

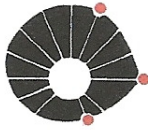


Ricardo Roquette Moretti

**Mistura Diesel, Biodiesel e Etanol Anidro: uma
Possibilidade para Reduzir o Custo da
Cadeia de Produção da Cana-de-Açúcar**

50/2013

CAMPINAS
2013



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA


Ricardo Rochetto Moretti

Mistura Diesel, Biodiesel e Etanol Anidro: uma Possibilidade para Reduzir o Custo de Produção da Cadeia da Cana-de-Açúcar.

Orientador: Prof. Dr. Waldir Antonio Bizzo

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica, na Área de Térmica e Fluidos.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO
ALUNO RICARDO ROQUETTO MORETTI, E ORIENTADO
PELO PROF. DR. WALDIR ANTONIO BIZZO


.....
.....
ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS,
2013

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

M817m Moretti, Ricardo Roquette, 1982.
Mistura diesel, biodiesel e etanol anidro: uma
possibilidade para reduzir o
custo de produção da cadeia da cana-de-açúcar /
Ricardo Roquette Moretti. –
Campinas, SP : [s.n.], 2013

Orientador: Waldir Antonio Bizzo
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Motores - Combustão. 2. Etanol. 3. Combustíveis
diesel. 4. Mistura (Química). 5. Biodiesel. I. Bizzo,
Waldir Antonio. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital:

Título em Inglês: Blending diesel, biodiesel and ethanol anhydrous is a
possibility to reduce the cost of the production chain of sugar
cane.

Palavras-chave em inglês:

Engine – combustion
Ethanol
Diesel fuels
Blending
Biodiesel

Área de concentração: Térmica e Fluídos

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Waldir Antonio Bizzo [Orientador]

Waldir Luiz Ribeiro Gallo

Francisco Emilio Baccaro Nigro

Data da defesa: 23/05/2013

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUIDOS


DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO

Mistura Diesel, Biodiesel e Etanol Anidro: uma Possibilidade para Reduzir o Custo da Cadeia de Produção da Cana-de-Açúcar

Autor: Ricardo Rochetto Moretti

Orientador: Waldir Antonio Bizzo


A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Waldir Antonio Bizzo
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Waldyr Luiz Ribeiro Gallo
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Francisco Emilio Baccaro Nigro
Universidade de São Paulo

Campinas, 23 de maio de 2013.

Dedico este trabalho à minha querida família, esposa e amigos que muito me apoiaram durante essa longa caminhada.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Ao meu pai pelo incentivo em todos os momentos da minha vida.

A minha querida avó minha segunda mãe que muito apoiou durante essa longa caminhada.

A minha mãe que sempre olha do céu por mim.

Minha esposa Verônica, que muito me incentivou durante esse estudo.

Ao meu orientador, que me mostrou os caminhos a serem seguidos.

A todos os professores e colegas de trabalho, que me ajudaram direta e indiretamente na conclusão deste trabalho.

*“A ferrovia que leva ao sucesso é construída
em cima de um solo de humildade
com pesados trilhos chamados erros
que somente são fixados numa linha reta
com maciços pregos de perseverança”
(Eduardo Siqueira Filho).*

Resumo

A emissão de poluentes por veículos automotores é um dos grandes problemas ambientais enfrentados na atualidade. Para resolver o problema de emissão de poluentes a modificação da matriz energética foi o caminho adotado, e para isso realizaram-se investimentos em tecnologias para fabricação de motores com melhor eficiência térmica e capazes de operar com biocombustíveis.

No Brasil etanol foi o combustível objeto de estudo para realizar a mudança na matriz energética, por ser um produto produzido em larga escala no Brasil.

Durante o estudo realizou-se uma revisão bibliográfica sobre os processos de produção de etanol, biodiesel e óleos vegetais. Avaliou-se a viabilidade técnica e financeira de se utilizar uma mistura de combustível óleo diesel, biodiesel versus o desempenho da mistura óleo diesel, biodiesel e etanol anidro em um motor de ignição por compressão visando não acarretar perda de performance no motor. Para a avaliação do desempenho global do motor utilizou-se um motor ciclo diesel comercial, operando com 95% de óleo diesel e 5% biodiesel e comparou-se esse mesmo motor utilizando uma mistura de 92,15% de óleo diesel, 4,85% de biodiesel e 3% de etanol anidro.

Palavras Chave: Diesel, biodiesel, etanol, mistura, motor.

Abstract

This work investigated the feasibility of using a blend of standard Brazilian diesel (which contains 5% biodiesel) and up to 5% ethanol. We characterized the mixture as fuel and measured the performance of a diesel engine operating with a blend containing 3% anhydrous ethanol, the maximum percentage of ethanol that did not reduce the cetane number of the fuel below that specified in Brazilian legislation (ANP Resolution 42). The presence of anhydrous ethanol in the mixture did not cause a significant impact on engine performance as measured by brake power, brake torque and brake specific fuel consumption tests. The thermal efficiency of the engine used in the tests was slightly higher with standard diesel than with the diesel-biodiesel-ethanol blend.

Key Words: Diesel, biodiesel, ethanol, blend, engine

Lista de Ilustrações

Figura 2.1. Diagrama Pressão x Volume do Ciclo Diesel Teórico e Real	07
Figura 2.2. Diagrama Pressão x Volume do Ciclo Dual Diesel	08
Figura 2.3. Desenvolvimento do Processo de Combustão em Motores Ciclo Diesel de Injeção Direta.	10
Figura 2.4. Vista em Corte do Sistema de Injeção Direta	11
Figura 2.5. Vista em Corte do Sistema de Injeção Indireta	12
Figura 2.6. Aparelho de Destilação	19
Figura 2.7: Reação de Transesterificação para Produção de Biodiesel	22
Figura 2.8. Rotas para a Produção de Biodiesel	24
Figura 2.9. Estudo de Miscibilidade Diesel, Biodiesel e Etanol Hidratado	28
Figura 2.10. Resultado das Emissões de CO em Motor Diesel Operando em Várias Cargas	30
Figura 2.11. Resultado das Emissões de HC em Motor Diesel Operando em Várias Cargas	31
Figura 2.12. Resultado das Emissões de NO _x em Motor Diesel Operando em Várias Cargas	31
Figura 2.13. Consumo Específico para Misturas de Combustíveis e Várias Taxas de Compressão	33
Figura 2.14. Gráficos de Consumo Específico para Misturas de Diesel e Etanol Anidro	34
Figura 2.15. Gráficos de Rendimento para Misturas de Diesel e Etanol Anidro	35
Figura 2.16. Resultado da Emissão de CO para Mistura Diesel/ Etanol Anidro	36
Figura 2.17. Resultado da Emissão de NO _x para Mistura Diesel/ Etanol Anidro	36
Figura 2.18. Resultado da Emissão de THC para Mistura Diesel/ Etanol Anidro	37
Figura 3.1. Esquemático do Aparelho para Teste de Lubricidade	41
Figura 3.2 Banco de Testes	46

Figura 3.3. Motor Ensaiado	48
Figura 4.1. Série História de Preços	55
Figura 5.1. Gráfico da Curva Destilação	60
Figura 5.2. Béqueres com Misturas de 92,15% diesel, 4,85% Biodiesel e 3% Etanol Anidro e Outro Com 92,15% Diesel, 4,85% Biodiesel e 3% Etanol Hidratado	61
Figura 5.3. Condensado Formado no Béquer com Etanol Hidratado Após 24h	62
Figura 5.4. Condensado Formado no Béquer com Etanol Anidro Após 24h	62
Figura 5.5. Condensado Formado no Béquer com Etanol Hidratado Após 96h	63
Figura 5.6: Condensado Formado no Béquer com Etanol Anidro Após 96h	64
Figura 5.7. Amostras sendo Levadas para Refrigerador	65
Figura 5.8. Amostra de Etanol Hidratado por 24h Sob Refrigeração	66
Figura 5.9. Amostra de Etanol Anidro Após 24h Sob Refrigeração	67
Figura 5.10. Detalhe da Nevoa no Béquer de Etanol Hidratado Após 48h	68
Figura 5.11. Detalhe do Fundo do Béquer de Etanol Anidro Após 48h	68
Figura 5.12. Formação de Bolhas no Béquer de Etanol Hidratado Após 1h	69
Figura 5.13. Formação de Bolhas no Béquer de Etanol Anidro Após 1h	70
Figura 5.14. Gráfico de Potência Efetiva Variando as Cargas do Motor	71
Figura 5.15. Gráfico de Torque Variando as Cargas do Motor	73
Figura 5.16. Gráfico de Consumo Médio de Combustível Variando as Cargas do Motor	74
Figura 5.17. Gráfico do Consumo Específico de Combustível Variando as Cargas do Motor	75
Figura 5.18. Gráfico da Eficiência Global de Combustível Variando as Cargas do Motor	76
Figura 5.19. Variação da Temperatura dos Gases de Escape Variando as Cargas do Motor	76

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Propriedades Típicas do Diesel no Brasil	14
Tabela 2.2 Composição de ácidos graxos e alguns óleos e gorduras	15
Tabela 2.3. Composição Típica do Etanol Anidro e Hidratado no Brasil	21
Tabela 2.4. Propriedades Típicas do Biodiesel no Brasil	23
Tabela 2.5. Mistura Diesel, Biodiesel e Baixas Concentrações de Etanol	29
Tabela 2.6. Mistura Diesel, Biodiesel de Etanol	29
Tabela 4.1. Análise de Viabilidade Financeira	54
Tabela 5.1. Análises de Cetano	56
Tabela 5.2. Análises de Lubricidade	57
Tabela 5.3. Viscosidade a 40°C	58
Tabela 5.4. Ponto de Fulgor	58
Tabela 5.5. Pressão de Vapor	59

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras Latinas

P - pressão	[kPa];
V - volume	[m ³];
m - massa	[kg];
η - rendimento	[%];
d - densidade	[kg/m ³];
l - litros	[L];

.....

Letras Gregas

.....

Superescritos

+ - tempo posterior

.....

Subscritos

e - propriedade avaliada na evaporação

.....

Abreviações

R\$ - Reais;

Km - Quilometragem;

GEE's - Gases de efeito estufa;

.....

Siglas

ANP - Agência Nacional do Petróleo;

CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada;
CFR - Corporate Fuel Research Committee;
CNP – Conselho Nacional do Petróleo;
COPPEAD – Centro de Estudos em Logística;
DETF – Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos;
ESALQ – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiros;
FEI – Faculdade de Engenharia Industrial;
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis.
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas;
IEA - Agência Internacional de Energia;
MME – Ministério de Minas e Energia;
ONU - Organização das Nações Unidas;
PCI – Poder Calorífico Inferior;
PMI – Ponto Morto Inferior;
PMS – Ponto Morto Superior;
PROÁLCOOL – Programa Nacional do Alcool;
USP – Universidade de São Paulo;

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	05
3. MATERIAL E METODOS	39
4. VIABILIDADE FINANCEIRA	52
5. RESULTADO E DISCUSSÃO	56
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A primeira fonte de energia utilizada pelo homem foi a lenha. Na Inglaterra, na segunda metade do século XVIII ocorreu a Revolução Industrial que marcou a transição de feudalismo para o capitalismo. A partir da invenção das máquinas a demanda por energia aumentou drasticamente e a lenha perdeu espaço para o carvão mineral. E esse se tornou a principal fonte de energia utilizada pela humanidade naquele período.

Entretanto, visitando a Pensilvânia em 1859, George Bissel encontra petróleo, um novo produto que atrai a cobiça humana até hoje. No princípio, dele era extraído apenas o querosene de iluminação, mas, em 1896 Ford fabrica seu primeiro automóvel e a partir disso o petróleo tornou-se o principal produto estratégico do mundo moderno.

A exploração de petróleo no terceiro mundo teve origem no Irã em 1908. A partir de então todo o Golfo Pérsico começou a ser explorado por companhias estrangeiras, principalmente inglesas e americanas.

O aumento do número de automóveis e a utilização do petróleo também como combustível de aviação, acarretou a necessidade de aumento da produção do produto, o que tornou as companhias exploradoras cada vez mais ricas. Entretanto, em 1973 ocorreu a primeira crise do petróleo quando os países do Oriente Médio reduziram a produção elevando o preço do barril de US\$ 2,90 para US\$ 11,65 em apenas três meses (Pianovski Jr. 2002).

O Brasil não apresentou a fase do carvão mineral devido a sua industrialização tardia. O país possui grandes reservas desse combustível, mas este é de baixa qualidade e alto teor de cinzas. Portanto é natural que a lenha continuasse ocupando lugar de destaque na matriz energética brasileira até 1940.

No início do século XX, começa-se a busca por petróleo no Brasil. O primeiro relato de “lama preta” foi feito em 1932 por moradores de Lobato um bairro na periferia de Salvador-BA.

Em 1937 a Constituição determinou que as jazidas encontradas pertencessem a União. No ano seguinte o governo brasileiro cria o Conselho Nacional do Petróleo - CNP. A primeira jazida foi descoberta em 1939 em Lobato. Apesar das descobertas em pequena escala o aparecimento dessa riqueza incentivou a oficialização em 1953 do monopólio estatal sobre a exploração do petróleo com a criação da companhia estatal “Petróleo Brasileiro S.A.” a Petrobrás.

Em 1973 o cenário mundial mudou e muitos países, inclusive o Brasil, por possuírem um déficit de produção de petróleo viram o risco de desabastecimento energético diante da primeira crise do petróleo e isso reacendeu o interesse por fontes renováveis de energia, o que levou vários países a buscarem soluções nacionais mais adequadas à característica de cada país.

O álcool (etanol) foi o combustível renovável escolhido pelo país para reduzir a dependência por petróleo, pois se conhecia a mais de um século que o etanol, proveniente da cana-de-açúcar, poderia ser utilizado como combustível automotivo. Em seu primeiro mandato Vargas decretou o primeiro modelo de mistura o qual determinava a adição de até 15% de etanol anidro a gasolina.

O Brasil possuía grandes extensões de terra cultivada com cana-de-açúcar, mão-de-obra no campo para trabalhar na produção e o setor açucareiro possuía capacidade industrial ociosa que poderia ser ocupada com a produção de etanol.

O principal benefício da utilização do etanol anidro misturado a gasolina foi a rápida eliminação do chumbo (tetraetila) na gasolina e conseqüentemente redução das emissões de poluentes nos grandes centros urbanos. O mesmo ocorreu com a utilização do etanol hidratado nos motores.

O governo brasileiro, preocupado com o seu Plano Nacional de Desenvolvimento Acelerado, com o aumento da inflação e o aumento da dívida externa, decidiu estudar fontes não convencionais de energia e esses estudos deram origem ao Programa Nacional do Álcool - Proálcool (decreto nº 76.593, de 14/11/1975). O projeto original foi feito por engenheiros e economistas da Universidade de São Paulo - USP, o qual propunha a substituição do diesel por álcool (etanol) como incentivo à mudança dos motores ciclo diesel por motores ciclo Otto.

Desde o primeiro choque do petróleo em 1973, vários pesquisadores vêm estudando combustíveis alternativos com o intuito de substituir o petróleo como principal combustível da

matriz energética mundial. O início dos estudos foi realizado com o objetivo de encontrar fontes alternativas de energia seguras.

O primeiro grande evento sobre meio ambiente realizado no mundo foi a Conferência de Estocolmo em 1972. Nessa época, muitos governos ainda tratavam o meio ambiente como uma fonte inesgotável e que seu aproveitamento fosse infinito. O aumento da intensidade dos diversos problemas ambientais já identificados, como chuva ácida, redução da camada de ozônio, contaminação dos corpos d'água e, principalmente o efeito estufa, motivaram a Organização das Nações Unidas – ONU a organizar uma convenção no qual os países se propunham discutir estes problemas e propor soluções. A comunidade internacional reuniu-se em 1997 em Quioto no Japão com o intuito de reduzir a crescente quantidade de emissões de gases do efeito estufa. Nessa conferência foi proposta a criação de um Protocolo segundo o qual os países industrializados se comprometeriam a reduzir em 5% as emissões provenientes desses gases em relação aos níveis medidos durante o ano de 1990 no período de 2008 e 2012. Infelizmente os Estados Unidos, maior emissor de gases do efeito estufa do mundo não aderiu a esse protocolo. (Pianovski Jr., 2002).

Segundo Grando (2005) a crescente demanda por combustíveis renováveis como alternativa aos combustíveis fósseis é devido a maior preocupação internacional com o aquecimento global. Assim o etanol e o biodiesel poderão contribuir para melhorar as condições ambientais através da redução da emissão de gases causadores do efeito estufa.

Assim o etanol e o biodiesel poderão contribuir para melhorar as condições ambientais através da redução da emissão de gases causadores do efeito estufa. O etanol é um combustível de origem renovável, obtido principalmente da fermentação da sacarose da cana-de-açúcar. O biodiesel é também um combustível renovável e biodegradável, constituído de uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, obtidos da reação de transesterificação de qualquer triglicerídeo com um álcool de cadeia curta (metanol ou etanol). (Parente, 2005).

O consumo mundial de petróleo no ano de 2010 foi ao redor de 80 milhões de barris diários segundo dados da Agência Internacional de Energia - IEA. Em 2010, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 45,5% da energia utilizada no Brasil veio de fontes renováveis: 14,0% hidráulica, 9,7% de lenha e carvão vegetal, 17,8% de biomassa (cana-de-açúcar), 4% de outras fontes alternativas tais como solar, eólica, biogás. Outros 52,8% da energia

utilizada no país vêm de fontes não renováveis: 37,6% de derivados de petróleo; 10,8% de gás natural, 4,8% de carvão e derivados, 1,4% de urânio.

Essa dissertação de mestrado tem como objetivo geral estudar a viabilidade de utilização do etanol anidro como substituto parcial do diesel. Os objetivos específicos são:

- Avaliar as propriedades físicas e químicas da mistura dos seguintes combustíveis: diesel, biodiesel, etanol anidro e etanol hidratado;
- Avaliar e comparar o desempenho experimental de um motor diesel operando com 95% diesel e 5% biodiesel e com uma mistura de combustíveis com a seguinte composição: 92,15% de diesel 4,85% de biodiesel e 3% de etanol anidro;
- Calcular a viabilidade financeira do projeto da alteração do combustível;

Capítulo 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Motores Térmicos

Motores térmicos são máquinas que tem com objetivo transformar a entalpia de combustão em energia mecânica, ou seja, transformam a energia química do combustível em trabalho útil ou força motriz de acionamento.

No mundo moderno o motor é utilizado em várias aplicações tais como: automóveis, ônibus, geradores de energia elétrica, navios, etc.

Os motores podem ser classificados em quatro tipos de acordo com sua aplicação:

Estacionários: destinados ao acionamento de máquinas estacionárias tal como geradores, moto bombas, etc.

Industriais: destinados a máquinas industriais tal como guindastes, veículos fora de estrada, compressores de ar, etc.

Veiculares: destinado a veículos de transporte geral tal como ônibus, caminhões e automóveis;

Marítimos: destinado a equipamentos de uso naval tal como barcos e navios.

Os motores de combustão interna podem ser classificados também em dois tipos principais considerando o ciclo termodinâmico: motores ciclo Diesel e motores ciclo Otto. Ambos receberam os nomes de seus respectivos inventores.

Os motores do ciclo diesel são aqueles que aspiram o ar que, após ser comprimido no interior da câmara de combustão, recebe o combustível que é injetado diretamente na câmara através de bicos nebulizadores de alta pressão. A mistura é formada dentro da câmara já com o ar aquecido devido à compressão. O combustível é injetado, na forma líquida, diretamente na câmara de combustão. Durante a injeção ocorre a nebulização em pequenas gotículas e essas em contato com o ar à alta temperatura evaporam e entram em ignição sem a necessidade de centelhamento (Menezes, 2009).

