



**Claudio Vidal Teixeira**

**Ignição por Compressão com Reatividade Controlada e  
Dupla Injeção Direta Diesel-Etanol**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em  
Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial  
para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Sergio Leal Braga  
Co-Orientador: Prof. Carlos Valois Maciel Braga

Rio de Janeiro  
Outubro de 2018



**Claudio Vidal Teixeira**

## **Ignição por Compressão com Reatividade Controlada e Dupla Injeção Direta Diesel-Etanol**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor 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. Carlos Valois Maciel Braga**

Coorientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Prof. Jose Alberto dos Reis Parise**

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Dr. Fernando Zegarra Sánchez**

Laboratório de Engenharia Veicular - PUC-Rio

**Prof. Juan Jose Milon Guzman**

Universidad Tecnológica del Perú

**Dr. Antônio Carlos Scardini Villela**

Petrobras

**Prof. Victor Santoro Santiago**

Departamento de Engenharia Mecânica - IME

**Prof. Márcio da Silveira Carvalho**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 31 de outubro de 2018

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

### **Claudio Vidal Teixeira**

Graduou-se em Engenharia Mecânica e de Automóveis no Instituto Militar de Engenharia (IME), em novembro de 2004. De 2004 a 2008, atuou como engenheiro de manutenção de viaturas e equipamentos no 3º Batalhão de Engenharia de Construção (3º BECnst) do Exército Brasileiro. Obteve o Título de Mestre em Engenharia Mecânica no IME, em abril de 2010. De 2010 a 2013, desempenhou, no Centro Tecnológico do Exército (CTEx), a função de gerente de projeto da Viatura Leve de Emprego Geral Aerotransportável (VLEGA GAUCHO). Atualmente desempenha, no Diretoria de Fabricação (DF) do Exército Brasileiro, a função de fiscal de contrato do projeto Viatura Blindada Transporte de Pessoal - Média de Rodas Guarani (VBTP-GUARANI).

### Ficha Catalográfica

Teixeira, Claudio Vidal

Ignição por compressão com reatividade controlada e dupla injeção direta diesel-etanol / Claudio Vidal Teixeira; orientador: Sergio Leal Braga; co-orientador: Carlos Valois Maciel Braga. – 2018.

144 f.: il. color.; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2018.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Ignição por compressão com reatividade controlada. 3. RCCI. 4. Diesel. 5. Etanol. 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

*Para os meus pais, Manoel e Maria, pelo  
amor incondicional.*

## Agradecimentos

A Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio (DEM) e ao Instituto de Tecnologia da PUC-Rio (ITUC) que me receberam como doutorando e proporcionaram as condições adequadas para a realização deste trabalho.

Ao Exército Brasileiro, ao Instituto Militar de Engenharia (IME) ao Centro Tecnológico do Exército (CTEx), Ao Arsenal de Guerra do Rio de Janeiro (AGR) e a Diretoria de Fabricação (DF) pelo apoio irrepreensível que me franquiaram durante o doutorado.

Aos Professores Sergio Leal Braga e Carlos Valois Maciel Braga que, foram mais do que orientadores. Foram fiadores de um trabalho experimental cujas dificuldades apontavam para o fracasso. Mesmo assim não desistiram, permaneceram comigo e confiaram no sucesso do trabalho.

Ao Professor Jose Alberto dos Reis Parise que pelos aconselhamentos. Foram determinantes para que continuasse persistindo em alcançar o objetivo.

Ao Doutor Fernando Zegarra Sánchez que acompanhou o trabalho desde o início. E, mesmo repleto de tarefas, colaborou efetivamente em todos os setores: montagem do experimento, aquisição e reparo de componentes, operação dos testes e do programa Matlab e na orientação na escolha dos parâmetros para composição dos testes.

Aos integrantes do ITUC, Marcos, Renato, Leandro, Geovani, Janaina, Renata, Florian, Luciano, pela dedicação e fidalguia empregada no trato com o corpo discente, do qual fiz parte por alguns anos.

