

Fernando Ferrari Filho

**Análise de um Motor do Ciclo Diesel operando no Modo
Bicombustível: Diesel / Etanol**

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: Carlos Valois Maciel Braga
Co-orientador: Sergio Leal Braga

Rio de Janeiro
Dezembro de 2011



Fernando Ferrari Filho

**Análise de um Motor do Ciclo Diesel operando no Modo
Bicombustível: Diesel / Etanol**

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

Prof. Carlos Valois Maciel Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Sergio Leal Braga

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. José Alberto dos Reis Parise

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Ph.D Julio César Cuisano Egúsquiza

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 20 de dezembro de 2011

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

Fernando Ferrari Filho

Formado em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em dezembro de 2008. Atualmente trabalha na área de gerenciamento de projetos.

Ficha Catalográfica

Ferrari Filho, Fernando

Análise de um motor do ciclo diesel operando no modo bicomcombustível: diesel/etanol / Fernando Ferrari Filho; orientador: Carlos Valois Maciel Braga ; co-orientador: Sergio Leal Braga. – 2011.

118 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2011.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Motor diesel. 3. Etanol. 4. Liberação de calor. 5. Emissões. I. Braga, Carlos Valois Maciel. II. Braga, Sergio Leal. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CCD: 621

Agradecimentos

À minha mãe, pelo incentivo, apoio e amor, que me deu forças para lutar e concretizar o presente trabalho.

Aos Professores Carlos Valois Maciel Braga e Sergio Leal Braga pelo grande incentivo e confiança depositada, mesmo com as grandes mudanças realizadas ao longo dos três últimos anos, acreditando em mim.

A PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao doutor engenheiro mecânico Júlio Cesar Cuisano Egúsquiza pelo grande apoio e uma grande amizade.

A Promon Engenharia por incentivar e acreditar em mim, colaborando com os créditos educativos para a realização do mestrado.

Ao ITUC, Instituto Tecnológico da PUC-Rio, através dos funcionários administrativos, ressaltando Leandro Góis por sempre presente nas questões de informática.

Resumo

Filho, Fernando Ferrari; Braga, Carlos Valois Maciel; Braga, Sergio Leal. **Análise de um Motor do Ciclo Diesel Operando no Modo Bicombustível: Diesel / Etanol.** Rio de Janeiro, 2011. 118p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho avaliou o comportamento de um motor do ciclo Diesel, operando no modo original (Diesel puro) e no modo bicombustível (Diesel / etanol), em dois modos de hidratação do álcool (70 e 93° INPM). A rotação foi mantida fixa em 1800 rpm. A finalidade foi estudar os parâmetros de desempenho do motor e analisar a liberação de calor pela combustão, como também, o calor trocado com as paredes. Avaliou-se como parâmetros de desempenho, o rendimento térmico, consumo específico de combustível e emissão de poluentes. A fase inicial do trabalho constou de ensaios experimentais realizados no conjunto motor / dinamômetro nos modos mencionados acima. O objetivo foi coletar a variação de pressão no interior do cilindro, consumo de combustível, emissão de gases, temperaturas em pontos estratégicos, entre outros. Em uma segunda etapa foi realizada uma análise dos parâmetros de desempenho e da liberação de calor. Para emissões de poluentes, observou-se uma diminuição de MP em altas taxas de substituição. No entanto, notou-se um aumento elevado de HC. Em baixas cargas e taxas de substituição elevadas houve redução de emissão de NOx. O rendimento térmico apresentou comportamentos similares em 70 e 93° INPM. Em altas cargas e altas taxas de substituição houve um sensível aumento do rendimento quando comparado ao modo original. O rendimento foi menor para baixas cargas com altas taxas de substituição, em relação ao modo original. O início da combustão no modo bicombustível foi antecipado em relação ao modo original, nas condições de altas cargas e máximas taxas de substituição. Isto foi devido à liberação de calor que ocorreu mais cedo no modo bicombustível. Ressalta-se que, nas mesmas condições, houve a ocorrência de um maior calor trocado com as paredes do cilindro, em ambos os modos de hidratação (70 – 93° INPM), quando comparado ao modo original.