Em motores com aspiração natural o ar é aspirado pelo movimento de descida do pistão que cria uma pressão negativa na câmara de combustão em relação à pressão atmosférica permitindo a entrada do ar ambiente nos cilindros. Já os motores turboalimentados são aqueles que possuem um compressor que comprime o ar insuflando-o no cilindro. Esse compressor é acionado por uma turbina, que é movida pelos gases de exaustão do motor. A sobrealimentação aumenta a potência do motor, pois aumenta a densidade do ar que é injetada no cilindro permitindo injetar mais combustível (Pianovski Jr, 2002).

Os motores ciclo diesel tem uma relação de compressão é de 20 até 60:1. O controle de carga de um motor ciclo diesel é realizado com a variação da quantidade de combustível injetado

Os motores ciclo Otto aspiram uma mistura de ar e combustível e esta mistura é comprimida no interior dos cilindros. A combustão é provocada por uma centelha proveniente de uma vela de ignição. Os motores ciclo Otto possuem tipicamente uma relação de compressão de 6 até 12:1.

A principal diferença entre os motores de ignição por compressão e ignição por centelha está no tipo de combustão que neles ocorre. A diferença fundamental está no fato de que no motor de ignição por centelha a combustão é pré-misturada e no de ignição por compressão a combustão é dispersa. No caso da pré-misturada é necessário que a mistura (ar + combustível) esteja muito próximo da relação estequiométrica ideal para que a ignição ocorra de forma eficiente. Para controlar a potência varia-se a quantidade de mistura aspirada, controlada pela borboleta do acelerador. O oposto ocorre em um motor por ignição por compressão onde a mistura não fica muito próximo da relação estequiométrica, apenas em uma pequena região ao redor da gota de combustível nebulizado, sendo que a quantidade de ar dentro do cilindro permanece constante, e a quantidade de combustível injetado varia a fim de controlar a potência do motor.

2.1.1. Comparação Diagrama PxV do Ciclo de Diesel Ideal e Real

A Figura 2.1 apresenta uma comparação entre o ciclo diesel ideal e o ciclo diesel real. Conforme apresentado na figura, no ciclo diesel real, a combustão se realiza em tais condições,

que a pressão varia durante o processo de combustão, enquanto que no ciclo teórico supõe-se que a pressão permaneça constante durante a combustão. Assim, a combustão no ciclo real não ocorre nem a pressão constante nem a volume constante, mas em um processo aproximado a isso. Além das diferenças observadas na forma do ciclo teórico em comparação com o ciclo real, outras diferenças também são verificadas nos valores de pressão, temperatura, perdas de energia para cada ciclo.

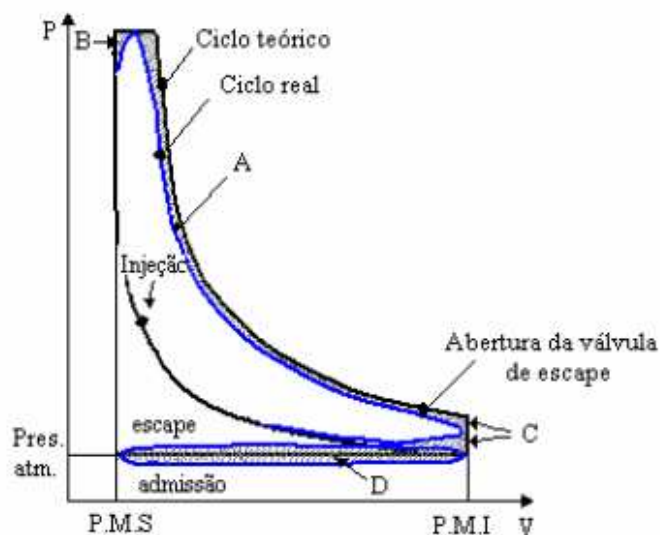


Figura 2.1. Diagrama Pressão x Volume do Ciclo Diesel Teórico e Real. Notação A, B, C, D, significam perdas de trabalho útil devido as perdas de energia na fase expansão (A), ganho de calor (B), rejeição de calor (C) e admissão/ escape (D). PMS: Ponto Morto Superior e PMI: Ponto Morto inferior (Menezes, 2009).

2.1.2. Diagrama PxV do Ciclo Dual Diesel

A maioria dos motores opera em um ciclo muito mais próximo do ciclo dual do que do ciclo diesel, tal como mostrado na Figura 2.2 abaixo.

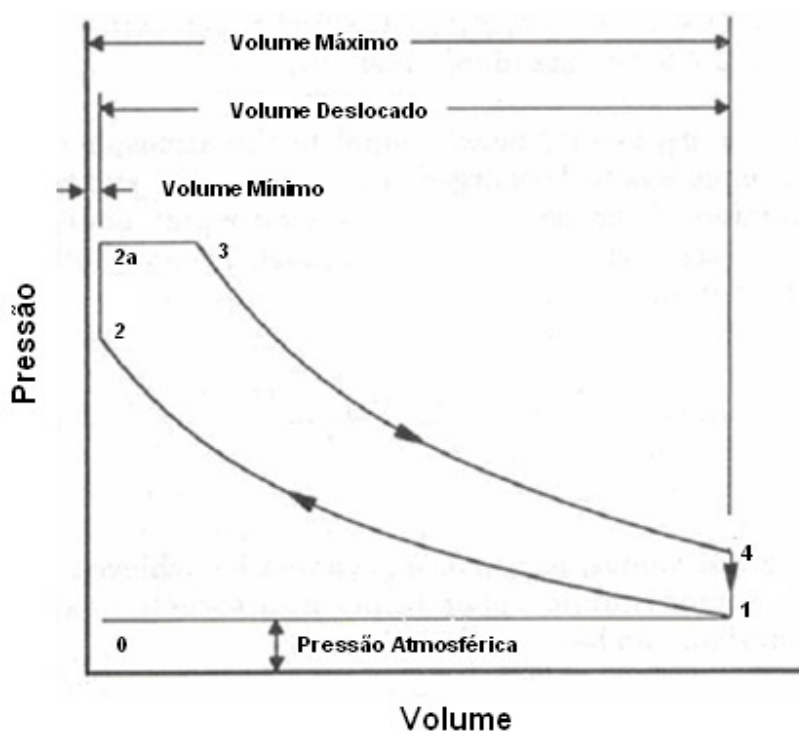


Figura 2.2. Diagrama Pressão x Volume do Ciclo Dual Diesel (Heywood, 1988)

2.1.3. Processo de Combustão nos Motores Diesel

A combustão nos motores diesel ocorre em etapas que envolvem processos físicos e químicos. Os processos físicos causam o aumento da temperatura do ar, decorrente da etapa de

compressão. Os processos químicos conduzem a auto-ignição do combustível com liberação de energia para os gases, os quais produzem trabalho através da expansão contra o êmbolo.

O motor diesel é composto de um ou vários cilindros, dentro do qual se movimenta um pistão. A combustão ocorre na câmara formada pelo conjunto cilindro-pistão. O pistão movimenta-se dentro do cilindro, variando o volume interno da câmara, desde o ponto morto inferior (PMI) - quando o volume interno do cilindro atinge seu máximo e inicia-se a compressão. A temperatura do ar dentro do cilindro aumenta substancialmente devido à compressão do ar. O ponto morto superior (PMS) – ocorre quando o volume interno da câmara de combustão atinge seu mínimo.

A Figura 2.3, mostra as etapas da injeção de combustível no interior da câmara de combustão, a formação de gotículas e a completa combustão do combustível injetado.

O combustível é injetado sob alta pressão nos bicos injetores, iniciando-se a injeção pouco antes do pistão atingir o PMS e nebuliza-se em pequenas gotículas no interior da câmara de combustão entrando em contato com o ar quente que foi admitido em seguida comprimido no curso de compressão. As gotículas recebem calor do ar vaporizam e inflamam-se dando início ao processo de combustão. A taxa de combustão é controlada pela taxa de injeção de combustível, ou seja, pela vazão de combustível que é injetado.

O processo de nebulização é uma etapa importante, pois é responsável pela formação de área superficial de transferência de calor e massa, processos fundamentais para a vaporização do combustível.

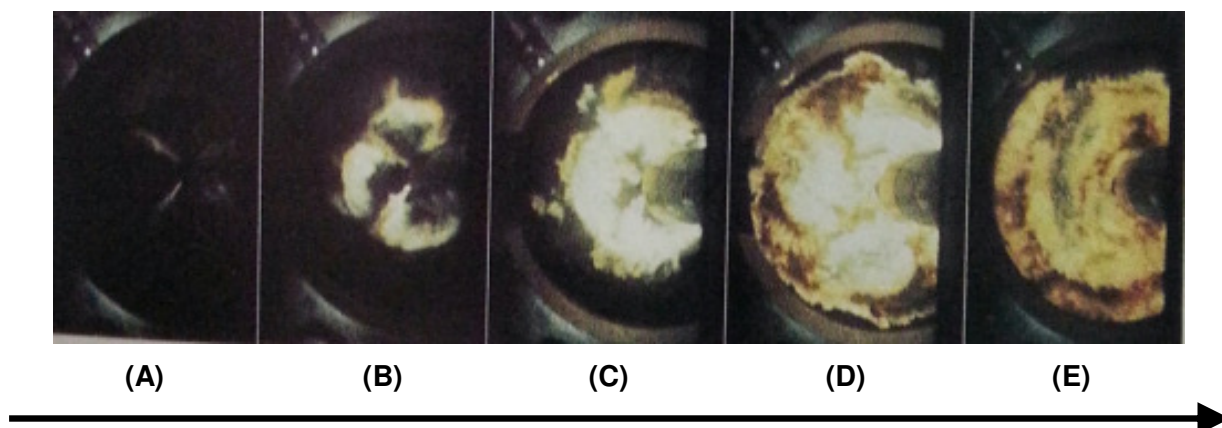


Figura 2.3. Desenvolvimento do Processo de Combustão em Motores Ciclo Diesel de Injeção Direta (Heywood, 1988).

Quando o combustível é injetado na câmara ele utiliza o calor sensível do ar para aumentar a temperatura e vaporizar, por isso a combustão não ocorre instantaneamente, pois existe um intervalo de tempo entre a injeção e o início da ignição, que é determinado pelas características físico-químicas do combustível (entalpia de vaporização e estrutura molecular). A reação de combustão tem início porque o combustível vaporizado forma a mistura ar combustível dentro da faixa de inflamabilidade, que se oxida rapidamente, causando uma grande liberação de energia e aumento da pressão no interior da câmara de combustão.

O tempo de retardo da ignição é uma variável importante no processo de combustão nos motores ciclo diesel, pois tem grande influência na etapa de liberação de calor, interfere na partida a frio e na emissão de gases. Atrasos da ordem de milissegundos são inerentes ao processo de combustão do diesel.

2.1.4. Classificação dos Motores de Ignição por Compressão Conforme Projeto da Câmara de Combustão

Os motores de ignição por compressão podem ser classificados em dois grupos de acordo com o projeto da câmara de combustão:

- Motores de Injeção Direta: esse tipo de motor possui uma única câmara de combustão, logo o combustível é injetado diretamente acima da cabeça do pistão por um bico injetor com um ou vários furos (diâmetros de 0,1 a 0,3 mm) direcionados segundo um ângulo apropriado. O injetor trabalha com pressões elevadas para conseguir a nebulização adequada, do combustível no ar. O jato em alta pressão quase no final do tempo de compressão forma uma neblina composta de gotas minúsculas que se inflama em primeiro lugar nas suas extremidades. A formação da mistura é acelerada e melhorada quando o ar de combustão movimenta-se rapidamente em relação à névoa do combustível. As válvulas de admissão são projetadas para que o ar gere um turbilhonamento ao entrar na câmara, com a finalidade de tornar a mistura (ar +combustível) mais homogênea. Os motores modernos utilizam esse tipo de injeção devido ao seu melhor rendimento térmico.

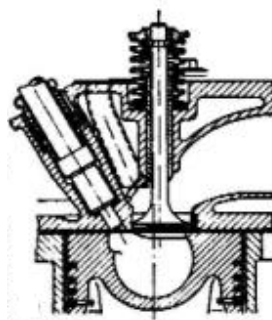


Figura 2.4. Vista em Corte do Sistema de Injeção Direta: O jato de combustível é direto no pistão. Fonte: www.joseclaudio.eng.br. Acesso: 20 mar. 2011

- Motores de Injeção Indireta: nesse tipo de motor a câmara de combustão é subdividida em pré-câmara e câmara principal. O combustível é injetado na pré-

câmara a qual se comunica com a câmara principal através de um canal. O combustível em sua totalidade é injetado na antecâmara. As paredes da antecâmara, sobretudo o ponto de impacto do jato entrante, são mantidas com a temperatura mais elevada possível, pois desta forma auxiliam na preparação e ignição do combustível. Embora tenham a vantagem de produzir menos componentes de gases poluentes (CO, NOx); devido à passagem por canais o rendimento térmico desse tipo de motor é mais baixo do que o motor de injeção direta, aumentando o consumo de combustível.

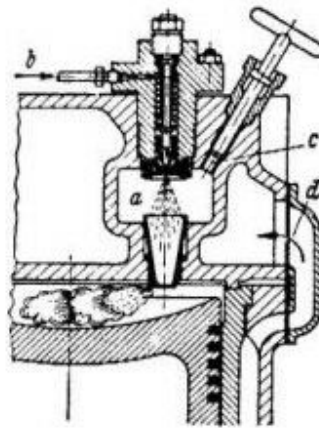


Figura 2.5. Vista em Corte do Sistema de Injeção Indireta. Fonte: www.joseclaudio.eng.br. Acesso: 20 mar. 2011

Na Figura 2.5, parte inferior da antecâmara a é quente, pois se encontra separada das paredes refrigeradas. b = tubulação de combustível; c = ignição auxiliar para partidas a frio; d = passagem da água de refrigeração para o cabeçote.

2.2. Os Combustíveis

A partir do surgimento dos primeiros automóveis no final do século XIX, diversos combustíveis foram utilizados como fonte de energia. Entre eles se pode citar: o gás natural, carvão mineral pulverizado, os álcoois, óleos vegetais, óleo combustível e os derivados de petróleo. Como já citado no Capítulo 1 os derivados de petróleo sempre se sobressaíram em relação aos outros combustíveis líquidos devido a sua abundância em praticamente todo o mundo, seu alto poder calorífico e seu custo ser relativamente baixo.

2.2.1. Óleo Diesel

O óleo diesel é composto predominantemente por hidrocarbonetos alifáticos contendo de 8 a 24 átomos de carbono na cadeia. Durante seu processo de produção, o diesel é destilado do petróleo em temperaturas na faixa de 130 °C a 370°C. Comercialmente, a composição do diesel varia de acordo com a origem do petróleo e com os variados processos de refino.

No Brasil o consumo de óleo diesel pode ser dividido em 03 grandes setores: o de transportes que representa mais de 75% do total consumido, o agropecuário representando 16% e o de transformação que utiliza o produto como na geração de energia elétrica e corresponde a 5% do total de diesel consumido no país. (Fonte: Agência Nacional do Petróleo - ANP, 2011).

O óleo diesel, como combustível de maior consumo no Brasil, é também o que mais contribui para a poluição atmosférica, tornando-se necessário a melhora da sua qualidade, como um importante passo para a redução dos contaminantes.

A produção nacional de óleo diesel é uma das maiores do mundo, tendo um consumo em torno de 36 bilhões de litros/ano. Devido ao grande consumo, tornou-se necessário ampliar a faixa de destilação, incorporando ao óleo diesel frações leves e pesadas de produtos (como querosene e óleo combustível) que destilam próximo à faixa do diesel, também existem atualmente unidades de hidrogenação para aumentar a produção de diesel. (Fonte: ANP, 2011).

O governo brasileiro decidiu adicionar 5% de biodiesel ao diesel visando deslocar a matriz energética brasileira e reduzir o consumo de óleo diesel no país.

No Brasil, a densidade do óleo diesel varia na faixa de 820 a 880 kg/m³, pois o petróleo é rico em frações pesadas, rico em impurezas, portanto com alta densidade e viscosidade. Esse tipo de petróleo apresenta um custo-benefício melhor quando transformado em substância de menor valor agregado, com baixa cetanagem, grandes cadeias carbônicas, como o óleo combustível e o piche. O petróleo leve possui menos impurezas, portanto, é mais rentável, devido ao menor custo de extração e obtenção dos principais combustíveis.

A Tabela 2.1 mostra as principais propriedades físico químicas do diesel utilizado no Brasil, segundo a Resolução ANP N°42.

Tabela 2.1. Propriedades Típicas do Diesel no Brasil.

Características	Unidades	Limites
Massa específica a 20°C	kg/m ³	820 a 880
Viscosidade a 40°C	mm ² /s	2 a 5
Ponto de Fulgor, mínimo	°C	38
Enxofre Total	mg/kg	50 a 1800
Poder Calorífico Inferior	MJ/kg	42,65
Número de Cetano		42 a 46
Destilação		
10% vol., recuperados	°C	-----
50% vol., recuperados		245 a 310
85% vol., recuperados, máx.		360 a 370
90% vol., recuperados		360 máximo

Fonte: Adaptado da Resolução ANP N°42

2.2.2. Óleos Vegetais

A utilização do óleo vegetal como combustível é conhecida desde o início do século XX, quando Rudolf Diesel construiu um protótipo que utilizava óleo de amendoim in natura. Depois

sua utilização ressurgiu durante as guerras mundiais como força motriz para movimentar tanques de guerra (D`Arce, 2005).

Os óleos vegetais são formados predominantemente por triglicerídeos (também chamados triacilgliceróis, ou triacilglicerídeos), que são compostos formados a partir de ácidos carboxílicos de cadeia longa (ácidos graxos) e glicerol. Além dos triglicerídeos os óleos vegetais apresentam em sua composição grandes quantidades de ácidos graxos livres tais como: fosfolipídios, esteróis e tocoferóis. Os ácidos graxos constituintes dos triglicerídeos mais comuns apresentam 12, 14, 16 e 18 átomos de carbonos. A Tabela 2.2 apresenta a composição de ácidos graxos e alguns óleos e gorduras.

Tabela 2.2. Composição de ácidos graxos e alguns óleos e gorduras.

Composição em Ácidos Graxos (% massa)							
	Láurico (12:0) C ₆ H ₂₄ O ₂	Mirístico (14:0) C ₁₄ H ₂₈ O ₂	Palmítico (16:0) C ₁₆ H ₃₂ O ₂	Esteárico (18:0) C ₁₈ H ₃₄ O ₂	Oléico (18:1) C ₁₈ H ₃₂ O ₂	Linoléico (18:2) C ₁₈ H ₃₀ O ₂	Linolênico (18:3) C ₁₈ H ₃₀ O ₂
Algodão	---	1,5	22	5	19	50	---
Amendoim	---	0,5	6,0-11,4	3,0-6,0	42,3-61	13-33,5	---
Babaçu	44-45	15-16,5	5,8-8,5	2,5-5,5	12-16	1,4-2,8	---
Coco	44-51	13-18,5	7,5-11	1-3	5-8,2	1,0-2,6	---
Dendê	---	0,6-2,4	32-45	4,0-6,3	38-53	6-12	---
Girassol	---	---	3,6-6,5	1,3-3	14-43	44-68	---
Linhaça	---	---	6	4	13-37	5-23	26-58
Milho	---	---	7	3	43	39	---
Oliva	---	1,3	7-16	1,4-3,3	64-84	4-15	---
Soja	---	---	2,3-11	2,4-6	23,5-31	49-51,5	2-10,5
Sebo	---	3-6	25-37	25-37	26-50	1-2,5	---

Fonte: Rinaldi et al, 2007

Os óleos vegetais possuem poder calorífico e índice de cetano próximos ao diesel, mas devido sua elevada viscosidade, alta densidade, baixa volatilidade e o conteúdo de ácidos graxos livres, quando utilizados diretamente em motores acarretam problemas tais como:

combustão incompleta, diminuição na eficiência de lubrificação, redução da durabilidade do motor. (Menezes, 2009)

O principal problema a ser enfrentado quando se utilizam óleos vegetais como combustíveis é a reatividade do combustível não queimado no cilindro e no cárter, onde o combustível bruto e parcialmente queimado pode aparecer de várias maneiras. O combustível não queimado ou parcialmente queimado no cilindro é a causa da formação de crostas no bico injetor. Uma maneira de reduzir esse acúmulo de borra na parede do cilindro e a diminuição da vida útil do bico injetor é reduzir a viscosidade do combustível, melhorando seu desempenho. Um combustível bem atomizado, completamente queimado, não causa nenhum dano em peças do motor. (Pianovski Jr., 2002).

