



**Fernando Zegarra Sánchez**

**Ignição por Compressão de Etanol Aditivado  
em uma Máquina de Compressão Rápida**

**Tese de Doutorado**

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

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

Rio de Janeiro  
Setembro de 2016



**Fernando Zegarra Sánchez**

## **Ignição por Compressão de Etanol Aditivado em uma Máquina de Compressão Rápida**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação 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

**Profa. Ana Rosa Fonseca de Aguiar Martins**

Departamento de Engenharia Química e de Materiais - PUC-Rio

**Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes**

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Dr. Ricardo Hernandez Pereira**

General Electric Company

**Dr. Guilherme Bastos Machado**

Cenpes/Petroleo Brasileiro S.A. - PETROBRAS

**Prof. Márcio da Silveira Carvalho**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 29 de Setembro de 2016

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

### Fernando Zegarra Sánchez

Graduou-se em Engenharia Mecatrônica na *Universidad Nacional de Ingeniería*, Lima - Peru, em Julho de 2007. Desde 2007 até 2010 atuou como engenheiro de projetos e manutenção em diversas firmas peruanas, na área de subestações elétricas e maquinaria para mineração. obteve o Título de Mestre em Engenharia Mecânica na PUC - Rio em 2012. Atualmente é engenheiro de pesquisa no LEV/PUC-Rio, estando envolvido no uso de combustíveis alternativos para motores de combustão interna.

#### Ficha Catalográfica

Sánchez, Fernando Zegarra

Ignição por Compressão de Etanol Aditivado em uma Máquina de Compressão Rápida / Fernando Zegarra Sánchez; orientador: Carlos Valois Maciel Braga; co-orientador: Sergio Leal Braga. — Rio de Janeiro PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2016.

v., 190 f: il. (color) ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Tese. 2. Mistura de Etanol e n-Butanol;. 3. Etanol Aditivado;. 4. Ciclo de Ignição por Compressão;. 5. Combustíveis Renováveis.. I. Braga, Carlos Valois Maciel. II. Braga, Sérgio Leal. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

Dedico este trabalho a minha mãe Berta, a meu tio Lidio e a toda minha família, pelo imenso amor e apoio desde meus primeiros anos de vida.

## Agradecimentos

Agradeço a Deus por tudo na minha vida. Pela força, luz e determinação na escolha da direção certa. Agradeço a Ele todas as vitórias e conquistas alcançadas.

A minha família pelo amor, apoio incondicional, compreensão, sacrifício, incentivo, felicidade, carinho, dedicação e inspiração encontrada na minha querida família que sempre farão parte de cada luta e vitória.

Ao Professor Carlos Valois Maciel Braga, meu orientador e amigo, pelo qual tenho muita estima e admiração. Muito obrigado pelas idéias e pelas inúmeras conversas esclarecedoras em torno do trabalho e pelas revisões no decorrer da redação do presente manuscrito

Ao Professor Sergio Leal Braga, meu co-orientador e também amigo, pela confiança e parceria para a realização deste trabalho. Agradeço por ter acreditado no meu potencial e por todas as oportunidades que me deu. Muito obrigado pelo acompanhamento, motivação, revisão e sugestões na redação do presente trabalho. Para mim foi um grande prazer poder trabalhar ao seu lado.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica por seu apoio durante todos estes anos.

Agradecimentos em particular para os órgãos de fomento à pesquisa CAPES, pelo apoio financeiro, sem o qual este trabalho simplesmente não teria sido possível.

A PSA Peugeot Groupe, pelo suporte financeiro e auxílios concedidos para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto Tecnológico, ITUC/PUC-Rio, pelo suporte com a construção de equipamentos e a logística para a compra de insumos e instrumentação para a Sala de Testes de Motores do Laboratório de Engenharia Veicular, LEV/PUC-Rio.

Aos colegas do LEV/PUC-Rio, Giovanni Calfa Neto e Leonardo Costa Braga pelo companheirismo e continuado incentivo; Severino Wanderley e Nestor Corrêa Cotelo pelo suporte eletrônico e importantes contribuições; Gilson Coutinho Pradanoff, Jorge Ricardo Moura Junior e Bruno Alves Maia pelo auxílio na montagem do aparato experimental; Gerson Silveiro pela assistência na manutenção dos equipamentos.

## Resumo

Sánchez, Fernando Zegarra; Braga, Carlos Valois Maciel; Braga, Sérgio Leal. **Ignição por Compressão de Etanol Aditivado em uma Máquina de Compressão Rápida**. Rio de Janeiro, 2016. 190p. Tese de Doutorado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Com o passar do tempo, a humanidade tem uma maior dependência na geração de energia, utilizada para promoção de conforto, transporte e outros. Com a finalidade de resolver este aumento de demanda, novas fontes eficientes, de preferência renováveis, estão sendo pesquisadas. O transporte é uma das atividades que tem maior dependência dos combustíveis fósseis, além de ser também um dos maiores geradores de gases de efeito estufa. É por isso, que em diversas partes do mundo, o homem pesquisa novas fontes de energia renováveis que possam ser substitutas dos atuais tradicionais usados no transporte. Sabe-se, que os motores Diesel são mais eficientes com relação aos motores Otto. Devido a este fato, há mais de 30 anos pesquisam-se e desenvolvem-se sistemas de ignição por compressão, movidos com combustíveis renováveis, o qual permita a diminuição da dependência dos combustíveis fósseis e garanta a redução de gases de efeito estufa. O etanol é um candidato para substituir o óleo Diesel, mas tem que se levar em conta algumas alterações (aumento da relação de compressão, adição de melhoradores da autoignição, etc.) antes de ser utilizado nos motores Diesel. Com base nisto, a presente tese apresenta uma nova proposta, utilizar como melhorador da autoignição do etanol o n-butanol. Para tal propósito se desenvolveu diversos testes com diversas relações de compressão, percentuais em massa de aditivo na mistura de etanol e diversos avanços da injeção. Os testes foram realizados em uma máquina de compressão rápida (MCR) com misturas de etanol e polietilenoglicol 400 e 600, e n-butanol, além dos testes referenciais com óleo Diesel e ED95. Os resultados mostram que o n-butanol, com uma participação de 10% na mistura, pode ser utilizado como melhorador da autoignição do etanol em sistemas de ignição por compressão.

