



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM MOTOR DIESEL OPERANDO COM BIODIESEL

Rafael R. Brunelli, e-mail , brunelli@mecatronica.org.br

Pedro Barbosa Mello, e-mail , mello@mecanica.ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul –Programa do Pós Graduação em Engenharia Mecânica-

Rua Sarmiento Leite, 425, Porto Alegre RS CEP 90050-170

Resumo: *O trabalho apresenta uma análise técnica de desempenho dos motores de combustão interna ciclo Diesel, operando com combustível biodiesel em relação à operação com óleo diesel automotivo do tipo B. O desempenho foi avaliado em relação ao torque, potência, consumo específico de combustível e emissões de fumaça. A aplicação do biodiesel como uma nova forma de energia alternativa, sem alterações em projetos originais dos motores de combustão interna ciclo Diesel, motivou a realização deste trabalho. O motor utilizado nestes ensaios foi um motor Agrale M93 ID, monocilíndrico, com cilindrada de 668 cm³ e relação de compressão de 20,0:1. Neste motor foram ensaiados três tipos diferentes de biodiesel: o de soja, mamona e dendê. Todos os ensaios foram realizados utilizando-se percentuais específicos de adição de biodiesel ao óleo diesel. Utilizou-se inicialmente o B25 (adição de 25% de biodiesel ao óleo diesel tipo B), e posteriormente concentrações de B50, B75 e B100. Todo o sistema motriz foi instalado em uma bancada dinamométrica e instrumentado, a fim de permitir a coleta de informações e avaliações do torque, potência, consumo específico, emissões de fumaça, temperaturas e rotações de operação. Os ensaios foram desenvolvidos em velocidades de rotação de 2600, 2400, 2200, 2000 e 1800 min⁻¹, para cada uma das concentrações de biodiesel e óleo diesel, coletando-se posteriormente todos os dados necessários para aplicar no programa de correção, conforme normatização vigente. Os resultados apresentaram pequenas variações nos parâmetros torque e potência, com variações mais significativas para o consumo específico e emissões de fumaça. Observa-se ao final dos ensaios que a aplicação de biodiesel destas três oleaginosas não altera o funcionamento do motor até percentuais próximos a 25%. Para misturas acima de 50%, verifica-se que o motor ensaiado apresenta reduções mais significativas nos parâmetros torque e potência, com aumento considerável no consumo específico de combustível e redução expressiva nas emissões de fumaça.*

Palavras-chave: *Motor Diesel, Biodiesel, Desempenho, Emissões de particulado.*

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a Agência Nacional do Petróleo (ANP), por meio da Portaria nº 255/2003, define biodiesel como sendo um combustível composto de mono-alkilésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou de gorduras animais e designado por B100. Portanto considera-se biodiesel todo combustível obtido de biomassa que possa substituir parcial ou totalmente o óleo diesel de origem fóssil em motores ciclo Diesel, automotivos e estacionários. Esta definição é relevante para evitar a discriminação de qualquer rota tecnológica para a obtenção desse combustível de fonte vegetal ou animal, o que permite incluir, além do próprio óleo in natura, o obtido por transesterificação etílica ou metílica, por craqueamento, ou ainda por transformação em líquido, de gases obtidos de biomassa. O Brasil detém considerável experiência acumulada na área do biodiesel, mas, ao contrário de outros países considerados desenvolvidos, o país ainda se encontra em franco descompasso com a atual capacidade produtiva de biomassa, pois dispomos de condições de solo e clima privilegiados para a produção de diversas matérias-primas como soja, mamona, amendoim, dendê, babaçu, etc, e de várias rotas tecnológicas (transesterificação metílica e etílica e craqueamento térmico ou catalítico, dentre outras), suscetíveis de aproveitamento para fabricação de biodiesel, de acordo com os Ministérios das Minas e Energia [MME, 2008], Desenvolvimento Agrário [MDA, 2008] e da Agricultura, Pecuária e Desenvolvimento [MAPA, 2008].

Em nível de pesquisa e desenvolvimento, o biodiesel já integra a agenda de importantes entidades públicas e privadas, como os Ministérios da Ciência e Tecnologia e de Minas e Energia, Instituições de Pesquisa, Universidades Federais e Regionais, Centros Tecnológicos do país e exterior, a Agência Nacional de Petróleo, a Embrapa e a Petrobrás, além de iniciativas promovidas por diversos Estados da Federação e por entidades como as de Tecnologias Bioenergéticas, a Associação Brasileira da Indústria de Óleos Vegetais e a Confederação Nacional da Agricultura (CNA) dentre outras. A cada ano que passa elevem-se as pesquisas ambientais às emissões de veículos automotores e

equipamentos em geral que utilizam motores de combustão interna para funcionarem, principalmente nos grandes centros urbanos, saturados destes equipamentos: automóveis, ônibus e caminhões. Os índices permissíveis, por regulamentações, dos compostos nos escapamentos destes equipamentos, em geral, estão diminuindo, elevando cada vez mais as pesquisas por alternativas e ampliando o espaço para penetração dos combustíveis limpos - os combustíveis ecológicos. É importante ressaltar que existem no trabalho duas linhas globais de análise: uma relacionada à aplicação do combustível biodiesel em relação ao combustível diesel automotivo, mantendo-se as características químicas dos combustíveis, e outra linha que se refere à avaliação técnica do desempenho obtido nos motores, mantendo-se todas as características originais do motor ensaiado, relacionando novamente o biodiesel com o diesel automotivo.

Neste trabalho constam, também, uma série de informações tecnológicas, algumas referentes ao motor de combustão interna utilizado e outras sobre os combustíveis aplicados. Os resultados obtidos neste trabalho referem-se aos combustíveis biodiesel de soja, mamona e dendê em relação ao diesel automotivo tipo B.

2. MATERIAIS

2.1- Diesel Automotivo

O combustível óleo diesel utilizado nos ensaios, tanto no inicial quanto no final, e também para as diversas misturas com o biodiesel, é o combustível classificado pela ANP como tipo B, conforme Tab. (2.1). O óleo diesel aplicado ao projeto do trabalho em questão é fornecido por empresas certificadas nacionalmente pela ANP.

