos pelo Brasil possui 7% de biodiesel e 93% de diesel (B-07). Um novo horizonte de incrementos no uso do biodiesel foi estabelecido em março de 2016 e até março de 2017 o percentual de mistura de biodiesel no diesel deverá ser de 8%, até março de 2018 de 9% e até março de 2019 de 10% (BASTOS, et al., 2015). O Conselho Nacional de Política Energética poderá aumentar esse percentual até 15% a qualquer momento após março de 2019.

Nos anos 90, com o surgimento do conceito de sustentabilidade e o agravamento do efeito estufa, foram realizados grandes investimentos em pesquisa e produção de biodiesel e sua mistura ao diesel em diversas concentrações. A mistura deste biodiesel ao diesel tem apresentado resultados surpreendentes tanto no funcionamento em motores quanto à melhoria da qualidade do ar, com a diminuição do lançamento de enxofre, altamente danoso a seres vivos (PARENTE, p.45, 2003).

Deste modo, o incentivo da aplicação de biodiesel em motores a diesel passa a refletir na agricultura, que torna o celeiro de matéria-prima para a produção de biodiesel, principalmente com a cultura da soja. O Brasil e outros países apresentam potencial e rápida formação do setor de biodiesel, com o crescimento das áreas destinadas às culturas energéticas, com ênfase às destinadas a extração de óleo vegetal e produção de biodiesel (RIGOTTE, 2014, p. 1-2).

O uso de óleo vegetal puro tornam-se combustíveis perfeitamente adaptáveis a motores a diesel, independentemente da fonte de energia renovável e pela sua diversidade de plantas

oleaginosas podendo ser utilizados na conversão de energia térmica em energia mecânica em veículos automotores. Foi durante a Exposição de Paris, em 1900, que um pequeno motor a diesel foi operado por óleo de *arachide* (amendoim) (KNOTHE, et al., 2005). Este tipo de motor, ainda que tenha sido construído para ser operado com óleo de petróleo, foi utilizado para o óleo vegetal, sem qualquer alteração que, neste caso, as experiências de consumo resultaram no aproveitamento do calor.

Os motores a diesel que utilizam o biodiesel além de melhorar o seu desempenho, apresentam a grande vantagem na redução da fumaça e a diminuição do consumo de combustível. Além disso, o uso de turbo-compressor pode aperfeiçoar a combustão e a presença deste equipamento promove o decaimento do lançamento de gases poluentes no meio ambiente, melhora o desempenho dos motores e reduz o consumo de combustível (NEVES, 2013, p.352).

Dessa forma, o presente estudo visa avaliar o desempenho de um motor a diesel agrícola quanto a potência, torque e consumo de combustível com o uso do óleo diesel S-10 (7% de biocombustível), o biodiesel de soja puro, 100%, e suas misturas em proporções de 20% e 50% com o diesel.

Materiais e métodos

Os ensaios de desempenho do motor na avaliação de potência, torque e consumo de combustível foram conduzidos nas dependências do Laboratório de Motores e Combustíveis (LAMOC) do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), localizado no município de Xerém, RJ, Brasil. Nos dias em que se realizaram a coleta de dados nos testes aplicados no motor a diesel, a temperatura e a pressão médias locais foram, respectivamente, 30 °C e 1005 mmHg.

Diesel

O óleo diesel utilizado para os ensaios em motor foi o S-10, que se caracteriza pela quantidade de enxofre a 10 ppm (partes por milhão), a 93% de diesel puro e 7% de biocombustível em sua composição. Este produto, sendo comercializado pela Petrobras Distribuidora, foi adquirido em postos de combustíveis do Rio de Janeiro, RJ.

O reservatório de combustível constituído pelo conjunto de dois tanques de 300 litros cada, encontra-se localizado em ambiente externo ao LAMOC e o fornecimento do fluxo de massa de combustível para o abastecimento da bomba injetora ocorre por gravidade a uma altura manométrica de oito metros (Figura 1).



Figura 1 – Reservatório de combustíveis a diesel do laboratório de motores e combustíveis (INMETRO-RJ)

Biodiesel

O biodiesel foi obtido junto à Granol Indústria Comércio e Exportação S/A, com unidade de produção em Porto Nacional, Tocantins, processados pela transesterificação por meio da rota metílica sendo transportados 300 litros de biodiesel puro em bombonas de 50 litros, para o Inmetro, Rio de Janeiro. Este produto foi misturado ao diesel S-10 em proporções de 20% (B-20) e 50% (B-50) e com 100% (B-100) de biodiesel, e novamente armazenados em bombonas de 50 litros disponibilizadas no piso do próprio laboratório e para alimentar o motor a diesel por meio de um sistema de bombeamento (Figura 2).



Figura 2 – Reservatório de biodiesel em bombonas do laboratório de motores e combustíveis (INMETRO-RJ)

Motor diesel

Para o ensaio de desempenho, foi utilizado um motor do ciclo diesel agrícola estacionário de quatro tempos, de ignição por compressão com pré-câmara de combustível em 4 cilindros, turbo-compressor, de cilindrada 4485 cm³ com uma potência máxima nominal de 97 kW a 2400 rpm e torque máximo nominal 500 N.m a 1600 rpm, com sistema de alimentação de combustível mecânico pré-bomba e bomba injetora de pistões (Figura 3).