Aos integrantes do LEV, Bruno, Jorge, Gerson, Gilson, Leonardo, Nestor, Severino, Pedro Paulo e Paulo Sergio, pela infinita paciência e empenho exemplar. Sem esses personagens o trabalho experimental sequer iniciaria.

Aos Professores Juan Jose Milon Guzman (UTP) e Victor Santoro Santiago (IME) e ao Doutor Antônio Carlos Scardini Villela (PETROBRAS) que reservaram parte do precioso tempo para fazer parte da banca.

Ao meu tutor no IME, Professor Francesco Scofano Neto, que acompanhou todas as fases do doutorado e se engajou pessoalmente nas demandas e solicitações de prorrogação. Importantíssimo. Sem as prorrogações não seria possível terminar o trabalho.

Ao General Prado e ao Coronel Armando, respectivamente, comandante e subcomandante do IME, que acreditaram no meu trabalho e fizeram gestões para que eu pudesse comparecer a PUC Rio e terminar os experimentos, mesmo depois ter sido transferido do IME.

Ao General Luiz Henrique e ao Coronel Correia, respectivamente, comandante e subcomandante da DF, que depositaram confiança em mim e proporcionaram as condições apropriadas para continuar empenhado na tese de doutorado, simultaneamente aos serviços da caserna sob minha responsabilidade.

Ao Coronel Rubens, Coronel Samir, Coronel Loriato, todos da DF, que compreenderam a minha condição de doutorando e me apoiaram em todas as circunstâncias.

Ao General Robson, Coronel Ademir, Tenente Coronel Marcio Gomes e Tenente Coronel Inácio, Servidor Civil Evandro e Servidora Civil Zuleica, todos do CTEx, pela empatia, compreensão e apoio. Estiveram presentes e atuantes no momento mais difícil do doutorado.

Ao Tenente Lopo, Subtenente Gonçalves, Subtenente Ferreira, Sargento Artur, Sargento Valdir, Sargento Alexander, Servidor Civil Ferreira e Servidor Civil Alexandre, Servidor Civil Andreaze e Servidor Civil Lincon, todos do CTEx pela imensa paciência, dedicação e desapego com o horário de almoço. O empenho de parte desse período de descanso tornou possível finalizar os desenhos dos alojamentos dos injetores de diesel e de etanol no cabeçote do motor, recalcular a nova taxa de compressão, confeccionar os alojamentos dos injetores, modificar o

cabeçote para receber os injetores, adaptar o sistema de injeção de etanol, além dos inúmeros serviços de reparação relacionados à bancada experimental.

Ao Wagner Santaniello da YANMAR SOUTH AMERICA por ter gentilmente cedido um cabeçote do motor Yanmar NSB50 para ser adaptado e funcionar com tecnologia RCCI. E por ter disponibilizado tempo para de sanar as dúvidas relacionadas aos aspectos dimensionais do motor.

Ao Felipe da PWM SOFTWARE, que ultrapassou as fronteiras da prestação de serviço e se empenhou com esmero nos projetos de controle dos sistemas de injeção de etanol e diesel, inclusive nos finais de semana e feriados.

Ao engenheiro Mario da MARONI Ltda., por ter aceito o desafio de reparar os componentes da bancada experimental, empregando toda experiência e genialidade para desempenhar o serviço em prazos curtíssimos.

Aos meus irmãos da igreja, que torceram por mim se dispuseram a jejuar e a interceder em oração pelo meu sucesso.

Aos meus irmãos biológicos, Clea e Cleiton, que acompanharam a minha trajetória, oraram e compartilharam dos diversos sentimentos presentes em um doutorado. Muito obrigado pelo apoio.

Aos meus filhos, Mylena Muniz Vidal Teixeira e Leonardo Muniz Vidal Teixeira, que me alegraram e me inspiraram, principalmente, nas adversidades. Inocentemente, transportaram-me para a real dimensão da vida e me fizeram lembrar de um ensinamento básico: com saúde é fácil ser feliz.

À minha esposa, Andrea dos Santos Muniz da Silva, pela compreensão e pelo apoio incondicional, sem os quais não seria possível continuar.

