

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Cesar Gonzalo Vera Vasquez**

**Redução das Emissões em Geradores  
Diesel-Gás**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC - Rio.

Orientador: Prof. Sergio Leal Braga

Rio de Janeiro  
Setembro de 2009



**Cesar Gonzalo Vera Vasquez**

## **Redução de Emissões em Geradores Diesel-gás**

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

**Prof. Sergio Leal Braga**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio.

**Prof. Ricardo Hernandez Pereira**

Co- Orientador

Faculdade de Engenharia Mecânica – UFU-MG.

**Prof. Carlos Valois Maciel Braga**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio.

**Prof. José Alberto dos Reis Parise**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio.

**Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio.

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 18 de Setembro de 2009

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

### **Cesar Gonzalo Vera Vasquez**

Formado em Engenharia Mecânica pela Universidad Nacional de San Agustín. Arequipa- Perú, em Dezembro de 2005. Todo o ano 2006 atou como engenheiro em projetos de manutenção e planejamento em diversas empresas peruanas.

#### Ficha Catalográfica

Vera Vasquez, Cesar Gonzalo

Redução das emissões em geradores diesel-gás / Cesar Gonzalo Vera Vasquez; orientadores: Sergio Leal Braga, Ricardo Hernandez Pereira. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2009.

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

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

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Geração termelétrica. 3. Motor diesel-gás. 4. Emissões. 5. Gás natural. 6. Combustão. I. Braga, Sergio Leal. II. Pereira, Ricardo Hernandez. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

A mis padres Reynaldo y Maruja, por el inmenso amor y apoyo siempre.

A Maricela por su inmenso cariño y estímulo en mi viaje a Brasil.

## Agradecimentos

Aos Professores Sergio Leal Braga e Ricardo Hernandez Pereira, pela confiança, paciência e apoio.

Aos meus familiares, em especial ao Arquiteto Álvaro Pilares Vera e a Licenciada Consuelo Vera Ramos pelo estímulo e ajuda na minha viagem ao Brasil.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, professores e funcionários.

Ao ITUC (Instituto Tecnológico da PUC-Rio), aos funcionários administrativos e funcionários das oficinas mecânicas pela ajuda subministrada.

Aos colegas Julio Cuisano Egúsquiza, Juan Milón Guzmán, Miguel Mozo Leon, Anthony Roque Ccacya, José Aguilar Franco, Fernando Ferrari, Andrea Carvalho e Filipe Alves pela parceria e amizade.

Ao engenheiro Severino Wanderley pelo suporte eletrônico e amizade.

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

Para Gerson Silvério, pela ajuda na montagem do aparato experimental e pela amizade.

Aos amigos que fiz no Brasil: Gilmar, Jorge, Marko, David, Antonio, Miguel, Nilton, Gerardo, Johanna, Melisa, Evelyn R., Rocio Z., Mayra, Melva, Claudia, Rocio R., Marquito, César M., Carlos G., Liseth, Alejandra, Liliana, Tania e todos meus amigos da PUC-Rio pela amizade e estímulo.

Para CAPES, pelo suporte financeiro.

## Resumo

Vera Vasquez, Cesar Gonzalo; Braga, Sergio Leal; Pereira, Ricardo Hernandez. **Redução das emissões em Geradores Diesel-gás.** Rio de Janeiro, 2009. 118p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O trabalho tem como objetivo a conversão de um grupo gerador, originalmente Diesel, para operar no modo Diesel-Gás, onde estes dois combustíveis são administrados simultaneamente no motor. Para tal foi utilizado um grupo gerador de 120KW, com um motor Perkins 1006 TAG (turbo alimentado com intercooler). Medidas experimentais foram realizadas tanto no modo Diesel quanto no bicomustível Diesel-gás. Foram avaliados: desempenho e, principalmente, emissões de poluentes atmosféricos. A redução das emissões foi realizada mediante a restrição parcial do ar de combustão, regulada por uma válvula tipo borboleta, que funciona eletronicamente, posicionada na entrada do coletor de admissão. A relação Diesel-Gás foi também avaliada, onde o segundo combustível era administrado através de um sistema eletrônico de injeção de gás natural. Os resultados indicam que em cargas baixas as reduções de monóxido de carbono e hidrocarbonatos são significativas (50% de redução de HC e 20% de CO) com máximas taxas de substituição. O mesmo se observa em cargas intermediárias. Em cargas médias e baixas observa-se um leve aumento nas emissões de óxido nítrico. Pode-se observar uma melhora no rendimento global do grupo gerador com o aumento da carga e da taxa de substituição. De forma geral, conseguiu-se reduzir os níveis de emissões em altas cargas, principalmente de hidrocarbonetos e monóxido de carbono.