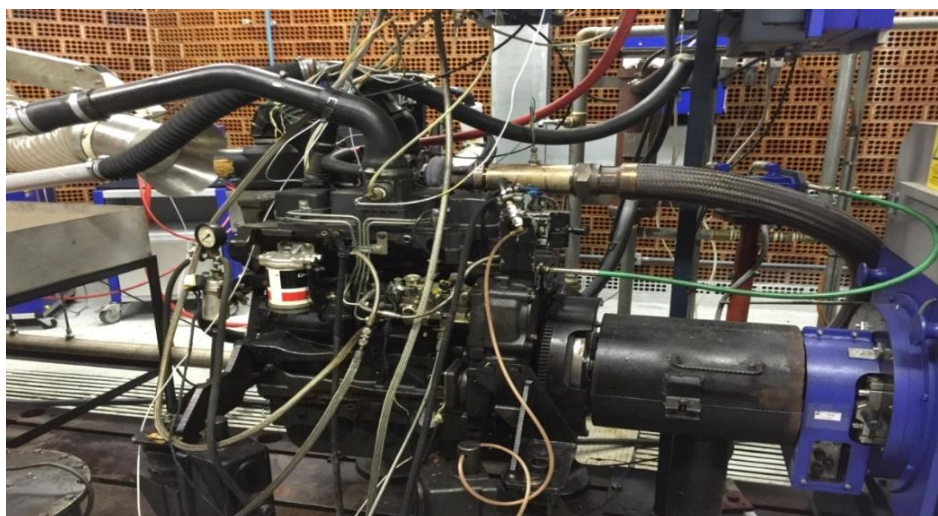


Figura 3 – Motor diesel do laboratório de motores e combustíveis (INMETRO-RJ)

Dinamômetro e eixo-acoplamento

Para aplicação de carga plena, foi utilizado freio dinamométrico AVL *Schneider Electric Drives*, Serial 130408, de correntes de *Foucault* com duplo motor elétrico de refrigeração a ar, alimentado com voltagem 220 V e corrente elétrica 294 A à frequência de 297 Hz (Figura 4).



Figura 4 - AVL *schneider electric drives* do laboratório de motores e combustíveis (INMETRO-RJ)

O eixo do dinamômetro tem a capacidade de frenagem máxima de 220 kW à rotação máxima de 8000 rpm e torque 0,92 kgfm, o qual aciona o eixo virabrequim do motor diesel, por intermédio do eixo *cardan* que possui duplo acoplamento elásticos e flexíveis, de transmissão de força do tipo ativo-passivo (Figura 5).

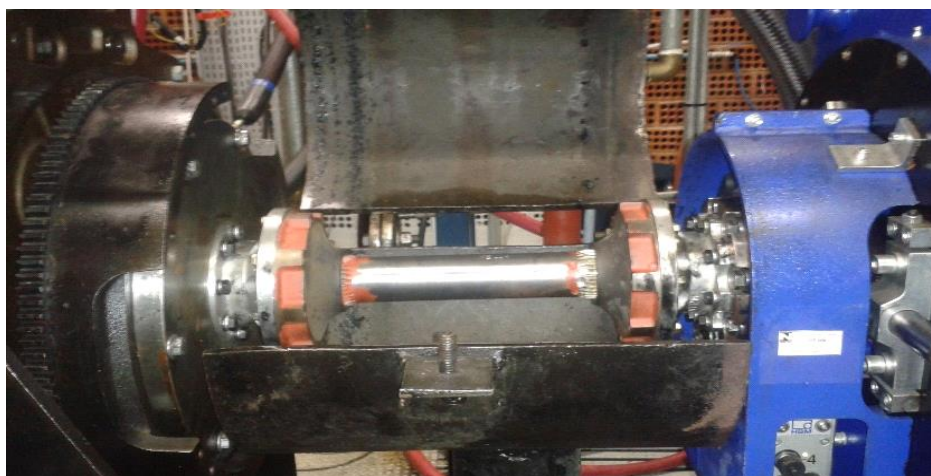


Figura 5 – Acoplamento motor-dinamômetro do laboratório de motores e combustíveis (INMETRO-RJ)

A Mesa de controle motor-dinamômetro fica instalada no ambiente externo ao laboratório e de onde se controla o motor e o dinamômetro, sendo utilizado o *software* Puma AVL *Open* 1.2.1 para análise de desempenho do motor a diesel referentes a potência, torque e consumo de combustível, dentre outras grandezas de medidas.

Os ensaios para a avaliação das curvas de desempenho do motor diesel, foram realizados

em conformidade com a NBR ISO 1585 Veículos Rodoviários – Código de ensaio de Motores – Potência Efetiva e conduzidos nas dependências do Laboratório de Motores e Combustíveis do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO-RJ). Dessa forma, iniciou-se os testes acionando o dinamômetro através da mesa de controle, com o motor em marcha lenta, na rotação *Idle* a 800 rpm, para pré-aquecimento, elevando gradativamente a rotação e o pedal de aceleração necessários para estabilizar o motor até atingirem a máxima rotação de 2300 rpm e pedal a 100%. Para atingir tais valores e tomar as curvas de desempenho dos tratamentos, procedimentos foram adotados segundo a norma e desenvolvidos em três estágios.

No primeiro estágio, a rotação do motor foi elevada para 1300 rpm a 30% de pedal mantido num intervalo de tempo de 2 minutos. No segundo estágio, a rotação elevada para 1500 rpm a 50% de pedal mantidos num intervalo de tempo de 2 minutos e no terceiro estágio elevada para 1800 rpm a 70% de pedal mantidos num intervalo de tempo de 2 minutos.

Após a estabilidade do motor, a rotação foi elevada para 2300 rpm e pedal a 100% com torque zero do dinamômetro e a partir daí as leituras dos dados coletados no *software* foram registrados em planilha eletrônica de Excel com três amostras para cada um dos tratamentos, em todos os 14 níveis rotacionais, na variação de 100 rpm, de 2300 a 1000 rpm (Figura 6).

Nos ensaios ocorridos, foram medidos os valores de níveis de poluição com o uso do equipamento denominado AVL 415S *Smoke Meter*, através da fumaça exalada pela queima dos combustíveis analisados. O *Smoke Meter* AVL 415S é um filtro do tipo medidor de fumaça para medir o teor de fuligem nos gases de escape de diesel.

