



Felipe Carneiro da Cunha Torres

**Estudo da Utilização do Biodiesel para
Geração de Energia Elétrica no Brasil**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Professor José Alberto dos Reis Parise

Rio de Janeiro
Setembro de 2006



Felipe Carneiro da Cunha Torres

**Estudo da Utilização do Biodiesel para
Geração de Energia Elétrica no Brasil**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Alberto dos Reis Parise

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. Sérgio Leal Braga

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. Carlos Valois Maciel Braga

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Professor Carlos Eduardo Reuther de Sirqueira

Petrobras / Universidade Católica de Petrópolis

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 22 de Setembro de 2006

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Felipe Carneiro da Cunha Torres

Graduou-se em Engenharia Mecânica pela PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2001. Em 2002 foi efetivado como Engenheiro da Promon Engenharia, onde atuou em projetos industriais ligados as áreas de geração de energia elétrica, óleo&gás, siderurgia, entre outros. Em 2003, participou como engenheiro de campo da implementação da Usina Termelétrica de Norte Fluminense (780 MW, ciclo combinado).

Ficha Catalográfica

Torres, Felipe Carneiro da Cunha

Estudo da utilização do biodiesel para geração de energia elétrica no Brasil / Felipe Carneiro da Cunha Torres ; orientador: José Alberto dos Reis Parise. – 2006.
115 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Biodiesel. 3. Geração de eletricidade. 4. Balanço térmico. 5. Motor diesel. 6. Energia alternativa. 7. Biomassa. I. Parise, José Alberto dos Reis. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621.3

Com gratidão,

À minha mãe, Gertrudes Carneiro da Cunha
Ao meu irmão, Rodrigo Carneiro da Cunha Torres
À minha avó, Dulce Carneiro da Cunha

Com saudade,

Ao meu avô, Stélio Carneiro da Cunha

Com amor,

À minha esposa, Cecília Müller Haddad

Agradecimentos

Ao meu orientador José Alberto dos Reis Parise pela orientação, apoio e compreensão durante o curso de Mestrado.

Ao Professor Antônio Guilherme Garcia Lima pelo pronto atendimento às solicitações durante a elaboração do modelo termodinâmico.

Aos Engenheiros da Promon Engenharia Gilson Krause, Guilherme Velho, João Fontoura, Luiz Granato e Carl Westhoff, pela contribuição na escolha do tema e incentivo durante a elaboração desta Dissertação.

Aos Engenheiros Eduardo dos Santos Barata (UTE Bahia – Usina Termelétrica) e Paulo Lima (ECOLUZ), pelas colaborações que muito facilitaram o desenvolvimento deste trabalho.

À Promon Engenharia por ter me cedido as horas necessárias para o desenvolvimento do curso de Mestrado e por ter patrocinado diversos seminários dentro e fora do Estado do Rio de Janeiro sobre o tema Biodiesel.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

Aos meus colegas da PUC-Rio.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio pelos ensinamentos e pela ajuda.

Resumo

Torres, Felipe Carneiro da Cunha; José Alberto dos Reis Parise (Orientador). **Utilização do Biodiesel para a Geração de Energia Elétrica no Brasil.** Rio de Janeiro, 2006. 115p. MSc. Dissertação – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Com a assinatura da Lei 11.097 de 13 de Janeiro de 2005, o Biodiesel fica introduzido na matriz energética brasileira. Até o fim de 2007, a mistura deste biocombustível ao diesel mineral, derivado do petróleo, é voluntária pelas distribuidoras de combustíveis. A partir de Janeiro de 2008, todo o óleo diesel será comercializado obrigatoriamente com 2% de Biodiesel misturado e, a partir de 2013 a mistura deverá conter 5% de Biodiesel. O mercado potencial de Biodiesel para esta meta de 2008 é de aproximadamente 800 mil toneladas anuais. Revela-se, portanto, um enorme esforço de todas as esferas interessadas neste mercado: instituições de ensino e pesquisa, agro-indústrias, indústrias ligadas ao setor energético, entre outras, com objetivo de se atingir a meta estipulada pela Lei. Como parte deste esforço, no presente trabalho foram levantados aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais sobre a implementação do programa de implementação do Biodiesel na matriz energética brasileira, visando identificar os prós e contras da utilização deste biocombustível. Um modelo de análise termodinâmica de uma usina termelétrica foi desenvolvido para descrever o comportamento de motores ciclo diesel de grande porte operando com 4 tipos diferentes de Óleo Combustível e 5 tipos de Biodiesel.

Palavras-Chave

Biodiesel ; Geração de Eletricidade ; Balanço Térmico ; Motor diesel ; Energia Alternativa; Biomassa.

Abstract

Torres, Felipe Carneiro da Cunha; José Alberto dos Reis Parise (Advisor). **Aspects of Electricity Generation in Brazil, using Biodiesel as Fuel.** Rio de Janeiro, 2006. 115p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

With the Federal Act number 11.097, from January 13, 2005, Biodiesel is introduced in the Brazilian energy matrix. To the end of 2007, a voluntary mixture of this fuel to mineral diesel oil can be prepared by fuel distributors. From January 2008, diesel oil will have to be commercialized with 2% of Biodiesel. This percentage is to be increased to 5% by 2013. The goal for 2008 means, approximately, 800 thousand ton of Biodiesel annually. All parts involved, universities, research institutes, agro business and energy industries, among others, have been putting a great deal of effort to meet the target set by Federal Government. The present work is a small contribution to this effort. Technical, economical, social and environmental aspects of the problem have been taking into account in the present study, in order to identify pros and cons of the utilization of Biodiesel. A simple thermodynamic model of a thermal-electric power plant was developed to predict the behavior of a large capacity diesel engine operating with conventional fuel (four different types of fuel oil) and with Biodiesel.

Key-Words

Biodiesel; Electricity Generation; Energy Balance; Diesel Engine; Alternative Energy, Biomass.

Sumário

1. Introdução	16
1.1. Objetivo	16
1.2. Organização do Trabalho	16
1.3. Situação Atual do Setor Elétrico Brasileiro	17
1.4. Cenário Brasileiro	19
1.5. Análise das Alternativas Atuais e Oportunidades para Expansão do Setor de Geração de Energia Elétrica no Brasil	21
2. O Biodiesel	25
2.1. Experiência da Europa com o Biodiesel	25
2.2. Experiência dos EUA com o Biodiesel	30
2.3. Aspectos Técnicos do Biodiesel	31
2.4. Aspectos Econômicos sobre o Biodiesel	59
2.5. Aspectos Sociais do Biodiesel	63
2.6. Aspectos Ambientais sobre o Biodiesel	64
3. Simulação de uma Usina Termelétrica	70
3.1. Sistema a ser modelado	71
3.2. Modelo Matemático	77
3.3. Solução – EES	85
3.4. Atrito em motores Diesel	86
3.5. Número de Cetano	88
4. Resultados	91
4.1. Casos estudados	91
4.2. Resultados	91
4.3. Compilação dos resultados	92
5. Conclusões	97
6. Referências Bibliográficas	99

Lista de Figuras

- Figura 01 - Processamento da contabilização da energia elétrica produzida e consumida no Brasil.
- Figura 02 - Estrutura da oferta de eletricidade no Brasil.
- Figura 03 - Capacidade de produção anual de Biodiesel na União Européia.
- Figura 04 - Produção anual de Biodiesel na União Européia.
- Figura 05 - Capacidade de produção anual de Biodiesel na Alemanha.
- Figura 06 - Preços do Biodiesel e do Diesel na bomba de combustível na Alemanha.
- Figura 07 - Produção anual de Biodiesel nos Estados Unidos da América.
- Figura 08 - Variação do poder lubrificante para diferentes *blends* de Biodiesel.
- Figura 09 - Variação do ponto de névoa (cloud point), do ponto de entupimento (C.F.P.P.) e do ponto de fluidez (pour point) para diferentes concentrações de Biodiesel.
- Figura 10 - Variação nas emissões de poluentes para diferentes concentrações de Biodiesel.
- Figura 11 - Distribuição da utilização de óleos vegetais para se transformar em Biodiesel.
- Figura 12 - Produção anual de mamona no Brasil.
- Figura 13 - Modelo proposto de comercialização do Biodiesel.
- Figura 14 - Comparação entre emissões de Biodiesel produzido por diferentes matérias-primas.
- Figura 15 - Balanço de massa e energia em um motor a combustão interna.

Figura 16 - Modelo do grupo moto-gerador.

Figura 18 - Efeito do número de cetano na emissão de fumaça em motor Diesel

Figura 19 - Diferença de consumo de combustível por dia de operação considerando apenas um grupo moto-gerador operando.

Figura 20 - Diferença de consumo de combustível por mês de operação.

Figura 21 - Diferença de consumo de combustível por ano de operação.

Figura 22 - Diferença de custo de aquisição combustível por mês de operação.

Lista de Tabelas

- Tabela 01- Principais diferenças dos modelos do setor elétrico brasileiro, antes e após a reestruturação do setor.
- Tabela 02 - Especificação do Biodiesel B100 pela ANP.
- Tabela 03 - Comparação de propriedades entre Diesel nº 2 e Biodiesel.
- Tabela 04 - Propriedades do Biodiesel pela norma ASTM D6751.
- Tabela 05 - Pontos de interesse para Utilização de Biodiesel em Baixas Temperaturas.
- Tabela 06 - Consumo de óleo Diesel no Brasil em 2004.
- Tabela 07 - Comparação de emissões da queima de Biodiesel proveniente de óleo de soja, em relação à queima de diesel.
- Tabela 08 - Características de alguns óleos combustíveis.
- Tabela 09 - Comparação entre Potências de um motor funcionando com diferentes combustíveis.
- Tabela 10 - Comparação entre Eficiências de um motor funcionando com diferentes combustíveis.
- Tabela 11 - Comparação entre B.F.S.C. de um motor funcionando com diferentes combustíveis.
- Tabela 12 - Temperatura estimada dos gases de exaustão para diferentes combustíveis
- Tabela 13 - Apresentação do número de cetano para diferentes tipos de Biodiesel
- Tabela 14 - Comparação entre os consumos de combustível

Nomenclatura

B.S.F.C.	Brake Specific Fuel Consumption [g/kWh]
C_a	Consumo anual de combustível [kg/mês]
C_d	Consumo diário de combustível [kg/dia]
C_m	Consumo mensal de combustível [kg/mês]
$C_{P_{fa,e,m}}$	Calor específico do fluido de arrefecimento na entrada do motor [kJ/kg.°C]
$C_{P_{ex,s,m}}$	Calor específico do fluido de arrefecimento na saída do motor [kJ/kg.°C]
$C_{P_{ar,e,m}}$	Calor específico do ar na entrada do motor [kJ/kg.°C]
$C_{P_{cb,e,m}}$	Calor específico do combustível na entrada do motor [kJ/kg.°C]
$\dot{E}_{cb,e,m}$	Taxa de fornecimento de energia pelo combustível [kW]
$\dot{E}_{ei,s,m}$	Demanda de potência [kW]
$\dot{E}_{ex,s,m}$	Taxa de energia perdida pelos gases de exaustão [kW]
$\dot{E}_{fa,s,m}$	Taxa de energia retirada pelo fluido de arrefecimento [kW]
$\dot{E}_{perdas,s,m}$	Taxa de energia perdida por outras formas de energia [kW]
$h_{ag,s,c}$	Entalpia da água na saída do aquecedor de óleo [kJ/kg]
$h_{ag,e,c}$	Entalpia da água na entrada do aquecedor de óleo [kJ/kg]
$h_{ag,s,c}$	Entalpia da água na saída do aquecedor de óleo [kJ/kg]
$h_{ag,e,a}$	Entalpia da água na entrada do aquecedor de óleo [kJ/kg]
$h_{ag,s,a}$	Entalpia da água na saída do aquecedor de óleo [kJ/kg]
$\dot{m}_{ag,e,c}$	Vazão mássica de água na caldeira [kg/s]
$\dot{m}_{ag,e,a}$	Vazão mássica de água no aquecedor de combustível [kg/s]
$\dot{m}_{cb,e,a}$	Vazão mássica de combustível no aquecedor de combustível [kg/s]
$\dot{m}_{cb,e,m}$	Vazão mássica do combustível na entrada do motor [kg/s]
$\dot{m}_{fa,e,m}$	Vazão mássica do fluido de arrefecimento [kg/s]
$\dot{m}_{ar,e,m}$	Vazão mássica de ar [kg/s]
P_A	Potência de atrito [kW]

PCI	Poder calorífico inferior [kJ/kg]
PCI_{cb,e,m}	Poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg]
\dot{Q}_c	Taxa de rejeito de calor da caldeira [kW]
\dot{Q}_a	Taxa de rejeito de calor do aquecedor de combustível [kW]
r_c	Razão entre o consumo específico do combustível analisado pelo consumo específico do combustível de referência [-]
$T_{ex,s,m}$	Temperatura dos gases de exaustão na saída do motor [°C]
$T_{ar,e,m}$	Temperatura dos gases de exaustão na entrada do motor [°C]
$T_{cb,e,m}$	Temperatura do combustível na entrada do motor [°C]
$T_{ex,e,c}$	Temperatura dos gases de exaustão na entrada da caldeira [°C]
$T_{ex,s,c}$	Temperatura dos gases de exaustão na saída da caldeira [°C]
$T_{cb,s,a}$	Temperatura do combustível na saída do aquecedor de combustível [°C]
$T_{cb,e,a}$	Temperatura do combustível na entrada do aquecedor de combustível [°C]
$T_{ex,s,m}$	Temperatura dos gases de exaustão na saída do motor [°C]
T_A	Torque de atrito [N.m]
$T_{fa,s,m}$	Temperatura do fluido de arrefecimento na saída do motor [°C]
$T_{fa,e,m}$	Temperatura do fluido de arrefecimento na entrada do motor [°C]
$T_{cb,e,a}$	Temperatura do combustível na entrada do aquecedor de combustível [°C]
∇	Cilindrada [l]
\dot{V}	Volume consumido na unidade de tempo [m³]
\dot{W}	Potência elétrica [W]

Símbolos Gregos

$\alpha_{ex,s,m}$	Porcentagem da energia total que entra no motor, perdida pelos gases de exaustão [-]
$\alpha_{fa,s,m}$	Porcentagem da energia total que entra no motor, perdida pelo fluido de arrefecimento [-]
$\alpha_{mec,s,m}$	Eficiência térmica do motor [-]
$\alpha_{perdas,s,m}$	Porcentagem da energia total que entra no motor, perdida sob outras formas de energia [-]
ρ	Massa específica [kg/m ³]
ω	Velocidade angular [rpm]

1

Introdução

Com a assinatura da Lei Federal número 11.097 de 13 de Janeiro de 2005 (Congresso Nacional, 2005), abre-se um mercado potencial de produção de Biodiesel de aproximadamente 800 mil toneladas anuais. Contudo, para se atenderem às normas nacionais e internacionais de produção e uso do Biodiesel, numerosos trabalhos têm sido publicados a respeito dos diferentes tipos de Biodiesel, provenientes de diferentes matérias primas, diferentes rotas tecnológicas de produção, e também sobre impactos sociais, ambientais estratégicos entre outros. Geralmente, cada trabalho publicado concentra-se em um dos aspectos acima, havendo, ainda, uma lacuna de trabalhos que ponderem, de maneira abrangente, sobre todos os aspectos, positivos e negativos, da implementação do programa de Biodiesel no Brasil.

1.1.

Objetivo

O presente trabalho busca contribuir para esta lacuna, reunindo os principais aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais a respeito da produção e utilização do Biodiesel no Brasil.

Adicionalmente é apresentado um modelo termodinâmico para se avaliar o comportamento de um motor ciclo diesel de grande porte (Diesel lento) operando com Biodiesel, proveniente de matéria prima tipicamente brasileira. Apesar de já existirem na Europa usinas termelétricas operando com Biodiesel, não foram encontrados, na literatura brasileira, trabalhos de simulação para centrais térmicas deste tipo.

1.2.

Organização do Trabalho

Esta dissertação está dividida em quatro capítulos.

O primeiro capítulo tem como objetivo descrever a situação do setor energético brasileiro, as alternativas de expansão e como o Biodiesel se situa na matriz energética brasileira.

O segundo capítulo aborda os aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais, incluindo oportunidades do protocolo de Kyoto, sobre a produção e utilização de Biodiesel no Brasil. Neste capítulo é feito um paralelo com as experiências sobre este biocombustível na Europa e Estados Unidos da América.

No capítulo seguinte, o terceiro, é apresentado um modelo de simulação termodinâmica de um motor ciclo diesel utilizando o Biodiesel como combustível. Apesar do programa de utilização de Biodiesel brasileiro não ser destinado à utilização do Biodiesel puro e sim misturado ao diesel mineral, esta alternativa não deve ser descartada. Pode tornar-se atraente, principalmente, para comunidades isoladas, onde o custo do transporte de diesel mineral é elevado.

O capítulo de número quatro trata das conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

1.3.

Situação Atual do Setor Elétrico Brasileiro

O setor elétrico brasileiro tem sofrido grandes mudanças estruturais nos últimos anos com o objetivo de introduzir a livre competição nos segmentos de geração e comercialização (Lora e Nascimento, 2004). A partir de 1991, várias alterações na legislação foram introduzidas visando atrair a participação do capital privado, abrindo espaço para a geração descentralizada de energia. A reformulação também possibilitou a inserção de novos agentes na prestação dos serviços de energia elétrica, entre eles a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e o Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.

Lora e Nascimento (2004) citam que a reestruturação do setor foi conduzida pelo Ministério das Minas e Energia – MME e teve como principais objetivos reduzir o papel do Estado nas funções tipicamente empresariais e desverticalizar o setor, o que pode ser verificado pela venda de concessionárias de energia elétrica, como a Light, CERJ, CESP e Excelsa.

Os anos 90 reuniram todos os fatores que poderiam contribuir para o agravamento de uma crise no Setor Elétrico: o esgotamento da capacidade de geração de energia elétrica das hidrelétricas existentes, o aquecimento da economia provocado pelo Plano Real, a necessidade de novos investimentos e a escassez de recursos do Governo para atender a esta necessidade diante de outras prioridades (Lora e Nascimento, 2004).

Fazia-se necessário encontrar alternativas que viabilizassem uma reforma e expansão do setor, com capitais privados e a entrada de novos agentes, onde o governo assumisse o papel de agente orientador e fiscalizador dos serviços de energia elétrica.

Lora e Nascimento (2004) citam que, através do Projeto RE-SEB (Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro) de 1996, iniciou-se a fase de concepção do novo modelo, sob a coordenação da Secretaria Nacional de Energia do Ministério de Minas e Energia, chegando-se à conclusão de que era preciso criar uma Agência Reguladora (Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL), um operador para o sistema (Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS) e um ambiente (Mercado Atacadista de Energia Elétrica - MAE), através de uma operadora (Administradora de Serviços do Mercado Atacadista de Energia Elétrica - ASMAE), onde fossem transacionadas as compras e vendas de energia elétrica. O Projeto RE-SEB foi concluído em agosto de 1998 (Lora e Nascimento, 2004).

No segmento de produção de energia elétrica, o modelo implementado abrange três modalidades de exploração: serviço público, produção independente e autoprodução. A produção independente, em decorrência da criação do Produtor Independente de Energia – PIE no novo modelo, possibilita a entrada de novos investidores com autonomia para realização de contratos bilaterais de compra e venda, de forma competitiva e com flexibilidade para consolidação de suas estratégias neste segmento (Lora e Nascimento, 2004).

No segmento de transporte de energia elétrica, onde o setor de distribuição também está sendo privatizado, a participação do capital privado já é majoritária. No setor de transmissão, o processo de licitação das linhas de transmissão está em andamento (Lora e Nascimento, 2004).

A mudança de papel do Estado no mercado de energia, deixando de ser executor para se tornar basicamente regulador, exigiu a criação de um órgão altamente capacitado para normatizar e fiscalizar as atividades do setor elétrico. Neste contexto de participação de capital privado no setor fez-se necessária à criação da ANEEL, pela Lei nº 9.427 de 1996 (ANEEL, 2005), com finalidade de regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica. Adicionalmente, em 1997, regulamentou-se o acesso às redes de transmissão o que garantiu que o PIE pudesse vender excedentes de eletricidade a terceiros independentemente das concessionárias locais.

As principais diferenças entre modelos, antigo e novo, de acordo com a Câmara de Comércio de Energia Elétrica (CCEE, 2005), são descritas na tabela abaixo:

Tabela 01 – Principais diferenças dos modelos do setor elétrico brasileiro, antes e após a reestruturação do setor.

Fonte: Câmara de Comércio de Energia Elétrica, 2005

Modelo Antigo	Modelo Novo
Financiamento através de recursos públicos	Financiamento através de recursos públicos (BNDES) e privados
Empresas estatais verticalizadas	Concessionárias divididas por atividade: geração, transmissão, distribuição e comercialização.
Maioria de empresas estatais	Abertura para empresas privadas
Monopólios com competição inexistente	Competição na geração e comercialização
Consumidores cativos	Consumidores Livres e Cativos
Tarifas reguladas	Preços livremente negociados na Geração e Comercialização.

1.4.

Cenário Brasileiro

De acordo com dados do Ministério das Minas e Energia (MME, 2005), o Balanço Energético Nacional de 2004 indica que a geração pública energia elétrica e de autoprodutores do Brasil atingiu 364,9 TWh em 2003, resultado 5,6% superior ao de 2002.

As importações de 37,1 TWh, somadas à geração interna, permitiram uma oferta total de energia de 402,1 TWh, montante 5,2% superior ao de 2002 (MME, 2005).

A geração nuclear, que em 2001 havia tido um grande incremento em decorrência da plena geração de Angra II, passando de 6,1 TWh para 14,3 TWh, teve ligeiro declínio em 2002, passando a 13,8 TWh (-3,1%). Em 2003 seguiu decrescendo, com geração de 13,4 TWh (-3,5%).

Já o gás natural, segundo o MME (2005), continuou a trajetória de crescimento na geração de eletricidade. Na geração pública manteve o patamar

de 9,1 TWh e na geração de autoprodutores passou de 3,3 TWh para 4,04 TWh. O gás natural já participa em 3,6% da geração total do País.

O incremento de 4,7% na geração total de autoprodutores se concentrou, principalmente, nos setores de papel e celulose e sucroalcooleiro .

A estrutura da oferta de energia elétrica de 2003 pode ser observada no gráfico da figura 02:

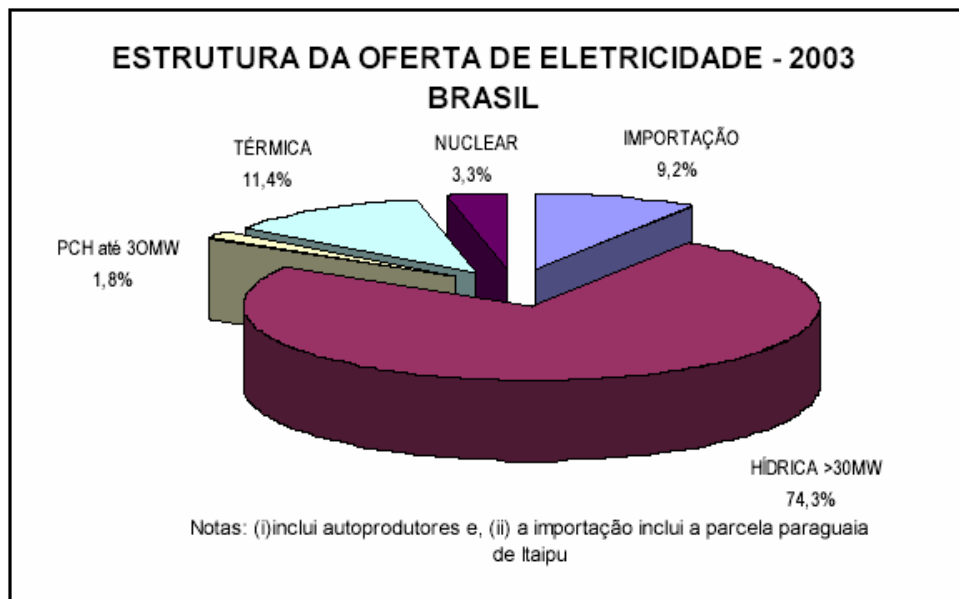


Figura 02: Estrutura da Oferta de Eletricidade no Brasil.
Fonte: Balanço Energético Nacional (MME, 2004)

Segundo o MME (2005), a capacidade instalada de geração do Brasil atingiu, em 2003, com um acréscimo de 4 GW, o montante de 86,5 GW, incluindo serviço público e autoprodutores. As principais usinas que entraram em operação foram: UHE Tucuruí, PA – unidades 13, 14 e 15 (1125 MW), UHE Itapebi, BA – unidades 1, 2 e 3 (450 MW), UTE Fortaleza, CE – unidade 1 (324 MW), UTE Camaçari, BA - unidades 1, 2 e 3 (210 MW), UTE Termonorte II, RO – unidade 3 (194 MW), UTE Termobahia, BA - unidade 1 (179 MW) e UTE Canoas, RS – unidade 1 (160 MW).

1.5.

Análise das Alternativas Atuais e Oportunidades para Expansão do Setor de Geração de Energia Elétrica no Brasil

O sistema elétrico brasileiro é caracterizado por grandes extensões de linhas de transmissão e, como citado, por um parque gerador predominantemente hidrelétrico.

Na década de 90 o Brasil experimentou uma retomada do crescimento econômico, impulsionado pelo controle da inflação por consequência do Plano Real. Este crescimento econômico levou à necessidade de expansão da capacidade de geração de energia elétrica. Contudo, as condições hidrológicas desfavoráveis no ano de 2001, aliadas a sucessivos anos em que o crescimento da demanda não era acompanhado pela oferta (Lora e Nascimento, 2004), resultaram em situação de racionamento energético. Como resultado imediato voltou-se a ter demanda equivalente à de 1995, com recuperação após o término do racionamento. De qualquer forma, os investimentos privados no setor e o crescimento histórico indicam que o consumo de energia elétrica deve expandir-se, nos próximos anos, a uma taxa média anual de 3,5%, sendo 7% na classe residencial, 6% na comercial e 2,5% na industrial (Lora e Nascimento, 2004).

Ainda segundo Lora e Nascimento (2004), investimentos realizados nos últimos anos, da ordem de US\$ 4,5 a 5,0 bilhões ao ano, dos quais cerca de 50% destinados à geração, não têm sido suficientes para garantir acréscimo anuais em torno de 3.500 MW à capacidade instalada de geração, potência necessária para atender ao crescimento verificado na demanda.

Neste cenário, pode-se verificar que as principais oportunidades de negócio do setor são:

- a. Novos empreendimentos de geração de energia elétrica;
- b. Novas linhas de transmissão;^[1]
- c. Privatização de sistemas de distribuição e de geração;
- d. Instalação de sistemas descentralizados, para atender áreas isoladas, utilizando fontes de energia renovável.

[1] O sistema de transmissão, com mais de 170.000km de extensão, é desenvolvido por empresas, na sua maioria, de controle dos governos federal e estaduais, não estando previsto, a curto prazo, a privatização destes ativos. O ingresso de capital privado é exercido através da concessão de novos empreendimentos

1.5.1.