Aos meus pais Manoel Teixeira Lima e Maria Vidal Teixeira, que dedicaram a vida à família. E conseguiram com amor e simplicidade transmitir ensinamentos sólidos, deixando como herança o maior legado que os filhos podem ter: a educação.

A Deus, pelo milagre. Por ter me presenteado com a força de trabalho dos melhores recursos humanos disponíveis no Brasil e com a possibilidade de usufruir de Instituições tradicionais e respeitadas no campo científico internacional.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## Resumo

Teixeira, Claudio Vidal; Braga, Sergio Leal; Braga, Carlos Valois Maciel. **Ignição por compressão com reatividade controlada e dupla injeção direta Diesel-Etanol.** Rio de Janeiro, 2018. 144p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Uma tecnologia desenvolvida na Universidade de Wisconsin-Madison denominada de “*Reactivity Controlled Compression Ignition* (RCCI)” usa dois injetores, por cilindro, para misturar combustível de baixa-reação (gasolina) com combustível de alta-reação (diesel) em um motor de ignição por compressão (ICO). Esta técnica possibilitou maior controle do processo de combustão, diminuição do consumo de combustível e dos gases de exaustão prejudiciais ao meio ambiente. Neste trabalho foi utilizado um motor ICO monocilíndrico, modificado para operar com tecnologia RCCI, injetando diesel e etanol diretamente na câmara de combustão. O objetivo era alcançar a maior taxa de substituição de diesel por etanol, utilizando estratégias de dupla e tripla injeção de combustível. Os resultados dos testes mostram que, operando com a estratégia de dupla injeção de combustível (etanol à -170° PMS e diesel a -8° PMS), a eficiência do motor modificado melhorou, mas surgiram pontos de alta pressão no interior do cilindro capazes de danificar o motor. Utilizando outra estratégia de dupla injeção de combustível (diesel a -8° PMS e etanol à +4° PMS) não foram constatados pontos de alta pressão no interior do cilindro, mas ocorreu um decréscimo na eficiência. Os resultados mais promissores foram obtidos empregando a estratégia de tripla injeção de combustível (etanol à -170° PMS, diesel a -8° PMS e etanol à +4° PMS): a eficiência aumentou e foi alcançada a maior taxa de substituição de diesel por etanol (74,6%).

## Palavras chave

Ignição por Compressão com Reatividade Controlada; RCCI; Diesel; Etanol.



## Abstract

Teixeira, Claudio Vidal; Braga, Sergio Leal (Advisor); Braga, Carlos Valois Maciel (Coadvisor). **Reactivity controlled compresion ignition with double direct injection Diesel-Ethanol**. Rio de Janeiro, 2018. 144p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio e Janeiro.

A technology developed at the University of Wisconsin-Madison called "Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI)" uses two injectors, per cylinder, to mix low-reaction fuel (gasoline) with high-reaction (diesel) fuel ignition (ICO). This technique allowed greater control of the combustion process, reduction of fuel consumption and exhaust gases harmful to the environment. In this work was used a single-cylinder compression ignition (IC) engine, modified to operate with RCCI technology, injecting diesel and ethanol directly into the combustion chamber. The objective was to achieve the highest rate of substitution of diesel by ethanol, using double and triple fuel injection strategies. Test results show that modified engine efficiency improved when the dual fuel injection strategy (ethanol at  $-170^{\circ}$  PMS and diesel at  $-8^{\circ}$  PMS) was used, but high pressure points appeared inside the cylinder that could damage the engine. Using another dual fuel injection strategy (diesel at  $-8^{\circ}$  PMS and ethanol at  $+4^{\circ}$  PMS) no pressure peaks were detected inside the cylinder, but a decrease in efficiency occurred. The most promising results were obtained using the triple fuel injection strategy (ethanol at  $-170^{\circ}$  PMS, diesel at  $-8^{\circ}$  PMS and ethanol at  $+4^{\circ}$  PMS): efficiency increased and the highest diesel substitution rate by ethanol was achieve (74,6%).

## Keywords

Compression Ignition Controlled Reactivity; RCCI; Diesel; Ethanol.