A medição ocorreu por meio da coleta de amostras de fumaça no tubo de escape do motor através de um papel de filtro limpo no instrumento *Smoke Meter*.

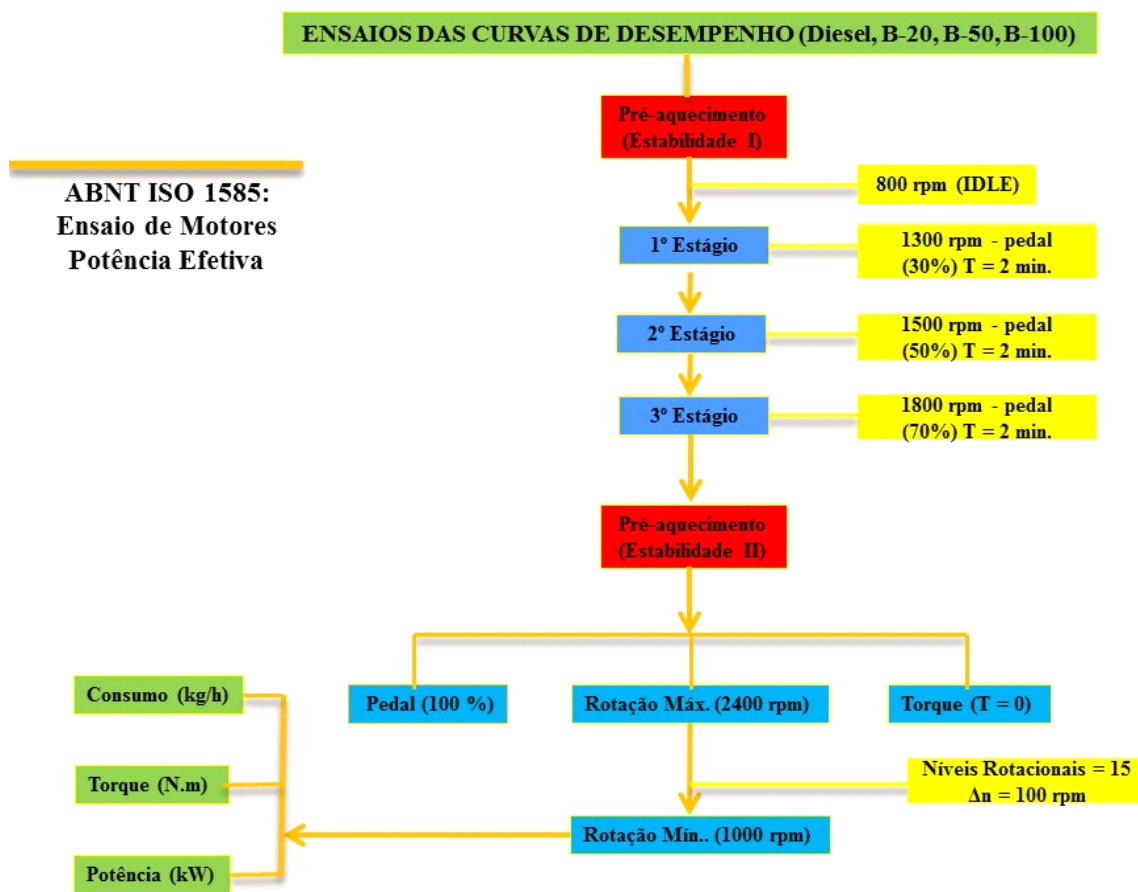


Figura 6 – Metodologia de Ensaios Motor-dinamômetro

A fuligem filtrada provoca o enegrecimento do papel de filtro, que é detectada por uma cabeça de medição fotoelétrica e avaliada no microprocessador para calcular o resultado em três formas de medições: FSN (*Filter Smoke Number*), mg/m^3 (Teor de fuligem) e nível de poluição (%), conforme (Figura 7).



Figura 7 – Medidor de fuligem “*AVL smoke meter*” do laboratório de motores e combustíveis (INMETRO-RJ)

Resultados e discussão

A potência média e máxima desenvolvida observada entre os combustíveis Diesel S-10, B-20, B-50 e B-100 foi com o uso de B-20, seguido pelo Diesel S-10, contudo mantiveram uma diferença de penas 0,3 kW (0,4%), conforme (Tabela 1).

	Potência Máxima (kW) 2300 rpm	Torque Máximo (N.m) 1800 rpm	Consumo Mínimo (kg/h) 1000 rpm
Diesel	83,37	383,67	8,43
B-20	83,67	381,67	12,63
B-50	81,13	371,00	19,17
B-100	78,77	365,33	26,47

Tabela 1. Desempenho máximo para os combustíveis na triplicata das amostras

Uma das propriedades, tal como a densidade, pode alterar o desempenho do motor. Um combustível de alta densidade pode gerar fumaça negra e grande liberação de material particulado. A densidade, portanto, influencia a potência desenvolvida pelo motor, independentemente da fonte de energia oleaginosa, pois a diferença de massa entre os diferentes tipos de combustíveis influencia na injeção do combustível alterando a potência (ASHRAFUL, et al., 2014).

Para o torque médio e máximo o Diesel obteve melhor resposta, seguido pelo B-20, com pequena variação de 2,0 N.m (0,5%). Já o consumo médio e mínimo de combustível, o Diesel se destacou como combustível mais econômico, o B-20 em segundo e o maior consumidor, em kg h^{-1} , foi o biodiesel B-100, por apresentar baixo poder calorífico.

O desempenho do B-20, em termos de potência e torque médios e máximos, ficou semelhante ao diesel S-10, ainda que tenha apresenta consumo de combustível mais elevado. Estudos indicam que o comportamento do B-20 foi superior ao diesel, ao analisarem as curvas de potência, torque e consumo de combustível, ainda que tenham os biocombustíveis apresentado consumo superior ao diesel (CASTELLANELLI, et al., 2008).