Tabela 2.1. Principais diferenças do óleo diesel comercializado no Brasil.

Principal Uso	Máquinas Agrícolas	Automotivo Comercial		Laboratórios	Embarcações Marítimas
Tipo de Diesel	Rubilene 813	Metropolitano (D)	Interior (B)	Automotivo de Referência (Padrão)	Marítimo
Comercialização	Nas empresas devido à segurança	Somente capitais	Demais regiões do território nacional (ex.: Caxias do Sul).	Ensaio de avaliação de consumo de combustível e emissões veiculares para fins de homologação	
Enxofre Total, máx.	7500 mg/kg ou ppm (0,75% massa)	500 mg/kg ou ppm (0,05% massa)	2000 mg/kg ou ppm (0,2% massa)	50 mg/kg ou ppm (0,005% massa)	10000 mg/kg ou ppm (1% massa)
Massa Específica a 20°C (kg/m ³)	820 a 880	820 a 865	820 a 880	835 a 845	820 a 880
Ponto de Fulgor, mín., (°C)	75	38	38	38	60
Viscosidade a 40°C (mm ² /s) cSt	2,5 a 5,5	2,0 a 5,0	2,0 a 5,0	2,5 a 3,5	1,6 a 6,0
Número de Cetano, mín.	42	42	42	51-54	40
Referência	Ficha Técnica Iniranea de	ANP Nº 15 de 17/07/2006		Resolução ANP Nº 35	Portaria DNC Nº 32 de

2.2 Biodiesel

A resolução da ANP que especifica o combustível biodiesel, utilizado no trabalho, é a Resolução ANP nº 42, de 24.11.2004 e a resolução que especifica o óleo diesel é a Resolução ANP nº 310, de 27.12.2001. O combustível biodiesel utilizado no Projeto Biodiesel possui diversas origens quanto a sua composição química. Nos ensaios em banco de prova são utilizados combustíveis biodiesel de três oleaginosas diferentes: soja, mamona e dendê (palma).

É de suma importância perceber-se que para cada diferente região do país existe uma espécie de oleaginosa que mais se destaca para a produção de biodiesel, explicando-se assim o fato dos ensaios serem realizados com as três oleaginosas descritas acima, a fim de se buscar uma visão mais completa em relação a utilização do biodiesel em âmbito nacional.

A Tab. (2.2) apresenta algumas das principais características do combustível biodiesel em suas diversas origens. As características do biodiesel que possuem maior influência nos resultados são a viscosidade, que chega a ser 3 vezes maior do que a do óleo diesel, o poder calorífico que determina uma menor eficiência para o biodiesel, com aumento no consumo de combustível, a densidade que fica próxima aos valores do óleo diesel e o número de cetano, que para a mamona tende a ser até 15% menor do que para o óleo diesel.

2.3 Motor usado nos ensaios

O motor de combustão interna Agrale M93 ID, utilizado nos ensaios é um motor monocilíndrico de injeção direta, 668 cm³ e taxa de compressão de 20,0:1, cuja potência máxima alcança os 14,7 cv a 2750 RPM.

Suas principais aplicações comerciais são para equipamentos agrícolas, construção civil, pequenos grupos geradores de energia elétrica, motobombas, veículos e tratores agrícolas de pequeno porte.

Conforme definido no início deste capítulo, existe hoje no mercado uma variada gama de equipamentos deste tipo, que são classificados de acordo com suas categorias de utilização comercial.

Tabela 2.2. Principais diferenças do biodiesel comercializado no Brasil.

PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DO BIODIESEL					
Características	Unidades	Métodos	Biodiesel de Mamona - Rota Metálica	Biodiesel de Soja - Rota Metálica	Biodiesel de Dendê - Rota Metálica*
Massa específica (20°C)	kg/m ³	ASTM D 4052	913,4	883	870,8
Viscosidade Cinemática (40°C)	mm ² /s	ASTM D 445 ou *NBR 10441	12,01	4,266	4,246
Ponto de fulgor, mín	°C	ASTM D 93	69	164	106
Teor de Cinzas Sulfatadas, máx	% massa	ASTM D 874	0,01	0,004	---
Teor de Enxofre Total (6)	% massa	ASTM D 5453	0,02	0,001	0

2.4 Dinamômetro

O dinamômetro utilizado nos ensaios de desempenho é da marca Schenck, modelo W130 – 130 kW, tipo corrente de Foucault, e incerteza de medição da rotação de $\pm 10 \text{ min}^{-1}$, com instrumentos e sistema de aquisição eletrônica e analógica de dados. O dinamômetro opera através de um braço de alavanca, de comprimento 0,310 m, sendo composto por uma célula de carga modelo KCC, fabricada pela KRATOS, com capacidade de 490 N de força e incerteza de medição aproximada $< 0,2\%$.

2.5 Medidor do Índice de Fumaça

O valor do índice de fumaça foi obtido por um equipamento especial da marca AVL, modelo AVL Smoke Meter (409D2), com uma faixa de medição de 0,0 a 9,0 UB (Unidade Bosch; SZ - BOSCH) e aproximadamente 2% de incerteza de medição, para as faixas de 0,6 a 5,0 SZ-BOSCH (sem variação do valor de temperatura de operação, que varia de 0°C a 50°C). Para avaliações específicas dos índices de fumaça emitidos por motores ciclo Diesel, existem normas NBRs que estão definidas em resoluções especiais como na importante CONAMA nº 08 de 31.08.1993, que trata destes tópicos, tanto para veículos, como para aplicações especiais (agrícolas, industriais, militares, etc.). Nesta resolução existe a descrição de outras normas específicas para avaliações técnicas relativas a emissões de gases de escape, como NBR 5484 (Motores alternativos de combustão interna de ignição por compressão - ciclo Diesel - e por centelha - ciclo Otto - de velocidade angular variável) e a NBR 7027 (Gás de escapamento emitido por motor Diesel, determinação do teor de fuligem – método de ensaio).

