

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO**



Ricardo Hernandez Pereira

**Avaliação Experimental e Previsão
do Desempenho de Motores Diesel
Consumindo Gás Natural**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós – graduação
do Departamento de Engenharia Mecânica do
Centro Técnico Científico da PUC – Rio como parte
dos requisitos para obtenção do grau de Doutor em
Engenharia Mecânica.

Orientadores:
Prof. Sergio Leal Braga
Prof. Carlos Valois Maciel Braga

Rio de Janeiro, 14 de Julho de 2006.



Ricardo Hernandez Pereira

**Avaliação Experimental e Previsão
do Desempenho de Motores Diesel
Consumido Gás Natural**

Tese apresentada ao Programa de Pós – graduação do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC – Rio como parte dos requisitos para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Sergio Leal Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica / PUC–Rio

Prof. Carlos Valois Maciel Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica / PUC–Rio

Prof. José Alberto dos Reis Parise

Departamento de Engenharia Mecânica / PUC–Rio

Prof. Luiz Fernando Alzuguir Azevedo

Departamento de Engenharia Mecânica / PUC–Rio

Prof. José Viriato Coelho Vargas

Universidade Federal do Paraná

Prof. Alvaro Toubes Prata

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Carlos Rodrigues Pereira Belchior

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico / PUC–Rio

Rio de Janeiro, 14 de Julho de 2006.

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

Ricardo Hernandez Pereira

Graduou-se em Engenharia Mecânica na PUC – Rio em 1995. Obteve o título de mestre nesta mesma instituição em 1998 (termociências experimental, com a medida e correlação de coeficientes de película em escoamentos monofásicos e com ebulição). Trabalhou entre 1999 e 2001 como pesquisador sênior na *Tecumseh do Brasil Ltda.*, sendo responsável pelo desenvolvimento de compressores para hidrocarbonetos com aplicação na refrigeração doméstica. Atualmente é coordenador de projetos no ITUC / PUC – Rio, estando envolvido na conversão de motores Diesel para o consumo do gás natural (ênfase na geração termelétrica).

Ficha Catalográfica

Pereira, Ricardo Hernandez

Avaliação experimental e previsão do desempenho de motores diesel consumindo gás natural / Ricardo Hernandez Pereira ; orientadores: Sergio Leal Braga, Carlos Valois Maciel Braga. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2006.

207 f. ; il. (col.) ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Motor diesel. 3. Gás natural. 4. Diesel. 5. Combustão. I. Braga, Sergio Leal. II. Braga, Carlos Valois Maciel. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

Aos orientadores Sergio Braga e Carlos Valois pelo convite de retorno à Universidade, confiança e amizade.

A PETROBRAS (Gerencia de Tecnologia do Gás Natural / CENPES) e BRASYMPE Energia S.A. pela suporte financeiro, via projetos setoriais CTPETRO e de Pesquisa e Desenvolvimento ANEEL.

A FINEP pelos equipamentos e instrumentação de laboratório.

A MWM Motores Diesel Ltda. pela cessão de motores para testes (comodato).

A CEG pelas instalações de gás natural encanado.

Ao Prefeito do Campus da PUC – Rio, Eduardo Lacourt, pela compreensão e incentivo.

Ao Instituto Tecnológico, ITUC / PUC – Rio, pelo suporte com a construção de equipamentos para a Sala de Testes em Motores do LEV / PUC – Rio.

Aos colegas Giovanni Calfa Neto, Mauricio Ladeira Casado e Julio César Egusquiza pelo companheirismo e continuado incentivo.

Ao Engenheiro Severino Wanderley e ao Mestre Nestor Corrêa Cotelô pelo suporte eletrônico e com instrumentação.

Aos, na época alunos de Iniciação Científica, Jayme Frota Renha, Pedro Moura Maciel Braga e Rafael César Góes pelo auxílio nas medidas de desempenho.

Aos técnicos Fabrício Ferraz Gonçalves e Gilson Coutinho Pradanoff pelo auxílio com na montagem do aparato experimental.

