



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

JOSÉ LUIZ BERNARDO BORGES

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM MOTOR DE CICLO
DIESEL ALIMENTADO POR MISTURAS TERNÁRIAS DE
BIOCOMBUSTÍVEIS CONTENDO BIODIESEL, ETANOL E
ÓLEO VEGETAL**

JOSÉ LUIZ BERNARDO BORGES

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM MOTOR DE CICLO
DIESEL ALIMENTADO POR MISTURAS TERNÁRIAS DE
BIOCOMBUSTÍVEIS CONTENDO BIODIESEL, ETANOL E
ÓLEO VEGETAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação, em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Ralisch
Co orientador: Dr. Márcio Turra de Ávila

Londrina
2009

JOSÉ LUIZ BERNARDO BORGES

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM MOTOR DE CICLO DIESEL
ALIMENTADO POR MISTURAS TERNÁRIAS DE BIOCOMBUSTÍVEIS
CONTENDO BIODIESEL, ETANOL E ÓLEO VEGETAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação, em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Agronomia.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Ralisch
Universidade Estadual de Londrina

Pesq. Dr. Márcio Turra de Ávila
Embrapa Soja

Prof. Dr. Otávio Jorge Grigoli Abi Saab
Universidade Estadual de Londrina

Prof. Dr. Murilo Daniel de Melo Innocentini
UNAERP

Pesq. Dr. José Miguel Silveira
Embrapa Soja

Prof. Dra. Carmen Guedes
Universidade Estadual de Londrina

Londrina, 18 de dezembro de 2009.

DEDICATÓRIA

A Deus, por sempre caminhar ao meu lado.

E a minha filha Maria Clara, por ter entrado na minha vida durante a realização deste trabalho, e ter sido, desde então, a minha luz, ter me mostrado um nova razão de viver. Tudo o que farei, deste ponto em diante, será para você e para sua mamãe, minha eterna amada Renata.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar presente e ser meu guia em todos os momentos de alegrias e dificuldades durante esta jornada, pois sem Ele nada é possível;

A meus pais José Roberto Borges e Sônia José Bernardo Borges, por toda paciência, esforço e motivação durante minha formação;

À minha irmã Maria Carolina Bernardo Borges, pela motivação e carinho;

À minha amada esposa Renata Palazim Fontana Borges, por ter surgido em minha vida durante a realização deste trabalho, e ter me dado todo apoio e carinho durante os momentos mais difíceis, e ainda pela paciência nos momentos em que tive que dedicar grande parte do meu tempo a este trabalho;

Ao Engenheiro Mecânico e pesquisador da Embrapa Soja, Dr. Márcio Turra de Ávila, pela orientação, troca de experiência, apoio total durante o experimento, ótimas sugestões e companheirismo em todo momento;

Ao Engenheiro Agrônomo e pesquisador da Embrapa, MSc. Décio Luiz Gazzoni, pelo apoio e confiança depositados;

Ao Professor Dr. Ricardo Ralisch, pela orientação, troca de experiência e novas idéias;

Ao técnico agrícola e funcionário da Embrapa, Fernando Portugal, pelo companheirismo e pela intensa ajuda no desenvolvimento dos trabalhos;

À empresa GET (Global Energy Telecommunication), pelo apoio técnico fornecido durante a realização do experimento;

À Professora Dra. Carmen Luísa Barbosa Guedes, pelos ensinamentos e conselhos na realização dos trabalhos;

À bolsista de iniciação científica em química Ana Carolina Souza, pelo respaldo proporcionado com a realização de análises físico-químicas necessárias;

À Universidade Estadual de Londrina (UEL) e à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), pela possibilidade de realização deste trabalho;

À CAPES, pela concessão de bolsa de estudo durante o período da pós-graduação;

Àqueles que passaram pela minha vida e que me esqueço de citar, meu sincero muito obrigado;

A todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a execução deste trabalho.

BORGES, José Luiz Bernardo. **Avaliação de desempenho de um motor de ciclo Diesel alimentado por misturas ternárias de biocombustíveis contendo biodiesel, óleo vegetal e etanol**. 2009. 107f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2009.

RESUMO

O objetivo deste trabalho situou-se em avaliar o desempenho de um motor de ciclo Diesel alimentado por misturas ternárias de biocombustíveis compostas de biodiesel, etanol e óleo vegetal, visando à utilização destas na forma de um aditivo ou como possíveis sucedâneas ao diesel convencional no mercado de combustíveis. Para isso, foram utilizados dois motores de ciclo Diesel, monocilíndricos, de injeção direta, e um gerador de eletricidade para imprimir carga aos motores. A seleção das misturas para as avaliações foram conduzidas da seguinte maneira: a) seleção pela análise das propriedades físico-químicas (seleção primária); e b) seleção pelo desempenho nas avaliações primárias, o que indicou a melhor amostra que compôs a avaliação secundária de durabilidade dos motores. O teste primário foi composto pelas seguintes avaliações: consumo específico, rendimento térmico, temperatura dos gases de escape e do cabeçote do motor, emissão de material particulado (MP) e nível de ruído dos motores. Já o teste secundário foi realizado aplicando um funcionamento contínuo aos motores durante um período de 150 horas, conduzido apenas com dois combustíveis: um dos motores trabalhou sempre com óleo diesel convencional, enquanto o outro funcionou com a mistura ternária formada por 50% de biodiesel, 40% de etanol e 10% de óleo vegetal. Os resultados obtidos mostraram que, à plena carga, as misturas ternárias apresentaram um rendimento térmico superior ao do óleo diesel, as temperaturas dos gases de escape e do cabeçote do motor foram mais baixas e a emissão de material particulado foi bastante inferior, porém o consumo e o nível de ruído apresentaram resultados melhores ao se utilizar o óleo diesel convencional. Quanto ao teste de durabilidade, a mistura 50 – 40 – 10 mostrou-se superior ao óleo diesel em alguns aspectos, tais como quantidade de depósito de carbono no bico injetor e no topo do pistão. Dessa forma, conclui-se que as misturas ternárias podem perfeitamente abastecer motores de ciclo Diesel, sem causar perda de eficiência ou danos aos componentes do motor.

Palavras-chave: Biocombustíveis. Diesel. Eficiência Térmica. Material Particulado. Miscibilidade.

BORGES, José Luiz Bernardo. **Avaliação de desempenho de um motor de ignição por compressão alimentado com misturas ternárias de biocombustíveis contendo biodiesel, etanol e óleo vegetal.** 2009. 107p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2009.

ABSTRACT

The aim of this work was to evaluate the performance of a Diesel cycle engine fuelled with ternary blends composed by ethanol, biodiesel and vegetable oil in attempt to make use of these blends as a possible substitute for conventional diesel fuel market. For this, it was used two diesel engines, single-cylinder, direct injection, and an electricity generator to establish charge to the engines. A selection of blends for the evaluations were conducted as follows: a) selection by the analysis of physical and chemical properties (primary selection), and b) selection by the primary performance evaluations, which indicated the best sample that composed the secondary assessment of engines durability. The primary test was composed of the following evaluations: specific fuel consumption, thermal efficiency, temperature of the exhaust gas and engine head, particulate matter emissions, and the noise of the engines. Moreover the secondary test was performed throughout application of continuous operation of motors for a period of 150 hours, conducted only with two fuels, one of them has always worked with conventional diesel, while the other worked with the ternary blend composed with 50% biodiesel, 40% ethanol and 10% vegetable oil. The results showed that, at high load, the ternary blends showed a higher thermal efficiency, a lower temperature of the exhaust gases and engine head, and the emission of particulate matter was quite lower, on the other hand the consumption and noise level had better results when using conventional diesel. The durability test of blend 50 - 40 - 10 showed to be superior to diesel fuel in some aspects, such as amount of carbon deposit in the injector nozzle and the top of the piston. Thus, it was concluded that the ternary blends may fuel diesel engines without causing loss of efficiency or damage to engine components.

Keywords: Biofuels. Diesel. Thermal Efficiency. Particulate Matter. Miscibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	– Motor Toyama T 70f1	49
Figura 3.2	– Gerador de eletricidade Bambozz	51
Figura 3.3	– Esquema de funcionamento do conjunto de correias e polias	51
Figura 3.4	– Pipeta volumétrica empregada para medição do consumo.....	52
Figura 3.5	– Detalhe do termopar instalado na saída da tubulação de escape.....	53
Figura 3.6	– Detalhe do termopar instalado no cabeçote do motor.....	54
Figura 3.7	– Central digital para aquisição do dados provenientes dos termopares	54
Figura 3.8	– Decibelímetro para medição do nível de ruído dos motores	55
Figura 3.9	– Miscibilidade dos componentes da mistura a 25°C	58
Figura 3.10	– Consumo específico dos combustíveis em função da carga aplicada.....	59
Figura 3.11	– Eficiência térmica dos combustíveis em função da carga aplicada.....	61
Figura 3.12	– Temperatura dos gases de exaustão em função da carga aplicada.....	63
Figura 3.13	– Temperaturas do cabeçote do motor em função da carga aplicada.....	65
Figura 3.14	– Nível de ruído do motor em função da carga aplicada.....	66
Figura 3.15	– Válvulas do motor abastecido com óleo diesel	69
Figura 3.16	– Válvulas do motor abastecido com a mistura ternária.....	69
Figura 3.17	– Tucho de válvula do motor alimentado com Diesel	70
Figura 3.18	– Tucho de válvula do motor alimentado com a mistura ternária	70
Figura 3.19	– Bico injetor após 150 horas funcionando com óleo diesel.....	71
Figura 3.20	– Bico injetor após 150 horas funcionando como a mistura ternária	72
Figura 3.21	– Topo do pistão após 150 horas funcionando com óleo diesel.....	73
Figura 3.22	– Top do pistão após 150 horas funcionando com a mistura ternária	74
Figura 3.23	– Pistão do motor alimentado com óleo diesel.....	76

Figura 3.24 – Pistão do motor alimentado com a mistura ternária	76
Figura 3.25 – Interior da camisa do motor alimentado com óleo diesel	77
Figura 3.26 – Interior da camisa do pistão alimentado com a mistura ternária	77
Figura 3.27 – Virabrequim do motor alimentado com óleo diesel.....	78
Figura 3.28 – Virabrequim do motor alimentado com a mistura ternária.....	78
Figura 3.29 – Comando de válvulas do motor alimentado com óleo diesel	79
Figura 3.30 – Comando de válvulas do motor alimentado com a mistura ternária	79
Figura 3.31 – Bronzina do motor alimentado com óleo diesel.....	80
Figura 3.32 – Bronzina do motor alimentado com a mistura ternária	80
Figura 3.33 – Bronzina da biela do motor alimentado com óleo diesel	81
Figura 3.34 – Bronzina da biela do motor alimentado com a mistura ternária.....	81
Figura 4.1 – Filtro de fibra de vidro empregado na coleta do MP	94
Figura 4.2 – Tubulação de aço acoplada ao escapamento para coleta de MP	95
Figura 4.3 – Detalhe do local onde foi inserido o filtro para coleta do MP.....	95
Figura 4.4 – Emissão de MP, durante 5 minutos de coleta, em função da carga aplicada	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	– Emissões de biodiesel comparadas ao diesel de petróleo.....	27
Tabela 2.2	– Produtividade mundial de etanol para combustível.....	30
Tabela 2.3	– Energia total consumida nas fases agrícola e industrial para produção de etanol no Brasi	31
Tabela 2.4	– Propriedades de Combustíveis.....	38
Tabela 2.5	– Valores médios de consumo de combustível num grupo gerador de energia	37
Tabela 2.6	– Alteração média das emissões em veículos pesados devido ao uso do biodiesel em relação ao óleo diesel padrão dos Estados Unidos	38
Tabela 3.1	– Especificações técnicas e medidas do motor Toyama T70f.....	49
Tabela 3.2	– Comparação das amostras com 3 substâncias miscíveis (24° – 26°C).....	57
Tabela 3.3	– Propriedades físico-químicas dos combustíveis.....	58
Tabela 3.4	– Medição da folga entre o balancim e as válvulas nos motores	68
Tabela 3.5	– Medição da folga entre o pistão e a camisa nos motores	75
Tabela 3.6	– Análise do ponto de fulgor do óleo lubrificanteTabela 3.7 Análise da viscosidade do óleo lubrificante	82
Tabela 3.7	– Análise da viscosidade do óleo lubrificante.....	83
Tabela 3.8	– Componentes a serem substituídos nos motores após 150 horas	84
Tabela 4.1	– Comparação das amostras com 3 substâncias miscíveis (24° – 26°C).....	93
Tabela 4.2	– Propriedades físico-químicas dos combustíveis.....	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEHC	Álcool etílico hidratado combustível
ANP	Agência Nacional do Petróleo
B2	mistura composta por 98% de diesel e 2% de biodiesel
B3	Mistura composta por 97% de diesel e 3% de biodiesel
B5	Mistura composta por 95% de diesel e 5% de biodiesel
B10	Mistura composta por 90% de diesel e 10% de biodiesel
B20	Mistura composta por 80% de diesel e 20% de biodiesel
B25	Mistura composta por 75% de diesel e 25% de biodiesel
B30	Mistura composta por 70% de diesel e 30% de biodiesel
B75	Mistura composta por 25% de diesel e 75% de biodiesel
B100	Biodiesel puro
BTU	British Thermal Unit
CO	Monóxido de carbon
CO₂	Dióxido de carbono
DNTEG	Dinitrato de Trietilenoglicol
DI	Direct injection
HC	Hidrocarboneto
HPA	Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos
HPLC	Cromatografia líquida de alta pressão
ICO – I	gñição por compressão
IDI	Indirect injection
MP	Material particulado
N₂	Gás nitrogênio
NaOH	Hidróxido de sódio
NC	Número de cetano
NO_x	Óxido de nitrogênio
NTHF	Nitrato de tetrahidrofurfurila
PMI	Ponto morto inferior
PMS	Ponto morto superior
PNPB	Plano Nacional de Produção e uso de Biodiesel
PM	Particulate matter

SIT	Temperatura de ignição espontânea
SO_x	Óxido de enxofre
SO₃	Trióxido de enxofre
TICS	Time and injection rate control system
O₂	Gás oxigênio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 HISTÓRICOS DOS MOTORES TÉRMICOS.....	19
2.2 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE UM MOTOR DE CICLO DIESEL	20
2.2.1 Funcionamento Básico	20
2.2.2 Propriedades do Combustível Empregado.....	21
2.3 UTILIZAÇÃO DE ÓLEOS VEGETAIS COMO COMBUSTÍVEL.....	23
2.3.1 Óleo vegetal “in natura”	23
2.3.2 Óleo Vegetal Transesterificado ou Biodiesel.....	25
2.3.3 Características do Biodiesel com Combustível Alternativo.....	27
2.3.4 Biodiesel e a Legislação Brasileira.....	28
2.4 ETANOL, O COMBUSTÍVEL 100% NACIONAL	29
2.4.1 Eficiência Energética Brasileira na Produção de Etanol.....	30
2.4.2 Propriedades de Etanol em Motores de Ciclo Diesel	31
2.5 MISTURAS DE COMBUSTÍVEIS EM MOTORES DE CICLO DIESEL	32
2.5.1 Misturas Contendo Óleo Diesel e Etanol.....	32
2.5.2 Misturas Contendo Óleo Diesel e Biodiesel	35
2.5.3 Misturas Contendo Óleo Diesel, Óleo Vegetal e Etanol	39
2.5.4 Misturas Contendo Óleo Diesel, Biodiesel e Etanol	39
2.5.5 Estudo com Enfoque na Emissão de Material Particulado.....	42
3 ARTIGO A – ESTUDO DA COMBUSTÃO DE UM MOTOR DE CICLO DIESEL ALIMENTADO POR MISTURAS TERNÁRIAS OXIGENADAS CONTENDO BIODIESEL, ETANOL E ÓLEO VEGETAL	44
3.1 RESUMO E ABSTRACT.	44
3.2 INTRODUÇÃO	46
3.3 MATERIAL E MÉTODOS	48
3.3.1 Descrição dos Motores Utilizados	48
3.3.2 Aplicação de Carga aos Motores	50

3.3.3 Parâmetros Analisados no Funcionamento dos Motores33	52
3.3.3.1 Avaliações primárias	52
3.3.3.2 Avaliações secundárias.....	55
3.3.4 Seleção das Misturas Ternárias de Biocombustíveis	56
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
3.4.1 Consumo Específico de Combustível.....	59
3.4.2 Eficiência Térmica	61
3.4.3 Temperatura dos Gases de Exaustão.....	63
3.4.4 Temperatura do Cabeçote do Motor	64
3.4.5 Nível de Ruído.....	66
3.4.6 Teste de Longa Duração	67
3.4.6.1 Conjunto de válvulas	68
3.4.6.2 Bico injetor.....	71
3.4.6.3 Topo do pistão.....	73
3.4.6.4 Pistão e camisa	74
3.4.6.5 Virabrequim e comando de válvulas	78
3.4.6.6 Bronzinas	79
3.4.6.7 Análise do óleo lubrificante.....	81
3.4.6.8 Outras considerações realizadas pelo técnico da oficina.....	83
3.4.7. Partida a Frio do Motor Abastecido com a Mistura Ternária	84
3.5 CONCLUSÕES	85

4 ARTIGO B – EMISSÃO DE MATERIAL PARTICULADO POR MISTURAS TERNÁRIAS COMPOSTAS DE BIODIESEL, ETANOL E ÓLEO VEGETAL: UMA COMPARAÇÃO COM O ÓLEO DIESEL CONVENCIONAL.....

4.1 RESUMO E ABSTRACT	87
4.2 INTRODUÇÃO	89
4.3 MATERIAL E MÉTODOS	91
4.3.1 Seleção das Misturas Ternárias de Combustíveis	92
4.3.2 Análise dos Gases de Exaustão.....	94
4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	96
4.5 CONCLUSÕES	97

5 CONCLUSÕES GERAIS	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, um grande esforço tem sido feito para reduzir a dependência de combustíveis derivados de petróleo para geração de energia e transporte em todo o mundo. Dentre as recentes alternativas propostas, biodiesel, etanol, além de misturas contendo biodiesel e diesel, e ainda, etanol com diesel, têm chamado muita atenção para o uso em motores de ciclo Diesel e apresentam-se como uma das soluções em diversos países para redução de suas importações de petróleo.

Além disso, a preocupação com o meio ambiente, principalmente no que diz respeito à emissão de gases na atmosfera, vem aumentando nos últimos anos. Com a iniciativa abordada no Protocolo de Kyoto em 1997, criou-se um tratado internacional com compromissos rígidos para a redução da emissão dos gases causadores do efeito estufa, considerados, de acordo com a maioria das investigações científicas, como causa do aquecimento global. De acordo com França (2008), a queima de combustíveis fósseis em veículos automotores constitui uma das principais causas da emissão de gás carbônico (CO_2), considerado o principal componente causador do efeito estufa. Esse fato levou pesquisadores e industriais a buscarem fontes alternativas para os combustíveis automotivos, que pudessem amenizar o problema.

Combustíveis produzidos a partir da biomassa atendem ao propósito, pois o CO_2 emitido pela combustão é parcial ou totalmente consumido durante o crescimento da biomassa (FRANÇA, 2008).

Etanol, óleo vegetal e biodiesel são todos derivados da biomassa e, ao contrário do petróleo, são combustíveis renováveis. Entre estes combustíveis, cada vez mais se destaca o etanol, que provém de fonte renovável, é um combustível oxigenado, menos poluente que os derivados do petróleo, miscível em água e de produção relativamente fácil e barata.

De Caro et al. (2001) consideram a incorporação de compostos oxigenados na porção da matriz energética ocupada pelo diesel como um caminho de impacto imediato no seu processo de renovação. Entre os alcoóis, o etanol geralmente é o escolhido por ter particularmente uma boa combinação de alto

conteúdo de oxigênio, baixo preço (para um oxigenado) e alta capacidade de produção.

No Brasil, estudos com a mistura de álcool e diesel vêm sendo realizados desde 1984, quando foi verificado que misturas de óleo diesel com álcool anidro eram viáveis, pois não causavam perda de eficiência do motor ou aumento do consumo de combustível, com uma redução da emissão de particulados. Desta maneira, trabalhos de pesquisa e testes de campo têm sido realizados para implantação de um programa de adição de etanol à matriz energética do diesel (ECONOMY; ENERGY, 2001).

Em tese, os óleos vegetais puros podem ser utilizados como combustíveis alternativos. Esta ideia ocorreu a Rudolph Diesel, que usou óleo de amendoim em seus motores na exposição de Paris em 1900. Contudo, os óleos vegetais possuem alta viscosidade e, para que sejam utilizados em motores de ciclo Diesel sem necessidade de adaptações, é preciso reduzir os valores de viscosidade para valores próximos ao do diesel convencional (MA; HANNA, 1999; RABELO, 2003).

Um pouco mais recente que o etanol, o biodiesel também encontra seu espaço e apresenta crescimento acelerado no mercado nacional de biocombustíveis. Porém, ao contrário do etanol, que encontrou na cana-de-açúcar sua matéria-prima ideal, o biodiesel ainda está em estágio de intensa pesquisa e desenvolvimento (PNA, 2005).

O biodiesel é um dos combustíveis alternativos mais promissores, principalmente em países como o Brasil, que possuem vocação agrícola, além de ser compatível com os existentes motores de ciclo Diesel. Porém, o biodiesel esbarra em entraves econômicos por ter um custo de produção mais alto que o diesel proveniente do petróleo. Adicionalmente, também existe a necessidade de encontrar maneiras de se utilizar industrialmente todo o subproduto obtido com a transesterificação (RABELO, 2003).

Segundo Fernando e Hanna (2004), o biodiesel tem sido usado não somente como uma alternativa para substituir o diesel de petróleo, mas também como um aditivo emulsificante para compor misturas ternárias de diesel, biodiesel e etanol. O biodiesel, nesses casos, atua como um agente de ligação, possibilitando uma compatibilidade entre as moléculas dos componentes da mistura, conduzindo, assim, à produção de uma mistura perfeitamente homogênea (LETCHER, 1983).

Tal homogeneidade da mistura deve-se ao caráter anfifílico do biodiesel (um agente ativador de superfície) que forma micelas que possuem caudas apolares e cabeças polares, permitindo dupla solubilidade, ou seja, tanto no etanol (polar) como no óleo diesel (apolar) (KWANCHAREON et al., 2007).

Misturas ternárias estáveis contendo diesel, biodiesel e etanol para alimentação de motores de ciclo Diesel foram obtidas com êxito por Kwanchareon et al. (2007) e Caetano (2003).

Testes de miscibilidade e estabilidade, envolvendo etanol, biodiesel e óleo vegetal, foram conduzidos na Universidade de Ribeirão Preto – SP (UNAERP), sob coordenação do Professor Murilo Innocentini, com os quais objetivou-se encontrar misturas estáveis dos três componentes, em temperaturas variando de 10° a 25°C.

Um fato relevante deste trabalho é que todos os componentes dessa mistura ternária provêm de matriz renovável, o que em tempos de escassez de reservas mundiais de petróleo e aquecimento global enriquece a importância do estudo.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de um motor de ciclo Diesel alimentado com misturas ternárias compostas de etanol hidratado, biodiesel de óleo de soja (*Glycine max L.*) e óleo de soja refinado, tendo como testemunha um motor idêntico funcionando com óleo diesel convencional, visando à utilização daquelas como possíveis sucedâneas ao diesel de petróleo no mercado de combustíveis.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 HISTÓRICO DOS MOTORES TÉRMICOS

Há mais de 250 anos, o homem tem usufruído de motores térmicos, porém, somente em 1860 os motores de combustão interna se tornaram uma realidade. Os primeiros motores desenvolvidos para uso comercial queimavam gás de carvão sob pressão atmosférica, não havendo compressão antes da combustão. Lenoir (1822-1900) desenvolveu o primeiro motor comercial deste tipo. Gás e ar eram arrastados para dentro do cilindro durante a primeira metade do curso do pistão. A combustão da mistura era iniciada por uma centelha, a pressão aumentava e os gases queimados transferiam trabalho ao pistão durante a segunda metade do curso (FEITOSA, 2003).