Geração Hidrelétrica

O Brasil tem a maior parte da sua energia elétrica gerada por este tipo de aproveitamento, aproximadamente 74,3% de acordo com o Balanço Energético Nacional de 2004. Segundo o planejamento da Eletrobrás – Plano 2015 (Eletrobrás, 2005) – é recomendada a utilização de todas as fontes de energia para geração de energia elétrica, mas é considerado prioritário o desenvolvimento do programa hidrelétrico complementado por um programa termelétrico nuclear, a carvão e a gás natural (Coelho, 1999).

Atualmente, esforços têm sido dirigidos a incentivar a construção de usinas de menor porte, como as Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCH's ^[2], além da recapacitação de grandes centrais existentes.

Novos projetos de centrais de grande porte estão condicionados a fatores como a atratividade econômica e, cada vez mais, a fatores sócio-ambientais; o que não quer dizer que a execução de grandes usinas venha a ser abandonada, uma vez que ainda existem aproveitamentos atrativos, como na região amazônica, e ainda porque até mesmo as previsões mais pessimistas de crescimento de carga indicam a impossibilidade de seu atendimento apenas com pequenas centrais ou outras formas de geração (Coelho, 1999).

1.5.2.

Geração Termelétrica – a partir de fontes renováveis e não renováveis

1.5.2.1.

Geração Termelétrica a partir de fontes não renováveis

A geração termelétrica a partir de fontes não renováveis é ilustrada pelas centrais nucleares, centrais a vapor e centrais a diesel.

As centrais nucleares que se encontram em operação, no momento, são as usinas de Angra I e II. Enquanto isto, a usina de Angra III, que conta com muitos equipamentos já adquiridos e que por este motivo já consumiu e continua consumindo substanciais investimentos, encontra-se no foco de discussões sobre a conveniência ou não de se continuar com o projeto (Lora e Nascimento, 2004). Aliados ao fator econômico, devem ser levados em conta os aspectos sócio-ambientais, em razão da segurança da operação da planta e do destino

[2] Por intermédio do PROINFA, programa coordenado pelo MME, foi estabelecida a contratação de 3.300 MW de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN), produzidos por fontes eólica, biomassa e PCHs, sendo 1.100 MW de cada fonte)

dos resíduos, além, é claro, do posicionamento estratégico do Brasil no cenário dos detentores da tecnologia nuclear.

As centrais a vapor têm usado principalmente óleo combustível e carvão (principalmente no Sul do país), enquanto que as centrais diesel têm sido aplicadas principalmente nos sistemas isolados (principalmente no Norte do país).

As centrais a carvão mineral são as com maiores perspectivas de investimento no Brasil, em face da disponibilidade deste combustível no mercado e da existência de políticas energéticas de incentivo, como a Conta de Desenvolvimento Energético – CDE^[3].

As centrais a gás natural permitem a geração de energia elétrica com impactos ambientais menores que outras formas tradicionais, o que o posiciona como um forte candidato a servir como ponte na transição para uma situação energética mais baseada em recursos renováveis, embora a disponibilidade deste combustível esteja ameaçada.

1.5.2.2.

Geração Termelétrica a partir de fontes renováveis

Sua maior aplicação está na cogeração industrial, a partir de resíduos de processo ou uso de biomassa. O bagaço da cana-de-açúcar, por exemplo, é usado no setor sucro-alcooleiro em sistema de cogeração, produzindo vapor e eletricidade para consumo próprio e vendendo o excedente.

Projetos associados à geração de energia elétrica a partir da utilização de resíduos urbanos (lixo) começam a ser considerados no Brasil.

A criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA, o qual inclui a geração termelétrica a partir de biomassa e se constitui essencialmente da utilização dos recursos da CDE, no sentido de tornar competitivas e ainda da compra compulsória por todos os consumidores finais de energia proveniente, tendo a ELETROBRÁS como comercializadora (Lora e Nascimento, 2004).

[3] O A Lei número 10.438, de 26 de abril de 2002, instituiu a CDE visando, entre outras coisas, a competitividade da geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, do gás natural e do carvão mineral nacional

1.5.3.

Outras tecnologias de geração

As mais relevantes no momento, devido à maior disponibilidade de aplicação em curto prazo, são as energias eólica e solar. Tais tecnologias têm sido mais difundidas no Brasil em comunidades isoladas e de difícil acesso.

A geração de energia elétrica a partir da energia eólica nem sempre é possível, devido à disponibilidade do vento. Esta tecnologia tem sofrido um grande crescimento em termos mundiais, principalmente em países como os Estados Unidos, Holanda e Alemanha (Lora e Nascimento, 2004). No Brasil, embora com participação ainda tímida, o crescimento é promissor, impulsionado pelo PROINFA que na sua primeira fase possui meta de novos 1.100 MW de geração a partir da fonte eólica (Lora e Nascimento, 2004).

A geração de energia elétrica a partir da energia solar apresenta altos custos de implementação. Estudos sobre o tema acreditam que, em relação à geração fotovoltaica, os custos poderão sofrer uma significativa redução (Lora e Nascimento, 2004), devido ao fator de escala, quando este tipo de geração se tornar mais disseminado. Atualmente sua aplicação se dá tipicamente em países desenvolvidos para a alimentação de pequenos sistemas isolados ou equipamentos solitários.

2

O Biodiesel

2.1.

Experiência da Europa com o Biodiesel

A Europa é a líder mundial em produção de Biodiesel. Combinando a produção de Biodiesel da Alemanha, França e Itália chega-se a um número aproximadamente igual a dezoito vezes a produção dos Estados Unidos, relata Pahl (2005).

**Capacidade de Produção Anual de Biodiesel na UE
(mil toneladas)**

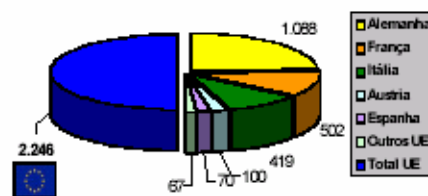


Figura 03: Capacidade de Produção Anual de Biodiesel na União Européia.
Fonte: European Biodiesel Board (EBB, 2005)

De acordo com o EBB (2005), a capacidade de produção de Biodiesel na Europa Ocidental no ano de 2004 era de aproximadamente 2,2 milhões de toneladas por ano. Este volume era proveniente de mais de 50 plantas de produção, localizadas principalmente na Alemanha, que é responsável por aproximadamente metade da capacidade da União Européia – EU; algo em torno de 1 milhão de toneladas por ano. A França aparece em segundo lugar, com capacidade de aproximadamente 502.000 toneladas por ano, seguida da Itália com 419.000 toneladas por ano e Áustria em quarto lugar da lista, com 100.000 toneladas por ano. Logo depois tem-se a Espanha, com capacidade de produzir anualmente 70.000 toneladas de Biodiesel.

Produção Anual de Biodiesel na UE (mil toneladas)

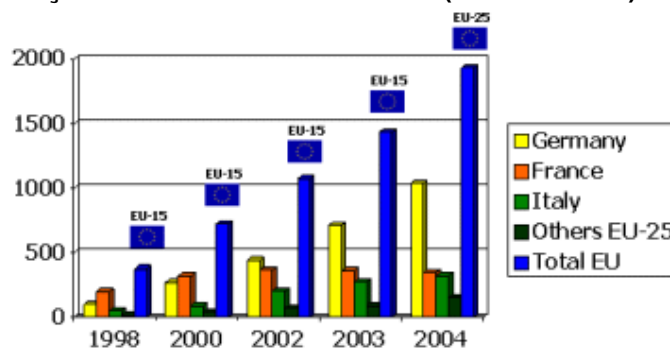


Figura 04: Produção Anual de Biodiesel na União Européia.
Fonte: European Biodiesel Board (EBB, 2005)

A Europa vem produzindo Biodiesel em escala industrial desde 1992, primariamente em resposta às ações de várias instituições e ações da UE (Pahl, 2005). Neste ano, ocorreram mudanças de regras na Política Comum de Agricultura – “*European Union’s Common Agricultural Policy (CAP)*”. As mudanças impactaram profundamente a indústria do Biodiesel na Europa. Segundo Pahl (2005), a produção na Alemanha, que, em 1992, era de apenas 5.000 toneladas, subiu no ano seguinte para 10.000 toneladas. A França, que tinha produção praticamente nula em 1992, passou a produzir 20.000 toneladas no ano seguinte.

O grande salto na produção de Biodiesel na Europa se deu por volta da virada do século XXI, impulsionado pela queda do preço dos óleos vegetais e do alto preço dos derivados do petróleo, figura 04. Naquela época, podem-se registrar significativos crescimentos de capacidade de produção, principalmente na Alemanha, com aumento de aproximadamente 200% (Pahl, 2005). Neste país a produção em 1999 era de 130.000 toneladas e, em 2002, foram registradas 500.000 toneladas de produção de Biodiesel.

A despeito de novas legislações, que promoveriam a produção e uso de biocombustíveis na UE, o ano de 2004 foi um ano difícil para a indústria do Biodiesel, por causa da tendência de aumento dos preços dos óleos vegetais no mercado mundial. “Os atuais preços dos óleos vegetais na Europa estão definitivamente causando problemas aos produtores de Biodiesel”, afirmou Raffaello Garofalo, secretário geral do *European Biodiesel Board* (EBB, 2005). Dependendo da matéria prima para a produção de Biodiesel e do processo empregado, a porcentagem do preço final do Biodiesel, referente à matéria

prima, representa algo em torno de 60 a 80%. Fica evidente, então, que qualquer flutuação no preço praticado para os óleos vegetais afeta direta e significativamente o preço do Biodiesel.

O direcionamento do programa de Biodiesel da União Européia objetiva a substituição de 2% do diesel usado para transportes em 2005, 5,75% em 2010, e 20% em 2020 (NAE, 2005).

A principal matéria-prima utilizada na Europa é a colza, uma espécie de couve comestível, também conhecida como canola. Estudos realizados pelo EBB (EBB, 2005) mostram que, apesar de o Biodiesel ser uma alternativa tecnicamente viável, devido ao fato de os custos de produção de Biodiesel serem, na Europa, em média, cerca de 1,5 a 3 vezes superiores ao custo de produção do diesel mineral, seu uso torna-se não competitivo, mesmo considerando os créditos por subprodutos associados como a venda da glicerina e torta residual. Fica evidente que a utilização do Biodiesel se torna viável somente se forem considerados fatores indiretos, tais como impacto ambiental, geração e manutenção de emprego e, principalmente, subsídios. Segundo o Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República (NAE, 2005) estes subsídios, em forma de isenção de impostos, estão estimados em aproximadamente 2,5 bilhões de Euros por ano, para se atingir a meta de 2010.

2.1.1.

Experiência da Alemanha

A Alemanha é hoje o maior produtor mundial de Biodiesel. Em 2004 produziu, segundo o EBB (EBB, 2005), 1.035 mil toneladas de Biodiesel. A capacidade de produção cresceu drasticamente, como pode ser visto no gráfico da figura 05.

Na Alemanha, o Biodiesel conseguiu espaço no mercado de combustíveis primariamente como combustível para veículos terrestres, como automóveis e caminhões, e utilizado puro, sem misturar ao óleo diesel. Em 2003 foi aprovada a utilização de misturas de Biodiesel. Sua introdução no mercado foi possível, segundo o UFOP (UFOP, 2005) devido a diversos fatores. Entre eles pode-se citar: (1) a isenção de tributos típicos de combustíveis para o Biodiesel, o que o tornou mais barato que o óleo diesel veicular (ver figura 06), (2) a proibição, em 1996, da venda em postos de combustíveis de gasolina aditivada com chumbo

tetraetila, e, ainda, (3) pela criação do governo em 1999 de uma taxa adicional ecológica em combustíveis fósseis.

Capacidade de Produção Anual de Biodiesel na Alemanha (mil toneladas)

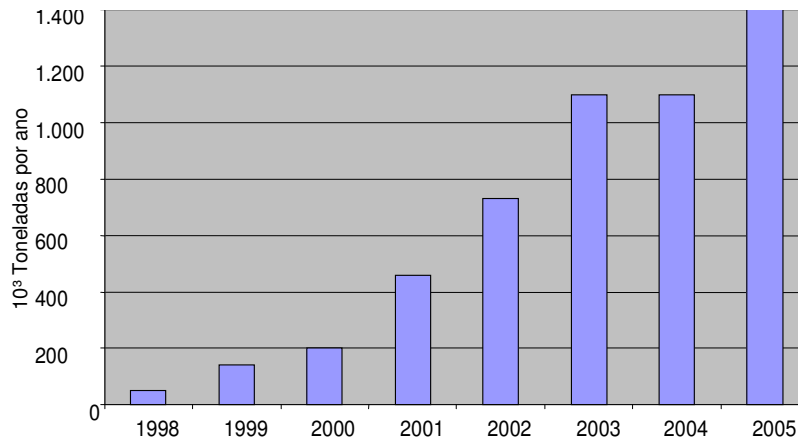


Figura 05: Capacidade de Produção Anual de Biodiesel na Alemanha.
Fonte: Status Report Biodiesel - Biodiesel Production and Marketing in Germany 2005 - Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen (UFOP, 2005 - União Para Promoção de Óleos e Proteínas Vegetais)

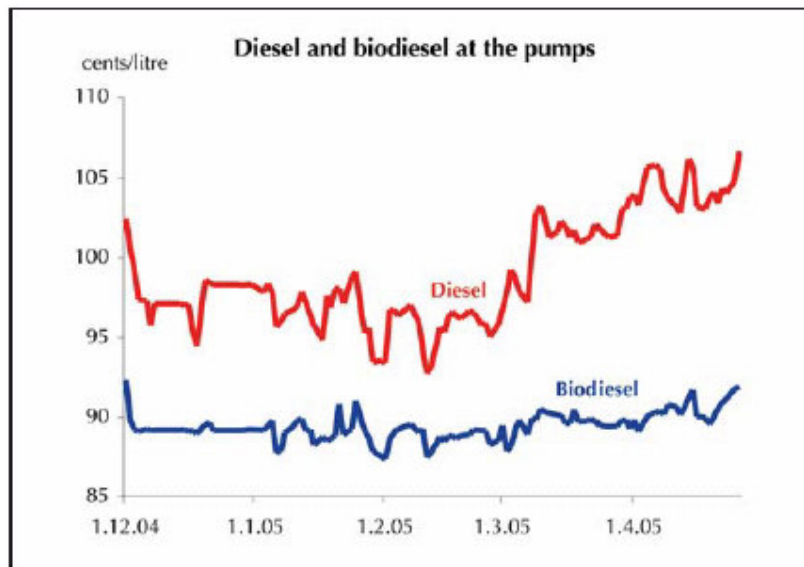


Figura 06: Preços do Biodiesel e do Diesel na bomba de combustível na Alemanha.
Fonte: Status Report Biodiesel - Biodiesel Production and Marketing in Germany 2005 - Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen (UFOP, 2005 - União Para Promoção de Óleos e Proteínas Vegetais)

Forças institucionais também foram responsáveis pelo sucesso do Biodiesel na Alemanha. Há grande interação entre os produtores de Biodiesel e fabricantes como Mercedes-Benz, Volkswagen, Audi, BMW e MAN. A Associação

de Táxis da Alemanha (German Taxi Association) adotou o uso do Biodiesel em nível nacional. Em 1998, a cidade de Kreiswerkr Heinsberg recebeu o título de ser a primeira cidade alemã a possuir toda sua frota de ônibus (Mercedes-Benz e MAN) operando com Biodiesel (UFOP, 2005).

A Alemanha conta com aproximadamente 1900 postos de combustível (UFOP, 2006) espalhados por todo o País oferecendo, em suas bombas, o Biodiesel. Esta a quantidade continua a subir. Estes postos são responsáveis pela venda de 40% do Biodiesel vendido na Alemanha enquanto que o restante é destinado, primariamente, ao transporte público.

A UFOP (2005) cita que a qualidade do Biodiesel produzido e vendido na Alemanha é garantida pela Norma DIN (Deutsches Institute für Normung) EN 14214 e por um selo de qualidade fixado nas bombas de Biodiesel certificadas pela Associação para Qualidade do Biodiesel (*Arbeitsgemeinschaft Qualitätsmanagement Biodiesel – AGQM*).

2.1.2.

Experiência da França

A França liderou o ranking de maiores produtores de Biodiesel entre os anos de 1993 e 1999 e hoje ocupa a segunda posição, com o número de 366.000 toneladas anuais de produção, número aproximadamente 3 vezes maior que a produção de etanol no País (Pahl, 2005).

O uso do Biodiesel na França é primariamente misturado à razão de 5% no diesel e em óleo para aquecimento, mas concentrações entre 5% e 30% também são encontradas para veículos de frotas francesas. De acordo com Pahl (2005), aproximadamente 4.000 veículos estão envolvidos em programas de Biodiesel. Entre estes veículos podem ser citados os ônibus públicos de Paris, Bordeaux, Dijon, Dunkirk, Grenble e Strasbourg.

A maior planta de produção de Biodiesel da Europa está localizada na cidade francesa de Grand-Couonne, Normandia. Esta planta tem capacidade de produzir 250.000 toneladas por ano e pertence à Diester Industrie, que é responsável por 80% do mercado Francês. A planta foi construída em 1995 ao custo de 18 Milhões de Euros (Pahl, 2005).

2.1.3.

Experiência da Itália

Pahl (2005) relata que a Itália aparece em um cenário de dependência de importação de energia na ordem dos 80%, tornando-a vulnerável neste setor. Por outro lado, oferecem boas perspectivas de longo prazo aos produtores de Biodiesel. A produção italiana, em 2003, foi de 210.000 toneladas anuais de Biodiesel e em 2004, alcançou aproximadamente 320.000 toneladas. Deste total, aproximadamente 90% foram destinados ao aquecimento na composição B100 e por vezes B20, que são respectivamente o Biodiesel puro e a mistura com 20% de Biodiesel. O restante foi vendido como mistura de 5% (B5) nas bombas de postos públicos de abastecimento ou utilizado como B30 no transporte público de cidades como Florença, Gorgonzola, Pádua, e Perúgia.

2.2.

Experiência dos EUA com o Biodiesel

O programa americano de Biodiesel é bem menor que o europeu e apresenta diferenças importantes. Enquanto que, na Europa, o Biodiesel se desenvolveu essencialmente de “cima para baixo”, como resultado de novas políticas governamentais, a indústria do Biodiesel nos EUA desenvolveu-se de forma contrária de “baixo para cima”, suportada, principalmente, pelos produtores de soja (Pahl, 2005). A principal matéria prima é a soja, seguida pelos óleos de fritura usados.

A principal organização que trata de aspectos ligados ao combustível é a *National Biodiesel Board* – NBB, criada em 1994 como uma associação representativa da indústria do Biodiesel e de coordenação dos estudos e pesquisas sobre o tema. A NBB está sediada em Jefferson City, Missouri.

A produção de Biodiesel nos EUA foi praticamente nula na década de 90, atingindo o inexpressivo número de 1.754 toneladas em 1999. A partir de então começou a crescer exponencialmente (Pahl, 2005) chegando ao número de aproximadamente 105.000 toneladas em 2004, embora este ainda seja um número tímido se comparado com a Alemanha.

A curva de crescimento na produção de Biodiesel nos EUA é representada na figura 07. Pode-se observar um crescimento significativo a partir do ano de 1999, embora o número final ainda seja muito pequeno quando comparado,

também, com os mais de 122 bilhões de toneladas de diesel consumidos anualmente no país.

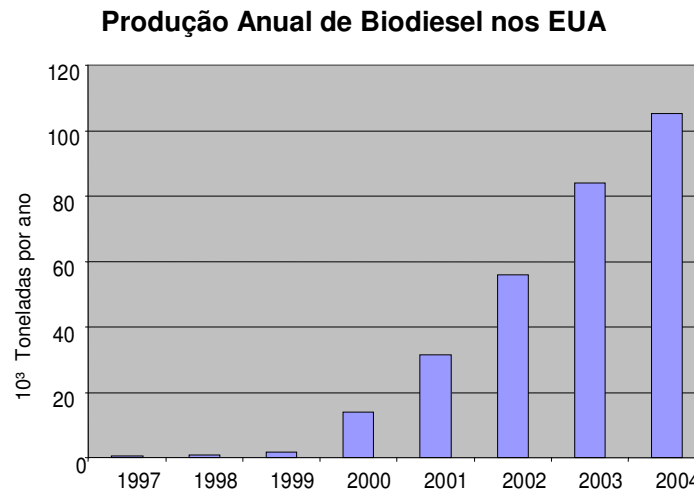


Figura 07: Produção Anual de Biodiesel nos Estados Unidos da América.
Fonte: National Biodiesel Board (NBB, 2005).

2.3.

Aspectos Técnicos do Biodiesel

Como já visto nas seções precedentes, o uso de óleos vegetais *in natura*, como substitutos do óleo diesel, tem sido alvo de pesquisa e desenvolvimento há muitos anos. Apesar de estes óleos possuírem alto índice de cetano e elevado poder calorífico, diversos fatores contribuem para que a substituição em larga escala do óleo diesel, principalmente em motores de pequeno porte, ainda seja evitada. Motores projetados para queimar óleo diesel sofreriam com problemas relacionados à carbonização e depósitos nos bicos injetores e sedes de válvulas, quando queimassem óleos vegetais *in natura*, uma vez que suas moléculas contém glicerina. Outros problemas estão relacionados à diluição do óleo lubrificante, dificuldade de partida a frio, queima irregular, eficiência térmica reduzida, odor desagradável dos gases de descarga e emissão de acroleína (Costa, 2005). Oliveira (2004) cita que a acroleína é uma substância tóxica e é emitida a partir da queima da glicerina contida nos óleos vegetais.

A transformação dos óleos vegetais em um éster de ácido graxo, popularmente conhecido como Biodiesel, é uma forma de minimizar os problemas acima citados.

O Biodiesel pode ser produzido a partir de fontes renováveis como óleos vegetais, gorduras animais e óleos utilizados para fritura de alimentos. Pode ser misturado ao óleo diesel mineral (derivado de petróleo) em diversas proporções como 2%, 5% e 20%, gerando misturas. Estas misturas são denominadas respectivamente B2, B5 e B20 (B de “blend”). A utilização do Biodiesel também pode ocorrer na substituição total do óleo diesel mineral, neste caso fica denominado B100.

O processo mais desenvolvido tecnologicamente de produção de Biodiesel é conhecido como transesterificação, e será analisado em mais detalhe em um capítulo específico. O Biodiesel é tipicamente obtido através da reação do óleo vegetal com metanol ou etanol, na presença de um catalisador. O metanol tem sido o mais empregado devido ao seu baixo custo e grande disponibilidade em países como EUA, Japão e países da Europa. O etanol, por ser disponível a baixo custo no Brasil, provavelmente será o substrato para o Biodiesel nacional, embora não existam incentivos governamentais privilegiando qualquer uma das rotas tecnológicas de produção.

Os produtos desta reação de transesterificação do óleo vegetal são o Biodiesel (éster alcoólico de ácido graxo) e a glicerina, cujo maior constituinte é o glicerol.

O incentivo ao desenvolvimento do Biodiesel no Brasil deve surtir diversos efeitos positivos, entre eles efeitos econômicos imediatos, ambientais e sociais. Além do mais, beneficiaria as localidades isoladas, onde o custo do transporte do diesel mineral é elevado.

Para melhor entendimento, e para não tornar o texto repetitivo, a partir deste ponto onde aparecer a palavra “Diesel” será entendido como o óleo Diesel mineral derivado do petróleo, e, quando aparecer a palavra Biodiesel, ou somente B2, B5, B20 e B100, será entendido como o Biodiesel nas proporções já mencionadas.

2.3.1.

Balanco energético

Embora seja um assunto fundamental para se tomar a decisão de se utilizar ou não um novo combustível, estudos sobre o balanço energético do Biodiesel no Brasil, ainda não foram elaborados em grande extensão.

A decisão deve ser fundamentada levando-se em consideração a relação entre a energia disponibilizada pelo combustível produzido e a energia consumida no processo de produção. Esta relação é conhecida como balanço energético.

Estudos mostram que, para o etanol produzido no Brasil, a relação entre a quantidade de energia produzida pelo combustível e a quantidade de energia aplicada na agroindústria da cana-de-açúcar, fornece um valor de 8,30 enquanto que nos EUA o etanol tem uma relação 1,30 (NAE, 2005).

Para o Biodiesel foram efetuadas diversas avaliações do balanço energético considerando a utilização de várias matérias primas. Para o caso do Biodiesel de produzido a partir do óleo de soja, o balanço energético nos EUA indica uma relação de aproximadamente 2,00 enquanto que no Brasil, estudos do NAE (2005) apontam para o valor de 1,43.

Para o Biodiesel produzido a partir dos óleos dendê e a macaúba em condição brasileira, Martins e Teixeira (1985) apresentaram respectivamente, 5,63 e 4,20. Estes valores são muito interessantes e confirmam o potencial das palmáceas como fonte de matéria prima, tanto pela maior produtividade como pela relação positiva de produção por consumo de energia.

2.3.2.

Especificação Técnicas

A especificação do Biodiesel para uso comercial é essencial para o desenvolvimento de programas de Biodiesel. A estabilidade à oxidação e o número de cetano são parâmetros que merecem especial atenção. A estabilidade, sobretudo em climas quentes, é relevante para assegurar que, mesmo depois de algumas semanas de armazenamento em condições normais, o produto não tenha sido degradado. Já a cetanagem, explica Isaias Macedo (NAE, 2005), assegura a boa combustão nos motores.

A Resolução ANP nº 42 (ANP, 2004) aplica-se ao Biodiesel B100, de origem nacional ou importada a ser comercializado no Brasil, que poderá ser adicionado ao óleo diesel para formar o Biodiesel B2. No entanto, as definições de qualidade ainda não estão bem sedimentadas. É importante também que as condições sejam estabelecidas não somente para o B2, mas também para outras misturas (Costa, 2005).

Costa (2005) cita que existem críticas aos critérios e padrões de qualidade definidos pela ANP, pois estes não atendem às especificações da UE e EUA. Ao se definirem os critérios e padrões nacionais, ocorreu alguma flexibilização para atender às características de matérias primas nacionais, o que se apresenta como uma possível inibição de exportação e investimento de grupos internacionais interessados neste segmento.

A determinação das características do Biodiesel foi feita mediante o emprego das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), das normas internacionais “*American Society for Testing and Materials*” (ASTM), da “*International Organization for Standardization*” (ISO) e do “*Comité Européen de Normalisation*” (CEN).

Os Estados Unidos utilizam a norma ASTM D 6751 (ASTM, 2002) para qualificar o Biodiesel B100. Atualmente a ASTM possui a norma citada para o B100 e a norma ASTM D 975 (ASTM, 2005) para o diesel. Não existe uma norma aprovada para os *blends* de Biodiesel até o momento, estando esta norma em fase de elaboração.

Os Biodiesel B5, e abaixo, geralmente têm suas propriedades enquadradas na norma ASTM D 975 (ASTM, 2005). Os B20 e acima podem, também, ter suas características enquadrando-se na ASTM D 975 (ASTM, 2005), com provável exceção da viscosidade (DOE, 2004). Segundo o DOE (2004), os fabricantes de motores diesel atestam que viscosidades mais altas do que as previstas na ASTM D 975 podem causar altas pressões nos sistema de bombeamento e uma atomização inadequada, o que pode resultar em queda de rendimento do motor.