Na Alemanha é comercializado um kit que aquece o óleo vegetal até que o mesmo atinja a viscosidade para qual o sistema de injeção está calibrado para trabalhar, com isso soluciona-se o problema de formação de crostas no bico injetor.

2.2.3. Etanol

As crises do petróleo que ocorridas nas décadas de 70 e 80, provocaram sérios problemas à economia mundial e obrigaram os países a buscarem combustíveis alternativos. No Brasil as consequências das crises foram muito fortes, pois o país importava 85% do petróleo consumido. Diante da elevação dos preços do petróleo que causou o aumento da dívida externa brasileira, o país optou por desenvolver outros combustíveis para reduzir seu endividamento.

O governo militar através de decretos decidiu investir na criação de uma indústria voltada para a produção de um combustível renovável visando reduzir a dependência do país pelo petróleo, e o “etanol” foi o produto escolhido.

No Brasil, praticamente a totalidade do açúcar e do etanol são produzidos a partir da cana-de-açúcar e alguns fatos justificam isso:

A tradição de quatro séculos de plantio e utilização da cana-de-açúcar;

Grandes extensões de terras para o plantio ainda não utilizadas;

A mesma matéria prima pode ser utilizada para a produção de açúcar ou etanol;

A composição química da cana é variável quantitativamente devido à variedade da cana, região de cultivo, clima, solo, adubação, etc. Porém qualitativamente ela é semelhante. A cana-de-açúcar pode ser colhida manualmente ou através de colheita mecanizada; após essa etapa ela é transportada por via rodoviária até a unidade de processamento. Ao chegar à usina a matéria-prima é pesada e após a pesagem são retiradas amostras do material, sendo enviadas para análise no laboratório. O descarregamento da cana normalmente é feito de maneira mecanizada, podendo ser descarregada diretamente na mesa da moenda ou utilizar um sistema de armazenamento. O sistema de armazenamento está em desuso dando-se preferência pelo armazenamento breve sobre rodas (rodotrem).

A lavagem é a primeira etapa do processo industrial, apesar de que atualmente a mesma está caindo em desuso devido à perda de açúcar que a lavagem acarreta principalmente quando a colheita é mecanizada. O transporte da cana é realizado através de esteiras ou correias transportadoras. A extração do caldo para produção de açúcar ou etanol é tradicionalmente realizada pelo processo de moagem, no qual a cana-de-açúcar passa por uma moenda ou por um difusor. A moenda é uma unidade esmagadora composta por um conjunto de ternos, cada terno formado por 3 cilindros dispostos de tal modo que os seus centros formam praticamente um triângulo isósceles. Os cilindros inferiores rodam no mesmo sentido e o cilindro superior roda no sentido contrário aos inferiores.

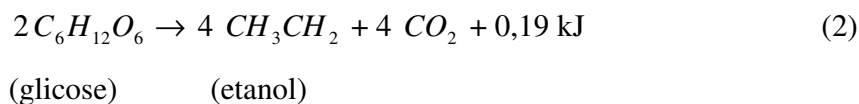
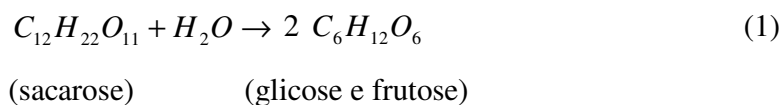
O princípio de funcionamento de um difusor é a difusão, fenômeno pelo qual duas soluções de concentrações diferentes, separadas por uma membrana permeável, após um determinado tempo as soluções se misturam e adquirem a mesma concentração. As células do parênquima da cana postas em contato com a água quente funcionam como paredes semipermeáveis e a sacarose, nelas contida, é extraída por um processo de troca físico-química causado por diferença de pressão osmótica e difusão molecular entre caldo e o líquido de extração. (Camargo et al, 1990). O difusor é o método de extração de caldo mais eficiente do que a moenda, tendo uma eficiência de extração de 98% sendo que a moenda tem uma eficiência de 96%.

O caldo após sair do processo de extração passa por algumas etapas de tratamento que tem como objetivo principal retirar as impurezas minerais e purificar o caldo. Encontram-se algumas tendências quanto ao tipo de tratamento do caldo misto. Algumas unidades industriais

eliminaram-no, enviando-o diretamente para a destilaria após o seu peneiramento. No entanto outras unidades fazem a pasteurização do caldo aquecendo-o a 105°C e resfriando-o rapidamente a 32°C, após o peneiramento; outras usinas optam por aquecê-lo a 105°C e decantação, após o peneiramento, tendo ou não “a calagem”, processo no qual se adiciona leite de cal ao caldo. Em seguida o caldo é aquecido a uma temperatura ao redor de 100 °C até 105 °C. (Camargo et al, 1990).

O caldo, após tratamento térmico e químico é posto em repouso para que haja remoção de impurezas tanto por floculação quanto por sedimentação. O lodo proveniente da decantação é levado para a filtração onde ocorre a separação do caldo e do precipitado. O caldo que sai da filtração é resfriado e enviado para a fermentação.

O processo de fermentação alcoólica consiste na transformação da sacarose em etanol, gás carbônico e energia, sob ação enzimática de leveduras e é dividido em duas etapas.



Após fermentar o vinho é encaminhado para a destilaria onde passará pelo aparelho de destilação, que é um conjunto de colunas com seus respectivos condensadores e acessórios, de maneira a se produzir etanol dentro de especificações pré-estabelecidas. A Figura 2.6 mostra a vista frontal do aparelho de destilação.

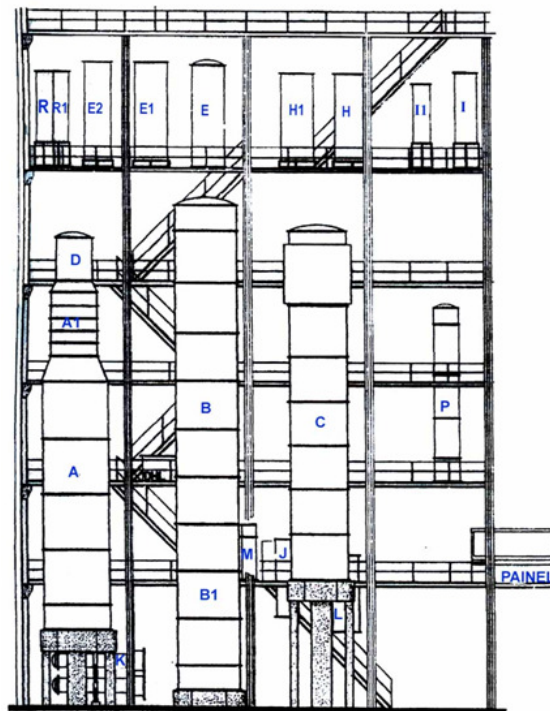


Figura 2.6. Aparelho de Destilação (adaptado de Camargo et al, 1990)

O tronco de destilação C pode ser utilizado tanto para destilação de etanol hidratado que possui teor alcoólico de 95,1 a 96% em volume e teor de água de 4,9% ou etanol anidro com teor alcoólico de 99,6% em volume e teor de água de 0,4% em volume.

Através dos processos de destilação e retificação, o produto final obtido é sempre uma mistura hidroalcoólica. A explicação para este fenômeno é a formação de uma mistura binária etanol-água, denominada mistura azeotrópica. A mistura azeotrópica, quando submetida ao processo de destilação à pressão normal (1 atm), vaporiza-se a temperatura constante comportando-se como se fosse uma substância pura.

Para livrar o etanol do resto da água desidratando-o, é necessário introduzir aos processos normais de destilação um artifício, que possa fracionar a mistura azeotrópica. O etanol anidro obtido pelos processos industriais de desidratação possui um teor alcoólico em volume variável de 99,5 – 99,9%.

Existem dois processos para se produzir etanol anidro: através de uma terceira coluna de destilação (coluna C) ou pelo processo de peneira molecular. Na coluna C é injetado o etanol hidratado proveniente da coluna B. Na parte superior da coluna C encontra-se o desidratante (atualmente as usinas utilizam o ciclohexano), o qual captura a água do etanol hidratado resultando como produto de fundo o etanol anidro. A fase superior da coluna C é rica em desidratante e água sendo enviados para a Coluna P, onde ocorrerá a evaporação da água e o ciclohexano será novamente enviado para a coluna C retornando-o ao processo. O fundo da coluna P é uma mistura de água e etanol o qual é enviada para a coluna B retornando ao processo.

A tecnologia de peneiras moleculares baseia-se no princípio de diferentes potenciais de passagem de diferentes moléculas através de uma membrana permeável. (Camargo et al, 1990). Peneiras moleculares são substâncias duras, granulares, esféricas ou cilíndricas fabricadas através de extrusão. São classificadas de acordo com o tamanho de seus poros que determinarão a área de passagem dos produtos tratados. A peneira molecular recebe o etanol hidratado proveniente da Coluna B e a separação etanol-água ocorre por diferença de potenciais, pois as moléculas de água são menores que a de etanol, sendo então estas adsorvidas pela peneira molecular enquanto o etanol “passa direto” pela peneira deixando a água para trás (Camargo et al, 1990). A peneira molecular trabalha em ciclos de 8 em 8 horas, ou seja, após 8 horas realizando a captura da água a mesma passa por um processo de regeneração, onde se injeta vapor que evapora as moléculas de água capturadas durante a produção do etanol anidro, podendo-se assim iniciar um novo ciclo. A Tabela 2.3 mostra a composição típica do etanol anidro e hidratado comercializados no Brasil segundo Resolução ANP 07 de 2011.

Tabela 2.3. Composição Típica do Etanol Anidro e Hidratado no Brasil.

Características	Unidades	Limites	
		Etanol Anidro	Etanol Hidratado
Massa específica a 20°C	kg/m ³	791,5 máx	807,6 a 811,0
Teor de Etanol, mín.	% volume	98	94,5
Teor de Água, máx.	% volume	0,4	4,9
Poder Calorífico Inferior	MJ/kg	27,42	24,91
Teor Alcoólico	% volume	99,6	Min 95,1 à Max 96,0
Teor de Hidrocarbonetos, máx.	% volume	3	
Teor de Metanol, máx.	% volume	1	
Resíduo por Evaporação, máx.	mg/100ml	5	

Fonte (Adaptado: ANP N° 07, 2011)

2.2.4. Biodiesel

Biodiesel é definido como um derivado monoalquil éster de ácidos graxos de cadeia longa, proveniente de óleos vegetais ou ácidos graxos.

Ésteres de óleos vegetais apresentam características muito próximas ao óleo mineral.

No processo de transesterificação, a gordura animal ou óleo vegetal reage com álcool na presença de um catalisador formando um éster. Na transesterificação de óleos vegetais, um triacilglicerídeo reage com álcool (metanol ou etanol) na presença de um catalisador (ácido, básico, biológico ou metálico) produzindo uma mistura de ésteres alquílicos de ácidos graxos e glicerol, com mostrado na Figura 2.7. O processo gera três reações reversíveis, na qual mono e diacilglicerídeos são formados com intermediários. A estequiometria da reação de transesterificação é necessária uma proporção molar 3:1 de álcool por triglicerídeo, porém devido ao caráter reversível da reação o agente transesterificante (metanol ou etanol) é adicionado em excesso, favorecendo, o aumento do rendimento dos ésteres.

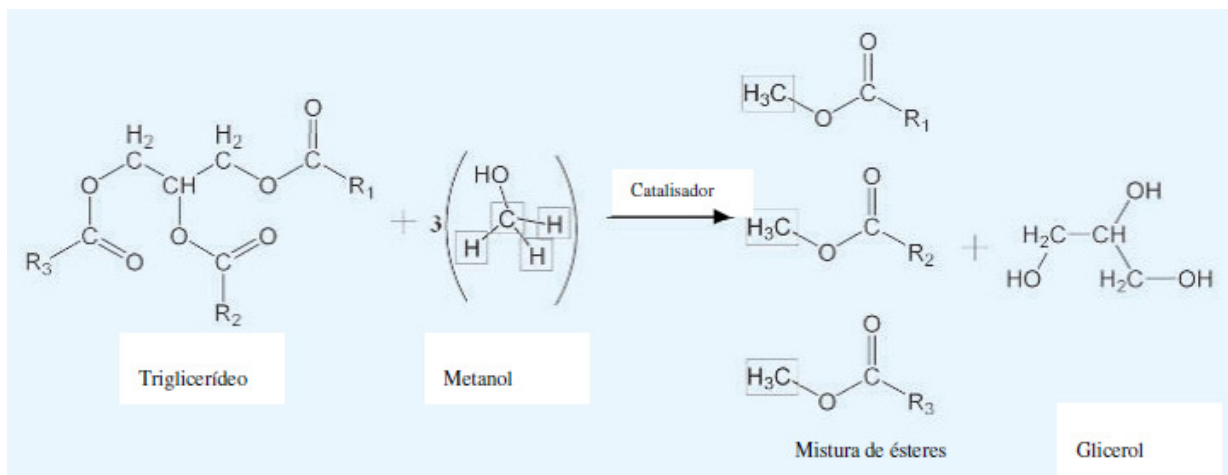


Figura 2.7: Reação de Transesterificação para Produção de Biodiesel (Menezes, 2009)

Pode-se dizer que o biodiesel tem a mesma função do etanol, pois o desenvolvimento do etanol foi impulsionado pela necessidade de reduzir o consumo de gasolina nos motores de ignição por centelha. O biodiesel também teve incentivo do governo brasileiro para substituir o diesel nos motores de ignição por compressão, com a vantagem de não serem necessárias grandes modificações mecânicas nos motores e não alterarem o rendimento energético (MIC I, 1985).

Quase todo o biodiesel produzido mundialmente é do tipo metílico, no Brasil apesar da já existente indústria do etanol e da grande vocação agrícola brasileira, o país também utiliza metanol importado, pois esse é mais barato que o etanol.

A Tabela 2.4 mostra as principais propriedades físico químicas do biodiesel utilizado no Brasil segundo Resolução ANP 07 de 2008.

Tabela 2.4. Propriedades Típicas do Biodiesel no Brasil

Características	Unidades	Limites
Massa específica a 20 °C	kg/m ³	820 a 880
Viscosidade	mm ² /s	3,6 a 6,0
Teor de Água, máx	mg/kg	500
Ponto de Fulgor, mínimo	°C	100
Poder Calorífico Inferior	kcal/kg	9.440
Enxofre Total, máx.	mg/kg	50 a 1800
Teor de Éster, mín.	% massa	96,5
Glicerol Total	% massa	0,25
Metanol ou Etanol, máx.	% massa	0,2

Fonte (Adaptado: ANP N° 07, 2008)

O biodiesel é também um aditivo lubrificante com número de cetano mais alto do que o diesel e baixo teor de enxofre,

A Lei n° 11.097, de 13 de janeiro de 2005, introduziu o biodiesel na matriz energética brasileira e estabeleceu a obrigatoriedade de adição de um percentual mínimo de biodiesel ao diesel comercializado em qualquer parte do território nacional. Esse percentual atingiu a meta de 5% em 2010. O marco regulatório do uso comercial do biodiesel no Brasil considerou a diversidade das matérias primas disponível no país, a garantia do suprimento e da qualidade e competitividade frente aos demais combustíveis.

Abaixo estão representados os possíveis caminhos para a produção de biodiesel segundo o Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP em Planejamento Estratégico Tecnológico e Logístico para o Programa Nacional de Biodiesel:

A Figura 2.8 mostra as possíveis rotas para produção de biodiesel tendo como matérias primas grãos ou sebo animal, realçando as unidades industriais envolvidas em cada processo produtivo. As rotas 4 e 6 são as mais economicas devido a redução do custo logístico, pois esses modelos consideram que a unidade de produção esteja próximo da matéria prima.

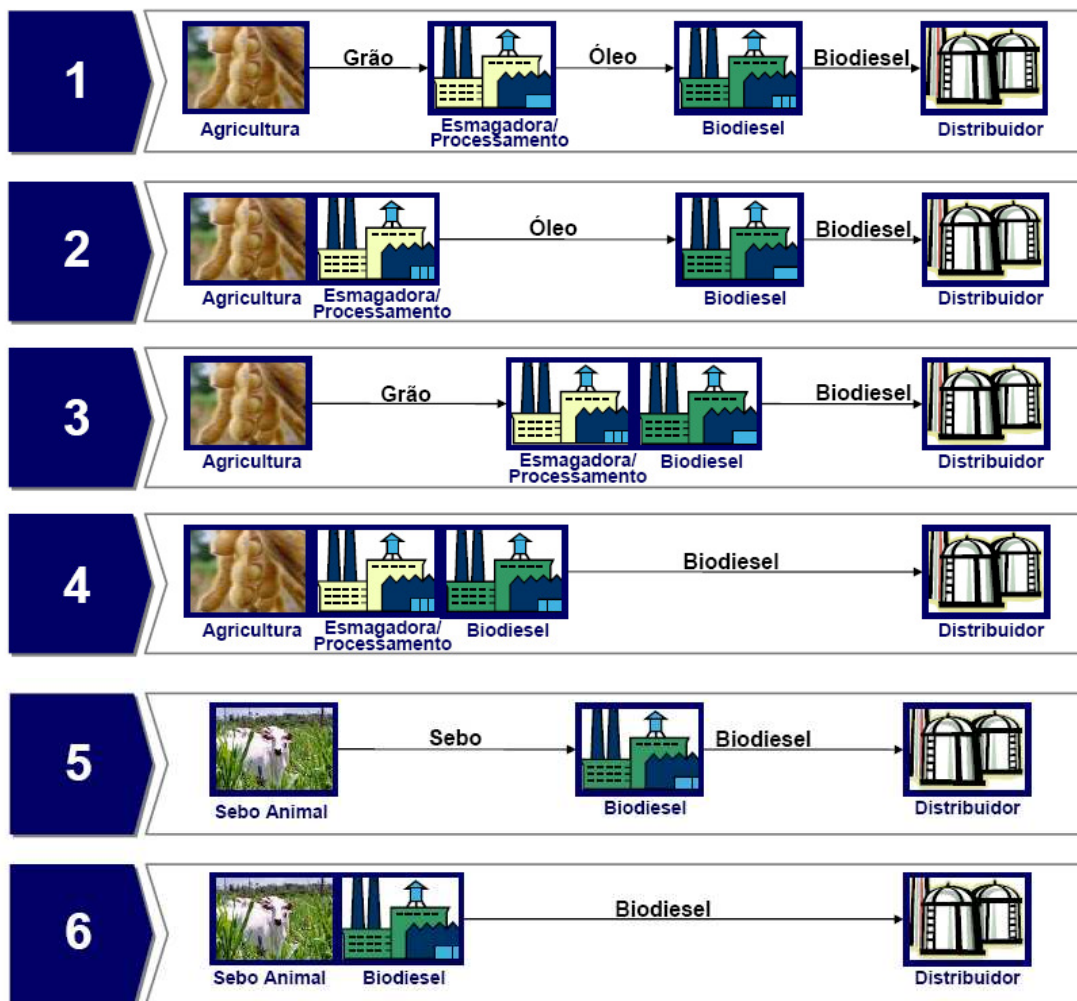


Figura 2.8. Rotas para a Produção de Biodiesel (IBP, 2007)

De acordo com os dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Bicompostíveis - ANP a produção de biodiesel totalizou aproximadamente 2,3 milhões metros cúbicos no ano de 2011, em função das entregas pelos produtores à distribuidora e da formação de estoque. Para uma capacidade instalada, de aproximadamente 3,6 milhões de metros cúbicos anuais.