## Sumário

1. Introdução	22
1.1. Tecnologia RCCI	25
1.2. Objetivos	27
1.3. Contribuição	28
1.4. Organização da Tese	28
2. Revisão Bibliográfica	29
2.1 Pesquisas relacionadas à Tecnologia RCCI	31
3. Descrição dos Equipamentos	38
3.1 Bancada Experimental do Motor Original	38
3.2 Bancada Experimental do Motor Modificado	39
3.3 Motor Diesel	40
3.4 Conjunto Roda Fônica – Sensor de posição	41
3.4.1 Roda Fônica	42
3.4.2 Sensor de Posição	42
3.5 Bancada Dinamométrica	43
3.5.1 Sensor de Torque	43
3.5.2 Inversor de Frequência	44
3.5.3 Dissipador de Potência	44
3.5.4 Motor Elétrico do Dinamômetro	45
3.6 Sensor de Pressão	45
3.7 Sensor de Vazão de Combustível	46
3.8 Sensor de Vazão de Ar	47
3.9 Balança Sartorius PMA7501	48
3.10 Sistema de Injeção de Etanol (SIE)	48
3.10.1 Subsistema de Baixa Pressão	50
3.10.2 Bomba de Combustível de Alta Pressão	51
3.10.3 Mangueira de Combustível de Alta Pressão e Acumulador	51
3.10.4 Common Rail - Etanol	52
3.10.5 Injetor de Etanol	52

3.10.6 Inversor de Frequência do Sistema de Injeção de Etanol	53
3.10.7 Motor Elétrico do Sistema de Injeção de Etanol	54
3.10.8 Fonte Estabilizada do Sistema de Injeção de Etanol	54
3.11 Sistema Lubrificante da Unidade de Acionamento	55
3.12 Sistema de Injeção de Diesel (SID)	55
3.12.1 Bomba de Alta Pressão - Diesel	56
3.12.2 Common Rail – Diesel	57
3.12.3 Injetor – Diesel	58
3.12.4 Motor Elétrico do Sistema de Injeção de Diesel	58
3.13 Cabeçote Modificado	58
4. Metodologia	64
4.1 Primeira Etapa dos Experimentos	65
4.1.1 Determinação dos Parâmetros de Funcionamento do Motor Original YANMAR NSB50 – Teste 0	66
4.1.2 Mapeamento dos injetores (Etanol e Diesel)	66
4.1.3 Mapeamento do motor modificado – Teste D	68
4.1.3.1 Teste D1	68
4.1.3.2 Teste D2	68
4.1.3.2 Teste D3	69
4.2 Segunda Etapa dos Experimentos	70
4.2.1 Teste DE: Motor Modificado Operando com Dupla Injeção (Diesel / Etanol)	70
4.2.2 Teste ED: Motor Modificado Operando com Dupla Injeção (Etanol / Diesel)	71
4.2.3 Teste EDE: Motor Modificado Operando com Tripla Injeção (Etanol / Diesel / Etanol)	72
5 Tratamento dos Dados	73
5.1 Potência Efetiva	74
5.2 Consumo Específico de Combustível	74
5.3 Rendimento Térmico	75
5.4 Vazão Mássica de Ar Seco	76
5.4.1 Vazão Volumétrica de Ar Úmido	76
5.4.2 Viscosidade do Fluxo de Ar	77