2.3.2.1.

Biodiesel B100 – Visão Nacional

Como já foi citado, é de responsabilidade da ANP (ANP, 2005) especificar e avaliar a conformidade da qualidade do Biodiesel. A avaliação de conformidade à resolução ANP nº 42 (ANP, 2004) é feita mediante análise de

amostra obtida segundo métodos “ABNT NBR 14883 - Petróleo e produtos de petróleo - Amostragem manual” ou “ASTM D 4057 - Prática para Amostragem de Petróleo e Produtos Líquidos de Petróleo (*Practice for Manual Sampling of Petroleum and Petroleum Products*)” ou “ISO 5555 (*Animal and vegetable fats and oils - Sampling*)”.

A legislação obriga que a análise deva ser feita pelos Produtores de Biodiesel e os resultados enviados a ANP, considerando todas as características e métodos da especificação (ANP, 2004).

As características do combustível devem ser comparáveis à Tabela 02 e os métodos de ensaio devem ser executados de acordo com as publicações mais recentes dos métodos, apresentados nas tabelas presentes na Resolução ANP nº 42 (ANP, 2004)

Tabela 02 – Especificação do Biodiesel B100 pela resolução ANP nº 42.

Fonte: Resolução ANP nº 42 (ANP, 2004)

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE	METODO		
			ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
Aspecto	-	LII (1)	-	-	-
Massa específica a 20°C	kg/m ³	(2)	7148, 14065	1298, 4052	- , -
Viscosidade Cinemática a 40°C,	mm ² /s	(3)	10441	445	EN ISO 3104
Água e sedimentos, máx. (4)	% volume	0,050	-	2709	-
Contaminação Total	mg/kg	(6)	-	-	EN 12662
Ponto de fulgor, mín.	°C	100,0	14598 -	93 -	- EN ISO3679
Teor de éster	% massa	(6)	-	-	EN 14103
Destilação; 90% vol. recuperados, máx.	°C	360 (5)	-	1160	-
Resíduo de carbono dos 100% destilados, máx.	% massa	0,10	-	4530, 189	EN ISO 10370, -
Cinzas sulfatadas, máx.	% massa	0,020	9842	874	ISO 3987
Enxofre total	% massa	(6)	- -	4294 5453	- EN ISO 14596
Sódio + Potássio, máx	mg/kg	10	- -	- -	EN 14108 EN 14109
Cálcio + Magnésio	mg/kg	(6)	-	-	EN 14538
Fósforo	mg/kg	(6)	-	4951	EN 14107

Corrosividade ao cobre, 3h a 50 °C, máx.	-	1	14359	130	EN ISO 2160
Número de Cetano	-	(6)	-	613	EN ISO 5165
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	(7)	14747	6371	-
Índice de acidez, máx.	mg KOH/g	0,80	14448	664	- EN 14104 (8)
Glicerina livre, máx.	% massa	0,02	-	6584 (8) (9)	- EN 14105 (8) (9) EN 14106 (8) (9)
Glicerina total, máx.	% massa	0,38	-	6584 (8) (9)	- EN 14105 (8) (9)
Monoglicéridos.	% massa	(6)	-	6584 (8) (9)	- EN 14105 (8) (9)
Diglicéridos	% massa	(6)	-	6584 (8) (9)	- EN 14105 (8) (9)
Triglicéridos	% massa	(6)	-	6584 (8) (9)	- EN 14105 (8) (9)
Metanol ou Etanol, máx.	% massa	0,5	-	-	EN 14110 (8)
Índice de lodo		(6)	-	-	EN 14111 (8)
Estabilidade à oxidação a 110 °C, min	h	6	-	-	EN 14112 (8)

Notas:

(1) LII – Límpido e isento de impurezas.

(2) A mistura óleo diesel/biodiesel utilizada deverá obedecer aos limites estabelecidos para massa específica a 20C constantes da especificação vigente da ANP de óleo diesel automotivo.

(3) A mistura óleo diesel/biodiesel utilizada deverá obedecer aos limites estabelecidos para viscosidade a 40C constantes da especificação vigente da ANP de óleo diesel automotivo.

(4) O método EN ISO12937 poderá ser utilizado para quantificar a água não dispensando a análise e registro do valor obtido para água e sedimentos pelo método ASTM D 2709 no Certificado da Qualidade.

(5) Temperatura equivalente na pressão atmosférica.

(6) Estas características devem ser analisadas em conjunto com as demais constantes da tabela de especificação a cada trimestre civil. Os resultados devem ser enviados pelo produtor de biodiesel à ANP, tomando uma amostra do biodiesel comercializado no trimestre e, em caso de neste período haver mudança de tipo de matéria-prima, o produtor deverá analisar número de amostras correspondente ao número de tipos de matérias-primas utilizadas.

(7) A mistura óleo diesel/biodiesel utilizada deverá obedecer aos limites estabelecidos para ponto de entupimento de filtro a frio constantes da especificação vigente da ANP de óleo diesel automotivo.

(8) Os métodos referenciados demandam validação para as oleaginosas nacionais e rota de produção etílica.

(9) Não aplicáveis para as análises mono-, di-, triglicéridos, glicerina livre e glicerina total de palmiste e coco. No caso de biodiesel oriundo de mamona deverão ser utilizados, enquanto não padronizada norma da

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT para esta determinação, os métodos: do Centro de Pesquisas da Petrobrás – CENPES, para glicerina livre e total, mono e diglicerídeos, triglicerídeos.

2.3.2.2.

Biodiesel B100 – Visão dos Estados Unidos

De acordo com o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, 2004), as considerações para estocagem, manuseio e utilização do Biodiesel B100 são muito diferentes se comparadas com as misturas. De qualquer forma, o entendimento das propriedades do B100 pode ajudar na compreensão das características das misturas.

2.3.2.2.1.

Comparação das propriedades físico-químicas do Biodiesel B100 com o óleo Diesel nº 2

As propriedades físico-químicas do Biodiesel B100 são bem similares às do óleo diesel nº 2, como pode ser visto na tabela abaixo:

Tabela 03 – Comparação entre propriedades do Diesel nº 2 e o Biodiesel B100.
Fonte: U.S. Department of Energy, 2004

Propriedade	Unidade	Diesel (Norma ASTM D975)	Biodiesel (Norma ASTM D6751)
Poder calorífico inferior (PCI)	BTU/gal	~129.050	~118.170
Viscosidade cinemática	mm ² /s (@40°C)	1,3~4,1	4,0~6,0
Peso específico	kg/L (@60F)	0,85	0,88
Densidade	Lb/gal (@15C)	7,079	7,328
Água e particulados	máxima % em volume	0,05	0,05
Carbono	Wt%	87	77
Hidrogênio	Wt%	13	12
Oxigênio	Wt%	0	11
Enxofre	Máxima Wt%	0,05	0,0 ~ 0,0024
Ponto de ebulição	°C	180 ~ 340	315 ~ 350
Ponto de fulgor	°C	60 ~ 80	100 ~ 170
Ponto de turvamento	°C	-15 ~ 5	-3 ~ 12
Ponto de fluidez	°C	-35 ~ -15	-15 ~ 10
Numero de cetano		40 ~ 55	48~65
Poder lubrificante SLBOCLE	Gramas	2.000~5.000	>7.000
Poder lubrificante HFRR	Microns	300 ~ 600	<300

Como acontece com outros combustíveis, o óleo diesel é classificado em 4 sub-categorias que diferem pela viscosidade. Enquanto o óleo diesel nº 4 é utilizado em motores lentos e de média velocidade, que operam a velocidade constante ou quase constante, os óleos Diesel número 1 e 2 são próprios para

aplicação de motores veiculares (King, 2006). O de número 3 não é mais refinado, segundo o autor.

As semelhanças entre o Biodiesel e o óleo diesel nº 2 possibilitam que, em alguns casos, o Biodiesel B100 possa ser utilizado em motores diesel convencionais sem qualquer modificação no motor ou no sistema de injeção.

Nos EUA, o limite máximo de teor de enxofre permitido no diesel nº 2 é 0,05%. Em 2006, o valor máximo regulado pela EPA (U.S. Environmental Protection Agency) será de 15ppm para utilização automotiva. Como pode ser visto pela tabela 03, o B100 (a maioria deles) já se enquadra nas novas regras do EPA.

Outro aspecto que pode ser observado é que o Biodiesel possui 11% em peso de oxigênio dissolvido e um número de cetano ligeiramente superior, o que favorece uma queima mais completa, reduzindo as emissões (DOE, 2004).

2.3.2.2.2.

Especificação do Biodiesel B100 pela ASTM

Em Junho de 1994 foi formado um sub comitê na American Society for Testing Materials – ASTM para desenvolver a especificação do Biodiesel, a qual foi apresentada e aprovada preliminarmente em 1999. Em 2001 a versão final, D 6751, foi publicada (ASTM, 2002). O National Biodiesel Board (NBB, 2005) considera esta publicação como sendo o marco mais importante no desenvolvimento da indústria do Biodiesel.

Assim como as outras especificações de combustíveis na ASTM, a especificação D 6751 é baseada nas propriedades físico químicas necessárias para uma utilização segura e satisfatória.

Deve ficar claro que a especificação não é baseada no tipo de matéria prima utilizada nem do processo de produção. A especificação ASTM D 6751-03 define o Biodiesel como sendo “...alquilésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou de gorduras animais, designado B100” (ASTM, 2003) e deve se enquadrar dentro das propriedades da tabela abaixo:

Tabela 04 – Propriedades do Biodiesel pela norma ASTM D6751.

Fonte: ASTM, 2003

Propriedade	Unidade	Limite	Método
Ponto de fulgor	°C	130.0 min.	D93
Água e particulados	% vol.	0.050 max.	D2709
Viscosidade cinemática, 40°C	mm ² /s	1.9 - 6.0	D445
Cinzas de sulfato	% massa	0.020 max.	D874
Teor de enxofre ⁽¹⁾	% massa	0.0015 max. (S15) 0.05 max. (S500)	D5453
Corrosão no cobre		No. 3 max.	D130
Número de cetano		47 min.	D613
Ponto de turvamento	°C	Reportar ao consumidor	D2500
Carbono residual	% massa	0.050 max.	D4530
Número de acidez	mg KOH/g	0.80 max.	D664
Glicerina livre	% massa	0.020 max.	D6584
Glicerina total	% massa	0.240 max.	D6584
Fosforo contido	% max.	0.001 max.	D4951
Temperatura de destilação, 90% Recuperado (T90) ⁽²⁾	°C	360 max.	D1160

Notas:

(1) Limitado em 15 ppm a partir de 2006

(2) Temperatura atmosférica equivalente

Seguem abaixo alguns comentários sobre as características listadas na tabela 04:

a) Ponto de fulgor :

O ponto de fulgor de um combustível é a temperatura na qual dele se desprendem vapores que, em contato com o oxigênio presente no ar, podem entrar em combustão na presença de uma fonte de calor. O ponto de fulgor não tem relação direta (Torres et al, 2005) no desempenho do combustível, mas um valor mínimo deve ser estabelecido para garantir a segurança no armazenamento e manuseio do produto.

O uso de um combustível com ponto de fulgor muito baixo pode provocar problemas no pré-aquecimento, pois um volume excessivo de vapores pode causar pré-ignição.

O ponto de fulgor do B100 é fixado acima do ponto do diesel nº 2, para garantir que o produtor tenha removido o metanol (caso o Biodiesel tenha sido produzido por reação metílica) residual durante o processo de produção, ou seja a determinação de seu valor permite detectar contaminações com produtos mais leves. O metanol residual, que poderia ser eventualmente encontrado em um

Biodiesel fora de especificação, poderia ser prejudicial à bomba de combustível e aos selos, e também poderia contribuir para uma queima irregular.

b) Água e sedimentos:

A contaminação por água pode contribuir para a elevação da acidez do Biodiesel, potencializando a corrosão não só nos tanques como também nos equipamentos e linhas, além de igualmente potencializar a formação de microorganismos.

Os particulados ou sedimentos podem levar ao bloqueio dos filtros dos motores, reduzindo a sua vida útil, contribuindo para diminuição da potência. Os sedimentos podem causar combustão não uniforme, pulsação da chama, etc.

c) Viscosidade :

A viscosidade é uma característica muito importante para os óleos combustíveis, pois fornece informações sobre a facilidade de movimentá-lo e transferi-lo nas instalações, na temperatura vigente, e também o grau de pré-aquecimento a que o óleo deve ser submetido para obter-se uma temperatura correta de atomização para uma combustão eficiente. Esta relação entre o pré-aquecimento do combustível e a atomização correta é fundamental na combustão em equipamentos industriais (Torres et al, 2005).

Uma viscosidade mínima é requerida por alguns motores por causa de possibilidade de perda de potência no mesmo devido a eventuais vazamentos em equipamentos como a bomba injetora e bicos injetores; ou mesmo se um combustível é excessivamente fino e pouco viscoso pode acarretar em uma quantidade excessiva de combustível sendo bombeada, causando combustão incompleta (Torres et al, 2005), e conseqüentemente, elevando a quantidade de emissões ambientais.

A viscosidade máxima é limitada pelo projeto do sistema de injeção do motor. Combustíveis de alta viscosidade acarretam, por exemplo, uma combustão pobre ocasionando formação de depósitos. O máximo valor permitido pela ASTM D975, ou seja para o diesel nº 2, é $4,1 \text{ mm}^2/\text{s}$ (@ 40°C) embora muitos motores sejam projetados para operar com combustíveis mais viscosos. O Biodiesel, por ter viscosidade ligeiramente mais elevada do que o diesel, pode proporcionar, a um motor projetado para este último, esforços adicionais não desejados nos sistema de injeção, além de uma atomização inadequada o que resultará em uma queda de performance do motor. Em resumo, se um

combustível for demasiadamente viscoso, podem ocorrer os seguintes problemas:

- Dificuldade no bombeio do tanque para o motor;
- Quantidade insuficiente de combustível no motor;
- Atomização deficiente;
- Carbonização nos bicos e deposição nas paredes da câmara de combustão;

Vale, neste ponto, lembrar que a especificação da ANP não estabelece valores máximos ou mínimos para a viscosidade do Biodiesel. Sugere que os valores sejam estabelecidos apenas para misturas de óleo Diesel/Biodiesel a serem utilizadas e que deverá obedecer aos limites estabelecidos para o Diesel.

d) Cinzas sulfatadas:

De acordo com o U.S. Department of Energy (DOE, 2004), as cinzas são basicamente constituídas de sais inorgânicos, como óxidos metálicos de sódio ou potássio. Sua presença caracteriza resíduos do catalisador utilizado na produção do Biodiesel e que não foram corretamente removidos durante a purificação. A formação de cinzas pode contribuir para a formação de depósitos, prejudicando a performance do motor.

Quando em proporções elevadas, as cinzas podem fundir e causar a corrosão de alta temperatura nos metais.

e) Teor de enxofre:

A limitação do teor de enxofre nos combustíveis se justifica pelo controle das emissões de óxidos de enxofre, que por sua vez estão relacionados com as chamadas “chuvas ácidas”.

O enxofre está presente na maioria dos combustíveis, principalmente nos derivados do petróleo. De acordo com Torres et al. (2005), os óxidos de enxofre formados na combustão geralmente não causam problemas de corrosão, contanto que todas as superfícies em contato com os gases de combustão sejam mantidas a uma temperatura acima do ponto de orvalho do ácido sulfúrico, evitando-se, assim, a condensação de ácidos corrosivos.

Na combustão, o enxofre se converte nos óxidos de enxofre (SO_2 e SO_3). Estes se combinam com vapor de água formando ácido sulfúrico que se condensa sobre as superfícies metálicas que estejam a uma temperatura inferior a do ponto de orvalho do ácido, causando corrosão em baixas temperaturas,

resultando em uma redução de eficiência térmica do motor e diminuição de sua vida útil.

Em relação ao meio ambiente, o enxofre promove poluição atmosférica, quando os óxidos de enxofre são emitidos para a atmosfera. Em muitos países, a legislação vigente em relação ao teor de enxofre é rigorosa, o que obriga os refinadores a empregarem técnicas especiais como a hidrodessulfurização.

Neste aspecto, Pahl (2005) explica que o Biodiesel, por não ser origem mineral, além de ser livre de chumbo, contém teores insignificantes de enxofre e aromáticos (benzeno, tolueno, etc).

f) Corrosão no cobre:

Este teste indica a compatibilidade do Biodiesel com componentes de sistemas de injeção fabricados em cobre ou bronze. Os requerimentos deste teste para o B100 são idênticos ao diesel.

g) Número de cetano:

Um número de cetano adequado é requerido para uma boa performance do motor, isto é, garante boas características para partir a frio e minimizar formação de fumaça branca. O número de cetanos limitado pelo ASTM para o B100 é 47 (DOE, 2004), que equivale ao valor para o “Diesel Premium” nos Estados Unidos.

h) Ponto de Névoa:

O ponto de névoa é a temperatura na qual se pode observar visualmente o primeiro cristal em uma amostra de combustível quando ela é resfriada sob condições definidas pela especificação ASTM D2500. Esta, segundo o U.S. Department of Energy (2004), é a medida da propriedade mais conservadora em relação às propriedades para utilização do combustível em climas frios. A maioria dos combustíveis podem ser utilizados, sem grandes problemas, a temperaturas abaixo da temperatura de névoa mas acima da temperatura de entupimento de filtro – CFPP. A CFPP é a temperatura na qual a aglomeração de cristais é tão grande que ocasiona o entupimento nos filtros. O ponto de névoa para o B100 é tipicamente mais alto do que o do diesel convencional, o que é importante para garantir o desempenho do motor a baixas temperaturas.

Alguns autores, (Torres et al, 2005) entre outros, consideram que a propriedade que melhor descreve um combustível sendo utilizado a baixas

temperaturas é ainda inferior à CFPP. Este ponto é o chamado ponto de fluidez. Outros autores (DOE, 2004) consideram que a determinação do ponto de fluidez é de pequeno valor prático, uma vez que em uma instalação, caso ocorresse um entupimento de filtro pelos cristais do combustível, ainda não se teria chegado no ponto de fluidez do combustível.

As características acima são de maior importância para países de climas mais rigorosos, o que não é o caso do Brasil, mesmo porque, ao se diluir o Diesel com Biodiesel, formando uma mistura, que é o foco da utilização do Biodiesel no Brasil, aquelas características estariam atenuadas. O Biodiesel Handling and Use Guidelines (DOE, 2004) sugere os seguintes valores para alguns B100:

Tabela 05 – Pontos de interesse para utilização de biodiesel em baixas temperaturas.

Fonte: U.S. Department of Energy, 2004

Biodiesel	Ponto de Turvamento (°C)	Ponto de Entupimento (°C)	Ponto de Fluidez (°C)
Biodiesel de soja, rota metilica	3	-2	-4
Biodiesel de colza (canola), rota metilica	-3	-4	-4

A tabela 05 comprova que, dependendo da região onde for utilizado o Biodiesel e da época do ano, deve-se tomar cuidados especiais no transporte e na armazenagem.

i) Carbono residual:

O valor do carbono residual indica uma tendência de depósito de carbono no combustível e uma aproximação da tendência de formação de depósitos a ser formado no motor (Torres et. al, 2005).

j) Número de acidez:

O número de acidez é primariamente uma indicação de que o Biodiesel está livre de ácidos provenientes da degradação natural de óleos e gorduras que formaram o Biodiesel. O U.S Department of Energy (DOE, 2004) alerta que o número de acidez alto indica que a produção do Biodiesel não foi feita de maneira adequada ou que o produto final degradou por oxidação.

k) Glicerina total e livre:

A remoção incompleta de glicerina na fase de produção do Biodiesel aumentará o número de glicerina total e livre aumentando portanto principalmente a viscosidade do Biodiesel. Se estes números forem altos, poderão resultar em resíduos no tanque de armazenagem, no sistema de combustível e no motor. Combustíveis que excedem os limites das normas são mais propensos a causar entupimento nos filtros, entre outros problemas.

l) Fósforo contido:

O Biodiesel produzido nos EUA geralmente apresenta presença de fósforo em níveis inferiores a 1ppm, embora este valor seja limitado a 10ppm. O fósforo pode danificar elementos do catalisador.

m) Destilação T90:

Este parâmetro foi introduzido para garantir que o Biodiesel não esteja contaminado com substâncias indesejadas (DOE, 2004).

2.3.2.2.3.

Biodiesel B2, B5 e B20 – Visão dos Estados Unidos

Misturar Biodiesel ao diesel derivado de petróleo tem por finalidade minimizar as diferenças de propriedades entre estes combustíveis, integrando benefícios de ambos, onde podem ser citados os benefícios ecológicos do Biodiesel e econômicos e físicos do derivado mineral.

Segundo o U.S. Department of Energy (2004) a mistura mais popular nos países desenvolvidos é a B20, por representar um bom compromisso entre custo, emissões, propriedades físicas para baixas temperaturas e compatibilidade de materiais.

A mistura B20 não causa grandes problemas em relação a entupimento de filtros e formação de depósitos provenientes de combustão irregular ou dissolvidos pelo Biodiesel, que por ventura poderiam estar depositados no tanque de estocagem.

Para o B20 e misturas em menores concentrações, ficam minimizados os aspectos negativos associados à compatibilidade de materiais.

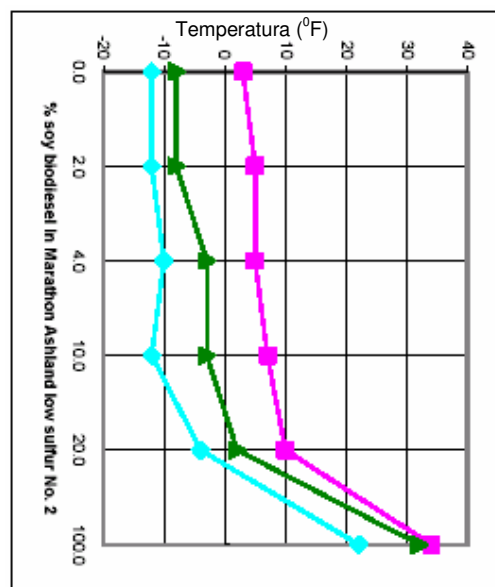
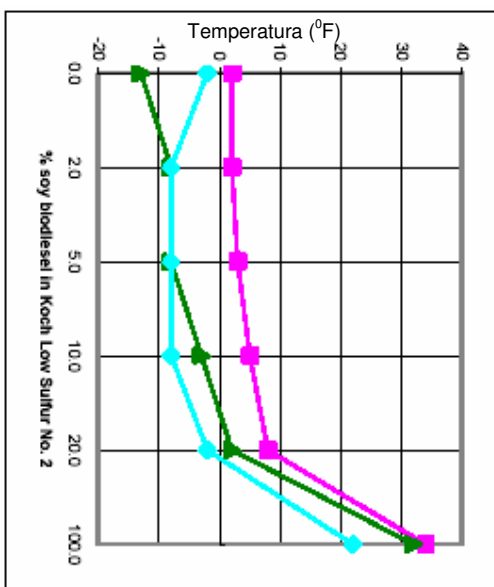
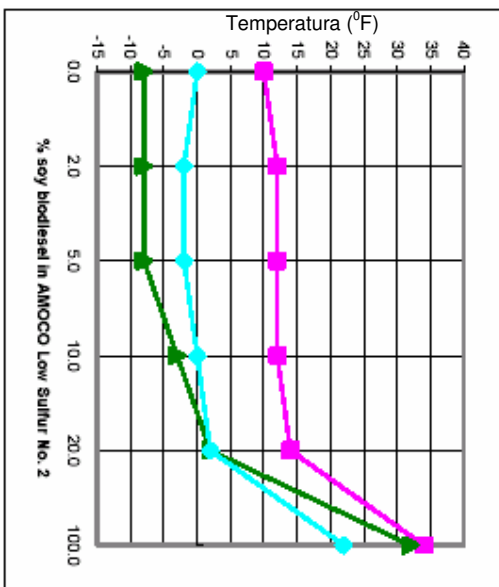
A experiência de mais de 10 anos de utilização de B20 nos Estados Unidos, indicam compatibilidade como todos os componentes de um motor

Diesel, inclusive com aqueles não compatíveis com misturas com alta concentração de Biodiesel ou mesmo o B100 (DOE, 2004).

Comparando com o Biodiesel puro (B100), o B20 possui maior estabilidade, o que resulta numa maior vida de estocagem. A especificação ASTM D4625 sugere que a maioria dos tipos de Biodiesel B20 possa ser estocado por um período de 8 a 12 meses. Porém, o National Biodiesel Board recomenda que o B20 deva ser utilizado dentro de 6 meses a partir da sua produção. Vale lembrar que alguns fornecedores de óleo diesel nos EUA recomendam que o derivado do petróleo deva ser utilizado em um período não superior a 4 meses (DOE, 2004). Mesmo evidenciando que a estabilidade do B20 é comparável a do Diesel, o uso de antioxidantes e aditivos no biodiesel é recomendado quando este for ser estocado por longos períodos.

Como foi visto anteriormente, uma das maiores preocupações na esfera tecnológica é quanto ao uso do combustível em climas frios. Diluindo-se o Biodiesel no Diesel mineral minimiza-se este efeito negativo além de possibilitar uma ação mais efetiva dos aditivos que por ventura foram adicionados na mistura, devido à considerável presença de Diesel na mistura.

A Universidade de Minnessota (University of Minnesota Center for Diesel Research) testou Biodiesel B20 de soja produzido a partir de diversos fornecedores de Diesel disponíveis na região. O resultado foi publicado pelo U.S Department of Energy (DOE, 2004). Os gráficos abaixo mostram o comportamento das propriedades relevantes (ponto de névoa, ponto de entupimento e ponto de fluidez) para regiões de baixas temperaturas e como elas variam muito também fixando o Biodiesel e modificando o derivado do petróleo.