É relevante o fato de o óleo de soja ser a matéria-prima mais utilizada na fabricação do biodiesel, seguida pelo sebo (gordura animal) e do óleo de algodão. Em dezembro de 2010 segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Bicompostíveis - ANP, a participação

ficou em 75,22% para óleo de soja, 20,58% para sebo, 2,41% óleo de algodão e 1,79% para outras matérias-primas.

2.2.5. Propriedade dos Combustíveis

De um modo geral, a avaliação da qualidade dos combustíveis para motores diesel requer a determinação analítica das sete principais propriedades dos combustíveis:

- Número de cetano;
- Densidade;
- Viscosidade;
- Tensão superficial;
- Curva de destilação;
- Pressão de vapor;
- Ponto de Fulgor;

O número de cetano define o poder de auto-ignição de um combustível quando esse é injetado na câmara de combustão, sendo que seu valor condiciona o desempenho do motor, refletindo-se de modo especial na partida a frio, no ruído e na taxa de elevação da pressão da câmara de combustão. É determinado em um motor padrão CFR (Corporate Fuel Research Committee) por comparação entre dois hidrocarbonetos de referência (n-hexadecano ou cetano, NC = 100 e alfa-metilnaftaleno, NC = 0) através do procedimento padronizado pela ASTM D613, que será discutido com capítulo 4.

A densidade é uma propriedade importante do combustível, pois o sistema de injeção (bomba e bicos injetores) é ajustado para fornecer um volume pré-determinado de combustível.

A viscosidade é a medida de resistência ao escoamento oferecida pelo combustível. Esta propriedade influencia no processo de nebulização do combustível e no desgaste do motor. Muito baixa viscosidade pode causar desgaste prematuro das partes auto-lubrificadas no sistema de

injeção, vazamento na bomba de combustível, atomização incorreta do combustível no interior da câmara.

A tensão superficial quantifica a energia necessária para romper as forças intermoleculares do líquido e mover uma molécula do seu interior até a sua interface, que é a superfície de separação entre o líquido e o ar ou entre dois líquidos imiscíveis. Tal como a viscosidade esse parâmetro também influencia no tamanho das gotículas de um combustível durante sua nebulização.

A curva de destilação consiste em destilar um volume predeterminado do combustível ou fração em uma pressão predeterminada e acompanhar a temperatura. O resultado é apresentado por uma curva do volume evaporado versus temperatura. Elas podem ser feitas na pressão atmosférica ou sob vácuo.

A volatilidade de uma substância é o potencial que essa possui de passar para o estado de vapor, em outras palavras, as substâncias mais voláteis de uma mistura são aquelas que no estado puro tem maior pressão de vapor (maior tendência de escapar do estado líquido para o estado vapor).

Outra característica importante é o ponto de fulgor o qual indica a temperatura mínima na qual é produzida uma mistura ar/vapor do combustível inflamável, acima da superfície livre do combustível armazenado.

2.2.6. Mistura Biodiesel, Diesel e Etanol em Motores Ignição por Compressão.

Caetano (2003) estudou a temperatura de separação de fase para mistura líquido-líquido entre vários combustíveis como: diesel, biodiesel e etanol, onde se conclui que a presença de etanol em qualquer proporção no biodiesel não causa a separação de fases nas condições climáticas do Brasil.

De acordo com Silva (2005) a maior dificuldade de se misturar diesel e etanol é a tendência de separação de fases a baixas temperaturas. Para solucionar esse problema estudou-se formulação de aditivos que pudessem manter as misturas homogêneas mesmo a baixas

temperaturas. O comportamento da mistura diesel etanol varia em função do teor da quantidade de água e do teor de etanol.

Solubilidade é a capacidade de uma substância de se dissolver em outra e segundo Caetano (2003) o etanol possui solubilidade limitada em relação ao diesel.

Fernando e Hanna (2004) formularam um diagrama de fases entre o diesel, biodiesel e etanol com o objetivo estudar a compatibilidade entre misturas de diesel, biodiesel e etanol. Os autores também estudaram os efeitos da mistura de etanol em diferentes tipos de diesel, em diferentes proporções de etanol e em temperaturas variadas. Para as composições onde não houve separação de fases entre as misturas de combustíveis estudou-se a lubricidade, o número de cetano, o teor de enxofre e o poder calorífico.

Park, Kim e Lee (2009), estudaram a mistura de diesel, biodiesel e etanol hidratado onde se verificou a separação de fases mostrada na Figura 2.9 Observa-se que quando maior a quantidade de biodiesel adicionada na mistura sem alterar a quantidade de etanol, essa se torna homogênea.


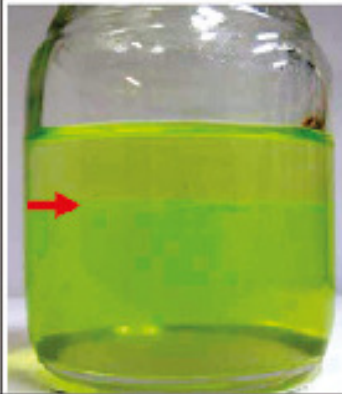
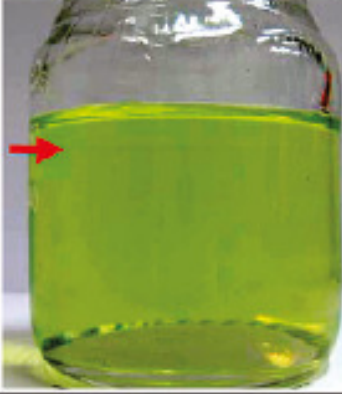



Porcentagem, vol. %			Tempo decorrido em horas	
Diesel	Etanol	Bio diesel	0	48
70	30	0		
65	30	5		
60	30	10		

Figura 2.9. Estudo de Miscibilidade Diesel, Biodiesel e Etanol Hidratado (adaptado de Park, Kim e Lee (2009))

Segundo Cheenkachorn e Fungtammassan (2010), 84% de diesel, 4,75% de etanol anidro, 0,25% de etanol hidratado e 11% de biodiesel são proporções adequadas para ser utilizar como combustível, pois essa mistura respeita as propriedades físico químicas estabelecidas como padrão para o diesel. Em seguida estudou-se o potencial de se utilizar o biodiesel como agente emulsificante para em misturas de diesel/ etanol. Os resultados são apresentados nas Tabelas 2.5 e 2.6.

Tabela 2.5. Mistura Diesel, Biodiesel e Baixas Concentrações de Etanol.

Porcentagem, vol. %					
Componentes			Emulsificante		
Diesel	Etanol Hidratado	Etanol Anidro	Biodiesel	Octanol	Resultados
98,0	0,1	0,1	1,8	0	Mistura homogênea
96,2	0,2	0,2	3,5	0	Mistura homogênea
94,3	0,3	0,3	5,1	0	Mistura homogênea
92,6	0,3	0,3	6,7	0	Mistura homogênea
90,9	0,4	0,4	8,3	0	Mistura homogênea

Fonte: Adaptado de Cheenkachorn e Fungtammassan (2010)

Tabela 2.6. Mistura Diesel, Biodiesel de Etanol.

Porcentagem, vol. %					
Componentes			Emulsificante		
Diesel	Etanol Hidratado	Etanol Anidro	Biodiesel	Octanol	Resultados
82,5	0,50	4,50	12,5	0	Mistura homogênea
84,0	0,25	4,75	11,0	0	Mistura homogênea
82,5	0,25	4,75	12,5	0	Mistura homogênea
80,0	0,50	4,50	15,0	0	Mistura homogênea

Fonte: Adaptado de Cheenkachorn e Fungtammassan (2010)

Outros pesquisadores vêm estudando a miscibilidade entre diesel, biodiesel e etanol anidro ou etanol hidratado e após encontrar a relação ideal de “blending” passam a utilizar testes práticos em motores de ignição por compressão, tal como feito Kwanchareon, Luengnaruemitchai e Jain-in (2007) onde encontrou-se através da formulação de um diagrama de mudança de fases que a

mistura ideal para ser utilizada em motores era 80% diesel, 15% biodiesel e 5% etanol anidro, pois essa mistura apresentava-se homogênea. Em seguida foram realizados experimentos para caracterizar as propriedades físico químicas dos combustíveis tais como: densidade, número de cetano, ponto de fulgor, etc. Os autores realizaram ensaios de emissões gasosas para várias misturas de combustíveis em um mesmo motor ciclo diesel quatro tempos de cilindro único com várias cargas e compararam os resultados das emissões gasosas do motor operando somente com diesel.

A adição de biodiesel e etanol ao diesel reduziu as emissões de CO e HC e aumentaram as emissões de NOx em altas cargas do motor, tal como representado nas Figuras 2.10, 2.11 e 2.12.

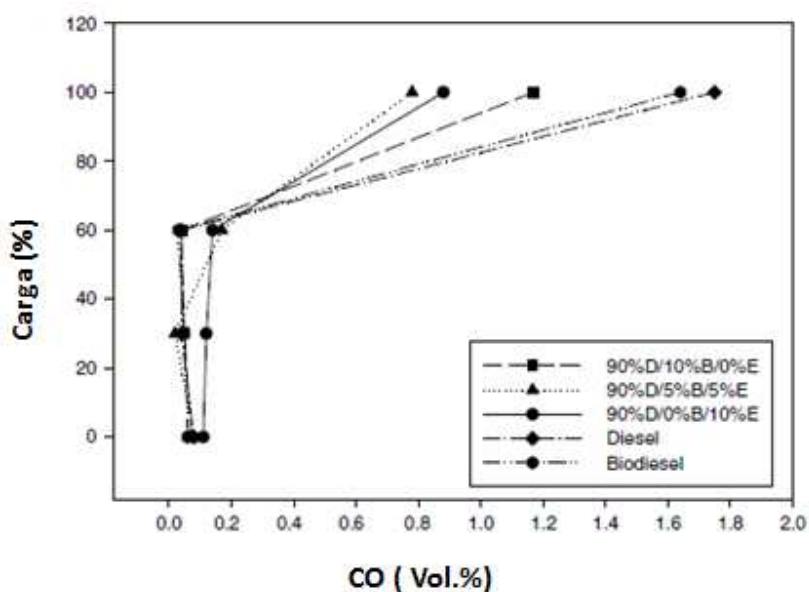


Figura 2.10. Resultado das Emissões de CO em Motor Diesel Operando em Várias Cargas (adaptado de Kwanchareon, Luengnaruemitchai e Jain-in, 2007)

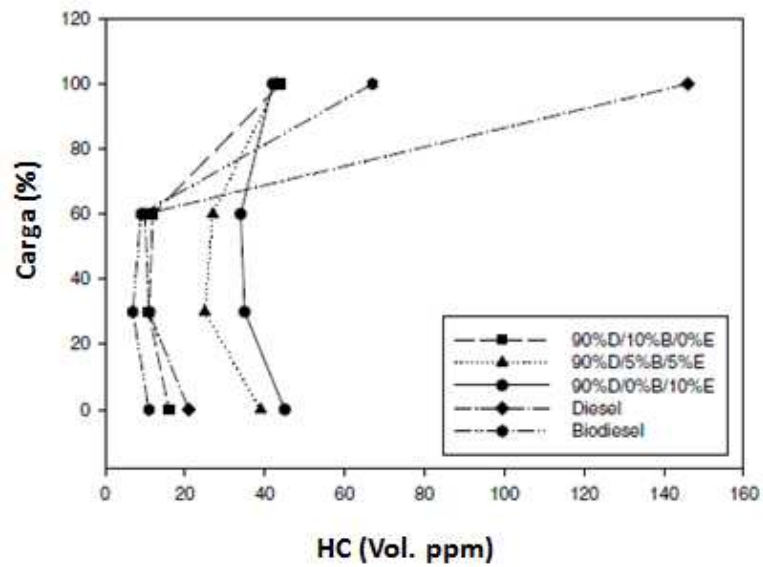


Figura 2.11. Resultado das Emissões de HC em Motor Diesel Operando em Várias Cargas (adaptado de Kwanchareon, Luengnaruemitchai e Jain-in, 2007)

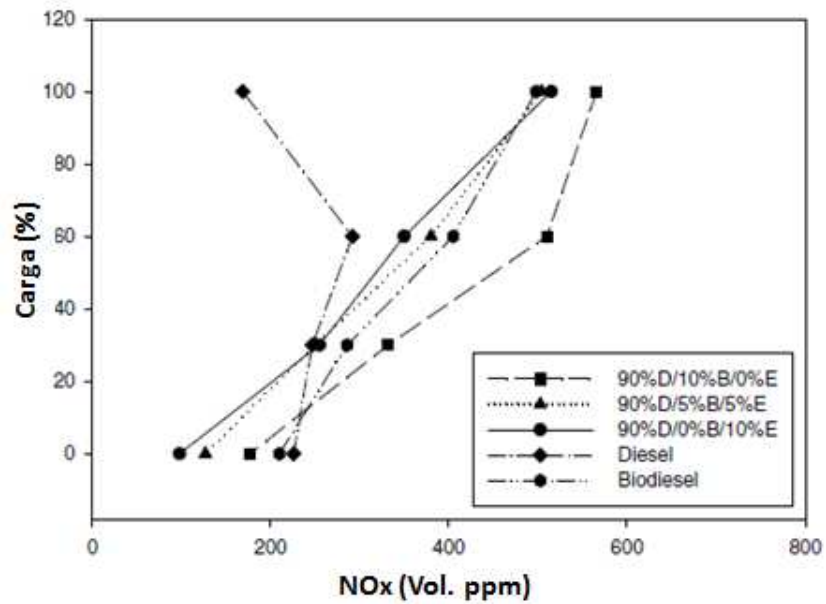


Figura 2.12. Resultado das Emissões de NOx em Motor Diesel Operando em Várias Carga (adaptado de Kwanchareon, Luengnaruemitchai e Jain-in, 2007)

Bilgin, Durgun e Sahin (2002) realizaram testes de performance em um motor ciclo diesel, quatro tempos cilindro único com misturas de combustíveis entre diesel e etanol; variando a proporção de etanol em 2%, 4% e 6% em volume e comparou com desempenho do mesmo motor operando com diesel. Nesse ensaio os pesquisadores realizaram modificações mecânicas no motor alterando a relação de compressão para 19, 21 e 23. Os autores chegaram à conclusão que a adição de 4% de etanol no combustível aumenta a eficiência e a potência do motor gerando uma redução no consumo específico para as relações de compressão de 21 e 23, para relação de compressão de 19 houve aumento do consumo específico do motor, tal como mostrado na Figura 2.13.

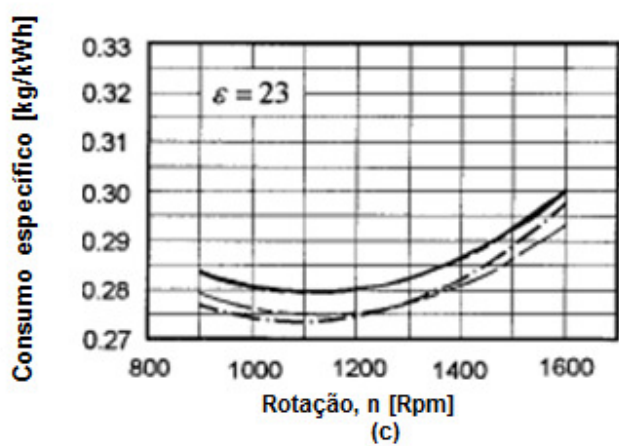
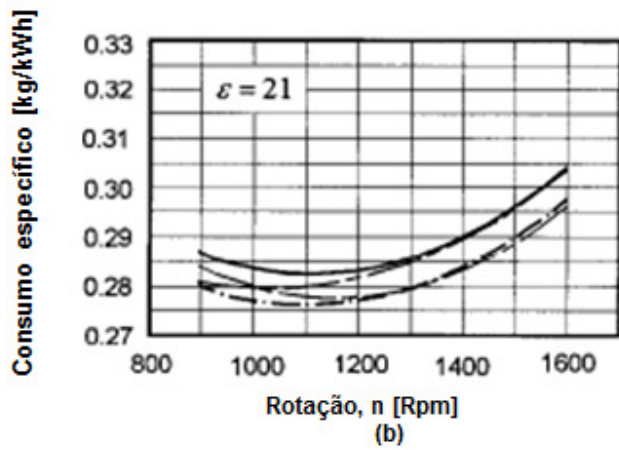
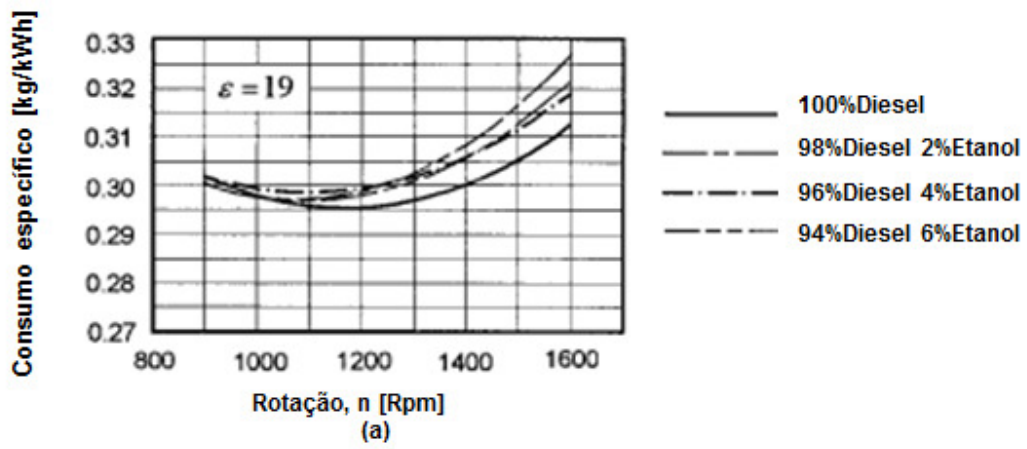


Figura 2.13. Consumo Específico para misturas de Combustíveis e Várias Taxas de Compressão (adaptado de Bilgin, Durgun e Sahin, 2002)

Hasimoglu (2008) realizou ensaio de emissões em um motor diesel 4 cilindros, 4 tempos, turbo alimentado, operando com diesel, 10% de etanol e 1,5% de aditivo e comparou os resultados com o diesel padrão. Verificou que a presença de etanol na mistura reduz a emissão de NOx .