Para todos os combustíveis observados, ainda que o B-20 tenha apresentado diferenças insignificantes em relação ao diesel S-10 com relação a torque e potência, à medida que se

aumentou a concentração de biodiesel na mistura ao diesel, com queda de desempenho e aumento do consumo de combustível, devido à elevação do índice de viscosidade.

Maiores concentrações de biocombustível, tende a aumentar o consumo e umas dessas causas é o elevado índice de viscosidade, apresentado principalmente em B-100. Biodiesel mais concentrado apresenta elevada viscosidade prejudicando a mistura com o oxigênio, devido à baixa pulverização das gotículas do combustível, por possuírem diâmetros maiores de suas partículas.

Dessa forma, a elevada viscosidade cinemática leva a sua baixa atomização da queima, ou seja, uma combustão incompleta (Ali, et al., 2016). A viscosidade é uma das propriedades mais importantes, uma vez que desempenha um papel dominante no processo de pulverização do combustível, a formação da mistura e de combustão (ALPTEKIN, et al., 2008).

No entanto, a vantagem de possuir maior número de cetano, principalmente B-100, esta propriedade torna-se compensatória ao diminuir o tempo de ignição, proporcionando uma melhor resposta do motor, com menor quantidade de combustível na câmara de combustão e mistura mais regular ar/combustível.

A qualidade de ignição por compressão está diretamente relacionada com o número de cetano. Portanto, quanto maior o número de cetano, melhor será a queima do combustível e o biodiesel pode alcançar o valor máximo do número de cetano ($NC = 60$), conforme anunciado (SUH, et al., 2016).

O baixo consumo de combustível observado pelo diesel, se justifica por possuir maior poder calorífico dentre os demais combustíveis, o que significa maior quantidade de energia transferida para a câmara de combustão, ou pistões do motor.

De acordo com pesquisa realizada por CHEIKH, et al., 2016, verificou-se que misturas de Bx apresentaram ligeiro aumento de consumo de combustível com o aumento de rotação, enquanto que o B-100 ocorreu o contrário, com diminuição do consumo de combustível, pelo aumento de temperatura do motor e consequente diminuição da viscosidade e aproveitamento do poder calorífico.

Os desvios padrões (DP) da potência média, na triplicata das amostras, para todos os combustíveis, em todos os níveis rotacionais apresentaram baixos valores médios: Diesel (DP = 0,30), B-20 (DP = 0,54), B-50 (DP = 0,78) e B-100 (DP = 0,69), sendo que o diesel com menor desvio padrão médio. A potência média desenvolvida por todos os combustíveis, na rotação de 2300 rpm, apresentou a relação desvio padrão e potência média 0,65% para o diesel, 0,69% para o B-20, 0,99% para o B-50 e 1,37% para o B-100 (Figura 8).

Observou-se que, com o aumento rotacional há um aumento da potência média, semelhantemente para todos combustíveis, visto que os pontos das curvas praticamente sobrepõem ao longo das trajetórias dos pontos.

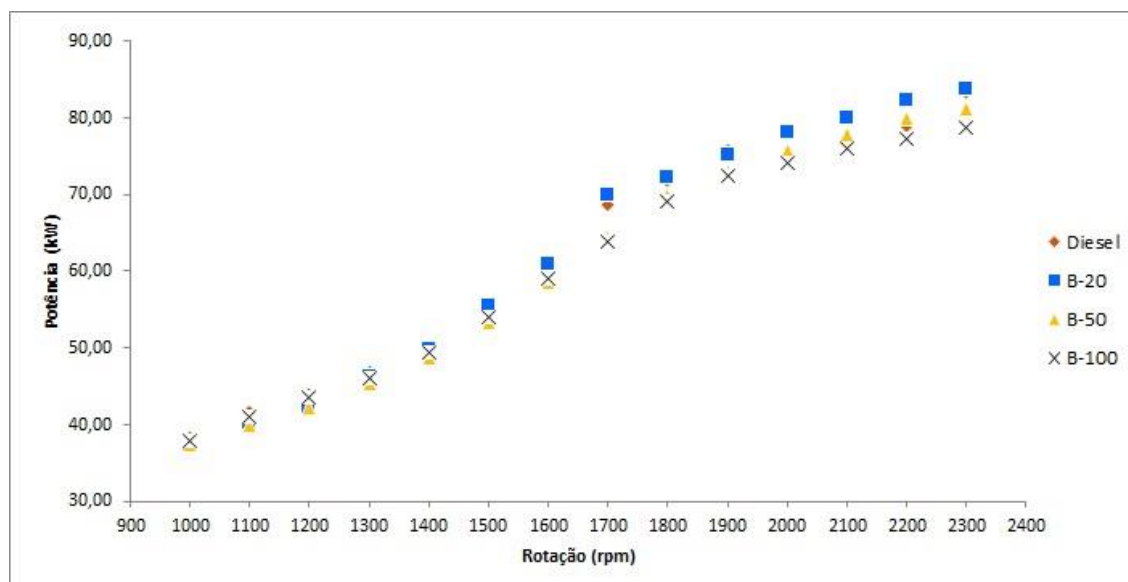


Figura 8 – Potência média entre combustíveis na triplicata das amostras

Para o torque médio, foram observados os desvios padrões médios para Diesel (D.P. = 2,77), B-20 (D.P. = 3,93), B-50 (D.P. = 5,16) e B-100 (D.P. = 5,08), novamente o diesel com menor valor em desvio padrão médio. Para todos os combustíveis a 1800 rpm com torque máximo alcançados por todos os combustíveis, a relação entre desvio padrão e o torque médio 0,83% para o Diesel, 0,30% para o B-20, 0,97% para o B-50 e 0,63% para o B-100.