Com intenção de superar os problemas da baixa eficiência térmica e do excessivo peso dos motores da época, Otto (1832-1891) propôs um modelo constituído de 4 tempos de deslocamento do pistão: um tempo de admissão da mistura de ar e combustível, um tempo de compressão previamente à ignição, um tempo de expansão dos gases queimados onde o trabalho era transferido ao eixo das manivelas e, finalmente, um tempo de exaustão (HEYWOOD, 1988).

Vinte e cinco anos após a criação do motor a combustão interna, o engenheiro alemão Daimler construiu o primeiro motor de combustão interna capaz de mover um veículo com razoáveis condições de segurança e economia. Em 1894, outro engenheiro alemão, Rudolf Diesel, simplificou o princípio de funcionamento do motor a explosão, nascendo assim o motor Diesel. O motor Diesel possui ignição por compressão, pois a mistura ar-combustível é inflamada quando uma nuvem de óleo é injetada, pela bomba de alta pressão, no ar quente contido no cilindro. O aquecimento do ar ocorre devido à compressão praticamente adiabática (sem troca de calor com o exterior) efetuada pelo pistão do motor, ao contrário do motor à gasolina (ciclo Otto) em que a ignição é desencadeada pela centelha que salta entre os eletrodos da vela de ignição. Esta diferença, entre os modos de inflamar a carga,

impõe características físico-químicas distintas aos combustíveis usados em um e outro desses motores (HADDAD; WATSON, 1984).

2.2 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE UM MOTOR DE CICLO DIESEL

2.2.1 Funcionamento Básico

Segundo Broge (2002), o motor Diesel tem sido escolhido para aplicações pesadas na agricultura, na indústria e no transporte rodoviário há mais de 50 anos. Sua popularidade pode ser atribuída à sua capacidade de utilizar uma fração do petróleo bruto que tinha sido anteriormente identificada como resíduo do refino da gasolina. Mais tarde, a durabilidade, a capacidade de fornecer alto torque e consumo eficiente do combustível foram os fatores mais determinantes para a sua aplicação.

Nos motores de ciclo Diesel apenas o ar é admitido para o cilindro, pois o combustível (óleo diesel) é injetado diretamente no interior do cilindro (injeção direta) ou em uma antecâmara (injeção indireta) e, então, inicia-se o processo de combustão. O controle da rotação e do torque do motor é obtido variando-se apenas a quantidade de combustível injetado em cada ciclo, sendo que a vazão de ar para o cilindro, em uma dada rotação, é praticamente invariável com a carga aplicada ao motor (em caso de motores aspirados) (FEITOSA, 2003).

De acordo com Heywood (1988), a maioria dos motores de combustão interna opera na forma conhecida como ciclo de quatro tempos, onde cada cilindro requer quatro tempos, ou cursos, do seu pistão. Este ciclo divide-se em:

1º - Curso de Admissão: inicia-se quando o pistão está no ponto morto superior (PMS) e termina quando o pistão atinge o ponto morto inferior (PMI), sugando mistura fresca para o interior do cilindro. Durante este tempo, a válvula de admissão está aberta e a de exaustão se mantém fechada.

2º- Curso de compressão: quando as válvulas de admissão e de exaustão estão fechadas e o pistão desloca-se para cima, comprimindo a mistura no

interior do cilindro a um volume muitas vezes inferior ao seu volume inicial. Quase ao final do tempo de compressão, a combustão se inicia e a pressão no interior do cilindro cresce rapidamente.

3º- Curso de potência ou de expansão: inicia-se quando o pistão está no PMS e termina quando este atinge o PMI conforme os gases sob alta pressão e temperatura empurram o pistão para baixo, forçando o eixo das manivelas a girar. Cerca de cinco vezes mais trabalho é gerado durante este tempo do que é perdido no tempo de compressão. Conforme o pistão atinge o PMS, a válvula de exaustão se abre para iniciar o processo seguinte.

4º- Curso de exaustão: onde os gases queimados residuais existentes no interior do cilindro são expulsos pelo movimento da subida do pistão ao PMS. A válvula de exaustão permanece aberta durante o curso. Próximo ao PMS, a válvula de admissão se abre, fechando-se logo em seguida a válvula de exaustão, iniciando-se novamente o ciclo pelo tempo da admissão.

Condições heterogêneas da relação ar/combustível no cilindro, durante o processo de combustão, contribuem para a formação de partículas de fumaça, que é um dos maiores desafios aos projetistas de motores Diesel. Estas partículas são formadas em regiões da câmara de combustão onde as temperaturas são altas e a relação ar/combustível é característica para misturas ricas em combustível, consistindo principalmente de carbono com uma pequena quantidade de hidrogênio e compostos inorgânicos. Embora ainda não se conheça o processo, o biodiesel reduz a quantidade de fumaça, e isto parece estar associado ao fato de que o combustível contém oxigênio (MCCORMICK et al., 1997).

2.2.2 Propriedades do Combustível Empregado

A qualidade do combustível diesel é um importante fator no estudo de motores de combustão, pois pode afetar, positiva ou negativamente, o comportamento da combustão e o desempenho do motor, dependendo, por exemplo, de fatores como índice de cetano ou conteúdo de aromáticos presentes nesse combustível (CAETANO, 2003).

Volatilidade, qualidade de ignição, viscosidade, conteúdo de enxofre, e ponto de névoa são também propriedades importantes do combustível diesel automotivo. No Brasil, o óleo diesel comercial automotivo é classificado de acordo com a portaria nº032, de 04 de Agosto de 1997, em cinco tipos: "A", "B", "C" "D" e Óleo Diesel Marítimo (KNOTHE et al., 2006).

Os aromáticos são uma classe de hidrocarbonetos que se caracterizam por ter estrutura química estável. Eles usualmente estão presentes no diesel em níveis entre 25% e 35%. São desejáveis no diesel porque contribuem para o aumento da energia por litro de combustível, contudo, podem contribuir para aumentar as emissões de particulados e NO_x , além de apresentarem baixo número de cetano (NC) (KNOTHE et al., 2006).

Um importante critério sobre a qualidade do combustível diesel são suas propriedades de ignição, expressas pelo número, ou índice de Cetano (NC).

O número de cetano indica a capacidade que o combustível possui de sofrer auto-ignição nas temperaturas e pressões presentes no cilindro, quando este é injetado. O teste de laboratório utilizado para medir esta característica é o teste de número de cetano (NC) descrito na norma ASTM D613. O teste compara a tendência de auto-ignição de uma amostra do combustível com misturas formadas por dois combustíveis padrões de referência, o cetano (hexadecano) e o heptametilonano. Combustíveis com altos NC terão pequenos retardamentos de ignição e pequenas quantidades de combustível estarão presentes na fase de combustão em pré-mistura, devido ao pequeno tempo para o preparo do combustível para a combustão (KNOTHE et al., 1997).

No Brasil, com alto consumo de óleo diesel devido à estrutura do sistema de transporte coletivo de passageiros e de carga, o número de cetano variou entre amplos limites a partir da alta de preço do petróleo na década de 70, refletindo o esforço de acomodação da balança comercial. A partir do início da década de 90, houve um movimento de melhoria da qualidade do diesel motivado pela legislação sobre a qualidade do ar. Na atualidade, há quatro faixas de especificação do número de cetano para uso rodoviário, urbano, metropolitano, ensaios e outros usos. A faixa de variação vai de NC de 40 a 45. Entretanto, em países onde a legislação ambiental é mais rigorosa, o diesel urbano tem NC igual a 50 (ECONOMY; ENERGY, 2001).

Para melhorar a qualidade do ar, restrições mais severas são tomadas em relação ao conteúdo de enxofre e de aromáticos no diesel, sendo

especificado um índice mínimo de cetano no combustível de modo que a quantidade de aromáticos não seja alta (GARY; HANDWERK, 1994).

A densidade e a viscosidade do diesel têm, também, um efeito considerável no desempenho do motor. Densidades altas levam a um enriquecimento na mistura combustível-ar, a qual, em princípio, rende uma potência mais alta ao motor; no entanto, efeitos negativos na exaustão de gases podem ocorrer, uma vez que misturas demasiadamente ricas em combustíveis tendem a promover uma queima incompleta devido a um desequilíbrio estequiométrico na quantidade de ar e combustível dentro da câmara.

A viscosidade do diesel deve estar entre limites estreitos, pois uma viscosidade muito baixa pode levar ao desgaste da bomba de injeção, ao passo que viscosidades muito altas dificultam a injeção e prejudicam a formação da mistura combustível-ar (ELVERS et al., 1990).

2.3 UTILIZAÇÃO DE ÓLEOS VEGETAIS COMO COMBUSTÍVEL

2.3.1 Óleo Vegetal “in Natura”

A possibilidade de uso de óleos vegetais como combustível foi reconhecida desde os primórdios da descoberta e desenvolvimento dos motores de ciclo Diesel. O próprio Rudolph Diesel utilizou vários óleos vegetais em seus motores. No prefácio escrito por ele para o livro *Termodinâmica*, afirmou: “O motor diesel pode ser alimentado com óleos vegetais e poderá ajudar consideravelmente o desenvolvimento da agricultura nos países onde ele funcionar. Isso parece um sonho do futuro, mas eu posso predizer, com inteira convicção, que esse modo de emprego do motor Diesel pode, em dado tempo, adquirir uma grande importância” (SÁ FILHO et al., 1979).

Os óleos vegetais foram usados como combustível de emergência, dentre outras aplicações, durante a Segunda Guerra Mundial. Por exemplo, o Brasil proibiu a exportação de óleos de algodão porque este produto poderia ser utilizado para substituir as importações de óleo diesel. Reduções na importação de

combustíveis líquidos também foram divulgadas na Argentina, o que exigiu uma maior exploração comercial de óleos vegetais (MARTINEZ DE VEDIA, 1944).

Segundo Caetano (2003), a inconveniência do uso dos óleos vegetais nos motores de ciclo Diesel é devida à sua alta viscosidade, da ordem de 12 a 20 vezes maior que a do diesel, acarretando problemas de fluidez, durabilidade do motor e emissões de partículas.

Ryan et al. (1983) estudaram os efeitos das propriedades dos óleos vegetais durante as etapas de injeção e combustão nos dois diferentes tipos de motores Diesel conhecidos, injeção direta (DI) e injeção indireta (IDI), obtendo caracterizações diferentes, quando comparadas ao diesel, por causa da alta viscosidade do óleo utilizado que diminui o grau de atomização obtido, resultando num grande atraso de ignição no motor e baixo número de cetano.

Os óleos vegetais puros, quando empregados nos motores, apresentam os seguintes inconvenientes (VILLANO; PENIDO F^o, 1983; FALCON et al., 1983; RAMOS et al., 2003):

- a) facilidade de oxidação;
- b) formação de resíduos na câmara de combustão;
- c) necessidade de pré-aquecimentos;
- d) alto índice de odor;
- e) alta viscosidade;
- f) ausência de volatilidade;
- g) redução na potência do motor;
- h) aumento do consumo;
- i) dificuldade de partida a frio;
- j) características amplamente variantes com o tipo de vegetal

oleaginoso.

Maziero et al. (2007) realizaram um experimento com um trator dotado de um motor de ignição por compressão MWM D229.3, de injeção direta, alimentado com óleo bruto de girassol. O ensaio de longa duração teve de ser interrompido com apenas 60 horas de trabalho devido à ocorrência dos seguintes problemas detectados com a abertura do motor:

I) Formação de uma substância preta e pegajosa saindo da junta da tubulação de escapamento, sinal de que possivelmente o combustível não estava sendo totalmente queimado. O motor, então, foi retirado do trator e enviado ao fabricante para análise de seu interior;

II) obstrução do pescador de óleo do cárter;

III) desgaste do retentor;

IV) entupimento das galerias de lubrificação interna do motor;

V) acúmulo de carvão nos bicos injetores e na cabeça do pistão;

VI) A bomba injetora e o conjunto porta-injetores, apesar de estarem mecânica e hidraulicamente em ordem, apresentaram forte formação de depósitos do tipo “verniz”.

Além disso, os autores observaram ao longo da faixa de ensaio de desempenho do motor, que os valores, com o uso de óleo bruto de girassol, variaram de -5,3% a -9,0 % para a potência, e de +13,6% a +16,3 % para o consumo específico de combustível, comparado ao resultado obtido com diesel.

Para que seja possível a utilização de óleos vegetais em motores do ciclo Diesel sem necessidade de adaptações, é preciso reduzir a viscosidade a valores próximos ao diesel convencional. Para isso, a literatura registra quatro métodos (WENZEI; LAMMERS, 1997; MA; HANNA, 1999; RABELO, 2003):

1. Formação de misturas diesel/óleo vegetal;
2. Formação de combustíveis emulsionados;
3. Pirólise para produção dos componentes com pequena massa molecular;
4. Transesterificação do óleo vegetal.

2.3.2 Óleo Vegetal Transesterificado ou Biodiesel

Dentre os possíveis candidatos a combustível proveniente da biomassa com potencialidade para uso em motores de ignição por compressão, o biodiesel mostrou-se uma alternativa bastante atrativa. Para utilizar óleo vegetal em um motor de ciclo Diesel comum, é necessário submetê-lo a uma reação química

com o propósito de diminuir a viscosidade do óleo a valores próximos ao do diesel mineral.

A essa reação química dá-se o nome de transesterificação, que nada mais é do que a reação de um triglicerídeo com um álcool (metanol ou etanol) para produzir um éster e um subproduto, o glicerol, que é um poliálcool. O processo global de transesterificação de óleos vegetais e gorduras é uma sequência de três reações reversíveis e consecutivas, em que os monoglicerídeos e os diglicerídeos são produtos intermediários (SUAREZ, 2006).

A definição do biodiesel pela Agência Nacional de Petróleo (ANP), através da resolução 042, de 24.11.2004, estabelece, através do Artigo 2º:

I – biodiesel (B100): combustível composto de alquil-ésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou de gorduras animais, conforme a especificação contida no Regulamento Técnico nº 4/2004, parte integrante desta resolução;

II – Mistura óleo diesel / biodiesel – B2: combustível comercial, composto de 98%, em volume, de óleo diesel, conforme a especificação da ANP, e 2%, em volume, de biodiesel, que deverá atender à especificação prevista pela Portaria ANP nº 310, de 27 de Dezembro de 2001, e suas alterações;

III – Mistura autorizada óleo diesel / biodiesel: combustível composto de biodiesel e óleo diesel, em proporção definida quando da autorização concedida para testes e uso experimental, conforme previsto pela Portaria ANP nº 240, de 25 de Agosto de 2003.

No Brasil, as alternativas para a produção de óleos vegetais são diversas, constituindo-se em um dos muitos diferenciais para a estruturação do programa de produção e uso do biodiesel no país. Por se tratar de um país tropical, com dimensões continentais, o desafio colocado é o do aproveitamento das potencialidades regionais. Isso é válido tanto para culturas já tradicionais, como a soja (*Glycine max* L.), o amendoim (*Arachis hypogaea* L.), o girassol (*Helianthus annuus*), a mamona (*Ricinus communis* L.) e o dendê (*Elaeis guineensis*), quanto para alternativas novas, como o pinhão manso, o nabo forrageiro, o pequi, o buriti, a macaúba e uma grande variedade de oleaginosas a serem exploradas (PNA, 2005).

2.3.3 Características do Biodiesel como Combustível Alternativo

Muitos méritos podem ser atribuídos ao uso do biodiesel como combustível alternativo. Um balanço entre agricultura, desenvolvimento econômico e meio ambiente pode ser estabelecido com o uso do biocombustível (MEHER et al., 2006). O biodiesel possui alto número de cetano (aproximadamente 60 contra apenas 40 para o diesel mineral) e alto ponto de fulgor (maior que 130 °C) (KISS et al., 2006). Comparado ao diesel de petróleo, o biodiesel tem uma emissão de gases de combustão favorável, como a baixa emissão de monóxido de carbono, material particulado e hidrocarbonetos e o dióxido de carbono emitido pode ser reciclado pela fotossíntese realizada durante o crescimento da matéria-prima (ZHANG et al., 2003; SHAHID; JAMAL, 2007). A Tabela 2.1 mostra as emissões médias do biodiesel comparadas ao diesel de petróleo.

Tabela 2.1 – Emissões de biodiesel comparadas ao diesel de petróleo.

Tipo de emissão	B20	B100
Total de hidrocarbonetos	- 20 %	- 67 %
Monóxido de Carbono (CO)	- 12 %	- 48 %
Dióxido de Carbono (CO ₂) - ciclo de vida da produção	- 16 %	- 79 %
Material particulado	- 12 %	- 47 %
Óxidos de Nitrogênio (NO _x)	+ 2 %	+ 10 %
Óxidos de Enxofre (SO _x)	- 20 %	-100 %
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA)	- 13 %	- 80 %
HPA Nitrados (nHPA)	- 50 %	- 90 %

Fonte: Kiss et al. (2006).

B20 – Mistura contendo 80% de diesel mineral com 20% de biodiesel

B100 – Biodiesel puro

Encinar et. Al. (199) fizeram um estudo sobre a preparação e as propriedades do Biodiesel obtido do óleo de cardo (*cynara cardunculus.L*) para que fosse usado em motores de combustão interna, sendo que a transesterificação do óleo foi realizada com metanol e diferentes catalisadores alcalinos. As propriedades como a densidade, a viscosidade, o índice de cetano e o valor calorífico foram

similares à do diesel. Entretanto, os pontos de névoa e de fluidez tiveram valores mais altos, ocasionando dificuldades na partida do motor em clima frio. As temperaturas de autoignição e de fulgor foram também mais altas, garantindo para o biodiesel maior segurança no transporte e armazenamento.

Lang et al. (2001) fizeram a preparação e caracterização de diferentes biodieseis. Os óleos vegetais selecionados foram transesterificados com metanol, etanol, 2-propanol ou butanol, obtendo-se vários tipos de ésteres, cujas composições foram determinadas por cromatografia líquida (HPLC). Algumas propriedades físicas e de combustão dos biodieseis foram determinadas e comparadas com as do diesel convencional. A densidade, a viscosidade, índice de iodo (que depende do óleo vegetal de origem), acidez e ponto de névoa foram mais altos que para o diesel. O calor de combustão (que mede o conteúdo de energia no combustível) e a volatilidade (medida por técnica termogravimétrica) apresentaram valores menores comparados ao diesel.

Shahid e Jamal (2007) fizeram uma revisão sobre o uso do biodiesel em motores Diesel baseada nos resultados de pesquisadores e produtores, publicados entre 1990 e 2005. Esses dados mostraram que, quando testado por um longo período, misturas com mais de 20% do biocombustível (maior que B20) causaram problemas de manutenção e, em alguns casos, danos aos motores. Porém, as propriedades lubrificantes do biodiesel são melhores do que as do diesel e resultam no aumento da vida útil do motor.

Segundo Geller e Goodrum (2004), regulamentações que fixam diminuições na quantidade de enxofre do diesel de petróleo comercial resultam num decréscimo do poder de lubrificação deste combustível. Esta redução pode causar danos ao motor e ao sistema de injeção do combustível. Dessa forma, o diesel obtido a partir de óleo vegetal, se usado como aditivo, apresenta-se como uma solução para o problema.

2.3.4 Biodiesel e a Legislação Brasileira

Em 2003, um grupo de trabalho interministerial criado pelo Governo Federal considerou que o biodiesel deveria ser introduzido na matriz energética

brasileira imediatamente, fazendo as seguintes recomendações: (I) o uso não deveria ser mandatório; (II) não deveria haver uma rota tecnológica nem matéria-prima preferencial para a produção do biodiesel; (III) o desenvolvimento sócio-econômico das regiões mais pobres deveria ser incluído (POUSA et al., 2007).

Um ano depois foi lançado o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) com o objetivo de garantir a produção de biodiesel economicamente viável, a inclusão social e o desenvolvimento regional (POUSA et al., 2007). O programa prevê que o biocombustível seja adicionado ao diesel mineral em quantidades a serem gradativamente modificadas: B2 (2% de biodiesel e 98% de diesel) de forma autorizada até 2008; B2 de forma obrigatória a partir de 2008; B3 a partir do segundo semestre de 2008 e B5 (5% de biodiesel) de forma obrigatória a partir de 2013.

Como 80% do consumo de diesel diz respeito aos transportes públicos e de cargas, aumentar ou manter a dependência externa deste combustível pode ser dramático para a economia brasileira, no caso de ocorrer escassez de diesel no mercado mundial. Sob este ponto de vista, a substituição parcial de diesel por biodiesel contribui não apenas para o desenvolvimento social e da agricultura, mas torna-se importante para diminuir a dependência externa do Brasil por combustíveis fósseis (POUSA et al., 2007).

Além das vantagens econômicas e dos benefícios ambientais, a produção de biodiesel em larga escala será importante instrumento de geração de renda no meio rural, com impacto significativo sobre a agricultura familiar. Uma das maiores motivações para a produção desse combustível alternativo foi dada pelo Governo Federal por meio do “Selo Combustível Social”, que prevê que indústrias produtoras comprem matérias-primas para biodiesel oriundas da agricultura familiar (SLUSZZ; MACHADO, 2006).

2.4 Etanol, o Combustível 100% Nacional

O Brasil é o país mais avançado, do ponto de vista tecnológico, na produção e no uso do etanol como combustível, seguido pelos EUA e, em menor escala, pela Argentina, Quênia, Malawi e outros. A produção mundial de álcool

aproxima-se dos 40 bilhões de litros, dos quais presume-se que mais de 30 bilhões de litros sejam utilizados para fins energéticos. O Brasil responde por 15 bilhões de litros deste total (Tabela 2.2). O álcool é utilizado em mistura com gasolina no Brasil, EUA, UE, México, Índia, Argentina, Colômbia e, mais recentemente, na Austrália. O uso exclusivo de álcool como combustível está concentrado no Brasil (PNA, 2005).

Tabela 2.2 – Produção mundial de etanol para combustível.

País	Produção em bilhões de litros/ano					
	1980	1985	1990	1995	2000	2005
EUA/Canadá	0	2,5	2,8	5,0	5,5	10,0
EU	0	0	0	0	0	0
Brasil	5,0	12,0	12,5	13,0	11,0	15,0
Mundo	5,0	14,5	15	18,0	16,0	25,0

Fonte: PNA (2005).

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é a principal fonte de energia renovável do Brasil com 16% de participação na matriz energética atual, considerando-se o álcool combustível e a cogeração de eletricidade a partir do bagaço (EPE, 2008).

Dos 6 milhões de hectares, cerca de 85% da cana-de-açúcar produzida no Brasil está na Região Centro-Sul (concentrada em São Paulo, com 60% da produção) com os 15% restantes na região Norte-Nordeste. Todo o potencial para a cogeração, com o aumento da eficiência energética das usinas, faz com que a produção de energia elétrica passe a ser uma das alternativas para o uso do bagaço. Também estão em curso pesquisas para transformá-lo em álcool (hidrólise lignocelulósica), ou mesmo, para o seu melhor aproveitamento pela indústria moveleira e para a fabricação de ração animal (PNA, 2005).

2.4.1 Eficiência Energética Brasileira na Produção do Etanol

A Tabela 2.3 apresenta o balanço energético da produção de etanol no Brasil elaborado por Macedo (2004). As entradas de energia representam

consumos de diesel em transporte, energia fóssil equivalente presente nos fertilizantes químicos utilizados e energia fóssil embutida na infraestrutura e nos equipamentos. As saídas representam a energia equivalente presente no etanol produzido e no bagaço de cana utilizado para geração de eletricidade e calor para o processo e excedente comercializado. O resultado é fortemente positivo e capaz de explicar os interesses nacional e internacional sobre o combustível: enquanto na indústria do petróleo se gasta praticamente uma unidade de energia para cada unidade de energia produzida, para o etanol de cana-de-açúcar obtêm-se cerca de 10 unidades de energia para cada unidade de energia fóssil utilizada.

Tabela 2.3 – Energia total consumida nas fases agrícola e industrial para produção de etanol no Brasil.

	Entradas e Saídas (kcal/tonelada de cana-de-açúcar)		
	Entrada de Energia		Saída de Energia
Fase agrícola	45.861	-	-
Fase Industrial	9.510	-	-
Etanol	-	-	490.100
Bagaço	-	-	75.600
Total	53.371	-	565.700
Entrada/Saída	-	10,2	-

Fonte: Macedo, (2004).