Li et al (2005) estudaram os efeitos de diferentes misturas de combustíveis em um motor injeção direta simples cilindro utilizando 95%, 90%, 85% e 80% de diesel e 5%, 10%, 15% e 20% de etanol anidro sem a presença de estabilizantes e comparou com o desempenho do motor operando com 100% de diesel. Os resultados encontrados são mostrados na Figura 2.14:

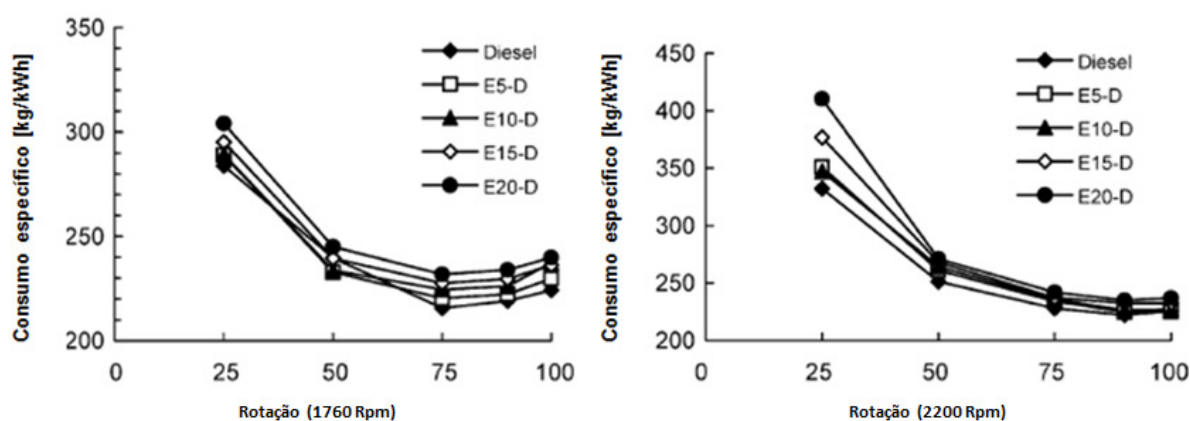


Figura 2.14. Gráficos de Consumo Específico para Misturas de Diesel e Etanol (adaptado de Li et al, 2005)

A presença de etanol gerou diferentes modificações físicas químicas no diesel, causando alterações no número de cetano, no ponto de fulgor, na viscosidade, no consumo específico, etc. (Li et al, 2005). A Figura 2.14 mostra que a mistura entre diesel e etanol anidro resultou em um aumento no consumo de combustível, mas por outro lado na Figura 2.15 se observa que o rendimento específico das misturas com etanol também foi maior em relação ao diesel.

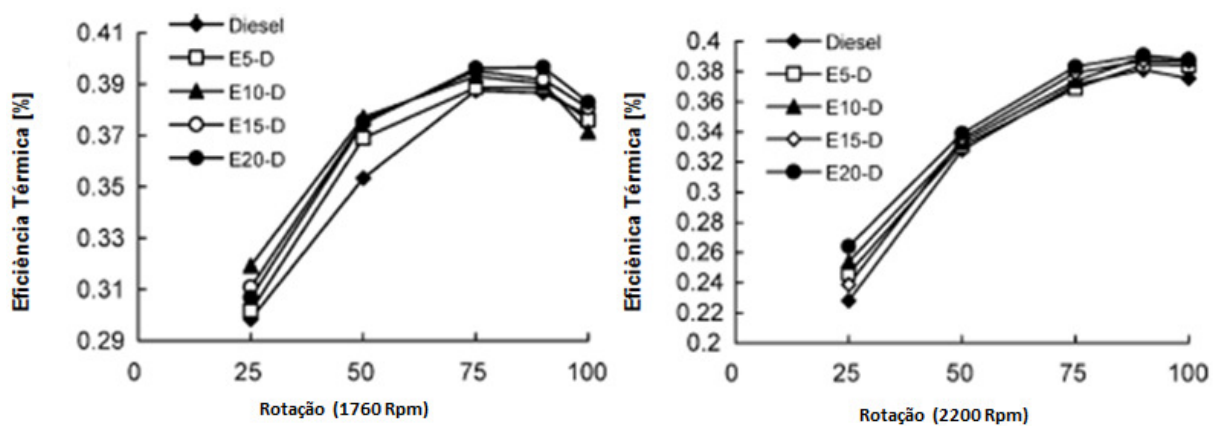


Figura 2.15. Gráficos de Rendimento para Misturas de Diesel e Etanol Anidro (adaptado de Li et al, 2005)

O ensaio de emissões realizado nesse trabalho mostra um aumento na emissão de CO para as cargas de 25%, 50% e 75% havendo redução nesse valor somente quando o motor operou com 100% de carga tal como mostrado na Figura 2.15. Por outro lado a Figura 2.16 mostra que quando o motor operou com baixas cargas ocorreu redução na emissão de NOx e para 100% de carga ocorreu aumento em comparação com o diesel. Na Figura 2.17 as emissões de THC do motor operando com diesel e etanol anidro sempre foram maiores do que quando operando somente com diesel.

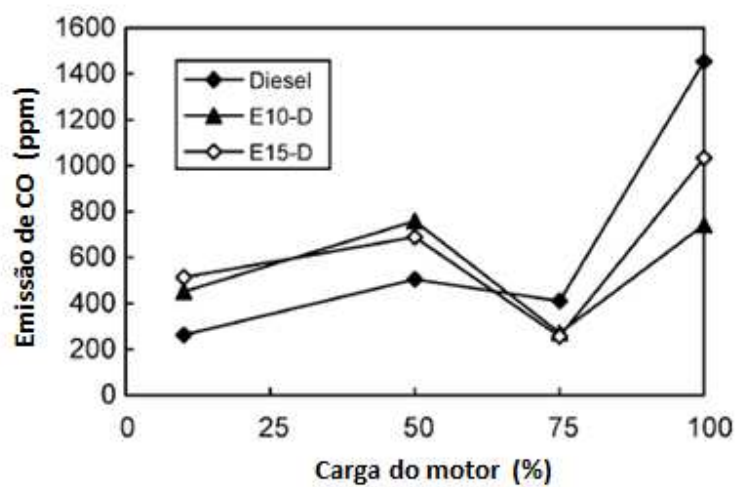


Figura 2.16. Resultado da Emissão de CO para Mistura Diesel/ Etanol Anidro (adaptado de Li et al, 2005)

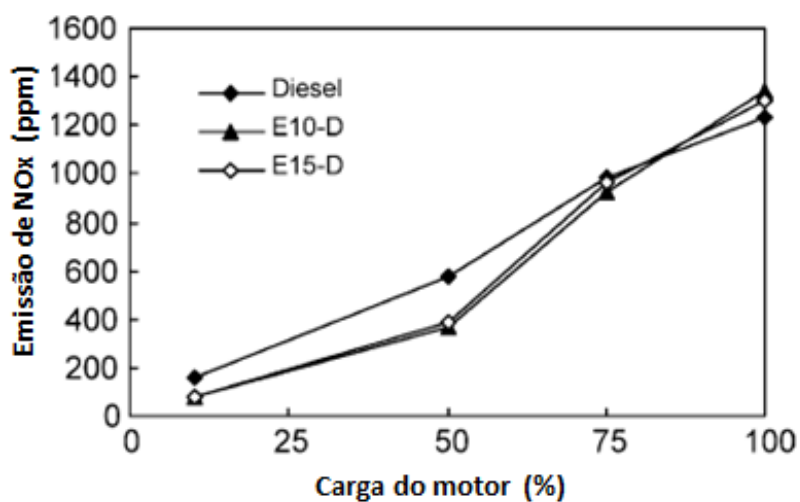


Figura 2.17. Resultado da Emissão de NOx para Mistura Diesel/ Etanol Anidro (adaptado de Li et al, 2005)

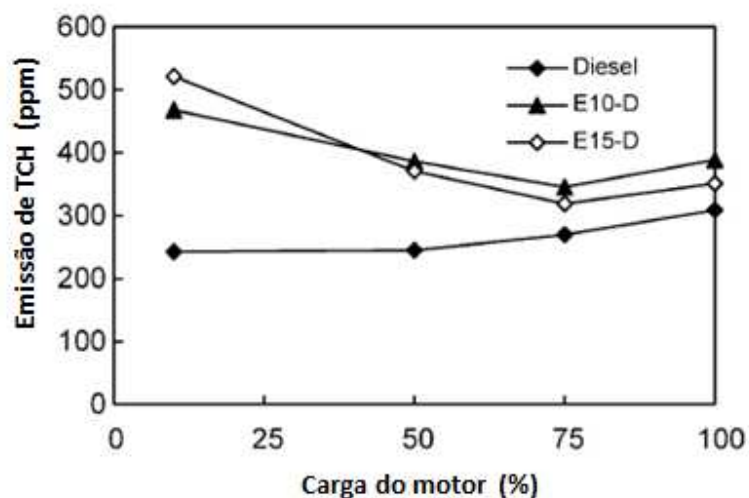


Figura 2.18. Resultado da Emissão de THC para Mistura Diesel/ Etanol Anidro (adaptado de Li et al, 2005)

Lu et al (2005), realizaram misturas de combustíveis no qual verificou-se que a adição de compostos oxigenados causa o atraso na combustão para cargas parciais de um motor ciclo diesel.

Koike, Dal Bem e Passarini (2006) realizaram um experimento prático durante sete anos em uma usina de açúcar e etanol utilizando uma frota de veículos conhecida operando com uma mistura composta por 93% de diesel e 7% de etanol anidro e outra frota espelho operando com diesel puro. Verificou que para 7% de etanol anidro no diesel os veículos tiveram um aumento no consumo específico de combustível, pois a mistura possuía um poder calorífico 3% menor que o diesel puro. Nas análises de óleo lubrificante verificou-se que não houve diferenças significativas na viscosidade, no ponto de fulgor e sólidos insolúveis dos veículos que operaram com a mistura em relação aos veículos que operaram com diesel e também não houve aumento no custo de manutenção dos veículos que utilizaram a mistura.

A característica de lubrificidade do diesel é de suma importância em motor de ignição por compressão visto que o diesel auxilia na lubrificação nos internos da bomba injetora do motor. Lapuerta, Garcia-Contreras e Agudelo (2010) utilizaram o método ASTM D 6079, através do qual foi possível traçar um diagrama de lubrificidade de várias misturas de combustíveis com o

objetivo de verificar qual a proporção de diesel, biodiesel e etanol anidro poderiam ser misturados a fim de aumentar a quantidade de compostos renováveis no diesel e não reduzir a vida útil do motor. O estudo resultou que a incorporação de etanol na mistura diesel com biodiesel não resulta em perdas significativas na lubricidade.

Capítulo 3

3. Material e Métodos

3.1. Preparação e Análise Físico Química da Mistura Diesel e Biodiesel e Diesel, Biodiesel e Etanol Anidro

Os combustíveis utilizados para os testes foram:

- Óleo diesel S500 com 5% de biodiesel conforme Resolução ANP N° 42 de 19/03/2008;
- Etanol Anidro conforme Resolução ANP N° 07 de 24/03/2011;

A mistura foi preparada através de uma proveta graduada nas seguintes proporções em base volume:

- 95% de diesel e 5% de biodiesel;
- 90,25% de diesel, 4,75% de biodiesel e 5% de etanol anidro;
- 92,15% de diesel, 4,85% de biodiesel e 3% de etanol anidro;
- 93,10% de diesel, 4,90% de biodiesel e 2% de etanol anidro;

3.2. Análise do Número de Cetano

O ensaio do número de cetano foi realizado no Laboratório de Energia Térmica, Motores, Combustíveis e Emissões do Centro de Tecnologias Ambientais e Energéticas do IPT.

As determinações dos números de cetano das amostras foram realizadas em acordo com a norma ASTM 613 – Standard Test Method for Cetane Number of Diesel Fuel Oil.

O número cetano das amostras foi calculado para um nível de confiança estatística de 95% de reprodutividade. As incertezas foram assumidas iguais àquelas obtidas a partir de resultados

estatísticos do programa interlaboratorial realizado pela ASTM Nacional Exchange Group (NEG).

Para determinar o número de cetano utilizou-se um motor diesel quatro tempos, com cilindro único e taxa de compressão variável.

O método consiste em se comparar as características de combustão de um óleo diesel padrão operando em um motor de teste com a mistura desejada. Isto é realizado variando-se a relação de compressão do motor.

3.3. Análise de Lubricidade

O ensaio de lubricidade foi realizado no Laboratório de Energia Térmica, Motores, Combustíveis e Emissões do Centro de Tecnologias Ambientais e Energéticas do IPT.

As análises de lubricidade foram realizadas conforme ASTM D 6079 utilizou-se um equipamento a frequência de 50 Hz com movimento alternado para realizar os ensaios de combustíveis.

Uma mostra de 2 [ml] de combustível é aquecida e mantida a temperatura de 60°C. Após isso o braço LVDT mostrado na Figura 3.1, começa a vibrar linearmente a uma amplitude de 1 mm, a 50 HZ de frequência por 75 min, fazendo com que o corpo de prova, que é uma esfera de metal AISI E-52100 de 200g com dureza de 58 a 66 HRC, seja friccionado contra o contra corpo fabricado em AISI E-52100 com dureza de 30 HV onde se encontra o combustível.

Após isso o contra corpo é retirado, limpo e secado seguindo para análise em um microscópio eletrônico. A indicação de desgaste é medida nos eixos x e y e o resultado é obtido pela média aritmética do desgaste do eixo x (paralelo ao movimento) e do eixo y (perpendicular ao movimento).

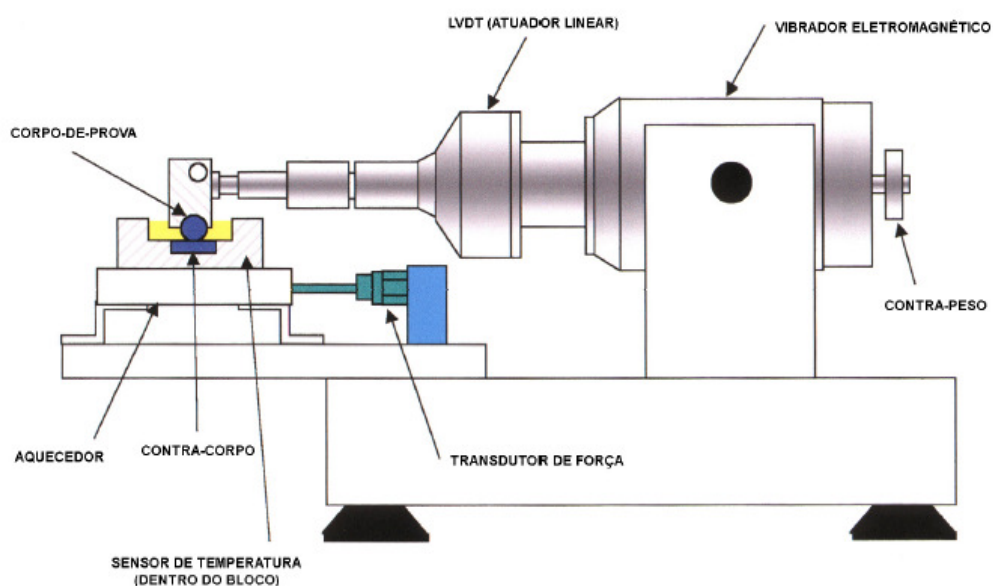


Figura 3.1. Esquemático do Aparelho para Teste de Lubricidade (Joaquim, 2007)

Devido às altas pressões de vapor do etanol a 60°C, os ensaios foram realizados a temperatura de 25°C buscando minimizar os efeitos da evaporação sobre as análises. Foram realizadas 2 repetições dos ensaios por amostra de mistura, utilizou-se a distribuição t de Student com 95% de confiança estatística.

3.4. Ponto de Fulgor da Mistura

As análises do ponto de fulgor foram realizadas pelo Instituto de Pesquisas e Estudos Industriais da FEI.

O ponto de fulgor é calculado através da aplicação de uma chama piloto no combustível a ser analisado em diversas temperaturas do combustível.

A menor temperatura que causa o lampejo (pré-ignição) na amostra é chamado ponto de fulgor o qual é provocado pela inflamação dos vapores do combustível que se encontra armazenado no aparelho de ensaio.

O aparelho utilizado para a determinação do ponto de fulgor é baseado no método Pensky-Martens vaso fechado de acordo com a ASTM D93.

3.5. Viscosidade a 40°C da Mistura

As análises de viscosidade foram realizadas pelo Instituto de Pesquisas e Estudos Industriais da FEI.

O aparelho utilizado para análise de viscosidade foi o Viscosímetro Digital Anton Paar modelo: SVM 3000

Os testes foram realizados conforme ASTM D7042, a qual consiste em introduzir as mostras em células de medição as quais possuem a temperatura conhecida e controlada.

As células de medição consistem em dois cilindros rotativos concêntricos e oscilantes em um tubo em U, a viscosidade cinemática é calculada dividindo-se a viscosidade dinâmica pela densidade.

3.6. Pressão de Vapor da Mistura

As análises da pressão de vapor foram realizadas pelo Instituto de Pesquisas e Estudos Industriais da FEI.

A pressão de vapor foi calculada de acordo com ASTM D5191. Para o seu cálculo a amostra é introduzida através de um pistão no interior de uma câmara com temperatura controlada. A câmara possui um volume cinco vezes maior que o volume da amostra.

Após a introdução da amostra espera-se até que essa atinja a temperatura de equilíbrio 38,7 °C.

A pressão total no interior da câmara é medida utilizando um indicador de pressão.

A pressão total é calculada pela soma da pressão parcial da amostra com a pressão do ar dissolvido no interior da câmara e em seguida é convertida para pressão de vapor.

3.7. Curva de Destilação da Mistura

As análises da curva de destilação da mistura foram realizadas pelo Instituto de Pesquisas e Estudos Industriais da FEI.

As curvas de destilação foram levantadas utilizando a norma ASTM D86 a qual determina qualitativamente o intervalo de destilação de produtos petrolíferos a pressão ambiente.

Os componentes básicos da unidade de destilação são: o balão de destilação, o aquecedor, o medidor de temperatura e o cilindro receptor de condensado.

Uma amostra de 100 ml é colocada no balão de destilação e aquecida. Conforme ocorre a vaporização do combustível testado, o vapor passa por um trocador de calor transformando-o em condensado o qual é coletado e medido.

3.8. Característica Físico Química dos Combustíveis Utilizados no Estudo Prático de Miscibilidade

Baseado em outros trabalhos realizou-se experimento prático de se colocar a mistura diesel, biodiesel, etanol anidro e diesel, biodiesel e etanol hidratado para se estudar estabilidade das misturas em diferentes temperaturas.

Abaixo seguem as características dos combustíveis utilizados nas misturas:

3.8.1. Diesel e Biodiesel

- Densidade a 20°C: 820 – 880 kg/m³;
- Solubilidade em água: desprezível;

3.8.2. Etanol Anidro

- Densidade a 20°C: 791,5 kg/m³;
- Temperatura de ebulição: 78,5 °C;
- Solubilidade em água: Solúvel;

3.8.3. Etanol Hidratado

- Densidade a 20°C: 809,3 kg/m³;
- Temperatura de ebulição: 77°C;
- Solubilidade em água: Solúvel;

Foram realizadas as seguintes misturas 92,15% diesel, 4,85% biodiesel, 3% etanol anidro e 92,15% diesel, 4,85% biodiesel, 3% etanol hidratado, para se averiguar a estabilidade da mistura antes de utilizá-las no motor.

As misturas foram preparadas em funil de separação de 250 ml, utilizando proveta graduada. Posteriormente as misturas foram transferidas para béqueres de 250 ml.

As misturas foram colocadas sob as seguintes condições de temperatura e tempo, no interior de um laboratório de metrologia com a temperatura controlada de 20±1 °C, nas seguintes condições:

- 20°C, 24 horas de repouso;
- 20°C, 100 horas de repouso;

Durante esse período foram coletados dados sobre o comportamento de cada mistura. Depois de decorridas às 100 horas as misturas foram levadas diretamente para o interior de uma geladeira com temperatura controlada de 5±1 °C por períodos de tempo de:

- 5°C, 24 horas de repouso;

- 5°C, 48 horas de repouso;

Depois de 48 horas no interior da geladeira as amostras foram levadas novamente para o laboratório por aproximadamente 30 minutos e em seguida colocou-se as misturas no interior do freezer da geladeira por um período de:

- -5°C, 1 hora de repouso;

Após a retirada das amostras do freezer da geladeira as misturas foram novamente levadas para o interior do laboratório.