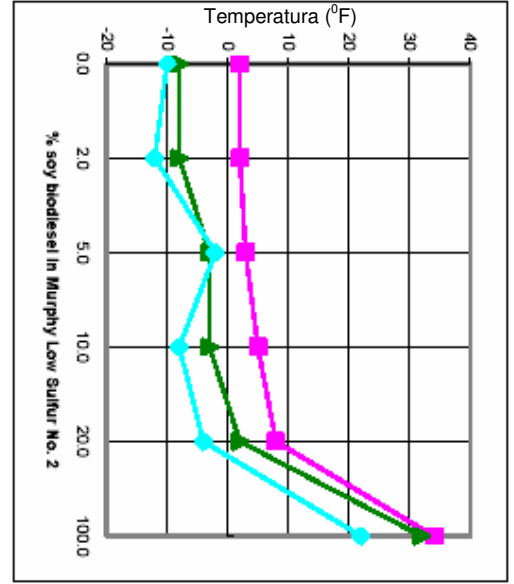
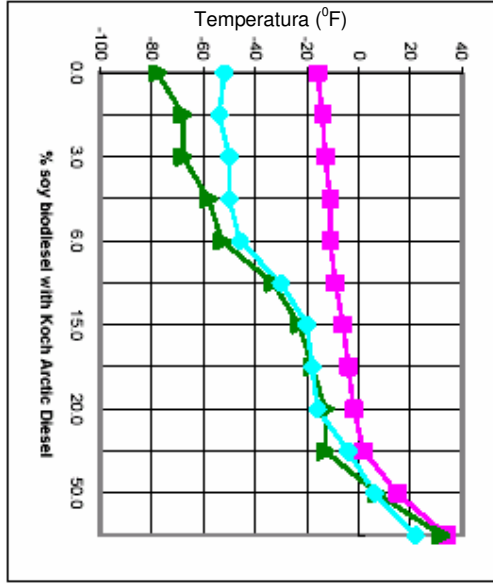
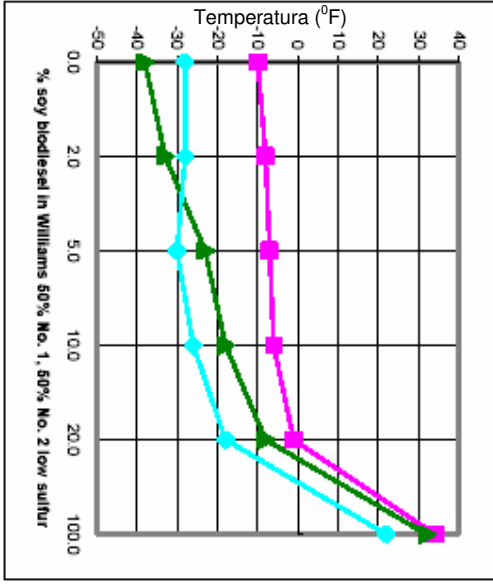




Figura 09: Variação do ponto de névoa (cloud point), do ponto de entupimento (C.F.P.P.) e do ponto de fluidez (pour point) para diferentes concentrações de Biodiesel.
Fonte: U.S. Department of Energy, 2004

O ponto de névoa (Cloud Point), como já foi descrito, é a temperatura na qual se pode observar o primeiro cristal em uma amostra de combustível quando ela é resfriada. O Pour Point é a temperatura que na qual existem aglomerados de cristais em tal quantidade que o fluido pode ser considerado um gel e por isso não mais vai escoar como líquido Newtoniano. O CFPP (Cold Filter Plug Point) é a temperatura na qual os cristais se aglomeraram em quantidade suficiente para causar entupimento no filtro de teste.

Em relação às emissões provenientes da queima de uma mistura de Biodiesel, pode ser visto, pelo gráfico abaixo, que emissões de NO_x crescem lentamente com o aumento na concentração de Biodiesel na mistura, enquanto que as emissões de CO , HC e material particulado (PM) diminuem consideravelmente com este aumento na concentração de Biodiesel.

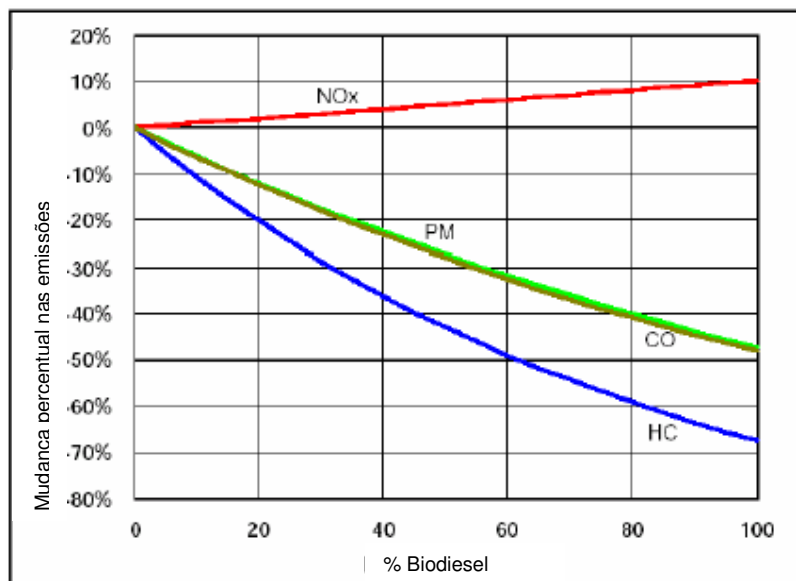


Figura 10: Variação nas emissões de poluentes para diferentes concentrações de Biodiesel.

Fonte: U.S. Department of Energy, 2004

2.3.2.3.

Mistura Para Formação dos *Blends*

Até recentemente, nos EUA, os volumes de misturas utilizados não eram grandes o suficiente para que se viabilizasse economicamente a utilização da infra-estrutura dos distribuidores de derivados de petróleo. Grande parte do B20 utilizado era misturada pelo usuário após recebimento do B100 de um fornecedor. Com o aumento da demanda de B20, os consumidores passaram a receber a mistura já preparada por empresas convencionais do ramo de derivados de petróleo. Com isto, estes últimos ficaram responsáveis por receber e estocar o B100, fazer a mistura com o diesel e então fornecer o *blend* ao consumidor final.

Assim como nos EUA, outros países desenvolvidos, onde o programa de Biodiesel está em um estado mais avançado, os usuários podem adquirir Biodiesel B20 e outras misturas de menores teores diretamente de distribuidores. Desta forma garantem que a mistura foi corretamente misturado, estocado e transportado.

Fazer a mistura independentemente ou comprá-la já pronta depende de vários fatores, entre os quais podem ser citados: o volume necessário de B100 para se fazer a mistura, o teor final do Biodiesel desejado, disponibilidade dos equipamentos necessários, espaço disponível para produção, além dos custos operacionais da produção da mistura.

Misturas de Biodiesel podem ser produzidas de diferentes maneiras. O U.S. Department of Energy (2004) cita as mais populares:

a) *Spash Blending*:

É a operação onde tanto o Biodiesel quanto o Diesel são carregados separadamente no tanque que será utilizado para transporte do *blend*. A relativa mistura dos elementos somado com o movimento do caminhão ou trem já é o suficiente para uma mistura dos componentes; vale lembrar que, quando o transporte ocorre a temperaturas relativamente baixas, esta agitação somente pode não ser suficiente para uma boa mistura.

b) *In-tank Blending*:

É uma operação semelhante à acima descrita, sendo que nesta a vazão de enchimento do reservatório é alta, gerando certa turbulência e garantindo que

eles sejam misturados de maneira satisfatória já no enchimento, sem a necessidade de misturadores eletromecânicos, recirculação ou mesmo de contar com a agitação do transporte (*splash blending*).

c) *In-line Blending*:

É a operação na qual o Biodiesel é adicionado diretamente à linha de distribuição de Diesel. O escoamento turbulento garante a boa mistura dos componentes da mistura.

Esta operação é semelhante à operação de adição de aditivos nos derivados de petróleo nos dias de hoje.

Por esta operação exigir investimentos em equipamentos para o sistema de injeção, não é utilizada por pequenos usuários, apesar de ser a operação mais eficiente de todas.

Como pode ser visto dos itens (a), (b) e (c), acima, não é difícil de preparar a mistura. O que deve ser levado em consideração, segundo o U.S. Department of Energy (DOE, 2004), é que o Biodiesel, por ser mais pesado do que o Diesel se, no ato do enchimento, for transferido primeiro para o tanque, seguido o Diesel, a mistura pode não resultar de maneira satisfatória.

E uma vez que a mistura não tenha sido feita corretamente e por ser o Biodiesel mais pesado, este vai permanecer no fundo do tanque. Como as bombas de transferência succionam desta seção do tanque, o produto bombeado terá uma concentração de Biodiesel acima da desejado.

Adicionalmente considerando que o Biodiesel é um ótimo solvente, se no fundo do tanque ocorrer esta alta concentração de Biodiesel e no tanque existirem sedimentos depositados, estes serão dissolvidos e carregados no bombeamento em direção aos filtros, eventualmente entupindo-os. Para se evitar tais transtornos, basta ter em mente que quanto mais agitada sua entrada no tanque melhor será a mistura. Caso contrário, deve-se dispor de agitadores mecânicos no tanque

2.3.3.

Processo de produção

Quatro métodos têm sido estudados e praticados para se utilizar óleos vegetais em motores ciclo diesel, sem grandes modificações nestes:

- a) Mistura com Diesel;

- b) Craqueamento térmico, também conhecido como pirólise;
- c) Microemulsificação;
- d) Transesterificação;

A transesterificação é de longe o método mais utilizado (Knothe et al, 2005) e somente este processo produz o que é conhecido como Biodiesel, i.e., um mono-álquilésteres de ácidos graxos de cadeia longa, e por isso será o único descrito neste trabalho.

A transesterificação, também chamada de alcólise, é a troca de um álcool de um éster por um outro álcool na presença de um catalisador

Os álcoois que podem ser utilizados são o metanol, etanol, propanol, butanol ou álcool amílico. O mais comum é a utilização da rota metílica, uma vez que o metanol é o álcool mais barato na maioria dos países, com poucas exceções, como no Brasil, que possui forte tradição de produção do etanol .

A reação de transesterificação pode ser catalisada por álcalis, ácidos ou enzimas, e é o processo utilizado pelos Estados Unidos e Europa para produzir Biodiesel. Esta reação também é utilizada na produção de ésteres metílicos para aplicações na indústria de cosméticos e detergentes.

2.3.3.1.

Parâmetros para a reação de transesterificação

Os parâmetros mais relevantes para a reação de transesterificação são:

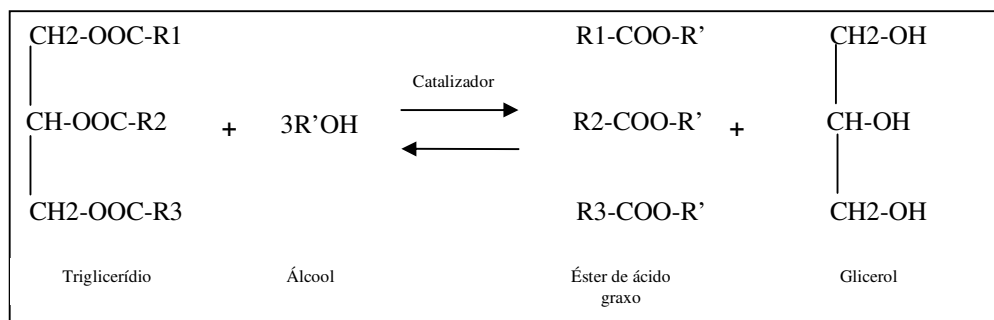
- a) Concentração de ácidos graxos livres no óleo:

É fator importante na reação quando ela for catalisada por NaOH, pois será maior seu requerimento para neutralização. O conteúdo de água nos reagentes deve ser baixo, pois podem ser formados sabões no processo, o que aumenta a viscosidade final do produto e dificulta a separação final do glicerol (Macedo e Macedo, 2004).

- b) Efeito da reação molar:

Este fator está associado ao tipo de catalisador utilizado, por exemplo, na catálise ácida de butanol com óleo de soja necessita-se de uma relação de 30:1, enquanto que na catálise alcalina a relação é de 6:1 para se atingir a mesma taxa de produção (Macedo e Macedo, 2004).

A reação estequiométrica de transesterificação requer 3 moles de álcool por mol de triglicerídeos, para render 3 moles de éster e um mol de glicerol. A reação abaixo, apresentada por Macedo e Macedo (2004), é a equação geral da transesterificação de triglicerídeos com álcool, onde R1, R2, R3, R' representam os grupos de alquila.



Estudos mostram que alta relação molar resulta em maior obtenção de ésteres em menor tempo de uma reação, sendo porém liberada maior quantidade de glicerol (Macedo e Macedo, 2004). Óleos de soja, girassol, amendoim, algodão e palma, por exemplo, apresentam maiores taxas de conversão com o aumento da reação molar entre o triglicerídeos e o álcool. Em processos industriais, para se obter éster metílicos com taxas de 98% de conversão a relação molar de 6:1 é geralmente a mais usada (Macedo e Macedo, 2004).

c) Tipos de catalisadores:

Os tipos de catalisadores possíveis são os ácidos (H_2SO_4 , HCl, derivados de H_2PO_4) alcalinos (KOH, NaOH) ou enzimas (lipases).

As reações mais rápidas são as que utilizam catalisadoras alcalinas, aproximadamente 4000 vezes mais rápidas e por isso as mais empregadas comercialmente. Macedo e Macedo (2004) citam que foi observado que, embora a catálise alcalina resulte em altas taxas de conversão quando se trata de curtos tempos de reação, este processo apresenta alguns inconvenientes, como, por exemplo, apresentar altos gastos energéticos, necessidade de se tratar à água alcalina residual, remover o catalisador, recuperar de maneira difícil e demorada o glicerol entre outros.

As reações que utilizam catalisadores ácidos são indicadas quando o óleo possui alto teor de água ou ácido graxo livre, conforme descrito no item (a) desta relação de parâmetros.

Estudos para se empregar catalisadores enzimáticos começaram a ser publicados na década de 90. Esta tecnologia tem demonstrado grande potencial na transesterificação de óleos vegetais. Segundo Macedo e Macedo (2004), as reações utilizando catalisadores enzimáticos podem utilizar vários tipos de álcoois e têm apresentado altas taxas de conversão e evidentes vantagens ambientais como menor gasto energético, mais fácil recuperação dos produtos e menor quantidade de glicerol como subproduto. Frente a estas vantagens, justificam-se investimentos em pesquisa e desenvolvimento para esta tecnologia para ser implantada no Brasil.

2.3.4.

Principais Matérias Primas para Produção de Biodiesel

Embora existam diversas matérias primas capazes de produzir o Biodiesel, a partir tanto dos óleos vegetais quanto das gorduras animais e dos resíduos de fritura, a experiência internacional na produção de Biodiesel é concentrada no uso de óleo de canola, girassol e soja (Pahl, 2005). Verifica-se, porém, principalmente na Áustria e nos Estados Unidos, uma forte iniciativa em usar óleo residual de fritura (Costa, 2005).

A figura abaixo mostra a distribuição da utilização de óleos vegetais para se transformar em Biodiesel no nível mundial:

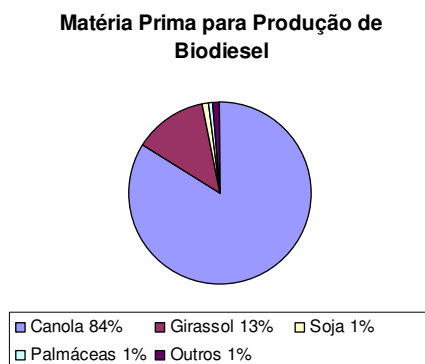


Figura 12: Distribuição da utilização de óleos vegetais para se transformar em Biodiesel.

Fonte: Biodiesel, Growing a New Energy Economy, Pahl, 2005

Na Europa, a produção de Biodiesel é originada principalmente da colza, que é uma couve comestível e é conhecida também pelo nome de canola ou *rapessed*. Pahl (2005) cita que a canola representa aproximadamente 84% das matérias primas para a produção de Biodiesel, embora sua produtividade de óleo por hectare plantado (1.190 litros por hectare) fique atrás de outras fontes como o côco (2.689 litros por hectare) e as palmáceas (5.950 litros por hectare).

As palmáceas, onde se enquadra o óleo de dendê, aparecem no topo da lista de produtividade por área plantada embora outros fatores inibam investimentos nesta matéria prima, como o tempo de maturação da planta, e o alto valor do ponto de névoa, o que torna o Biodiesel desta matéria prima não atraente para países de clima frio (Pahl, 2005).

2.3.4.1.

Principais Matérias Primas para Produção de Biodiesel no Brasil

Para a escolha da matéria prima para se produzir o Biodiesel, deve se levar em conta diversos fatores como, por exemplo, a aptidão regional ao cultivo. De uma forma geral, a EMBRAPA (Peres, 2003) tem sugerido a soja para as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, a mamona para o Nordeste e o dendê para a região Amazônica, embora não sejam desconsideradas outras fontes de matéria prima para produção de Biodiesel com o girassol, o amendoim e até mesmo o abacate.

Há correntes que são contra o uso de óleos alimentícios, como óleo de soja ou o óleo de dendê, para a produção de combustível. No Brasil, a produção de Biodiesel proveniente de óleo de mamona não sofreria estas críticas.

2.3.4.1.1.

Mamona

A mamona tem sido cultivada na região nordeste, principalmente na Bahia, que segundo o NAE (2005), é responsável por 60% da produção regional. Pesquisas agrônômicas do EMBRAPA têm demonstrado que, conservadoramente, o rendimento da mamona é estimado entre 500 e 1000 kg de óleo por hectare plantado. A produção de óleo de mamona atualmente no Brasil é de aproximadamente 50 mil t/ano, considerando um teor de óleo de 48%; como mostra a figura 12:

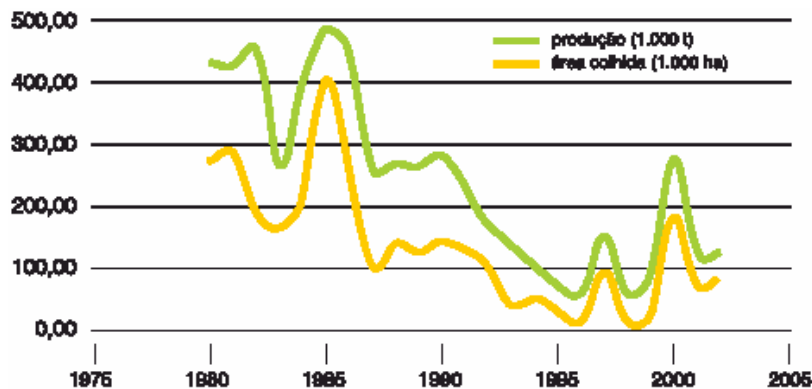


Figura 12: Produção anual de mamona no Brasil.

Fonte: Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República (NAE), 2005.

É fato que a mamona tem sido indicada como uma das poucas opções agrícolas rentáveis para as regiões árido e semi-árido do Nordeste. Não se pode deixar de destacar que a produção de óleo de mamona advém primariamente de pequenos produtores, com até 15 ha de área plantada, mas que, para se atender a um programa agressivo de produção de Biodiesel, as escalas de produção deverão ser muito maiores.

2.3.4.1.2.

Soja

O cultivo da soja no Brasil, de acordo com dados da EMBRAPA (NAE, 2005), ocupa uma área de mais de 20 Mha e cerca de 70% da produção é destinada à exportação. Em 2003 foram produzidos 5,4 Mt de óleo de soja, devido à produtividade de 2,8 t/ha e ao teor de óleo situar-se entre 18 e 20% do peso dos grãos.

2.3.4.1.3.

Dendê

A produção de óleo de dendê no mundo cresce em ritmo muito acelerado. Estima-se que, pela tendência atual, a produção deste óleo ultrapasse a produção de óleo de soja no final da década.

O Brasil é freqüentemente citado como possuidor do maior potencial de áreas com aptidão do mundo para o plantio do dendê, embora hoje produza

apenas 0,5% do total mundial, algo em torno de 0,1 Mt de óleo (NAE, 2005), enquanto que a Malásia ocupa a primeira posição no ranking, com 11,2 Mt de óleo produzido anualmente.

2.3.5.

Aspectos tecnológicos sobre a substituição de Diesel por Biodiesel

Atualmente não existem grandes barreiras tecnológicas para se substituir o Diesel mineral pelo Biodiesel. Os maiores impedimentos estão relacionados a aspectos mais financeiros do que tecnológicos (GTI, 2003).

A MAN B&W executou diversos testes em motores para comparar o comportamento dos mesmos operando com combustíveis tradicionais e com biocombustíveis, entre eles Biodiesel. A partir dos resultados dos testes, realizados desde 1994 até 2004, Carranca (2005) pode concluir que motores de média velocidade são os mais indicados para se utilizar biocombustíveis. Os testes também mostraram que não ocorreram mudanças significativas na performance dos motores, assim como nas emissões dos principais poluentes, a exceção do NO_x. O trabalho, apresentado pela MAN B&W, cita que testes para motores de menor porte, os chamados Diesel rápidos, apresentam problemas quando utilizam Biodiesel a concentrações superiores a 5%. Tais problemas, como perda de potência, vazamento, corrosão, entupimento, formação de depósitos e etc, estão relacionados às dificuldades que se tem para manuseio, transporte e estocagem de tais biocombustíveis, maior viscosidade e menor poder calorífico.

Este último aspecto é extremamente importante, principalmente quando da utilização em plantas de geração de energia elétrica. Segundo Carranca (2005), o consumo em um grupo moto-gerador de 1MW de potência utilizando Biodiesel, pode chegar a 2.000 toneladas anuais.

Generalizando, os biocombustíveis podem ser estocados e transportados de uma maneira similar a combustíveis convencionais e são particularmente seguros para manuseio, pois são estáveis, não tóxicos e possuem pontos de fulgor relativamente altos (DOE, 2004). A substituição do Diesel pelo Biodiesel B100, do ponto de vista dos aspectos tecnológicos, deve ser feita com alguns cuidados, a saber:

a) O B100, por ser um bom solvente, pode dissolver particulados depositados no tanque de combustível e no sistema de alimentação de combustível, carregando-os para a câmara de combustão.

b) A maioria dos B100 começa a atingir o ponto de névoa a temperaturas frias não severas. Devem, portanto, ser previstas linhas de alimentação e/ou tanque providos de dispositivo de aquecimento mesmo para países de clima moderado. Acredita-se que, atualmente, nos países de clima frio, esta questão seja a mais importante barreira tecnológica para se utilizar o Biodiesel.

À temperatura próxima do ponto de névoa, serão formados cristais que se depositarão no fundo do tanque formando um gel. Tanques de armazenamento providos de agitadores mecânicos podem ser bastante úteis, pois a agitação no combustível ajudará a dissolver novamente os cristais na solução. O U.S. Department of Energy (DOE, 2004) cita que alguns fabricantes de aditivos mostram que, adicionando aditivos ao Biodiesel, a temperatura de névoa é reduzida em até 12°C para altas dosagens de aditivos (10.000ppm), e em até 3°C, para dosagens menos severas (1.000ppm).

c) O Biodiesel B100 não é compatível com alguns tipos de borrachas (buna N, borracha natural, etc), normalmente utilizadas em algumas mangueiras e gaxetas. Isto pode causar degradação de componentes em um motor, vazamentos, danos à bomba de combustível, entupimentos dos filtros etc. Existem no mercado motores totalmente resistentes ao Biodiesel. A Wärtsila do Brasil, por exemplo, está autorizada a comercializar todos os seus motogeradores utilizando Biodiesel B100. O mesmo fornecedor já conta, em seu *track-record*, com mais de 164MW instalados na Europa a partir da utilização de B100.

d) O U.S. Department of Energy (DOE, 2004) alerta que o Biodiesel B100 não é compatível com alguns metais e plásticos. Os metais incompatíveis são cobre (e suas ligas como bronze), chumbo, estanho e zinco. Normalmente motores diesel não contém estes metais mas, no caso de ocorrer, o Biodiesel em contato por longo período com estes materiais pode formar sedimentos que entupirão filtros, entre outros problemas. O Biodiesel também não é compatível com alguns tipos de plástico como polietileno e polipropileno, o que atinge e

restringe principalmente os recipientes de estocagem e transporte de pequenas quantidades de combustível.

2.3.6.

Aspectos sobre transporte e estocagem

O Biodiesel pode utilizar os mesmos recursos de transporte e estocagem utilizados para o Diesel. Deve-se tomar cuidado, no entanto, com a incompatibilidade do Biodiesel com alguns equipamentos ou acessórios de borracha ou plástico (i.e borrachas de vedação, mangueiras, etc) conforme já descrito.

Quanto à logística de suprimento de Biodiesel, devem ser levadas em consideração as distâncias entre as áreas de plantio, de produção do óleo, de produção do Biodiesel, de mistura com o Diesel e os centros de consumo. Para um país com as dimensões do Brasil, a minimização dos custos de transporte se torna fundamental e inclusive deve-se realizar estudos de avaliação da frota de caminhões-tanque disponíveis no mercado.

É de comum entendimento que a mistura do Biodiesel no Diesel deva ser feita pelas distribuidoras de combustíveis, assim como acontece no caso da adição de álcool anidro à gasolina. Fica evidente que, neste caso, minimizando os agentes autorizados a realizar a mistura, menores são as chances de fraude, mas, por outro lado, maiores os custos de transporte. O GTI (2003) destaca que o mercado de combustíveis já dispõe de uma infra-estrutura de logística para o suprimento de combustíveis que é capaz de atender à implementação de um programa de uso de Biodiesel. No entanto, sugere que, sobre o aspecto de estocagem, deva ser avaliada a necessidade de ampliação do parque de tancagem das distribuidoras de combustível, assim como a adequação das instalações para esta nova atividade.

Com base na minimização dos agentes envolvidos a fim de favorecer o controle da qualidade e o controle tributário, o Programa de Engenharia de Transportes da COPPE (Ribeiro et al, 2004) sugere um modelo de comercialização do Biodiesel, sintetizado na figura 3:

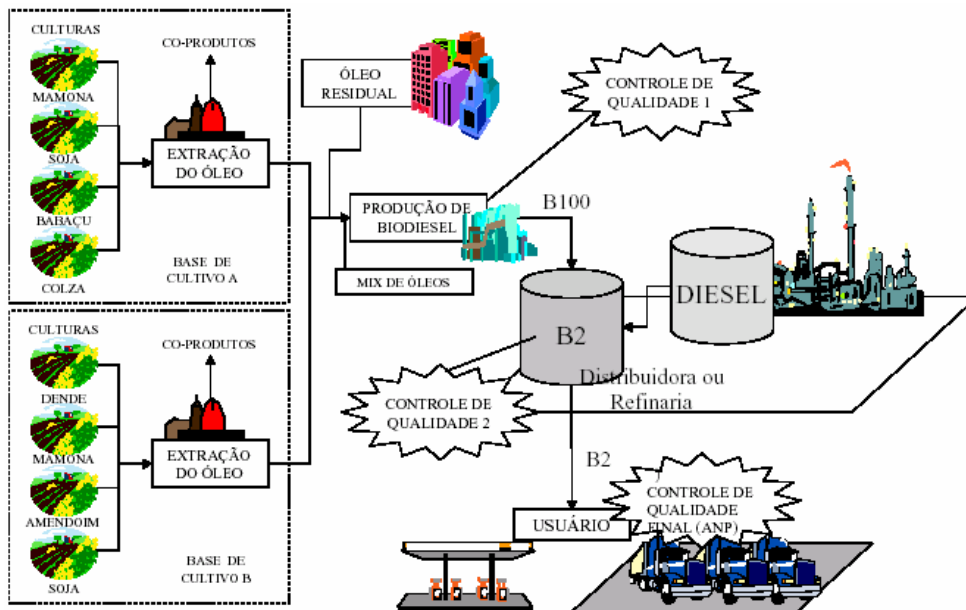


Figura 13: Modelo proposto de comercialização do Biodiesel.

Fonte: Ribeiro et al (2004)

No estudo é sugerido, por uma questão logística, que as plantas de produção de Biodiesel sejam instaladas o mais próximo possível das refinarias, ou das grandes bases de distribuição de Diesel (Ribeiro et al, 2004). O modelo sugerido buscou conciliar a experiência internacional de comercialização de Biodiesel e a experiência nacional na comercialização do etanol. Os autores acreditam que o modelo deva ser capaz de contemplar uma grande variedade de matérias-primas e ainda garantir a qualidade final do produto comercializado. Por esta razão o modelo é baseado na cadeia de comercialização de pequena flexibilidade (Ribeiro et al, 2004), ou seja, minimizando o número de transações entre os agentes da cadeia de comercialização.

