



Julio Cesar Cuisano Egúsquiza

Redução das Emissões em Motores Diesel-gás

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.

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

Rio de Janeiro, 06 de outubro de 2006



Julio Cesar Cuisano Egúsquiza

Redução das Emissões em Motores Diesel-gás

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. Carlos Valois Maciel Braga

Co-Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. Hécio Rangel Barreto Orlande

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 06 de outubro de 2006

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

Julio Cesar Cuisano Egúsquiza

Formado em Engenharia Mecânica de Fluidos pela Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú, em Dezembro de 2000. Desde 2001 até 2004 atuou como engenheiro de projetos em diversas empresas peruanas, na área de motores de combustão interna e energia.

Ficha Catalográfica

Egúsquiza, Julio César Cuisano

Redução das emissões em motores Diesel-gás / Julio Cesar Cuisano Egúsquiza; orientadores: Sergio Leal Braga, Carlos Valois Maciel Braga. – Rio de Janeiro; PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2006.

145 f. : il. ; 30 cm

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

Incluí referências bibliográficas.

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

CDD: 621

A mi esposa Zaida, por el inmenso amor y todo el apoyo que nunca me faltó.
A mis padres y hermanos, por su optimismo y confianza.

Agradecimentos

Aos Professores Sergio Leal Braga e Carlos Valois Maciel Braga, pela confiança, estímulo e apoio durante o desenvolvimento de todo o mestrado.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, através dos professores de pós-graduação e do corpo administrativo.

A PETROBRAS (CENPES), pelo suporte financeiro no presente trabalho.

Ao ITUC (Instituto Tecnológico da PUC-Rio), através dos funcionários administrativos e funcionários da oficina mecânica, pela ajuda logística e técnica.

Aos colegas Ricardo Hernandez Pereira e Mauricio Ladeira Casado pela colaboração, companheirismo e permanente incentivo.

Aos colegas Nestor Corrêa Cotélo e Severino Wanderley pelo suporte eletrônico e amizade.

Aos futuros engenheiros mecânicos da PUC-Rio, André Braga e Felipe Duncan, pela amizade, apoio na parte experimental e colaboração no presente trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Veicular da PUC-Rio, Gilson Coutinho Pradanoff e Fabrício Ferraz Gonçalves, pelo apoio durante a montagem do aparato experimental.

Aos casais: Beatriz Mejia e Habib Zambrano, Márcia Pradanoff e Gilson Coutinho, pela amizade e estímulo.

Ao Professor Andrés Valderrama Romero, pelo incentivo dos estudos no Brasil.

A CAPES, pelo suporte financeiro.

Resumo

Egúsquiza, Julio César Cuisano; Braga, Sergio Leal; Braga, Carlos Valois Maciel. **Redução das Emissões em Motores Diesel-gás.** Rio de Janeiro, 2006. 145p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste estudo, os esforços são concentrados em se buscar a redução das emissões em motores Diesel-gás. Assim, são apresentados resultados experimentais, obtidos em dinamômetro de bancada, das emissões e desempenho de um motor do ciclo Diesel (turbo alimentado e com intercooler), para operar, reversivelmente, como motor Diesel-gás ou Diesel original. Inicialmente, foram executados ensaios nas duas versões, Diesel e Diesel-gás; logo, os resultados respectivos foram comparados em termos de emissões e desempenho do motor. A seguir, na operação Diesel-gás, foi avaliado o método da restrição parcial do ar de admissão, a fim de produzir uma mistura efetivamente mais rica para a mesma quantidade do gás natural. Os resultados obtidos mostraram uma notável redução nas emissões de monóxido de carbono e hidrocarbonetos não queimados, para toda a faixa de operação avaliada. Por outro lado, as emissões de material particulado continuaram sendo ínfimas em altas taxas de substituição e os níveis de óxidos de nitrogênio apresentaram certo incremento em altas cargas do motor. Quanto ao rendimento térmico, verificam-se acréscimos quando é alcançado certo valor de taxa de substituição. Contudo, os resultados de emissões e rendimento térmico apresentam melhores resultados em baixas cargas do motor (abaixo de 50% da plena carga). Assim, além de reduzirem-se os níveis de certas emissões em altas cargas, verificou-se uma contribuição adicional do presente trabalho no que diz respeito à redução, de forma parcial, de um dos principais problemas envolvendo a combustão em motores Diesel-gás: a queima incompleta de misturas pobres em cargas baixas.

Palavras-chave

Motor Diesel-Gás, Combustão, Emissões, Gás Natural.