3.9. Método de Ensaio de Performance do Motor por Compressão.

Visando-se verificar a eficiência da mistura diesel, biodiesel e etanol anidro realizou-se o mapeamento de performance realizada conforme norma NBR 1585 em um motor de ignição por compressão ciclo diesel operando com 95% diesel e 5% biodiesel e depois com 92,15 % diesel, 4,75% biodiesel e 3% etanol anidro no qual foram adquiridos os seguintes dados: rotação, torque, potência, pressões, consumo de combustível, temperaturas.

A mistura foi preparada utilizando-se proveta graduada e o combustível ficou armazenado em um reservatório sem agitação mecânica, apenas o retorno do motor era enviado para ele causando uma leve agitação no fluido, simulando assim o comportamento da mistura no tanque de um veículo em operação.

3.9.1. Características do Banco de Testes

O banco de testes utilizado foi o do Centro Tecnológico da Mahle.

O banco de testes é composto pelos seguintes equipamentos:

- Dinamômetro Eddy Current,
- Potência de 230 kW;

- Torque máximo de 1700 Nm;
- Fabricante: Schenck;
- Modelo: W230;
- Sistema de automação: Sptronic-Ecat;
- Sistema de medição mássico de combustível: AVL735 com integrador Coriolís;

O teste foi realizado a pressão barométrica de 724 mmHg e a temperatura ambiente variou de 20 ± 5 °C, durante a realização do teste, visto que o mesmo teve duração de 48 horas.

O banco de testes possui uma incerteza de medição combinada de $\pm 2\%$ para todas as medidas coletadas.



Figura 3.2. Banco de Testes

3.9.2. Dados Técnicos do Motor

Utilizou-se para o ensaio um motor comercial com as seguintes características técnicas:

- Potência: 136 CV;
- Torque: 402 Nm;
- Relação de compressão: 17,25: 1;
- Cilindrada total: 5958 cm³;
- Número de cilindros: 06;
- Diâmetro dos cilindros: 97,5 mm
- Curso dos êmbolos: 137 mm
- Disposição dos cilindros: Vertical em linha;
- Ciclo de funcionamento: Quatro tempos
- Tipo de injeção: Direta;
- Bomba Alimentadora: Mecânica Manual;
- Tipo de Alimentação: Aspirado;



Figura 3.3. Motor Ensaiado

3.9.3. Descrição do Ensaio

O ensaio consiste em instalar o motor no dinamômetro utilizando um adaptador e ir variando a rotação do motor de 900 rpm à 2800 rpm para carga parcial e total (25%, 50%, 75% e 100%).

O teste consiste em realizar o mapeamento de performance do motor utilizando 95% diesel com 5% biodiesel e depois fazer o mesmo levantamento utilizando a mistura 92,15% diesel, 4,85% biodiesel, 3% etanol anidro. Utilizou-se um dinamômetro modelo Schenck W230 e um conjunto de sensores eletrônicos com os quais se monitorou os seguintes parâmetros do motor: consumo médio, potência, temperatura dos gases de exaustão, temperatura de saída da água, pressão dos gases de exaustão, torque e consumo específico. Nenhuma alteração mecânica foi realizada na configuração original do motor.

Antes dos ensaios realizou-se o amaciamento do motor, pois esse foi retificado recentemente. O amaciamento foi feito no dinamômetro e durou aproximadamente 30 minutos obedecendo a um regime de cargas variáveis utilizando óleo diesel como combustível. Nos 20 primeiros minutos do amaciamento o motor operou com cargas de 25, 50 e 75 % do torque de potência máxima e com o acelerador posicionado a fornecer 75 % da rotação máxima livre. As cargas eram trocadas a cada 5 minutos, iniciando-se com 25 %, subindo até 75 % e depois retornando ao valor inicial. Seguiu-se então um ciclo de 10 minutos com o motor operando com cargas de 25, 50,75 e 100 % do torque de potência máxima, porém com o acelerador posicionado no máximo, semelhantes aos trabalhos realizados por Barbosa (2006) e Maziero et al (2007).

O procedimento de testes consiste em se referenciar o motor em plena carga, ou seja, com a máxima abertura da bomba da injetora varia-se a rotação do motor de 900 a 2800 rpm, com isso consegue-se o referenciar o torque máximo do motor para as respectivas rotações. Em seguida multiplicam-se os torques referenciados encontrados por 0,75 (por exemplo), com isso obtemos os torques a 75% de carga do motor e inserem-se esses valores no dinamômetro.

O dinamômetro então começa a buscar a posição de pedal para aquele torque, depois de encontrado o torque para uma rotação específica mantém-se a aceleração fixa e espera-se o motor estabilizar as condições de pressão, temperatura, escape de gases, etc. (normalmente demora de 6 à 7 minutos a estabilização do sistema). Em seguida coletam-se 30 vezes cada um dos parâmetros do motor e o resultado é a média aritmética desses valores, em seguida passa-se para o próximo valor de torque varrendo todas as rotações para uma carga específica. Após isso se multiplica o torque referencia por 0,5 e 0,25 reiniciando o procedimento de teste, conseguido levantar as curvas de performance do motor para as cargas de 100, 75, 50 e 25%.

3.9.4. Cálculo do Consumo Específico:

O consumo específico de combustível foi calculado através da seguinte expressão:

$$G_{sp} = \frac{G}{BP} \quad (3)$$

Onde:

G_{sp} = consumo específico de combustível (g/kWh);

G = consumo médio de combustível (g/h);

BP = potência efetiva no eixo (kW);

3.9.4.1. Cálculo da Eficiência Global:

A eficiência global foi calculada como:

$$\eta = \frac{BP}{3,6 \times 10^{-6} \times G \times PCI} \quad (4)$$

Onde:

η = eficiência térmica (%);

PCI = poder calorífico inferior (kJ/kg);

3.9.4.2. Cálculo das Massas:

$$d_{mistura} = \frac{m_{mistura}}{V_{mistura}} \quad d_{Diesel, Biodiesel} = \frac{m_{Diesel, Biodiesel}}{V_{Diesel, Biodiesel}} \quad (5)$$

4.9.4.3. Cálculo do Poder Calorífico:

$$PCI_{\text{Mistura}} = \frac{(PCI_{\text{Diesel, Biodiesel}} \times m_{\text{Diesel, Biodiesel}}) + (PCI_{\text{EtanolAnidro}} \times m_{\text{EtanolAnidro}})}{m_{\text{mistura}}} \quad (6)$$

Capítulo 4

4. Viabilidade Financeira

A produção de etanol de cana-de-açúcar envolve a utilização do óleo diesel na fase agrícola, movimentando tratores, colheitadeiras e motores estacionários de aplicação geral (irrigação, por exemplo) e no transporte da cana colhida até a usina. Esse capítulo tem o objetivo de realizar a análise econômica do projeto, mostrando a possível redução de custo que a mistura 92,15% diesel, 4,85% biodiesel, 3% etanol anidro poderá representar na cadeia produtiva da indústria sucroenergética brasileira.

Para o cálculo de retorno financeiro foram utilizados os preços médios de diesel com 5% de biodiesel e do etanol anidro. Assumiu-se que não há perdas de performance nos motores ciclo diesel operando com 95% diesel e 5% biodiesel ou com 92,15% diesel, 4,85% biodiesel, 3% etanol anidro, pois esta hipótese será confirmada no próximo capítulo. Baseado no trabalho de Koike et al (2006) supôs-se que não há aumento no custo de manutenção dos veículos quando esses utilizam 95% diesel e 5% biodiesel ou 92,15% diesel, 4,85% biodiesel, 3% etanol anidro como combustível.

Uma usina de açúcar e etanol típica de médio porte do Estado de São Paulo possuiu aproximadamente em média 500 motores ciclo diesel operando em sua cadeia produtiva. Obteve-se também que cada um desses motores roda em média 90.000 quilômetros por ano, com um consumo médio de 3 quilômetros por litro de combustível.

Consultaram-se também fabricantes de bombas, sistemas de automação e empresas de montagem eletromecânica, pois será necessário realizar investimentos em sistema de tancagem, automação e bombeamento no valor total aproximado de R\$ 50.000,00 reais por implantação em cada unidade industrial.

A mistura de diesel com biodiesel atualmente é comercializado em todos os postos de combustíveis no Brasil. Logo, é apenas necessário adicionar o etanol anidro (produto produzido

nas usinas) nos tanques de diesel com biodiesel já existente nas usinas, de modo a resultar em uma mistura final com a seguinte proporção: 92,15% diesel, 4,85% biodiesel, 3% etanol anidro.

Considerou-se no projeto o retorno financeiro obtido durante 5 anos de utilização dessa mistura em uma usina de médio porte. O preço médio ao consumidor do diesel com 5% de biodiesel teve como fonte a ANP e do etanol anidro teve como fonte o índice CEPEA/ESALQ. Esse índice leva em consideração o valor pelo qual o produtor é remunerado isento de impostos, ambos para o ano de 2012.

- Preço médio ao consumidor do diesel rodoviário com 5% de biodiesel (região sudeste, ANP): R\$/L 2,06;
- Preço médio do etanol anidro (CEPEA/ESALQ, sem impostos e sem frente): R\$/L 1,23;

A partir das considerações, para uma usina com inventário de 500 veículos, rodando em média 90.000 km/ano cada veículo, obtém um retorno financeiro total R\$ 1.817.500,00 em 5 anos de operação, quando se adiciona 3% de etanol anidro na mistura diesel com 5% de biodiesel.

Os cálculos são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Análise de Viabilidade Financeira

Projeto Etanol Anidro 3%						
VPL R\$ 1.817.500,00		Anos de Projeto				
		1	2	3	4	5
Número de Motores Operando		500	500	500	500	500
Custo por Motor						
Investimento	(DELTA) -R\$ 50.000	R\$ (50.000)	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Manutenção	(DELTA) R\$ 0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
\$ Combustível	- R\$ 747	R\$ 373.500	R\$ 373.500	R\$ 373.500	R\$ 373.500	R\$ 373.500
	TOTAL	R\$ 323.500	R\$ 373.500	R\$ 373.500	R\$ 373.500	R\$ 373.500

Consumo mistura	3,00	KM/ L	Mistura Diesel/ Etanol Anidro
Consumo diesel	3,00	KM/ L	Diesel
Fator de consumo	1,00		
Total de quilômetros	90.000	Ano	
Total de litros	30.000	Ano	

Legenda	
	Dados de Entrada
	Premissas do Projeto

Quantidade diesel 97,00% Porcentagem de diesel na mistura

Custo etanol anidro	1,230	o litro	[Preço Médio CEPEA 2012]
Custo da mistura	2,035	o litro	
Custo diesel	2,060	o litro	[Preço Médio ao Consumidor em São Paulo ANP 2012]
Redução de Custo	0,025	o litro	

Fonte: Autoria própria

A Figura 4.1 mostra a série histórica de preços do diesel e da mistura, através dela é possível que nos últimos anos a mistura sempre teve um preço menor que o diesel, sendo uma possibilidade importante para a redução dos custos de produção para o setor sucroenergético.

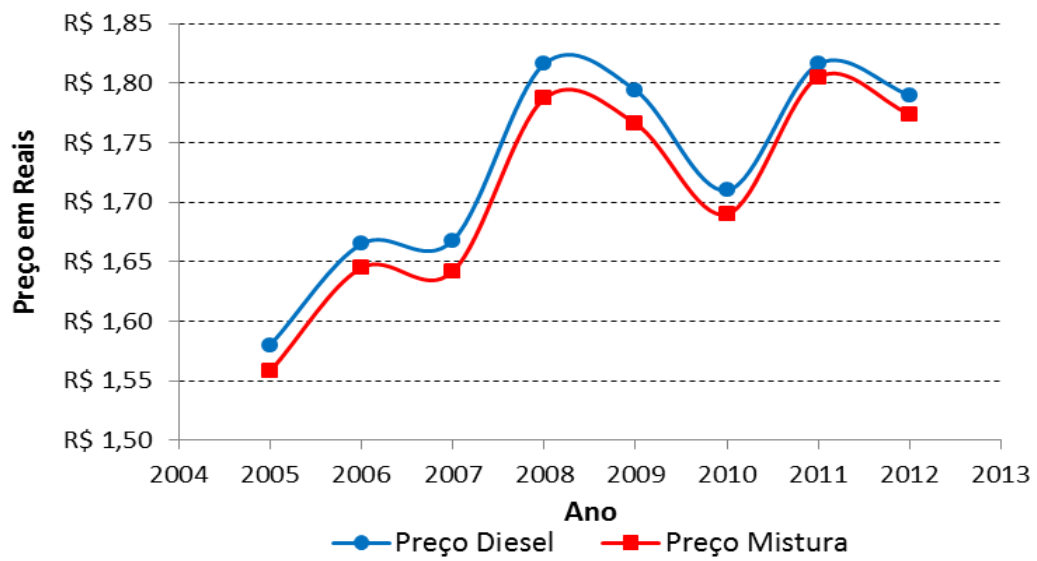


Figura 4.1. Série História de Preços

Fonte: Dados retirados site da ANP médio ao consumidor em São Paulo segundo e o custos do etanol anidro foram obtidos através do índice CEPEA, durante os anos de 2005 a 2012.

Capítulo 5

5. Resultado e Discussão

5.1. Resultados da Análise do Número de Cetano

Os resultados das análises do número de cetano das misturas encontram-se na Tabela 5.1:

Tabela 5.1 – Análises de Cetano

Amostras	Número de Cetano
95% Óleo Diesel e 5% Biodiesel	44,5 ±3,4
93,10% Diesel, 4,90% Biodiesel e 2% Etanol Anidro	43,5 ±3,2
92,15% Diesel, 4,85% Biodiesel e 3% Etanol Anidro	42,6 ±3,1
90,25% Diesel, 4,75% Biodiesel e 5% Etanol Anidro	41,4 ±3,0

Fonte: Autoria própria

Observa-se que a mistura (90% de Diesel, 5% Biodiesel e 5% de Etanol Anidro) não satisfaz a especificação técnica contida na Resolução da ANP N° 42 de 16/12/2009 que estabelece 42 como sendo o limite inferior para o número de cetano para óleo diesel.

Durante a realização dos testes não se observou características típicas do fenômeno de cavitação na bomba injetora, tais como: ruídos excessivos, variação na corrente de alimentação, deslocamento da curva de performance, variação na pressão de descarga da bomba, apesar da presença de etanol anidro em 3 amostras, fato que poderia gerar um funcionamento instável do motor.

5.2. Resultados das Análises de Lubricidade

Os resultados de lubricidade são apresentados na Tabela 5.2:

Tabela 5.2 - Análises de Lubricidade

Amostras	ASTM 6079 WSD [mm]	ISO 12156 WS1,4 [μm]
93,10% Diesel, 4,90% Biodiesel e 2% Etanol Anidro	0,26 \pm 0,02	259,3 \pm 23,1
92,15% Diesel, 4,85% Biodiesel e 3% Etanol Anidro	0,27 \pm 0,02	272,0 \pm 32,6
90,25% Diesel, 4,75% Biodiesel e 5% Etanol Anidro	0,28 \pm 0,03	282,7 \pm 21,4

Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados conclui-se que quanto maior o teor de etanol anidro na mistura menor é a característica lubrificante do mesmo, resultado também encontrado por Joaquim (2007). Apesar desse aumento de desgaste as misturas analisadas encontram-se dentro das especificações de óleo diesel no que diz respeito à lubricidade segundo HFRR, pois estão abaixo de 460 μm de desgaste estabelecidos pelas normas brasileiras em vigor (Joaquim, 2007).

Fazendo uma combinação entre os resultados preliminares das análises de lubricidade e número de cetano observa-se que a mistura 92,15% diesel, 4,85% biodiesel e 3% de etanol anidro é a proporção máxima possível de etanol na mistura a ser utilizada em um motor. Sendo este parâmetro limitante para realização do teste de performance.

5.3. Resultados das Análises de Viscosidade

Na Tabela 5.3 são apresentados os valores de viscosidade.

Tabela 5.3 – Viscosidade a 40°C

Amostras	mm²/s
95%Diesel e 5% Biodiesel	3,72 ±0,2
92,15% Diesel, 4,85% Biodiesel e 3% Etanol Anidro	3,46 ±0,2

Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados das análises de viscosidade observamos que não há grande variação no valor de viscosidade encontrado entre os combustíveis analisados, mas a mistura 92,15% diesel, 4,85% biodiesel e 3% etanol anidro possui viscosidade ligeiramente menor do que 95%diesel com 5% biodiesel. Como o valor de viscosidade é mais baixo na mistura com etanol anidro isso facilita a formação de gotículas com pequenos diâmetros no interior da câmara de combustão aumento assim a eficiência de energética

5.4. Resultados das Análises de Ponto de Fulgor

Os resultados das análises do ponto de fulgor para os combustíveis são apresentados na Tabela 5.4:

Tabela 5.4 - Ponto de Fulgor

Amostras	Temperatura °C
95%Diesel e 5% Biodiesel	58 ±0,8
92,15% Diesel, 4,85% Biodiesel e 3% Etanol Anidro	14 ±0,8

Fonte: Autoria própria

Como podemos observar na tabela há uma grande redução na temperatura de ponto de fulgor da mistura 92% diesel, 5% biodiesel e 3% etanol anidro em comparação com 95%diesel e

5% biodiesel. O ponto de fulgor encontrado para a mistura foi de 14°C fazendo com que a mistura esteja fora da especificação do diesel segundo a ANP 42 logo sua comercialização é proibida, e a temperatura é menor que a temperatura ambiente típica do Brasil. Isto implica na adição de melhorias no requisito de segurança no armazenamento da mistura

5.5. Resultados das Análises de Pressão de Vapor

A Tabela 5.5 apresenta os valores das análises da pressão de vapor:

Tabela 5.5 – Pressão de Vapor

Amostras	kPa
95% Diesel e 5% Biodiesel	0,5 ±0,2
92,15% Diesel, 4,85% Biodiesel e 3% Etanol Anidro	11,9 ±0,2

Fonte: Autoria própria

A mistura 92,15% diesel, 4,85% biodiesel e 3% etanol anidro possui uma pressão de vapor maior do que a mistura 95% de diesel com 5% de biodiesel, ou seja, ela facilita a pré-evaporação do combustível após a ignição e facilita a volatilização do combustível durante sua armazenagem.

5.6. Resultados das Análises da Curva de Destilação

Na Figura 23 é mostrado o gráfico comparando as curvas de destilação da mistura de 95% de diesel e 5% de biodiesel e 92,15% diesel, 4,85% biodiesel e 3% etanol anidro.