2.4.2 Propriedades do Etanol em Motores Diesel

Duas propriedades fundamentais do etanol fazem com que ele contribua para a redução de emissões de partículas dos motores Diesel (GERDES & SUPPES, 2001):

1. Alto conteúdo de oxigênio, que conduz à formação de espécies gasosas como alternativa ao material particulado rico em carbono, normalmente emitido pelo motor Diesel;
2. Volatilidade mais alta que o diesel, que torna mais fácil a mistura do combustível com o ar a temperaturas mais baixas que as normalmente encontradas para esta combustão.

Contudo, De Caro et al. (2001) esclarecem que a adição do etanol ao diesel tem também suas limitações. A solubilidade do etanol absoluto no diesel não

ocorre em todas as proporções, limitando-se nas faixas de 0-30% e 70-100% em etanol, sendo que fora destes intervalos, observa-se nebulosidade seguida por uma separação de fases na mistura. Outros parâmetros importantes que também são afetados pela presença de etanol no diesel são:

- A viscosidade, que garante adequada lubrificação às bombas injetoras do combustível no motor, e que diminui à medida em que se aumenta a concentração de etanol;
- O número de cetano, que assegura o bom desempenho do motor porque descreve a qualidade de ignição, e que também decresce com o aumento da concentração de etanol, porque esta é uma molécula de cadeia curta mais resistente à secessão em radicais livres, do que as moléculas longas de hidrocarbonetos.

2.5 MISTURAS DE COMBUSTÍVEIS EM MOTORES DE CICLO DIESEL

2.5.1 Misturas Contendo Óleo Diesel e Etanol

Em Pulsão consiste na mistura direta do álcool ao óleo diesel, podendo esta ser realizada sem a adição de aditivos, quando a adição de álcool é relativamente pequena, ou com o uso de aditivos emulsificantes, quando se pretendem utilizar grandes proporções (FEITOSA, 2003).

Ainda de acordo com o autor, com a adição de alcoóis ao óleo diesel, o número de cetano da mistura sempre será menor que o do diesel puro, dependendo do tipo e da qualidade do álcool adicionado ao diesel. Neste caso, o uso de aditivos que melhoram o numero de cetano do combustível também é necessário quando uma emulsão com maior quantidade de álcool é utilizada.

Hansen et al. (1989) realizaram testes em um motor de ciclo Diesel com substituição total por etanol, e ainda testes com misturas de diesel-etanol sem a adição de aditivos emulsificantes, o que mostrou ser limitada (a um máximo de 15% a fração de álcool no diesel), por questões de separação de fases.

Os pesquisadores notaram que o atraso da ignição do combustível tendia a aumentar com o aumento da proporção de etanol na mistura, sob todas as cargas, como era previsto em função das pobres características de ignição por compressão do etanol.

Noguchi et al. (1999) investigaram um motor Diesel alimentado com duplo combustível (diesel e etanol). Os principais problemas foram o controle das taxas de diesel ou de etanol e a rápida combustão do álcool, que causava um audível golpe, podendo danificar o motor. No entanto, uma bomba de injeção de diesel (TICS - timing and injection rate control system) resolveu o controle da taxa de vazão dos combustíveis e reduziu o golpe. Obteve-se um desempenho satisfatório do motor funcionando somente com o diesel ou com a mistura diesel / etanol.

As primeiras misturas com aditivos químicos não tinham como objetivo viabilizar o uso de combustíveis alternativos nos motores de ignição por compressão. O foco principal era facilitar a partida a frio dos motores Diesel e melhorar a sua qualidade de ignição. Ju e Wood (1941) realizaram uma série de experimentos no sentido de determinar o número de cetano de certos hidrocarbonetos e relacioná-lo com a sua composição química e qualidade de ignição.

Santos (1986) realizou um estudo visando obter um melhor desempenho de motores de ignição por compressão utilizando, para isso, combustíveis aditivados em um motor de ciclo Diesel, marca Perkins 4248. O aditivo utilizado foi o DNTEG (Dinitrato de Trietilenoglicol), fabricado no Brasil pela fábrica de explosivos Britanite.

Houve necessidade de modificação no sistema de injeção para o uso do álcool e verificou-se o desempenho do motor com três taxas de compressão: 13:1, 16:1 e 18:1. Variou-se o teor de aditivo nas seguintes porcentagens em volume: 10%, 5,5%, 4,5%, 3%, 2,5%, 2% e 1,5%. Com o emprego desse aditivo o índice de cetano passou a se situar dentro da faixa estabelecida para funcionamento de motores Diesel (MALLEV, 1945), com conseqüente redução da temperatura de ignição espontânea (SIT) do etanol, conseguindo-se, assim, desempenho satisfatório dos motor experimentado. Contudo, o autor relata o problema da alta toxidez desse aditivo, capaz de atuar como um potente veneno quando ingerido por ratos.

Segundo Santos (1986), a equipe responsável pela condução dos ensaios em laboratório queixava-se frequentemente de dores de cabeça, chegando até mesmo a recusar-se a trabalhar durante os últimos dias do experimento.

Entre os aditivos conhecidos, destaca-se ainda o iniciador de combustão denominado NTHF (nitrato de tetrahidrofurfurila) que apresenta como principal vantagem a abundância de matéria-prima de baixo custo, o que possibilita a operação de motores de ciclo Diesel de modo mais econômico. A matéria-prima desse aditivo é obtida de resíduos fibrosos, tais como casca de arroz, sabugo de milho, palha e, principalmente, bagaço de cana.

O NTHF, como aditivo para o álcool visando a total substituição do diesel, já foi testado pela Saab-Scania do Brasil. Os resultados foram surpreendentes e mostraram que o etanol hidratado aditivado com NTHF, no teor de 7 a 8%, permitiu a operação normal dos motores do ciclo Diesel. Em testes de 6.000 h de durabilidade, onde se simula a vida inteira do motor, os técnicos da Scania constataram que o motor funcionou normalmente com o álcool aditivado com NTHF, não sendo afetado pela substituição ao diesel; o óleo lubrificante mostrou-se em muito bom estado e o equipamento de injeção apresentou desgastes considerados dentro dos padrões. Os nitratos orgânicos também são capazes de reforçar a cetanagem do óleo diesel. Testes experimentais revelaram que a adição de 1% do aditivo ao diesel de baixa qualidade melhora sua performance de 10 a 12%. Análises realizadas no Brasil, na Alemanha e na Suécia comprovaram que o NTHF é um aditivo adequado para a finalidade proposta, por ser de matéria-prima renovável, solúvel em etanol, estruturalmente estável, eficaz a baixos teores na mistura, não explosivo, de baixa toxicidade, baixa emissão de poluentes e alto poder lubrificante.

Estudos do Ministério das Minas e Energia concluíram que o NTHF é um aditivo aplicável em motores Diesel, podendo ser introduzido no Brasil a partir de matérias-primas renováveis, não requer insumos ou equipamentos importados, provém de tecnologia amplamente dominada no país e permite substituir, sem dificuldades, o óleo diesel veicular por álcool.

Apesar dos aspectos aparentemente positivos, este princípio de alimentação não se mostrou atraente devido ao elevado nível de consumo verificado pelos motores. Diversas tentativas anteriores de uso de etanol em motores de ciclo Diesel foram efetuadas, sempre, através da sua aditivação com compostos ditos

detonantes, cujo objetivo era o de melhorar o índice de cetano do combustível a fim de permitir o início do processo de combustão.

Um estudo para determinar o desempenho de misturas de etanol e aditivos com diesel foi realizado por De Caro et al. (2001) em motores de injeção direta (DI) e motores de injeção indireta (IDI), mostrando que o uso de aditivos em ambos os tipos de motores gera inúmeros ganhos como redução das emissões poluentes, melhora na injeção, ignição e combustão do combustível, além de proporcionar uma melhor lubrificação no motor.

Com relação à temperatura dos gases de escape ao empregar misturas de etanol e diesel em motores ICO Ajav et al. (1998) relataram uma redução expressiva quando utilizaram carburador para substituição parcial de óleo diesel por etanol. À plena carga foi verificada uma redução de 20°C na temperatura dos gases de exaustão, isto quando 15% de substituição foi empregado.

Chaplin e Janius (1987) reportaram, do mesmo modo, reduções na temperatura dos gases de escape com o aumento da adição de etanol, injetado no coletor de admissão e no interior do cilindro.

Kumar et al. (2006), ao utilizarem uma emulsão formada por gordura animal e etanol para ser empregada em um motor de ciclo Diesel, verificaram também uma diminuição na temperatura dos gases de escape em relação ao diesel convencional. Em seus experimentos obtiveram resultados bastante favoráveis aos combustíveis oxigenados. Para a condição de carga máxima, a maior temperatura dos gases de escape observada pelos autores foi referente ao óleo diesel, 600°C; já para a emulsão gordura animal/etanol, a temperatura dos gases de exaustão obtida foi a menor entre todas, em torno de 500°C.

2.5.2 Misturas Contendo Óleo Diesel e Biodiesel

Como já citado anteriormente, a adição do biodiesel ao diesel de petróleo já é compulsória e teve início no ano de 2008 com o B2 (2% de biodiesel inserido no diesel). O que se pretende ressaltar são as propriedades químicas da mistura diesel - biodiesel, que podem implicar em benefícios ou malefícios ao desempenho do motor.

A Tabela 2.4 detalha algumas propriedades de diferentes combustíveis, óleo diesel, biodiesel puro (B100), uma mistura biodiesel (20%) e diesel (80%), conhecido como B20 e também óleo vegetal puro.

Tabela 2.4 – Propriedades de Combustíveis.

	Peso do Combustível	Calor de Combustão	Número de cetano	Viscosidade
	[Lb./galão]	[BTU/galão]		[CST]
Diesel	7,05	140,000	48	3,0
B.100	7,3	130,000	55	5,7
B.20	7,1	138,000	50	3,3
Óleo Vegetal	7,5	130,000	35 a 45	40 a 50

Fonte: NDSU (2003), adaptada por Hofman (2003).

De acordo com a Tabela 2.4 elaborada por Hofman (2003), em pesquisas realizadas na Universidade da Dakota do Norte, nos EUA, as principais diferenças observadas entre óleo diesel, biodiesel e óleo vegetal puro foram relacionadas à viscosidade, ao número de cetano e ao calor de combustão. Uma alta viscosidade do combustível, como no caso do óleo vegetal bruto, irá produzir gotas maiores na câmara de combustão, que não serão queimadas completamente como as de menor diâmetro. Combustíveis queimados incompletamente favorecem o aparecimento de resíduos nas paredes do cilindro, em torno das válvulas, nos bicos injetores e também nos anéis. O biodiesel apresenta viscosidade muito próxima do diesel, possibilitando a formação de gotas pequenas que queimarão de maneira bastante eficiente.

O elevado número de cetano apresentado pelo biodiesel pode otimizar o processo de ignição o que afeta diretamente a performance do motor, a partida a frio e o aquecimento.

O poder calorífico dos combustíveis também varia. O diesel contém aproximadamente 140.000 BTU por galão, enquanto o óleo vegetal e o biodiesel contêm, aproximadamente, 130.000 BTU/gal. Um “BTU” (unidade britânica) representa a energia requerida para elevar a temperatura da água em um grau

Fahrenheit. Os combustíveis com um calor elevado de combustão liberarão mais energia por libra do combustível do que combustíveis com menor energia. Em consequência, um motor que usa um combustível com menos energia requererá mais combustível para produzir o mesmo trabalho mecânico que o combustível diesel. desta forma, o biodiesel requererá aproximadamente 1,1 galão de combustível para fazer o mesmo trabalho que um galão de diesel.

Um importante parâmetro a ser considerado no uso de qualquer combustível alternativo é o seu consumo. Ferrari et al. (2005) avaliaram o consumo de combustível em um grupo gerador de energia utilizando misturas de óleo diesel e biodiesel obtido através da transesterificação do óleo de soja com etanol anidro, na presença de catalisador alcalino (NaOH) (Tabela 2.5).

Tabela 2.5 – Valores médios de consumo de combustível num grupo gerador de energia

Combustível	Consumo(l/h)	Variação (%)
Óleo diesel	0,69 ± 0,012	-
B10	0,65 ± 0,020	- 2,23
B20	0,68 ± 0,007	+ 4,57
B40	0,71 ± 0,004	+ 3,49
B80	0,75 ± 0,008	+ 4,14
B100	0,79 ± 0,016	+ 4,77

Fonte: Santos (2007), adaptado de Ferrari et al (2005).

Observa-se que em misturas de óleo diesel e biodiesel em proporção de até 10%, ocorreu uma redução no consumo de combustível, e que para proporções maiores que esta, ocorreu um aumento no consumo, chegando a 4,77% quando se utilizou biodiesel puro. Este aumento no consumo é justificado pela diferença no poder calorífico do biodiesel que apresenta menor poder calorífico em relação ao óleo diesel.

Diversos estudos têm demonstrado as vantagens ambientais do uso do biodiesel, dentre as quais destaca-se a redução das emissões de CO, materiais particulados (MP) e óxidos de enxofre (SO_x), além da diminuição das emissões de CO₂, por se tratar de uma fonte renovável de energia. Em países como a Alemanha, Áustria, França, Suécia, Itália e Estados Unidos, entre outros, estudos sobre a

produção e uso do biodiesel mostram que os motores, de um modo geral, atendem aos limites de emissões quando operam com biodiesel, e que na maioria dos casos, ocorre uma redução da emissão de poluentes. (SCHARMER, 2001).

Chang et al. (1996) demonstraram que as emissões de CO, CO₂, e MP, usando-se biodiesel, foram menores que as emissões do óleo diesel. Porém, as emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) foram maiores em diferentes tipos de biodiesel.

A Tabela 2.6 apresenta a alteração das emissões em veículos pesados em função do teor de biodiesel adicionado ao óleo diesel padrão dos Estados Unidos.

Tabela 2.6 – Alteração média das emissões em veículos pesados devido ao uso do biodiesel em relação ao óleo diesel padrão dos Estados Unidos.

Combustível	NO _x	MP	CO	VOC	SO ₂
B20	+2,4%	- 8,9%	-13,1%	-17,9%	-20%
B100	+13,2%	-55,3%	-42,7%	-63,2%	-100%

Fonte: Santos (2007), adaptado de Morris et al. (2003).

Wang et al. (2000) verificaram as emissões de nove caminhões operando com motores de ciclo Diesel sem alterações, abastecidos com óleo diesel e com uma mistura de biodiesel e diesel (B35 - 35% de biodiesel e 65% de diesel). Os caminhões contendo a mistura B35 emitiram quantidades de material particulado, de monóxido de carbono (CO) e de hidrocarbonetos menores que as do diesel, diferentemente do que se pode verificar pelo trabalho de Altin et al. (2001), que encontraram emissões similares ao diesel.

Em relação às emissões de NO_x os autores explicam que estas estão relacionadas com a potência que o motor desenvolve. Em aceleração, as emissões aumentam; em velocidade de cruzeiro, as emissões diminuem. Isso ocorre porque altas cargas exigem maior massa de combustível que provoca picos de alta pressão e temperatura na câmara de combustão, favorecendo a formação dos óxidos de nitrogênio. Assim, pode-se concluir que as emissões de NO_x também estão relacionadas com a massa de combustível injetado

2.5.3 Misturas Contendo óleo Diesel, Óleo Vegetal e Etanol

Alguns óleos vegetais e derivados (ésteres) possuem altos números de cetano. Assim sendo, vários estudos usando substâncias que possam elevar esses valores na mistura diesel/álcool têm sido sugeridos (SUPPES et al, 2001; SERDAR et al., 1999; RABELO, 2003 ; GURU et al, 2002). Esses estudos revelaram que os aditivos, além de aumentarem o número de cetano, parecem funcionar também como emulsificantes, impedindo a separação de fases nos motores (De CARO et al, 2001; RABELO, 2003). Portanto, a importância dos óleos vegetais “in natura” retorna ao cenário de combustíveis alternativos, não como sucedâneos ao diesel convencional, pois isto requer determinadas alterações nos motores e no combustível, mas como um possível aditivo lubrificante em misturas binárias e ternárias.

2.5.4 Misturas Contendo Óleo Diesel, Biodiesel e Etanol

Geralmente o etanol pode ser misturado com diesel sem requerer nenhuma alteração no motor Diesel (AJAV; AKINGBEHIN, 2002). Contudo, Letcher (1983) aponta que a principal desvantagem da mistura etanol/diesel se liga ao fato de que o etanol é imiscível no diesel em diversas temperaturas e proporções de água, por causa de diferenças em suas propriedades e estruturas químicas. Isto pode levar a uma instabilidade do combustível devido à separação de fases. Esta separação pode ser evitada de duas maneiras: adicionando-se um emulsificante, que agirá na suspensão das moléculas da solução, ou utilizando-se um cossolvente, que atua como um agente de ligação entre as moléculas, produzindo uma mistura homogênea.

Segundo Hansen et al. (2001), existe ainda o problema do baixo número de cetano da mistura álcool/diesel, que acaba dificultando o processo de queima nos motores de ignição por compressão. Como resultado, vários estudos têm sido conduzidos com biodiesel para permitir a solubilidade do etanol no diesel, e também visando elevar o número de cetano da mistura.

Neste contexto, Fernando e Hanna (2004), esclarecem que o biodiesel não deve ser utilizado apenas como uma alternativa direta para substituir o diesel fóssil, mas também como um aditivo (emulsificante) em misturas contendo álcool e diesel, formando assim uma mistura ternária de combustíveis.

Kwanchareon et al. (2007) testaram misturas ternárias de combustíveis contendo óleo diesel, etanol e biodiesel, observando que:

- O biodiesel, derivado do óleo de palma, foi um eficiente aditivo estabilizante de emulsões contendo álcool e diesel;
- A densidade e a viscosidade das misturas apresentaram valores dentro do limite para o diesel convencional;
- O elevado número de cetano presente no biodiesel foi capaz de compensar o decréscimo causado nesse índice pela adição de etanol à mistura, considerando que o baixo número de cetano da molécula de etanol sempre foi problemático durante a ignição do motor utilizando misturas binárias contendo álcool e diesel;
- Todas as misturas apresentaram valores de calor de combustão abaixo do encontrado no diesel convencional. Porém, os valores encontrados para misturas com percentuais de etanol abaixo de 10% foram muito próximos aos do diesel;
- As emissões de CO e HC foram significativamente reduzidas quando comparadas ao diesel convencional, na plena carga do motor diesel; as emissões de NO sofreram um pequeno acréscimo.

Em trabalho experimental específico, foi estudado o uso de biodiesel de óleo de palma como aditivo para preparação de misturas álcool-diesel para a alimentação de motores de ciclo Diesel, uma vez que os alcoóis apresentam solubilidade limitada em óleo diesel e índice de cetano baixo, além de possuírem viscosidade muito menor que a do diesel, comprometendo a lubricidade das mesmas misturas (CHOTWICHEN et al., 2009).

O biodiesel é um aditivo ou emulsificante que promove a solubilidade dos alcoóis no diesel em uma ampla faixa de temperaturas, apresentando propriedades importantes como solubilidade no diesel e nos alcoóis, alto índice de cetano e alto ponto de fulgor. Assim sendo, três tipos de biodiesel (ésteres metílico, etílico e butílico de óleo de palma) foram usados para se investigarem a estabilidade

das misturas e as propriedades dos sistemas etanol-biodiesel-diesel e butanol-biodiesel-diesel. Os resultados desses estudos indicaram que:

a) a solubilidade de diesel-éster metílico de óleo de palma-álcool foi levemente maior que a solubilidade de diesel-éster etílico de óleo de palma-álcool e de diesel-éster butílico de óleo de palma-álcool; na faixa de temperaturas de 10°C a 30°C, a solubilidade de diesel-biodiesel-butanol foi maior que a de diesel-biodiesel-etanol, sendo que o uso do butanol nas misturas diesel-álcool minimizou o problema de separação de fase pela sua maior solubilidade no diesel;

b) a adição de álcool ao diesel diminuiu a densidade, a viscosidade cinemática e o número de cetano do combustível, o que pode ser compensado pela adição de biodiesel; as propriedades das misturas diesel-álcool, usando éster metílico de óleo de palma, éster etílico de óleo de palma e éster butílico de óleo de palma, não variaram significativamente. As misturas diesel-butanol apresentaram propriedades mais próximas às do diesel que as misturas diesel-etanol;

c) a mistura de 85% de diesel, 10% de éster etílico de óleo de palma e 5% de butanol foi mais favorável ao uso em motores Diesel por se apresentar estável e com propriedades combustíveis aceitáveis.

Normalmente, ésteres de óleos vegetais são acrescentados às misturas diesel-etanol para se evitar a separação das mesmas. Um desses estudos enfocou o emprego de éster metílico de óleos vegetais em misturas etanol-diesel nas proporções de 10%, 20% e 30% (em volume de etanol), para testes em motores Diesel. Foram analisados o desempenho e as emissões do motor com as diferentes porcentagens de etanol, ou seja, o torque produzido, o consumo específico de combustível e os gases regulamentados emitidos, quais sejam, os óxidos de nitrogênio (NO_x), o monóxido de carbono (CO), os hidrocarbonetos (HC), além do material particulado (PM) e a fumaça (CHEN et al., 2008).

Desta forma, para fins de testes, quatro tipos de combustíveis foram preparados: diesel (E0) como o combustível padrão, 10% de etanol misturado com 5% de éster e 85% de diesel (E10B), 20% de etanol com 10% de éster e 70% de diesel (E20B), 30% de etanol com 10% de éster e 60% de diesel (E30B). O aumento da participação de etanol nas misturas combustíveis aumentava o seu conteúdo de oxigênio e diminuía o poder calorífico das mesmas. Quando a porcentagem de etanol era maior que 30%, a interrupção de queima era observada, sob algumas

condições de funcionamento, devido ao maior atraso de ignição causado pelo baixo número de cetano. De forma resumida, as conclusões do estudo em questão foram:

a) o torque produzido pelo motor diminuiu quase que linearmente com a adição de etanol ao diesel devido ao seu baixo poder calorífico; o consumo específico de combustível aumentou com o aumento do teor de oxigênio nas misturas, porém, o consumo específico equivalente de combustível (que leva em conta o poder calorífico do combustível) se manteve próximo ao do diesel;

b) usando misturas etanol-éster-diesel, tanto a fumaça quanto o material particulado foram reduzidos significativamente; quanto maior a porcentagem de combustível oxigenado presente nas misturas, maior foi a redução, porém, a diminuição do material particulado não foi tão sensível quanto a fumaça em relação ao teor de oxigênio;

c) as emissões de NO_x das misturas oxigenadas mostraram-se iguais ou levemente maiores que aquelas referentes ao diesel; E10B causou leve aumento na emissão de NO_x em todas as cargas, ao passo que E20B e E30B emitiram o mesmo nível de NO_x que o diesel;

d) em comparação com diesel, as misturas etanol-éster-diesel determinaram decréscimo de emissão de HC em todas as condições de funcionamento do motor; já as emissões de CO aumentaram em baixa e média cargas e decresceram em altas cargas, com o aumento do conteúdo de oxigênio presente nas misturas.

2.5.5 Estudos com Enfoque na Emissão de Material Particulado

Redução na emissão de material particulado foi verificada nos experimentos de Holmer et al. (1980), que realizaram substituições de até 32% do óleo diesel por etanol, através do uso do artifício da microemulsão. Resultados similares foram obtidos por Goering et al. (1992) que notaram supressão na emissão de fumaça quando utilizaram injeção de etanol no coletor de admissão ou no injetor do cilindro.

Seguindo essa mesma linha de pesquisa, muitos trabalhos investigaram os efeitos da adição de etanol na formação de poluentes oriundos da

queima de diesel. Tem sido amplamente mostrado que quando é adicionado o etanol ao diesel, o principal benefício é a redução de fuligem e material particulado, seguido pela diminuição de CO. Ajav et al. (1999) mostraram que ao incrementar a porcentagem de etanol na mistura com diesel, as emissões de MP foram reduzidas. Suppes (2000) analisou os resultados experimentais de diferentes autores concluindo que se pode falar efetivamente de uma redução do material particulado quando se adiciona etanol ao diesel. A redução destes particulados também é destacada na ampla revisão bibliográfica feita por Hansen et al. (2005).

Outro composto presente em misturas, sejam elas binárias ou ternárias, também responsável pela diminuição do material particulado emitido é o biodiesel.