Resumo

Pereira, Ricardo Hernandez; Braga, Sergio Leal; Braga, Carlos Valois Maciel. **Avaliação experimental e previsão do desempenho de motores Diesel consumindo gás natural**. Rio de Janeiro, 14 de Julho de 2006. 207p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Medidas do desempenho de quatro diferentes motores, todos operando no modo bicomcombustível Diesel / gás natural, foram realizadas em dinamômetro de bancada. Selecionaram-se os motores a ensaiar por suas características construtivas e operacionais, representativas das distintas aplicações dos motores Diesel (cilindrada, faixa de rotação, uso ou não da turbo-alimentação e arrefecimento do ar de combustão). Variou-se a razão de substituição de Diesel por gás natural de modo a levantar as regiões por onde a operação bicomcombustível é possível. Embora o foco do trabalho esteja sobre o desempenho também se tomaram dados relativos às emissões (fumaça / opacidade), tanto durante a operação original Diesel, quanto na bicomcombustível. Foram propostas correlações empíricas para o rendimento térmico indicado, eficiência volumétrica e atrito em motores Diesel. Podem-se usar, na falta de dados experimentais prévios, tais correlações na estimativa do desempenho de motores diferentes dos testados. Os resultados indicam que, por grande parte dos campos de funcionamento, apenas parte do gás natural efetivamente queima. Em motores operando a baixa carga cerca de 20 – 30 % do gás fornecido passa ao coletor de escape sem reagir. Desenvolveu-se um modelo simples para a queima Diesel / gás. Parâmetros empíricos exigidos por tal modelo foram levantados com base dos pontos experimentais obtidos. Sugere-se usar tal modelo na previsão do desempenho Diesel / gás de motores ainda não testados no modo bicomcombustível. Os resultados sugerem que, em motores operando com razão ar / gás natural superior a, aproximadamente, 30, a queima do gás ocorre apenas no entorno do Diesel. Em misturas de razão ar / gás inferior a 30 a queima em frentes de chama parece ocorrer. Em tais casos fica-se, também, sujeito ao funcionamento com detonação. As correlações empíricas levantadas foram utilizadas na conversão Diesel / gás natural de três diferentes grupos geradores de eletricidade (motores de 212, 535 e 1.570 hp). De forma distinta das medidas tomadas em laboratório as conversões destes geradores foram feitas em campo, sem oportunidade para a medida cuidadosa e metódica de todos os parâmetros de interesse. Os dados verificados nas conversões de tais grupos geradores, quando considerados adequados, foram incorporados ao presente trabalho.

Palavras-chave

Motores, Diesel, Gás natural, Geração termelétrica, Combustão.

Abstract

Pereira, Ricardo Hernandez; Braga, Sergio Leal (Advisor); Braga, Carlos Valois Maciel (Advisor). **Experimental investigation and performance estimate of Diesel engines burning natural gas**. Rio de Janeiro, July of 2006. 207p. PhD Thesis – Mechanical Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Four Diesel engines, all running on the Diesel / natural gas dual fuel mode, were dynamometer tested. Engines were selected based on their distinct construction, operating parameters and engine field use. The Diesel / natural gas substitution was varied in order to determine the dual fuel operation limits. Measurements related to particulate emissions (smoke and opacity) were also made. Correlations for indicated thermal efficiency, volumetric efficiency and engine friction were proposed. It's suggested that those can be used on the performance estimate of engines when little or no previous test data is available. The dual fuel test results indicate that, according to engine load, part of the gas does not burn. In engines running on low load as much as 20 – 30 % of the gas supplied simply reaches exhaust manifold unreacted. A simple model for the dual fuel combustion was proposed. An empirical correlation for a combustion parameter, that arouse in the modeling was, base on test results, proposed. It's suggested that the semi-empirical dual fuel model can be used for the performance estimate of Diesel engines, when burning natural gas, not previously tested on the dual fuel mode. Results indicate that, for engines running on air / gas ratios above 30, combustion appear to remain limited to Diesel droplets neighborhood. For richer mixtures gas combustion appear to occur on flame fronts. Audible knock was noticed on engines running on air / gas ratios below, approximately, 30. The empirical correlations proposed were used for the dual fuel conversion of three different genset engines (212, 535 and 1.570 bhp). Gensets data, when appropriate, is also reported in the present work.

Keywords

Engines; Diesel; Natural Gás; Power Generation; Dual – Fuel.