5.4.3 Vazão Mássica de Ar Úmido	77
5.4.4 Massa específica do Ar Ambiente	77
5.4.5 Constante do Ar Ambiente	78
5.4.6 Umidade Absoluta	78
5.4.7 Pressão de Saturação	79
5.5 Eficiência Volumétrica	79
5.6 Fator Lambida ( $\lambda$ )	79
5.6.1 Relação Ar/Combustível Real	80
5.6.2 Relação Ar/Combustível Estequiométrica	80
5.7 Taxa de Substituição	81
5.8 Atraso na Combustão	81
6. Modelagem do Cálculo do Calor Aparente Liberado	82
6.1 Hipóteses	82
6.2 Primeira Lei da Termodinâmica para Volume de Controle	83
6.3 Razão de Calores Específicos	85
6.4 Temperatura no Interior do Cilindro	86
6.5 Volume do Cilindro em uma Determinada Posição ( $\theta$ )	86
7. Combustível	89
7.1 Óleo Diesel	89
7.1.1 Óleo diesel (S10 e S500) de Uso Rodoviário	89
7.1.2 Óleo diesel (S1800) de Uso Não Rodoviário	90
7.1.3 Óleo diesel marítimo DMA/DMB	90
7.2 Mistura Óleo Diesel/Biodiesel	90
7.3 Etanol	93
8. Resultados e Discussões	96
8.1 Resultados dos Testes com Motor Original – Teste 0	96
8.2 Resultados dos Testes com Motor Modificado Operando com Diesel – Teste D	100
8.2.1 Resultados do Teste D1	100
8.2.2 Resultados do Teste D2	101

8.2.3 Resultados do Teste D3	102
8.3 Resultado dos Testes com o Motor Modificado Operando com Diesel e Etanol – Teste DE, ED e EDE	103
8.3.1 Resultados do Teste DE	103
8.3.2 Resultados do Teste ED	109
8.3.3 Resultados do Teste EDE	114
9. Conclusões	120
9.1 Comparação dos resultados dos Testes DE, ED e EDE	121
9.1.1 Estratégia de Injeção	122
9.1.2 Taxa de substituição de diesel por etanol	123
9.1.3 Eficiência	124
9.2 Recomendações	124
9.3 Sugestões	125
10. Referências Bibliográficas	130
Anexos	
Anexo A - Métodos de Análises Fisicoquímicas	135
Anexo A1 - Mistura Diesel/Biodiesel (ASTM)	135
Anexo A2 - Mistura Diesel/Biodiesel (ABNT)	136
Anexo A3 - Mistura Diesel/Biodiesel (EM ISO)	137
Anexo A4 - Etanol (NBR)	138
Anexo A5 - Etanol (D)	139
Anexo A6 - Etanol (E)	140
Anexo A7 - Etanol (ISO)	141
Anexo B - Incerteza na Medição	142

## Lista de figuras

Figura 1.1: Injeção de combustível no motor RCCI.	26
Figura 3.1: Bancada Experimental do Motor Original	38
Figura 3.2: Bancada Experimental do Motor Modificado	39
Figura 3.3: Motor YANMAR NSB50.	40
Figura 3.4: Conjunto Roda Fônica - Sensor de Posição.	41
Figura 3.5: Sensor de Posição.	42
Figura 3.6: Dinamômetro Elétrico.	43
Figura 3.8: Sensor de Torque.	43
Figura 3.9: Inversor de Frequência.	44
Figura 3.10: Dissipador de Potência.	44
Figura 3.11: Sensor de Pressão.	45
Figura 3.12: Corioli CFM010.	46
Figura 3.13: Sensor de Fluxo de Ar.	47
Figura 3.14: Balança Sartorius PMA7501.	48
Figura 3.15: Sistema de Injeção de Etanol (SIE).	49
Figura 3.16: Bomba de Combustível de Baixa Pressão.	50
Figura 3.17: Manômetro.	50
Figura 3.18: Regulador de Pressão.	50
Figura 3.19: Bomba de Alta com Unidade de Acionamento.	51
Figura 3.20: Mangueira de Combustível e Acumulador de Pressão.	52
Figura 3.21: Common Rail-Etanol com Sensor de Pressão e Injetor.	52
Figura 3.22: Injetor de Etanol.	53
Figura 3.23: Inversor de Frequência.	53
Figura 3.2: Fonte Estabilizada FTE1310 HOBBY.	54
Figura 3.25: Sistema Lubrificante da Unidade de Acionamento.	55
Figura 3.26: Sistema de Injeção de Diesel.	56
Figura 3.27: Bomba de Alta Pressão CP3.3	57
Figura 3.28: Common Rail – Diesel.	57