Na literatura, diversos autores demonstram a eficiência do biodiesel na redução dos particulados totais do motor. Misturas de biodiesel de girassol/diesel (B25, B50, B75 e B100) foram utilizadas por Muñoz et al. (2004), em motor Diesel automotivo, para determinação dos níveis de emissão de poluentes. A redução do grau de enegrecimento e da emissão específica de material particulado medido foi bastante representativa e favorável ao uso do biodiesel, o que, em parte, é explicado pela ausência de enxofre no biodiesel.

De acordo com Muñoz et al. (2004) e Sharp et al. (2000), o enxofre compartilha o oxigênio disponível na fase tardia da combustão com o carbono resultante da queima parcial, em algumas condições de funcionamento do motor, aumentando a produção de material particulado

Misturas ternárias estáveis contendo diesel/biodiesel/álcool etílico para alimentação de motores de ciclo Diesel foram obtidas com êxito por Kwanchaeron et al. (2007) e Caetano (2003). Em todos os estudos, os autores verificaram resultados positivos em relação à emissão de poluentes para a atmosfera, fato que, em tempos de exaustiva preocupação com a preservação do meio ambiente, mostra-se como uma excelente alternativa à utilização de um combustível puramente fóssil.

3 ARTIGO A: ESTUDO DA COMBUSTÃO DE UM MOTOR DE CICLO DIESEL ALIMENTADO POR MISTURAS TERNÁRIAS OXIGENADAS CONTENDO BIODIESEL, ETANOL E ÓLEO VEGETAL.

3.1 RESUMO E ABSTRACT

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar o emprego de misturas ternárias oxigenadas, compostas de biodiesel, etanol e óleo vegetal, na alimentação de um motor de ciclo Diesel, englobando avaliações, tais como, consumo específico, rendimento térmico, temperatura dos gases de escape e do cabeçote do motor, e nível de ruído. Aplicou-se, ainda, teste de durabilidade por um período de 150 horas, conduzido apenas com dois combustíveis: um dos motores trabalhou sempre com óleo diesel convencional, enquanto o outro funcionou com a mistura ternária formada por 50% de biodiesel, 40% de etanol e 10% de óleo vegetal. Para isso foram utilizados dois motores de ciclo Diesel, monocilíndricos, de injeção direta, e um gerador de eletricidade para imprimir carga aos motores. A seleção das misturas para as avaliações foi feita da seguinte maneira: a) análise das propriedades físico-químicas (seleção primária); e b) desempenho nas avaliações primárias, que indicaram a melhor amostra para compor a avaliação secundária de durabilidade dos motores. Os resultados obtidos mostraram que, à plena carga, as misturas ternárias conferiram rendimento térmico superior ao do óleo diesel, e temperaturas dos gases de escape e do cabeçote do motor mais baixas, porém o consumo e o nível de ruído foram melhores ao utilizar o óleo diesel convencional. Quanto ao teste de durabilidade, a mistura 50 – 40 – 10 mostrou-se superior ao óleo diesel em alguns aspectos tais como quantidade de depósito de carbono no bico injetor e no topo do pistão. Dessa forma, pode-se concluir que as misturas ternárias podem perfeitamente abastecer motores de ciclo Diesel, sem causar perda de eficiência ou danos aos componentes do motor.

Palavras-chave: Biocombustíveis. Motor Diesel. Eficiência Térmica. Temperatura. Miscibilidade.

Abstract

The aim of this work was to evaluate the performance of a Diesel cycle engine fuelled with ternary blends composed of ethanol, biodiesel and vegetable oil in attempt to make use of these blends as a substitute for conventional diesel fuel market. For this, it was used two diesel engines, single-cylinder, direct injection, and an electricity generator to establish charge to the engines. A selection of blends for the evaluations were conducted as follows: a) selection by the analysis of physical and chemical properties, and b) selection by the primary performance evaluations, which indicated the best sample that composed the secondary assessment of engine durability. The primary test was composed of the following evaluations: specific fuel consumption, thermal efficiency, temperature of the exhaust gas and engine head, and the noise of the engines. Moreover, the secondary test was performed throughout application of continuous operation of motors for a period of 150 hours, conducted only with two fuels, one of them has always worked with conventional diesel, while the other worked with the ternary blend composed with 50% biodiesel, 40% ethanol and 10% vegetable oil. The results showed that, at high load, the ternary blends showed a higher thermal efficiency, a lower temperature of the exhaust gases and engine head, and the emission of particulate matter was quite lower, on the other hand the consumption and noise level had better results when using conventional diesel. The durability test of blend 50 - 40 - 10 showed to be superior to diesel fuel in some aspects, such as amount of carbon deposit in the injector nozzle and the top of the piston. Thus, it was concluded that the ternary blends may fuel diesel engines without causing loss of efficiency or damage to engine components.

Key words: Biofuels. Diesel. Thermal Efficiency. Miscibility.

3.2 INTRODUÇÃO

Motores de combustão interna de ciclo Diesel são amplamente empregados no setor de transporte de cargas e passageiros, além de serem aplicados como fonte de potência em diversas operações agropecuárias em todo o mundo. Isto se deve, em parte, à elevada eficiência energética do combustível, o que possibilita fornecer um grande torque com um consumo específico inferior, por exemplo, ao de motores de ignição por centelha. No entanto, o aumento de preços dos derivados petrolíferos, os rigorosos regulamentos de emissões e o previsível esgotamento das reservas dos combustíveis fósseis forçam os pesquisadores e cientistas a buscarem novas alternativas tecnológicas para atender à demanda da sociedade por energia.

O desenvolvimento da bioenergia, especialmente os biocombustíveis, como etanol e biodiesel para uso no setor de transportes, é uma das principais preocupações do governo de diversos países visando uma reestruturação da matriz energética, aliada à preocupação da utilização de energias limpas, ou seja, aquelas que não agriam o meio ambiente.

Etanol, óleo vegetal e biodiesel são todos derivados da biomassa e, ao contrário do petróleo, são combustíveis renováveis. Entre estes combustíveis, cada vez mais se destaca o etanol, que provém de fonte renovável, é um combustível oxigenado, menos poluente que os derivados do petróleo, miscível em água e de produção relativamente fácil e barata (CHEN et al., 2007)

De Caro et al. (2001) consideram a incorporação de compostos oxigenados na porção da matriz energética ocupada pelo diesel como um caminho de impacto imediato no seu processo de renovação. Entre os alcoóis, o etanol geralmente é o escolhido por ter particularmente uma boa combinação de alto conteúdo de oxigênio, baixo preço (para um oxigenado) e alta capacidade de produção.

No Brasil, estudos com a mistura de álcool e diesel vêm sendo realizados desde 1984, quando foi verificado que misturas de óleo diesel com álcool anidro eram viáveis, pois não causavam perda de eficiência do motor ou aumento do consumo de combustível, com uma redução da emissão de particulados. Desta maneira, trabalhos de pesquisa e testes de campo têm sido realizados para

implantação de um programa de adição de etanol à matriz energética do diesel. (ECONOMY & ENERGY, 2001).

Em tese, os óleos vegetais puros podem ser utilizados como combustíveis alternativos. Esta idéia ocorreu a Rudolph Diesel, que usou óleo de amendoim em seus motores na exposição de Paris em 1900. Contudo, os óleos vegetais possuem alta viscosidade e, para que sejam utilizados em motores de ciclo Diesel sem necessidade de adaptações, é preciso reduzir os valores de viscosidade para algo próximo ao do diesel convencional (MA & HANNA, 1999; RABELO, 2003).

Um pouco mais recente que o etanol, o biodiesel também encontra seu espaço e apresenta crescimento acelerado no mercado nacional de biocombustíveis. Porém, ao contrário do etanol, que encontrou na cana-de-açúcar sua matéria-prima ideal, o biodiesel ainda está em estágio de intensa pesquisa e desenvolvimento (PNA, 2005).

O biodiesel é um dos combustíveis alternativos mais promissores, principalmente em países como o Brasil, que possuem vocação agrícola, além de ser compatível com os existentes motores de ciclo Diesel. Porém, o biodiesel esbarra em entraves econômicos por ter um custo de produção mais alto que o diesel proveniente do petróleo. Adicionalmente, também existe a necessidade de encontrar maneiras de se utilizar industrialmente todo o subproduto obtido com a transesterificação (RABELO, 2003).

Segundo Fernando & Hanna (2004), o biodiesel tem sido usado não somente como uma alternativa para substituir o diesel de petróleo, mas também como um aditivo emulsificante para compor misturas ternárias de diesel, biodiesel e etanol. O biodiesel, nesses casos, atua como um agente de ligação, possibilitando uma compatibilidade entre as moléculas dos componentes da mistura, conduzindo, assim, à produção de uma mistura perfeitamente homogênea (LETCHER, 1983).

Tal homogeneidade da mistura deve-se ao caráter anfifílico do biodiesel (um agente ativador de superfície) que forma micelas que possuem caldas apolares e cabeças polares, permitindo dupla solubilidade, ou seja, tanto no etanol (polar) como no óleo diesel (apolar) (KWANCHAREON et al., 2007).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de um motor de ciclo Diesel alimentado com misturas ternárias compostas de etanol hidratado, biodiesel de óleo de soja (Glycine Max L.) e óleo de soja refinado, tendo como testemunha um motor idêntico funcionando com óleo diesel convencional,

visando o emprego destas misturas como possíveis sucedâneas ao diesel de petróleo no mercado de combustíveis.

3.3 MATERIAL E MÉTODOS

Os testes envolvendo misturas de biocombustíveis alternativos foram realizados no Laboratório de Engenharia Agrícola do Centro Nacional de Pesquisa de Soja (Embrapa Soja), em Londrina - PR, onde estão alocados os motores estacionários e o gerador de eletricidade que foram empregados durante a experimentação.

3.3.1 Descrição dos Motores Utilizados

Para os testes, foram utilizados dois motores estacionários de ciclo Diesel a 4 tempos, da marca Toyama (Figura 3.1), modelo T70f, arrefecidos a ar, com injeção direta e 6 HP de potência nominal, sendo que um deles foi abastecido somente com óleo diesel, e o outro, com a mistura ternária que continha óleo vegetal, biodiesel e etanol; dessa forma, cada motor pode ser avaliado individualmente de acordo com o combustível empregado. As principais especificações técnicas e medidas dos motores são descritas na Tabela 3.1.



Figura 3.1 – Motor Toyama T70f.

Tabela 3.1 – Especificações técnicas e medidas do motor Toyama T70f.

Item	Especificação técnica	
Modelo	T 70f	
Tipo	Monocilíndrico, 4 tempos	
Arrefecimento	Ar	
Cilindrada (l)	0,296	
Rotação nominal (rpm)	3.000	3.600
Potência nominal (HP)	5,4	6,0
Velocidade média do pistão (m/s)	6,2	7,44
Pressão efetiva média (kgf/cm ²)	5,52	5,07
Relação de consumo de combustível (g/HP.h)	< 206	< 215
Relação de consumo de óleo lubrificante (g/HP.h)	< 3	
Capacidade do tanque de combustível (l)	3,5	
Sentido do eixo de rotação	Horário, visto do volante	
Tipo e lubrificação	Bomba de óleo	
Tipo de partida	Manual retrátil	
Peso líquido (kg)	33	

Para a realização de testes procurando simular, concretamente, as exigências mecânicas a que um motor desse tipo é submetido, foi necessário imprimir uma determinada carga aos motores através do uso de um gerador de energia elétrica e de lâmpadas incandescentes.

3.3.2 Aplicação de Carga aos Motores

No intuito de fixar carga aos motores, foi empregado um gerador elétrico da marca Bambozzi (Figura 3.2), de 10 kVA, com rotação nominal de 1800 rpm, portanto, passível de ser utilizado com o motor supracitado que possuía rotação nominal de 3000 a 3600 rpm. Este gerador serviu como fonte de energia elétrica para um conjunto de lâmpadas ligadas em série, cuja potência requerida foi produzida e transmitida ao gerador pelo trabalho mecânico do motor Diesel.

Assim sendo, 18 lâmpadas de 150 Watts cada uma foram instaladas no conjunto, o que determinou uma carga elétrica de 2700 Watts. Como o motor possuía 6 HP de potência nominal ($1 \text{ HP} = 745,7 \text{ W}$), este foi suficientemente capaz de alimentar as lâmpadas.

Neste trabalho, a intenção foi de que o motor funcionasse com pelo menos 70% de sua potência total, para simulação de operação em torno da faixa ótima de utilização. Essa foi a razão para o emprego de um conjunto de 18 lâmpadas de 150 W.



Figura 3.2 – Gerador a diesel de 10kVA.

A transmissão de potência do motor para o gerador foi feita por um conjunto formado por duas correias e duas polias (Figura 3.3), que foram acopladas em ambos os eixos dos equipamentos.

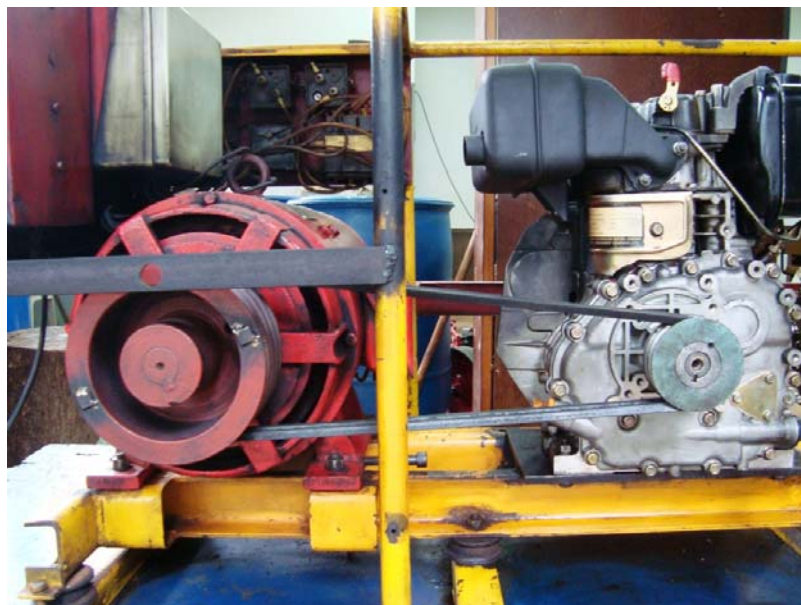


Figura 3.3 – Esquema de funcionamento do conjunto de correias e polia.

3.3.3 Parâmetros Analisados no Funcionamento dos Motores

3.3.3.1 Avaliações Primárias

i) Facilidade ou dificuldade de partida a frio do motor:

Fator relacionado principalmente ao número de cetano (NC) presente no combustível. Combustíveis com elevado NC como, por exemplo, o biodiesel, não retardarão o processo de ignição dos motores (KNOTHE et al., 2006); por outro lado, um baixo NC pode interferir diretamente no ato da partida do motor.

ii) Consumo específico:

O consumo específico dos combustíveis foi determinado através do uso de um sistema constituído de uma pipeta volumétrica, com um volume previamente apurado de 40 ml (Figura 3.4), e também do emprego de um cronômetro digital para determinação do tempo necessário para a combustão dos 40 ml de combustível.



Figura 3.4 – Pipeta volumétrica empregada para medição do consumo.

iii) Temperatura dos gases de escape:

A medição da temperatura dos gases de exaustão do motor foi realizada através do emprego de termopares cromel-alumel do tipo K, instalados na saída da tubulação de escape (Figura 3.5).

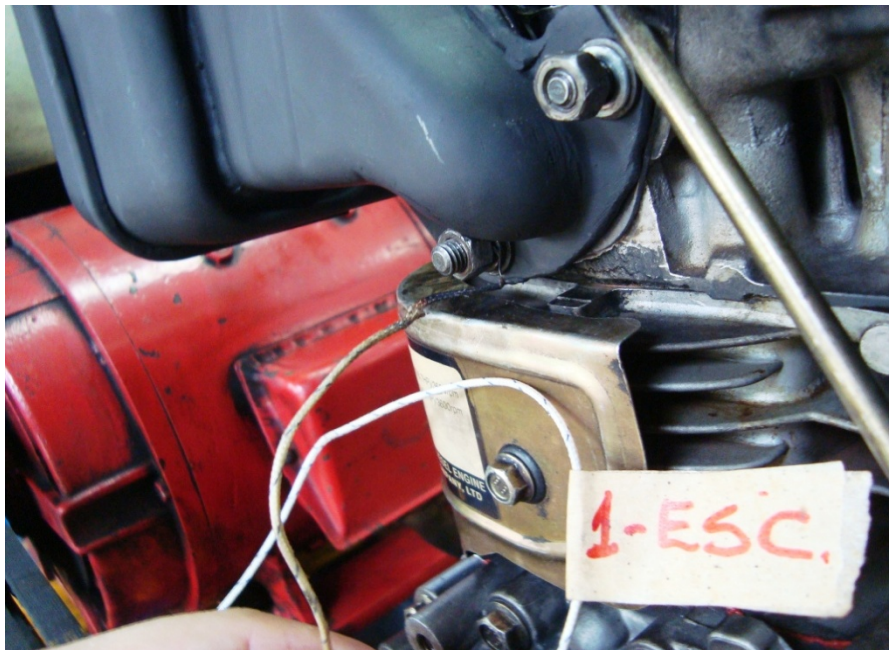


Figura 3.5 – Detalhe do termopar instalado na saída da tubulação de escape.

iv) Temperatura do cabeçote do motor;

Foi aferida com o emprego de termopares cromel-alumel do tipo K, acoplados na região do cabeçote do motor (Figura 3.6).

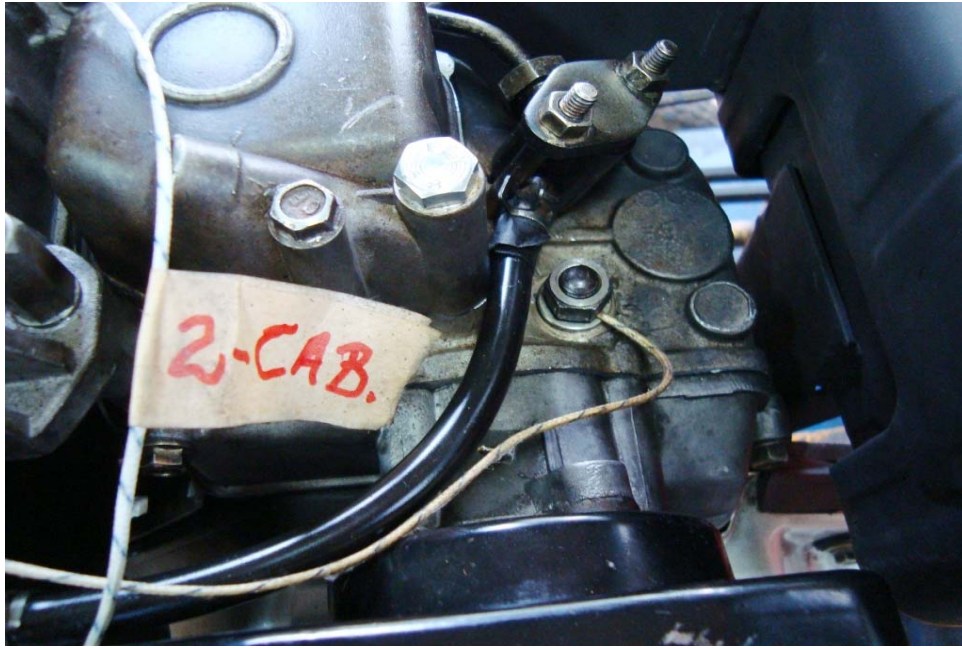


Figura 3.6 – Detalhe do termopar instalado no cabeçote do motor.

Estes termopares foram ligados a uma central digital (Figura 3.7), onde foi possível acompanhar os decréscimos e acréscimos de temperatura durante o funcionamento dos motores.

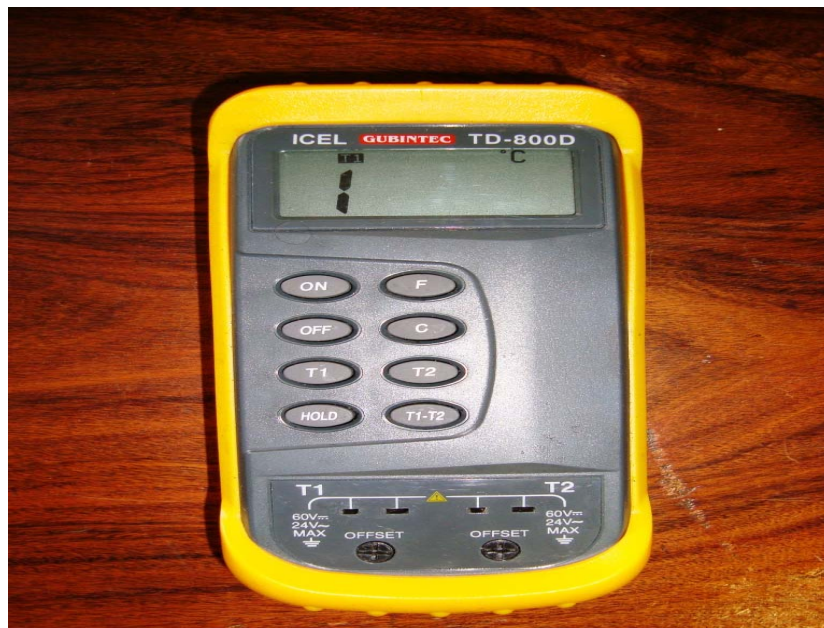


Figura 3.7 – Central digital para aquisição dos dados provenientes dos termopares.

v) Nível de ruído dos motores (WILLIAMS & BADR, 1998);

O nível de ruído é uma medida indireta e qualitativa do combustível utilizado. Altos níveis de ruídos indicam que o número de cetano presente no combustível é baixo, e a eficiência da combustão poderá não ser satisfatória. Em contrapartida, operações suaves e menos ruidosas podem significar funcionamento com combustível de melhor qualidade (maior número de cetano).

Um decibelímetro (Figura 3.8) foi instalado no local onde os motores operaram para verificar o nível de ruído emitido pelos motores durante os testes de longa duração.



Figura 3.8 – Decibelímetro para medição do nível de ruído dos motores.

3.3.3.2. Avaliações secundárias.

i) Teste de durabilidade dos motores;

Este teste foi realizado por meio do funcionamento contínuo dos motores durante um período de 150 horas. Foi conduzido apenas com dois combustíveis já pré-estabelecidos: um dos motores trabalhou sempre com óleo diesel, enquanto o outro funcionou apenas com a mistura ternária composta por 50%

de biodiesel, 40% de etanol e 10% de óleo vegetal, em volume, a qual foi pré-selecionada através das avaliações primárias citadas anteriormente.

No contexto deste teste, três variáveis foram observadas e comparadas:

a) desgaste de componentes do motor, por exemplo, por meio de oxidação e corrosão pela presença do álcool combustível;

b) presença de resíduos no óleo lubrificante, fato que pode levar a um aumento de viscosidade do mesmo, além da presença de substâncias metálicas oriundas dos componentes metálicos do motor;

c) deposição de compostos de carbono (“coking”) em determinadas partes do motor, principalmente na parte superior do pistão (topo), bicos injetores e válvulas.

Durante o teste de durabilidade, uma central de aquisição digital da marca Campbell-INC. media continuamente a rotação de trabalho do gerador de eletricidade, com o que procurou-se verificar a existência de qualquer irregularidade no funcionamento do motor devido ao combustível empregado, pois se decréscimos na rotação do gerador fossem observados, isto significaria a existência de alguma deficiência na queima do combustível.

3.3.4. Seleção das Misturas Ternárias de Biocombustíveis

As misturas ternárias contendo biodiesel, óleo vegetal e etanol, foram preparadas no laboratório de engenharia química da Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP), pelo Professor Doutor Murilo Innocentini e sua equipe; os resultados relacionados à estabilidade líquido-líquido das misturas, bem como a quantidade em massa de cada componente, podem ser vistos na Tabela 3.2.

Dentre todas as misturas estáveis, três delas foram selecionadas para as avaliações primárias do experimento, tendo como base as características físico-químicas estabelecidas pela ANP para o óleo diesel mineral, como, por exemplo, viscosidade, índice de cetano e poder calorífico. Além disso, deu-se preferência para misturas com maior quantidade possível de etanol, visto o menor preço deste combustível oxigenado no mercado interno, objetivando sempre a obtenção de um combustível de menor custo que o diesel convencional.

