

MTL 2016 – La Plata, Argentina

# AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM MOTOR OPERANDO COM MISTURAS BIODIESEL-ETANOL

Lucas Mendes Scarpin<sup>1, 2</sup>, Renan Paiva Rocha<sup>2</sup>,  
Ricardo Alan Verdú Ramos<sup>2</sup>

1-Centro Universitário Toledo, Rua Antônio Afonso de Toledo, 595, Araçatuba, Brasil.  
imscarpin@toledo.br

2-Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Avenida Brasil, 56, Ilha Solteira, Brasil.  
ramos@dem.feis.unesp.br

**Palavras-chave:** Avaliação de desempenho, bancada dinamométrica, biodiesel, etanol, motor de combustão interna.

## Resumo

Atualmente, o país apresenta destaque na produção de etanol e no desenvolvimento de tecnologias para esse setor, como a produção de etanol de segunda geração e biodigestão da vinhaça. Por outro lado, a produção de biodiesel, o qual é utilizado em substituição parcial ou total ao óleo diesel, é crescente, tanto em termos de produção de matérias-primas quanto em capacidade industrial. Por meio de uma breve revisão bibliográfica, foi observado que a adição de etanol em até 20% em volume na mistura com o biodiesel é favorável ao desempenho do motor. Diante desse contexto, foi proposto analisar o desempenho de um motor de combustão interna de ignição por compressão, operando com diesel (B5), biodiesel (B100) e misturas entre biodiesel e etanol nas seguintes proporções em volume: 95% de biodiesel e 5% de etanol (B95E5), 90% de biodiesel e 10% de etanol (B90E10) e 80% de biodiesel e 20% de etanol (B80E20). Para o desenvolvimento dos ensaios, foi utilizada uma bancada dinamométrica, composta por um freio eletromagnético TDB-500 da TopDyno, o qual é controlado por uma central eletrônica. Analisando as curvas de torque e potência, obtidas em função da rotação e do combustível utilizado nos ensaios, é possível afirmar que para rotações acima de 900 rpm, a adição de 10% em volume de etanol no biodiesel revela um incremento no desempenho, gerando maiores níveis de torque e, conseqüentemente, potência de eixo.

## 1. Introdução

Primordialmente, pode-se afirmar que a crise do petróleo nos anos 70 despertou o mundo para a busca de formas alternativas de energia e, no Brasil, motivou, primeiramente, a criação do Proálcool e depois de outros programas, como o PPT (Programa Prioritário de Termoeletricidade) e o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica), sempre com a finalidade de incentivar o uso de combustíveis alternativos, dentre os quais se destacam: biodiesel, biogás, etanol, madeira oriunda de áreas de reflorestamento, óleos vegetais e outros.

Atualmente, por conta dos elevados custos do petróleo e seus derivados, os combustíveis alternativos passam a ser mais competitivos sob o ponto de vista econômico, devendo-se considerar, sobretudo, que as reservas de petróleo tendem à escassez. Assim, é de suma

importância o desenvolvimento dos métodos de obtenção da matéria-prima e processamento de bases energéticas alternativas.

Dentre os maiores produtores de biocombustíveis, o Brasil possui destaque na produção de etanol e no desenvolvimento de tecnologias para este setor, como a produção de etanol de segunda geração, que é obtido pela hidrólise da celulose. Por outro lado, a produção de biodiesel, o qual é utilizado em substituição parcial ou total ao óleo diesel de origem fóssil, é crescente tanto em termos de produção de matérias-primas quanto em capacidade industrial instalada. O emprego do biodiesel em motores veiculares ou estacionários reduz o consumo de combustíveis de origem do petróleo e possibilita a redução nas emissões.

O biodiesel pode ser de origem vegetal, cujo óleo utilizado para produção é extraído de plantas oleaginosas, como soja, mamona, palma, girassol, caroço de algodão, pinhão manso, ou pode ser de origem animal, sendo obtido a partir do sebo bovino, suíno e de aves. Por fim, o biodiesel pode ser de origem residual, onde os óleos de cozinha usados são recolhidos e devidamente tratados para serem utilizados como matéria-prima.