Observou-se que na rotação de 1000 rpm a 1400 rpm, houve queda gradativa do torque médio, entre os combustíveis, sendo que os combustíveis diesel e B-20 apresentaram semelhanças e alternâncias entre si nos valores de torques médios, enquanto que B-50 indicou o menor valor de torque médio (Figura 9).

Pode-se verificar que a rotação do motor (N) aumentou em uma proporção maior que a potência efetiva (P_E), como é o caso do intervalo de 1000 a 1400 rpm. A partir desta velocidade angular, o torque diminui e a potência aumenta com maior valor de gradiente, o que pode ser observado pela curva de potência (Figura 8), provocando um aumento de torque. A potência efetiva (P_E) é estimada em função do torque (T) e da velocidade de rotação (N) no volante do motor, sendo que estes parâmetros são obtidos em equipamentos denominados dinamômetros. Para tanto, a potência é diretamente proporcional à velocidade rotacional e ao torque do motor

(BRUNETTI, et al., 2013). Ou ainda, o torque é diretamente proporcional a potência do motor e inversamente proporcional à velocidade angular do eixo volante do motor (VARELLA, 2010).

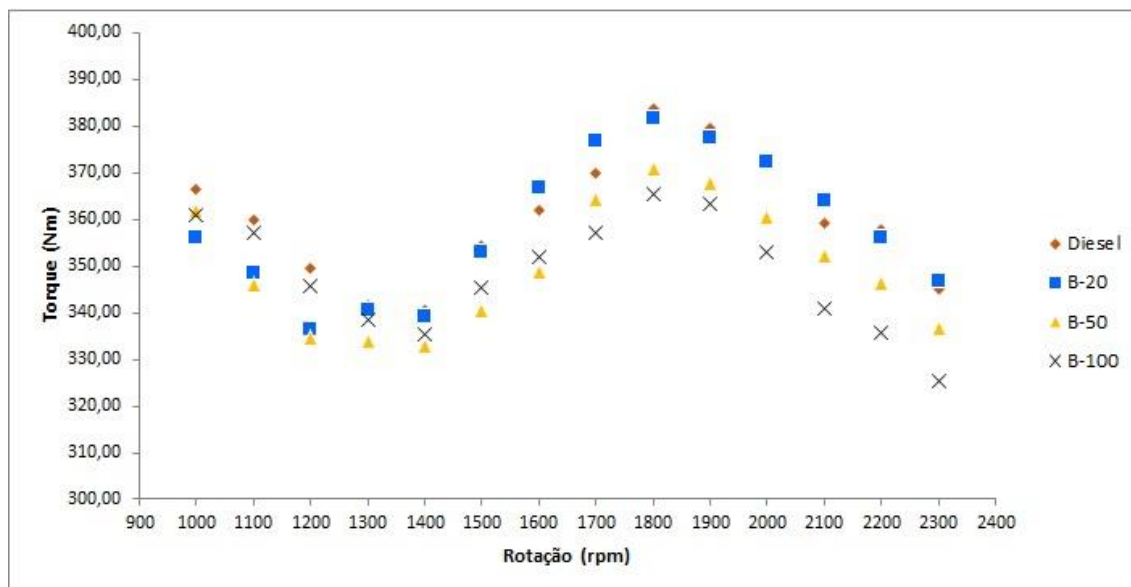


Figura 9 – Torque médio entre combustíveis na triplicata das amostras

Na sequência de 1400 a 1800 rpm, observa-se o crescimento dos valores do torque médio para todos os combustíveis e do intervalo de 1800 a 2300 rpm percebe-se uma queda gradativa do torque médio dos combustíveis estudados.

Mas em geral, entre 1000 a 2300 rpm os combustíveis apresentaram semelhanças entre si com variações gradativas nos valores dos torques médios, com pequenas oscilações, ou seja, elevações e quedas de torques médios.

Para os desvios padrões médios de todas as rotações em seus respectivos consumos médios de todos os combustíveis, observou-se que o Diesel apresentou $DP = 0,06$, o B-20 com valor de $DP = 9,21$, o B-50 com $DP = 11,58$ e o B-100 com medida $DP = 11,76$ sendo que o Diesel apresentou menor desvio padrão observado, enquanto que o B-100 com valor médio máximo no desvio padrão.

Na rotação máxima, foi verificado que a relação entre desvio padrão e o consumo médio apresentou 24,46% para o Diesel, 43,79% para o B-20, 43,77 % para o B-50 e 33,55% para o B-100; enquanto que à rotação mínima o Diesel demonstrou uma relação de 0,71%, o B-20 uma relação de 73,15%, o B-50 de 59,20% e o B-100 com apenas 46,40%.

Observadas as curvas de consumo médio para B-20, B-50 e B-100, todas se comportaram em linhas paralelas e crescentes, demonstrando que a variação do consumo médio apresentou valor igual entre si, sendo o B-20 o mais econômico (Figura 10).