Sumário

Lista de figuras	08
Lista de tabelas e nomenclatura	10
1. Introdução	13
1.1. O consumo do gás natural em motores	22
1.2. Setores onde a conversão Diesel/gás pode encontrar aplicação	24
1.3. Objetivos	29
1.4. Atividades desenvolvidas e organização da Tese	30
2. Antecedentes do uso do gás natural em motores Diesel	33
3. Equacionamento do desempenho e modelo da queima Diesel/Gás	49
3.1. Equacionamento do desempenho de motores	49
3.2. Modelo da combustão Diesel / gás	51
4. Aparato e procedimento experimental	56
4.1. Sala para testes em motores	61
4.2. Motores ensaiados	68
5. Redução de dados	78
5.1. Análise das incertezas experimentais	81
6. Resultados	85
6.1. Atrito em motores	91
6.2. Relação entre os consumos de ar, Diesel e gás natural	97
6.3. Rendimento térmico e eficiência volumétrica	109
6.4. Opacidade e emissões de poluentes particulados	118
7. Conclusões e recomendações	122
8. Referências bibliográficas	128
Apêndice I: Propriedades termofísicas	143
Apêndice II: Pontos experimentais	147

Lista de Figuras

Figura 1 – Composição da matriz energética nacional	15
Figura 2 – Consumo de Diesel no Brasil	16
Figura 3 – Representações da combustão Diesel / gás	52
Figura 4 – Esquema do aparato experimental	57
Figura 5 – Vistas do dinamômetro de bancada	61
Figura 6 – Detalhes do dinamômetro de bancada	61
Figura 7 – Eixo cardan, acoplando motor ao freio do dinamômetro	62
Figura 8 – Bocais ASME	63
Figura 9 – Bocais em vaso de pressão e entrada de tambor	64
Figura 10 – Balança de combustível e medidor de blow-by	65
Figura 11 – Opacimetro e Smoke Meter	66
Figura 12 – Filtro do Smoke Meter	67
Figura 13 – Torre de resfriamento, escape e rede de gás encanado	67
Figura 14 – Tanques de Diesel, bombas d'água e estação de gás	68
Figura 15 – Motor MWM modelo 4.10 TCA	69
Figura 16 – Motor MWM modelo 4.07 TCA	70
Figura 17 – Motores MWM modelos 229-6 e TD229-EC6	70
Figura 18 – Motores MWM modelos 229-6 e TD229-EC6	71
Figura 19 – Grupo gerador com motor Perkins 1006 TAG	72
Figura 20 – Balancins e válvulas do Perkins 1006 TAG	73
Figura 21 – Grupo gerador com motor Cummins NTA855G3	73
Figura 22 – Balancins e válvulas do Cummins NTA855G3	73
Figura 23 – Grupos geradores com o Perkins 4012 TAG2	74
Figura 24 – Sistema para dosagem de gás aos Perkins 4012 TAG2	74
Figura 25 – Banco de carga	75
Figura 26 – Medida do consumo de Diesel	75
Figura 27 – Resultados típicos para consumo de Diesel	86
Figura 28 – Resultados típicos para consumo de gás natural	86
Figura 29 – Resultados típicos para consumo de ar	87
Figura 30 – Resultados típicos de emissões	87