As estruturas moleculares dos óleos vegetais e das gorduras animais são formadas por três moléculas de ácidos graxos ligados a uma molécula de glicerol, que os tornam conhecidos como triacilgliceróis. Para produzir biodiesel, o óleo é misturado a um álcool, o qual pode ser metanol ou etanol. Em seguida, é inserido um catalisador que é uma substância que acelera a reação química entre o óleo e o álcool, denominada reação de transesterificação. Esta reação quebrará as ligações do glicerol com os ácidos graxos, resultando em uma massa reacional constituída de duas fases: glicerol e ésteres alquílicos (biodiesel), os quais, dependendo da natureza do álcool empregado, podem ser ésteres metílicos ou etílicos.

O biodiesel é um combustível de natureza renovável, que pode ser utilizado na substituição total ou parcial do diesel em motores de ignição por compressão. No território brasileiro, os principais tipos de biodiesel são os ésteres alquílicos de óleos vegetais ou gordura animal, que são obtidos através de uma reação denominada transesterificação. Devido à grande compatibilidade dos ésteres alquílicos com o diesel convencional, os caracteriza como uma alternativa capaz de atender à maior parte da frota de veículos diesel já existente no mercado.

Nos últimos anos, tem-se intensificado a quantidade de pesquisas voltadas à aplicação de biocombustíveis em motores de combustão interna alternativos, seja no âmbito numérico ou experimental. Deste modo, a seguir serão apresentados trabalhos relacionados à utilização de misturas entre biodiesel e etanol em motores de ignição por compressão.

Barbosa *et al.* (2006) avaliaram a eficiência térmica de um motor de ignição por compressão, funcionando em momentos distintos com diesel mineral e misturas deste com biodiesel, nas proporções B2, B5, B20 e B100. Para realização dos ensaios, foi utilizado um motor de um trator Valmet 85 id, modelo MWM-D225-4TVA, de quatro cursos, injeção direta, refrigerado a água, quatro cilindros em linha, cilindrada total de 3.778 cm<sup>3</sup>, taxa de compressão 18:1, com potência nominal segundo o fabricante de 78 cv (58,2 kW) a 2.300 rpm, seguindo-se a metodologia estabelecida pela norma NBR 5484 da ABNT, que se refere ao ensaio dinamométrico de motores. Concluiu-se que a potência do motor ao se utilizar Biodiesel foi pouco inferior àquela desempenhada pelo Diesel mineral, chegando a uma redução média de 1,31%.

Shi et al. (2006), procurando diminuir a emissão de material particulado (MP) de um motor Cummins-4B a diesel, realizaram testes usando uma mistura de etanol-biodiesel-diesel, na

proporção de 5:20:75 em volume. Os resultados mostraram uma redução de 21 a 39% no MP e um aumento de 2 a 14% na emissão de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), com relação a operação com diesel convencional. A mudança na emissão de monóxido de carbono (CO) não foi conclusiva e dependia muito das condições de operação, porém a emissão de hidrocarbonetos (HC) foi menor do que a emissão apresentada pelo diesel puro, na maioria das condições analisadas.

Eqúsqiza (2011) desenvolveu testes experimentais em um motor do ciclo diesel, operando com etanol hidratado ou gás natural em substituição parcial do diesel. Baseado nos dados fornecidos pelo diagrama pressão-ângulo de manivelas, foi possível analisar alguns parâmetros característicos da combustão, tais como início da combustão, taxa máxima de aumento da pressão e o pico de pressão. Os parâmetros de desempenho e emissões do motor foram analisados através da eficiência térmica e das concentrações de monóxido de carbono, hidrocarbonetos, material particulado e óxidos de nitrogênio. Os resultados mostraram que a operação *dual* de injeção, com altas taxas de substituição do diesel, favorece uma melhor queima dos combustíveis alternativos, refletindo em uma redução nas emissões de CO e MP, e em um pequeno aumento na eficiência térmica do motor. No entanto, existe também um aumento nas emissões de  $\text{NO}_x$  e, a medida que se elevou o avanço de injeção, foi possível observar um ruído mais alto gerado pelo motor.