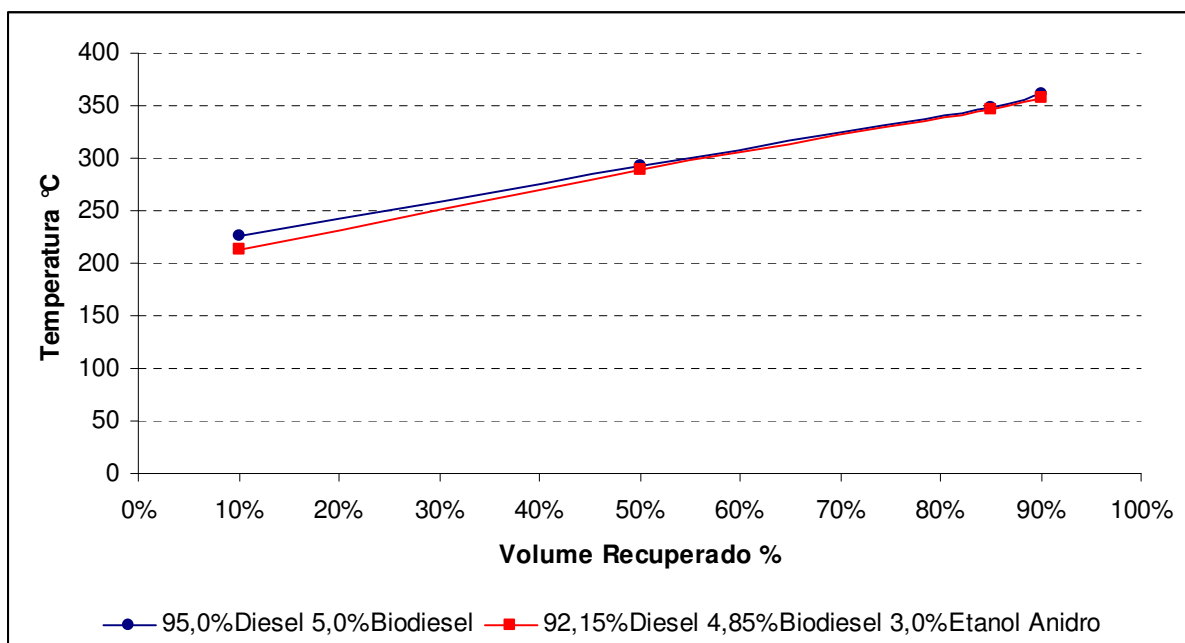


Figura 5.1. Gráfico da Curva Destilação

Observa-se que não houve mudanças significativas nos valores encontrados para ambos os combustíveis, estando dentro do intervalo de incerteza de 95% da análise. Mas a mistura com etanol começa a destilar primeiro que a curva com diesel e biodiesel, como isso se deve ter maiores cuidados com a armazenagem.

O grau de incerteza na medição é de $\pm 0,2$ °C.

5.7. Resultados das Análises Físico Química dos Combustíveis Utilizados no Estudo Prático de Miscibilidade

Abaixo estão representados os resultados práticos das análises de miscibilidade das misturas diesel, biodiesel, etanol hidratado e diesel, biodiesel e etanol anidro.

A Figura 5.2 mostra dois béqueres um deles está com uma mistura de 92,15% diesel, 4,85% biodiesel e 3% etanol anidro e o outro com uma mistura 92,15% diesel, 4,85% biodiesel e 3% etanol hidratado. Ambos os recipientes estão no interior de um laboratório de metrologia com temperatura controlada de $20 \pm 1^\circ\text{C}$.



Figura 5.2. Béqueres com Misturas de 92,15% diesel, 4,85% Biodiesel e 3% Etanol Anidro e Outro Com 92,15% Diesel, 4,85% Biodiesel e 3% Etanol Hidratado

Observa-se na Figura 5.2 que a principal diferença encontrada entre as duas amostras é a opacidade. A mistura com etanol anidro tem um aspecto límpido, parecida com o diesel, a de hidratado mostra-se opaca e não uniforme.

Em seguida as misturas foram deixadas em repouso no interior do laboratório de metrologia por um período de 24h.



Figura 5.3. Condensado Formado no Béquer com Etanol Hidratado Após 24h



Figura 5.4. Condensado Formado no Béquer com Etanol Anidro Após 24h

As Figuras 5.3 e 5.4 mostram os recipientes com as respectivas misturas condicionadas a temperatura de $20 \pm 1^\circ\text{C}$, após 24 horas. É possível observarmos a existência de gotículas de água apenas no recipiente contendo etanol hidratado apresentadas na Figura 5.3 a mistura com etanol anidro permaneceu sem alteração conforme apresentada na Figura 5.4. Após essa primeira coleta de dados decidiu-se deixar as misturas por um período de 100 horas sob as mesmas condições.

As Figuras 5.5 e 5.6 mostram os mesmos recipientes após 100 horas à temperatura de $20 \pm 1^\circ\text{C}$, onde a única diferença encontrada entre as amostras foi o aumento na quantidade de gotículas de água na parte superior do béquer com etanol hidratado Figura 5.5. Com isso foi possível concluir que a mistura de etanol anidro é estável a temperatura de 20°C (temperatura típica na região Sudeste do Brasil).



Figura 5.5. Condensado Formado no Béquer com Etanol Hidratado Após 100h



Figura 5.6. Condensado Formado no Béquer com Etanol Anidro Após 100h

Depois de 100 horas de manutenção das amostras mantidas em ambiente com temperatura controlada $20 \pm 1^\circ\text{C}$, optou-se por colocar os béqueres em um refrigerador com temperatura controlada a $5 \pm 1^\circ\text{C}$ para verificar se haveria ou não separação de fases entre as misturas.



Figura 5.7. Amostras sendo Levadas para Refrigerador

As amostras permaneceram no refrigerador por 24 horas a uma temperatura de $5 \pm 1^\circ\text{C}$, a única mudança encontrada nos recipientes foi o aumento na deposição de gotículas topo do béquer contendo etanol hidratado. Apresentada na Figura 5.8:



Figura 5.8. Amostra de Etanol Hidratado por 24h Sob Refrigeração

A Figura 5.9 mostra que na amostra com etanol anidro não houve deposição de gotículas na parte superior do béquer e a separação de fase entre a mistura de combustíveis também não ocorreu.



Figura 5.9. Amostra de Etanol Anidro Após 24h Sob Refrigeração

Optou-se por deixar as amostras permanecerem no refrigerador por um período de 48 horas a temperatura de $5 \pm 1^\circ\text{C}$. Resultando que no béquer contendo etanol hidratado observou-se a formação de uma nevoa esbranquiçada no fundo do recipiente e um aumento na quantidade de gotículas na parte superior do recipiente. Apresentadas na Figura 5.10.

A mistura contendo etanol anidro começou a apresentar as primeiras mudanças: uma porção de líquido depositou-se no fundo do béquer, mas não se verificou a formação de gotículas de água na parte superior do recipiente. Os resultados são apresentados na Figura 5.11.



Figura 5.10. Detalhe da Nevoa no Béquer de Etanol Hidratado Após 48h

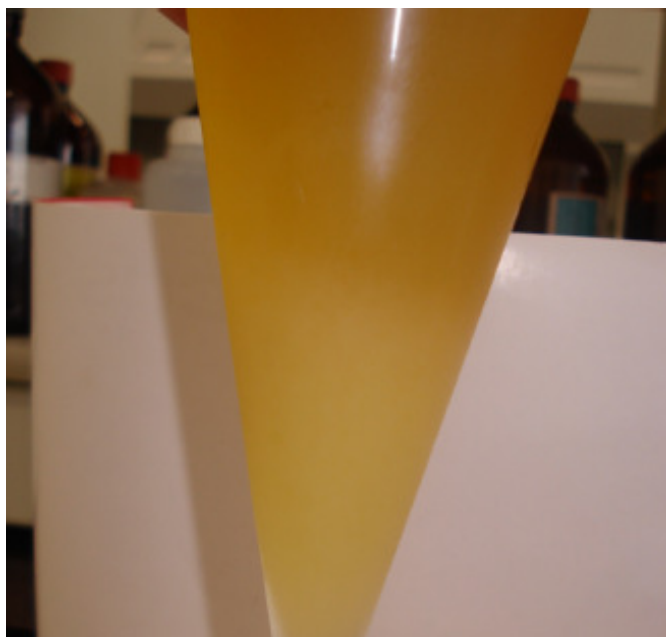


Figura 5.11. Detalhe do Fundo do Béquer de Etanol Anidro Após 48h

Após 48 horas na geladeira, os recipientes contendo etanol anidro e hidratado foram levados novamente a sala com temperatura de $20 \pm 1^\circ\text{C}$, onde se observou que com o aquecimento das misturas, a porção esbranquiçada encontradas em ambos os béqueres voltaram a se homogeneizar após poucos minutos, A separação era mais visível na mistura de contendo etanol hidratado.

Em seguida as amostras foram levadas ao freezer da geladeira e mantidas a temperatura de -5°C pelo período de 1 hora, durante o qual se verificou a formação de bolhas em ambas às amostras sendo na que contém etanol hidratado as bolhas possuíam maior diâmetro apresentadas na Figura 5.12, do que as bolhas encontradas na mistura contendo etanol anidro apresentadas na Figura 5.13.



Figura 5.12. Formação de Bolhas no Béquer de Etanol Hidratado Após 1h



Figura 5.13. Formação de Bolhas no Béquer de Etanol Anidro Após 1h

Depois de decorrida 1 hora das misturas acondicionadas a temperatura de -5°C elas foram retiradas do freezer e colocadas a temperatura de $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ e rapidamente voltaram ao estado inicial.

Através deste experimento prático concluiu-se que a mistura de 92,15% diesel, 4,85% biodiesel e 3% de etanol anidro apresentou-se estável para a realização de ensaio em motor. As variações na temperatura não modificaram significativamente a mistura contendo etanol anidro, sendo possível realizar o ensaio nas condições ambientais em todo o território brasileiro.

5.8. Resultados das Curvas de Performance do Motor

Após o estudo de miscibilidade um motor foi testado em uma bancada de testes com o objetivo de se determinar as características do motor ciclo diesel operando com 95% diesel e 5% biodiesel e com a mistura de 92,15% diesel, 4,85% biodiesel e 3% de etanol anidro, pois essa é uma mistura estável para o levantamento das curvas de performance. A mistura contendo etanol anidro não precisou ser agitada constantemente para homogeneizar-se. Porém, o mesmo trabalho

não pode ser realizado com mistura de 92,15% diesel, 4,85% biodiesel e 3% de etanol hidratado, pois a água presente no etanol desestabilizaria o sistema de injeção do motor.

5.8.1 Ensaio do Motor

O ensaio foi realizado a um pressão barométrica de 724 mmHg, durante três dias, visando-se verificar em bancada se a mudança de combustível afetaria a operação de um motor ciclo diesel, através do levantamento das curvas de potência, torque, consumo específico, temperatura dos gases de exaustão para as variadas cargas de trabalho.

Na Figura 5.14 estão representadas as curvas de potência efetiva do motor ensaiado para as cargas de: 25%, 50%, 75% e 100%.

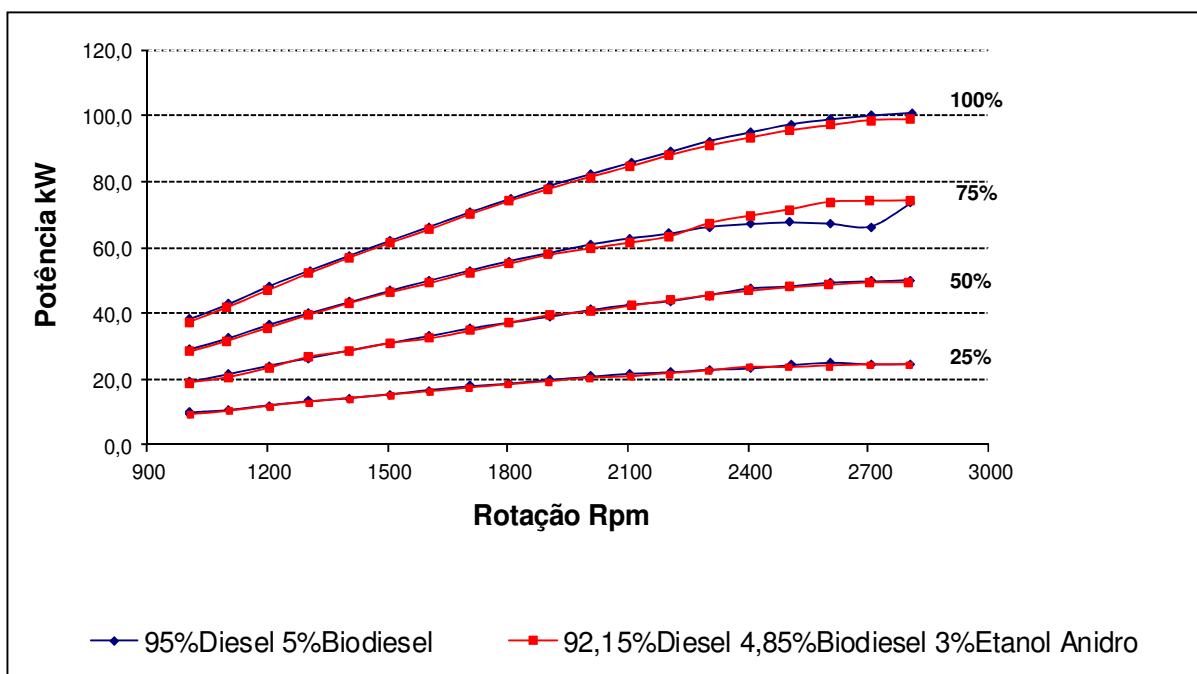


Figura 5.14. Gráfico de Potência Variando as Cargas do Motor

Como podemos observar a diferença entre as potências desenvolvidas pelos dois combustíveis para os diferentes regimes de cargas que o motor foi submetido durante o ensaio ficaram abaixo da incerteza de medição do banco de testes que é $\pm 2\%$. Assim conclui-se que não houve perda de potência do motor operando com a mistura 92,15% diesel, 4,85% biodiesel e 3% de etanol anidro quando comparamos com as curvas de performance de 95% diesel com 5% biodiesel.

Na curva com 75% de carga há uma região que a mistura apresentou uma potência maior do que o 95% diesel com 5% biodiesel. Aparentemente, o sistema de controle de carga não conseguiu manter o valor de torque proporcional ao torque obtido na carga total. Como estes testes foram confirmados em três repetições, não se encontra explicação para este comportamento que não seja uma falha no sistema de controle. Todos os outros valores obtidos nas diversas cargas e rotações aparentam coerência com os valores de torque em carga total.

A Figura 5.15 mostra o gráfico de torque do motor para as cargas de 25%, 50%, 75% e 100%.

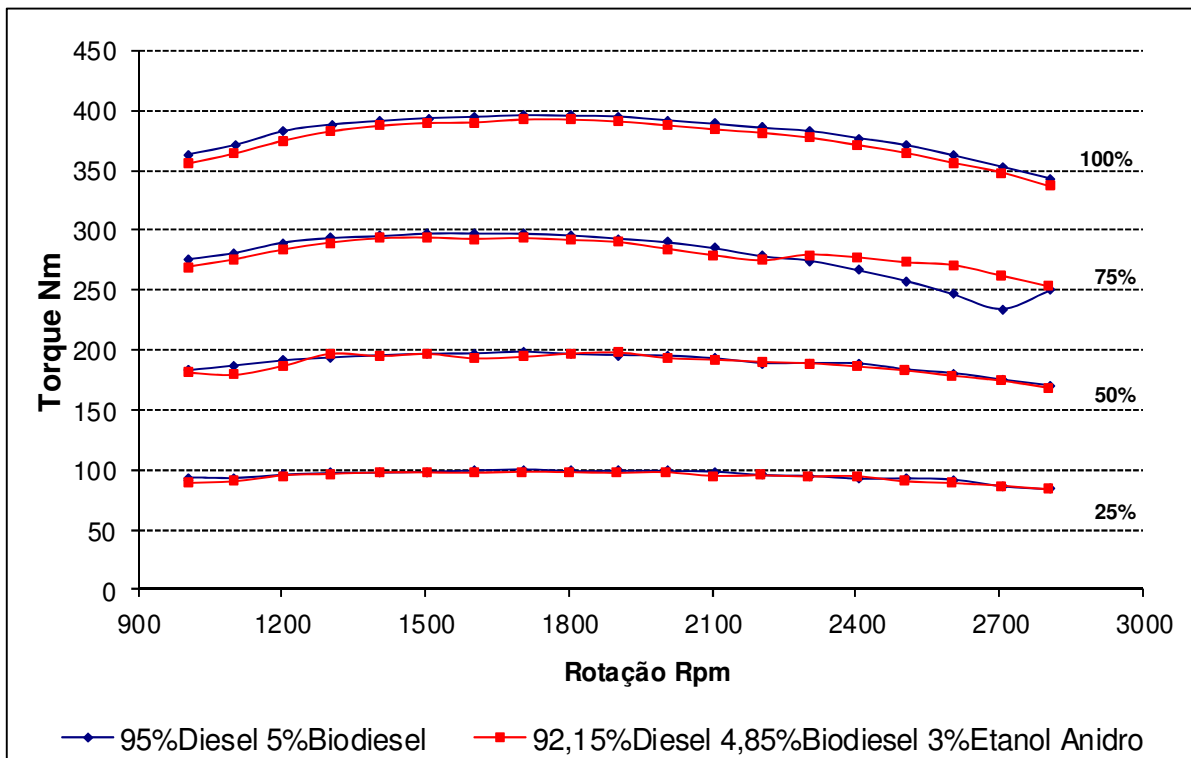


Figura 5.15. Gráfico de Torque Variando as Cargas do Motor

Analisando o gráfico de torque, houve uma pequena variação no torque do motor quando este utilizou como combustível a mistura 92,15% diesel, 4,85% biodiesel e 3% de etanol anidro ou com 95% diesel com %5 biodiesel, todos os valores encontrados estão abaixo da incerteza de medição do banco de testes. Exceto para a curva com 75% de carga onde há uma região que a mistura apresentou um torque maior do que o 95% diesel com %5 biodiesel.

A Figura 5.16 representa o gráfico do consumo médio de combustível para uma das misturas de combustíveis ensaiadas. Analisando as curvas de consumo conclui-se que tal como a potência e o torque o consumo do motor também não apresentou alteração significativa na eficiência energética, pois a diferença entre os valores ficaram menores que a incerteza da bancada de testes. Exceto para a curva com 75% de carga onde há uma região que a mistura apresentou um consumo médio maior do que o 95% diesel com %5 biodiesel.

Assim conclui-se que o motor pode operar com qualquer uma das misturas de combustíveis sem aumento significativo de consumo combustível.

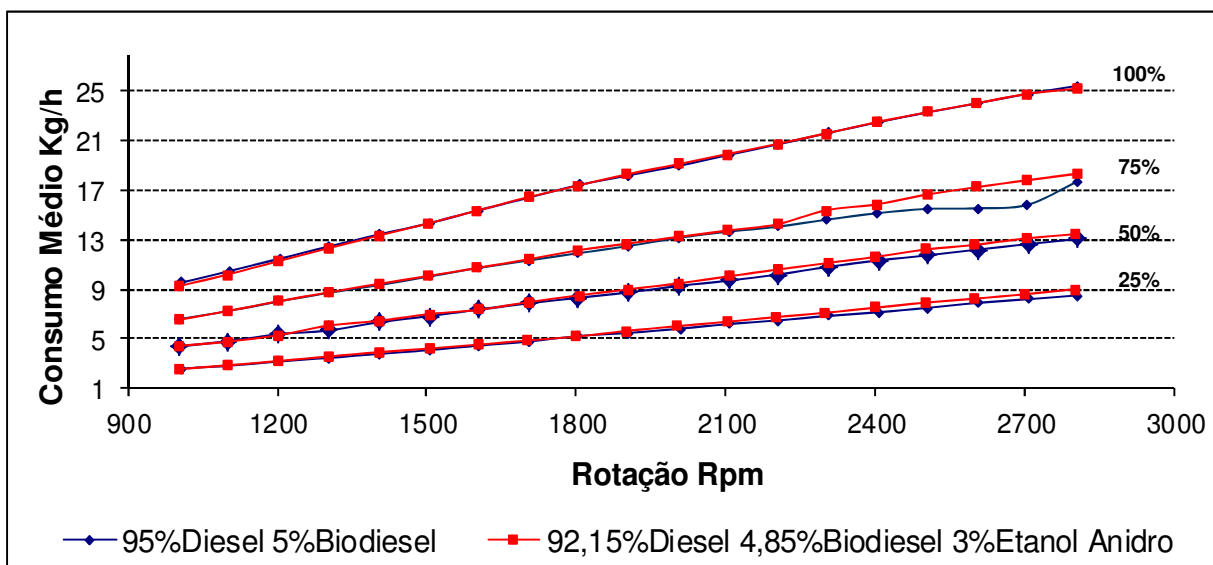


Figura 5.16. Gráfico de Consumo Médio de Combustível Variando as Cargas do Motor

Analisando o gráfico de consumo específico mostrado na Figura 5.17, verificamos que para as cargas de 50, 75 e 100% não houve aumento do consumo específico do motor quando este utilizou como combustível a mistura 92,15% diesel, 4,85% biodiesel e 3% de etanol anidro em comparação com 95% diesel e 5% biodiesel, pois todos os valores encontrados estão abaixo da incerteza de medição do banco de testes. Para a carga de 25% o consumo específico da mistura 92,15% diesel, 4,85% biodiesel e 3% de etanol anidro foi aproximadamente 10% maior do que quando o motor operou com 95% diesel e 5% biodiesel. Resultados semelhantes foram encontrados por Li et al (2005).

