

Clóvis Henrique Meirelles Fonseca

**Substituição do Óleo Diesel por
Combustível Alternativo na
Geração de Energia Elétrica**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Dr. Sergio Leal Braga
Co-Orientador: Dr. Sandro Barros Ferreira

Rio de Janeiro, maio de 2007



Clóvis Henrique Meirelles Fonseca

**Substituição do Óleo Diesel por
Combustível Alternativo na
Geração de Energia Elétrica**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau 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. Sergio Leal Braga

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. Sandro Barros Ferreira

Co-Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. Marcos Sebastião da Paula Gomes

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. José Alberto dos Reis Parise

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 18 de maio de 2007

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

Clovis Henrique Meirelles Fonseca

É Engenheiro Eletricista formado pela Universidade Veiga de Almeida. Atua nas áreas de Energia e Máquinas Térmicas.

Ficha Catalográfica

Fonseca, Clóvis Henrique Meirelles

Substituição do óleo diesel por combustível alternativo na geração de energia elétrica / Clóvis Henrique Meirelles Fonseca ; orientador: Sergio Leal Braga ; co-orientador: Sandro Barros Ferreira. – 2007.

91 f. : il. (col.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Motor diesel. 3. Geração de energia. 4. Óleo diesel. 5. Óleo de dendê. 6. Combustíveis alternativos. 7. Biocombustível. I. Braga, Sergio Leal. II. Ferreira, Sandro Barros. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, essa força superior que nos dá a força necessária para continuarmos nossa luta diária pela melhoria do mundo.

Agradecer a minha família. Meu pai, Eduardo, que sempre foi um suporte e um exemplo que seguirei pelo resto da minha vida. Minha mãe, Izabel, cuja força e conhecimento me ensinam que as dificuldades podem ser sempre superadas.

Minha amada esposa, Karina, que com sua coragem me mostrou que somos capazes de tudo. Basta que tenhamos força de vontade para correr atrás dos nossos sonhos e ambições. Agradeço também pelo suporte emocional e pela sua força que não permitiu que eu desistisse nos momentos de fraqueza.

Ao meu Orientador, Sergio Braga, que me apoiou e me deu o suporte necessário para a conclusão deste trabalho.

Ao meu Co-Orientador, Sandro Barros, antes de tudo um amigo, que me auxiliou nas dificuldades encontrado por mim, sempre disposto a me incentivar e me corrigir os erros.

Aos amigos de trabalho, em especial o Vinicius Avellar, que me ajudou na execução do experimento, seja gravando a experiência ou ajudando no melhor arranjo para o preparo da banca de testes.

Ao pessoal do laboratório de Engenharia Veicular da PUC, que muito me ajudou no desenvolvimento da experiência. Ressaltando o Gerson que me auxiliou na montagem do experimento, nos equipamentos de medição, tive a ajuda do amigo Julio, nos trabalhos braçais e conhecimento da mecânica e montagem, contei com a ajuda dos amigos Gilson e Fabrício.

Aos amigos do Instituto Tecnológico da PUC (ITUC), nas figuras de Fada, Beth, Marcos, Luciano e Renato, que sempre me ajudaram em qualquer momento. Ao Ricardo, que sempre esclareceu minhas dúvidas.

À equipe do Laboratório de Pressão e Temperatura, nas figuras de João Peixe e do “Gemada” e do Laboratório de Termociências, representado pelo “Mestre Camurça”, agradeço pelo material cedido para a montagem do experimento.

E finalmente pelo Instituto de Energia da PUC que me acolhe como funcionário e me permite ter uma convivência com pessoas extremamente competentes.

Resumo

Fonseca, Clovis Henrique Meirelles; Braga, Sergio Leal. **Substituição do Óleo Diesel por Combustíveis Alternativos na Geração de Energia Elétrica.** Rio de Janeiro, 2007, 91p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este estudo foi realizado visando avaliar o desempenho de um grupo gerador na geração de energia elétrica nas áreas remotas do Brasil utilizando um combustível renovável, o óleo de dendê *in natura*. Foi investigado, em laboratório, o comportamento de um motogerador diesel, de 3 kVA ligado a um banco de carga composto por 16 lâmpadas de 150 kW. O desempenho do motor foi avaliado com a utilização do óleo de dendê, tendo como referência o desempenho do mesmo grupo gerador utilizando o óleo diesel. Devido à alta viscosidade do combustível escolhido, foi necessário um pré-aquecimento do mesmo para que esta propriedade fosse semelhante à do diesel. As emissões de poluentes do motor utilizando o óleo vegetal foram em média menores do que com o motor utilizando diesel. No entanto, o consumo específico de combustível do motor utilizando óleo de dendê foi maior que o consumo específico de combustível utilizando o óleo diesel. Além disso, a potência média gerada com o óleo de dendê foi a mesma que a potência média gerada com diesel. Os resultados indicam que é possível uma substituição do óleo diesel pelo óleo de dendê *in natura* nas remotas localidades do país.