Assim sendo, as três misturas selecionadas para as avaliações primárias foram as seguintes:

- Mistura 1: 60% de biodiesel, 20% de etanol hidratado e 20% de óleo vegetal refinado (em volume);
- Mistura 2: 60% de biodiesel, 30% de etanol hidratado e 10% de óleo vegetal refinado (em volume);
- Mistura 3: 50% de biodiesel, 40% de etanol hidratado e 10% de óleo vegetal refinado (em volume).

O biodiesel empregado no experimento foi produzido na empresa BIOPAR, localizada em Rolândia-PR, a qual possui certificação da ANP para a produção e comercialização do mesmo. A matéria-prima utilizada na produção desse foi uma mistura de óleo de soja (*Glycine Max L.*) e sebo bovino.

O óleo vegetal que compôs as misturas foi do tipo refinado, também tendo como matéria-prima a soja (*Glycine Max L.*), e sendo proveniente da cooperativa agroindustrial COCAMAR, localizada em Maringá-PR.

O etanol foi fornecido pela Usina Nova América-S.A., produzido a partir da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*), e disposto na sua forma hidratada (7% de água).

Tabela 3.2 – Comparação das amostras com 3 substâncias miscíveis (24° – 26°C).

Resultado (miscibilidade)	% Óleo (massa)	% Etanol (massa)	%Biodiesel (massa)
Sim	10	40	50
Sim	40	10	50
Sim	10	30	60
Sim	20	20	60
Sim	30	10	60
Sim	10	20	70
Sim	20	10	70
Sim	10	10	80

*Misturas empregadas no experimento.

A Figura 3.9 apresenta o diagrama ternário de miscibilidade dos três componentes (biodiesel, etanol e óleo vegetal) realizada na temperatura de 25°C, partindo da concentração de 0% até 100% de cada um dos compostos da mistura.

Sistema tri componente miscível Sistema tri componente não miscível

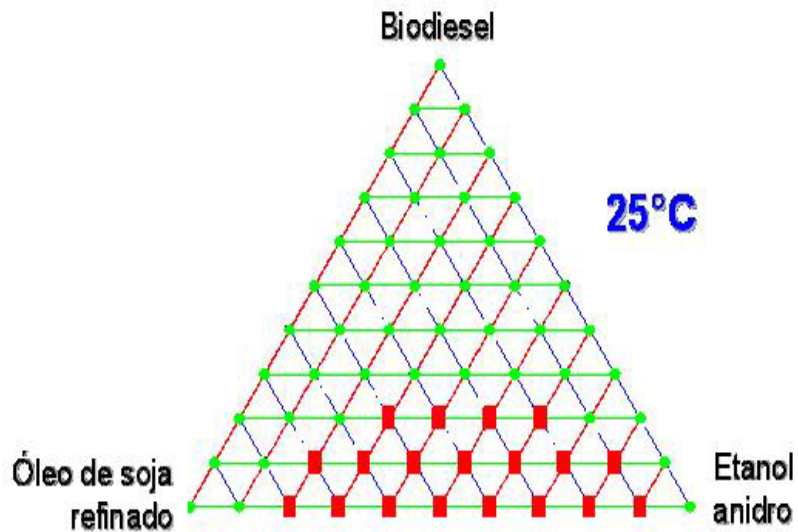


Figura 3.9 – Miscibilidade dos componentes da mistura a 25°C

A Tabela 3.3 abaixo apresenta valores relacionados às propriedades físico-químicas dos combustíveis utilizados nos ensaios, numa temperatura variando de 24°C a 26°C.

Tabela 3.3 – Propriedades físico-químicas dos combustíveis.

	Viscosidade (cSt)	Índice de cetano	Poder Calorífico (kJ/kg)
60 – 20 – 20	4,1	39,9	34.733
60 – 30 – 10	3,0	36,5	35.707
50 – 40 – 10	2,6	31,8	37.032
Óleo diesel*	1,6 – 6,0	47,64	45.000

*Kwanchareon et al., 2007.

É importante lembrar que a determinação dessas três propriedades das misturas ternárias (cetanagem, poder calorífico e viscosidade cinemática), contidas na Tabela 3.3, foram obtidas através de correlações matemáticas e não por testes de laboratórios.

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.4.1 Consumo Específico de Combustível

A Figura 3.10 apresenta os resultados relacionados ao consumo específico dos combustíveis calculado a partir da seguinte equação:

$$\text{Consumo Específico} = \frac{\text{Consumo Mássico}}{\text{Potência}}$$

em que:

consumo específico [$\text{kg.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$]

consumo mássico [kg.h^{-1}]

potência [kW]

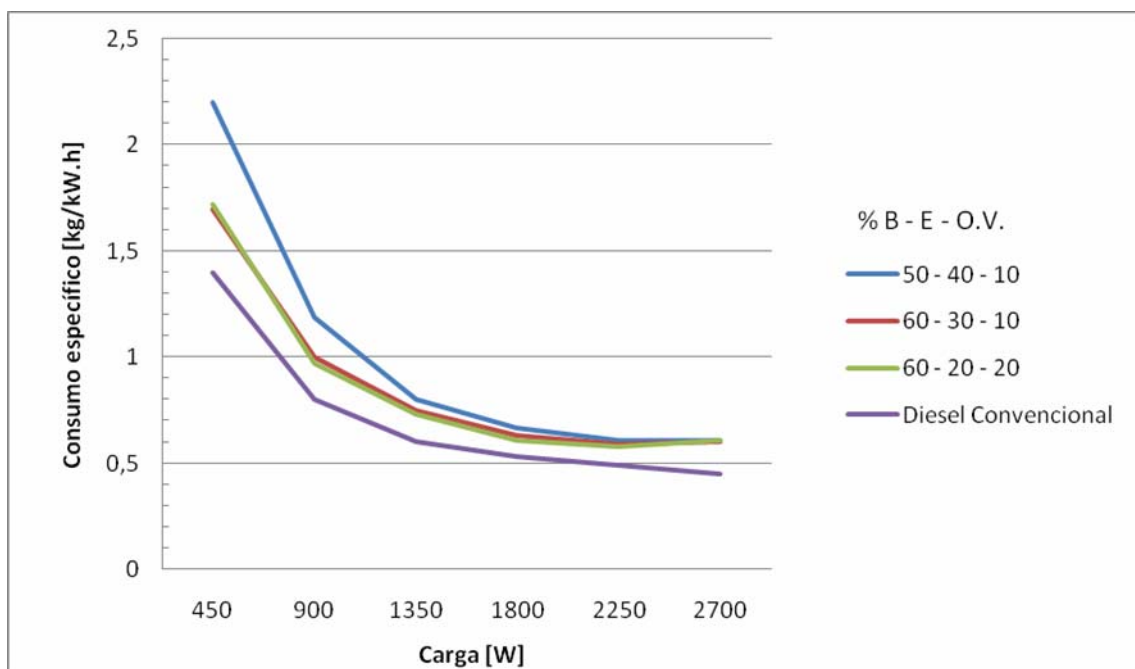


Figura 3.10 – Consumo específico dos combustíveis em função da carga aplicada.

Nota-se que o consumo entre as misturas ternárias foi equivalente quando a carga proporcionada pelo gerador era máxima (2700 Watts), fato explicado pela similaridade do poder calorífico apresentado pelas mesmas. Esta propriedade, segundo Chotwichien et al. (2009), especifica a quantidade de energia contida em determinado combustível; assim sendo, combustíveis com poderes caloríficos semelhantes apresentam consumos específicos semelhantes (KNOTHE et al., 2006).

Na condição de baixa carga, a mistura 50 - 40 - 10 apresentou um consumo superior às demais misturas, provavelmente devido à presença de maior quantidade de etanol na mistura que proporciona um pequeno decréscimo no poder calorífico desta. Contudo, conforme a carga aplicada pelo gerador foi aumentando, o consumo da mistura 50 - 40 - 10 foi equiparando-se àqueles das demais misturas.

A Figura 3.10 mostra, ainda, que o consumo específico de diesel foi inferior, em relação às três misturas, para todas as condições experimentadas; na condição de carga máxima, o consumo de óleo diesel foi 27% inferior às misturas ternárias, evidenciando um resultado já esperado, devido ao maior poder calorífico do combustível fóssil, conforme já apresentado na Tabela 3.3.

Kwanchareon et al. (2007) demonstraram em seus experimentos que o poder calorífico de misturas ternárias, formadas por diesel, biodiesel e etanol, decrescem substancialmente quando grandes volumes de etanol e biodiesel são adicionados, diminuindo, assim, a capacidade do combustível em fornecer energia química para o processo de combustão.

Quanto maior a quantidade de combustíveis oxigenados presentes em uma mistura, mais elevado será o consumo específico, consequência do menor poder calorífico dos oxigenados em comparação ao diesel convencional (CHEN et al., 2008). Esses mesmos autores empregaram em seus ensaios diversas misturas compostas de diesel, biodiesel e etanol em um motor de ciclo Diesel, e obtiveram um aumento oscilando entre 6% a 11% no consumo específico com a utilização dessas misturas ternárias.

Resultados que corroboram o deste trabalho foram obtidos por Cheng et al. (2008) através do emprego de misturas binárias formadas por metanol e biodiesel.

3.4.2 Eficiência térmica

Teoricamente, a injeção de etanol, biodiesel e óleo vegetal na câmara de combustão tenderia a facilitar o processo de queima, devido à existência de oxigênio em cada molécula dos três componentes da mistura, e, principalmente, em razão da molécula do etanol ser menor que as moléculas presentes no óleo diesel. Tudo isso deveria implicar em um aumento da eficiência térmica do motor.

Os valores da eficiência térmica foram obtidos a partir da seguinte equação:

$$\text{Eficiência Térmica} = \frac{\text{Potência}}{\text{Consumo Mássico} * \text{Poder Calorífico}}$$

onde:

eficiência térmica [%];

consumo mássico [$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$];

poder calorífico [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$].

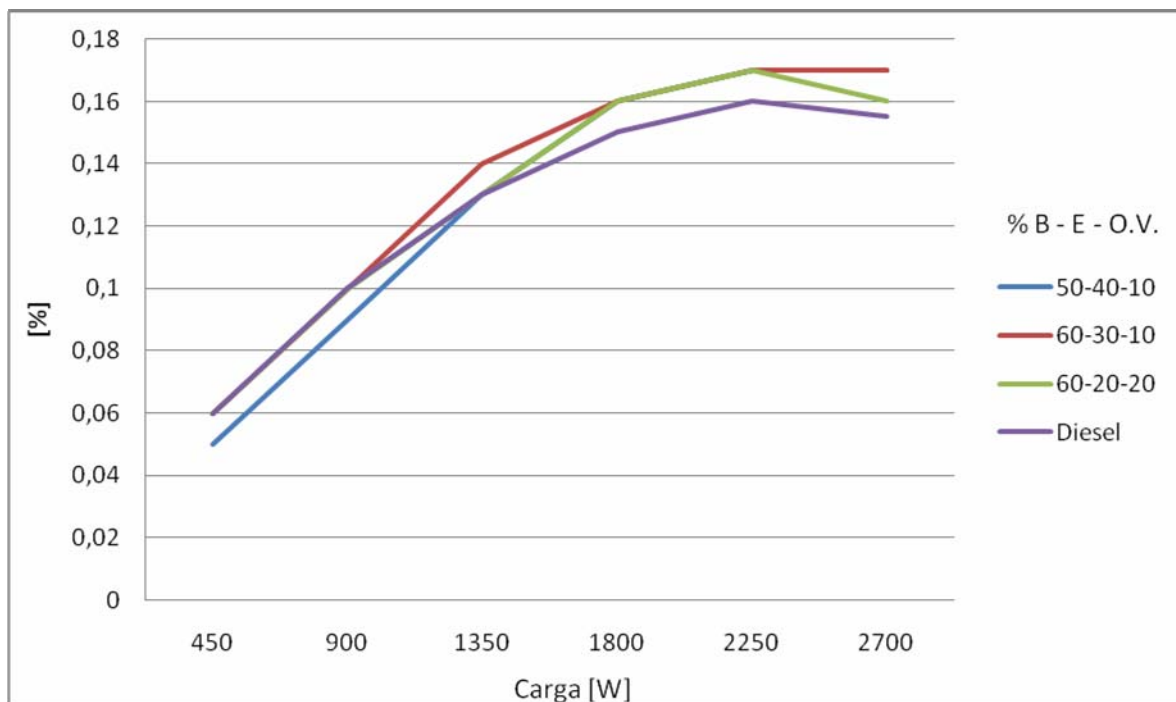


Figura 3.11 – Eficiência térmica dos combustíveis em função da carga aplicada.

Nos ensaios realizados (Figura 3.11), de acordo com o previsto pela teoria, observaram-se ganhos no rendimento térmico do motor quando se utilizaram as misturas ternárias de biocombustíveis, principalmente quando a carga aplicada era a máxima. As misturas 50 – 40 – 10 e 60 – 30 – 10 foram as que apresentaram maior rendimento, cerca de 17%, seguidas pela mistura 60 – 20 – 20, com 16%, e finalmente, o diesel convencional, com 15,5% de eficiência térmica.

Conforme os resultados apresentados obteve-se, 1,5% a mais de rendimento sobre o valor da eficiência térmica do óleo diesel, que foi de 15,5%. Assim sendo, verifica-se um incremento final de rendimento térmico da ordem de 10% com a utilização das misturas 50 – 40 – 10 e 60 – 30 – 10. A literatura demonstra que valores superiores de eficiência térmica podem ser obtidos quando motores de ciclo Diesel são operados com biodiesel, resultados estes, evidenciados pelos trabalhos de Agarwal (2007) e de Kulkarni & Dalai (2006).

A combustão com biodiesel possui maior taxa de queima em relação ao diesel convencional, devido ao fato do biodiesel ser oxigenado, o que proporciona maior eficiência térmica (GERPEN & CHANG, 1997).

Quando etanol é injetado em um motor de ciclo Diesel, ocorre uma melhora no processo de queima, levando a uma maior porcentagem de combustível oxidado durante a combustão, o que permite um incremento no rendimento térmico do motor.

Dessa forma a diferença existente entre os poderes caloríficos dos combustíveis (Tabela 3.3) foi compensada por uma melhor eficiência durante a combustão, devido à presença dos átomos de oxigênio nas moléculas dos componentes das misturas (CHEN et al. 2008).

Resultados semelhantes foram obtidos por Cheng et al. (2008) em que os autores empregaram misturas ternárias contendo diesel, biodiesel e metanol, e conseguiram aumentos no rendimento térmico do motor que variaram de 0,5 até 2% em relação ao óleo diesel convencional, sendo que o menor aumento foi para a emulsão de 10% de metanol com biodiesel e o maior aumento foi para a utilização de 90% de biodiesel com 10% de etanol fumigado.

Outros trabalhos relatavam um ganho de rendimento térmico ao empregar etanol em motores de ciclo Diesel, como se pode verificar nos experimentos realizados por Bermudo & Silvério (1983) e por Goering et al., (1992).

3.4.3 Temperatura dos Gases de Exaustão

Na Figura 3.12, está apresentado o gráfico da temperatura dos gases de escape em função da carga aplicada pelo gerador ao motor. Nota-se pelo gráfico que, em condição de baixas cargas, a mistura com maior teor de etanol (50 – 40 – 10) apresenta temperaturas mais elevadas, contudo, à medida em que se aumenta a carga e, conseqüentemente, uma maior quantidade de combustível é debitada na câmara de combustão, essa mistura renovável e oxigenada fornece a menor temperatura obtida durante os ensaios. Lembrando sempre que temperaturas menores indicam um processo de combustão mais eficiente

Com a carga máxima proporcionada, ou seja, 2700 Watts, a temperatura dos gases de exaustão obtida com o emprego da mistura 50 – 40 – 10 foi de 520°C, 50°C inferior àquela verificada com o óleo diesel, que nessas condições apresentou o valor mais elevado entre todos os combustíveis, 570°C. A segunda menor temperatura obtida foi com a mistura 60 – 20 – 20, com gases de exaustão a 550°C, seguida da mistura 60 – 30 – 10, que atingiu o patamar mais alto entre todas as misturas, 560°C, mas ainda assim, 10°C inferior ao número alcançado pelo diesel convencional.

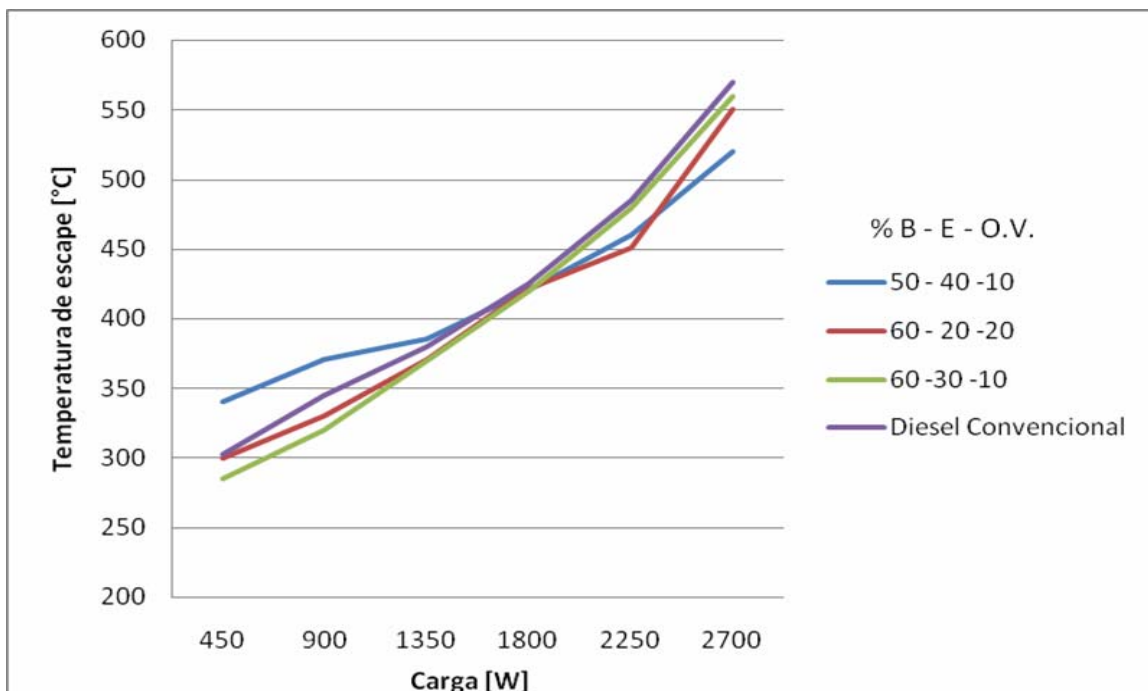


Figura 3.12 – Temperatura dos gases de exaustão em função da carga aplicada.

Tal comportamento pode ser explicado pelo elevado calor latente de vaporização do etanol, que resulta em baixas temperaturas de queima quando se utiliza o mesmo em misturas para motor de ciclo Diesel (KUMAR et al., 2006). Adicionalmente a isto, a curta difusão da combustão, promovida pelo etanol, reduz a queima tardia de combustível na câmara, contribuindo também com essa diminuição de temperatura dos gases de exaustão (AJAV et al., 1998).

Os experimentos realizados por Kumar et al. (2006) apresentaram resultados similares ao deste trabalho. Os mesmos utilizaram uma emulsão formada por gordura animal e etanol, e também verificaram uma diminuição na temperatura de escape em relação ao diesel convencional. Para a condição de carga máxima, a maior temperatura dos gases de escape observada pelos autores foi referente ao óleo diesel, 600°C, e a menor, em torno de 500°C, para as misturas.

Outros resultados reportando reduções na temperatura dos gases de escape devido ao aumento da adição de etanol na mistura, foram ainda obtidos por Chaplin & Janius (1987) e Ajav et al. (1998).

3.4.4 Temperatura do Cabeçote do Motor

A Figura 3.13 apresenta o gráfico referente às temperaturas do cabeçote, do motor, durante seu funcionamento, em função da carga fornecida pelo gerador.

Observa-se que em condições de baixa carga aplicada ao motor, há apenas uma leve diferença entre a temperatura do cabeçote do motor operado com diesel e todas as misturas ternárias, inclusive, o combustível fóssil chega até mesmo a proporcionar uma temperatura de cabeçote inferior à mistura 60 – 30 – 10 e equivalente àquela da mistura 60 – 20 – 20.

Porém, na medida em que se eleva a carga aplicada ao motor, e conseqüentemente há necessidade de maior débito de combustível na câmara de combustão, ocorre uma diminuição das temperaturas do cabeçote no caso do uso das misturas ternárias.

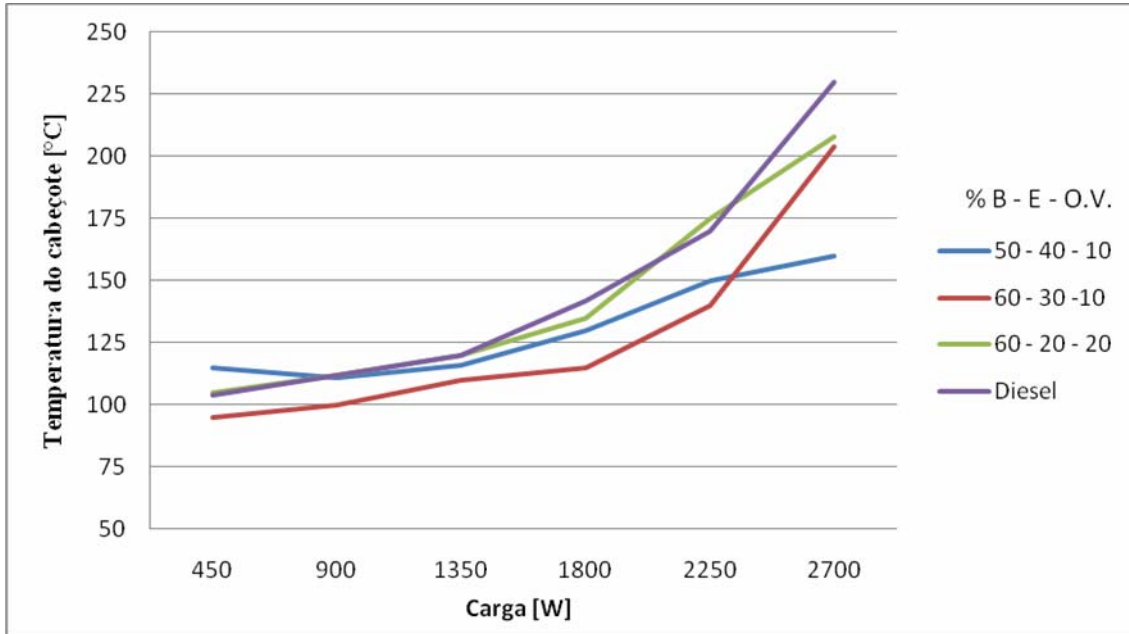


Figura 3.13 – Temperaturas do cabeçote do motor em função da carga aplicada.

À plena carga, o óleo diesel proporcionou a maior temperatura do cabeçote durante o funcionamento, cerca de 230°C, seguido da mistura 60 – 20 – 20 em que o cabeçote encontrava-se a 208°C, e da mistura 60 – 30 – 10, bastante semelhante à mistura anterior, com 204°C. A diferença mais significativa foi em relação à mistura 50 – 40 – 10, com a qual o cabeçote do motor apresentou uma temperatura 70°C inferior à do motor abastecido com óleo diesel, ou seja, 160°C com carga máxima.

Conforme já citado no item anterior, tal comportamento pode ser explicado pelo elevado calor latente de vaporização do etanol, que resulta em baixas temperaturas de queima quando se utiliza o mesmo em misturas para motor de ciclo Diesel, diminuindo, assim, a temperatura do cabeçote durante o funcionamento do motor (KUMAR et al., 2006).

3.4.5. Nível de Ruído

O gráfico evidenciado pela Figura 3.14 refere-se ao nível de ruído, verificado nos motores durante o funcionamento, em função da carga imposta pelo gerador.