2.6 Medidor de Consumo Específico

A obtenção dos valores de consumo específico durante os ensaios dinamométricos de desempenho dos motores, é realizada normalmente de duas maneiras distintas. A primeira opção é com utilização de um equipamento especial da marca austríaca AVL, com uma faixa de medição de 0,0 a 50,0 kg/h. O equipamento da AVL mede diretamente a vazão mássica. A segunda opção utiliza um balão volumétrico especial, que mede o volume consumido em um dado período de tempo. Todas as medidas são realizadas antes da bomba injetora. É importante destacar que, devido ao fato do biodiesel (e misturas) normalmente possuir alta viscosidade em relação ao óleo diesel, a segunda opção, ou seja, o sistema do balão volumétrico, foi utilizado para os ensaios, a fim de evitar entupimentos no sistema da AVL.

3. MÉTODO

Como a diretriz principal deste trabalho foi a de avaliar a introdução do biodiesel como combustível alternativo para alimentação de motores de combustão interna, monocilíndricos, e para que estes possam, em um futuro próximo, servirem de base para o desenvolvimento de novas tecnologias relacionadas à utilização de formas alternativas de energia, verificam-se então os procedimentos operacionais utilizados para o desenvolvimento prático deste trabalho, conforme padrões estabelecidos por algumas normas, dentre elas a ABNT NBR 6396, ABNT NBR 1585 e ABNT 3046/1. Dentro do que estabelecem as normas técnicas do setor de ensaios e eficiência, pode-se verificar três diferentes tipos de curvas de desempenho: - Curva A (ABNT NBR 6396, de 1976): aplicada para carga e rotação constante, podendo ser empregada em moto bombas, compactadores de solo, compressores de ar e propulsão de barcos, por exemplo; - Curva B (ABNT NBR 6396, de 1976): aplicada para carga variável e rotação constante, podendo ser utilizada em grupos geradores, trituradores e moedores de cana, por exemplo; - Curva F ou Curva N (ABNT NBR ISO 1585, de 1986): aplicada para carga e rotação variável, podendo ser utilizada em tratores, carretas agrícolas e veículos automotivos em geral.

Todos os ensaios realizados com o motor em questão são desenvolvidos para o óleo diesel puro e misturas de 25%, 50%, 75% e 100% de biodiesel. Durante os ensaios, o motor é colocado em rotação especificada de 2600, 2400, 2200, 2000 e 1800 RPM, com base em normas de referência para este procedimento em bancada dinamométrica.

A metodologia dos ensaios e os procedimentos, detalhadamente descritos, dos processos de preparação mecânica, elétrica, desenvolvimento e obtenção de resultados do trabalho são:

--- Preparação de motor, M93 ID (projeto e construção da empresa de Caxias do Sul), para os ensaios em dinamômetro de eixo, no laboratório dinamométrico do setor de engenharia e desenvolvimento;

--- Instalação do Motor M93 ID em bancada dinamométrica (Schenck, modelo W130 – 130 kW, do tipo corrente de Foucault com instrumentos e sistema de aquisição eletrônica e analógica de dados);

--- Durante a montagem do sistema motor-dinamômetro é realizada a instalação de diversos sensores, a fim de coletar todas as informações técnicas possíveis e necessárias em vários pontos do motor ensaiado, dados do tipo: temperaturas (termopares do Tipo K), pressões de operação e índice Bosch (ou índice de fumaça). Tal processo é realizado coletando-se os gases de escape do motor de combustão em operação de ensaio, e obrigando os mesmos a passar por um tipo de papel especial (filtro de particulados) e aplicado ao equipamento da marca AVL modelo Smoke Meter 409D2, em forma de rolos.

--- A próxima etapa consiste na obtenção de todas as informações possíveis, relativas ao desempenho do motor de combustão interna (potência, torque, consumo específico e emissões de gases do escape), através de resultados numéricos apresentados pelo programa do dinamômetro e dos outros equipamentos envolvidos no processo de avaliação. No caso do dinamômetro, os resultados são demonstrados em monitores de vídeo especiais, onde um computador adaptado ao dinamômetro faz as primeiras avaliações instantâneas, sem nenhuma correção, conforme normas ABNT NBR. Nesta etapa de ensaios e anotações de dados em banco de prova, serão realizados, por duas vezes seguidas e da mesma maneira, todos os ensaios técnicos para cada combustível avaliado. Após a obtenção e registro manual destes dados em formulários específicos, alimenta-se um programa especial de correção (ABT), conforme ABNT NBR ISO 1585, de 1986, que gera dois relatórios, um para cada uma das condições iniciais inseridas. É importante salientar que somente após a inserção dos dados no programa de tratamento de dados é que se obtém a média aritmética dos valores obtidos. Em relação aos combustíveis empregados no ensaio em banco de provas, foram utilizados padrões de misturas para o óleo diesel e para o biodiesel (de várias origens). As definições teóricas específicas para potência, torque e consumo específico, são apresentadas detalhadamente nas normas ABNT NBR 1585, ABNT NBR 3046/1 e ABNT NBR 6396.

As incertezas de medições, que estão associadas à exatidão dos instrumentos utilizados, algumas vezes são especificadas pelo fabricante, normalmente expressa em valores percentuais de fundo de escala. O método mais utilizado na bibliografia especializada, bem como neste trabalho, quando o resultado procurado depende de medição individual, é o Kleine e McClintock, dado pela Eq. (1) de [Zaro e Borchardt, 1982].

$$\Delta R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \cdot \Delta_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \cdot \Delta_2 \right)^2 + \dots \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Onde,

ΔR - Incerteza do resultado ($x_1, x_2 \dots x_n$ são as variáveis independentes);

Δ - Incerteza de cada variável independente.