Palavras-Chaves

Motor diesel; Geração de energia; Óleo diesel; Óleo de dendê; Combustíveis alternativos; Biocombustível.

Abstract

Fonseca, Clovis Henrique Meirelles; Braga, Sergio Leal **Substitution of the Oil Diesel by Alternative Fuels in the Generation of Electricity**. Rio de Janeiro, 2007, 91p. MSc. Dissertation - Department of Engineering Mechanics, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

This study was carried out aiming the performance assessment of a power generation set using a renewable fuel, the crude palm oil. It was investigated, in laboratory, the performance of a diesel generating set of 3 kVA, supplying power to a load composed of 16 light bulbs of 150kW. The performance of the engine was evaluated with the use of the crude palm oil, having as reference the performance of the same generating set using the diesel oil. Given the high viscosity of the chosen fuel, its preheating was necessary so that this property was similar to the diesel oil. The emissions of pollutants of the engine using the vegetal oil were less than that with the engine using diesel oil. However, the specific fuel consumption of the engine using crude palm oil was greater than the specific fuel consumption using the oil diesel. Moreover, the average power generated with palm oil was equal to the power generated with diesel oil. The performance of the engine was evaluated with the use of the palm oil, having as reference the performance of the same generating group using the diesel oil. The results indicate that it is possible to substitute the diesel oil by the renewable oil.

Keyword

Engine diesel; Generation of energy, Oil diesel; Palm oil, Alternative fuels; Biofuel

Sumário

1	Introdução	14
2	Revisão bibliográfica	17
3	Utilização do óleo vegetal em motores diesel.	30
3.1	Disponibilidade e potencial no Brasil.....	30
3.2	Escolha do óleo vegetal a ser utilizado no experimento.....	31
3.3	Propriedades físicas dos óleos vegetais	32
3.4	Vantagens na utilização do óleo vegetal como combustível	36
3.5	Problemas na utilização do óleo vegetal como combustível	36
4	Motor de combustão interna.....	38
4.1	Considerações gerais.....	38
4.2	Princípio de funcionamento	39
4.3	Parâmetros do motor.....	39
4.4	Motor de quatro tempos	40
4.5	Motor de dois tempos	41
4.6	Ciclo teórico ideal de um motor diesel.....	42
5	Descrição do sistema experimental	44
5.1	Sistema de alimentação de combustível	45
5.2	Sistema de dissipação de energia	46
5.3	Descrição do motor	47
5.4	Instrumentação	48
5.4.1	Medição dos parâmetros elétricos	48
5.4.2	Medição do consumo de combustível.....	48
5.4.3	Medição da temperatura	48
5.5	Análise das emissões.....	48
6	Procedimento dos testes.....	50
7	Correção dos parâmetros de desempenho	52
8	Balanco de energia	54
9	Metodologia para análise da viabilidade econômica da utilização do óleo de dendê como combustível para geração de energia elétrica	57
9.1	Gasto anual com combustível	58
9.2	Custo de geração	59
9.3	Consumo específico de combustível.....	60
9.4	Preço do combustível.....	61
9.5	Custo de combustível.....	61
9.6	Custo do capital para a geração.	62
9.7	Custo de operação e manutenção para geração de energia utilizando dendê e diesel como combustível.....	63
9.8	Custo final	64
9.9	Análise econômica	67
10	Resultados	68
10.1	Desempenho.....	68
10.2	Emissões	74

11	Conclusão e recomendações para futuros trabalhos	79
12	Referências Bibliográficas.....	82
	Anexo 1	88
	Análise da propagação das incertezas das medidas	88
	Propagação das incertezas	88
	Anexos 2 Certificados	91