2.4.

Aspectos Econômicos sobre o Biodiesel

Na Europa e nos Estados Unidos o custo do Biodiesel é, hoje, de uma e meia a três vezes maior do que o diesel mineral (GTI, 2003) e não há previsão de reduções importantes desse custo no futuro próximo.

A utilização do Biodiesel deve, portanto, ser justificada por outros aspectos positivos tais como menor impacto ao meio ambiente, geração de emprego,

desenvolvimento sustentável, diminuição da dependência de derivados de petróleo entre, outros.

O NAE (2005) relata que a mamona parece ser um caso de difícil viabilização comercial para fins de Biodiesel, uma vez que o óleo de mamona tem alto valor de mercado, com ganhos bem superiores aos da produção de Biodiesel. Além do mais, a alta viscosidade o Biodiesel proveniente desta matéria prima poderia inibir a exportação do produto.

Simulações feitas pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior – MDIC (GTI, 2003) permitem obter estimativas preliminares dos custos de produção de Biodiesel, derivado de diversas matérias primas. Tais simulações levaram em consideração os valores referentes ao custo da produção do óleo vegetal, o transesterificação do óleo vegetal, a receita dos derivados (farelo, tortas e glicerina gerados nos processos) e a tributação incidente.

O resultado do estudo do MDIC (ver apêndice E) conclui que o Biodiesel tornar-se-ia muito atrativo para o consumidor final caso o produto sofresse isenção tributária, o que, por parte da União e pelos Estados, resultaria numa perda de arrecadação.

Estudos de viabilidade técnico-econômica devem ser realizados exaustivamente, para acompanhar a evolução tecnológica dos processos de produção, dos preços praticados no mercado das matérias primas, (que tendem a cair com o aumento de oferta) das receitas geradas pela venda dos derivados, e assim por diante. Além do mais, devem-se levar em conta os custos do transporte das matérias primas das respectivas fontes produtoras ao local de produção do Biodiesel, o transporte deste ao agente que irá preparar as misturas (distribuidor) e deste ao consumidor final. Isto porque, devido às grandes dimensões do país, estes valores serão certamente relevantes.

2.4.1.

Financiamento

Recentemente o BNDES lançou o “Programa de Apoio Financeiro a Investimentos em Biodiesel” (BNDES, 2006), com o objetivo de apoiar investimentos na produção de Biodiesel. O programa atende a todas as fases da produção, i.e. desde a sua fase agrícola, de produção de óleo bruto, de produção de Biodiesel. Atende, também a assuntos ligados a armazenamento, logística e aquisição de equipamentos para a produção de Biodiesel.

O programa estabelece condições mais favoráveis a projetos que possuam o chamado “Selo Combustível Social”, a ser outorgado pelo Ministério do Desenvolvimento Agrário-MDA aos projetos que promovam a inclusão social de agricultores familiares.

A participação do Banco nestes projetos é de até 90% dos itens passíveis de apoio, para projetos com “Selo Combustível Social”; e de até 80% (oitenta por cento) dos itens passíveis de apoio, para projetos sem selo. Adicionalmente, foi reduzida a exigência de garantias reais para 100% do valor do financiamento, em vez dos usuais 130%; e são praticadas menores taxas de juros.

2.4.2.

Aspectos de mercado

O Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República (NAE, 2005) explica que o mercado potencial para o Biodiesel é determinado pelo mercado do derivado mineral. Conceitualmente, o Biodiesel pode substituir o diesel em qualquer uma das suas aplicações. No entanto, a inserção deste combustível na matriz energética brasileira deverá ocorrer de forma gradual e focada em mercados específicos, que garantam a irreversibilidade do processo.

A utilização do Biodiesel pode ser dividida em dois mercados distintos (NAE, 2005), a saber: mercado automotivo e usos estacionários.

O mercado de estações estacionárias caracteriza-se basicamente por instalações de geração de energia elétrica, e representam casos específicos e regionalizados. Tipicamente, pode-se considerar a geração de energia nas

regiões remotas do país as quais, em termos dos volumes envolvidos, não é significativa, mas pode representar reduções significativas com os custos de transporte e, principalmente, a inclusão social destas comunidades.

Outros nichos de mercado para a utilização do Biodiesel para geração de energia podem ser encontrados na pequena indústria e no comércio, como forma de redução do consumo de energia no horário de ponta, aliado aos aspectos de propaganda e marketing.

O mercado automotivo abrange o transporte urbano, de prestação de serviços municipais, transporte ferroviário, hidroviário e o consumidor do varejo, representado pela compra do combustível nos postos de revenda tradicionais, i.e empresas de transportes interestaduais de cargas e passageiros, veículos leves e consumidores em geral.

Neste cenário, e de acordo com dados da ANP (ANP, 2006), o mercado total de diesel do Brasil, por região, é representado pelos números da tabela abaixo:

Tabela 06 - Consumo de óleo Diesel no Brasil em 2004.

Fonte: ANP (2006)

Região	Consumo de Diesel (mil m³)
Sudeste	16737
Sul	7743
Centro-Oeste	4498
Nordeste	5618
Norte	3019

Deste montante, aproximadamente 37.000 mil m³ de óleo Diesel foram importados, aproximadamente 16,3%, algo em torno de 6.400 mil m³ o que equivale a um gasto de US\$ 1,2 bilhão (NAE, 2005). Como exemplo, a utilização de Biodiesel B2 abriria um mercado de aproximadamente 800.000 m³ de Biodiesel, enquanto que, para a utilização de B5, demandaria, um total de aproximadamente 2 MM m³.

O aproveitamento destes nichos de mercado e a possível redução de custos agrícolas pela substituição total ou parcial do diesel pelo Biodiesel são benefícios potenciais da utilização desse combustível renovável. Especialmente nas regiões Norte e Centro-Oeste, onde as distâncias e a carência de infraestrutura de transporte elevam os custos de distribuição do diesel, conferindo vantagem ao combustível produzido localmente.

2.5.

Aspectos Sociais do Biodiesel

É fato que o processo de produção do Biodiesel estimulará a agricultura nacional, que terá de ampliar sua capacidade para atender à demanda esperada.

Com a criação o “Selo Combustível Social”, o assentamento de famílias no campo será estimulado e com isso é esperada uma grande geração de empregos em áreas isoladas como nas regiões Norte e Nordeste.

Os principais benefícios relacionados aos aspectos sociais resultantes da utilização do Biodiesel no Brasil, relacionam-se com a geração de emprego e renda, além de inclusão social de populações menos favorecidas que se beneficiariam do uso do Biodiesel para geração de energia elétrica. Desta forma o Biodiesel pode ser um instrumento adicional para se alcançar os objetivos do Programa “Luz para Todos”.

No que diz respeito à criação de empregos rurais, o GTI (2003) sugere, como regra comparativa e dependendo da cultura e tecnologia utilizada, que para cada 100 hectares de terras plantadas é necessário um trabalhador, enquanto que para agricultura familiar seriam necessários 10 trabalhadores. Por esta razão a propaganda do programa nacional do Biodiesel é pautada na inclusão social.

Nesta linha de ação, diversas empresas estão fazendo estudos de viabilidade de usinas produtoras de Biodiesel sustentadas por pequenos produtores rurais. Entre as empresas pode ser citada a Petrobrás, que iniciou, em abril de 2005, um estudo de viabilidade para investir MR\$15 em unidade de produção de Biodiesel no interior do Paraná (O GLOBO, 2005). O estudo vai levantar a capacidade dos pequenos produtores rurais da região de abastecer a usina, cuja capacidade de produção deverá ser de 40 mil toneladas por ano. Outro objetivo do estudo é avaliar qual oleaginosa será mais viável para sustentar o fornecimento para a Empresa. Entre as possibilidades de produção estão o nabo forrageiro, o amendoim e o girassol. De acordo com o artigo, o Projeto poderá abranger um universo de 50 mil produtores no Paraná e norte de Santa Catarina.

2.5.1.

Geração de emprego e agricultura familiar

De acordo com o relatório final do Grupo de Trabalho Interministerial (GTI, 2003) “...os estudos conjuntos desenvolvidos pelos Ministérios do Desenvolvimento Agrário (MDA), da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), da Integração Nacional (MI) e das Cidades (MCidades) permitem simular que, a cada 1% de participação da agricultura familiar no mercado de Biodiesel no País, na hipótese de utilização de um percentual de mistura de 5% (B5) de Biodiesel no óleo diesel em todo território nacional, seria possível gerar cerca de 45 mil empregos no campo...”.

Levando-se em conta que, para cada um destes 45 mil empregos rurais, dentro das hipóteses acima, pode-se gerar 3 empregos urbanos, ou seja 130 mil, totalizar-se-iam 180 mil empregos diretos e indiretos para o mercado do B5.

Se a participação da agricultura familiar fosse aumentada de 1% para 6% no mercado do B5, a geração de emprego aumentaria para 270 mil empregos rurais e 810 mil na indústria, comércio e distribuição, totalizando mais de 1 milhão de empregos. O mesmo relatório do GTI aponta, como efeito comparativo, o fato que, se a mesma participação fosse integralmente apropriada pelo agronegócio da soja, seriam gerados apenas cerca de 46 mil postos de trabalho.

O GTI recomendou, em seu relatório, que as ações do Governo direcionadas ao Biodiesel devam adotar a inclusão social e o desenvolvimento regional, via geração de emprego e renda de pequenos produtores, ou seja a produção e consumo devem ser promovidos de forma descentralizada. O Grupo recomendou, também, que não se deva privilegiar rotas tecnológicas, matérias primas e escalas de produção agrícola e agroindustrial, diante do amplo leque de alternativas que se pode explorar, mas que as regiões Norte e Nordeste devam receber tratamento diferenciado por serem regiões mais carentes e com amplas potencialidades de inserção no mercado do Biodiesel.

2.6.

Aspectos Ambientais sobre o Biodiesel

Quando se avaliam os impactos ambientais da queima de um combustível renovável, deve-se levar em conta todo o seu ciclo de vida desde a produção de

sementes, passando pela utilização de fertilizantes, plantio, colheita, armazenamento, extração do óleo vegetal, transporte, consumo (emissões devido à combustão) e ainda a decomposição dos resíduos que venham a ser produzidos e a degradação do combustível que por um acaso não tenha sido utilizado como tal (GTI, 2003).

Foge aos objetivos deste trabalho uma avaliação completa sobre os aspectos ambientais do Biodiesel. Serão analisados dois pontos considerados mais relevantes: (a) comparação e balanço das emissões resultantes da queima do Biodiesel em relação ao diesel e (b) oportunidades do Protocolo de Kyoto para o Biodiesel.

É importante lembrar, que por ser o Biodiesel um combustível renovável, o cenário de referência em relação às emissões de gases de efeito estufa deve avaliar a quantidade de gases emitidos e depois deduzir a quantidade capturada na fotossíntese da biomassa que lhe serve de matéria prima (GTI, 2003).

As emissões de poluentes, provenientes da queima do Biodiesel, variam basicamente em função da matéria prima utilizada para sua produção. Comparativamente com o diesel e tomando-se por base o Biodiesel B100, produzido do óleo de soja, seu uso reduz as emissões do monóxido de carbono (CO) em 48%, de material particulado (MP) em 47%, do óxido de enxofre (SO_x) em praticamente 100% e dos hidrocarbonetos totais (HC) em 67% (GTI, 2003).

Em relação às emissões de óxido de nitrogênio (NO_x), no entanto, verifica-se um aumento. Recentes estudos da Environmental Protection Agency-EPA (U.S. Department of Energy, 2004), concluíram que, devido a este incremento de aproximadamente 10% de emissão de NO_x, quando da utilização de Biodiesel, realmente pode-se inibir a comercialização em áreas onde o efeito deste incremento de emissões ultrapasse requisitos ambientais. Entretanto, este fator não deve ser encarado como um impedimento geral de seu uso, devido, principalmente, às grandes vantagens em relação aos outros poluentes e pelos grandes esforços que se tem feitos para diminuir a emissão deste poluente. A questão do óxido de nitrogênio, por ser um aspecto negativo, será tratada com mais detalhes no item 2.6.1 deste trabalho.

Em relação às misturas de Biodiesel, pode-se perceber também uma redução nas emissões do monóxido de carbono, material particulado e hidrocarbonetos totais, porém em menores proporções por causa da “diluição” deste diesel. A comparação de emissões da queima de Biodiesel óleo de soja com o diesel encontra-se na tabela abaixo:

Tabela 07: Comparação de emissões da queima de Biodiesel proveniente de óleo de soja, em relação a queima de óleo diesel convencional.

Fonte: GTI (2004)

Poluente	B100	B20	B5	B2
Monóxido de carbono (CO)	-48%	-12%	-3%	-1%
Hidrocarboneto (HC)	-67%	-20%	-5%	-2%
Material particulado (MP)	-47%	-12%	-3%	-1%
Óxidos de enxofre (NO _x)	+10%	+2%	+0,5%	+0,2%

Com relação à valorização dos custos evitados da poluição pela substituição do diesel pelo Biodiesel B100, o GTI (2004) fez um exercício de estimativa de quanto o País poderia evitar gastar, contabilizando os custos relacionados principalmente à saúde. As estimativas alcançaram um montante de um pouco mais de MR\$ 2,3 ao dia, totalizando aproximadamente MR\$ 873 ao ano. Para o B20 a redução dos gastos ligados à poluição, o montante seria de MR\$ 302,3 ao ano e para o B5 e B2, seria de MR\$ 75,6 e MR\$ 27,3 milhões de reais ao ano.

2.6.1.

Aspectos em relação às emissões de Óxidos de Nitrogênio (NO_x)

Como já foi dito, a composição do Biodiesel é um fator que afeta na quantidade de poluentes emitidos na queima – ver figura 15. Considerando um valor médio, pode-se verificar que o uso do Biodiesel B100 aumenta em aproximadamente 10% as emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) e algo entre 2 e 4% para o B20, o que não é elevado, mas deve ser considerado, pois é um dos principais precursores do ozônio troposférico, atualmente o mais grave problema de qualidade do ar na maior cidade brasileira, São Paulo (CETESB, 2003).

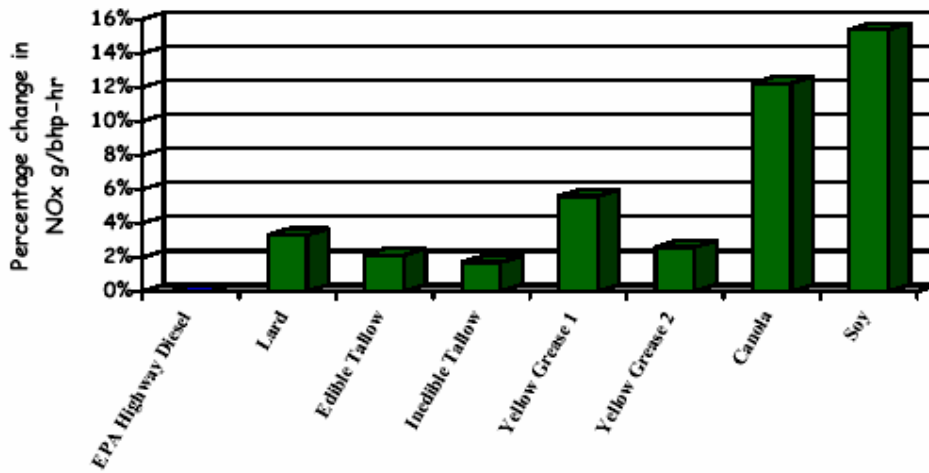


Figura 15: Comparação entre emissões de Biodiesel produzido por diferentes matérias-primas.

Legenda:

- Lard = Banha de porco;
- Edible Tallow = Sebo comestível;
- Inedible Tallow = Sebo não comestível;
- Yellow Grease = Gordura
- Soy = Soja

Fonte: Biodiesel Handling and Use Guideline, 2004

O aumento das emissões de NO_x , associado à utilização do Biodiesel, tem sido confirmado por muitos estudos e, por ser um aspecto negativo à implementação do mesmo na matriz energética nacional, deve ser o aspecto principal a ser pesquisado, visando à redução de formação de NO_x . As principais linhas de ação são:

- a) Utilização de catalisadores^[4];
- b) Utilização de aditivos^[5];
- c) Identificação da fonte ou propriedade;
- d) Desenvolvimento de novos motores;
- e) Modificação no tempo de ignição^[6];

[4] Nos veículos movidos a diesel, não se utilizam catalisadores de pós-combustão devido ao elevado teor de enxofre e emissão de particulados deste combustível. Como o Biodiesel é virtualmente isento de enxofre e diminui drasticamente as emissões de particulados, é possível a utilização de um catalisadores para veículos a Biodiesel, porém estaria seu uso restrito ao biocombustível. A utilização de catalisadores é uma alternativa de simples execução durante o processo de produção de novos motores estacionários ou em novos veículos, mas de uma operação de extrema complexidade quando se trata de instalar em motores usados principalmente nos veículos em circulação, com variado número de modelos e anos de uso (Biodiesel Handling and Use Guideline, 2004).

[5] Fabricantes de aditivos tem trabalhado nesta linha, embora testes com B100 tem mostrado que aditivos provém poucos benefícios a altos custos (Biodiesel Handling and Use Guideline, 2004).

[6] Um pequeno retardo no tempo de ignição, algo em torno de 1° a 5° , pode trazer as emissões de NO_x do Biodiesel para níveis comparáveis ao diesel, ou ao menos reduzir a sua quantidade (Biodiesel Handling and Use Guideline, 2004). A regulagem de motores usados é uma operação complexa, mas a idéia é que alterando o tempo de ignição, modificam-se as condições de temperatura e pressão e com isso ocorre menor formação de NO_x .

Oliveira (2004) cita que, apesar deste aumento nas emissões de NO_x ser um fato, ainda existe espaço técnico para utilização imediata do B9 mesmo quando utilizado no motor que mais emite NO_x homologado pelo Programa de Controle de Emissões Veiculares (PROCONVE) e sendo, ainda assim, respeitado o limite superior de emissões imposto pelo IBAMA. No texto de referência ainda é afirmado que, caso o motor de maior índice de emissões de NO_x fosse excluído do sistema, seria possível a utilização da mistura de 28% de Biodiesel no diesel.

2.6.2.

Oportunidades do Protocolo de Kyoto para a Implementação de Geração de Energia a partir do Biodiesel

O Protocolo de Kyoto, através dos seus instrumentos de flexibilização, entre eles o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL, busca obter uma reversão da tendência de crescimento das emissões de gases de efeito estufa na atmosfera. Desta forma, o protocolo de Kyoto determina que os países que aderiram às suas determinações, reduzam suas emissões e para tal, foram criados os chamados mecanismos de flexibilização.

Há abertura no protocolo para o caso de algum país que não consiga atingir as metas de redução. Este poderia comprar créditos de outras nações que possuam projetos de MDL. No entanto, o Protocolo de Kyoto, afirma que *"...reduções de emissões (devem ser) ... adicionais às que ocorreriam na ausência da atividade certificada de projeto."* (GTI, 2003).

Desta maneira, a forma como será desenvolvido o programa nacional de Biodiesel definirá a possibilidade ou não de enquadramento nas exigências do MDL, pois, como explica o GTI (2003), *"...para se estabelecer o que se define como redução adicional, deve-se estabelecer um cenário de referência. Caso o programa de Biodiesel seja compulsório, o mesmo se configurará como cenário de referência, não apresentando, portanto, adicionalidade na redução de emissões. Caso seja autorizativo, apresentará mais chances de elegibilidade."*

O programa brasileiro está caminhando para que, a partir de 2008, seja compulsório o consumo de B2, restringindo assim a elegibilidade de projetos ligados ao Biodiesel dentro do MDL. Contudo, isto não deve ser um fator decisivo para se inibirem investimentos em Biodiesel, pois além do fato de que as exigências serem muito severas no âmbito do MDL, dificultando a

elegibilidade de qualquer projeto, também há o risco de não haver compradores interessados, pois a Diretiva da Comunidade Européia para o mercado de carbono estabelece como foco os projetos envolvendo grandes fontes estacionárias de emissão, como grandes centrais de geração de energia, indústria do cimento, entre outros (GTI, 2003).

Por outro lado, por ser o Biodiesel proveniente basicamente de óleo vegetal, estimulando-se o consumo deste combustível, estimular-se-á o desenvolvimento de empreendimentos ligados ao agronegócio e estes sim, entre outras alternativas, podem ser elegíveis para a recuperação de crédito de carbono dentro do Protocolo de Kyoto.

3

Simulação de uma Usina Termelétrica

Considerando os diversos aspectos já tratados nesta dissertação, fez-se necessário simular o comportamento termodinâmico de motores estacionários operando com Biodiesel, a fim de comparar seu desempenho operando com combustíveis convencionais.

Vale lembrar, neste ponto, que os motores a combustão interna (MCI) representam a tecnologia mais difundida dentre as máquinas térmicas, devido à sua simplicidade, robustez e alta relação potência/peso (Lora e Nascimento, 2004). Dentre os MCI, os que operam segundo o ciclo diesel geralmente apresentam grande eficiência térmica quase que independentemente da faixa de operação (carga parcial ou total) e não são tão sensíveis às condições ambientais como outros motores térmicos (i.e., turbina a gás). Grone e Hallmam (1997) consideram que os MCI, e em particular os motores a ciclo Diesel, apresentam a mais alta eficiência dentre as máquinas térmicas para capacidades inferiores a 50MW, passando dos 40% e chegando a aproximadamente 58% se for considerada a recuperação de calor dos gases de exaustão (cogeração).

Outras vantagens relacionadas à geração de eletricidade a partir de MCI incluem a possibilidade de se queimar diferentes combustíveis (i.e óleo Diesel, óleos pesados, óleos vegetais, etc) inclusive em motores já instalados, após pequenas alterações no motor (Lora e Nascimento, 2004). Entretanto, com a mudança de combustível, alterações inevitáveis ocorrerão em alguns dos parâmetros de desempenho, tais como potência, eficiência térmica, consumo, emissões, entre outros.

Adicionalmente, deve-se considerar que a modularidade dos equipamentos de uma Usina Termelétrica (UTE) operando com ciclo diesel possibilita um curto tempo de montagem e um mínimo espaço para construção, além da ótima flexibilização de carga. Uma vez pronta, a usina terá como característica uma rápida entrada em operação (*start-up*) e possibilidade de facilmente entrar ou sair de operação ao longo do dia. A faixa de aplicação de grupos motogeradores é ampla, podendo ir desde poucos kW até centenas de MW, para fins de geração isolada ou interligada, propulsão ou unidades de emergência.

É apresentado, neste capítulo, um modelo de simulação de uma planta termoelétrica com motor diesel operando com Biodiesel.

3.1.

Sistema a ser modelado

Para a simulação, será considerada uma UTE (Usina Termoelétrica) fictícia, supostamente instalada e operando com determinado óleo combustível.

O grupo moto-gerador utilizado para esta análise foi o modelo 18V46 fabricado pela Wärtsilä Corporation. Conforme informado pelo Fabricante (Wärtsilä, 2004) este equipamento possui 18 cilindros dispostos em “V” operando a 514 rpm, e 60 Hz. Fornece uma potência elétrica de 17.076kW, com uma eficiência elétrica de 46,9% (tolerância de 5% e fator de potência 0,8, conforme indicado no manual do moto-gerador).

A configuração escolhida para a análise foi a de uma usina com três moto-geradores, totalizando aproximadamente 51MW. Uma usina com características similares está instalada na Bahia (Torres et al, 2005). Esta escolha foi tomada em função de, apesar de estar longe das principais capitais do sudeste do Brasil, ser a Bahia uma região em franco crescimento industrial, que possui a disponibilidade de outros combustíveis (i.e., proximidade da refinaria Landulpho Alves – Rlam) que podem ser comparados com o Biodiesel na análise e cujo governo local se apresenta como um dos maiores incentivadores para a produção de Biodiesel no Brasil, principalmente a partir de óleo de mamona. Tal incentivo é devido a ações positivas de grupos da região, tais como o movimento PRÓ-Biodiesel Bahia (Portal do Biodiesel, 2006) e da Rede Baiana de Biocombustíveis (Rede Baiana de Biocombustíveis, 2006).

Os combustíveis de base escolhidos foram os chamados Óleos Combustíveis. Estes são hoje largamente utilizados na indústria, principalmente para a geração de vapor em caldeiras ou como combustíveis de moto-geradores. São constituídos de hidrocarbonetos residuais e possuem alto peso molecular e alta viscosidade (Lora e Nascimento, 2004) e, por isto, sua utilização exige geralmente seu pré-aquecimento, a fim de reduzir a viscosidade, favorecendo, desta forma, o bombeamento e pulverização.

A partir de 1986, os óleos combustíveis no Brasil passaram a ser divididos em dois grupos. O grupo “A” contém os óleos combustíveis com teor de enxofre superior a 1% e inferior a 5,5% e o grupo “B”, os com teor de enxofre inferior ou

igual a 1%. Cada um destes grupos foi subdividido em 9 subgrupos, separados pela viscosidade, onde o nº 1 representa a mais baixa viscosidade neles encontrados e o nº 9, a mais alta.

Segundo Lora e Nascimento (2004), dos diversos tipos de óleos combustíveis disponíveis no mercado, o OC1A, OC1B, OC2A e OC2B representam 65% do mercado de óleos combustíveis no Brasil. Por este motivo, serão os utilizados na presente simulação termodinâmica. As características físico-químicas mais relevantes destes combustíveis estão na tabela abaixo:

Tabela 08 – Características de alguns óleos combustíveis.
Fonte: Lora e Nascimento, 2004

Óleo Combustível (tipo)	Viscosidade máxima (SSF @50°C)	Enxofre (% peso)	PCI (kJ/kg)
OCA1	600	2,20	40.488
OCA2	900	2,80	40.023
OCB1	600	0,80	41.221
OCB2	900	0,74	41.142

A troca de combustível em um motor a combustão tem impacto direto no comportamento deste. Os efeitos na eficiência, potência e consumo serão os investigados na presente dissertação.

3.1.1.1.

Efeitos na eficiência e potência em motores ciclo Diesel, ocasionados pela mudança de combustível

Neste ponto torna-se importante investigar quais os efeitos na eficiência e na potência em um motor quando passa a ser alimentado por outro combustível. O balanço de energia, aplicado a um motor a combustão interna, implica que a taxa de fornecimento de energia do combustível será transformada em outras formas, a saber: potência no eixo e taxas de perdas de calor pelo fluido de

arrefecimento, pelos gases de exaustão e por outros meios em geral (radiação, óleo lubrificante, etc.).

Ao se trocar apenas o combustível utilizado e se este, por exemplo, apresentar menor poder calorífico do que o original, espera-se que uma menor taxa de energia química seja fornecida ao motor, se mantido inalterado o sistema de injeção de combustível. Os balanços de massa e energia (primeira lei da termodinâmica) indicam que as potências de saída e as perdas também decresçam. Na realidade, outros fatores entram em jogo.