A incerteza de medição máxima do parâmetro torque líquido, pode ser determinada pelas derivadas parciais ou de acordo com o Método Vetorial ISO GUN - McClintok (Incertezas Combinadas). A incerteza de medição relatada para o torque é declarada como incerteza padrão ou combinada no valor calculado de 0,54%, sendo que esta, se multiplicada por um fator de abrangência k ($k = 2$), para uma distribuição t , com graus de liberdade efetivos $\{V_{eff}\}$, correspondendo a uma confiabilidade de aproximadamente 95%, tem-se então a incerteza expandida no valor de 1,08%. A incerteza padrão ou combinada foi determinada segundo Publicação EA – 4 / 02 [INMETRO, ABNT, SBM, 1999].

A calibração do sinal oriundo da célula de carga permitiu a determinação do parâmetro torque desenvolvido, com incerteza combinada de medição no valor de 0,54% ($\pm 0,2\text{N.m}$). Diretamente em função do parâmetro torque, e levando-se em consideração todas as incertezas de medição calculadas e combinadas, temos a potência líquida [kW], que representa a taxa de realização de trabalho por tempo, sendo o produto do torque líquido pela velocidade angular do motor, com uma incerteza percentual combinada de aproximadamente 1,07%, conforme Método Vetorial ISO GUN – McClintok.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme estudos de alguns autores [Bueno, 2006; Santos, 2007] que também investigaram os efeitos de certas propriedades como, viscosidade, densidade, número de cetanos, poder calorífico e exergia, pode-se avaliar, observando-se os resultados obtidos nas Fig. (4;1), Fig. (4.2), Fig. (4.3) e Fig. (4.4), que existe grande influência destas no funcionamento, desempenho e na obtenção de potência e torque, bem como em relação ao consumo específico e índice de fumaça emitido pelo motor.

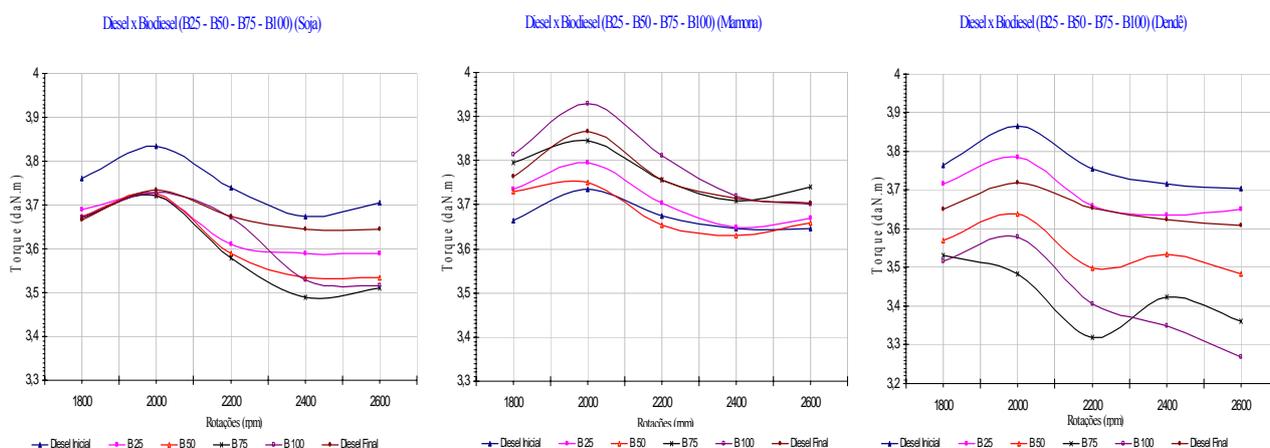


Figura 4.1. Torque para as diversas variações de Biodiesel. Incerteza de medição máxima $\pm 0,54\%$.

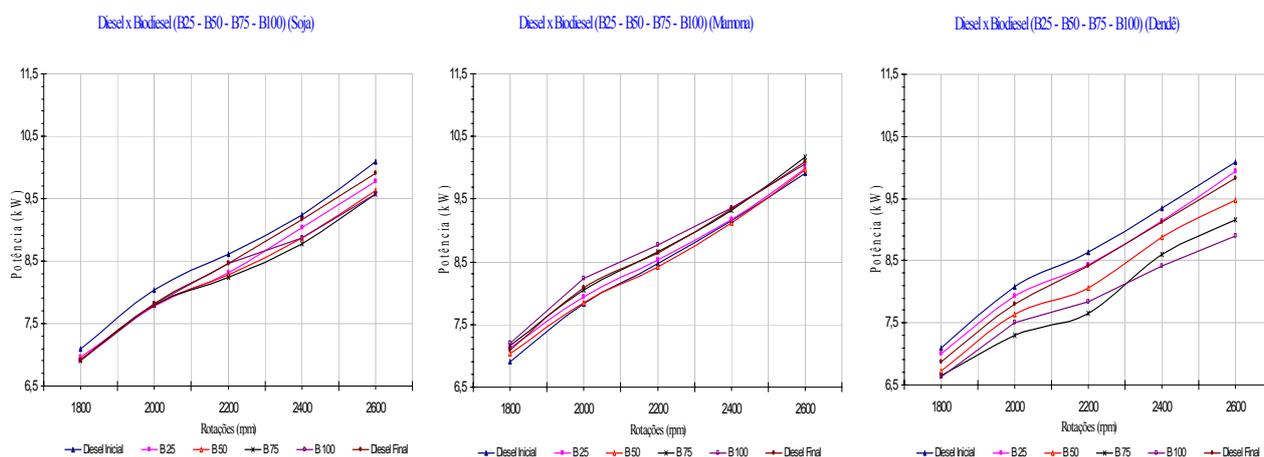


Figura 4.2. Potência para as diversas variações de Biodiesel. Incerteza de medição máxima $\pm 1,07\%$.