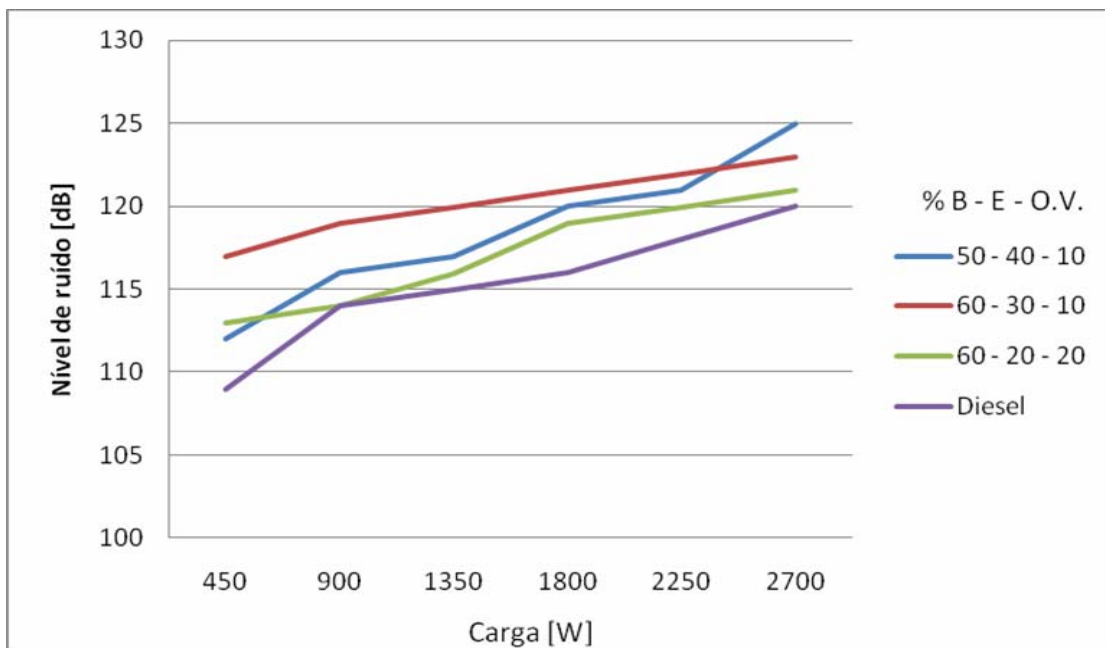


Figura 3.14 – Nível de ruído do motor em função da carga aplicada.

Verifica-se no gráfico que existe uma tendência de aumento no nível de ruído para todos os combustíveis, com o aumento da carga aplicada pelo gerador. Observa-se, ainda, que o nível de ruído do óleo diesel, em qualquer situação de funcionamento, é sempre inferior ao das misturas ternárias. Isto ocorre, provavelmente, como consequência do menor número de cetano das misturas ternárias em relação ao diesel fóssil, conforme apresentado na Tabela 3.3.

À plena carga, o maior nível de ruído obtido foi verificado quando o motor operou com a mistura 50 – 40 – 10, em torno de 125 dB. O menor nível de ruído, nestas mesmas condições, foi observado com o emprego do óleo diesel, cerca de 120 dB.

Entre as misturas, nota-se que à medida em que se eleva a quantidade de etanol, maior é o nível de ruído. Isto pode ser explicado pelo fato de que quanto maior é a porcentagem de etanol presente na mistura, menor será o número de cetano da mesma (KWANCHAREON et al., 2007).

O nível de ruído é uma medida indireta e qualitativa do combustível utilizado. Altos níveis de ruído indicam que o número de cetano presente no combustível é baixo, e a eficiência da combustão poderá não ser satisfatória. Em contrapartida, operações suaves e menos ruidosas podem significar funcionamento com combustível de melhor qualidade, ou seja, com maior número de cetano (WILLIAMS & BADR, 1998).

3.4.6 Teste de Longa de Duração

O teste de durabilidade dos motores foi realizado fixando-se um tempo de 150 horas de funcionamento. Tanto com óleo diesel convencional em um dos motores como com a mistura volumétrica de 50% de biodiesel de óleo de soja, 40% de etanol hidratado e 10% de óleo de soja refinado no outro motor. Os impactos desse teste sobre os motores foram observados através da abertura dos mesmos em uma oficina especializada e autorizada da empresa Toyama. As análises visuais e medições técnicas foram todas realizadas por um técnico mecânico da oficina Maglon da cidade de Londrina, PR, que foi treinado e habilitado pela empresa fabricante do motor.

As figuras que seguem nos próximos subitens foram obtidas durante o processo de desmontagem dos motores, e ilustram a situação de seus componentes que poderiam ter sofrido algum tipo de avaria, seja por desgaste ou por excesso de deposição de material residual do processo de combustão, após o teste de longa duração.

Vale lembrar ainda que o técnico da oficina em nenhum momento foi avisado sobre o tipo de combustível que cada um dos motores desmontados utilizou, evitando, assim, qualquer tipo de conclusão subjetiva durante a análise feita por ele.

3.4.6.1 Conjunto de válvulas

As Figuras 3.15 e 3.16 apresentam o conjunto de válvulas (admissão e escape) dos motores abastecidos com diesel e com a mistura ternária, respectivamente.

A medição feita neste componente é relacionada à folga entre o balancim e as válvulas de admissão e de escape; segundo a empresa Toyama, a folga máxima permitida é de 0,15 mm, medida com uma lâmina metálica padrão, a qual foi utilizada pelo técnico durante o procedimento de abertura dos motores. De acordo com o técnico, ambos os motores apresentaram folgas, contudo, ela foi maior no motor alimentado com óleo diesel do que naquele abastecido com a mistura ternária, conforme apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Medição da folga entre o balancim e as válvulas dos motores.

Tipo de combustível	Folga observada (mm)	Folga máxima permitida (mm)
Diesel convencional	0,35	0,15
Mistura 50 – 40 – 10	0,25	0,15

O fato dos dois motores terem apresentado folgas maiores que aquela especificada deveu-se, provavelmente, ao excesso de trepidação durante o funcionamento, pois tratam-se de motores monocilíndricos, os quais apresentam alta vibração, mesmo estando perfeitamente fixados em um suporte de aço apoiado sobre 6 coxins de borracha.

De acordo com o observado na Tabela 3.4, houve um maior desgaste na região analisada do motor alimentado com óleo diesel, consequência de uma maior carbonização no interior deste motor, pois se notou, durante o experimento, que o filtro de ar do mesmo apresentava constante entupimento, necessitando de limpeza e trocas consecutivas. Isto ocorreu devido à grande emissão de material particulado quando se utilizou o óleo diesel; por outro lado, no motor abastecido com a mistura, ocorreu uma diminuição desse poluente ao se utilizarem combustíveis oxigenados, sendo um deles (etanol), de menor cadeia carbônica (SUPPES, 2000; SHARP, 2000; MUÑOZ, 2004).

As Figuras 3.17 e 3.18 apresentam o tucho de válvula dos motores abastecidos com óleo diesel e com a mistura ternária, nessa ordem. Os dois componentes apresentaram desgastes semelhantes e dentro do esperado para o teste; nota-se, pelas figuras, que existem pequenos riscos horizontais e verticais caracterizando o desgaste. Tal fato aconteceu devido à folga existente, e já citada anteriormente, entre os balancins e as válvulas de ambos os motores.



Figura 3.15 – Válvulas do motor abastecido com diesel.



Figura 3.16 – Válvulas do motor abastecido com a mistura ternária.



Figura 3.17 – Tucho de válvula do motor alimentado com diesel.



Figura 3.18 – Tucho de válvula do motor alimentado com a mistura ternária.

3.4.6.2 Bico Injetor

Os bicos injetores dos motores estão destacados nas Figuras 3.19 e 3.20. De acordo com o técnico, os dois apresentaram uma carbonização considerada normal para o tempo de trabalho ao qual foram submetidos. Contudo, o bico injetor do motor alimentado com a mistura 50 – 40 – 10 estava com um nível de carbonização bem inferior ao do motor abastecido com óleo diesel. O técnico também destacou que em anos de experiência de trabalho com este tipo de motor, nunca havia visto um bico injetor com tão pouca carbonização em um período de funcionamento como o do experimento.



Figura 3.19 – Bico injetor após 150 horas funcionando com óleo diesel.



Figura 3.20 – Bico injetor após 150 horas funcionando como a mistura ternária.

Essa menor carbonização presente no bico injetor do motor abastecido com a mistura 50 – 40 – 10 deve-se à substituição de um combustível de cadeia carbônica longa (óleo diesel), por uma mistura de combustíveis oxigenados contendo etanol, um combustível de cadeia curta, o que, segundo Dietrich & Bindel (1983), proporciona uma combustão mais fácil, implicando em redução no teor de carbono não queimado e diminuição do excesso de combustível não queimado, o que atenua depósitos nos componentes do motor.

Maziero et al. (2007) realizaram um experimento com um motor de ignição por compressão de injeção direta, alimentado com óleo bruto de girassol. O ensaio de longa duração, que previa um funcionamento contínuo de 200 horas, teve de ser interrompido com apenas 60 horas de trabalho. Na desmontagem do motor, foi verificado um grande acúmulo de carvão nos bicos injetores e na cabeça dos pistões, devido ao ineficiente processo de queima do óleo vegetal puro.

Assim sendo, como o óleo vegetal corresponde a 10%, em volume, da mistura ternária utilizada, ao se abrirem os motores, atentou-se para uma possível deposição excessiva de carvão no bico injetor, porém, conforme pode ser visualizado na Figura 3.20, a queima do combustível foi bastante satisfatória, sem a ocorrência de excesso de resíduo no bico injetor.

3.4.6.3 Topo do pistão

Nota-se, claramente, pelas Figuras 3.21 e 3.22, uma grande diferença na presença de resíduos de carbono no topo do pistão, entre a utilização de óleo diesel e o emprego da mistura 50 – 40 – 10. Na Figura 3.21, a coloração da cabeça do pistão é bem mais enegrecida, devido ao acúmulo de carvão proveniente de combustível não queimado, enquanto que na Figura 3.22, a coloração apresentada é bem mais clara, tendendo a cinza, resultado de um melhor processo de queima do combustível.

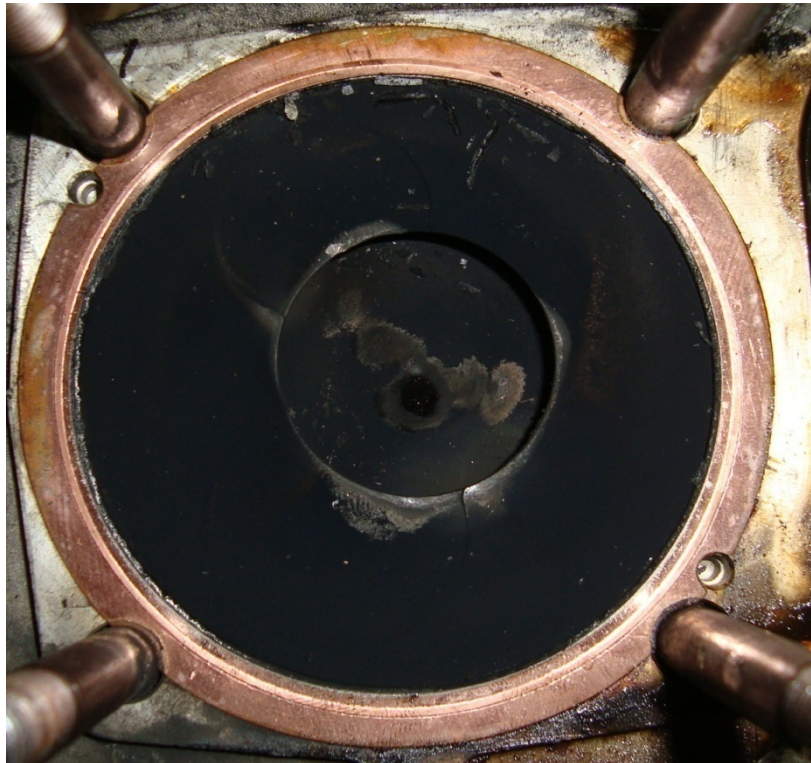


Figura 3.21 – Topo do pistão após 150 horas funcionando com óleo diesel.



Figura 3.22 – Topo do pistão após 150 horas funcionando com a mistura ternária.

Como citado no item anterior, atentou-se para uma possível deposição excessiva de carvão na cabeça do pistão, devido ao fato de Maziero et al. (2007) terem observado intensa carbonização sobre o pistão ao utilizarem óleo vegetal puro em motores ICO. Contudo, conforme pode se observar na Figura 3.22, o topo do pistão do motor abastecido com a mistura ternária, que continha óleo vegetal, não apresentou acúmulo excessivo de carvão, encontrando-se mais limpo que aquele do motor alimentado com diesel convencional.

3.4.6.4 Pistão e camisa

As marcas em forma de riscos lineares observadas nas Figuras 3.23 e 3.25 (motor abastecido com óleo diesel) e 3.24 e 3.26 (motor abastecido com a mistura 50 – 40 – 10) são inerentes ao desgaste natural desses componentes. Tal

como explicado pelo técnico, não houve influência do combustível alternativo que pudesse promover algum tipo de desgaste excessivo.

Medições com o sistema de lâminas metálicas foram realizadas visando observar a folga presente entre o pistão e a camisa (Tabela 3.5), visto que há um limite máximo para essa folga, e um excesso pode causar mau funcionamento do motor (perda de compressão).

Tabela 3.5 – Medição da folga entre o pistão e a camisa dos motores.

Tipo de combustível	Folga observada (mm)	Folga máxima permitida (mm)
Óleo diesel	0,25	0,15
Mistura 50 – 40 – 10	0,20	0,15

Observa-se pelos números apresentados que houve uma maior folga entre o pistão e a camisa no motor alimentado com óleo diesel, devido, provavelmente (conforme relato do item 3.4.6.1), a uma maior carbonização neste motor, pois se notou constante entupido do filtro de ar provocado pelo excesso de material particulado produzido pelo diesel; já o motor abastecido com a mistura ternária demonstrou expressiva melhora na emissão desse poluente, não acarretando em entupimento do filtro de ar.

Além do mais, essa menor carbonização presente no motor abastecido com a mistura 50 – 40 – 10 deve-se também à substituição de um combustível de cadeia carbônica longa (óleo diesel), pelo etanol, um combustível de cadeia curta e que possui oxigênio em sua molécula, o que segundo Dietrich & Bindel (1983), proporciona uma combustão mais fácil, implicando em redução no teor de carbono não oxidado e diminuição do excesso de combustível não queimado que se deposita nos componentes do motor.



Figura 3.23 – Pistão do motor alimentado com óleo diesel



Figura 3.24 – Pistão do motor alimentado com a mistura ternária.



Figura 3.25 – Interior da camisa do motor alimentado com diesel.



Figura 3.26 – Interior da camisa do motor alimentado com a mistura ternária.

Percebeu-se, durante a desmontagem, que o emprego da mistura ternária no motor ocasionou travamento no 1º anel de compressão, porém, com apenas uma leve carbonização, conforme destacado na Figura 3.24. Tal fato ocorreu, provavelmente, durante os testes primários de desempenho, em que o motor foi alimentado, além da mistura 50 – 40 – 10, com as misturas 60 – 30 – 10 e 60 – 20 – 20, as quais apresentavam viscosidade mais elevada, podendo ter conduzido à formação de “coking” em torno do anel de segmento, e consequentemente, ocasionando o seu travamento.

3.4.6 Virabrequim e Comando de Válvulas

Como pode ser observado nas figuras 3.27, 3.28, 3.29 e 3.30, e segundo o parecer técnico, não ocorreu nenhum tipo de desgaste além do esperado, para o tempo do teste de durabilidade, nos virabrequins e nos comandos de válvulas dos motores, independentemente do tipo de combustível utilizado.

Pode-se notar que os componentes presentes nas figuras estão em perfeito estado e sem qualquer desgaste excessivo ou deposição de material.

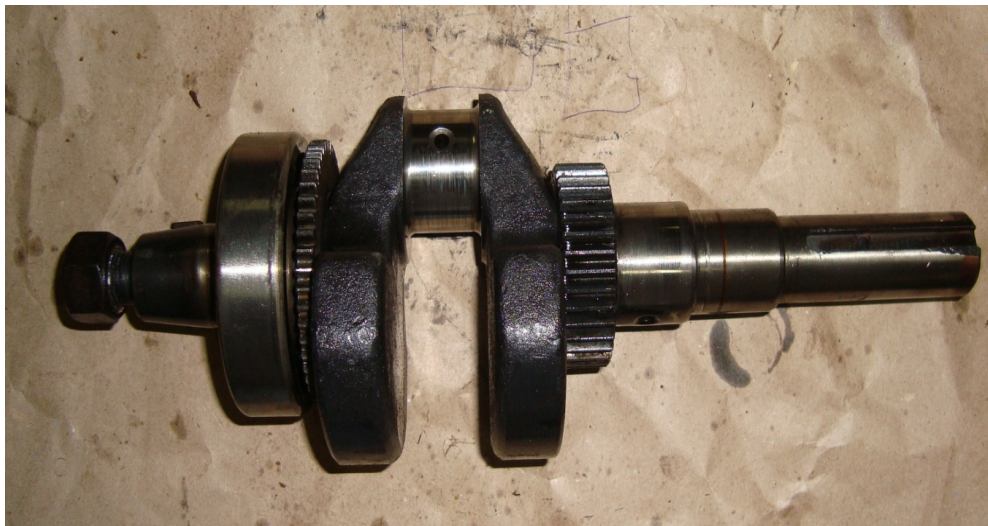


Figura 3.27 – Virabrequim do motor alimentado com óleo diesel.

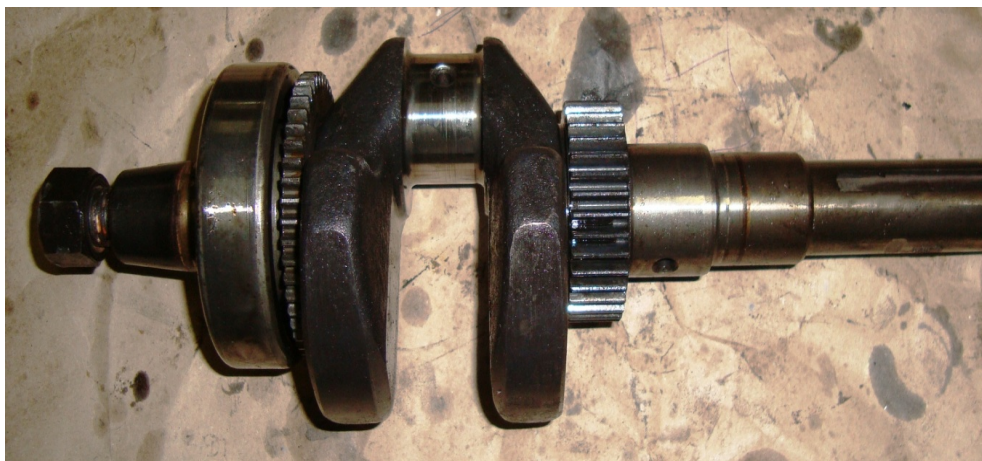


Figura 3.28 – Virabrequim do motor alimentado com a mis



Figura 3.29 – Comando de válvulas do motor alimentado com óleo diesel.

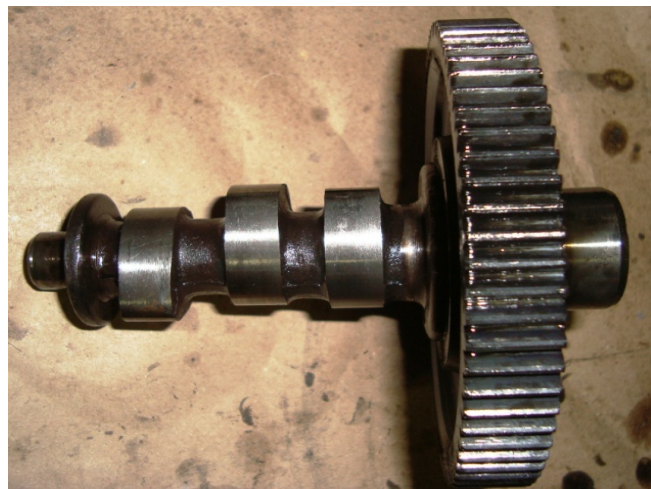


Figura 3.30 – Comando de válvulas do motor alimentado com a mistura ternária.

3.4.6.6 Bronzinas

Nota-se pelas figuras a seguir que, em ambos os motores e independentemente do tipo de combustível empregado, houve um desgaste normal nas bronzinas da porção superior e da porção inferior da biela. Segundo o técnico especializado, para os dois motores desmontados, o ideal é realizar a troca das bronzinas da biela.

Tais desgastes podem ser facilmente visualizados nas Figuras 3.31, 3.32, 3.33 e 3.34, pela presença de ranhuras horizontais nas referidas peças.

Igualmente, foi verificado pelo técnico o estado da bronzina do mancal dos motores, levando-o a constatar que a bronzina do mancal do motor alimentado com óleo diesel deveria ser substituída, enquanto a do motor abastecido com a mistura ternária não necessitou de troca, pois apresentou um desgaste bem menos expressivo.

Infelizmente, não foram feitas fotografias das bronzinas dos mancais devido à impossibilidade de acesso satisfatório para obter uma imagem com boa qualidade.



Figura 3.31 – Bronzina da capa de biela do motor alimentado com óleo diesel.



Figura 3.32 – Bronzina da capa de biela do motor alimentado com a mistura ternária.



Figura 3.33 – Bronzina da biela do motor alimentado com óleo diesel.



Figura 3.34 – Bronzina da biela do motor alimentado com a mistura ternária.

3.4.6.7 Análise do óleo lubrificante

As Tabelas 3.6 e 3.7, a seguir, apresentam os resultados referentes às análises do óleo lubrificante durante 50 e 100 horas de funcionamento contínuo dos motores. Tais testes foram realizados no Laboratório de Fluorescência e Ressonância Paramagnética Eletrônica (LAFLURPE) da Universidade Estadual de Londrina (UEL) e, também, na BIOPAR, nos quais a determinação do Ponto de Fulgor ($^{\circ}\text{C}$) foi conduzida com o emprego do aparelho de vaso fechado Pensky-Martens (ABNT NBR 14598), e a viscosidade cinemática (cSt) foi determinada segundo a norma ABNT NBR 10441, para produtos derivados de petróleo.

Tabela 3.6 – Análise do ponto de fulgor do óleo lubrificante.

Amostras	Ponto de Fulgor (°C) feito pela 1ª vez na UEL	Ponto de Fulgor (°C) feito pela 2ª vez na UEL	Ponto de Fulgor (°C) feito na BIOPAR	Média do Ponto de Fulgor	Desvio Padrão do Ponto de Fulgor
Óleo lubrificante novo	129,6	122,6	124	125,4	3,02
Óleo lubrificante usado por 100 h com a mistura: 10% óleo, 40% etanol, 50% biodiesel	126,6	101,5	120	116,1	10,60
Óleo lubrificante usado por 50 h com a mistura: 10% óleo, 40% etanol, 50% biodiesel	166,5	151,6	148	155,4	8,01
Óleo lubrificante usado por 100 h com Diesel (B4)	159,5	161,6	150	157,03	5,04
Óleo lubrificante usado por 50 h com Diesel (B4)	196,6	196,5	170	187,7	12,51

Foram analisadas cinco amostras de óleo lubrificante, sendo a primeira composta pelo óleo novo, em seguida, o óleo usado por 100 e 50 horas, respectivamente, no motor de ciclo Diesel utilizando a mistura ternária como combustível e, por último, o óleo usado por 100 e 50 horas, respectivamente, no motor de ciclo Diesel usando diesel (B4) como combustível.

Quando foi utilizado o diesel (B4), o ponto de fulgor para o óleo lubrificante foi maior do que quando foi empregada a mistura ternária. Essa diminuição do ponto de fulgor pode ter ocorrido devido à contaminação do óleo lubrificante por frações mais leves de combustível presente na mistura ternária durante o funcionamento do motor.

Tabela 3.7 – Análise da viscosidade do óleo lubrificante.