Abstract

Egúsquiza, Julio César Cuisano; Braga, Sergio Leal; Braga, Carlos Valois Maciel. **Reduction of the Emissions in Gas-Diesel Engines**. Rio de Janeiro, 2006. 145p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The focus of this study is the reduction of emissions in Gas-Diesel engines. The experimental results of emissions and performance of a Diesel cycle engine (with turbo and intercooler), obtained by a dynamometer, are presented for operation as Gas-Diesel and as original Diesel engine. First, two kinds of operation were tested: Diesel and Gas-Diesel; then, the respective results of emissions and performance of the motor were compared. After, in Gas-Diesel operation, was evaluated the method of the partial restriction of the admission air, to produce a richer mixture with the same quantity of natural gas used before. The obtained results show a notable reduction of the emissions of carbon monoxide and unburned hydrocarbons for the whole range of evaluated operation. On the other hand, the particulate emissions had kept minimis at high rates of substitution and the nitrogen oxides levels presented a bit of increase at high engine load. The thermal performance increases when is achieved a determinate substitution rate value. However, the emissions and thermal performance results have a better behavior at low engine loads (below 50% of the full load). Thus, beyond the levels of some emissions are reduced at high loads, in addition, a reduction was found, of partial form, from one of the main problems involving combustion in Gas-Diesel engines: the incomplete burning of poor mixtures in low loads.

Palavras-chave

Gas-Diesel Engine, Combustion, Emissions, Natural Gas.

Sumário

1 Introdução	15
1.1. Poluição Atmosférica e Veículos Automotores	17
1.2. Objetivos do Presente Trabalho	23
1.3. Descrição da Dissertação	23
2 Revisão Bibliográfica	24
2.1. Propriedades do Gás Natural e do Óleo Diesel	24
2.2. Combustão em Motores Diesel-gás	27
2.2.1. Combustão Perfeita e Real	28
2.2.2. Combustão Real	31
2.2.3. Processo de Combustão em Motores Diesel-gás	31
2.3. Formação de Poluentes em motores Diesel-gás	34
2.3.1. Formação de MP	35
2.3.2. Formação de NO _x	36
2.3.3. Formação de CO	38
2.3.4. Formação de HC	39
2.4. Métodos Utilizados na Redução de Emissões em Motores Diesel-gás	41
3 Aparato Experimental	45
3.1. Equipamentos e Dispositivos de Medição e Controle	47
3.1.1. Motor Diesel	47
3.1.2. Dinamômetro Elétrico de Bancada	48
3.1.3. Atuador Eletrônico da Bomba de Injeção Diesel	48
3.1.4. Controlador Eletrônico do Ar de Admissão	49
3.1.5. Medição do Consumo de Óleo Diesel	49
3.1.6. Medição do Consumo de Ar de Admissão	50
3.1.7. Medição do Consumo de Gás Natural	51
3.1.8. Medição da Pressão	51
3.1.9. Medição da Temperatura	52
3.1.10. Computador e Software de Controle “Star”	53
3.1.11. Medição de Emissões	54
3.1.12. Medidor de <i>Blow-by</i>	57
3.1.13. Equipamentos de Apoio	57

4 Metodologia e Desenvolvimento dos Ensaios	62
4.1. Ensaio Motor Diesel	63
4.2. Ensaio Motor Diesel-gás	64
4.3. Ensaio Motor Diesel-gás com Restrição Parcial do Ar de Admissão	66
4.4. Redução de Dados	67
4.4.1. Potência	68
4.4.2. Pressão Média Efetiva	68
4.4.3. Consumos de Ar Úmido e Ar Seco	68
4.4.4. Cálculo da Massa Específica do Ar Ambiente	69
4.4.5. Cálculo da Velocidade do Ar nos Bocais de Medição	70
4.4.6. Consumo de Gás	71
4.4.7. Cálculo da Massa Específica do Gás Natural	71
4.4.8. Cálculo da Velocidade do gás nos Bocais de Medição	72
4.4.9. Consumo Específico de Combustível	73
4.4.10. Rendimento Térmico	74
4.4.11. Eficiência Volumétrica	75
4.4.12. Razão Ar/Combustível	75
4.4.13. Razão de Equivalência	76
4.4.14. Taxa de Substituição	78
4.4.15. Emissões Específicas	78
5 Resultados e Discussões	82
5.1. Resultados das Emissões nas Operações Diesel e Diesel-gás	84
5.2. Resultados das Emissões e Parâmetros de Desempenho na Operação Diesel-gás com Restrição Parcial do Ar de Admissão	91
6 Conclusões e Recomendações	114
7 Referencias Bibliográficas	118
Apêndice A: Análise das Incertezas Experimentais	124
Apêndice B: Planilhas	139