As curvas da Fig. (4.1) e Fig. (4.2) representam as variações em 25%, 50%, 75% e 100% de biodiesel de soja, mamona e dendê, relativas aos parâmetros torque e potência. Um ponto importante, observando-se os gráficos, é que o desempenho do motor em relação ao torque e à potência tende a se reduzir quando opera com misturas mais acentuadas de biodiesel, ou quando opera com o biodiesel puro em relação ao óleo diesel padrão de referência (diesel inicial). Verifica-se também para o torque e para a potência, que para o biodiesel de mamona, conforme gráficos apresentados, ocorreram os melhores resultados específicos para os parâmetros analisados, pois o biodiesel de mamona apresenta, em relação às suas propriedades, uma diferença bem considerável em relação ao biodiesel de soja e dendê. Diferenças estas que ficam bem claras quando se observam os valores da viscosidade, densidade e números de cetanos. Fatores de muita

importância como o poder calorífico e energia, também possuem grande influência sobre desempenho que o combustível irá apresentar, quando colocado em aplicação direta em motores ciclo Diesel, pois conforme estudado em literatura especializada e observado nos ensaios, o aumento da concentração de biodiesel em misturas com óleo diesel, faz com que esta nova composição de combustíveis venha a apresentar-se com uma menor capacidade térmica de produção de energia, em virtude da redução que chega até os 15%, no poder calorífico da mistura, ocasionando redução de temperatura no interior da câmara de combustão do motor, reduzindo assim os níveis de energia obtida para a transformação mecânica e térmica. Essa redução de energia é diretamente proporcional à redução dos parâmetros de torque e potência no motor, fazendo com que o consumo específico aumente de forma proporcional, a fim de manter uma produção de energia próxima à produzida pelo óleo diesel. Segundo estudos de alguns autores especializados, e em relação ao desempenho e resultados para o uso do biodiesel, similares aos apresentados pelo referido motor, permite-se chegar a um raciocínio específico e lógico sobre a aplicação do biodiesel como fonte combustível: a adaptação dos parâmetros construtivos dos motores às características do combustível que contém o biodiesel (soja, mamona ou dendê), permitiria explorar melhor as boas características do biodiesel como fonte de energia química, retirando assim excelentes resultados com relação à potência, torque, consumo específico e índice de fumaça.

As curvas da Fig. (4.3) representam, respectivamente, as variações em 25%, 50%, 75% e 100% de biodiesel de soja, mamona e dendê, relativo ao consumo específico. Observa-se então que enquanto torque e a potência tendem a diminuir com o acréscimo do percentual de mistura de biodiesel ao óleo diesel, seu consumo específico também aumenta na mesma proporção. Como a viscosidade do biodiesel de mamona, em média, chega a ser três vezes maior do que a viscosidade do biodiesel de soja ou dendê, e sua densidade fica, em média, 10% maior em relação aos valores tabelados do biodiesel de soja e dendê, conclui-se que os grandes acréscimos nos valores de consumo específico, para as aplicações principalmente do biodiesel de mamona, se deve em grande parte ao fato do sistema de alimentação do motor aumentar o volume de combustível injetado no sistema motriz, a fim de manter a potência e o torque próximos ou superiores em relação ao óleo diesel, compensando desta forma o ganho conquistado para potência e torque, causando, contudo, excesso no consumo de combustível. O poder calorífico de cada um dos combustíveis ensaiados também possui enorme influência no que tange análises do consumo específico, verifica-se ainda que existem grandes diferenças nesta propriedade para cada tipo de biodiesel, gerando uma variação muito grande de consumo em relação ao óleo diesel de referência, em virtude de compensação no sistema para obtenção de desempenho térmico e mecânico. Tanto quanto para o torque e potência, em mistura de até 25% de biodiesel ao óleo diesel (tipo B), não se percebem modificações funcionais nos ensaios de desempenho; porém, para percentuais acima de 50% as diferenças aparecem bem mais acentuadas, gerando consumo elevado nas misturas de biodiesel.

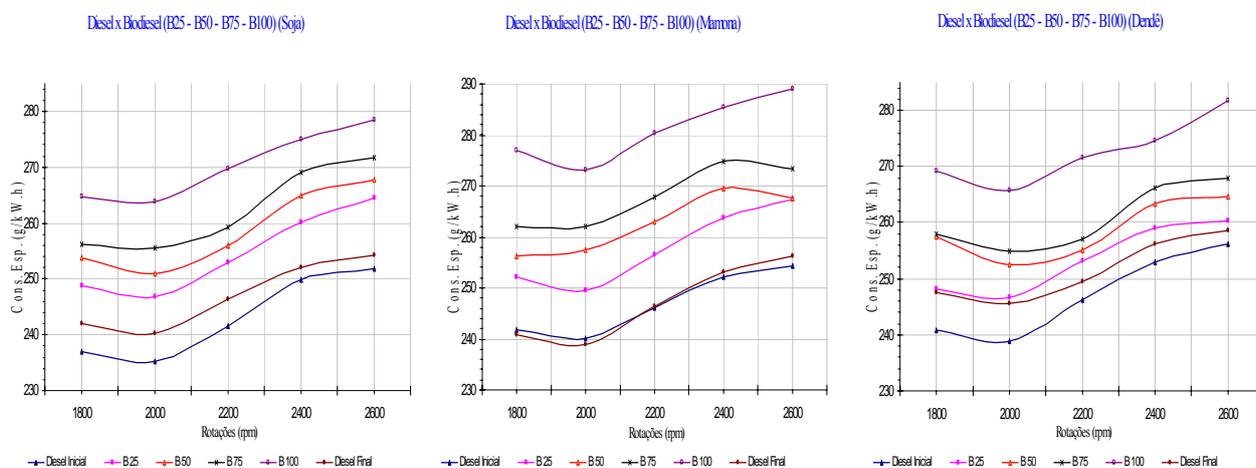


Figura 4.3. Consumo Específico para as variações de Biodiesel. Incerteza de medição máxima $\pm 5\%$.