Ferreira et al. (2013) mostraram a performance e o perfil de emissão de um motor a diesel operando com injeção de etanol no coletor de admissão, em conjunto com a injeção direta a alta pressão de uma mistura diesel-biodiesel. Para a injeção de etanol, foi usado um sistema eletrônico de controle que detecta pulsos de alta pressão no perfil de injeção do diesel. Os testes foram feitos com o motor operando a 1.800 rpm, conectado a um gerador de energia elétrica. A primeira composição testada foi somente a mistura diesel-biodiesel, enquanto as outras tiveram um aumento na proporção de etanol. A quinta composição usou 15% de etanol, porém foi utilizado 0,4% de aditivo (peróxido de di-terc-butil) na mistura principal de diesel-biodiesel. Os resultados mostraram que a adição de etanol acarretou uma redução no consumo de combustível, embora o gasto global de energia foi maior. O perfil de emissão mostrou uma consistente redução na emissão de  $\text{NO}_x$  e de MP, mas, por outro lado, houve um aumento na emissão de CO e HC. A análise energética apresentou um decréscimo na eficiência do motor com a adição de etanol. Além disso, foi constatada uma significativa redução da temperatura do ar na admissão com uso do etanol, sugerindo que parte da redução de  $\text{NO}_x$  pode ser atribuída a essa redução de temperatura, uma vez que o  $\text{NO}_x$  se forma a altas temperaturas. Provando, entre outras coisas, que a adição de etanol pode ser um importante método para reduzir a quantidade de  $\text{NO}_x$  nos gases de exaustão de um motor a diesel.

Murcak *et al.* (2013) avaliaram o desempenho de um motor monocilindro de injeção direta a diesel, operando com misturas entre diesel e etanol em diversos avanços de injeção. As misturas foram preparadas, contendo 5, 10 e 20% de etanol em volume. Como resultado, a potência máxima foi obtida para a mistura de 10% etanol-diesel em 3.000 rpm e avanço de injeção de 45° apms (antes do ponto morto superior). O torque máximo foi obtido operando com o mesmo combustível em 1.400 rpm e avanço de ignição de 25° apms. O consumo específico de combustível de eixo (bsfc) mínimo foi obtido para a mistura de 20% etanol-diesel em 1.200 rpm e avanço de injeção de 35° apms.

Diante desse contexto, foi proposto analisar o desempenho de um motor de combustão interna de ignição por compressão em uma bancada dinâmométrica, operando com diesel

(B5), que servirá como base para comparação, biodiesel (B100) e misturas entre biodiesel e etanol nas seguintes proporções em volume: 95% de biodiesel e 5% de etanol (B95E5), 90% de biodiesel e 10% de etanol (B90E10) e 80% de biodiesel e 20% de etanol (B80E20).

## 2. Equipamentos

Neste tópico, serão apresentados os principais equipamentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho, os quais compõem a bancada dinamométrica: motor a ser testado, freio eletromagnético e sistema de controle e aquisição de dados dos ensaios.

### 2.1. Motor

O motor Mercedes-Benz, modelo OM-352, utilizado nos experimentos, foi concebido para aplicações agrícolas ou estacionárias. Por essa razão, a bomba injetora foi configurada, originalmente, para proporcionar uma rotação máxima da árvore de manivelas por volta de 2.300 rpm. A Tabela I apresenta as principais características construtivas e operacionais do motor.

Tabela I. Parâmetros do motor OM-352.

<b>Motor Mercedes-Benz OM-352</b>	
Número de cilindros	6
Disposição dos cilindros	Vertical em linha
Ciclo de funcionamento	Diesel de quatro cursos
Diâmetro do cilindro	97,0 mm
Curso	128,0 mm
Cilindrada total	5.675,0 cm <sup>3</sup>
Razão de compressão	17:1
Rotação em marcha lenta	600 rpm
Potência máxima	96 kW a 2800 rpm
Torque máximo	363 N.m a 1700 rpm
Tipo de injeção	Direta com bomba injetora Bosch

Fonte: Manual de manutenção do motor Mercedes-Benz OM-352.