## Palavras-chave

Geração termelétrica; Motor Diesel-Gás; Emissões; Gás Natural; Combustão.

## Abstract

Vera Vasquez, Cesar Gonzalo; Braga, Sergio Leal (Advisor); Pereira, Ricardo Hernandez (Advisor). **Reduction of the Emissions in Gas Diesel Generators.** Rio de Janeiro, 2009. 118p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The objective of this study is converting a generator, originally Diesel, to operate in a Diesel-Gas; two fuels are administered simultaneously to the motor. One diesel generator of 120KW model Perkins 1006 TAG (powered with turbo intercooler), running on the Diesel / natural gas dual fuel mode, was tested. Experimental measurements were performed in both the Diesel and dual fuel diesel-gas. Are evaluated performances and; especially air pollutant emissions. The emission reduction was carried out by partial restriction of the combustion air with the help of an electronic throttle valve, positioned before the intake manifold. The ratio Diesel-Gas was evaluated, where the second fuel (natural gas) was administered with one electronic injection of natural gas. The results indicate that at low loads the reductions in carbon monoxide and hydrocarbons are significant (50% reduction in HC and 20% CO) with maximum replacement rates. Something like is observed at intermediate loads. In medium and low loads there is a slight increase in emissions of nitrous oxides. One can observe a slight increase in overall yield of the generator with the increased workload and the replacement rate; in general it was possible to reduce emissions at high loads, especially in hydrocarbons and carbon monoxide.

## Keywords

Power Generation; Gas Diesel; Engine; Emissions; Natural Gas; Combustion.

# Sumário

1. Introdução	18
1.1. Poluentes Atmosféricos	19
1.2. Principais Poluentes Atmosféricos	20
1.3. Objetivos	22
1.4. Descrição da Tese	23
2. Revisão Bibliográfica	24
2.1. Combustão Diesel-Gás	24
2.2. Definições de Potências em Geradores	24
2.2.1. Potência Efetiva Contínua não Limitada	25
2.2.2. Potência Efetiva Contínua Limitada	26
2.3. Combustão Perfeita	27
2.4. Propriedades do Óleo Diesel	28
2.5. Propriedades do Gás Natural	29
2.6. Combustão Real	30
2.7. Formação de Poluentes em Motores Diesel-Gás	31
3. Aparato Experimental	32
3.1. Grupo Gerador	33
3.2. Governador Elétrico	34
3.3. Medição da Carga Elétrica	36
3.4. Medição do Consumo de Diesel	37
3.5. Controlador Eletrônico de Vazão Ar	38
3.6. Medição de Consumo de Ar	39
3.7. Controlador Eletrônico de Vazão de Gás	40
3.8. Medição do Consumo de Gás	41
3.9. Medição de Pressões e Temperaturas	42



3.10. Software de Controle	43
3.11. Medição de Emissões	44
3.12. Dissipador de Carga Elétrica	45
3.13. Sistema de Compressão de Gás Natural	44
4. Metodologia e Desenvolvimento dos Ensaio	46
4.1. Modo Diesel Puro	47
4.2. Modo Diesel – Gás	47
4.3. Diesel –Gás com Restrição de Ar	50
4.4. Redução de Dados	51
4.4.1. Potência elétrica Observada ( $P_{el}$ )	51
4.4.2. Vazão Mássica de ar ( $\dot{m}_{ar}$ )	51
4.4.3. Vazão Mássica de Gás Natural ( $\dot{m}_g$ )	55
4.4.4. Consumo Específico de Combustível (cec)	57
4.4.5. Rendimento Térmico ( $\eta_t$ )	58
4.4.6. Eficiência Volumétrica ( $\eta_v$ )	59
4.4.7. Razão Ar-Combustível (AC)	61
4.4.8. Razão de Equivalência Total ( $RE_T$ )	61
4.4.9. Taxa de Substituição (TS)	62
4.4.10. Emissões Específicas	62
5. Resultados e Análises	66
5.1. Resultados no Modo Diesel Puro, Diesel-Gás e Com Restrição de Ar	66
6. Conclusões e Recomendações	87