Apresentam-se a seguir, nas curvas da Fig. (4.4), as variações em 25%, 50%, 75% e 100% de biodiesel de soja, mamona e dendê, relativo ao índice de fumaça. Da mesma forma que ocorre para os parâmetros potência e torque, que tendem a diminuir com o acréscimo do percentual de mistura de biodiesel ao óleo diesel, os níveis de fumaça também diminuem em uma mesma proporção. É importante observar que para o percentual de 100% de biodiesel, o combustível biodiesel de dendê apresentou o melhor resultado de todos os ensaios dinamométricos, em relação ao índice de fumaça. Este número gira em torno de 50% de redução nas emissões de fumaça, um valor considerável, correspondendo a uma queda pela metade do valor relativo às emissões do óleo diesel, considerando-se uma incerteza máxima de $\pm 2\%$. Esta acentuada redução nas emissões de fumaça, determinada pela aplicação de biodiesel no motor, demonstra que este combustível está de acordo com as principais e atuais regulamentações de redução de poluentes na atmosfera, porém nunca é demais lembrar que, conforme observado anteriormente para o consumo específico, para misturas superiores a 50% de biodiesel, houve aumentos significativos de consumo, o que pode levar a um novo estudo científico, uma relação entre a redução de emissões com o aumento de consumo, mantendo-se estáveis os parâmetros de torque e potência. Assim pode-se questionar a aplicação do combustível biodiesel como uma aplicação ecológica. É preciso ter

sempre em mente que os níveis de poluição são muito menores, porém o consumo é inversamente proporcional em percentuais acima de 25%. É importante destacar que, além de todos os aspectos até então analisados com relação às propriedades dos biocombustíveis e suas influências nos processos de combustão e desempenho, normalmente a adição de biodiesel ao óleo diesel melhora a eficiência da combustão pelo aumento do número de cetanos, o que reduz significativamente os níveis de fumaça emitidos durante o processo de combustão interna nos motores.

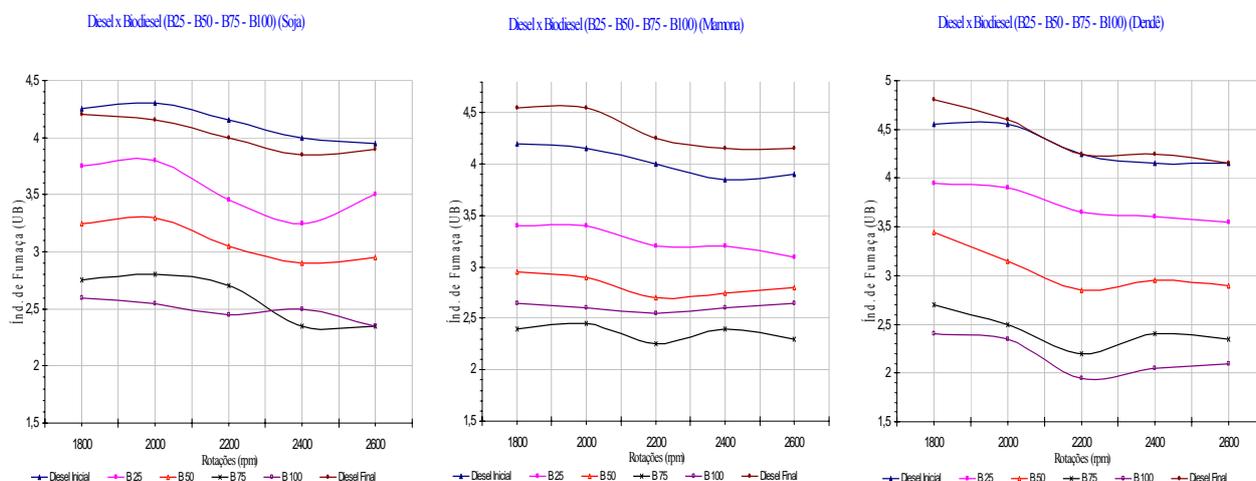


Figura 4.4. Índice de Fumaça para as variações de Biodiesel. Incerteza de medição máxima $\pm 2\%$.

Para uma análise mais detalhada do ambiente dos ensaios dinamométricos, pode-se verificar para o biodiesel de soja, mamona e dendê as seguintes médias nas variações percentuais, conforme apresentados na Tab. (4.1). A referida tabela mostra, de forma simples e clara, uma relação entre o óleo diesel padrão e o biodiesel de soja, mamona e dendê, seus desempenhos e valores médios calculados. Da forma como se apresenta a tabela, fica muito fácil avaliar todos os fatores trabalhados nos ensaios em laboratório, porém estes valores são oriundos de médias diretas entre os valores obtidos de biodiesel para cada uma das misturas em todas as faixas determinadas de rotações, em relação ao valor direto para o óleo diesel inicial tipo B (padrão de referência) para cada uma das respectivas concentrações de misturas.

Tabela 4.1. Análises Gerais de Desempenhos (Óleo Diesel X Biodiesel).

Diesel X Biodiesel (Tipo e Concentração)		Torque - Potência	Consumo Específico	Índice de Fumaça
SOJA	B 25	- 2,7%	4,7%	- 14%
	B 50	- 3,5%	6,4%	- 25,2%
	B75	- 4%	7,9%	- 37,3%
	B 100	- 3,2%	11,2%	- 39,7%
MAMONA	B 25	1,3%	4,4%	- 18,9%
	B 50	0,4%	6,4%	- 29,8%
	B75	2,6%	8,5%	- 41,2%
	B 100	3,3%	13,8%	- 35%
DENDÊ	B 25	- 1,8%	2,6%	- 13,8%
	B 50	- 5,7%	4,7%	- 29,3%
	B75	- 9%	5,6%	- 43,9%
	B 100	- 9%	10,3%	-50%

5. CONCLUSÕES

O estudo apresentado neste trabalho relaciona-se a ensaios e determinação de dados referentes à aplicação de biocombustível, em especial biodiesel, aplicados a motores de combustão interna ciclo Diesel, com a finalidade de se reduzir principalmente emissões de fumaça ao meio ambiente, mantendo-se inalteráveis seus parâmetros de funcionamento quando operando com óleo diesel. Com a avaliação dos ensaios dinamométricos realizados no motor