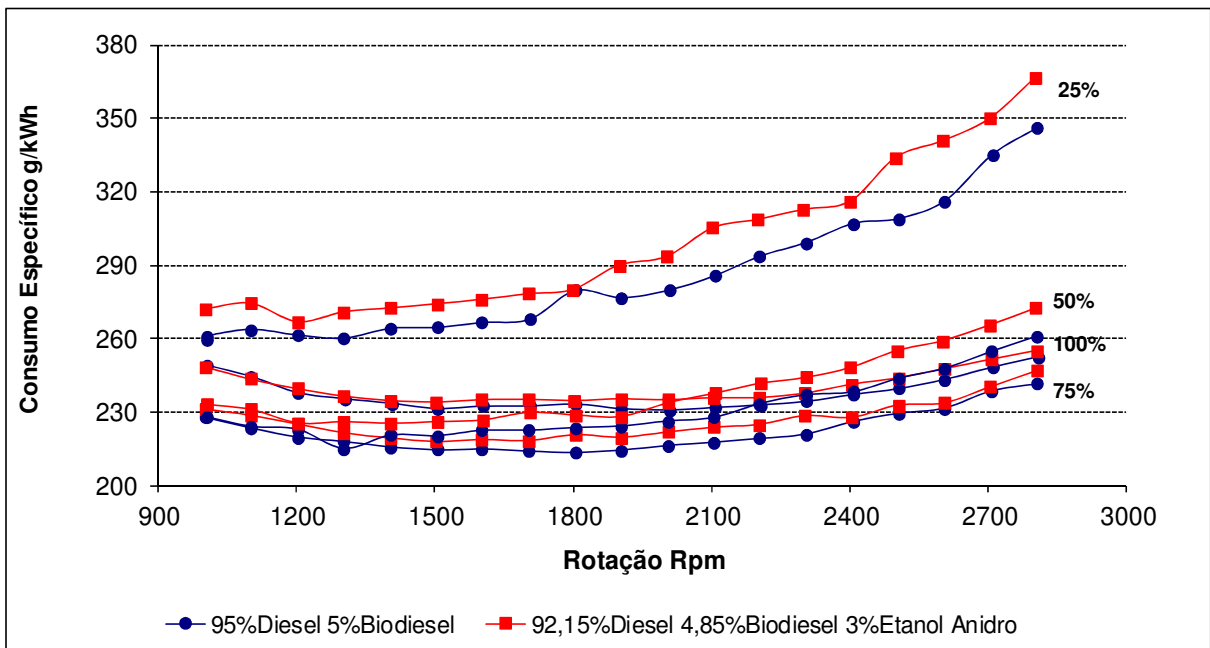


Figura 5.17. Gráfico do Consumo Específico de Combustível Variando as Cargas do Motor

A Figura 5.17 apresenta os resultados do consumo específico de combustível, sendo que o combustível com 3% de etanol apresentou consumo ligeiramente superior ao combustível diesel padrão. Este maior consumo pode ser explicado pelo menor poder calorífico do etanol em relação ao diesel e ao biodiesel

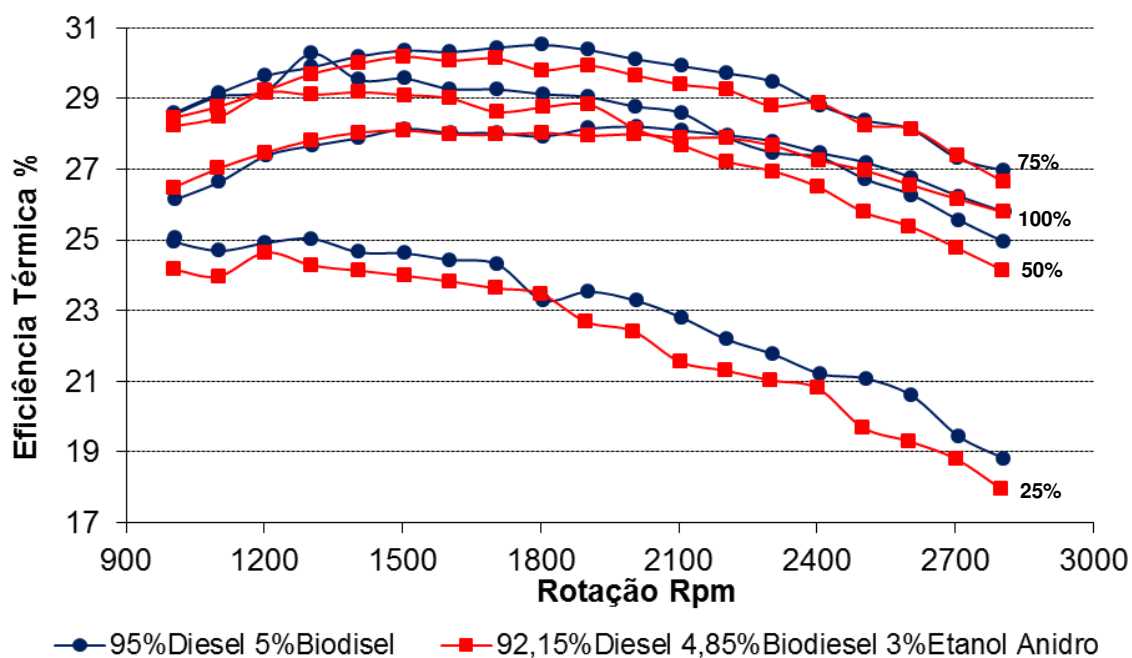


Figura 5.18. Gráfico da Eficiência Global de Combustível Variando as Cargas do Motor

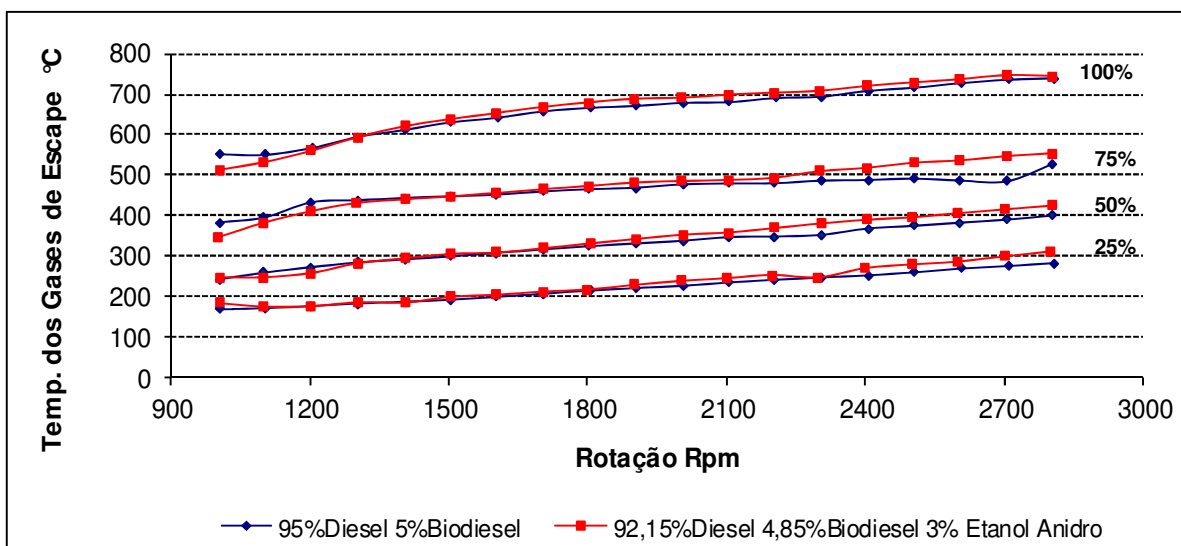


Figura 5.19. Variação da Temperatura dos Gases de Escape Variando as Cargas do Motor

Na Figura 5.18 é apresentada a eficiência térmica global do motor nas diversas condições de operação. Considerando a carga do motor, as maiores eficiências foram observadas com 75% de carga. O excesso de ar nesta condição contribui para maior efetividade e velocidade de queima do combustível quando comparado à condição de 100% de carga, que opera próximo à relação ar/combustível estequiométrica. Comparando-se os dois combustíveis, para uma mesma carga e condições de operação, o combustível diesel padrão apresentou eficiência térmica ligeiramente maior que a mistura que contém etanol, principalmente em cargas parciais. É muito difícil explicar este comportamento sem conhecer-se a evolução do processo de combustão nos dois casos. Uma diferença notável entre o combustível diesel e etanol anidro é a entalpia de vaporização, cujo valor para o etanol é cerca de três vezes maior que o diesel. Etanol tem entalpia de vaporização de 919 kJ/kg e o diesel, da ordem de 270 kJ/kg (Cengel e Boles, 2006). Em condições idênticas, a temperatura da mistura antes do início da combustão torna-se menor para a mistura com etanol do que para o diesel padrão. No entanto, ainda é difícil afirmar que esta seja a razão principal, pois outros fatores, cujos dados não estão disponíveis, devem ser levados em consideração.

Na Figura 5.19 são mostradas as temperaturas de saída dos gases de combustão para todas as condições testadas. É razoável que para o combustível que contém etanol as temperaturas de saída sejam ligeiramente superiores em relação ao combustível diesel padrão, pois este apresentou maior eficiência térmica da transformação de calor em trabalho mecânico.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

A mistura 92,15% de diesel, 4,85% de biodiesel e 3% de etanol anidro apresenta uma alternativa para redução dos custos de produção do setor sucroalcooleiro brasileira, tornando-o mais competitivo e menos dependente do diesel para movimentação da sua frota. Observa-se que isso é válido todas as vezes que o preço de venda do etanol anidro estiver mais baixo que o do diesel. A mistura 92,15% diesel, 4,85% biodiesel e 3% etanol anidro não pode ser comercializada no Brasil, sendo seu uso liberado apenas com um combustível experimental, podendo ser utilizados apenas 10.000 litros por mês de acordo com RESOLUÇÃO ANP N° 19, DE 22/06/2007 - DOU 25/06/2007.

A mistura de diesel 92,15%, biodiesel 4,85% e etanol anidro 3% mostrou-se um combustível adequado para utilização em motores diesel, apresentando a vantagem de conter 7,85% em volume de combustíveis renováveis, devido à presença do biodiesel e do etanol anidro, ambos classificados como biocombustível. O índice de cetano da mistura apresentou-se acima do mínimo exigido para um combustível diesel e o teste de lubricidade não apresentou aumento de desgaste significativo em relação ao combustível diesel.

A pressão de vapor da mistura com etanol, no entanto, aumentou, reduzindo o ponto de fulgor. Isto obriga à utilização de cuidados similares, no armazenamento e transporte, ao utilizado em relação ao etanol puro.

A presença do etanol na mistura causou impacto insignificante na performance do motor, considerando os resultados obtidos nos teste de potencia, torque e consumo médio. A mistura com etanol apresentou performance ligeiramente menor que o combustível diesel padrão, no entanto, esta diferença é da mesma ordem de grandeza que as incertezas de medições. A eficiência térmica global do motor apresentou-se ligeiramente maior para o combustível diesel padrão.

De uma maneira geral, a utilização de 3% de etanol anidro (em volume) misturada ao combustível diesel (com 5% de biodiesel) mostrou-se tecnicamente viável.

Como sugestões para próximos trabalhos destacamos a necessidade de ensaio em banco de emissões para avaliar a emissão de material particulado gerado pela mistura contendo 3% de etanol anidro. Outro ponto importante é a realização de ensaio de durabilidade a fim de se comparar o desgaste apresentado por um motor operando com a mistura diesel-biodiesel-etanol com o desgaste típico de um motor operando com o diesel padrão. Este ensaio pode ser feito em bancada dinamométrica (por exemplo, 1000 horas de operação) ou em campo, operando-se diversos motores com a mistura diesel-biodiesel-etanol.

Outra sugestão é a realização do ensaio da mistura em bancada utilizando um motor com injeção eletrônica a fim de verificar se nesse equipamento também não ocorreriam mudanças significativas nas curvas de performance.

Sugere-se que seja realizado o mesmo trabalho para outras proporções de diesel, biodiesel e etanol anidro, verificando-se qual a máxima adição de biodiesel e etanol anidro no diesel sem acarretar perdas de eficiência energética no motor.

Referências Bibliográficas

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

BARBOSA, L. R. **Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel**. 2006. 64p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Lavras.

BILGIN, A.; DURGUN, O.; SAHIN, Z. The Effects of Diesel-Ethanol Blends on Diesel Engine Performance. **Energy Sources**, v.24, n.5, p.431—440, 2002.

CAETANO, TATIANA. **Estudo da miscibilidade de etanol com componentes do diesel e biodiesel**. 2003. 129p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CAMARGO, A. C.; USHIMA, A. H.; RIBEIRO, A. M. M.; SOUZA, M. E. P.; SANTOS, N. F. Conservação de energia na indústria do açúcar e do álcool. IPT (Ed). Processo de fabricação de açúcar e etanol, 1990, cap. 3, p.17-54.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A.; **Thermodynamics: An Engineering Approach**. 6th edition. New York, United States. McGraw-Hill, 2006.

CHEENKACHORN, K.; FUNGTAMMASSAN, B. An Investigation of Diesel-Ethanol-Biodiesel Blends for Diesel Engine: Part 1. Emulsion Stability and Fuel Properties. **Energy Sources**, Part A, v.32, p.637—644, 2010.

D'ARCE, M. A. B. R. **Grãos e óleos vegetais: matérias primas**. Disponível em: <http://www.esalq.usp.br/departamentos/lan/pdf/materiasoleaginosas.pdf>. Acesso em: 19/08/2011.

FERNANDO, S.; HANNA, M. Development of a novel biofuel blend using ethanol-biodiesel-diesel microemulsions: eb-diesel. **Energy & Fuels**, v. 18, n. 6, p.1-9, 2004.

GRANDO, F. A força do combustível verde. **Revista do CONFEA**, Brasília, v.9, n.22, p.14-17, 2005.

IBP. **Planejamento Estratégico Tecnológico e Logístico para o Programa Nacional de Biodiesel**. Relatório Final, Mod. I e II; 2007.

HANSEN, A.C.; ZHANG, Q.; LYNE, P. W.L. Ethanol–diesel fuel blends—a review. **Bioresource Technology**. n.96, p.277–285, 2005.

HASSETT, D. J.; HASAN, R. A. Sunflower oil methyl ester as diesel fuel. **In: vegetable oil fuels – proceedings of international conference on plant and vegetable oils as fuel**. Michigan. Proceedings Michigan: American Society of Agricultural Engineers, 1982. p. 123-126.

HASIMOGLU, C. Exhaust emission characteristics of a low-heat-rejection diesel engine fuelled with 10 per cent ethanol and 90 percent diesel fuel mixture. **J. Automobile Engineering**, Part D, v.222, p.93-100, 2008.

HEYWOOD, J. B. Internal combustion engine fundamentals. **McGraw-Hill Book Company**, 1988, v 01, p.1-915.

JOAQUIM, R. O. C. **Verificação do comportamento da lubricidade do óleo diesel veicular com adição de etanol**. 2007. 103. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

PIANOVSKI JR, GUILHERME. **Utilização de misturas de óleo diesel e ésteres etílicos de óleo de soja como combustíveis alternativos: análise do desempenho e do processo de combustão no motor diesel**. 2002. 149. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba.

KWANCHARON, P.; LUENGNARUEMITCHAI, A.; JAIN-IN, S. Solubility of a diesel–biodiesel–ethanol blend, its fuel properties, and its emission characteristics from diesel engine. **Fuel**, n.86, p.1053–1061, 2007.

KOIKE, G.; DAL BEM, A. J.; PASSARINI, L. C. Utilização de etanol em motores de ciclo diesel. **Minerva**, v.3, n.1, p.141-149, 2006

LAPUERTA, M.; GARCIA-CONTRERAS, R.; AGUDELO, J. R. Lubricity of Ethanol-Biodiesel-Diesel Fuel Blends. **Energy Fuels**, n.24, p.1374–1379, 2010.

LI, D.; ZHEN G.; XINGCAI L.; WU-GAO. Z.; JIAN-GUANG. Y. Physico-chemical properties of ethanol–diesel blend fuel and its effect on performance and emissions of diesel engines. **Renewable Energy**, n.30, p.967–976, 2005.

LU, X.; YANG, J.; ZHANG, W.; HUNAG, Z. Improving the Combustion and Emissions of Direct Injection Compression Ignition Engines Using Oxygenated Fuel Additives Combined with a Cetane Number Improver. **Energy & Fuels**, v.19, n.5, p.1879-1888. 2005.

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

MENEZES, W. E.. **Produção de trabalho, geração de contaminantes e tratamento pós-combustão em motores ciclo diesel**. 2009. 170. Tese (Doutorado) – Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação. Testes e ensaios para validação do uso da mistura biodiesel B5 em motores e veículos. Brasília, 2009. 176 p.

MIC - MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E DO COMÉRCIO. Secretaria de Tecnologia Industrial. **Obtenção de combustível de óleo vegetal em nível de propriedade rural**. Brasília, 1985. 98 p. (I)

MIC - MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E DO COMÉRCIO. Secretaria de Tecnologia Industrial. **Óleos vegetais – experiência de uso automotivo desenvolvida pelo programa OVEG I: relatório executivo da comissão técnica**. Brasília, 1985. 344 p. (II)

PARENTE, E. J. S. Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado. Disponível em: <http://www.tecbio.com.br>. Acesso em: 10 fev. 2005.

PARK, S. H.; KIM, S. H.; LEE, C. S. Mixing stability and spray behavior characteristics of diesel-ethanol-methyl ester blended fuels in a common-rail diesel injection system. **Energy Fuels**, n.23, p.5228–5235, 2009.

PEREIRA, J. C. **Motores e Geradores**. Disponível em: www.joseclaudio.eng.br . Acesso em: 20 mar. 2011.

REYES, Y.; ARANDA, D. A. G.; SANTANDER, L. A. M.; CAVALO, A.; BELCHIOR, C. R. P. Action Principles of Cosolvent Additives in Ethanol-Diesel Blends: Stability Studies. **Energy & Fuels**, n.23, p.2731–2735, 2009.

RINALDI, R.; GARCIA, C.; MARCINIUK, L. L.; ROSSI, A. V.; SCHUCHARDT, U. Síntese de Biodiesel: uma Proposta Contextualizada de Experimento para Laboratórios de Química Geral. **Química Nova**, n 30, p.5-1374, 2007.

SILVA, JOSÉ EVANDRO. **Equilíbrio líquido-líquido em misturas de hidrocarbonetos + alcoóis: comportamento de fases e desenvolvimento de aditivos para aumentar a miscibilidade em misturas óleo diesel + etanol**. 2005. 163. Tese (Doutorado) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

TORRES-JIMENEZ, E.; SVOLJSAK, M.; GREGORC, M.; LISEC, I.; DORADO, M. P.; KEGL, B. Physical and Chemical Properties of Ethanol-Biodiesel Blends for Diesel Engines. **Energy & Fuels**, n.24, p.2002–2009, 2010.