Taylor (1961) indica que, para o caso de motores que operam em um ciclo Diesel, a mudança do combustível utilizado geralmente não exige mudança na taxa de compressão, caso os números de cetanos forem próximos. Todas as comparações, entre óleo diesel e Biodiesel, são feitas supondo, obviamente, mesmas condições de pressão e temperatura à entrada do motor. Por estas razões, em testes de bancada onde se buscam analisar efeitos ocorridos a partir da mudança de combustível, estas grandezas permanecem constantes, assim como permanecerão nas simulações desta dissertação.

Testes deste tipo geralmente são feitos utilizando o mesmo conjunto moto-bomba para injeção de combustível, o qual, por ser um dispositivo de deslocamento positivo, fornece um volume deslocado constante por ciclo (ou por unidade de tempo) para todos os combustíveis, havendo variações apenas para o caso de diferença de densidade entre os fluidos (Taylor, 1961). Nestes casos, considerando que a taxa de fornecimento volumétrica permanece constante, mas se utilizando de diferentes combustíveis (conseqüentemente diferentes Poderes Caloríficos Inferiores – PCI), fica claro que a potência e o consumo específico serão diferentes para cada caso.

Testes onde se tem como resultado a variação na potência mecânica são úteis para motores, por exemplo, utilizados na indústria automotiva. Por exemplo quando se quer investigar o efeito da substituição de diesel mineral por outro combustível para uma frota de caminhões usados, fica, por razões óbvias, praticamente impossível de se modificar o sistema de bombeamento destes veículos para se modificar o sistema de injeção e com isso manter a potência mecânica constante. Geralmente o que se faz é verificar o quanto a potência vai variar com a mudança do combustível e então se chega a uma conclusão: se é possível conviver com esta mudança ou não, isto é, se afetará significativamente a dirigibilidade.

Para fins estacionários, de motores instalados para geração de eletricidade, a variação na potência mecânica e, conseqüentemente, a variação na potência elétrica produzida nos geradores, não ocorre da mesma maneira. Usinas termoelétricas têm, geralmente, um contrato de venda de energia que fixa a quantidade de energia elétrica que a UTE vai fornecer ao sistema ou pode fornecer quando solicitada. Nestes casos justifica-se a modificação no sistema de bombeio de combustível para se manter a potência dos grupos moto-geradores constante.

Taylor (1961) mostra que o aumento da eficiência, quando no caso de consumo volumétrico constante, está diretamente ligado à diminuição da massa específica do combustível, o que pode ser devido, entre outros fatores, à redução da razão ar-combustível e à melhoria da atomização do combustível na câmara de combustão. Por outro lado, conclui que, no caso onde a faixa de variação de eficiência térmica do motor é pequena para diferentes combustíveis (ver tabela 11), esta variação se dá praticamente pela mudança no poder calorífico do combustível.

Laforgia et al. (1994) realizaram testes em um motor diesel funcionando com diesel e com Biodiesel, a fim de comparar o comportamento do motor no que diz respeito à potência e eficiência global. Embora o autor não tenha apresentado, em seu trabalho, como foi calculado este parâmetro, os resultados podem ser resumidos nas tabelas abaixo:

Tabela 9 – Comparação entre Potências de um motor funcionando com diferentes combustíveis.

Fonte: reproduzido a partir de gráficos produzidos por Laforgia et al.(1994).

	Velocidade angular do motor (rpm)						
	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500
Potência_{Biodiesel} (kW)	28	32	34	36	38	40	41
Potência_{Diesel} (kW)	-	28	32	35	38	41	43
$\frac{\text{Potência}_{\text{Biodiesel}}}{\text{Potência}_{\text{Diesel}}}$	-	1,14	1,06	1,02	1,00	0,97	0,95

Tabela 10 - Comparação entre Eficiências de um motor funcionando com diferentes combustíveis.

Fonte: reproduzido a partir de gráficos produzidos por Laforgia et al. (1994).

	Velocidade angular do motor (rpm)						
	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500
Eficiência_{Biodiesel} (%)	24	27	26	25	24	23	22
Eficiência_{Diesel} (%)	-	24	24	23	24	23	22
$\frac{\text{Eficiência}_{\text{Biodiesel}}}{\text{Eficiência}_{\text{Diesel}}}$	-	1,13	1,08	1,08	1,00	1,00	1,00

Taylor (1961) alerta para o fato de que testes feitos mostram que, se o produto da razão ar-combustível (corrigindo o valor para cada combustível testado) pelo poder calorífico por unidade de massa do combustível permanecer constante, resultará em uma eficiência térmica constante. O que implica que o consumo específico de combustível é inversamente proporcional ao valor do seu poder calorífico, mas que a variação no consumo específico cresce mais lentamente com o aumento do peso específico.

Nos combustíveis estudados na presente dissertação, os combustíveis têm peso específico semelhante e, considerando os resultados de Laforgia et al. (1994), que mostram que a variação de eficiência térmica, quando substituído o óleo diesel pelo Biodiesel, é pequena, será considerado, então, que a variação no consumo dar-se-á exclusivamente pela variação do poder calorífico do combustível.

Uma observação importante sobre o consumo de combustível deve ser feita a respeito dos diferentes consumos a carga total e parcial. Adams (1949) mostra uma dependência linear do aumento do consumo com o aumento da porcentagem da potência mecânica para situação distante da condição de carga máxima, onde ocorre a formação de fumaça (Greene e Lucas, 1969) e uma dependência não mais linear.

3.1.1.1.1.

Consumo específico e eficiência global

Para os grupos moto-geradores, é importante conhecer o consumo específico de combustível em relação aos kWh gerados.

A determinação do consumo de combustível em um motor é fundamental para que se conheça a eficiência com que transforma a energia química do combustível em trabalho útil. De posse dos valores de consumo de combustível e potência, pode-se calcular o consumo específico de combustível, grandeza também conhecida como *Brake Specific Fuel Consumption* (B.S.F.C.), pela equação abaixo:

$$B.S.F.C. = \frac{\rho \times \dot{V}}{\dot{W}} \quad (1)$$

onde ρ , \dot{V} e \dot{W} são respectivamente: a massa específica do combustível, o volume consumido e a potência elétrica gerada.

Testes realizados por Laforgia et al (2004) comparam a diferença de consumo específico em um motor diesel para diversos combustíveis. Os testes foram realizados em um motor de quatro cilindros de aproximadamente 43kW (@4200 rpm) que operou com óleo diesel e depois com Biodiesel. Os testes mostraram uma diminuição de aproximadamente 5% na potência (ver tabela 10), quando o motor operou com Biodiesel, em altas rotações. O autor atribuiu a queda ao menor poder calorífico e à maior densidade do Biodiesel em relação ao combustível convencional.

Foi observado, em todas as rotações utilizadas nos testes, um aumento do consumo específico, conforme tabela abaixo:

Tabela 11 - Comparação entre B.F.S.C. de um motor funcionando com diferentes combustíveis.

Fonte: reproduzido a partir de gráficos elaborados por Laforgia et al. (1994).

	Velocidade angular do motor (rpm)						
	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500
B.F.S.C_{Biodiesel} (g/kWh)	375	330	345	360	365	375	415
B.F.S.C_{Diesel} (g/kWh)	-	325	330	335	325	330	350
r_c⁽¹⁾	-	1,02	1,05	1,07	1,12	1,13	1,18

Nota (1): r_c é definida como sendo a razão do consumo específico do combustível analisado pelo consumo específico do combustível de referência, ou seja:

$$r_c = \frac{\text{B.F.S.C}_{\text{comb. analisado}}}{\text{B.F.S.C}_{\text{comb. de ref.}}} \quad (2)$$

Estes resultados serão utilizados para comparação de resultados dos modelos desta dissertação.

3.2. Modelo Matemático

O modelo matemático desenvolvido nesta dissertação foi desenvolvido a partir do modelo físico simplificado apresentado na figura 17:

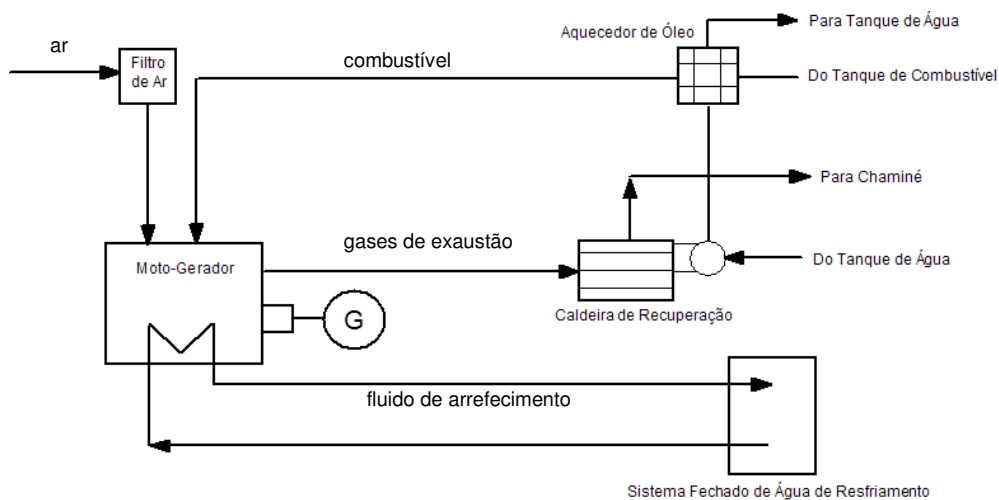


Figura 17: Modelo do grupo moto-gerador.

O modelo proposto na figura 17 possui 6 equipamentos ou sistemas principais, a saber:

- Motor Diesel
- Gerador Elétrico
- Filtro de Ar
- Sistema Fechado de Água de Resfriamento – fornece água à temperatura ambiente ao radiador do motor, resfriando os fluidos de arrefecimento e lubrificação.
- Caldeira de Recuperação de Calor – dispositivo que gera vapor que será utilizado para pré-aquecimento do óleo combustível. A fonte quente deste equipamento é o gás de exaustão do motor.
- Aquecedor de Óleo – trocador de calor que recebe vapor da caldeira e pré-aquece o combustível que será utilizado no motor.

3.2.1.

Balanco de energia do motor

Analisando o motor como o volume de controle, é sabido que a taxa de fornecimento de energia do combustível é convertida em potência mecânica de eixo. Igualmente, a parte restante daquela é perdida ao meio ambiente, seja pelo fluido de arrefecimento, pelos gases de exaustão ou por outras perdas de calor por radiação, lubrificação e etc. Portanto, o balanço de energia é dado por:

$$\dot{E}_{cb,e,m} = \dot{E}_{ei,s,m} + \dot{E}_{fa,s,m} + \dot{E}_{ex,s,m} + \dot{E}_{perdas,s,m} \quad (3)$$

onde os termos representam, em ordem de apresentação: taxa de fornecimento de energia pelo combustível, potência mecânica no eixo, taxa de calor retirada pelo fluido de arrefecimento, taxa de calor perdida pelos gases de exaustão e taxa de calor perdida por outros meios (radiação e lubrificação, entre outros).

3.2.1.1.**Taxa de fornecimento de energia pelo combustível ($\dot{E}_{cb,e,m}$)**

A taxa de energia do combustível é dada pelo produto da vazão mássica do combustível, em kg/s, pelo valor do poder calorífico inferior do combustível (LHV), em kJ/kg, conforme a equação (4), abaixo:

$$\dot{E}_{cb,e,m} = \dot{m}_{cb,e,m} PCI_{cb,e,m} \quad (4)$$

3.2.1.2.**Potência mecânica no eixo ($\dot{E}_{ei,s,m}$)**

A potência mecânica no eixo pode ser calculada da seguinte forma:

$$\dot{E}_{ei,s,m} = \alpha_{mec,s,m} \dot{E}_{cb,e,m} \quad (5)$$

onde $\dot{E}_{ei,s,m}$ é a demanda fixa de potência, em kW, do motor estudado. A grandeza $\alpha_{mec,s,m}$ é a razão entre a quantidade de energia que entra por unidade de tempo no motor com o combustível e a potência mecânica no eixo do motor. É conhecida como eficiência térmica do motor.

3.2.1.3.**Taxa de calor retirado pelo fluido de arrefecimento ($\dot{E}_{fa,s,m}$)**

A taxa de calor retirado pelo fluido de arrefecimento é dada por:

$$\dot{E}_{fa,s,m} = \alpha_{fa,s,m} \dot{E}_{cb,e,m} \quad (6)$$

Assim como no item anterior, a grandeza $\alpha_{fa,s,m}$ representa o quanto da energia entregue pelo combustível ao volume de controle do motor, é retirada pelo fluido de arrefecimento.

Por outro lado, esta taxa de transferência de calor para o fluido de arrefecimento pode ser calculada pela equação abaixo:

$$\dot{E}_{fa,s,m} = \dot{m}_{fa,e,m} c_{pfa,e,m} (T_{fa,s,m} - T_{fa,e,m}) \quad (7)$$

onde $\dot{E}_{fa,s,m}$, $\dot{m}_{fa,e,m}$, $c_{pfa,e,m}$ são, respectivamente, a taxa de calor retirado pelo fluido de arrefecimento, a vazão do fluido de arrefecimento e o calor específico do mesmo. As temperaturas de saída e entrada do motor do fluido de arrefecimento são dadas por $T_{fa,s,m}$ e $T_{fa,e,m}$, respectivamente.

3.2.1.4.

Cálculo da taxa de calor perdido pelos gases de exaustão ($\dot{E}_{ex,s,m}$)

Analogamente, a taxa de calor perdido pelos gases de exaustão pode ser calculada por:

$$\dot{E}_{ex,s,m} = \alpha_{ex,s,m} \dot{E}_{cb,e,m} \quad (8)$$

onde $\alpha_{ex,s,m}$ é a razão da energia total que entra no motor que é transformada em energia térmica perdida pelos gases de exaustão. Esta fração, aliada à temperatura aponta para a utilização dos gases de exaustão como fonte quente em uma caldeira de recuperação de calor.

A taxa de energia perdida pelos gases de exaustão pode ser calculada pela expressão abaixo (Greene e Lucas, 1969):

$$\dot{E}_{ex,s,m} = (\dot{m}_{ar,e,m} + \dot{m}_{cb,e,m}) c_{pex,s,m} (T_{ex,s,m}) - \dot{m}_{ar,e,m} c_{par,e,m} (T_{ar,e,m}) - \dot{m}_{cb,e,m} c_{pcb,e,m} (T_{cb,e,m}) \quad (9)$$

Os mesmos autores (Greene & Lucas, 1969) sugerem também a expressão abaixo para o cálculo do calor específico dos gases de exaustão, como em função apenas da temperatura destes:

$$c_{pex,s,m} = 0,988 + 2,3 \cdot 10^{-4} (T_{ex,s,m}) + 5,0 \cdot 10^{-8} (T_{ex,s,m})^2 \quad [\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}] \quad (10)$$

onde $T_{ex,s,m}$ é dado em $^\circ\text{C}$.

3.2.1.5.

Taxa de calor perdida no motor por radiação e outras formas ($\dot{E}_{perdas,s,m}$)

A taxa de calor perdida por radiação e outras formas é dada por:

$$\dot{E}_{perdas,s,m} = \alpha_{perdas,s,m} \dot{E}_{cb,e,m} \quad (11)$$

onde $\alpha_{\text{perdas,s,m}}$ é a razão entre a taxa de perdas de calor por radiação, pelo lubrificante e de outras formas e a taxa de fornecimento de energia pelo combustível.

Com isso, tem-se que:

$$\sum \alpha_i = 1 \quad (12)$$

i.e.

$$\alpha_{\text{mec,s,m}} + \alpha_{\text{ex,s,m}} + \alpha_{\text{fa,s,m}} + \alpha_{\text{perdas,s,m}} = 1$$

3.2.1.6.

Balanco de energia da caldeira de recuperação de calor

Aplica-se a primeira lei da termodinâmica para o volume de controle da caldeira de recuperação de calor (ver figura 17) sob as seguintes hipóteses e constatações:

- Regime Permanente
- Variação de energia cinética desprezível
- Variação de energia potencial desprezível
- Trabalho nulo
- Trocador de calor adiabático

Parte do calor levado para dentro da caldeira pelos gases de exaustão, será absorvido pelo fluido a ser vaporizado. Parte desta energia será perdida para o ambiente. O vapor gerado na caldeira será utilizado para aquecimento do combustível que entra no motor.

Assim, o balanço de energia da caldeira pode ser escrito por:

$$\dot{E}_{\text{ex,s,m}} c_{p_{\text{ex,s,m}}} (T_{\text{ex,e,c}} - T_{\text{ex,s,c}}) = \dot{m}_{\text{ag,e,c}} (h_{\text{ag,s,c}} - h_{\text{ag,e,c}}) + \dot{Q}_c \quad (13)$$

E o balanço de massa por:

$$\dot{m}_{\text{ex,s,m}} = \dot{m}_{\text{ar,e,m}} + \dot{m}_{\text{cb,e,m}} \quad (14)$$

onde a vazão mássica dos gases de exaustão ($\dot{m}_{\text{ex,s,m}}$) é a soma da vazão mássica do combustível ($\dot{m}_{\text{cb,e,m}}$) e do ar ($\dot{m}_{\text{ar,e,m}}$) que entram no motor.

3.2.1.7.

Balço de energia no aquecedor de combustível

Assim como foi feito para a caldeira, para o caso do aquecedor de óleo (ver figura 17) pode-se aplicar a primeira lei da termodinâmica para o volume de controle com as mesmas hipóteses (regime permanente, variações desprezíveis de energia cinética e potencial, trabalho nulo e trocador adiabático). Da energia carregada para dentro do aquecedor de óleo, parte será absorvida pelo combustível e parte será perdida para o ambiente.

O balanço de energia resulta em:

$$\dot{m}_{ag,e,a} (h_{ag,e,a} - h_{ag,s,a}) = \dot{m}_{cb,e,a} c_{p_{cb,e,m}} (T_{cb,s,a} - T_{cb,e,a}) + \dot{Q}_a \quad (15)$$

O balanço de massa é dado por:

$$\dot{m}_{ag,e,a} = \dot{m}_{ag,e,c} \quad (16)$$

$$\dot{m}_{cb,e,a} = \dot{m}_{cb,e,m} \quad (17)$$

3.2.2. Valores constantes atribuídos

a) Taxa de Energia perdida pelos gases de exaustão

A vazão, assim como a temperatura de exaustão, foram estimadas pelo fabricante do motor analisado, como segue:

$$\dot{m}_{ar,e,m} = 30 \text{ [kg/s]}$$

Supõe-se que a eficiência volumétrica não mudará com o combustível e, conseqüentemente também a razão de ar.

Não foi encontrado na literatura, resultados de testes de motor operando com óleo combustível e também com Biodiesel, no que diz respeito a temperatura dos gases de exaustão. Poderiam acontecer três casos: aumento, diminuição ou manutenção da temperatura dos gases de exaustão, este último pouco provável.

A estimativa da temperatura dos gases de exaustão para cada caso está no Apêndice III do presente trabalho. Os valores encontrados foram os reproduzidos na tabela 12.

Tabela 12 - Temperatura estimada dos gases de exaustão para diferentes combustíveis

Combustível	Temperatura estimada dos gases de exaustão (°C)
OCA1	317,0
OCA2	324,9
OCB1	304,9
OCB2	306,2
Biodiesel de Canola, Rota metílica	375,4
Biodiesel de Soja, Rota metílica	373,9
Biodiesel de Girassol, Rota metílica	352,7
Biodiesel de Dendê, Rota etílica	341,7
Biodiesel de Mamona, Rota etílica	332,2

Na impossibilidade de se encontrar o calor específico do Biodiesel, $c_{p_{cb,e,m}}$, na literatura, foi atribuído o valor médio de 2,075 [kJ/kg.°C], considerando que para diversos tipos de óleo combustível, tais como óleo leve, médio e pesado, este valor varia de 1,95 e 2,20 [kJ/kg.°C]. Logo:

$$c_{p_{cb,e,m}} = \frac{1,95 + 2,20}{2} = 2,075 \text{ [kJ/kg.}^\circ\text{C]}$$

Para o ar, foi fixado o valor de 1,00 [kJ/kg.°C]:

$$c_{p_{ar,e,m}} = 1,00 \text{ [kJ/kg.}^\circ\text{C]}$$

A temperatura de entrada do combustível no motor é especificada pelo fabricante:

$$T_{cb,e,m} = 90 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

b) Balanço de energia na caldeira de recuperação de calor

A temperatura de saída da caldeira foi estimada e fixada em torno de 200°C, para evitar condensação de ácidos que provocam corrosão nos elementos do sistema de exaustão. É necessário, então, que esta temperatura seja maior que a temperatura do ponto de orvalho dos elementos que possam se combinar com vapor d'água (por exemplo enxofre), formando ácidos. Por hipótese, o escoamento dos gases que saem da motor e entram na caldeira de recuperação de calor, é isotérmico, logo:

$$\begin{aligned} T_{\text{ex,s,c}} &= 200 \text{ [}^\circ\text{C]} \\ T_{\text{ex,e,c}} &= T_{\text{ex,s,m}} \end{aligned} \quad (18)$$

As perdas na caldeira de recuperação de calor foram, por hipótese, limitadas a uma eficiência mínima de 80%.

c) Balanço de energia no aquecedor de óleo

Por hipótese foi admitida, para o combustível, uma temperatura de entrada no motor igual a 50°C:

$$T_{\text{cb,e,a}} = 50 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

O escoamento de combustível pode ser considerado isotérmico desde a saída deste do aquecedor até a entrada no motor.

$$T_{\text{cb,s,a}} = T_{\text{cb,e,m}} \quad (19)$$

As perdas no aquecedor de óleo foram, por hipótese, limitadas a uma eficiência mínima de 80%.

O processo no aquecedor de óleo pelo lado da água é considerado isobárico. Então:

$$P_{\text{ag,s,a}} = P_{\text{ag,e,a}} = 7 \text{ [bar]}$$

3.2.3. Equações de Propriedade

As equações de propriedade dos fluidos foram calculadas em função de propriedades termodinâmicas, conforme abaixo:

$$C_{p_{\text{fa,e,m}}} = C_p (T_{\text{fa,e,m}}, P_{\text{fa,e,m}}) \quad [\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}] \quad (20)$$

$$h_{ag,e,c} = h(\text{fluido}, T_{ag,e,c}, P_{ag,e,c}) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (21)$$

$$h_{ag,s,c} = h_{ag,e,a} = h(\text{fluido}, T_{ag,s,c}, P_{ag,s,c}) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (22)$$

$$h_{ag,s,a} = h(\text{fluido}, T_{ag,s,a}, P_{ag,s,a}) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (23)$$

$$T_{ag,s,a} = T_{\text{sat}}(\text{fluido}, P_{ag,s,a}) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (24)$$

No presente trabalho foram utilizadas as funções da biblioteca do programa Engineering Equation Solver.

3.3. Solução – EES

Para se resolver o sistema de equações que compõe o modelo matemático foi utilizado o programa Engineering Equation Solver (EES V7.258-3D), programa desenvolvido por professores da Universidade de Wisconsin, EUA. Além das equações dos balanços de massa e energia, das equações de propriedades, das hipóteses, e das equações relativas aos dados de entrada, é necessário atribuir a condição de contorno do problema. Os dados de entrada são, então:

3.3.1.

Variáveis conhecidas – Dados de entrada

a) Taxa de Energia retirada pelo Fluido de Arrefecimento

No balanço de massa e energia do radiador do moto-gerador, define-se geralmente as temperaturas de entrada e saída do fluido de arrefecimento, assim como a vazão do mesmo. Para o modelo, foram estimadas as seguintes grandezas:

$$P_{fa,e,m} = 4 \quad [\text{bar}]$$

$$T_{fa,s,m} = 91 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$T_{fa,e,m} = 75 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$\dot{m}_{fa,s,m} = 52,78 \quad [\text{kg/s}]$$

b) Para o sistema de referência será utilizado o óleo combustível OCA1 cujo valor do poder calorífico inferior é dado por (Lora, 2005):

$$PCI_{cb,e,m}=40.488 \text{ [kJ/kg]}$$

c) A potência demandada do grupo moto-gerador é:

$$\dot{E}_{ei,s,m} = 17.076 \text{ [kW]}$$

d) As grandezas relacionadas à água que é fornecida à caldeira de recuperação de calor são:

$$\dot{m}_{ag,e,c} = 0,917 \text{ [kg/s]}$$

$$T_{ag,e,c} = 115 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$T_{ag,s,c} = T_{sat} (@ P_{sat}) \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$P_{ag,e,c} = P_{ag,s,c} = 7 \text{ [bar]}$$

3.3.2. Equações do sistema

O sistema de equações algébricas, a ser resolvido pelo código computacional, é composto pelas 14 seguintes equações: (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9), (10), (11), (13), (14), (15), (16), (17).

3.4. Atrito em motores Diesel

A partir da linha de Willan (Greene e Lucas, 1969) é possível determinar, no ponto de torque nulo qual é o consumo de combustível necessário para se vencer o atrito em motores que operam segundo o ciclo diesel. Extrapolando a mesma linha para o ponto de consumo de combustível nulo, é possível, também, determinar o torque necessário para se vencer estes atritos. Esta informação permite determinar a potência de atrito do motor para dada velocidade angular.

Pereira (2006) testou quatro diferentes motores (MWM 4.07 TCA, MWM 4.10 TCA, MWM 229-6 e MWM TD229-EC6), convertidos para operar no modo Diesel/gás natural e três moto-geradores (Perkins 1006TAG, Cummins NTA855G3 e Perkins 4012TAG2), com o objetivo, entre outros, de determinar o torque e a potência de atrito.

Pereira (2006) cita que o torque de atrito é um dos parâmetros necessários à estimativa de desempenho de motores e que o resultado de sua pesquisa permite estimar o atrito em motores diferentes daqueles por ele testado.

Os torques de atrito para o presente estudo foram estimados pelas curvas levantadas por Pereira (2006) para cada motor para diferentes velocidades angulares. No caso dos grupos moto-geradores, regulados para operar a 1800 rpm (condição para geração de eletricidade em 60hz em alternadores de 4 pólos) o autor chama a atenção para o fato de, por possuírem potências muito distintas (o maior tem aproximadamente 1MW e o menor aproximadamente 100 kW), obviamente para as potências de atrito foram, também, encontrados valores distintos, conforme números abaixo:

- P_{potência de atrito} (Perkins 1006TAG) = 26 kW
- P_{potência de atrito} (Cummins NTA855G3) = 58 kW
- P_{potência de atrito} (Perkins 4012TAG2) = 167 kW

Dividindo estes resultados pela cilindrada dos correspondentes equipamentos, chegou ao interessante resultado de $4,0 \pm 0,34$ kW/litro (Pereira, 2006).