Lista de figuras

Figura 1 – Emissões por tipo de fonte na região metropolitana de Rio de Janeiro.	21
Figura 2 – Particulados no escape - variação com carga e taxa de substituição (1800 rpm).	36
Figura 3 – NO com variação da razão da massa de gás natural, em 2000 rpm e varias cargas do motor.	37
Figura 4 – HC e CO em função da razão da massa de gás natural, em 2000 rpm e varias cargas do motor.	38
Figura 5 – Regiões de formação de hidrocarbonetos não queimados no motor Diesel-gás.	40
Figura 6 – Esquema do aparato experimental	46
Figura 7 – Vistas do motor MWM, modelo 4.10 TCA.	47
Figura 8 – Vistas da bancada do dinamômetro AVL, modelo Alpha 240.	48
Figura 9 – Atuador eletrônico da bomba de injeção diesel (lado esquerdo) e regulador do curso do acelerador (lado direito).	48
Figura 10 – Borboleta eletrônica do ar de admissão (lado esquerdo) e controlador eletrônico da borboleta (lado direito).	49
Figura 11 – Balança do combustível diesel.	49
Figura 12 – Tambor para a medição do consumo de ar do motor	50
Figura 13 – Sistema de medição do gás natural	51
Figura 14 – Arranjo dos transdutores de pressão.	52
Figura 15 – Computador da bancada do dinamômetro.	54
Figura 16 – Interface de controle e monitoramento do software “START”	54
Figura 17 – Equipamento de medição de emissões Testo.	55
Figura 18 – <i>Smoke Meter</i> (lado esquerdo) e medidor de <i>Blow-by</i> (lado direito).	57
Figura 19 – Equipamentos de apoio	58
Figura 20 – Montagem do motor na bancada do dinamômetro	59
Figura 21 – Vista geral do experimento	59
Figura 22 – Cabine de controle e monitoramento	60
Figura 23 – Vista lateral esquerda do motor e dinamômetro	60
Figura 24 – Vista lateral direita do motor e dinamômetro	61
Figura 25 – <i>Smoke Meter</i>	61
Figura 26 – Curvas de potência, torque e consumo específico de combustível em plena carga variando com a rotação, para as operações Diesel e Diesel-gás (com máxima taxa de substituição).	83
Figura 27 – Razão de equivalência versus rotação e carga, para as operações Diesel e Diesel-gás (com máxima taxa de substituição).	85

Figura 28 – Emissões específicas de monóxido de carbono (CO) com variação da rotação e carga para as operações Diesel e Diesel-gás (com máxima taxa de substituição).	88
Figura 29 – Emissões específicas de hidrocarbonetos não queimados (HC) com variação da rotação e carga para as operações diesel e diesel-gás (com máxima taxa de substituição).	89
Figura 30 – Emissões específicas de óxidos de nitrogênio (NO _x) com variação da rotação e carga para as operações diesel e diesel-gás (máxima taxa de substituição).	90
Figura 31 – Emissões específicas de monóxido de carbono com variações da taxa de substituição, cargas do motor e restrição parcial do ar de admissão.	93
Figura 32 – Emissões específicas de hidrocarbonetos não queimados com variações da taxa de substituição, cargas do motor e restrição parcial do ar de admissão.	95
Figura 33 – Emissões específicas dos óxidos de nitrogênio com variações da taxa de substituição, cargas do motor e restrição parcial do ar de admissão.	97
Figura 34 – Emissões específicas do material particulado com variações da taxa de substituição, cargas do motor e restrição parcial do ar de admissão.	99
Figura 35 – Rendimento térmico com variações da taxa de substituição, cargas do motor e restrição parcial do ar de admissão.	101
Figura 36 – Eficiência volumétrica com variações da taxa de substituição, cargas do motor e restrição parcial do ar de admissão.	103
Figura 37 – Temperatura de escape com variações da taxa de substituição, cargas do motor e restrição parcial do ar de admissão.	105
Figura 38 – Emissões específicas de hidrocarbonetos não queimados e monóxido de carbono com variação da razão de equivalência total, para diferentes cargas e restrições parciais do ar de admissão. Operação Diesel-gás com máxima taxa de substituição.	109
Figura 39 – Emissões específicas de óxidos de nitrogênio com variação da razão de equivalência total, para diferentes cargas e restrições parciais do ar de admissão. Operação Diesel-gás com máxima taxa de substituição.	110
Figura 40 – Emissões específicas de HC com variação da razão de equivalência total (originadas pelas restrições parciais do ar de admissão), para diferentes cargas e rotações do motor. Operação Diesel-gás com máxima taxa de substituição.	111
Figura 41 – Emissões específicas de CO com variação da razão de equivalência total (originadas pelas restrições parciais do ar de admissão), para diferentes cargas e rotações do motor. Operação Diesel-gás com máxima taxa de substituição.	112

Figura 42 – Emissões específicas de NO_x com variação da razão de equivalência total (originadas pelas restrições parciais do ar de admissão), para diferentes cargas e rotações do motor. Operação Diesel-gás com máxima taxa de substituição.

