



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]