A partir desta constatação e considerando a cilindrada do grupo moto-gerador em estudo como sendo se 1.735 litros, chega-se à conclusão que a potência de atrito pode ser estimada em :

$$P_{\text{potência de atrito}} (\text{Wärtsilä 18V46}) = 6.940 \text{ kW} \pm 589,9 \text{ kW}$$

Por outro lado, Pereira (2006) apresentou uma correlação que ajusta os pontos experimentais dos torques de atrito obtidos em bancada e a cilindrada dos correspondentes motores. Tal relação, com erro médio de 6,9% e máximo de 26,9%, é apresentada abaixo. Nela, a velocidade angular (ω) é dada em rpm:

$$\frac{T_A}{V} = 14,41 - 6,845 \cdot 10^{-3} \omega + 3,645 \cdot 10^{-6} \omega^2 \quad (25)$$

Sabendo-se que a rotação deste grupo moto-gerador é igual a 514 rpm, pode-se calcular a potência de atrito pela equação (26):

$$P_A = \forall \left(\frac{T_A}{\forall} \right) \omega \quad (26)$$

Pela correlação de Pereira (2006) a potência de atrito prevista é igual a 6.093 kW^[7]. O autor cita que os torques de atrito e, conseqüentemente, as potências de atrito são consideravelmente maiores nos grupos moto-geradores, quando comparado com os motores testados em bancada, uma vez que no caso dos moto-geradores há ocorrência de torque de atrito nos geradores, alternadores e outros acessórios. Além do mais, o autor cita que, quanto maior for o grupo moto-gerador, menor é seu torque de atrito por unidade de cilindrada, o que deve ser significativo ao se comparar os grupos testados e o calculado nesta dissertação.

3.5. Número de Cetano

Outro parâmetro estudado no presente trabalho é o número de cetano do Biodiesel. O número de cetano está intimamente ligado à qualidade da ignição e, conseqüentemente, ao tempo de ignição. O tempo de ignição, ou atraso de ignição (*ignition delay*), é definido por Heywood (1989) como sendo o intervalo entre o início da injeção do combustível e o início da combustão. Uma vez que as características de ignição do combustível, qualificado pelo número de cetano, afetam diretamente o tempo de ignição, determiná-las torna-se importante a fim de se poder quantificar a eficiência térmica, emissão de fumaça, falha na combustão, emissão sonora, facilidade de partida, auto-ignição, entre outros fatores (Heywood, 1989).

O autor cita que, para combustíveis de baixo número de cetano, com alto atraso na ignição, todo o combustível é injetado antes de se iniciar a combustão, o que propicia elevada taxa de queima, favorecendo a auto-ignição e, conseqüentemente, ocorrência de ruído no motor, conhecido como “batida” (*diesel knock*). Em casos extremos, a ignição ocorre durante o processo de expansão, resultando em combustão incompleta com conseqüente redução de potência.

[7] A correlação empírica é válida para a faixa de potência de 0,1 MW até 1,0 MW. No presente trabalho, a correlação foi extrapolada para a potência do grupo moto-gerador 18V46 da Wärsilä, aproximadamente 17 MW.

Para altos números de cetano, a combustão inicia antes de acontecer uma boa mistura ar/combustível, resultando em combustão incompleta e conseqüente emissão de fumaça.

Levando-se em conta o Biodiesel com maior número de cetano entre os apresentados na tabela 13 (Biodiesel de óleo de canola, rota etílica) e considerando o óleo diesel com número de cetano igual a 40 (ASTM, 2005), a utilização deste Biodiesel levaria a um incremento de aproximadamente 43% em emissão de fumaça quando comparado com a emissão proveniente da queima de óleo diesel. Reporta-se entretanto uma diminuição de emissão de fumaça, como pode ser visto na figura 10 deste trabalho. Patterson (1974) cita que existem outros fatores, como a volatilidade do combustível, que também afetam o nível de emissões de fumaça.

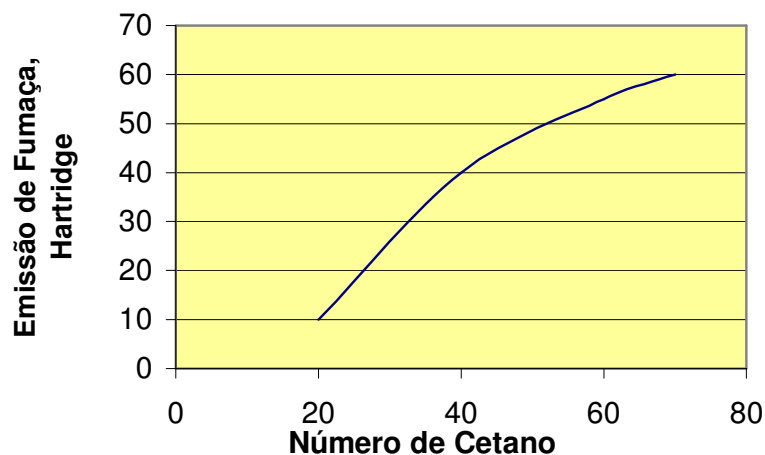


Figura 18: Efeito do número de cetano na emissão de fumaça em motor Diesel.
Fonte: Reproduzido a partir de dados de Patterson, 1974

Heywood (1989) sugere que combustíveis a serem utilizados em motores diesel, tenham número de cetano dentro da faixa de 40 a 55. As normas ASTM D6751 (ASTM, 2002), EN 14214 (DIN, 2003) e ANP 42 (ANP, 2004) exigem respectivamente número de cetano para o Biodiesel de 47, 51 e 45, enquanto que a norma ASTM D975 exige um mínimo de 40 para o óleo diesel.

A tabela 13 apresenta o número de cetano para diferentes tipos de Biodiesel (Knothe, 2005).

Tabela 13 - Apresentação do número de cetano para diferentes tipos de Biodiesel.

Fonte: Knothe, 2005.

Biodiesel (matéria prima/rota)	Número de Cetano
Óleo de soja / rota metílica	49,6
Óleo de girassol / rota metílica	54 – 58
Óleo de dendê / rota etílica	56,2
Óleo de canola / rota metílica	47,9 – 56
Óleo de canola / rota etílica	67,4

Knothe (2005) cita que, para óleo diesel, existe uma relação direta do aumento do número de cetano e redução das emissões de NO_x . Pela condição do Biodiesel ter maior número de cetano, quando comparados com o óleo diesel, eles foram inicialmente considerados como aditivo para se elevar o número de cetano do óleo diesel. Por outras razões, já apresentadas nos capítulos anteriores, verificou-se um aumento de emissão de NO_x quando da utilização de Biodiesel em mistura. Conclui-se, então, que a relação entre o número de cetano e emissões de NO_x é afetada por outros fatores como tecnologia do motor e composição química do combustível.

4

Resultados

4.1.

Casos estudados

Os casos estudados para o grupo moto-gerador em questão foram realizados levando em consideração os 4 OC's descritos e 5 tipos de Biodiesel: de mamona e dendê produzidos por rota etílica e de soja, e girassol e colza (canola) por rota metílica.

Como, por hipótese, a usina simulada se encontra em operação, alguns dados não podem ser alterados, como por exemplo, a potência total da UTE, que é disponibilizada ao sistema nacional. Adicionalmente, o modelo será consolidado para um dos combustíveis. E com isto alguns dados deste modelo serão usados como condição de contorno para as simulações seguintes com o objetivo de se fixar algumas variáveis e deixar outras livres para serem comparadas.

4.2.

Resultados

Para a simulação descrita neste trabalho, foi utilizado o OCA1 como combustível. Com isto o resultado do balanço é apresentado abaixo:

$$\dot{E}_{cb,e,m} = 3.6071,00 \text{ [kW]}$$

$$\alpha_{ex,s,m} = 27,28\% \Rightarrow \dot{E}_{ex,s,m} = 9.841,00 \text{ [kW]}$$

$$\alpha_{fa,s,m} = 9,81\% \Rightarrow \dot{E}_{fa,s,m} = 3.538,00 \text{ [kW]}$$

$$\alpha_{mec,s,m} = 47,34\% \Rightarrow \dot{E}_{ei,s,m} = 17.076,00 \text{ [kW]}$$

$$\alpha_{perdas,s,m} = 15,57\% \Rightarrow \dot{E}_{perdas,s,m} = 5.617,00 \text{ [kW]}$$

$$\dot{m}_{cb,e,a} = \dot{m}_{cb,e,m} = 0,8909 \text{ [kg/s]}$$

$$\dot{m}_{ex,s,m} = 30,89 \text{ [kg/s]}$$

$$T_{ag,s,a} = 164 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

$$T_{ag,s,c} = 166 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

4.3.

Compilação dos resultados

Como pode ser verificado pelos resultados acima, da quantidade de energia que entra no motor carregada pelo combustível, 47,34% são aproveitados como trabalho de eixo; valor muito próximo ao informado pelo fabricante (46,9%) (Wärtsilä, 2004). As outras parcelas, referentes a perdas pela exaustão, pelo fluido de arrefecimento e outras perdas, parecem traduzir a realidade (Lora e Nascimento, 2004). Os valores encontrados foram respectivamente, 27,28%; 9,81% e 15,57%.

Pela impossibilidade de se calcular o consumo para diferentes solicitações com o modelo utilizado, neste trabalho será considerada apenas carga total nos moto-geradores.

O consumo de combustível OCA1 foi calculado em 0,8909 [kg/s]. Esta será a grandeza principal de comparação, conforme tabela abaixo:

Tabela 14 - Comparação entre os consumos de combustível

Combustível	PCI (kJ/kg)	Consumo (kg/s)	$r_c^{(1)}$
OCA1	40.488	0.8909	1,00
OCA2	40.023	0.9013	1,01
OCB1	41.221	0.8751	0,98
OCB2	41.142	0.8767	0,98
Biodiesel de Canola, Rota metélica	37.300	0.9210	1,03
Biodiesel de Soja, Rota metélica	37.372	0.9192	1,03
Biodiesel de Girassol, Rota metélica	38.472	0.8929	1,00
Biodiesel de Dendê, Rota etélica	39.070	0.8793	0,99
Biodiesel de Mamona, Rota etélica	39.600	0.8673	0,97

Nota (1): O combustível de referência é o OCA1

Os resultados desta tabela mostram que a razão entre o consumo específico do Biodiesel sobre o consumo específico do OCA1, situa-se em uma faixa de 0,97 até 1,03. Valores muito próximos dos obtidos por Laforgia e Ardito (1994) quando comparando o Biodiesel com o Diesel, a baixas rotações. O fato de, no modelo, ter-se obtido valores inferiores à unidade, apesar do menor poder calorífico do Biodiesel, deve-se a diferentes eficiências térmicas encontradas em testes de motores operando com diferentes combustíveis (Laforgia e Ardito, 1994).

Com os dados de consumo, pode-se prever quais os consumos diários, mensais e anuais para se comparar valores e ainda verificar a necessidade de ampliação do parque de estocagem ou não da UTE. Para esta próxima análise foram consideradas uma taxa média de indisponibilidade forçada de 15% e uma taxa média de indisponibilidade programada de 11%, como sugerido pelo ONS (2005). A taxa de indisponibilidade é uma boa medida para identificar o nível de desempenho de uma UTE que esteja operando, pois para seu cálculo, considera-se a relação entre o total de horas paradas da UTE para receber manutenção e o total de horas em serviço.

Multiplicando-se a vazão de combustível, pela quantidade de horas que operaria por dia, pode-se calcular consumo diário por grupo moto-gerador. O resultado pode ser representado pelo gráfico da figura 19.

Os cálculos do consumo mensal (C_m), considerando um mês de 30 dias, e do consumo anual (C_a), considerando o ano com 365 dias, pode ser feito a partir das equações abaixo:

$$C_m = C_d \cdot 30 \text{ [kg/mês]} \quad (1)$$

$$C_a = C_d \cdot 365 \text{ [kg/ano]} \quad (2)$$

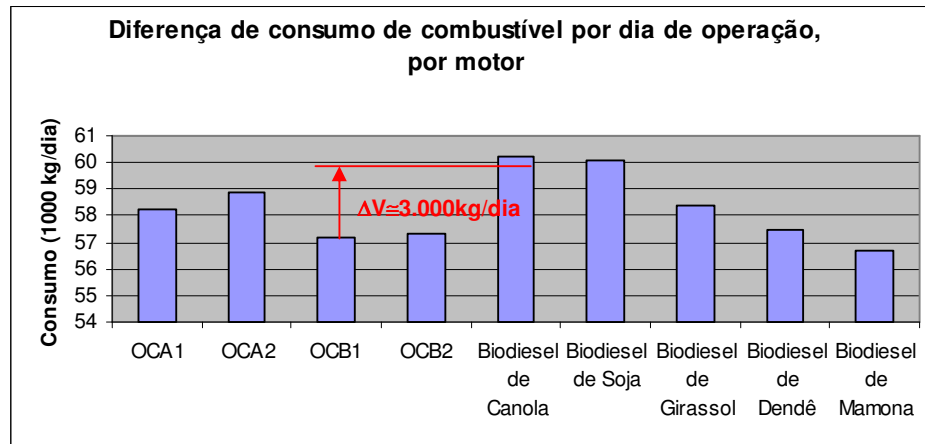


Figura 19: Diferença de consumo de combustível por dia de operação considerando apenas Um grupo moto-gerador operando.

Este gráfico representa a diferença de consumo de diferentes combustíveis por dia de operação para um único motor. O gráfico representa indiretamente os investimentos iniciais de uma planta nova ou a necessidade de expansão de uma já existente. A estocagem de combustível típica de uma UTE deste tipo é para dois dias de operação contínua, ou seja, para o caso de uma usina projetada para operar com OCB2 ou OCB1 a tancagem seria insuficiente para atender Biodiesel de canola ou de soja. A diferença, no entanto, para se atender estes dois dias de operação, algo em torno de um volume de 6.000kg por grupo moto-gerador, além dos gastos para manutenção do mesmo e manutenção térmica do combustível, pode ser contornada e este não deve ser motivo para a inibição de um investimento desta natureza.

Um aspecto que parece ser mais preocupante, quando comparado ao aspecto de estocagem, é quanto aos custos referentes ao consumo mensal e anual, pois, obviamente, a diferença absoluta tende a aumentar.

Semelhantemente ao que foi feito para o cálculo do consumo diário, os consumos mensal e anual podem ser calculados. Os resultados podem ser vistos a seguir, nas figuras 20 e 21.

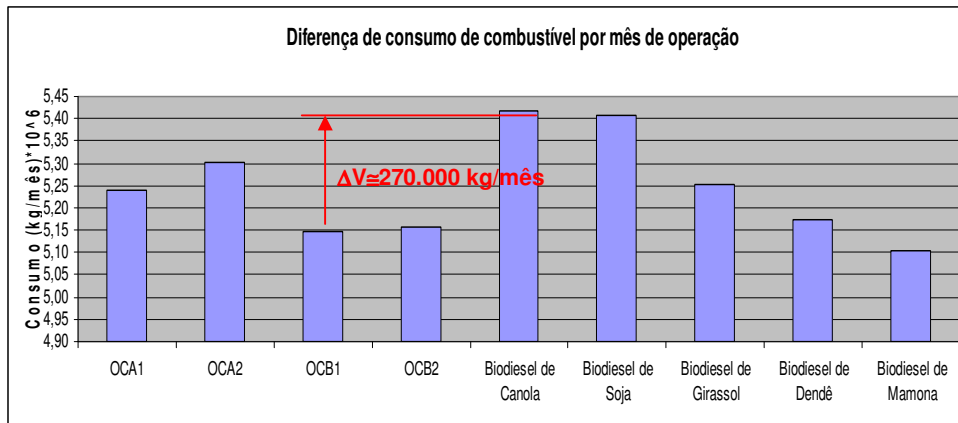


Figura 20: Diferença de consumo de combustível por mês de operação.

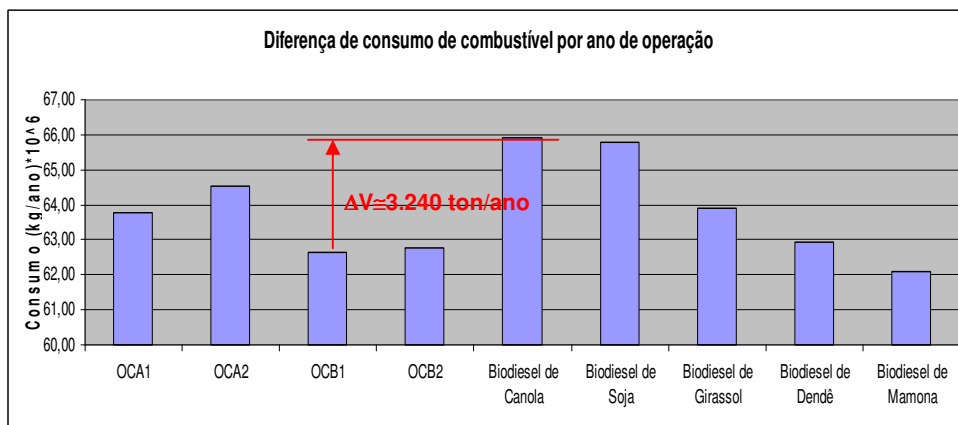


Figura 21: Diferença de consumo de combustível por ano de operação.

Os resultados consideram que a UTE teria 3 grupos moto-geradores operando. Com isto a diferença mensal cresce para, aproximadamente, 270 toneladas e, anualmente, para aproximadamente 3.240 toneladas, quando se compara o Biodiesel de óleo de canola ou de soja com o óleo combustível de referência. Entretanto, vale lembrar que o programa do Biodiesel no Brasil não está fundamentado para utilização de B100, principalmente em máquinas deste porte; talvez tal medida seja possível, em equipamentos menores e apenas em comunidades isoladas. Adicionalmente, vale destacar que, em curto prazo, não se teria uma região no Brasil capaz de atender à demanda requerida por esta UTE.

Considerando apenas os custos de aquisição de Biodiesel, tendo como referência o 3^o Leilão de Compra de Biodiesel (ANP, 2006), onde o preço médio

atingiu o valor de R\$ 1.753,79/m³ de Biodiesel e considerando o preço do óleo combustível de R\$ 0,792/kg (Torres, 2005), pode-se fazer uma estimativa dos custos mensais de aquisição para ambos os combustíveis, conforme a figura 22.

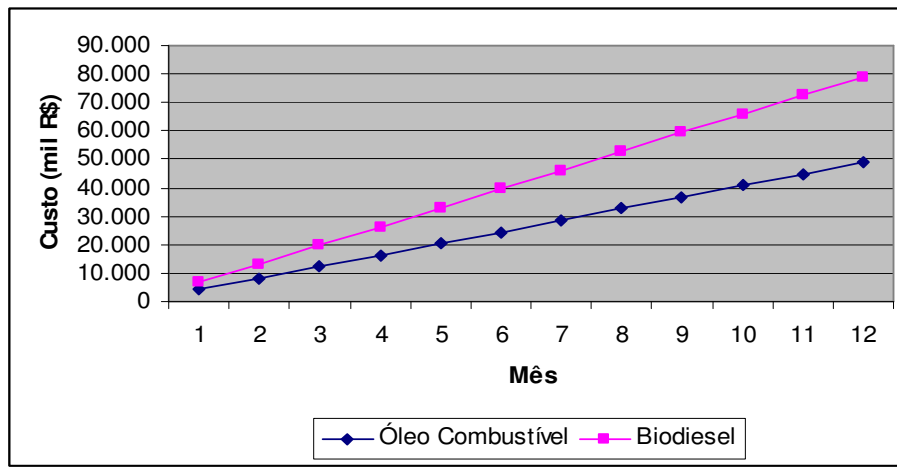


Figura 22: Diferença de custo de aquisição combustível por mês de operação.

Para elaboração deste gráfico foi considerado o peso específico do Biodiesel igual a 875 kg/m³, por ser o valor médio entre os limites inferior e superior especificado pela Norma EN 14214 (DIN, 2003). Foi também considerada, a equação para a determinação do custo, abaixo:

$$C_{mensal} = \dot{m}_{mensal} C_{unitário} \left[\frac{R\$}{mês} \right] \quad (3)$$

onde $\dot{m}_{mensal} \left[\frac{kg}{mês} \right]$ é a quantidade de combustível consumida em um mês de

operação e $C_{unitário} \left[\frac{R\$}{kg} \right]$ é o preço do combustível analisado.

Pôde-se, então, verificar que, em um mês de operação, os custos de aquisição de Biodiesel (R\$ 6.587,49 mil) e de óleo combustível (R\$ 4.077,07 mil) uma diferença de R\$ 2.510,43 mil, que representam uma desvantagem para a utilização de Biodiesel. Uma vez extrapolada esta diferença para um ano de operação, a diferença representa uma expressiva desvantagem competitiva para este combustível, uma vez que, em doze meses, a diferença de custo de aquisição de sobe para aproximadamente R\$ 30 milhões, como pode ser verificado pela figura 22.

5

Conclusões

É fato que o Biodiesel já é uma realidade no Brasil. A implementação do programa de Biodiesel no país, contribuirá para a redução das importações de óleo diesel, uma vez que, a partir de 2008, todo óleo diesel deverá ser comercializado com 2% de Biodiesel misturado (ANP,2005), totalizando um volume de aproximadamente 800.000 toneladas por ano.

A criação do “Selo Combustível Social” certamente promoverá a inclusão social dos pequenos agricultores, seja pela geração de emprego e renda como pela utilização de Biodiesel como combustível para geração de energia elétrica em comunidades isoladas.

Outros aspectos positivos do programa afetam a esfera ambiental. É comentado que a utilização do Biodiesel promoverá uma significativa diminuição de emissões de poluentes como monóxido de carbono, material particulado, enxofre e hidrocarbonetos, embora haja ligeiro aumento na emissão de óxido de nitrogênio.

O melhor aproveitamento regional agrícola por culturas tradicionais como a soja, a mamona, o dendê, o amendoim e o girassol ou mesmo das novas alternativas, como o pinhão manso, o nabo forrageiro, o pequi, o buriti, a macaúba entre outras, será uma difícil questão a ser resolvida, uma vez que o Brasil é um país tropical, com dimensões continentais.

Na Região Norte, a opção indicada pelo EMPRAPA é o cultivo da palma africana e o dendê e a produção descentralizada de biodiesel para abastecimento direto das comunidades isoladas, que produziriam a matéria-prima e efetuariam a produção do biodiesel, contribuindo assim para a redução da dependência em relação ao óleo diesel e contribuindo para a inclusão social dos habitantes destas áreas remotas.

No Nordeste, devido à conotação social dada ao programa, atualmente o foco de produção está centrado na mamona, dado pela resistência desta matéria-prima à seca, tornando-a uma das únicas alternativas rentáveis para as regiões árido e semi-árido do Nordeste.

Do ponto de vista das alternativas para o Biodiesel, a região Centro-Sul, apresenta grande potencial para a soja, o amendoim, o girassol e a própria mamona (com experiências de sucesso no Mato Grosso), sem falar de que

dispõe ainda de uma grande extensão de terras agricultáveis ainda livres, com maior regularidade climática.

A simulação termodinâmica utilizou balanços de massa e energia para descrever o comportamento teórico de um motor a combustão interna de grande porte operando com alguns óleos combustíveis e alguns tipos de Biodiesel. Os resultados recomendaram melhorias ou investimentos em maiores pátios de estocagem do consumidor, além de estudos mais específicos sobre transporte e logística do Biodiesel.

Como recomendações principais a novos estudos, esta dissertação pode apontar para os seguintes assuntos:

- Estudos sobre impacto no preço do Biodiesel, em decorrência da oferta de sub produtos (i.e., glicerina, etc) da produção de Biodiesel, no mercado.
- Estudos sobre o balanço energético do Biodiesel produzidos por matérias primas nacionais.
- Testes de motores diesel, operando com diferentes tipos de Biodiesel e diferentes concentrações.
- Aprimoramento do modelo matemático empregando a partir de dados empíricos adicionais obtidos com novos ensaios de motores operando com Biodiesel ou a partir do relaxamento de algumas hipóteses simplificadoras, substituídas por decisões mais precisas de alguns processos reinantes em um motor diesel.

Este trabalho tentou reunir aspectos positivos e negativos sobre a utilização de Biodiesel como combustível. O texto discorreu sobre assuntos técnicos, ambientais e sociais. Todos estes quesitos devem ser levados em consideração ao se decidir sobre a implementação, fato este pouco explorado no Brasil, ainda mais por fontes politicamente neutras. Foi objetivo do presente trabalho reunir e compilar as questões citadas relativas ao Biodiesel, contribuindo para uma avaliação isenta e imparcial sobre a continuidade do programa de Biodiesel no Brasil.

6

Referências Bibliográficas

Adams, O., Elements of Diesel Engineering, 2ª edição, The Norman W. Henley Publishing CO., 1949.

Agência Nacional de Energia Elétrica, página <http://www.aneel.gov.br>, acessada em Novembro de 2005.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, página <http://www.anp.gov.br>, acessada em Novembro de 2005.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Resolução ANP nº 42, 2004.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Resultado Final do 3º Leilão de Compra de Biodiesel, 2006.

Ali, Y., Hanna, M.A., Leviticus, L.I., Emissions and Power Characteristics of Diesel Engines on Methyl Soyate and Diesel Fuel Blends, Bioresource Technology Magazine, vol. 52,1995, pp. 185 - 195.

American Society for Testing and Materials, Norma ASTM D 6751, Standard Specification for Biodiesel Fuel (B100) Blend Stock for Distillate Fuels, 2002.

American Society for Testing and Materials, Norma ASTM D 975, Standard Specification for Diesel Fuel Oils, 2005.

Arkhangelsky, V., Khovakh, M., Stepanov, Y., Trusov, V., Vikhert, M., Voinov, A., Motor Vehicle Engines, Mir Publishers, 1971.

Athayde, E., Arábia Saudita das Energias Renováveis, Jornal Gazeta Mercantil, 16 de Maio de 2006.

Backman, M., Biodiesel – The Dispatchable Renewable, Anais do Power-

Gen International Conference, 2003.

Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico Social (BNDES), página <http://www.bndes.gov.br>, acessada em março de 2006.

Câmara de Comércio de Energia Elétrica, página <http://www.ccee.org.br>, acessada em Novembro de 2005.

Canakci, M., Erdil, A., Arcaklioglu, E., Performance and Exhaust Emissions of a Biodiesel Engine, Applied Energy, 2006, pp 594-605.

Cardoso, D., Tecnologia brasileira do Biodiesel, Jornal Gazeta Mercantil, 15 de Março de 2006.

Carranca, J.N., Green Power From Diesel Engines Burning Biological Oils and Recycled Fat, Anais do Rio 5 – World Climate & Energy Event, fevereiro de 2005, pp 283 – 292.

Coelho, S.T, Mecanismos para Implementação da Cogeração de Eletricidade a partir da Biomassa - Um modelo para o Estado de São Paulo, tese de doutorado, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 1999.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), Relatório da qualidade do ar 2003, publicado em maio de 2004.

Congresso Nacional, Lei nº 11.097 – Introdução do Biodiesel na Matriz Energética Brasileira, 2005.

Costa, L.R, Biodiesel: Estratégias para Produção e Uso no Brasil, Relatório Técnico apresentado à Promon Engenharia, 2005.

Deutsches Institute für Normung, Norma DIN EN 14214, Automotive fuels - Fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines - Requirements and test methods, 2003.

Eletrobrás, página <http://www.eletrobras.gov.br>, acessada em Novembro de

2005.

Estill, L., Biodiesel Power - the Passion, the People, and the Politics of the Next Renewable Fuel, 1ª edição, New Society Publishers, Gabriola Island, Canadá, 2006.

European Biodiesel Board (EBB), página <http://www.ebb-eu.org>, acessada em Janeiro de 2005.

Finn, D., Biodiesel as a Renewable Fuel for GENSET Technology, anais do 16th Prime Power Diesel Inter-Utility Conference, 2003.