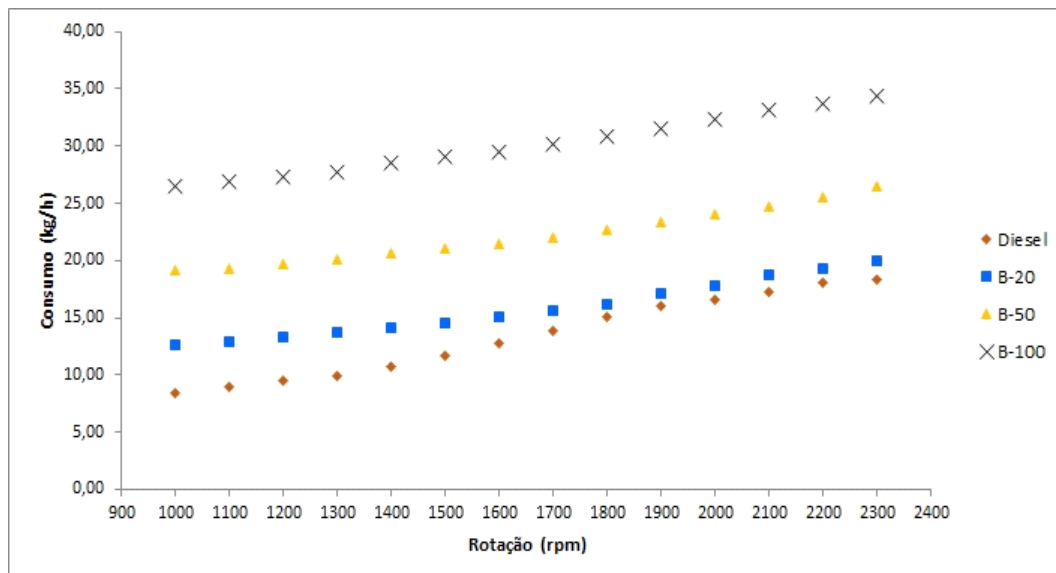


Figura 10 – Consumo médio entre combustíveis na triplicata das amostras

Quanto ao desvio padrão, todos os combustíveis ensaiados, na triplicata das amostras, responderam com baixa oscilação nos valores, destacando-se com maiores porcentagens na ordem o B-20 (2,79% - 1000 rpm), o diesel (2,64% - 1000 rpm), o B50 (2,30% - 1000 rpm) e o B-100 (1,93% - 1000 rpm) demonstrando também baixo nível de fumaça. Com relação ao desvio padrão, os valores não diferiram estatisticamente entre todos os combustíveis e em todas as velocidades rotacionais analisadas.

Para os quatro tratamentos, S-10 e os biodieseis a 20%, 50% e 100%, nas variáveis dependentes de potência, torque e consumo de combustível e as independentes, os 14 níveis de velocidades, as médias potências máximas (2300 rpm), não diferiram estatisticamente entre si para todos os combustíveis, não havendo variação significativa apresentando menor variação para diesel com 0,36% (83,36 kW) e maior variação para B-100 de 1,47% (78,76 kW), comprovando a confiabilidade das observações tomadas.

Observou-se que, tanto o *valor-P* = 0,0001 quanto o valor de $F_{\text{calculado}} = 25,38$ ser maior que o valor de $F_{\text{crítico}} = 4,06$, não indica haver estatisticamente diferença significativa entre as medidas tomadas para as médias de potências a 2300 rpm.

Para o torque, a 1800 rpm, onde todos os combustíveis apresentaram o melhor desempenho, não

apresentaram variação significativa entre as observações, visto que a menor variação de 0,003% (381,66 N.m) para o B-20 e maior variação para B-100 de 0,151% (365,33 N.m).

Observou-se, ainda, tanto o *valor-P* = 0,0001 quanto o valor de $F_{\text{calculado}}$ = 30,44, ainda maior que o valor de $F_{\text{crítico}}$ = 4,06, confirmaram não haver estatisticamente diferença significativa entre as medidas para os torques a 1800 rpm.

Para o consumo mínimo de combustível, a 1000 rpm, todos os combustíveis testados não apresentaram estatisticamente diferença significativa entre as medidas tomadas, sendo avaliados o *valor-P* = 0,18 quanto o valor de $F_{\text{calculado}}$ = 2,03, menor que $F_{\text{crítico}}$ = 4,06.

Foram avaliadas as curvas de tendências de potências médias dos referidos combustíveis, apresentam características semelhantes entre si, observadas pelas curvas de tendência e apresentaram valores de $R^2 > 0,96$, o que indica que existe uma correlação entre potência e rotação não havendo, portanto, interferência de nenhuma outra variável.

Observou-se que as curvas não apresentaram oscilações significativas, com elevação gradativa dos valores de suas potências médias, à medida que se eleva a rotação do motor de 1000 rpm a 2300 rpm, com maior valor para o B-20 (83,67 kW) seguido pelo diesel 83,37 kW) e o menor valor atribuído ao B-100 (78,77 kW).

Para a avaliação das curvas de tendências para torques médios, para todos os combustíveis, foi observado que houve características semelhantes entre si, nos ensaios de motor e apresentaram valores de $R^2 > 0,97$, indicando uma correlação entre torque e rotação, não havendo interferência de outra variável. Não ocorreram oscilações significativas da rotação 1000 rpm a 2300 rpm mantendo um torque médio próximos entre os combustíveis com maior torque médio para o diesel (383, 66 Nm), seguido do B-20 (381, 66 Nm) e menor para o biodiesel B-100 (365,33 Nm).

Para os combustíveis, todos apresentaram semelhanças nas entre si, observadas pelas curvas de tendências, com em torno de $R^2 > 0,99$, o que indica a existências de uma correlação entre consumo e rotação não havendo, portanto, interferência de qualquer outra variável. A curva de tendência para o diesel indica que há um aumento do consumo médio de combustível, à medida que há o aumento de rotação até a 2300 rpm, sendo que neste ponto o consumo médio é máximo, 18,37 kg/h, e máxima de 83,37 kW.

Comparativamente com o diesel, o B-20 apresentou maior consumo médio em todas as rotações, mas os dois demonstraram apresentar desempenhos semelhantes, o que de se esperar

pois o biocombustível possui menor poder calorífico em relação ao diesel comercial. Outra comparação, o B-20 apresentou curva de tendência semelhante aos B-50 e B-100, embora tenha percebido a elevação do consumo à medida que se aumenta a mistura de biocombustível ao diesel. Em rotação intermediária de 1800 rpm, com consumo médio de 22,67 kg/h, entre os consumos máximo e mínimo com melhor desempenho na rotação mínima, 19,17 kg/h.