7. Referências Bibliográficas	92
Anexo A: Análise da Propagação de Incerteza nos Cálculos	96
Anexo B: Planilhas de Medições	106
Anexo C: Planilhas de Incertezas	113

## Lista de figuras

Figura 1 - Emissões por tipo de fonte na região metropolitana de Rio de Janeiro	21
Figura 2 - Esquema da instalação e montagem dos equipamentos de ensaio	32
Figura 3 - Grupo gerador Perkins 1006 TAG modelo P135	33
Figura 4 - Governador eletrônico da Bomba de alta Pressão de combustível	34
Figura 5 - Voltímetro e Amperímetro usados em conjunto na medição da carga elétrica	35
Figura 6 - Medidor de vazão de Óleo Diesel	35
Figura 7 - Tambor para a medição de vazão de ar na entrada do coletor de admissão	36
Figura 8 - Bico injetor	37
Figura 9 - Placa eletrônica de controle	38
Figura 10 - Tambor de medição de gás natural	38
Figura 11 - Arranjo dos transdutores de pressão e tomadas de temperatura no lado direito a tomada dos sensores para a leitura de dados	39
Figura 12 - Software e Sistema de aquisição de dados	40
Figura 13 - Arranjo dos transdutores de pressão e tomadas de temperatura; no lado direito a tomada dos sensores para a leitura de dados	41
Figura 14 - Software e Sistema de aquisição de dados	42
Figura 15 - Equipamento de medição de gases de escapamento	43
Figura 16 - Arranjo do dissipador de carga	44
Figura 17 - Sistema de compressão do gás natural	45
Figura 18 - Curva de potência elétrica e potência ao eixo em função do consumo de óleo Diesel (Modo Diesel Puro)	67

Figura 19 e 20 - Consumo específico de combustível em modo diesel puro e em modo diesel-gás com máxima taxa de substituição e consumo de combustível de diesel e de gás natural, em modo diesel puro e diesel-gás com máxima taxa de substituição para diferentes frações da Carga <i>Prime</i>	69
Figura 21 - Consumo Específico de Combustível para diferentes porcentagens da Carga <i>Prime</i> em função da Taxa de Substituição	70
Figura 22 - Consumo de diesel sem restrição e com as máximas restrições de ar em função da Fração de Carga <i>Prime</i>	71
Figura 23 - Rendimento Térmico com variações de carga e restrição de ar em função da Taxa de Substituição	73
Figura 24 - Eficiência Volumétrica com variações de carga e restrição de ar em função da Taxa de Substituição	74
Figura 25 - Temperatura de Escape em 60% e 100% de carga, e restrição de ar em função da Taxa de Substituição	75
Figura 26 - Temperatura de Escape com variações de carga e restrição de ar em função da Taxa de Substituição	76
Figura 27 - Emissões Específicas de Dióxido de Nitrogênio com variações de carga e restrição de ar em função da Taxa de Substituição	77
Figura 28 - Emissões Específicas de Monóxido de Carbono em 60% e 100% de carga, com restrição de ar em função da Taxa de Substituição.	78
Figura 29 - Emissões Específicas de Monóxido de Carbono com variações de carga e restrição de ar em função da Taxa de Substituição	79
Figura 30 - Emissões Específicas de Hidrocarbonetos não queimados em 60% e 100% de carga, com restrição de ar em função da Taxa de Substituição	80

Figura 31 - Emissões Específicas de Hidrocarbonetos não queimados, com variações de carga e restrição de ar em função da Taxa de Substituição	81
Figura 32 - Emissões Específicas de Monóxido de Carbono queimados, com variação de Equivalência Total para diferentes restrições de ar. Operação Diesel-Gás com máxima taxa de substituição	82
Figura 33 - Emissões Específicas de Hidrocarbonetos não queimados, com variação de Equivalência Total para diferentes restrições de ar. Operação Diesel-Gás com máxima taxa de substituição	85