Amostras	Viscosidade a 40°C (cSt)
Óleo lubrificante novo	125,0
Óleo lubrificante usado por 100 horas com a mistura: 10% óleo, 40% etanol, 50% biodiesel	44,0
Óleo lubrificante usado por 50 horas com a mistura: 10% óleo, 40% etanol, 50% biodiesel	56,6
Óleo lubrificante usado por 100 horas com Diesel	138,5
Óleo lubrificante usado por 50 horas com Diesel	71,0

Nota-se que o valor da viscosidade diminuiu bastante para o óleo lubrificante usado no motor alimentado com a mistura ternária. Isto aconteceu, provavelmente, em função da contaminação do óleo lubrificante pela mistura. Como esta contém 40% de etanol (viscosidade baixa), o óleo lubrificante teve sua viscosidade também diminuída, o que indicou valores inferiores ao do óleo utilizado no motor alimentado com diesel. Assim sendo, admite-se que não houve aumento da viscosidade do óleo lubrificante do motor em função da presença de 10% de óleo vegetal na mistura, visto que, de acordo com Maziero et al. (2007), o óleo vegetal bruto pode elevar excessivamente a viscosidade do óleo do cárter, prejudicando a lubrificação do motor, fato que não foi observado no experimento em questão.

3.4.6.8 – Outras considerações realizadas pelo técnico da oficina

De acordo com o técnico, os rolamentos existentes no contrapeso do motor abastecido com óleo diesel sofreram um desgaste mais significativo do que aqueles do motor alimentado com a mistura ternária; isto ocorreu, provavelmente, pelo excesso de carbonização no interior do motor abastecido com óleo diesel, ocasionando perda da qualidade do lubrificante e maior desgaste nos rolamentos. Assim sendo, a orientação dada por ele foi no sentido da substituição dos rolamentos do contrapeso no motor que funcionou com diesel.

Vale destacar ainda que, as mangueiras e suportes de borracha presentes no interior do tanque de armazenamento de combustível, além da cola existente no filtro de combustível sofreram grande deterioração pela presença do biodiesel e necessitaram de substituição no decorrer do experimento.

Segundo informações fornecidas pelo técnico, os dois motores apresentaram-se dentro dos padrões de normalidade em relação a desgastes e deposições para a duração de tempo do experimento (150 horas), contudo, o motor abastecido com a mistura ternária apresentou melhor estado de conservação de seus componentes, nas condições em que foi realizado esse experimento. Deve ser ressaltado que, somente ao final da desmontagem e análise dos motores e após a conclusão do parecer técnico, o mecânico especializado foi informado sobre o tipo de combustível que cada motor usou.

A fim de elucidar melhor todo o serviço de manutenção necessário aos motores após o teste de durabilidade, foi confeccionada a Tabela 3.8 mostrando os itens que foram avaliados e que necessitaram de substituição.

Tabela 3.8 – Componentes a serem substituídos nos motores após 150 horas.

	Bronzina da biela	Bronzina do mancal	Rolamentos do contrapeso	Rolamentos do comando de válvulas	Filtro de combustível
Motor (óleo diesel)	Substituir	Substituir	Substituir	Não substituir	Não substituir
Motor (mistura ternária)	Substituir	Não substituir	Não substituir	Não substituir	Substituir (2 vezes)

3.4.7 Partida A Frio Do Motor Abastecido Com A Mistura Ternária

Uma das características analisadas durante a experimentação foi em relação a capacidade de partida a frio da mistura ternária durante o teste de durabilidade. Esta característica está relacionada diretamente com o número de cetano do combustível, o qual quantifica a habilidade de um combustível para entrar em combustão em um motor por ignição a compressão, ou seja, retrata a qualidade de ignição do combustível (KNOTHE, 1997).

Os resultados obtidos por Santos (1986) apontaram para um número de cetano de, no mínimo 25, para proporcionar um bom funcionamento de motores de ignição por compressão. Este dado foi tomado como referência neste experimento, onde todas as misturas empregadas nos testes possuíam índice de cetano maior do que 25, conforme apresentado na Tabela 3.3.

Anteriormente, Maleev (1945) verificou em seus testes com motores de ciclo Diesel que os valores de número de cetano entre 25 a 33 eram satisfatórios para a operação em baixa velocidade.

Durante todos os testes com as misturas ternárias (60 – 20 – 20, 60 – 30 – 10 e 50 – 40 – 10), o motor funcionou de maneira totalmente satisfatória, ou seja, sem variações na rotação, a qual era medida pela central digital de aquisição, fornecendo sempre a energia requerida pelo gerador para funcionamento das lâmpadas incandescentes. Todavia, o único problema observado durante o teste de durabilidade foi relacionado à partida a frio do motor.

O teste de durabilidade foi realizado no mês de julho, quando as temperaturas em Londrina-PR, às oito horas da manhã, encontravam-se aproximadamente a 10°C, dificultando a partida do motor.

Como forma de solucionar este problema, uma seringa de 5 ml foi utilizada para realizar uma injeção manual de biodiesel puro (alto índice de cetano) ou do próprio óleo diesel no coletor de admissão do motor. Este pequeno volume (5 ml) foi suficiente para possibilitar a partida a frio do motor durante todos os dias do teste de durabilidade.

3.5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados experimentais obtidos através do emprego das misturas ternárias de biocombustíveis em um motor de ciclo Diesel, pôde-se observar que:

I – O consumo de combustível referente a todas as misturas ternárias testadas foi superior ao do óleo diesel de petróleo, contudo o motor abastecido com as misturas obteve uma eficiência térmica maior, sendo as mistura

50 – 40 – 10 e 60 – 30 – 10 as que apresentaram melhor rendimento (17%), quando a carga aplicada foi máxima.

II – A temperatura dos gases de exaustão do motor alimentado com óleo diesel foi mais elevada do que a temperatura dos gases de escape do motor abastecido com as misturas ternárias. A mistura que continha a maior porcentagem de etanol em sua composição, 50 – 40 – 10, foi a que proporcionou a menor temperatura (520°C) em carga máxima.

III – Do mesmo modo, a temperatura do cabeçote do motor em que foi empregado o óleo diesel foi superior àquelas medidas no motor em que se utilizaram as misturas ternárias, sendo que a mistura 50 – 40 – 10 forneceu a temperatura do cabeçote mais baixa (160°C) dentre as misturas quando a carga aplicada foi máxima.

IV – Em regime de plena carga, o maior nível de ruído ocorreu quando o motor operou com a mistura 50 – 40 – 10, valor de 125 dB . E o menor nível de ruído obtido nestas condições foi através do emprego do óleo diesel, em que foi verificado 120 dB.

V – Quanto ao teste de durabilidade, observou-se que a mistura ternária 50 – 40 – 10 não causou dano aparente a nenhum componente do motor, mostrando um melhor comportamento quanto à deposição de resíduos de carbono no bico injetor e no topo do pistão.

4 ARTIGO B: EMISSÃO DE MATERIAL PARTICULADO POR MISTURAS TERNÁRIAS COMPOSTAS DE BIODIESEL, ETANOL E ÓLEO VEGETAL: UMA COMPARAÇÃO COM O ÓLEO DIESEL CONVENCIONAL.

4.1 RESUMO E ABSTRACT

Resumo

O objetivo deste estudo foi quantificar a emissão de material particulado de misturas ternárias compostas de biodiesel, etanol, e óleo vegetal em um motor de ciclo Diesel, tendo como testemunha um motor idêntico funcionando com diesel de petróleo. Para a comparação da emissão dos dois combustíveis, foi realizada a coleta de material particulado proveniente dos escapamentos dos motores através do uso de um filtro circular, confeccionado a partir de fibra de vidro. Os resultados obtidos com a utilização das misturas ternárias de biocombustíveis indicaram uma redução expressiva no nível de material particulado emitido pelo motor em sua carga máxima. Pode-se concluir que, a utilização das misturas ternárias, nas condições e métodos de realização do experimento, foi eficiente na redução de emissão de material particulado presente nos gases de exaustão do motor de ciclo Diesel.

Palavras-chave: Biocombustíveis. Motor de Ciclo Diesel. Emissões.

Abstract

The purpose of this study was to quantify the particulate matter emission from ternary blends comprehending ethanol, biodiesel and vegetable oil in a Diesel cycle engine, and an identical engine working with petrol diesel as a witness. To compare the fuels' emissions, the particulate matter from the engine's exhaust was collected, using a circular filter paper maked from fiber glass. The results achieved utilizing ternary blends showed expressive reduction of particulate matter level exhausted by the engine, in its maximum load. We can conclude with this work that the utilization of ternary blends, with the methods and conditions of this experiment, was efficient to reduce the particulate emission from exhausted gas of Diesel cycle engine.

Key words: Bioifuels. Diesel Cycle Engine. Emissions.

4.2 INTRODUÇÃO

Os compostos de emissão, tanto dos motores a diesel quanto a gasolina ou combustíveis mistos, podem ser classificados em dois tipos: os que não causam danos à saúde, ou seja, O_2 , CO_2 , H_2O e N_2 ; e os que apresentam perigos à saúde, sendo esses subdivididos em compostos cuja emissão está regulamentada, que são: monóxido de carbono (CO), os hidrocarbonetos (HC), os óxidos de nitrogênio (NO_x), os óxidos de enxofre (SO_x) e material particulado (MP); e aqueles que ainda não estão sob regulamentação: aldeídos, amônia, benzeno, cianetos, tolueno e hidrocarbonetos aromáticos polinucleares (HPA) (NEEFT et al., 1996).

O material particulado produzido por uma máquina diesel consiste, basicamente, de aglomerados de núcleos de carbono, e de hidrocarbonetos, SO_3 ou ácido sulfúrico, e água, adsorvidos ou condensados sobre esses núcleos carbônicos (NEEFT et al., 1996; LAHAYE & EHRBURGER-DOLLE, 1994).

A composição mássica média do material particulado é de 70% em massa de carbono, 20% de oxigênio, 3% de enxofre, 1,5% de hidrogênio, menos que 1% de nitrogênio e, aproximadamente, 1% de elemento traços. (NEEFT et al. 1996).

O MP é o poluente atmosférico mais consistentemente associado a efeitos adversos à saúde humana. Sua toxicidade depende basicamente de sua composição e diâmetro aerodinâmico. Diversos estudos têm relacionado a exposição contínua aos níveis ambientais de material particulado com a redução da expectativa de vida (LIPFERT, 1984; DOCKERY & POPE, 1994; ABBEY, 1999).

Os efeitos crônicos também têm sido demonstrados a partir da detecção de alterações estruturais dos pulmões de indivíduos que habitam regiões com elevadas concentrações de MP. A primeira demonstração clara de que os elevados níveis desse poluente promovem alterações inflamatórias difusas do trato respiratório em humanos veio de estudos de Souza et al. (1998), nos quais foram detectados hiperplasia muco-secretora, remodelamento com fibrose das pequenas vias aéreas e lesão da região centro acinar de jovens falecidos por causas externas na região metropolitana de São Paulo. Neste mesmo estudo, as lesões observadas estavam em íntima relação anatômica com focos de deposição e retenção de material carbonáceo (antracose), sugerindo uma relação de causa e efeito

Etanol, óleo vegetal e biodiesel são todos derivados da biomassa e, ao contrário do petróleo, são combustíveis renováveis. Entre estes combustíveis, o álcool etílico hidratado combustível (AEHC) se apresenta como um interessante combustível alternativo ao óleo diesel para reduzir as emissões de poluentes. Isso porque o etanol contém oxigênio na sua molécula, e é um combustível extremamente volátil. Essas características são geralmente favoráveis para uma boa combustão (PÉREZ et al., 2006).

O uso de etanol como combustível é defendido em função da redução nas emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa ao substituir os combustíveis fósseis. Macedo (2008) analisou o balanço energético de energia fóssil consumida na produção e processamento da cana-de-açúcar, comparativamente à energia proporcionada pelo uso do etanol, e à energia gerada pelo bagaço da cana. A relação entre a energia renovável produzida e a energia fóssil consumida na produção de etanol é de 8,3 a 10,2, isto é, a cada unidade de energia fóssil gasta no ciclo de produção do etanol, são obtidas entre 8,3 a 10,2 unidades de energia renovável.

Segundo Mma & Lima (2002), o etanol praticamente não possui enxofre em sua composição, logo o seu uso não contribui para a emissão de SO_x, além do que a sua menor complexidade molecular possibilita uma combustão com baixíssima formação de partículas de carbono, o que resulta em uma emissão desprezível de MP.

Outro fator de estímulo ao mercado de álcool é a possibilidade de adição de etanol ao diesel: testes demonstraram que a utilização de mistura de 3% de etanol com 97% de diesel pode ser adotada em qualquer motor sem ocasionar problemas, reduzindo as emissões de material particulado e de outros poluentes (HE et al, 1994; GELLER et al, 2004;).

No Brasil, estudos com a mistura álcool/diesel vêm sendo realizados desde 1984, quando foi verificada determinadas porcentagens de óleo diesel com álcool anidro eram viáveis, pois não causavam perda de eficiência do motor ou aumento do consumo de combustível, e geravam redução na emissão de particulados. Desta maneira, trabalhos de pesquisa e testes de campo têm sido realizados para implantação de um programa de adição de etanol à matriz energética do diesel. (ECONOMY & ENERGY, 2001).

Um pouco mais recente que o etanol, o biodiesel também encontra seu espaço e apresenta crescimento acelerado no mercado nacional de biocombustíveis líquidos. Porém, ao contrário do etanol, que encontrou na cana-de-açúcar sua matéria-prima ideal, o biodiesel ainda está em estágio de intensa pesquisa e desenvolvimento (PNA, 2005). Entretanto, diversos são os trabalhos que apontam vantagem ambiental a favor do biodiesel em relação ao diesel convencional, fato que o coloca na linha de frente dos sucedâneos ao petrodiesel.

Muñoz et al. (2004) testaram misturas de éster metílico de girassol e diesel (B25, B50, B75 e B100) em um motor Diesel automotivo para determinação dos níveis de emissão de poluentes. Nos testes realizados, a emissão de hidrocarbonetos com as misturas de biodiesel foi menor em relação ao diesel somente em algumas condições de operação, especialmente em cargas baixas. A concentração de NO_x com biodiesel puro, entretanto, foi sempre maior do que com o diesel. Contudo, a redução do grau de enegrecimento e da emissão específica de material particulado medido são representativas e favoráveis ao uso do biodiesel, o que, em parte, é explicado pela ausência de enxofre no biodiesel. O enxofre compartilha o oxigênio disponível na fase tardia da combustão com o carbono resultante da queima parcial, em algumas condições de funcionamento do motor, aumentando a produção de material particulado.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi quantificar a emissão de material particulado de misturas ternárias compostas de etanol, biodiesel e óleo vegetal em um motor de ciclo Diesel, tendo como testemunha um motor idêntico funcionando com diesel convencional.

4.3 MATERIAL E MÉTODOS

Os testes envolvendo misturas de combustíveis alternativos foram realizados no laboratório de Engenharia Agrícola do Centro Nacional de Pesquisa de Soja (Embrapa Soja), em Londrina - PR, onde estão alocados os motores estacionários e o gerador de eletricidade empregados na experimentação.

Foram utilizados para os testes dois motores estacionários, de ciclo Diesel a 4 tempos, da marca Toyama, modelo 70f, arrefecidos a ar, com injeção

direta e 6 hp de potência nominal, sendo que um deles foi abastecido somente com óleo diesel e o outro com as misturas ternárias contendo óleo vegetal/biodiesel/etanol. Dessa forma, cada motor pôde ser avaliado individualmente de acordo com o combustível utilizado. Foi empregado também, para imprimir carga aos motores, um gerador elétrico da marca Bambozzi, de 10 kVA, com rotação nominal de 1.800 rpm, portanto, passível de ser utilizado com o motor supracitado que possui rotação nominal de 3.000 a 3.600 rpm.

A transmissão de energia mecânica do motor Diesel para o gerador foi realizada por correias e um conjunto de polias acopladas em ambos eixos dos equipamentos.

4.3.1 Seleção das Misturas Ternárias de Combustíveis

Dentre todas as misturas estáveis, três delas foram selecionadas para as avaliações primárias do experimento, tendo como base as características físico-químicas estabelecidas pela ANP para o óleo diesel mineral, como, por exemplo, viscosidade, índice de cetano e poder calorífico (Tabela 4.1). Além disso, deu-se preferência para misturas com maior quantidade possível de etanol, visto o menor preço deste combustível oxigenado no mercado interno, objetivando sempre a obtenção de um combustível de menor custo que o diesel convencional.

Assim sendo, as três misturas selecionadas para as avaliações primárias foram as seguintes:

- Mistura 1: 60% de biodiesel, 20% de etanol hidratado e 20% de óleo vegetal refinado (em volume);
- Mistura 2: 60% de biodiesel, 30% de etanol hidratado e 10% de óleo vegetal refinado (em volume);
- Mistura 3: 50% de biodiesel, 40% de etanol hidratado e 10% de óleo vegetal refinado (em volume).

O biodiesel empregado no experimento foi produzido na empresa BIOPAR, localizada em Rolândia-PR, a qual possui certificação da ANP para a produção e comercialização do mesmo. A matéria-prima utilizada na produção desse foi uma mistura de óleo de soja (*Glycine Max L.*) e sebo bovino.

O óleo vegetal que compôs as misturas foi do tipo refinado, também tendo como matéria-prima a soja (*Glycine Max L.*), e sendo proveniente da cooperativa agroindustrial COCAMAR, localizada em Maringá-PR.

O etanol era proveniente da Usina Nova América-S.A., produzido a partir da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*), e disposto na sua forma hidratada (7% de água).

Tabela 4.1 – Comparação das amostras com 3 substâncias miscíveis (24° – 26°C).

Resultado (miscibilidade)	% Óleo (massa)	% Etanol (massa)	% Biodiesel (massa)	composição (O-A-B)
Sim	10	40	50	10:40:50*
Sim	40	10	50	40:10:50
Sim	10	30	60	10:30:60*
Sim	20	20	60	20:20:60*
Sim	30	10	60	30:10:60
Sim	10	20	70	10:20:70
Sim	20	10	70	20:10:70
Sim	10	10	80	10:10:80

*Misturas empregadas no experimento

A Tabela 4.2 abaixo apresenta dados relacionados às propriedades físico-químicas dos combustíveis utilizados nos ensaios, numa temperatura variando de 24°C a 26°C.

Tabela 4.2 – Propriedades físico-químicas dos combustíveis.

	Viscosidade (cSt)	Índice de cetano	Poder Calorífico (kJ/kg)
60 – 20 - 20	4,1	39,9	34.733
60 – 30 – 10	3,0	36,5	35.707
50 – 40 – 10	2,6	31,8	37.032
Óleo diesel*	1,6 – 6,0	47,64	45.000

*Kwanchareon et al., 2006.

É importante lembrar que a determinação das três propriedades das misturas ternárias (cetanagem, poder calorífico e viscosidade cinemática), contidas na Tabela 4.2, foram obtidas através de correlações matemáticas e não por testes experimentais.

4.3.2 Análise dos Gases de Exaustão

Foi realizada a coleta de material particulado (MP) proveniente dos escapamentos dos motores através do uso de um filtro circular, com diâmetro de 5 cm, confeccionado a partir de fibra de vidro (Figura 4.1), material este, adquirido da empresa Energética-Qualidade do Ar - RJ, especializada em materiais para análises desse tipo.

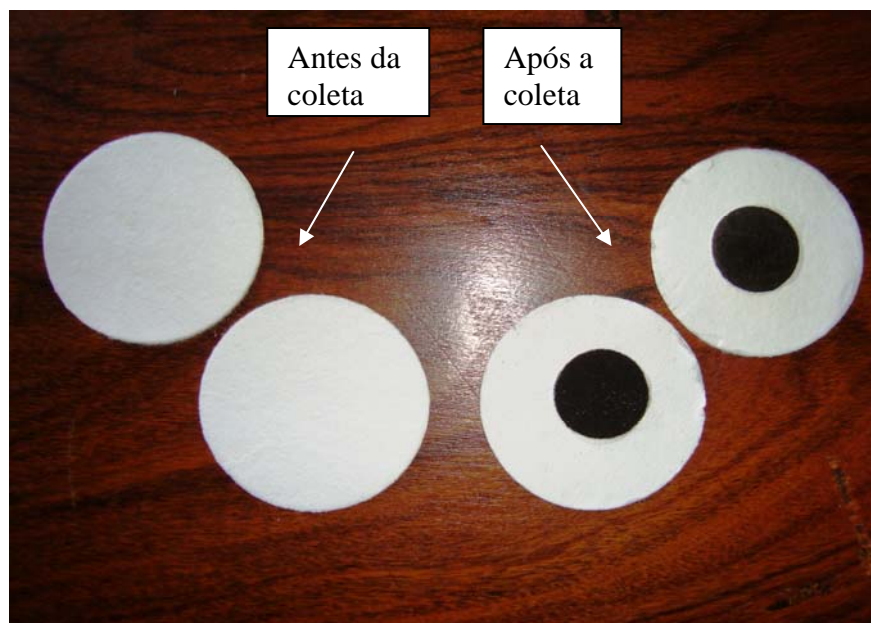


Figura 4.1 – Filtro de fibra de vidro empregado na coleta do MP.

Esses filtros foram secados previamente em estufa a 105°C para eliminação da umidade existente. Após a secagem, os filtros foram pesados em balança digital de precisão para finalmente serem instalados na extremidade final da tubulação de escape, onde permaneceram por 2, 5, 8 e 10 minutos, com a finalidade de reterem o material particulado exaurido pelo motor. Essa fixação ocorreu por meio de um suporte de aço (flange) que foi ali adaptado para tal finalidade (Figuras 4.2 e 4.3).

Para a determinação do tempo ideal para coleta, foram realizados testes de retenção variados, com os quais se notou uma diferença expressiva na quantidade de MP coletado nos filtros expostos por 2 e 5 minutos, com resultados

mais significativos no maior tempo de exposição. Já com 8 e 10 minutos de exposição, não se verificou diferença entre o material retido nos mesmos e no filtro exposto por 5 minutos; assim sendo, adotou-se, para os testes, o tempo padrão de 5 minutos de permanência.

Após os 5 minutos de coleta do material, os papéis-filtro foram novamente secados e, em seguida, levados para a balança de precisão, onde foi aferida a quantidade, em massa, de particulados expelidos pelos motores.



Figura 4.2 – Tubulação de aço acoplada ao escapamento para coleta de MP.

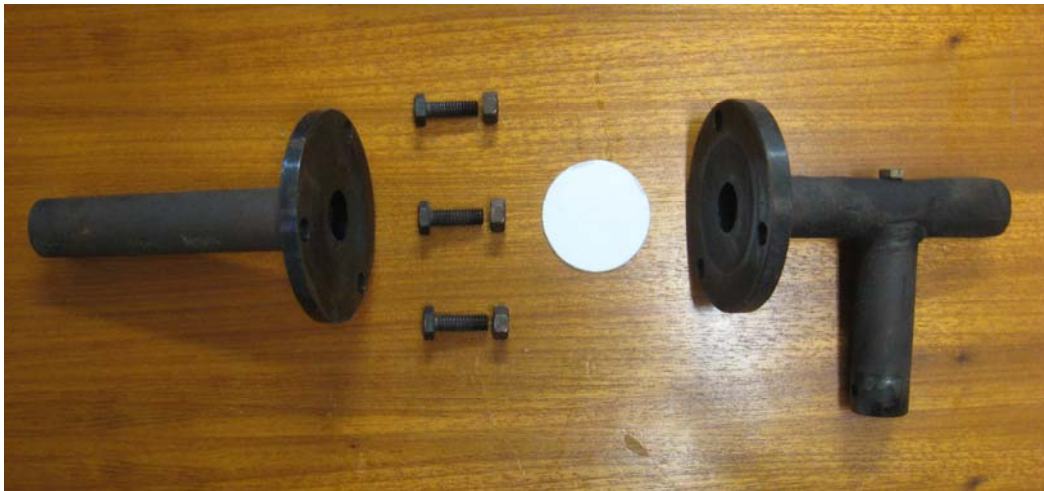


Figura 4.3 – Detalhe do local onde foi inserido o filtro para coleta do MP.

4.4 Resultados e Discussão

Os resultados obtidos com a utilização das misturas ternárias de biocombustíveis indicaram uma redução expressiva no nível de material particulado emitido pelo motor em sua carga máxima, comportamento este proveniente da substituição de um combustível de cadeia carbônica longa (óleo diesel), em média 13 carbonos, e alto ponto de ebulição (de 190° a 330°C), por uma mistura de combustíveis contendo etanol, de cadeia mais simples e menor temperatura de ebulição.