## 2.2. Freio eletromagnético

O freio eletromagnético está acoplado diretamente à árvore de manivelas do motor que será ensaiado. Com isso, um campo magnético, o qual é controlado eletronicamente, é gerado pelas bobinas eletromagnéticas e atua sobre os discos do freio, gerando um torque de reação contrário ao sentido de rotação do conjunto, transformando a energia cinética em calor. O torque desenvolvido pelo freio é medido continuamente por uma célula de carga, que se encontra acoplada na carcaça.

## 2.3. Bancada dinamométrica

A bancada dinamométrica, concebida para o desenvolvimento dos experimentos deste trabalho, é apresentada por meio da Figura 1. Com isso, é possível observar o acoplamento entre o motor e o freio eletromagnético, além de seus respectivos sistemas de arrefecimento.



Figura 1. Bancada dinamométrica montada para os testes.

O controle e a aquisição de dados é realizado por meio de um sistema eletrônico, o qual foi adquirido em conjunto com o freio eletromagnético. Com a finalidade de se monitorar o funcionamento do motor, foi desenvolvido um painel para aferição da pressão de óleo do motor e da temperatura de funcionamento em pontos específicos.

## 3. Procedimento experimental

De acordo com o fabricante do freio eletromagnético, testes realizados em bancada dinamométrica, ou seja, nos casos em que o freio eletromagnético é acoplado diretamente à árvore de manivelas do motor, deve-se selecionar uma faixa de rotação para o ensaio e, em seguida, aplicar o torque de frenagem. Simultaneamente, despeja-se toda a potência do motor para a rotação em questão.

Com isso, foi proposto iniciar os testes em 800 rpm, visto que a rotação de marcha lenta do motor em regime é de aproximadamente 600 rpm. Deste modo, foi definido um passo de 100 rpm para cada teste, até alcançar a rotação máxima de 2.300 rpm, contabilizando um total de quinze faixas de rotação ensaiadas. Adicionalmente, as Figuras 2 e 3 ilustram as interfaces gráficas de aquisição de dados e de controle do conjunto.

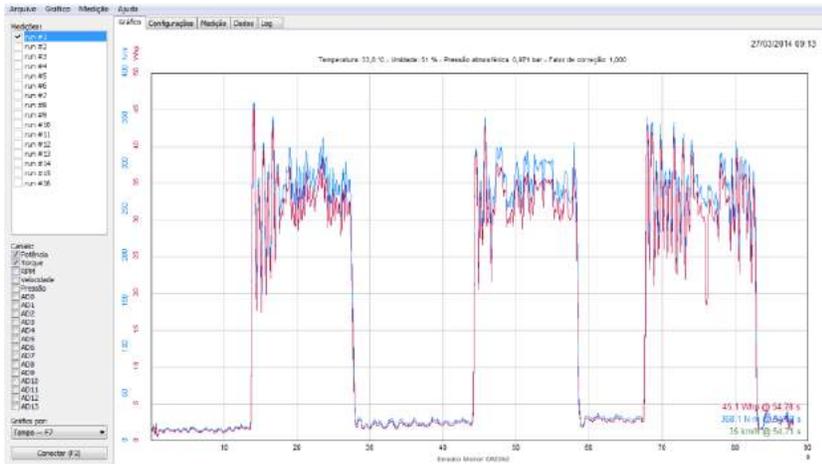


Figura 2. Interface gráfica de aquisição de dados.