O B-50 apresentou queda de desempenho em relação aos combustíveis anteriores, no que se refere à potência e torque com aumento do consumo de médio de combustível. O maior consumo médio de combustível foi observado pelo B-100, 34,40 kg/h, a 2300 rpm, sendo que o seu menor consumo foi de 26,47 kg/h (1000 rpm), superior ao consumo máximo do diesel e do B-20 e próximo ao máximo do B-50. Em síntese, o diesel apresentou melhor desempenho em comparação aos biodieseis, no entanto, o B-20 desenvolveu maior potência e torque praticamente idêntico ao diesel.

No que se refere ao consumo de combustível, observou-se que na tomada dos resultados o diesel apresentou como o combustível mais econômico, em consumo em kg/h, e o B-100 o menos econômico e, ainda, com menor potência e torque em trabalho motor.

Todavia, tal situação já prevista por diversos autores que, por outro lado, é um combustível que emite baixíssimo nível de poluição, como o CO e CO₂, sendo que o mais importante é a não presença de SO₂ na atmosfera, material altamente poluente e provocador da chuva ácida e efeitos danosos aos seres vivos, dentre outros prejuízos ambientais (PEDROZA, et al., 2014).

De acordo com RIBEIRO, et al., 2015, o biodiesel apresenta-se como combustível renovável, não tóxico, o qual pode ser utilizado em substituição do diesel de petróleo em ciclos motores. Além disso, oferece uma alternativa interessante, por ser de origem vegetal, reduzindo de maneira significativa a presença de compostos de enxofre, compostos orgânicos voláteis e óxidos de carbono na atmosfera.

Mas ainda que apresente maior consumo de combustível, o biodiesel torna-se competitivo economicamente a partir do momento em que se desenvolva motores tecnologicamente mais evoluídos, investindo-se no processo de produção do biodiesel com tantas fontes oleaginosas disponíveis no mundo e com a diminuição com gastos referentes aos danos causados já citados anteriormente.

Dessa forma, descobriram que o biodiesel é econômico e competitivo em relação ao diesel e analisaram as variações das propriedades físico-químicas das misturas entre diesel e biodiesel apresentando poucas diferenças entre eles, contudo com o uso de biodiesel em proporções mais elevadas houve

diminuição considerável das emissões, principalmente de enxofre, no entanto, com aumento do consumo de combustível, mas os benefícios com a diminuição das emissões compensam o uso de biodiesel, inclusive em maiores concentrações (BHUIYA, et al., 2016).

Ao analisar o rendimento do motor, em termos de porcentagem, numa relação entre o desempenho dos biocombustíveis de soja e o combustível diesel, pode-se observar que a potência do B-20 apresentou 0,35% superior ao diesel, enquanto que os outros B-50 e B-100 demonstraram rendimentos negativos, ou seja, inferiores ao diesel e ao próprio biodiesel na proporção de 20% valendo-se destacar o B-100, com menor rendimento, – 5,51% (Tabela 2).

O rendimento apresentado pelo motor relativo ao torque, verificou-se que todos os biocombustíveis demonstraram valores percentuais negativos, com relação ao diesel S-10, sendo que o B-20 com um percentual insignificante de – 0,52%, no entanto, o B-100 com maior variação de – 4,78%.

Em se tratando de consumo de combustível, todos os biodieseis apresentaram um consumo elevado, medidos em porcentagens, com relação ao diesel apresentando o B-20 como o menor consumidor e o B-100 o maior consumidor de combustível.

	Potência (kW)	Torque (N.m)	Consumo de Combustível (kg/h)
B-20	0,35 %	- 0,52 %	58,46 %
B-50	- 2,68 %	- 3,30 %	240,52%
B-100	- 5,51 %	- 4,78 %	332,12%

Tabela 2 – Rendimento do motor

Em resumo, dentre as amostras com suas médias de desempenho para cada biocombustível, observou-se que o B-20 foi o combustível que se assemelhou ao diesel apresentando potência e torque semelhantes entre si, no entanto, com um consumo um pouco mais elevado que o diesel. Enquanto que o B-100 o pior rendimento entre os biodieseis, ainda que se comparado ao B-50, com o dobro da concentração verificada a 100% não representou proporcionalmente uma queda de desempenho e consequentemente o rendimento comparativamente ao biodiesel a 50%.

Conclusões

O Biodiesel (B-20) apresentou desempenho e rendimento semelhantes ao Diesel S-10, com potência superior e torque inferior, porém com aumento de consumo de combustível.

O Biodiesel (B-50) apresentou desempenho e rendimento muito próximos ao B-20, com pequena queda de potência e torque e ligeiro aumento de consumo de combustível.

O Biodiesel (B-100) apresentou desempenho e rendimento inferiores a todos os combustíveis, com menor potência, menor torque e maior consumo de combustível.

O Diesel (S-10) pode ser substituído parcialmente pelo B-20, pois apresentou desempenho e rendimento semelhantes, com o ganho na diminuição de poluentes e aumento da vida útil do motor.

O Diesel (S-10) pode ser substituído parcialmente pelo B-50, ainda que este apresente menor desempenho e rendimento, no entanto diminui ainda mais as emissões e aumento da vida útil do motor, tornando-o cada vez mais independente ao diesel, se comparado ao B-20. O Diesel (S-10) pode ser substituído integralmente pelo B-100, ainda que este apresente menor desempenho e rendimento dentre todos os combustíveis, no entanto seu uso diminui drasticamente o nível de emissões de particulados causadores do efeito estufa.

A ausência de enxofre no B-100 evita a formação da chuva ácida, das diversas doenças ocasionadas nos grandes centros urbanos, prejuízos ao meio ambiente e agricultura e a contaminação do próprio motor.

Agradecimentos

Ao Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO-RJ), ao celebrar o convênio com a Universidade Federal do Tocantins (UFT), para a pesquisa no Laboratório de Motores e Combustíveis.

Ao Instituto Federal do Tocantins (IFTO), campus Palmas, o qual sou professor da área de indústria, em nos apoiar com o transporte do biodiesel para o destino da pesquisa.