113

Lista de tabelas

Tabela 1 – Principais impactos ambientais à saúde humana.	20
Tabela 2 – Comparação entre as propriedades físico-químicas do GN e do óleo Diesel.	27
Tabela 3 – Composição média do gás natural fornecido pela CEG	29
Tabela 4 – Dados técnicos do motor (Fonte: MWM motores diesel, 2006).	47
Tabela 5 – Especificações técnicas dos transdutores de pressão.	52
Tabela 6 – Dados técnicos para a caixa analisadora Testo 350 XL	56

Lista de Símbolos

(A/C) – Razão ar combustível

$(A/C)_{D,e}$ – Razão ar/Diesel estequiométrica

$(A/C)_{gás,e}$ – Razão ar/gás natural estequiométrica

(C/A) – Razão combustível ar

C – Carbono

cec – Consumo específico de combustível (g/kW.h)

CO – Monóxido de carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

CH₃ – Radical de metila

CH₄ – Metano

C₂H₆ – Etano

C₃H₈ – Propano

C_4H_{10} – Butano
 C_6H_{14} – Hexano
 $C_{12}H_{26}$ – Dodecano (Óleo Diesel Leve)
 $C_{16}H_{34}$ – Cetano (n-hexadecano)
 C_xH_y – Representação geral de um hidrocarboneto
 C_d – Coeficiente de descarga
 d – Diâmetro do orifício dos bocais (m)
EGR – Recirculação dos gases de escapamento
ETC – Ciclo estacionario europeu
F1 – Fator para conversão de concentrações em base seca para base úmida (-)
H – Hidrogênio
He – Helio
HC – Hidrocarbonetos não queimados
 H_2O – Vapor d'água
HMN – Heptalmetilnonano
mA – mili-Ampere
 m_{ar} – Massa de ar
 m_{comb} – Massa de combustível
 M_{ar} – Massa molecular do ar
 M_{comb} – Massa molecular do combustível
MP – Material particulado
 \dot{m} – Vazão mássica (kg/h)
N – Velocidade Angular (rpm)
 N_2 – Nitrogênio
NO – Óxido Nítrico
 NO_2 – Dioxido de Nitrogenio
NOx – Óxidos de nitrogênio
NC – Número de cetano
 n_{ar} – Número molar do ar
 n_{comb} – Numero molar do combustível
 O_2 – Oxigênio
P – Potência (W)
 P_{ar} – Pressão barometrica (kPa)
PCI – Poder calorífico Inferior (J/kg)
Pd – Paladium
 P_{sat} – Pressão de saturação do vapor d'água à temperatura ambiente (kPa)
PMS – Ponto morto superior
Pt – Platina
ppm – partes por milhão
 R_{ar} – Constante do ar (kJ/kg.K)
 $R_{gás}$ – Constante do gás (kJ/kg.K)

Re – Número de Reynolds
SO₂ – Dióxido de enxofre
T – Torque (N.m)
THC – Total de hidrocarbonetos
TS – Taxa de Substituição (%)
U_r – Umidade relativa (%)
V_{bocal} – Velocidade nos bocais ASME (m/s)
V_d – Volume deslocado por ciclo (m³)
 \dot{V} – Vazão Volumetrica (m³/h)
w – Umidade absoluta (kg de vapor d'água/kg ar seco)

Subscritos e Letras Gregas

ar – Relativo à vazão mássica do ar
D – Relativo à vazão mássica do Diesel.
D,O – Relativo ao consumo de Diesel original (expressão da taxa de substituição)
esc,u – Relativo à vazão do gás de escape em base úmida
gás – Relativo à vazão mássica do gás
 α – Posição da haste da bomba injetora (%)
 ρ_{ar} – Massa específica do ar (kg/m³)
 $\rho_{gás}$ – Massa específica do gás natural (kg/m³)
 ΔP_{ar} – Diferencial de pressão no tambor de ar (Pa)
 $\Delta P_{gás}$ – Diferencial de pressão no tambor de gás (Pa)
 $\eta_{T,D}$ – Rendimento termico no modo Diesel (%)
 $\eta_{T,D/g}$ – Rendimento Termico no modo Diesel-gás (%)
 η_V – Eficiência volumétrica (%)
 ϕ – Razão de equivalência (-)