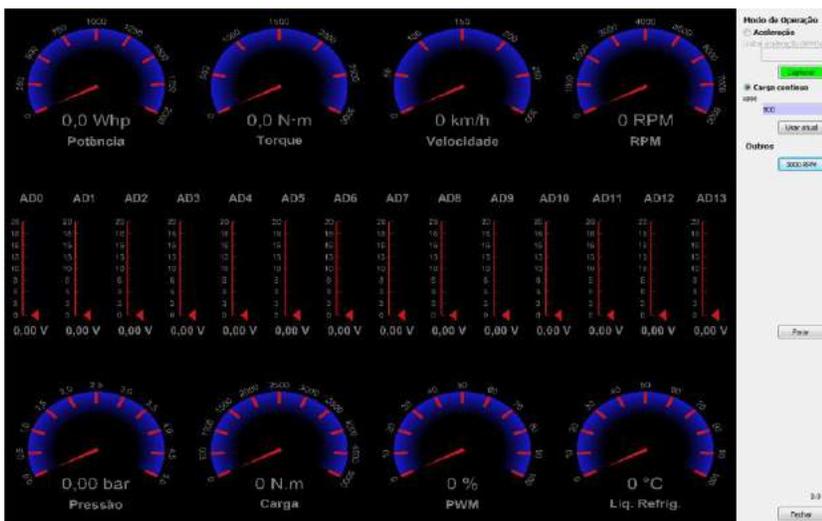


Figura 3. Interface gráfica de controle da bancada dinâmométrica.

Os combustíveis ensaiados: diesel (B5), biodiesel metílico de soja (B100), B95E5 (95% de B100 e 5% de etanol hidratado), B90E10 (90% de B100 e 10% de etanol hidratado) e B80E20 (80% de B100 e 20% de etanol hidratado), foram obtidos imediatamente antes dos ensaios e armazenados adequadamente.

Antes de realizar cada ensaio, o combustível a ser testado era conectado ao sistema de alimentação da bomba injetora e, em seguida, o motor era ligado. O mesmo funcionava em regime de marcha lenta até atingir a temperatura de operação (neste caso 85 °C) e, conseqüentemente, dava-se início ao ensaio.

#### 4. Resultados

Neste item, serão apresentados os resultados obtidos na forma de curvas para melhor visualização do comportamento do motor. Diante disso, as Figuras 4 e 5 representam graficamente o comparativo do torque e potência, respectivamente, em função da rotação e do combustível utilizado.

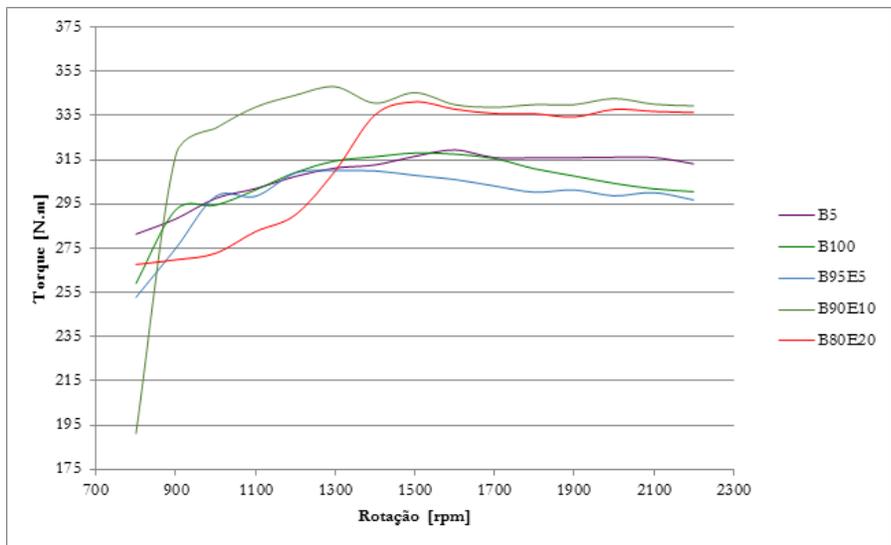


Figura 4. Comparativo do torque em função da rotação e do combustível.