M93 ID, constatou-se quantitativamente, que ocorreram reduções pouco significativas nos parâmetros potência e torque, um acréscimo razoável no consumo específico de combustível e uma acentuada redução nos percentuais do índice de fumaça. Conforme alguns pesquisadores, que tratam de assuntos referentes à aplicação de biodiesel na Matriz Energética Nacional e principalmente de temas envoltos nas emissões de gases nocivos, percebe-se que a aplicação de biodiesel é uma forte alternativa nacional e mundial para redução das emissões de fumaça, por parte destes equipamentos (motores) movidos hoje a óleo diesel. Embora o biodiesel se apresente, em geral, com características muito próximas às do óleo diesel, existem algumas propriedades típicas de determinadas oleaginosas que podem vir a criar algumas barreiras técnicas e operacionais para a aplicação em motores de combustão interna ciclo Diesel. Um exemplo bem típico desta situação está relacionado com a viscosidade do biodiesel de mamona, que chega a ser até 3 vezes maior do que a viscosidade do óleo diesel, influenciando muito em sua aplicação em motores de combustão interna. De uma forma bem simples, observando-se a Tab. (4.1), apresentada anteriormente, podemos concluir que a perda de torque e consequentemente, de potência e o aumento do consumo específico, ocorre devido a diferenças que existem entre as propriedades do biodiesel em relação ao óleo diesel, como a viscosidade e poder calorífico.

Os ensaios com batedores indicaram que o uso do biodiesel em faixas de potência e rotações intermediárias aos limites operacionais do motor não produz significativas alterações no regime normal de trabalho do motor; há, todavia, uma tendência à instabilidade do motor operando em faixas próximas aos limites mínimos e máximos, fazendo com que certos componentes tenham um comportamento distante do descrito em projeto, fato observado nas curvas de torque e potência que se demonstraram fora do padrão normal de comportamento.

A aplicação do biodiesel, de uma forma geral, requer uma avaliação de três importantes parâmetros, a saber: a eficiência do processo de combustão, a durabilidade do motor e seus componentes e as emissões de particulados e fumaça. A diminuição da durabilidade do motor, degradação de componentes, aumento de manutenções técnicas, formação de depósitos de carvão por precipitação e corrosão das partes internas estão relacionadas diretamente com o tipo de combustível biodiesel utilizado nos motores.

Conclui-se então, através dos estudos realizados, a total viabilidade operacional do uso de biodiesel, e que o ganho com seu uso tem grandes perspectivas. O aperfeiçoamento dos projetos de motores, bem como o avanços aplicados às propriedades do combustível biodiesel, pode elevar ainda mais os ganhos com o uso do mesmo como um combustível alternativo, renovável e de fonte biológica.

Como sugestões para novas pesquisas, nas áreas de aplicação de combustíveis alternativos e motores de combustão interna ciclo Diesel, seriam análises e implementações de alterações nos projetos ou nos componentes físicos dos motores, como modificações em cabeçotes e geometrias de válvulas, cilindros, êmbolos, alterações em pontos de ignição, modificações em geometria das câmaras de combustão, buscando agora maior eficiência para os parâmetros torque e potência, com reduções expressivas no consumo e emissões de gases e fumaça.

Outras sugestões para novos trabalhos referem-se à avaliação da influência do aquecimento das misturas de combustíveis, aumentos de pressão com mudanças de pontos de injeção de combustível, ensaios de durabilidade com análise de componentes quanto ao desgaste e análise numérica relativa à formação do spray associada aos fenômenos de turbulência e transmissão de calor no cilindro para os novos combustíveis.

Também se sugere novos estudos com relação à avaliação do custo-benefício da aplicação do biodiesel em cada região do país. Isso seria muito interessante, se avaliar o quanto a relação dos parâmetros torque e potência podem influenciar no consumo, diretamente envolvido no custo de aplicação do biodiesel em campo, para cada distinta região do país.

6 AGRADECIMENTOS

Sempre que pensamos em ciência, entendemos o quanto o ser humano tem de aprender, ensinar e viver.

Gostaria de agradecer a todo o pessoal da empresa Agrale S.A., pela atenção, confiança e satisfação que me proporcionaram durante o período de mais de um ano de interações com a fábrica de motores da Agrale de Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, ao Sr. Adelaire Colombo, Engenheiro Chefe do Departamento de Desenvolvimento de Motores da Agrale S.A., aos meus grandes amigos e futuros engenheiros Solimar Carra Perera e Andreis Nesello, Técnicos em Sistemas Automotivos, e aos técnicos do Laboratório Dinamométrico da Agrale S.A., os Srs Itacir José Giacomet e Luís Antônio Foresti.

De forma especial, gostaria de agradecer ao Engenheiro do Laboratório de Ensaios da Universidade de Caxias do Sul (UCS) o Sr. Marcos Rigotti.

Agradeço aos professores e profissionais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em especial ao Sr. Pedro Barbosa Mello, Doutor em Engenharia e meu orientador de mestrado, que muito me ajudou na formação tecnológica desta obra e ao Sr. Paulo Kutter, engenheiro e secretário da instituição.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. "ABNT NBR ISO/IEC". "Literatura Técnica, Resoluções, Portarias e Normas Técnicas Específicas". Disponível na Internet no site: <http://www.abnt.org.br> (Acessado em 2007 e 2008).

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. "Literatura Técnica, Resoluções, Portarias e Normas Técnicas Específicas". Disponível na Internet no site: <http://www.anp.gov.br>. (Acessado em 2007 e 2008).