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Composição do gás natural fornecida pela Companhia Distribuidora de Gás do Estado do Rio de Janeiro	22
Tabela 2 - Comparação entre algumas características físico-químicas do Óleo Diesel e o Gás Natural	29
Tabela 3 - Dados Técnicos do Grupo gerador	30
Tabela 4 - Dados técnicos dos transdutores de pressão	33
Tabela 5 - Dados técnicos dos transdutores de pressão	41

## Lista de Símbolos

A - Amperagem medida na linha do trifásico.

(A/C) - Razão ar-combustível.

(A/C<sub>g</sub>)<sub>e</sub> - Razão ar-gás estequiométrica.

(A/C<sub>D</sub>)<sub>e</sub> - Razão diesel-gás estequiométrica

C - Carbono.

Cec - Consumo específico de combustível .

CO - Monóxido de carbono.

CO<sub>2</sub> - Dióxido de carbono.

CH<sub>4</sub> - Metano.

C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> - Etano.

C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> - Propano.

C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> - Butano.

C<sub>12</sub>H<sub>26</sub> - Dodecano (óleo diesel leve).

C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> - Representação geral de um hidrocarboneto.

C<sub>d</sub> - Coeficiente de descarga.

d - Diâmetro do orifício nos bocais (m).

EGR - Recirculação dos gases de escapamento.

F1 - Fator de conversão de concentrações em base seca para úmida.

H - Hidrogênio

HC - Hidrocarbonetos não queimados.

H<sub>2</sub>O - Vapor d'água.

m<sub>ar</sub> - Massa de ar.

m<sub>D</sub> - Massa de diesel.

m<sub>g</sub> - Massa de gás.

MP - Material particulado.

*m* - Vazão mássica (kg/h).

N - Velocidade angular (RPM).

N<sub>2</sub> - Nitrogênio.

NO - Monóxido de nitrogênio.

NO<sub>2</sub> - Dióxido de nitrogênio.

NO<sub>x</sub> - Óxidos de nitrogênio.

$O_2$  - Oxigênio.

$P$  - Potência ao eixo (kW)

$P_{el}$  - Potência elétrica (kW)

$P_{ar}$  - Pressão barométrica (kPa)

PCI - Poder calorífico inferior.

$P_{sat}$  - Pressão de saturação da água em temperatura ambiente (kPa).

PPM - Partes por milhão

$RE_T$  - Razão estequiométrica total.

$R_{ar}$  - Constante do ar (kJ/kg.K).

$R_g$  - Constante do gás natural (kJ/kg.K).

Re - Numero de Reynolds

$SO_2$  - Dióxido de enxofre.

TS - Taxa de substituição

$U_r$  - Umidade relativa

$V_{bocal}$  - Velocidade nos bocais ASME.

$V_d$  - Volume deslocado no cilindro ( $m^3$ )

$V$  - Voltagem medida entre duas linhas do trifásico.

$\dot{V}$  - Vazão volumétrica

W - Umidade relativa



## Subscritos e Letras Gregas

Ar - Relativo à vazão mássica do ar.

D - Relativo à vazão mássica do ar.

D<sub>O</sub> - Relativo ao consumo de Diesel original.

esc<sub>u</sub> - Relativo à vazão do gás de escape em base úmida.

g - Relativo à vazão de gás.

$\rho_{ar}$  - Massa específica do ar ( $\text{kg/m}^3$ ).

$\rho_g$  - Massa específica do gás ( $\text{kg/m}^3$ ).

$\Delta P_{ar}$  - Diferencial de pressão no tambor de ar (kPa).

$\Delta P_g$  - Diferencial de pressão no tambor de gás (kPa).

S - Relativo à concentração específica de emissões.

$\eta_{t_D}$  - Rendimento térmico em operação diesel puro.

$\eta_{t_{dual}}$  - Rendimento térmico em operação diesel-gás.

$\eta_v$  - Eficiência volumétrica.

$\eta_G$  - Eficiência do grupo gerador.