Figura 3.29: Cabeçote Modificado.	59
Figura: 3.30: Tampas do cabeçote: original (A) e modificada (B).	60
Figura 3.31: Cabeçote adaptado com alojamento para os injetores diesel e etanol (1). Cabeçote adaptado com injetor diesel e etanol (2). Cabeçote adaptado com os injetores diesel e etanol e com a tampa do cabeçote (3).	60
Figura 3.32: Cabeçote original (A). Cabeçote adaptado (B) com injetor de etanol (1), injetor de diesel (2) e orifício de captação de pressão.	61
Figura 3.33: Primeira versão do alojamento do injetor diesel (1). Alojamento do injetor de etanol (2). Desgaste na parede da válvula de admissão (3). Fratura (4).	62
Figura 3.34: Rompimento da parede do alojamento da válvula de admissão (1) do cabeçote do motor. Fissuras na região do furo destinado a receber o alojamento do injetor diesel (2). Fissuras no alojamento do parafuso de fixação do cabeçote no motor (3).	63
Figura 4.1: Tela de controle do perfil dos injetores de diesel e de etanol	67
Figura 4.2: Tela de controle de pressão nas bombas de alta pressão dos sistemas de injeção de diesel e de etanol.	67
Figura 6.1: Volume de Controle da Câmara de Combustão	82
Figura 6.2: Geometria do Motor (adaptado do Heywood, 1988).	87
Figura 8.1: Resultados do motor original – Teste 0.	98
Figura 8.2: Calor aparente liberado motor original, operando a 1600 rpm, com vazão de 0,25 kg/h.	99
Figura 8.3: Pressão no interior do cilindro do motor original, operando a 1600 rpm, com vazão de 0,25 kg/h.	99
Figura 8.4: Resultados de energia e de potência dos motores original e modificado obtidos nos experimentos 4, 5 e 6 – Teste DE.	105
Figura 8.5: Rendimento dos motores original e modificado nos experimentos 4, 5 e 6 – Teste DE.	106
Figura 8.6: Calor aparente liberado dos experimentos 4, 5 e 6 do - Teste DE.	107
Figura 8.7: Pressão no cilindro dos experimentos 4, 5 e 6 do Teste DE.	108
Figura 8.8: Rendimento dos motores original e modificado – Teste ED.	109
Figura 8.9: Energia total empregada e a potência produzida nos motores original e modificado nos experimentos – Teste ED.	111

Figura 8.10: Calor aparente liberado – Teste ED.	112
Figura 8.11: Pressão no interior do cilindro – Teste ED.	113
Figura 8.12: Rendimento e potência dos motores original e modificado – Teste EDE	116
Figura 8.13: Energia total empregada e a potência produzida nos motores original e modificado nos experimentos – Teste EDE.	116
Figura 8.14 – Calor aparente liberado – Teste EDE.	117
Figura 8.15: Pressão no interior do cilindro-Teste EDE.	119
Figura 9.1: Calor aparente do Teste DE, ED e EDE com vazão de diesel de 0,15 kg/h e a vazão total de etanol de 0,43 kg/h.	121
Figura 9.2: Pressão no interior do cilindro do Teste DE, ED e EDE com vazão de diesel de 0,15 kg/h e a vazão total de etanol de 0,43 kg/h.	122
Figura 9.3: Pressão no interior do cilindro do motor modificado funcionando com etanol (E-170) e sem a injeção de combustível (sem combustão).	127
Figura 9.4: Pressão no interior do cilindro do motor modificado funcionando com etanol (E+2 /E-170) e sem a injeção de combustível (sem combustão).	128



## Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Limites das Emissões - PROCONVE	30
Tabela 3.1 - Dados Técnicos do Motor YANMAR NSB50	41
Tabela 3.2 - Dados Técnicos do Inversor de Frequência	44
Tabela 3.3 - Dados Técnicos do Motor Elétrico do Dinamômetro	45
Tabela 3.4 - Dados Técnicos do Medidor de Pressão KISTLER 6052C	45
Tabela 3.5 - Dados Técnicos do Corioli	46
Tabela 3.6 - Dados Técnicos do Medidor de Fluxo	47
Tabela 3.7 - Dados Técnicos do Transdutor de Pressão	47
Tabela 3.8 - Dados Técnicos da Balança Sartorius PMA7501	48
Tabela 3.9 - Dados Técnicos do Injetor de Etanol	53
Tabela 3.10 - Dados Técnicos do Motor Elétrico (SIE)	54
Tabela 3.11 - Dados Técnicos do Injetor de Diesel	58
Tabela 3.12 - Dados Técnicos do Motor Elétrico (SID)	58
Tabela 4.1: Mapeamento do Motor Original	66
Tabela 4.2: Teste D1	68
Tabela 4.3: Teste D2	69
Tabela 4.4: Teste D3	69
Tabela 4.4: Estratégia de Injeção	72
Tabela 7.1 - Especificação do óleo diesel BX a B30.	91
Tabela 7.2: Especificação do Etanol.	94
Tabela 8.1: Resultados dos Testes com Motor Original – Teste 0	97
Tabela 8.2: Resultados do Teste D1 (Motor Modificado)	100
Tabela 8.3: Extrato dos resultados do Teste 0 (Motor Original)	100
Tabela 8.4: Resultados do Teste D2	101
Tabela 8.5: Resultados do Teste D3	102
Tabela 8.6: Resultados do Teste DE (Motor Modificado)	104
Tabela 8.7: Extrato 1 dos Resultados do Teste 0 (Motor Original)	104
Tabela 8.8 Resultados do Teste ED (Motor Modificado)	110
Tabela 8.9 Extrato 2 dos Resultados do Teste 0 (Motor Original)	110
Tabela 8.10 Extratos dos Resultados do Teste ED (Motor Modificado)	112
Tabela 8.11 Resultados do Teste EDE (Motor Modificado)	115

Tabela 8.12 Extrato 3 dos Resultados do Teste 0 (Motor Original)	115
Tabela 9.1 Resultado da injeção de etanol a -170 ° PMS	126
Tabela 9.2 Resultado da injeção de etanol a -170 ° / +2 ° PMS	127

## Lista de símbolos

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ATAC	Active Thermo Atmosphere Combustion
$a$	Raio do Virabrequim
$B$	Diâmetro do Cilindro
B20	20% de biodiesel e 80% de diesel
C	Carbono, Combustível
CO	Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
$c_p$	Calor Específico à Pressão Constante
$c_v$	Calor Específico a Volume Constante
D	Diesel
DI	Direct Injection
$\frac{dQ_n}{dt}$	Taxa de Calor Liberado
E	Etanol
EGR	Recirculação dos Gases de Escape
E20	20% de etanol e 80% de gasolina
E85	85% de etanol e 15% de gasolina
EPA	Environment Protection Agency
EURO	Comissão Europeia para veículos leves e pesados
FTP	Federal Test Procedure
HC	Hidrocarbonetos
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition
ICO	Ignição por compressão
ICE	Ignição por centelha
L	Comprimento da Biela
LTC	Low Temperature Combustion
MP	Material Particulado

MCR	Máquina de Compressão Rápida
ms	milissegundos
NOx	Óxidos de Nitrogênios
p	Pressão
$P_{\theta}$	Pressão no interior do cilindro
$P_0$	Pressão no momento da admissão do ar
PCCI	Premixed Charge Compression Ignition
PFI	Port Fuel Injection
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos
R	Constante Universal dos Gases
RCCI	Reactivity Controlled Compression Ignition
SID	Sistema de Injeção de Diesel
SIE	Sistema de Injeção de Etanol
$r_c$	Razão de Compressão
S	Curso Total do Pistão
$S_{\theta}$	Curso do pistão
SOx	Óxidos de Enxofre
$T_{\theta}$	Temperatura no interior do cilindro
$T_0$	Temperatura no momento da admissão do ar
US	United States
$V_{\theta}$	Volume no interior do cilindro
$V_0$	Volume com válvula de admissão fechada
$V_D$	Volume Deslocado
$V_M$	Volume Morto
$V_T$	Volume Total

## Lista de símbolos gregos

$\gamma$	Razão entre os Calores Específicos
$\theta$	Ângulo do virabrequim