À GRANOL S/A (TO), pela doação do biodiesel de soja proveniente da região do Tocantins, inclusive do Matopiba, para os ensaios em motores a diesel.

À Secretaria de Agricultura e Pecuária do Estado do Tocantins (SEAGRO-TO), creditando o trabalho entre governo, empresa e instituições de ensino e pesquisa.

À Agência de Metrologia, Avaliação da Conformidade, Inovação e Tecnologia do Estado do Tocantins pelo apoio e reconhecimento à pesquisa e desenvolvimento para o estado.

Referências

ALI, O. M.; MAMAT, R.; ABDULLAH, N. R.; ABDULLAH, A. A. Analysis of blended fuel properties and engine performance with palm biodiesel–diesel blended fuel. **Renewable Energy**, v. 86, p. 59–67, 2016.

ALPTEKIN, E.; CANAKCI, M. Determination of the density and the viscosities of biodiesel–diesel fuel blends. **Renewable Energy**, v. 33, p. 2623–2630, 2008.

ASHRAFUL, A. M.; MASJUKI, H. H.; KALAM, M. A.; FATTAH, I. M. R.; IMTENAN, S.; SHAHIR, S. A.; MOBARAK, H. M. Production and comparison of fuel properties, engine performance, and emission characteristics of biodiesel from various non-edible vegetable oils: A review. **Energy Conversion and Management**, v. 80, p. 2623–2630, 2014.

BASTOS, R. K.; FRIGO, E. P.; SANTOS, R. F.; MARTINEZ, D. G.; MOREIRA, M. C. L.; ALVES, H. Biodiesel Second Generation. **J. Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v.4, p. 120-131, 2015.

BHUIYA, M. M. K.; RASUL, M. G.; KHAN, M. M. K.; ASHWATH, N.; AZAD, A. K.; HAZRAT, M. A. Prospects of 2nd generation biodiesel as a sustainable fuel – Part 2: Properties, performance and emission characteristics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 1129–1146, 2016.

BRUNETTI, F.; GARCIA, O. Motores de Combustão Interna. **Editora Edgard Blucher Ltda**, v.1, São Paulo, 2013.

CASTELLANELLI, Márcio, *et al.* Performance of cycle Diesel engine in dynamometer using diesel/biodiesel mixtures. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 1, p. 145-153, 2008.

CHEIKH, K.; SARY, A.; KHALED, L.; ABDELKRIM, L.; MOHAND, T. Experimental assessment of performance and emissions maps for biodiesel fueled compression ignition engine. **Applied Energy**. V. 161, 1 jan. 2016, p. 320–329. Elsevier.

GONÇALVES, A. L.; TAKAKURA, A. K.; COSTA, E. C.; MACHADO, N. T.; ARAÚJO, M. E. Simulação da Produção Contínua e Purificação do Biodiesel de Óleo de Palma usando ASPEN HYSYS. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, V. 5, N. 2, p. 252-266, 2016.

KNOTHE, G.; MATHEAUS, A. C.; RYAN, T. W. Cetane numbers of branched and straight-chain fatty esters determined in an ignition quality tester. **Fuel**, v. 82, p. 2623 – 2630 <http://www.sciencedirect.com/science/journal/00162361/82/8>, 2014.

LOFRANO, R.N.Z.; COSTA, F.M.F.; OLIVEIRA, L.A.F.; OLIVEIRA, M.C.A. Métodos e Perspectivas Tecnológicas de Obtenção de Combustíveis de Primeira e Segunda Geração. **Revista Exacta**, 2013.

NEVES, M. C. T *et al.* Desempenho do trator agrícola em função do tipo de biodiesel: Soja X Murumuru. **Reveng**, Viçosa, Minas Gerais, v. 21, n. 274, p.351-360, 2013.

PARENTE, Expedito José de Sá. BIODIESEL: Uma aventura tecnológica num país

engraçado. Fortaleza, Ceará: **Tecbio**, 2003. 66 p. Disponível em: <<http://www.xitizap.com/Livro-Biodiesel.pdf>>. Acesso em: 13 mar. 2016.

PEDROZA, M. M. Bio-óleo e biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo. Tese de Doutorado, **Universidade Federal do Rio Grande do Norte**, 2011. 210 f.

PEDROZA, M. M., VIEIRA, G. E. G., SOUSA, J. F., BEZERRA, M. B. D. Characterization of the products from the pyrolysis of sewage sludge in 1 kg/h rotating cylinder reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 11, p.147-157, 2014.

RIBEIRO, C. B.; STROPARO, E. C.; SOUZA, K. V. Produção de Biodiesel a partir de *Cyperus esculentus* e Tratamento do Efluente oriundo da Purificação. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, V. 4, p. 73-85, 2015.

SEE ALGAE TECHNOLOGY. See algae technology supplies commercial infrastructure for production of algae-based compounds. Disponível em: <<http://www.seealgae.com>>. Acesso em: 20 nov. de 2014.

SUH, H. K.; LEE, C. S. A review on atomization and exhaust emissions of a biodiesel-fueled compression ignition engine. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 1601-1620, 2016.

RIGOTTE, Márcio. Roberto. Desempenho de conjunto moto-gerador utilizando biocombustível sob cargas variadas. 2016. 57 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia na Agricultura, **Universidade Estadual do Oeste do Paraná**, Cascavel, Paraná, 2014.

VARELLA, C. A. A. Estimativa da Potência dos Motores de Combustão Interna. Engenharia de Máquinas e Mecanização Agrícola, **Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro**, RJ. p. 1-9. 27 de abr. 2010.

VIEIRA, G. E. G., ROMEIRO, G. A., SELLA, S. M., DAMASCENO, R. N., PEREIRA, R. G. Low temperature conversion (LTC) – An alternative method to treat sludge generated in an industrial wastewater treatment station – Batch and continuous process comparison. **Bioresource Technology**, 100, p.1544–1547, 2009.