Figura 31 – Resultados típicos de emissões	88
Figura 32 – Resultados típicos para consumo específico aparente	89
Figura 33 – Resultados típicos para temperatura de escape	90
Figura 34 – MWM 4.07 TCA (modo original Diesel)	92
Figura 35 – MWM 4.10 TCA (modo original Diesel)	93
Figura 36 – MWM 229–6 (modo original Diesel)	93
Figura 37 – MWM TD229–EC6 (modo original Diesel)	94
Figura 38 – Grupos geradores (modo original Diesel)	94
Figura 39 – Grupos geradores (modo original Diesel)	96
Figura 40 – Atrito típico de motores Diesel	96
Figura 41 – Razão f_G/f_Q para motores no modo Diesel / gás natural	98
Figura 42 – Início da propagação de chama no MWM 4.07 TCA	99
Figura 43 – Início da propagação de chama no MWM 4.10 TCA	100
Figura 44 – Início da propagação de chama no MWM 229–6	101
Figura 45 – Início da propagação de chama no MWM TD229–EC6	102
Figura 46 – Início da propagação de chama no Perkins 1006 TAG	103
Figura 47 – Variação de f_Q com f_D no MWM 4.07 TCA	105
Figura 48 – Variação de f_Q com f_D no MWM 4.10 TCA	105
Figura 49 – Variação de f_Q com f_D no MWM 229–6	106
Figura 50 – Variação de f_Q com f_D no MWM TD229–EC6	106
Figura 51 – Sensibilidade de f_Q à razão ar / gás natural	107
Figura 52 – Sensibilidade de f_Q à razão ar / gás natural	107
Figura 53 – Relação entre f_Q e f_D na operação Diesel / gás natural	108
Figura 54 – Rendimento térmico indicado no MWM 4.07 TCA	110
Figura 55 – Rendimento térmico indicado no MWM 4.10 TCA	111
Figura 56 – Rendimento térmico indicado no MWM 229–6	111
Figura 57 – Rendimento térmico indicado no MWM TD229–EC6	112
Figura 58 – Rendimento térmico indicado no Perkins 1006 TAG	112
Figura 59 – Variação de η_T com f_D em motores Diesel	113
Figura 60 – Eficiência volumétrica no MWM 4.07 TCA	114
Figura 61 – Eficiência volumétrica no MWM 4.10 TCA	115
Figura 62 – Eficiência volumétrica no MWM 229–6	115
Figura 63 – Eficiência volumétrica no MWM TD229–EC6	116

Figura 64 – Variação de η_v com a vazão de ar (MWM TD229–EC6)	116
Figura 65 – Eficiência volumétrica no Perkins 1006 TAG	117
Figura 66 – Eficiência volumétrica em motores Diesel	117
Figura 67 – Opacidade de motores Diesel e Diesel / gás	119
Figura 68 – Particulados no funcionamento Diesel e Diesel / gás	120
Figura 69 – Filter Smoke Number (FSN) – Diesel e Diesel / gás	121

Lista de Tabelas

Tabela I – Motores ensaiados em dinamômetro de bancada	69
Tabela II – Especificações – Motores dos grupos geradores	71
Tabela AI.I – Gás natural distribuído no Rio de Janeiro	143
Tabela AII.I – Motor MWM 4.07 TCA (2.400 rpm)	148
Tabela AII.II – Motor MWM 4.10 TCA (1.800 rpm)	160
Tabela AII.III – Motor MWM 229–6 (1.400 rpm)	170
Tabela AII.IV – Motor MWM TD229–EC6 (1.600 rpm)	188

Nomenclatura

A	– Área da garganta dos bocais ASME (m^2)
AD	– Razão ar / Diesel (–)
AG	– Razão ar / gás natural (–)
C_d	– Coeficiente de descarga (–)
cea	– Consumo específico aparente (g / kW.h, expressão 18)
d	– Diâmetro da garganta dos bocais ASME (m)
f	– Razão de equivalência (–)
\dot{m}	– Vazão mássica (kg / s, expressão 11)
P	– Potência (W)
PCI	– Poder calorífico inferior (J / kg)
PMI	– Ponto morto inferior
PMS	– Ponto morto superior

R_{DG} – Razão de substituição Diesel / gás natural (–, expressão 9)

Re – Número de Reynolds (–, expressão 13)

T – Torque (Nm)

Subscritos

A – Atrito

ar – Ar seco

D – Diesel

D,O – Funcionamento original Diesel

E – Relativo à mistura estequiométrica ou eixo

gás – Relativo à vazão de gás natural fornecido aos motores

gás,q – Relativo à parcela da vazão total de gás que queima

m – mistura de gases (ar e gás natural) fornecida aos cilindros

Q – Relativo ao modelo de combustão Diesel / gás natural

Símbolos Gregos

\forall – Cilindrada (m^3)

μ – Viscosidade (Pa.s)

η_{\forall} – Eficiência volumétrica (–)

η_T – Rendimento térmico indicado (–)

ρ – Densidade (kg/m^3)

ω – Rotação (rd/s) ou Razão de umidade (–)

The true meaning of a term is to be found by observing what a man does with it,
not what he says about it.

Percy Bridgman, citado por Benedict (1984).