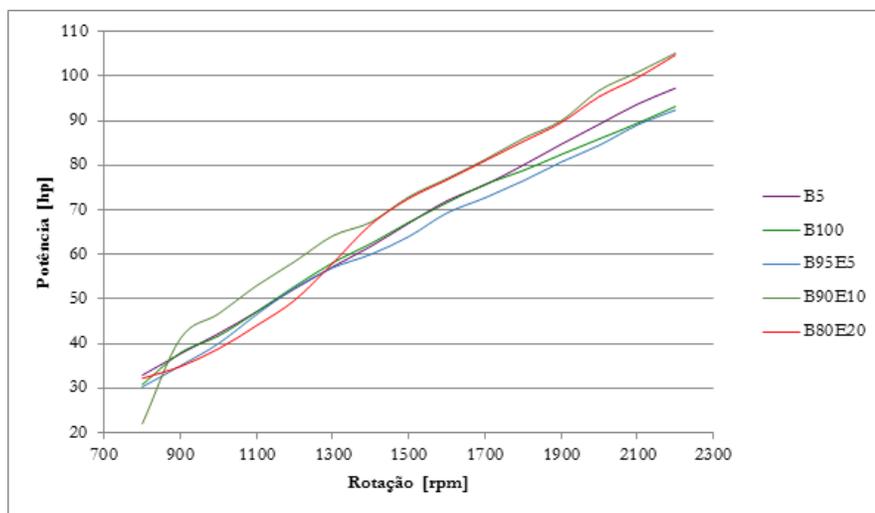


Figura 5. Comparativo da potência em função da rotação e do combustível.

Com a finalidade de se avaliar de modo comparativo a influência de certas composições de mistura, neste trabalho, é levado em consideração a base como sendo o B5 e a frequência de funcionamento de 1.700 rpm. Com isso, é possível observar um aumento na ordem de 7,2% para o torque gerado pelo motor, com o mesmo operando com B90E10. Analisando a máxima rotação alcançada pelo motor, tem-se um aumento de 8,1% na potência gerada, funcionando com B90E10.

Os resultados obtidos nos ensaios se aproximam dos que se tem observado na literatura, onde alguns trabalhos mostram que a adição de etanol, na proporção de até 10% em volume na mistura, favorece a conversão de energia do combustível em trabalho de expansão motora. Por outro lado, alguns trabalhos mostram que, operando com B100 há redução na potência de eixo de aproximadamente 1,3%, quando comparado com a operação com B5.

## 5. Conclusão

Por meio dos gráficos comparativos, é possível observar que a proporção de mistura B90E10 (90% em volume de biodiesel e 10% de etanol) apresenta grande destaque. Os níveis de torque e potência são superiores ao longo de grande parte da faixa de rotação ensaiada e, em particular para a faixa ao redor de 1.700 rpm, que se trata da rotação nominal de projeto do motor.

Analisando o comportamento do B80E20, é possível verificar que o torque e, conseqüentemente, a potência gerada acima de 1.500 rpm é maior que os níveis observados para B5 e B100. Abaixo dessa faixa de rotação, essa mistura é desfavorável à geração do trabalho de expansão motora.

Com relação às curvas de potência, é importante ressaltar o fato de que o motor foi desenvolvido para operar em baixas rotações e, conseqüentemente, não é possível observar a queda das curvas, por limitação da rotação, em função da bomba injetora.

## 6. Referências

- [1] BARBOSA, R. L.; SILVA, F. M.; SALVADOR, N.; CASTRO NETO, P., Eficiência de um motor à compressão utilizando diesel e misturas de biodiesel. 3º Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras e Biodiesel, Varginha. Anais. p. 1134-1139. 2006.
- [2] EGÚSQUIZA, J. C. C.; Avaliação experimental de um motor do ciclo diesel operando no modo bicomustível: diesel/etanol e diesel/gás; Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 168 f, 2011.
- [3] FERREIRA, P. V.; MARTINS, J.; TORRES, A. E.; PEPE, M. I.; SOUZA, R. M.S. J., Performance and emissions analysis of additional ethanol injection on a diesel engine powered with a blend of diesel-biodiesel. Elsevier: Energy for Sustainable Development, 2013.
- [4] MURCAK, A.; HASIMOGLU, C.; ÇEVİK, I.; KARABEKTAS, M.; ERGEN, G., Effects of ethanol–diesel blends to performance of a DI diesel engine for different injection timings. Elsevier: Fuel, 2013.
- [5] SHI, X.; PANG, X.; MU, Y.; HE, H.; SHUAI, S.; WANG, J.; CHEN, H.; LI, R., Emission reduction potential of using ethanol–biodiesel–diesel fuel blend on a heavy-duty diesel engine. Elsevier: Atmospheric Environment, 2006.