Palavras-chave

Motores Diesel; etanol; liberação de calor; emissões

Abstract

Filho, Fernando Ferrari; Braga, Carlos Valois Maciel (Advisor); Braga, Sergio Leal (Co-Advisor). **Evaluation of Diesel Cycle Engine Operating in the Dual Fuel Mode: Diesel / Ethanol**. Rio de Janeiro, 2011. 118p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work aimed to evaluate a Diesel cycle engine operating in the original (only Diesel) and dual-fuel modes (Diesel / ethanol) in two levels of hydration of alcohol (70 and 93° INPM). Speed was kept fixed at 1800 rpm. The purpose was to study the parameters of engine performance and analyze the heat release by combustion and heat exchanged to the cylinder's walls. For parameters of performance, evaluation of thermal efficiency, specific fuel consumption and emissions were conducted. Initial activities consisted in trial tests on the engine / dynamometer in the two modes as mentioned above. The goal was to collect the variation of indicated cylinder pressure data, as well as fuel consumption, emissions and temperatures at strategic points. Secondly, performance parameters and heat release analysis was performed. For emissions, a decrease in PM was found at higher replacement rates; however, in the same condition a large increase in HC was obtained. At low loads and at higher replacement rates, NOx emissions were reduced. Thermal efficiency showed similar behavior at 70 and 93° INPM. At high loads and at higher replacement rates a significant increase in thermal efficiency compared to the original mode and for low loads with higher replacement rates thermal efficiency was decreased. In high loads and at higher replacement rates conditions, the process of combustion occurred before in the dual fuel mode, due to earlier heat release compared to original mode (only Diesel). In the same conditions an increase of heat exchanged to the cylinder's wall in both modes of hydration of alcohol (70 and 93° INPM) compared to the original mode was obtained.

Keywords

Diesel engines; ethanol; heat release; emissions.

Sumário

1 Introdução	14
1.1. Evolução dos Motores Diesel	18
1.2. Motivação	19
1.3. Objetivo	21
1.4. Descrição da Dissertação	22
2 Revisão Bibliográfica e Tópicos Técnicos	23
2.1. Revisão Bibliográfica	23
2.2. Tópicos Técnicos	29
3 Método de Modelagem e Procedimento de Cálculo	42
3.1. Temperatura no Interior do Cilindro	46
3.2. Transferência de Calor pelas Paredes do Cilindro	47
3.3. Pressão sem Combustão	49
3.4. Procedimento de Cálculo	50
4 Procedimento Experimental e Redução de Dados	54
4.1. Motor Diesel	55
4.2. Pressão no Interior da Câmara	56
4.3. Softwares de Controle	57
4.4. Injeção de Álcool	58
4.5. Smoke Meter	59
4.6. TESTO	59
4.7. Potência	60
4.8. Rendimento Térmico	60
4.9. Consumo de Etanol	61
4.10. Consumo Específico de Combustível	61
4.11. Taxa de Substituição	62
4.12. Trabalho Indicado	63
4.13. Equações Geométricas	63

5 Resultados e Discussões	66
5.1. Parâmetros de Desempenho	68
5.2. Trabalho Útil Gerado	76
5.3. Curva de Pressão no Interior do Cilindro	79
5.4. Temperatura Média no Interior do Cilindro	86
5.5. Calor Liberado no Processo de Combustão	91
5.6. Calor Perdido pelas Paredes do Cilindro	102
6 Conclusões e Recomendações	111
Referências Bibliográficas	115

Lista de figuras

Figura 1: Oferta interna de energia (BEN, 2011)	17
Figura 2: Atraso de ignição, motor Diesel (Guibet, 1999)	35
Figura 3: Fases da combustão - motor Diesel (Heywood, 1988)	37
Figura 5: Bancada dinamométrica PUC-Rio	54
Figura 6: Motor Diesel MWM	55
Figura 7: Transdutor de pressão	57
Figura 8: Star da AVL e software de controle PUMA	58
Figura 10: Equipamento de medição de poluentes	59
Figura 11: Conjunto cilindro-pistão (Heywood, 1988)	64
Figura 12: Pressão máxima por ciclo em 100% de carga @ 93°INPM	67
Figura 13: Pressão no interior do cilindro - ciclo 75, CoV(Pmáx) de 1%	68
Figura 14: Rendimento térmico por taxa de substituição e carga do motor @ 1800 rpm com 70 e 93° INPM	70
Figura 15: Consumo específico de combustível por taxa de substituição e carga do motor @ 1800 rpm com 70 e 93° INPM	72
Figura 19: Curva de pressão por volume em 100% de carga, 93° INPM @ 1800 rpm	76
Figura 20: Pressão do cilindro em 100% de carga – 93° INPM	79
Figura 21: Pressão do cilindro em 100% de carga – 70° INPM	80
Figura 22: Pressão do cilindro em 75% de carga – 93° INPM	81
Figura 23: pressão do cilindro em 75% de carga - 70% INPM	81
Figura 24: Pressão do cilindro em 50% de carga – 93° INPM	82
Figura 25: Pressão do cilindro em 50% de carga – 70° INPM	83
Figura 26: Pressão do cilindro em 25% de carga – 93° INPM	84
Figura 27: Pressão do cilindro em 25% de carga – 70° INPM	84
Figura 29: Temperatura em 100% de carga – 93° INPM	86
Figura 30: Temperatura em 100% de carga – 70° INPM	87
Figura 31: Temperatura em 75% de carga – 93° INPM	87
Figura 34: Temperatura em 50% de carga – 70° INPM	89
Figura 36: Temperatura em 25% de carga – 70° INPM	90