Os valores obtidos no experimento estão apresentados na Figura 4.4, na forma de massa específica do material retido, num intervalo de 5 minutos de coleta, utilizando filtro de fibra de vidro.

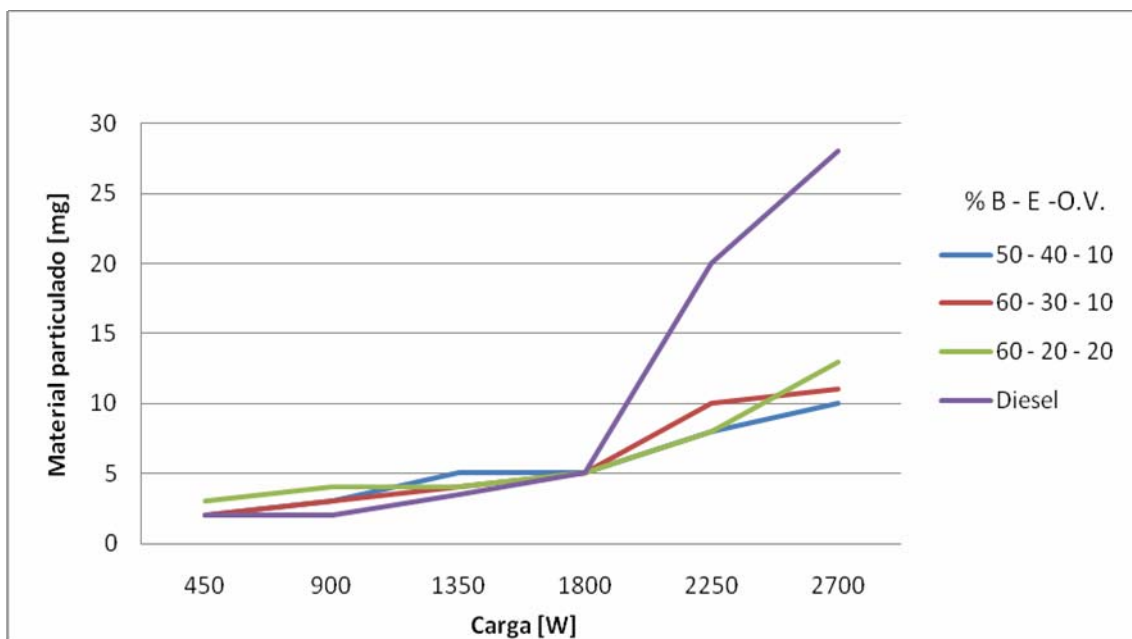


Figura 4.4 – Emissão de MP, durante 5 minutos, de coleta em função da carga aplicada.

Nota-se pelo gráfico que, quando a carga demandada pelo gerador não ultrapassa 1800 watts, a emissão de MP entre os combustíveis é semelhante, porém na medida em que se eleva a carga até 2700 watts, em que maior volume de combustível é pulverizado na câmara de combustão, a quantidade de MP emitido pelo diesel é bastante superior a todas as misturas, sendo 28 mg para o diesel, enquanto as misturas ternárias variam de 10 a 13 mg para a carga máxima.

Observa-se, também, que o aumento de etanol na mistura ternária favorece a queda na emissão de MP, fato que, segundo Dietrich & Bindel (1983), se explica pela capacidade do etanol em proporcionar uma combustão mais completa, implicando em redução no teor de carbono não queimado, corroborando os resultados encontrados no experimento.

Tem sido amplamente apresentado na literatura ao adicionar etanol ao diesel, o principal benefício é a redução de fuligem e material particulado, seguido pela diminuição de CO. Ajav et al. (1999) mostraram que ao incrementar a porcentagem de etanol na mistura com diesel, as emissões de MP foram reduzidas. Suppes (2000) analisou os resultados experimentais de diferentes autores concluindo que se pode falar efetivamente de redução do material particulado quando se adiciona etanol ao diesel. A redução dos particulados também é destacada na ampla revisão bibliográfica feita por Hansen et al. (2005).

Outro composto presente na mistura, que também foi responsável pela queda na emissão de particulados, é o biodiesel.

O enxofre compartilha o oxigênio disponível na fase tardia da combustão com o carbono resultante da queima parcial, em algumas condições de funcionamento do motor, aumentando a produção de material particulado (MUÑOZ et al. 2004; SHARP et al., 2000).

Diversos autores têm demonstrado a eficiência do biodiesel na redução dos particulados totais do motor. Misturas de biodiesel de girassol/diesel foram utilizadas por Muñoz et al. (2004), para determinação dos níveis de emissão de poluentes, e os autores observaram redução bastante representativa na emissão específica de MP (algo favorável ao uso do biodiesel), o que, em parte, foi explicado pela ausência de enxofre no biocombustível.

4.5 CONCLUSÕES

Conforme os resultados obtidos através do emprego das misturas ternárias de biocombustíveis, pôde-se observar que:

A utilização das misturas ternárias, nas condições e métodos de realização desse experimento, foi eficiente na redução de emissão de material particulado presente nos gases de exaustão do motor de ciclo Diesel. O óleo diesel foi o combustível responsável pela maior quantidade de MP emitido, enquanto a mistura 50 – 40 – 10 lançou o menor teor de MP para a atmosfera.

5 CONCLUSÕES GERAIS

Assim sendo, de acordo com as considerações feitas nos dois artigos descritos, conclui-se que as misturas ternárias de biocombustíveis podem perfeitamente ser empregadas em motores de ciclo Diesel, substituindo totalmente o óleo diesel convencional, sem causar perda na eficiência do motor, aumento na emissão de particulados, ou danos nos componentes internos do mesmo.

REFERÊNCIAS

ABBEY, D. E.; NISHINO, N.; MCDONNELL, W. F.; BURCHETTE, R. J.; KNUTSEN, S. F.; BEESON, W. L.; YANG, J. X. Long-term inhalable particles and other air pollutants related to mortality in nonsmokers. **American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine** 159, n. 373-382, 1999.

AGARWAL, A. K. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. **Progress Energy Combustion Science**. n. 33, p. 233-271, 2007.

AGENCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, disponível em <<http://www.anp.gov.br> > acesso em: 19 maio 2008, 2004.

AJAV, E. A.; SINGH, B.; BHATTACHARYA, T. K. Performance of a stationary diesel engine using vapourized ethanol as supplementary fuel. **Biomass and Bioenergy**, v. 15, n. 6, p. 493-502, 1998.

AJAV, E. A.; SINGH, B.; BHATTACHARYA, T. K. Experimental study of some performance parameters of a constant speed stationary diesel engine using ethanol-diesel blends as fuel. **Biomass and Bioenergy**, n. 17, p. 357-365, 1999.

AJAV, E.A., AKINGBEHIN, O.A. **A study of some fuel properties of local ethanol blended with diesel fuel**. Ibadan, Nigeria: Department of Agricultural Engineering, University of Ibadan, 2002.

ALTIN, R.; CETINKAYA, S.; YUCESU, H.S. The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel. **Energy Conversion and Management**. v.42, p. 529-538, 2001.

BERMUDO, A.; SILVÉRIO, J. A. Misturas Binárias diesel – etanol. Simpósio de engenharia automotiva, 1. **Anais...**I Simpósio de Engenharia Automotiva e XI Encontro dos Centros de Apoio Tecnológicos. Brasília. p. 313-332, 1983.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Balanco nacional de cana-de-açúcar e agroenergia** / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Produção e Agroenergia – Brasília: MAPA/SPA, 2007. 139p.

BROGE, J. L. Reving up for diesel. **Automotive Engineering International**, v.110, n.2, p.40-49, 2002.

CAETANO, T. **Estudo da miscibilidade de etanol com componentes do diesel e biodiesel**. 2003. 118f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas.

CHAPLIN, J.; JANIUS, R. B. Ethanol fumigation of a light duty automotive Diesel engine. Society of Automotive Engineers, **SAE paper** 811209.

CHANG, Y. Z. D.; GERPEN, V. H. J.; LEE, I.; JOHNSON, A. L.; HAMMOND, G. E.; MARLEY, J. S.; **Journal American Oil Chemistry Society**, n.73, p.1549, 1996.

CHEN, H.; WANG, J.; SHUAI, S.; CHEN, W. Study of oxygenated biomass fuel blends on a diesel engine. **Fuel**, v. 87, p. 3462-3468, 2008.

CHENG, C. H.; CHEUNG, C. S.; CHAN, T. L.; LEE, S. C.; YAO, C. D.; TSANG, K. S. Comparison of emissions of a direct injection diesel engine operating on biodiesel with emulsified and fumigated methanol. **Fuel**. n. 87, p. 1870-1879, 2008.

CHOTWICHIE, A.; LUENGNARUEMITCHAI, A.; JAI-IN, S. Utilization of palm oil alkyl esters as an additive in ethanol-diesel and butanol-diesel blends. **Fuel**, v.88, p. 1618-1624, 2009.

DE CARO, P. S.; MOULOUNGUI, Z.; VAITILINGOM, G.; BERGE, J. CH. Interest of combining an additive with diesel-ethanol blends for use in diesel engines, **Fuel**, v. 80, p. 565-574, 2001.

DIETRICH, W.; BINDEL, H. W. H. O desenvolvimento da “injeção piloto” para uso de álcoois em motores ciclo Diesel. **Anais... I Simpósio de Engenharia Automotiva e XI Encontro dos Centros de Apoio Tecnológico**, Brasília, p. 515-533. 1983.

DOCKERY D. W.; POPE C.A. III. Acute respiratory effects of particulate air pollution. **Annual Review on Public Health**. n. 15, p.107-132, 1994.

ECONOMY & ENERGY, **Progressos na Matriz Energética e de Emissões de Gases Causadores do Efeito Estufa**, Brasília, n. 25, Mar/Abr. 2001. Disponível em <<http://www.ecen.com>> Acesso em 15 maio 2008.

ELVERS, B.; HAWKINS, S.; SCHULZ, G. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**, v. A16, p. 724 - 728, jun. 1990.

ENCINAR, J. M.; GONLEZ, J. F.; SABIO, E.; RAMIRO, M. J. Preparation and properties of biodiesel from *Cynara cardunculus* L. oil - **Industry Engineering Chemical Resource**, v. 38, p. 2927 - 2931, abr. 1999.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Informe à imprensa: **Cana-de-açúcar já é a segunda fonte primária de energia no Brasil**. Disponível em: http://www.epe.gov.br/PressReleases/20080508_1.pdf Acesso em: 08/06/2008.

FALCON, A. M.; FERNANDES, F. R.; PISCHINGER, G. **Utilização de alternativas de combustíveis a base de óleos vegetais em motores diesel de injeção direta e indireta**. 1983, I SIMEA (Simpósio de Engenharia Automotiva), Brasília, p. 451-464

FEITOSA, M. V. **Desenvolvimento do motor de ignição por compressão alimentado por injeção direta de óleo diesel e por etanol pós vaporizado no coletor de admissão**. 2003. 217f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos.

FERNANDO S.; HANNA, M. Development of a novel biofuel blend using ethanol–biodiesel–diesel microemulsions. **Energy Fuel**, v.18, p.1685–703, 2004.

FERRARI, R. A.; OLIVEIRA, V. S.; SEABIO, A.; Biodiesel de soja: Taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-química e consumo em gerador de energia. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 1, p. 19-23, 2005.

FRANÇA, B.M. **Equilíbrio líquido-líquido de sistemas contendo biodiesel de mamona + glicerina + álcool**. 2008. 78f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

GARY, J.H.; HANDWERK, G.E. Petroleum Refining: Technology and Economics. In: DEKKER, M. **Refinery Products**. Atlanta: [s.n]. 1994. p. 5 - 22.

GELLER, D.P.; GOODRUM, J.W. Effects of specific fatty acid methyl esters on diesel fuel lubricity, **Fuel**, v. 83, n. 17, p. 2351-2356, 2004.

GELLER, H.; SCHAEFFER, R., SKLO, A., TOLMASQUIM, M. Policies for advancing energy efficiency and renewable energy use in Brazil. **Energy Policy**. n. 32, p.1437-1450, 2004.

GERDES, K. R.; SUPPES, G. J. Miscibility of Ethanol in Diesel Fuels, **Industry Engineering Chemical Res.** v.40, p. 949 - 956, 2001.

GERPEN, J. H. V.; CHANG, D. Y. Z. Fuel properties and engine performance for biodiesel prepared from modified feedstocks. **SAE** technological paper series, 1997. n. 971684.

GOERING, C. E.; CROWELL, T.J.; GRIFFITH, D.R.; JARRETT, M. W.; SAVAGE, L. D. Compression-ignition, flexible-fuel engine. **Transactions of the ASAE**, v. 35, n.35, p. 423-428. 1992.

GURU, M.; KARAKAYA, U.; ALTIPARMAK, E.; ALICILAR, A. Improvement of Diesel fuel properties by using additives, **ENERGY - Conversion and Management**, v.43, p. 1021 - 1025, 2002.

HADDAD, S.; WATSON, N. Combustion and heat release in diesel engines; Fuels for Diesel Engines. In _____: **Principles and Performance in Diesel Engineering** . New York, Ellis Horwood Limited, 1984, p. 13 - 64.

HANSEN, A.C.; TAYLOR, A.B.; LYNE, P.W.; MEIRING. Heat release in the compression-ignition combustion of ethanol. **American Society of Automotive Engineers**, v.32, 1507-1511, 1989.

HANSEN AC, HORNBACKER RH, ZHANG Q, LYNE PWL. On farm evaluation of diesel fuel oxygenated with ethanol. **American Society of Agricultural Engineers**, Paper no. 01-6173, 2001.

HANSEN, A. C.; ZHANG, Q.; LYNE, P. W. L. Ethanol-diesel fuel blends a review. **Bioresoursource Technology**. n. 96, p. 227-285, 2005.

HE, B. Q.; SHUAI, S. J.; WANG, J. X.; HE, H. The effect of ethanol blended diesel fuels on emissions from a diesel engine. **Atmospheric Environment**. n. 37, p. 4965-4971, 1994.

HEYWOOD, J.B. **Internal combustion engine fundamentals**. Mcgraw-Hill, New York, 1988.

HOFMAN, V. **Biodiesel Fuel**. Disponível em:
<<http://www.ag.ndsu.edu/pubs/agent/machine/ae1240w.htm>.> Acesso em
23/05/2008, 2003.

HOLMER, E.; BERG, P. S; BERTILSSON, B. I. The utilization of alternative fuels in a Diesel engine using different methods. Society of Automotive Engineers, **SAE paper** 800544. 1980.

INNOCENTINI, M. Testes de miscibilidade de combustíveis realizados na Universidade de Ribeirão Preto. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <borges-jl@hotmail.com> em maio 2008.

JU, T. Y.; WOOD, C.E. Cetane number and chemical composition. **The Oil and Gas Journal**. p. 41-45, 1941.

KISS, A.A.; OMOTA, F.; DIMIAN, A.C. The heterogeneous advantage : biodiesel by catalytic reactive distillation, **Topics in Catalysis**, v. 40, n. 1-4, pp. 141-150, 2006.

KNOTHE, G.; BAGBY, M.O.; RYAN, T. O. **Cetane numbers of fatty compounds: Influence of compound structure and various potential cetane improvers**. SAE Paper 971681, (SP-1274), 1997.

KNOTHE, G.; GERPEN, J. van; KRAHL, J.; RAMOS, L. P. (Ed.). **Manual de biodiesel**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006, 340 p. Traduzido por Luiz Pereira Ramos.

KULKARNI, M. G.; DALAI, A. K. Waste cooking oil – an economical source for biodiesel: a review. **Industry Engineers Chemical Resource**. n. 70, p. 2901-2913, 2006.

KUMAR, M. S.; KERIHUEL, J.; BELLETRE, J.; TAZEROUT, M. Ethanol animal fat emulsions as a diesel engine fuel – Part 2: Engine test analysis. **Fuel**, v. 85, p. 2646-2652, 2006.

KWANCHARON, P.; LUENGNARUEMITCHAI, A.; JAI-IN, S. Solubility of a diesel–biodiesel–ethanol blend, its fuel properties, and its emission characteristics from diesel engine. **Fuel**, v.10, p.1053-1061, 2007.

LAHAYE, J.; EHRBURGER-DOLLE, F. **Carbon** 1994, 32, 1319.

LANG, X.; DALAI, A.K.; BAKHSHI, N.N.; REANEY, M.J.; HERTZ, P.B. Preparation and characterization of bio-diesels from various bio-oils. **Bioresource Technology**, v.80, p. 53-62, 2001.

LETCHER, T.M.. Diesel blends for diesel engines. **South Africa Journal Science**, v.79, p.4-7, 1983.

LIPFERT F. W. Air pollution and mortality: specification searches using SMSA-based data. **Journal of Environmental and Economy Management**. n.11, p.208-243, 1984.

MA, F.; HANNA, M.A., Biodiesel production: a review. **Bioresource Technology**, v.70, p. 1-15, 1999.

MMA, LIMA/COPPE/UFRJ, FEEMA. **Avaliação do Programa de Inspeção e Manutenção de veículos em uso do Rio de Janeiro**. 2002.

MACEDO, I. C. **Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil**. Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético da Universidade Estadual de Campinas (NIPE). Campinas, jan. 2004.

MACEDO, I. C.; SEABRA J. E. A.; SILVA J. E. A. R. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy** n. 32, 582 – 595, 2008.

MALLEV, V. L. **Internal combustion engines**. 2 ed., Tokio, Japão, 1945.

MARTINEZ de VEDIA, R. Vegetable oils as diesel fuels. **Diesel Power Diesel Transport**, V.22, p.1298-1304, 1944.

MAZIERO, J.V.G.; CORRÊA, I.M.; ÚNGARO, M.R.; BERNARDI, J.A.; STORINO, M. Desempenho de um motor diesel com óleo bruto de girassol. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.13, n. 2, p. 249-255, 2007.

MCCORMICK, R.L; ROSS, J.D.; GRABOSKI, M.S. Effect of a several oxygenates on regulated emissions from heavy-duty diesel engines. **Environment Science and Technology**, v.31, n.4, p.1144-1150, 1997.

MEHER, L.C.; VIDYA SAGAR, D.; NAIK, S.N., Technical aspects of biodiesel production by transesterification-a review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 10, n. 3, pp. 248-268, 2006.

MORRIS, R.E.; A. K. POLLACK; G. E. MANSELL, C.; LINDHJEM, Y.; and G. WILSON. **Impact of Biodiesel Fuels On Air Quality And Human Health**. Novato. California: National Renewable Energy Laboratory. 150p. 2003.

MUÑOZ, M.; MORENO, F.; MOREA, J. Emissions of an automobile diesel engine fueled with sunflower methyl ester. **Transactions of the ASAE**. v. 47, n. 1, p. 5-11, 2004.

NEEFT, J. P. A.; MAKKEE, M.; MOULIJN, J. A. Diesel particulate emission control. **Fuel Processing Technology**, v. 47, p.1- 69. 1996.

NOGUCHI, N.; TERAQ, H.; SAKATA, C. Performance Improvement by Control of Flow Rates and Diesel Injection Timing on Dual-Fuel Engine with Ethanol. **Bioresource Technology**, v. 56, p. 35 - 39, 1999.

PEREZ, E. P.; CARVALHO JUNIOR, J. A.; CARROCCI, L. R.. Substituição do óleo diesel por álcool etílico hidratado na queima direta, uma comparação. In: AGRENER GD 2006, 6. **Anais...** Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural, 2006, Campinas. AGRENER GD 2006. Campinas : NIPE - Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético, 2006. v. 01, p. 01-09.

PNA - Plano Nacional de Agroenergia. **Caderno**, n.1, 118 p, 2005.

POUSA, G.P.A.G.; SANTOS, A.L.F.; SUAREZ, P.A.Z.; "History and policy of biodiesel in Brazil". **Energy Policy**, v. 35, n. 11, pp. 5393-5398. 2007.

RABELO, I. D. **Estudo de desempenho de combustíveis convencionais associados a biodiesel obtido pela transesterificação de óleo usado em fritura**. 2003. 96f. Dissertação (Mestrado) - Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba.

RAMOS, L. P.; KUCEK, K. T.; DOMINGOS, A. K.; WILHELM, H. M. Biodiesel: um projeto de sustentabilidade econômica e sócio-ambiental para o Brasil. **Revista Biotecnologia, Ciência & Desenvolvimento**, n. 31, p. 28-36, 2003.

RYAN, L.; CONVERY, F.; FERREIRA, S. Stimulating the use of biofuels in the European Union: Implications for climate change policy. **Energy Policy**, v. 34, n. 17, p. 3184-3194, 2006.

RYAN III, T. W.; DODGE, L. G.; CALLAHAN, T. J; The effects of vegetable oil properties on injection and combustion in two different diesel engines. In: International Symposium of Vegetable Oils, 2.,1983, New York (**Paper n. 12**)

SÁ FILHO, H. L. de ; ROTENBERG, B.; ALBUQUERQUE, S. F. de ; MENDONÇA, M. C. G. de ; MEDEIROS, P. R. da S. Diagnóstico de Viabilidade Técnica de Utilização dos Óleos Vegetais Brasileiros como Combustível/Lubrificantes. **Informativo do INT**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 22, p. 29-39, maio/ago, 1979.

SANTOS, A. M. dos. **Contribuições ao uso de combustíveis aditivados em motores de ignição por compressão**. 1986.106f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos.

SANTOS, M. A. dos. **Inserção do biodiesel na matriz energética brasileira: aspectos técnicos e ambientais relacionados ao seu uso em motores de combustão**. 2007. 123f. Dissertação (Mestrado – Programa interunidades de Pós – Graduação em energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

SCHARMER, K. Biodiesel: Energy and Environmental Evaluation. **UFOP**. Bonn, 2001.

SERDAR, A.; LOIS, E.; STOURNAS, S. Impact of esters of mono and dicarboxylic acids on diesel fuel quality. **Industry Engineering Chemical Research**, v.38, p. 3543 - 3548, 1999.

SHAHID, E.M., JAMAL, Y. "A review of biodiesel as vehicular fuel". **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Disponível em <www.fuelfirst.com/2008/biofuels/program.stm> Acesso em 05/05/2008, 2007.

SHARP, C. A.; HOWELL, S. A.;JOB, J. The effect of biodiesel fuels on transient emissions from modern diesel engines. Part 1: Regulated emissions and performance, **SAE technology paper** ser. 2000-01-1967, 2000.

SLUSZZ, T. ; MACHADO, J. A. D. Características das potenciais culturas matérias-primas do biodiesel e sua adoção pela agricultura familiar. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA, 6., 2006, Campinas. **Anais...** Itajubá: IME/UNIFEI, 2006.

SOUZA M. B.; SALDIVA P. H.; POPE C. A. 3rd, CAPELOZZI V. L. Respiratory changes due to long-term exposure to urban levels of air pollution: a histopathologic study in humans. **Chest**. v.113, n.5, 1312-8, 1998.

SUAREZ, P. A. Z. **Usina de craqueamento**. Disponível em: <<http://www.unb.br/iq/lmc>> Acesso em: 23/11/2007, 2006.

SUPPES, G. J. Past Mistakes and Future Opportunities of Ethanol in Diesel. **Bioenergy**, Buffalo; October, 2000.

SUPPES, G. J., GOFF, M., BURKHART, M, L., BOCKWINKEL, K. Multifunctional Diesel Fuel Additives from Triglycerides. **Energy Fuels**, v.15, p. 151 - 157, 2001.

VILLANO, F. & PENIDO F^o, P. **O óleo vegetal transesterificado e sua utilização nos motores de pré-câmara por ignição a compressão**. 1983, I SIMEA (Simpósio de Engenharia Automotiva), Brasília, p. 465-479.

WANG, W. G.; LYONS, D. W.; CLARK, N. N.; GAUTAM, M. Emissions from Nine Heavy Trucks Fueled by Diesel nad Biodiesel Blend without Engine Modification. **Environment Science Technology**, v. 34, p. 933 - 939, 2000.

WENZEL, G. e LAMMERS, P. S. Boiling Properties and Thermal Decomposition of Vegetable Oil Methyl Esters with Regard to their Fuel Suitability. **Journal Agriculture Food Chemistry**, v. 45, p. 4748 - 4752, 1997.

ZHANG, Y.; DUBE, M.A.; MCLEAN, D.D.; KATES, M. Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. **Bioresource Technology**, v. 89, n. 1, pp. 1-16, 2003.