- “Dados Técnicos, Estatísticos e Tecnológicos”. Internet: http://www.anp.gov.br/petro/dados_estatisticos.asp. (Acessado em 2007 e 2008).
- Biodieselbr – Site na Internet que trata de Biocombustíveis e seus Derivados. “Literatura Técnica, Equipamentos Especiais para diversas aplicações, Portarias, Regulamentações e Normas Técnicas Específicas para Combustíveis”. Disponível na Internet no site: <http://www.biodieselbr.com/biodiesel> (Acessado em Março de 2008).
- Bueno, André Valente, 2006. “Análise da Operação de Motores Diesel com Misturas Parciais de Biodiesel”. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.
- Bueno, L. de S.R., Velásquez, J.A., 2008. “Estudo da Influência da Composição do Biodiesel sobre o Atraso de Ignição de Misturas B10 no Motor”. Relatório Acadêmico. Departamento de Engenharia Mecânica da PUC – PR e Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, PR.
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resoluções que estabelecem o “Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE”. Coletânea de Legislação Ambiental (CONAMA nº 08 de 31 de Agosto de 1993 - PROCONVE). Disponível na Internet no site: <http://www.mma.gov.br/port/conama> e <http://www.conama.gov.br> (Acessado em Novembro e Dezembro de 2007).
- CTPETRO - Site na Internet que trata do Petróleo e seus Derivados. “Literatura Técnica, Equipamentos Especiais para diversas aplicações, Portarias, Regulamentações e Normas Técnicas Específicas para o Petróleo e seus Derivados”. Disponível na Internet no site: <http://www.ctpetro.com.br> (Acessado em Março e Abril de 2008).
- EPA - Environmental Protection Agency, 2002. “A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions”. Draft Technical Report. U.S. EPA National Vehicle and Fuel Emissions Laboratory. Ann Arbor, MI, USA.
- Heywood, J. B., 1988. “Internal Combustion Engine Fundamentals”, Ed. Mc Graw-Hill, Book Company, New York, USA.
- Holanda, A., 2004. “Biodiesel e Inclusão Social”. Série Cadernos de altos estudos (nº 1). Câmara dos Deputados – Coordenação de Publicações, Brasília, DF.
- IBAMA - Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis., 1998. “Programa de Controle da Poluição do ar por Veículos Automotores – Proconve”. Coleção Meio Ambiente. Série Diretrizes. 2ª edição. Brasília, DF. Disponível na Internet no site: <http://www.mma.gov.br/port/conama> e <http://www.conama.gov.br> (Acessado em Novembro e Dezembro de 2007).
- INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. “Literatura Técnica, Resoluções, Portarias e Normas Técnicas Específicas”. Disponível na Internet no site: <http://www.inmetro.gov.br> (Acessado em 2007 e 2008).
- INMETRO - ABNT - SBM, 1999 (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – Associação Brasileira de Normas Técnicas – Sociedade Brasileira de Metrologia). “Expressão da Incerteza de Medição na Calibração”. Primeira Edição Brasileira do EA – 4 / 02, Rio de Janeiro, Brasil.
- Kittelson, D.B., Watts, W.F., Johnson, J., 2002. “Workshop on Vehicle Exhaust Particulate Emission Measurement Methodology”. San Diego, California, USA.
- Oliveira, L. B. & Da Costa, A. O., 2002. “Biodiesel – Uma Experiência de Desenvolvimento Sustentável”. IVIG / COOPE / Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- Portal BIODIESEL - Site Oficial do Governo do Brasil na Internet que trata de Biocombustíveis (Biodiesel) e seus Derivados. “Literatura Técnica, Equipamentos Especiais para diversas aplicações, Portarias, Regulamentações e Normas Técnicas Específicas para Combustíveis”. Disponível na Internet no site: <http://www.biodiesel.gov.br> (Acessado em 2008).
- SAE - Society of Automotive Engineers. Associação de Engenheiros Automobilísticos Mundial (Normatizadora). “Literatura Técnica, Portarias, Regulamentações e Normas Técnicas Específicas para o setor automobilístico”. Disponível na Internet no site: <http://www.saebr.org.br> (Acessado em Dezembro de 2007).
- Santos, M., A., 2007. “Inserção do Biodiesel na Matriz Energética Brasileira: Aspectos Técnicos e Ambientais Relacionados ao seu uso em Motores de Combustão”. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Energia do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo - USP (EP/FEA/IEE/IF), São Paulo, SP.
- Sonntag, Richard E., Borgnakke, Claus, Wylen, Gordon J. Van., 1998. “Fundamentos da Termodinâmica” (“Fundamentals of Thermodynamics”). Tradução da 5ª edição americana, Editora Edgard Blücher LTDA, São Paulo, SP.
- Taylor, C. F., 1988. “Análise dos Motores de Combustão Interna”, Volume 2, Ed. Edgard Blücher LTDA, São Paulo, SP.
- Wylen, G. J. Van, 1995. “Fundamentos da Termodinâmica Clássica”. Ed. Edgard Blücher LTDA, São Paulo, SP.

ANALYSIS OF A DIESEL ENGINE PERFORMANCE OPERATING WITH BIODIESEL

Rafael R. Brunelli, e-mail , brunelli@mecatronica.org.br

Pedro Barbosa Mello, e-mail , mello@mecanica.ufrgs.br

Federal University of Rio Grande do Sul –Programa do Pós Graduação em Engenharia Mecânica-

Rua Sarmiento Leite, 425, Porto Alegre RS CEP 90050-170

***Abstract:** An analysis of the fuel as a means of obtaining power in internal combustion engine is accomplished in this work., as well as a comparative assessment of systems that are present today in the areas of feeding for combustion engines, the ones that use Automotive Diesel and the ones that use Biodiesel, so that it can be verified the application of a new fuel, the Biodiesel, and it can turn to be, in a very close future, very important, especially in regard to the control of emissions to the environment, being similar to the originals, parameters as potency, torque and consumption of the motors, this factors are being evaluated in this study. Summarizing, this study try to define the technological relationship between the old (Automotive Diesel) and the new (Biodiesel), demonstrating forms and processes of operation in order to emphasize the warranty of efficiency of Biodiesel application in engines that today operates with Automotive Diesel. The clean fuels decrease significantly some elements in emissions of evaporative gases to the atmosphere, Biodiesel when correctly applied can also help in this reduction, keeping unaffected, in relation to Automotive Diesel use, parameters as potency, torque and consumption are presented in this work, using for sampling a stationary single cylinder engine (M93 ID) of Agrale S.A Company., tested in dynamometer axis, under the guidance of ABNT standards.*

Key words: Internal Combustion Engine, Diesel, Biodiesel, Performance.