Figura 37: Curva de liberação de calor em 100% de carga - 93° INPM	92
Figura 38: Calor total liberado em 100% de carga – 93° INPM	92
Figura 40: Calor total liberado em 100% de carga – 70° INPM	94
Figura 42: Calor total liberado em 75% de carga – 93° INPM	95
Figura 44: Calor total liberado em 75% de carga – 70° INPM	96
Figura 46: Calor total liberado em 50% de carga – 93° INPM	97
Figura 47: Curva de liberação de calor em 50% de carga - 70° INPM	98
Figura 48: Calor total liberado em 50% de carga – 93° INPM	99
Figura 49: Curva de liberação de calor em 25% de carga - 93° INPM	99
Figura 50: Calor total liberado em 25% de carga – 93° INPM	100
Figura 51: Curva de liberação de calor em 25% de carga - 70° INPM	101
Figura 52: Calor total liberado em 25% de carga – 70° INPM	101
Figura 55: Calor instantâneo perdido em 100% de carga - 70° INPM	103
Figura 57: Calor instantâneo perdido em 75% de carga - 93° INPM	104
Figura 59: Calor instantâneo perdido em 75% de carga - 70° INPM	105
Figura 61: Calor instantâneo perdido em 50% de carga - 93° INPM	106
Figura 63: Calor instantâneo perdido em 50% de carga - 70° INPM	107
Figura 65: Calor instantâneo perdido em 25% de carga - 93° INPM	108
Figura 67: Calor instantâneo perdido em 25% de carga - 70° INPM	109

Lista de tabelas

Tabela 1: Consumo de Combustíveis - 2009 e 2010 (BEN 2011)	17
Tabela 2: Propriedades físico-químicas dos combustíveis (1 atm e 288 K)	32
Tabela 3: Ficha técnica do motor	56
Tabela 4: Taxas de substituição em 70 e 93° INPM @ 1800 rpm	69
Tabela 5: Trabalho útil em 70 e 93° INPM @ 1800 rpm	77

Nomenclatura

(A/C)	Razão ar-combustível
$(A/C)_s$	Razão ar-combustível estequiométrica
B	Diâmetro do cilindro
C	Carbono
cec	Consumo específico de combustível (g/kW.h)
CO	Monóxido de Carbono
CO_2	Dióxido de Carbono
CoV	Coeficiente de Variação
c_p	Calor específico a pressão constante
c_v	Calor específico a volume constante
C_2H_5OH	Etanol
$C_{12}H_{26}$	Dodecano (Óleo Diesel leve)
h	Coeficiente global de troca de calor (W/m ² K)
H_2O	Vapor d'água
m_{ar}	Massa de ar
m_{comb}	Massa de combustível
\dot{m}	Vazão mássica (kg/h)
N	Velocidade angular (rpm)
O_2	Oxigênio
P	Potência
PCI	Poder calorífico inferior (J/kg)
PME	Pressão Média Efetiva (bar)
R_{ar}	Constante do ar (J/kg.K)
T	Torque (N.m)
TS	Taxa de substituição (%)
V_d	Volume deslocado por ciclo (m ³)
W	Trabalho útil (J)

Subscritos e Letras Gregas

e	Relativo à vazão mássica do etanol
ρ	Massa específica do ar (kg/m ³)
$\eta_{t,d}$	Rendimento térmico no modo Diesel (%)
$\eta_{t,Da}$	Rendimento térmico no modo Diesel-etanol (%)
β	Emissividade
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
$\Delta\theta$	Variação do ângulo do virabrequim
γ	Razão entre os calores específicos