Giacosa, D., Motores Endotermicos, 3ª edição, Editorial Cientifico – Medica, 1970.

Greene, A.B., Lucas, G.G., The Testing of Internal Combustion Engines, 1ª edição, The English Universities Press Ltd., 1969.

Grupo de Trabalho Interministerial (GTI), A Viabilidade de Utilização de Óleo Vegetal - Biodiesel como Fonte Alternativa de Energia, relatório final, Casa Civil, Ministério dos Transportes, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, Ministério de Minas e Energia, Ministério da Fazenda, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, Ministério da Ciência e Tecnologia, Ministério do Meio Ambiente, Ministério do Desenvolvimento Agrário, Ministério da Integração Nacional, Ministério das Cidades, 2003.

Haga, N., Vegetable Oil as Fuel in Diesel Generating Sets, anais do 10th International Cogeneration, Combined Cycle & Environment Conference and Exhibition, Istanbul, maio de 2004.

Heywood, C.F., Internal Combustion Engine Fundamentals, 1ª edição, Editora McGraw-Hill, 1988.

Kalligeros, S., Zannikos, F., Stournas, S., Lois, E., Anastopoulos, G., Teas, C., Sakellaropoulos, F., An Investigation of Using Biodiesel/Marine Diesel

Blends on the Performance of Stationary Diesel Engine, Biomass & Bioenergy Magazine, vol. 24, 2002, pp. 141 - 149.

King, B., About Diesel Fuel, página <http://www.flashoffroad.com>, acessada em Julho de 2006.

Knothe, G., Krahl, J., Gerpen, J.V., The Biodiesel Handbook, 1ª edição, OACS Press, Illinois, 2005.

Knothe, G., Sharp, C.A., Ryan III, T.W., Exhaust Emissions of Biodiesel, Petrodiesel, Neat Methyl Esters, and Alkanes in a New Technology Engine, Energy & Fuels Magazine, vol. 20, 2006, pp. 403 - 408.

Laforgia, D., Ardito, V., Biodiesel Fueled IDI Engines: Performances, Emissions and Heat Release Investigation, Bioresource Technology Magazine, vol. 51, 1994, pp. 53 - 59.

Lora, E.E.S, Nascimento, M.A.R, Geração Termelétrica – Planejamento, Projeto e Operação, volumes I e II, 1ª edição, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2004.

Macedo, G.M., Macedo, J.A., Produção de Biodiesel por Transesterificação de Óleos Vegetais, revista Biotecnologia Ciência e Desenvolvimento, vol. 32, 2004, pp. 38 - 46.

Martins, H., Teixeira, L.C, Balanço Energético da Produção de Óleos Vegetais Transesterificados, Anais do III Congresso Brasileiro de Energia, vol. 4, Rio de Janeiro, 1984, pp. 1642 - 1649.

Ministério das Minas e Energia, página <http://www.mme.gov.br>, acessada em Novembro de 2005.

Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República (NAE), Biocombustíveis, Caderno número 2, 2005, pp 11 - 51.

Oliveira, L.B., Potencial de Aproveitamento Energético de Lixo e de

Biodiesel de Insumos Residuais no Brasil, tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal Fluminense, 2004.

Operador Nacional do Sistema, página <http://www.ons.org.br>, acessada em Novembro de 2005.

Pahl, G., Biodiesel - Growing a New Energy Economy, 1ª edição, Chelsea Green Publishing Company, Vermont, 2005.

Parente, E.J.S., Biodiesel: uma Aventura Tecnológica num País Engraçado, relatório final, 2003.

Pereira, R.H., Avaliação Experimental e Previsão do Desempenho de Motores Diesel Consumindo Gás Natural, tese de doutorado, PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2006.

Peres, J.R.R., Insumos Oleaginosos para o Biodiesel, Anais do 1º Simpósio de Biodiesel do Estado do Paraná, Londrina, 2003.

Portal do Biodiesel, página <http://www.biodiesel.gov.br>, acessada em Junho de 2006.

Petrovsky, N., Marine Internal Combustion Engines, Mir Publishers, 1975.

Rangel, J., BR amplia venda de Biodiesel, Jornal OGLORO, 18 de maio de 2006.

Rede Baiana de Biocombustíveis, página <http://www.redebaianadebiocombustiveis.ba.gov.br>, acessada em Junho de 2006.

Ribeiro, S.K., Santos, M.P.S.S., Balassiano, R., Almeida, A.F.S., D'Agosto, M.A., O Uso do Biodiesel no Brasil - Efeitos na Atividade de Distribuição de Combustíveis, relatório final, COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia de Transportes, 2004.

Santos, N.O., Termodinâmica Aplicada às Termelétricas – Teoria e Prática, 1ª edição, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2000.

Schumacher, L.G., Borgelt, S.C., Fosseen, D., Goetz, W., Hires, W.G., Heavy-Duty Engine Exhaust Emission Tests Using Methyl Ester Soybean Oil/Diesel Fuel Blends, Bioresource Technology Magazine, vol. 57, 1996, pp. 31 – 36.

Sulgas, página <http://www.sulgas.rs.gov.br>, acessada em Agosto de 2006.

Tavares, M., Jungblut, C., Combustível Verde-Amarelo, Jornal O GLOBO, 4 de Fevereiro de 2006.

Taylor, C.F., Taylor, E.S., The Internal-Combustion Engine, Textbook Company, 1961.

Torres, E.A., Aguiar, L.M.G., Lima, P.F., Correia, P.R.S., Barata, E., Estudos de Avaliação de Alternativas para Queima de Óleos Pesados em Usinas Termoelétricas a Base de Motores Diesel, relatório final, Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica da Bahia, 2005.

Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen (UFOP), Biodiesel Production and Marketing in Germany, relatório, 2005.

Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen (UFOP), página <http://www.ufop.de>, acessada em Janeiro de 2006.

United States Government Department of Energy, Biodiesel Handling and Use Guidelines, 2004.

Wärtsilä Corporation, Power Plants Product Programme, catálogo, 2004.

Wylen, G.V., Sonntag, R., Borgnakke, C.; Fundamentos da Termodinâmica Clássica, tradução da 4ª edição americana, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1995.

Apêndice I - O Motor Diesel, seu inventor e o óleo diesel

Rudolf Christian Karl Diesel nasceu no dia 18 de Março de 1858 em Paris. Em 1870 a França declarou guerra contra a Prússia e os Diesel, assim como qualquer um de origem germânica, começaram a ser vistos como suspeitos e indesejados. A família então migrou para a Inglaterra onde Rudolf pode finalizar seus estudos na *London School*.

Aos 14 anos, já na Alemanha, decidiu seguir a carreira de engenheiro e mesmo após o fim da guerra franco-prussiana ter terminado e sua família ter voltado a viver em Paris, Rudolf decidiu continuar na Alemanha para continuar seus planos.

Em outubro de 1873 entrou em um programa de engenharia mecânica em Augustburg. Durante seu curso, em uma aula no laboratório de física, Rudolf viu um equipamento “misterioso” que certamente chamou bastante sua atenção. O equipamento consistia em um pequeno cilindro fabricado em vidro, no qual ar era substancialmente comprimido. Com o aumento da pressão no cilindro, ocorria um aumento na temperatura e podia ser visto uma faísca através do vidro.

Uma vez graduado, Rudolf ganhou uma bolsa da *Technische Hochschule München* - Escola Técnica de Munique, mas também conhecida como Instituto de Tecnologia de Munique. Lá ele teve contato com o professor Carl Von Linde, quem desenvolveu o primeiro refrigerador por compressão de amônia eficiente e confiável. Ainda em Munique, Diesel começou a considerar seriamente a possibilidade de desenvolver o que ela chamava de “heat engine”, onde não seria necessária uma centelha para iniciar uma combustão, assim como acontecia no misterioso experimento do laboratório de física.

Naquele momento a fonte principal de energia das indústrias, eram motores a vapor e a uma baixa eficiência – algo abaixo de 10% e extremamente caros e conseqüentemente favoreciam as grandes empresas. Motivado por uma consciência social, talvez potencializado pelas dificuldades que sua família havia passado, e utilizando os conhecimentos adquiridos em engenharia e termodinâmica, começou a trabalhar no projeto de um novo e revolucionário motor.

Após a graduação no Instituto de Tecnologia de Munique, em 1880, Rudolf Diesel foi contratado pela grande e sólida empresa *Gebrüder Sulzer Maschinenfabrik* – fábrica de máquinas dos irmãos Sulzer. Nesta fábrica,

localizada em Winterthur, Suíça, ele teve bastante experiência em mecânica industrial, mas logo voltou a Paris, onde o antigo professor Carl Von Linde havia arranjado para ele um emprego em uma nova fábrica de refrigeradores que estava sendo construída. Ganhando experiência em refrigeração, em 1881 Diesel obteve sua primeira patente na área: uma máquina de fazer gelo. Com esta patente começou a procurar um fabricante para sua idéia e logo entrou em acordo com Maschinenfabrik Augusburg, conhecida hoje como Maschinenfabrik Augusburg-Nuerenberg, ou simplesmente MAN AG. Em 1883 começou a fabricar seu invento e no mesmo ano casou com Martha Flasche.

Em 1890, Diesel e sua esposa e três filhos voltaram para a Alemanha, desta vez a cidade foi para Berlim, onde começou a desenvolver o projeto do motor a combustão, o qual foi patenteado em 28 de Fevereiro de 1892. No ano seguinte ele publicou o famoso paper “Theory and Construction of a Rational Heat Engine to Replace the Steam Engine and Contemporary Combustion Engine”.

O primeiro protótipo, construído em 1893, consistia em um motor de um único cilindro e que funcionou inicialmente com kerosene e depois com gasolina e na seqüência outros combustíveis também foram experimentados.

Após a construção de outros protótipos e algumas participações em exposições internacionais, o invento de Rudolf Diesel se tornou um sucesso e mundialmente conhecido.

Nos seus últimos anos de vida Diesel era inquestionavelmente um defensor do uso de combustíveis renováveis, em 1911 ele disse “...*the diesel engine can be fed with vegetables oils and would help considerably in the development of agriculture of the countries which use it*” (Pahl, 2005).

Apesar do crescente domínio dos combustíveis derivados do petróleo, Diesel continuou acreditando nos combustíveis renováveis e em discurso acontecido em 1912 em Saint Louis, Missouri, quando estava descrevendo recentes mudanças nos atomizadores de combustível para serem utilizados nos seus motores e possibilitando então a utilização de outros óleos vegetais como óleo de amêndoa, dendê e outros; ele disse célebre frase: “...*the use of vegetable oils for engine fuels may seems insignificant today, but such oils may become, in the course of time, as important as petroleum and coal-tar products of the present time*”(Pahl, 2005).

Ainda neste ano, um antes da sua trágica morte (nota: A morte de Rudolf Diesel é cercada de mistério. Ele estava navegando da Atuérpia, Bélgica para

Harwich, Inglaterra e acompanhado de outros 2 tripulantes. Diesel misteriosamente desapareceu durante a noite. Por ter sido uma noite relativamente calma, a hipótese de acidente foi descartada e rapidamente a imprensa levantou a hipótese de ele ter sido assassinado pelo Serviço Secreto Britânico ou por agentes ligados a grandes companhias de petróleo. A imprensa americana sugeriu que ele havia sido executado pelos alemães, como traidor, para assegurar os segredos da última promessa bélica: os U-Bolts. A verdade é que não se pode garantir que, por exemplo, não aconteceu suicídio. (Pahl, 2005) já eram mais de 70.000 motores diesel operando em todo o mundo, mas por causa das características de tamanho e peso eram praticamente restritos á usos estacionários como em fábricas ou em plantas de geração de energia.

Apesar de seu motor ter sido originalmente projetado para queimar diversos óleos vegetais já citados ou ainda outros combustíveis como óleo de baleia ou óleo de cânhamo, Rudolf Diesel optou por utilizar querosene como combustível primário, por causa do seu baixo custo e grande abundância que eram praticados naquela época.

No começo do século XX a indústria bélica, motivada pelo crescente temor de novas guerras começou a equipar seus navios e submarinos, que eram a mais nova e promissora ameaça aos países inimigos; impulsionou a já fortíssima indústria do petróleo a desenvolver um combustível menos volátil que a querosene ou mesmo a gasolina para ser armazenado e transportado nas embarcações com mais segurança.

Foi desenvolvido então um combustível, sub produto do refino da gasolina e passou a ser chamado de óleo diesel. Os motores desenvolvidos por Rudolf Diesel foram então modificados para funcionar com este novo e poluente combustível derivado do petróleo. O novo motor, infelizmente, se afastava cada vez mais do objetivo inicial do seu inventor que era para ser utilizado com combustíveis limpos e renováveis, pois o casamento do motor com o novo combustível foi bem feito e as vendas cresciam exponencialmente. Parecia que o sonho ecológico e social de Rudolf Diesel estava cada vez mais longe de ser realizado.

Embora naquele momento mais tímidos, os experimentos em cima da utilização de óleos vegetais não foram completamente abandonados. Por volta dos anos 40, diversos experimentos foram conduzidos especialmente nas colônias dos países Europeus, como na África. Durante a segunda guerra mundial, óleos vegetais eram utilizados como combustíveis alternativos quando

o suprimento de combustíveis derivados de petróleo era interrompido. Mas com o fim do conflito e com o refortalecimento do suprimento dos combustíveis minerais e a preços novamente baixos, as pesquisas com óleos vegetais praticamente foram interrompidas, até a década de 70.

Embargo do petróleo e a retomada das pesquisas em combustíveis verdes

No dia 6 de outubro de 1973, o exército Egípcio atacou Israel através do canal de Suez enquanto simultaneamente forças militares Sírias atacavam pelo norte. O exército de Israel foi pego de surpresa recuou, mas após ter recebido apoio militar de outras nações como os Estados Unidos, eles contra-atacaram e expulsaram os invasores de seu território e adicionaram terras daqueles ao território de Israel. Um acordo de paz foi concluído em Novembro e as Nações Árabes sentindo-se humilhados pelas perdas prepararam uma retaliação as nações ocidentais que haviam dado suporte a Israel.

A Organização dos Países Exportadores de Petróleo – OPEC (“*Organization of Petroleum Exporting Countries*”) iniciou um embargo de petróleo aos países ocidentais, entre eles os Estados Unidos. O embargo teve conseqüências dramáticas as economias de diversos países espalhados pelo mundo pois o preço da energia teria sido inflacionado. Depois de uma noite o preço do barril de petróleo subiu de US\$3 para US\$5 e ao final de 1974 já estava em US\$14 (Pahl, 2005). O caos estava decretado nos países desenvolvido e extremamente dependentes de petróleo, o mundo ocidental estava vivenciando uma grande recessão econômica.

Em 1979, com a revolução do Irã o mundo novamente foi exposto a uma nova crise de energia. O preço do barril do petróleo, novamente dobrou em um curto espaço de tempo.

Motivado por estas crises, os países mais atingidos retomaram a pesquisa e desenvolvimento em combustíveis alternativos. Uma das linhas de ataque foi a do etanol, que já havia sido bastante desenvolvido principalmente durante a Primeira e Segunda Guerra mundial. Nestes períodos de guerra o etanol era utilizado como aditivo e/ou suplemento aos combustíveis derivados do petróleo. Com o fim da Segunda Guerra Mundial e com o restabelecimento do baixo preço do petróleo, as usinas de etanol perderam competitividade e fecharam, encerrado-se então a utilização de blends de gasolina e etanol, que era chamado naquela época de *gashol*. No início da década de 80, em reposta as crises do petróleo, o *gashol* foi reintroduzido nos Estados Unidos.

Paralelamente, outra linha de pesquisa se desenvolvia novamente em cima dos combustíveis vegetais alternativos ao óleo diesel.

Experimentos na Áustria, África do Sul e nos Estados Unidos

Logo após a crise de energia de 1973 importantes programas de pesquisa se instalaram pelo mundo, como na Áustria, África do Sul e nos Estados Unidos

O programa da Áustria se baseava tipicamente em misturar óleos vegetais em óleo diesel, formando um *blend*. Os experimentos essencialmente consistiam em testar diferentes concentrações nos blends em um pequeno e velho trator. Os primeiros resultados dos testes mostraram que a viscosidade do óleo vegetal deveria ser reduzida e que a sua utilização aumentaria consideravelmente os custos de manutenção dos motores devido a excessiva quantidade de depósitos nos componentes do motor. Ficou constatado também que no caso da utilização de óleos vegetais por um longo período de tempo, os motores poderiam ser condenados pelo desgaste. Concluíram que o combustível deveria ser adaptado para o motor diesel ou o motor deveria ser adaptado ao combustível, “decidimos adaptar o combustível”, relata Manfred Wörgetter, do Instituto Federal de Engenharia Agrícola (Bundesanstalt für Landtechnik – BLT) (Pahl, 2005). Em outubro de 1981 conversando com pesquisadores Sul Africanos, durante uma conferência sobre energia em Berlim, que haviam testado com sucesso um éster metílico de girassol, ficou convencido que produzir ésteres metílicos a partir de óleos vegetais seria uma excelente rota de pesquisa. A discussão sobre a utilização de éster metílico de girassol durante esta conferência é vista como o marco do que anos depois seria conhecido como Biodiesel.

Nos Estados Unidos, aproximadamente na mesma época, o Professor Charles Peterson da Universidade de Idaho iniciou testes misturando óleo vegetal no óleo diesel. Após alguns testes, assim como os pesquisadores Europeus e Africanos, concluiu que para se utilizar com sucesso óleos vegetais como combustíveis, ou estes ou os motores deveriam ser adaptados. Ele e seus colegas de pesquisa também concluíram que o melhor seria atacar o combustível. Testes com óleo de canola esterificado (Biodiesel) foi um marco real do início de experimentos com Biodiesel na universidade, atestou o Professor Peterson.

Apêndice II - Custo de produção do Biodiesel

Para se chegar aos custos do Biodiesel, o MDIC (2003) fez as seguintes considerações:

a) Foi considerado o custo de produção do grão, incluída a margem de retribuição do produtor. No caso da soja, foi considerado o valor comercial da saca e subtraído o valor comercial do farelo.

b) Foi subtraído o valor comercial dos sub-produtos (farelo ou torta e glicerina) sujeito à queda por aumento de oferta. No caso do dendê, a torta resultante de seu processamento, não foi considerado pois não tem valor de mercado para se usar como referência, embora seja possível de aproveitamento.

c) Foi considerado custo para a moagem de aproximadamente US\$ 12,00/tonelada, para a soja pois esta matéria prima trabalha com este custo para a chamada “crush-margin” (custo para moagem). Foi considerado que para os demais produtos, os custos não devem ser muito diferentes disso.

d) Os óleos vegetais, como insumo para Biodiesel, foram considerados isentos de tributos.

Sob essa metodologia, o Biodiesel B100, isento de tributos federais (CIDE e PIS/COFINS) e estadual (ICMS), apresenta os seguintes custos de produção:

Produto	Custo de produção (R\$/litro) Sem impostos
Biodiesel B100 – Soja	0,902
Biodiesel B100 – Girassol	0,645
Biodiesel B100 – Mamona	0,761
Biodiesel B100 – Dendê	0,494

Custos de produção de Biodiesel, isentos de tributos federais e estaduais Fonte: MCDI (2003)

Tomando-se por base o preço ao consumidor de um litro de diesel mineral de R\$ 1,397 em 2003^[7], A adição de 5% de Biodiesel B5 poderia levar a duas situações distintas: com e sem isenção tributária.

Se a tributação fosse cobrada integralmente na venda do B5, haveria um aumento nos preços de venda de 0,72%, se a matéria-prima utilizada fosse a soja, e de 0,21% se a oleaginosa fosse a mamona. Usando-se girassol e dendê, haveria redução de 0,21% e 0,72%, respectivamente.

Na situação inversa, se houvesse isenção tributária, os preços de venda poderiam diminuir em 2,29% (dendê); 1,79% (girassol); 1,36% (mamona) e em 0,86% (soja), mas acarretaria numa considerável perda de arrecadação.

Neste cenário, o MCDI (2003) fez também simulações para se verificar quanto seria esta perda de arrecadação por parte da União e Estados. Foi admitido no estudo que 95,5% do consumo de diesel para uso geral fosse atendido pela mistura B5 e que 30% das máquinas agrícolas, que representam 15% do consumo nacional, passariam a utilizar B100, haveria perda de arrecadação da ordem de 9,3%, atingindo a cifra de R\$1,37 bilhão, repartida entre a União (55%) e os Estados (45%); divididos da seguinte maneira:

Uso	Impostos Federais (MR\$)	Impostos Estaduais (MR\$)
Uso geral (95,5% com B5)	392	315
Uso em máquinas agrícolas (30% x 15% com B100)	369	296

Perda de arrecadação devido à isenção tributária do Biodiesel, cenário 1. Fonte: MCDI (2003)

Em um segundo cenário foi admitido que transporte metropolitano passaria a ser atendido com a mistura B5 e que 30% das máquinas agrícolas, passariam a utilizar B100, a perda de arrecadação neste caso passaria a ser de 5,8% (R\$ 857 milhões), onerando a União e os Estados nos mesmos percentuais de 55% e 45%, respectivamente.

Uso	Impostos Federais (MR\$)	Impostos Estaduais (MR\$)
Diesel metropolitano (27% x 95,5% com B5)	106	86
Uso em máquinas agrícolas (30% x 15% com B100)	369	296

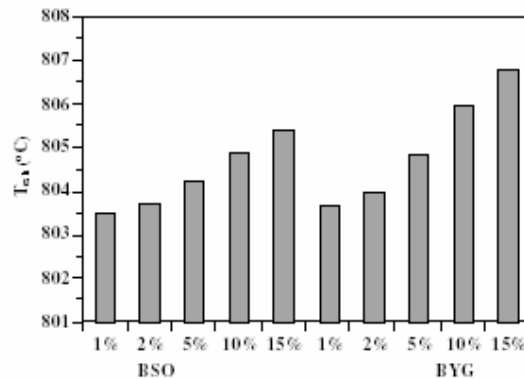
Perda de arrecadação devido à isenção tributária do Biodiesel, cenário 2. Fonte: MCDI (2003)

[7] As análises de impactos econômicos da introdução do Biodiesel na matriz energética nacional foram referenciadas no preço vigente de realização do diesel mineral que se encontrava influenciado pelas cotações do petróleo na ordem de US\$ 29/barril

Apêndice III – Estimativa da temperatura de exaustão para diferentes combustíveis

Canakci et al (2006) mediram a temperatura dos gases de exaustão para um motor operando com óleo diesel #2 puro e a diferentes misturas de Biodiesel de óleo de soja (BSO) e Biodiesel de gordura (BYG). O resultado (figura abaixo) mostra que, com o aumento da concentração de Biodiesel na mistura, aumenta a temperatura dos gases de exaustão.

O motor testado foi um John Deere 4276T, quatro cilindros, quatro tempos, turbo alimentado, com injeção direta de combustível, com potência máxima de 57,1 kW (@2100 rpm). Todos os testes foram realizados a carga total (100%) a uma velocidade igual a 1400 rpm, com torque igual a 257,6 Nm.



Efeito na variação da temperatura dos gases de exaustão ao se alterar a concentração de Biodiesel na mistura com óleo diesel.
Fonte: Canakci et al, 2005

A partir deste gráfico pode-se estimar a temperatura dos gases de exaustão no caso de operação do motor com 100% de BSO e BYG.

Pares de valores do gráfico acima foram imputados no programa Microsoft Excel. Com esta ferramenta pôde-se desenhar a linha de tendência e, então, determinar a equação (abaixo) que melhor descreve o comportamento da temperatura de exaustão em função da concentração de Biodiesel na mistura. Para o primeiro caso (BSO) a equação encontrada é a seguinte:

$$T [^{\circ}\text{C}] = 0,147(\%_{\text{BSO}}) + 803,28$$

Para para o segundo caso (BYG) é:

$$T [^{\circ}\text{C}] = 0,213(\%_{\text{BYG}}) + 803,50$$

Com estas equações pode-se calcular, aproximadamente, as temperaturas dos gases de exaustão para aquele motor operando com Biodiesel puro, que são respectivamente:

$$T_{100\% \text{ de BSO}} = 818,0 (^{\circ}\text{C})$$

$$T_{100\% \text{ de BYG}} = 824,8 (^{\circ}\text{C})$$

Por outro lado, Giacosa (1970) cita que, a partir do Ciclo Diesel teórico (padrão ar), é possível calcular a temperatura de exaustão (T_4), a partir da equação abaixo:

$$T_4 = T_1 \left(\frac{V_3}{V_2} \right)^k$$

onde T_1 é a temperatura de admissão e a razão $\left(\frac{V_3}{V_2} \right)$ é a razão de corte (“p” processo de expansão com adição de calor) e k é igual a:

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

Com isso tem-se que:

$$T_4 = T_1 \left(\frac{V_3}{V_2} \right)^k = \rho^k$$

Sabendo-se qual é a temperatura de admissão do motor (temperatura ambiente), e ao se determinar como a razão de corte varia com a troca do combustível, pode-se calcular qual será a temperatura dos gases de exaustão com o novo combustível. Supondo que ambos os combustíveis sejam injetados à mesma taxa (\dot{m}), isto é, que a bomba injetora não tenha sido alterada, se o combustível substituto tiver menor poder calorífico, mais tempo (ângulo do eixo virabrequim) será necessário para injeção de combustível, para manter constante a potência mecânica. Com isso conclui-se que a razão de corte é inversamente proporcional ao poder calorífico do combustível, ou seja:

$$\frac{\rho_{\text{comb}_1}}{\rho_{\text{comb}_2}} = \frac{\text{PCI}_{\text{comb}_2}}{\text{PCI}_{\text{comb}_1}}$$

E com isso tem-se, que:

$$T_{4,\text{comb}_1} = T_{4,\text{comb}_2} \left(\frac{\text{PCI}_{\text{comb}_2}}{\text{PCI}_{\text{comb}_1}} \right)^k$$

Considerando o experimento de Canakci et al (2006), e o combustível 1 como sendo o óleo Diesel #2 com poder calorífico igual a 42.613 kJ/kg, pode-se estimar a temperatura de exaustão quando utilizado o Biodiesel BSO e BYG. Para o caso, Petrovsky (1975) sugere usar, ao invés de $k=1,4$ (ar), utilizar um expoente politrópico com valor entre 1,15 e 1,30. Com isto as temperaturas dos gases de exaustão estimadas ficam sendo:

$$T_{100\% \text{ de BSO, teórico}} = 881,87 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$T_{100\% \text{ de BYG, teórico}} = 890,65 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Estes valores são, respectivamente, 7,8% e 7,9% superiores aos estimados a partir dos resultados de Canakci et al (2006).

Não ausência de dados específicos sobre o motor analisado na presente dissertação utilizando diferentes combustíveis e utilizando a formulação acima, pode-se estimar as temperaturas dos gases de exaustão, como se segue:

Combustível	Temperatura estimada dos gases de exaustão (°C)
OCA1	317,0
OCA2	324,9
OCB1	304,9
OCB2	306,2
Biodiesel de Canola, Rota metílica	375,4
Biodiesel de Soja, Rota metílica	373,9
Biodiesel de Girassol, Rota metílica	352,7
Biodiesel de Dendê, Rota etílica	341,7
Biodiesel de Mamona, Rota etílica	332,2