Lista de Figuras

Figura 1 Esquema do <i>kit</i> para conversão do motor diesel para óleo vegetal	23
Figura 2 Motor de Combustão Interna.....	38
Figura 3 Esquema de funcionamento de um motor 4 tempos	41
Figura 4 Esquema de funcionamento de um motor 2 tempos	41
Figura 5 Ciclo teórico de motor diesel	42
Figura 6 Esquema básico do experimento.	44
Figura 8 Resistências de Imersão	45
Figura 7 Controlador de Temperatura	45
Figura 9 (a) Painel de lâmpadas, (b) Painel de interruptores, (c) Painel de lâmpadas e interruptores.....	46
Figura 10 balanço energético do motor.....	54
Figura 11 Análise comparativa dos custos de geração	65
Figura 12 Variação percentual de combustível	66
Figura 13 Faixas de potência medida corrigida para cada carga.....	69
Figura 14 Valores médios da potência corrigida em função da carga.....	70
Figura 15 Valores médios da temperatura de escape em função da carga	71
Figura 16 Faixa de temperatura medida na exaustão do motor	72
Figura 17 Valores do consumo específico de combustível em função da carga	73
Figura 18 Eficiência térmica em função da carga.....	74
Figura 19 Emissão de dióxido de carbono em função da carga.....	75
Figura 20 Emissão de monóxido de carbono em função da carga.....	76
Figura 21 Óxido de nitrogênio em função da carga.....	77
Figura 22 Opacidade em função da carga	78
Figura 23 Balanço energético do motor	88
Figura 24 Teste de exatidão da potência e corrente elétrica.....	91

Lista de Tabelas

Tabela 1 Parâmetros em função da carga	19
Tabela 2 Comparação entre óleo de dendê e óleo diesel	33
Tabela 3 Viscosidade dos combustíveis	34
Tabela 4 Viscosidade do Óleo em Função da Temperatura	34
Tabela 5 Problemas na utilização do óleo vegetal	37
Tabela 6 Principais especificações técnicas do motor	47
Tabela 7 Dados técnicos básicos do Teste 350 XL.....	49
Tabela 8 Incerteza de consumo específico e eficiência térmica.....	90

Lista de Abreviaturas e símbolos

Letras Latinas

A – área

\dot{Q}_{ref} – calor absorvido pelo sistema

$c_{p_{agua}}$ – calor específico médio da água do resfriamento

\bar{P}_C – potência média medida

\dot{m}_{agua} – vazão de água para resfriamento do motor

\dot{m}_{ar} – vazão de ar que entra no motor,

\dot{m}_{comb} – vazão de combustível que entra no motor

\dot{m}_{gas} – vazão dos gases de exaustão,

C_c – custo de capital

C_{comb} – custo de combustível

CEC – consumo específico de combustível

C_g – custo de geração

$C_{O\&M}$ – custo de operação e manutenção

C_p – calor específico a pressão constante

C_v – calor específico a volume constante

EG – energia gerada

F – função

f – função

f_a – fator atmosférico

FC – fator de capacidade

f_m – fator do motor

FRC – fator de recuperação de capital

h_{ar} – entalpia do ar na entrada do motor

h_{comb} – entalpia do combustível

h_{gas} – entalpia dos gases de exaustão

i – taxa de desconto

ICMS – imposto sobre circulação de mercadorias e prestação de serviço

n – anos de operação

P_c – preço do combustível

PCI – poder calorífico inferior

PMI – ponto morto inferior

PMS – ponto morto superior

P_r – potência corrigida

p_r – pressão atmosférica de referência

P_{sr} – Pressão do vapor d'água de referência

P_{sy} – Pressão do vapor d'água durante o experimento

P_y – potência medida

p_y – pressão atmosférica medida durante o experimento

q – vazão mássica

Q_1 – calor de combustão

Q_2 – calor de exaustão

q_c – vazão mássica do ar de combustão por ciclo por litro

rpm – rotação por minuto

r_r – razão da pressão absoluta de ar da entrada do compressor com a saída nas condições de referência

t – tempo de operação

TIR – taxa interna de retorno

TMA – taxa mínima de atratividade

T_r – temperatura ambiente de referência

T_y – temperatura ambiente durante o experimento

V – volume de combustível medido

W_{ele} – trabalho elétrico do gerador

z – 120000 (constante para motor de quatro tempos)

Letras Gregas

α_c – fator de correção da potência

ϕ_y – umidade ambiente medida durante o experimento

ΔT_{agua} – variação da temperatura da água de resfriamento.

ϕ_r – umidade relativa de referência

∂ – derivada parcial

δ – incerteza

η – eficiência

π – 3,1415

Unidades

CV – cavalo vapor

CVh – cavalo vapor hora

GW – giga watts

°C – graus centígrados

ha – hectare

kcal – quilo caloria

kVA – quilo volt ampere

kW – quilo watt

ml – mililitro