## Palavras-chave

Mistura de Etanol e n-Butanol; Etanol Aditivado; Ciclo de Ignição por Compressão; Combustíveis Renováveis.

## Abstract

Sánchez, Fernando Zegarra; Braga, Carlos Valois Maciel (Advisor); Braga, Sérgio Leal. **Compression Ignition of Ethanol-Powered in Rapid Compression Machine**. Rio de Janeiro, 2016. 190p. DSc. Thesis — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Over time, humanity has developed a greater reliance in power generation, used to promote comfort, transport and others. In order to address this increased demand new efficient sources are being searched, in preference, renewable sources. Transportation is one of the activities that have greater reliance on fossil fuels as well as being one of the largest generators of greenhouse gases. Therefore, in many parts of the world men are engaged in the search of new renewable energy sources that can substitute the current one used in transport. It is known that diesel engines are more efficient in comparison to the Otto engine. Due to this fact, for more than 30 years research has been conducted in order to develop ignition systems by compression, powered with renewable fuels, which reduces the dependence on fossil fuels and the emission of greenhouse gases. Ethanol is a viable candidate to replace diesel oil, but some improvements have to be accounted for before it's used in diesel engines, improvements such as the increase in compression ratio, adding auto-ignition improves, etc. Based on the facts presented, this thesis offers a new proposal, the use of n-butanol as an auto-ignition improver for ethanol. For this purpose several tests have been executed with various compression ratios, mass percentage of additive in the mixture of ethanol and many start of injections. The tests were performed in a rapid compression machine (RCM) with mixtures of ethanol and polyethylene glycol 400 and 600, and n-butanol in addition to the reference test with diesel oil and ED95. The results show that n-butanol with a 10% share of the mixture, can be used as an auto ignition improver for ethanol in compression ignition systems.

## Keywords

Ethanol and n-Butanol Blend; Ethanol-Powered; Compression Ignition Cycle; Renewable Fuels.

# Sumário

1	Introdução	<b>20</b>
1.1	Objetivos	28
1.2	Organização da Tese	28
2	Revisão da Literatura	<b>30</b>
2.1	Ignição por Compressão	30
2.1.1	Detonação	32
2.1.2	Combustão Ideal	33
2.1.3	Atraso da ignição	34
2.2	Uso de etanol em motores de ignição por compressão	37
2.2.1	Misturas etanol - diesel	40
2.2.2	Emulsões etanol - diesel	41
2.2.3	Injeção de etanol no coletor de admissão ("fumigação")	43
2.2.4	Dupla Injeção Direta	47
2.2.5	Substituição total do óleo diesel mediante o uso de melhoradores da autoignição	48
2.3	Combustíveis e aditivos melhoradores da autoignição do etanol	50
2.3.1	Óleo Diesel	50
2.3.2	Etanol	52
2.3.3	Etanol Aditivado - ED95	53
2.3.4	Misturas de Etanol e melhoradores da autoignição	57
2.3.5	Métodos de Modelagem	64
3	Aparato Experimental	<b>67</b>
3.1	Bancada de Teste	68
3.1.1	MCR	69
3.1.2	Sistema Common Rail	74
3.1.3	Sistema de Injeção EFS	76
3.1.4	Câmara de Alta velocidade	78
3.1.5	Sistema de Aquisição de Dados de Pressão	78
4	Modelagem Experimental e Procedimento de Cálculo	<b>80</b>
4.1	Temperatura no Interior do Cilindro	84
4.2	Atraso da Ignição	85
4.3	Testes na MCR	87
4.3.1	Testes preliminares	87
4.3.2	Testes finais	95
4.4	Tratamento dos Dados	97
5	Resultados e Discussões	<b>99</b>
5.1	Resultados dos Testes Preliminares	99
5.1.1	Testes de Diesel S50 e ED95	99
5.1.2	Testes de Misturas de Etanol com PEG400	108
5.1.3	Testes de Misturas de Etanol com PEG600	124



5.1.4	Testes de Misturas Etanol com n-Butanol	132
5.2	Resultados dos Testes Finais	141
5.2.1	Testes com Diesel S10	141
5.2.2	Testes das misturas de etanol e PEG400 (13%)	151
5.2.3	Testes das misturas de etanol e n-butanol (10%)	158
5.2.4	Comentários Finais	163
<b>6</b>	<b>Conclusões e Recomendações</b>	<b>167</b>
6.1	Conclusões	167
6.1.1	Influências na utilização do combustível alternativo	167
6.1.2	Efeitos do avanço da injeção	170
6.2	Recomendações e Sugestões para Trabalhos Futuros	171
	Referências bibliográficas	<b>174</b>
A	Software de Análise de Dados	<b>183</b>
B	Análise das Incertezas	<b>185</b>
B.1	Análise na Medição de Variáveis	185
B.2	Propagação das incertezas	186

## Lista de figuras

1.1	Emissões antrópicas totais associadas à matriz energética brasileira (2014), em MtCO <sub>2</sub> -eq.	21
1.2	Emissões brasileiras de gases de efeito estufa, período 1990-2012 em CO <sub>2</sub> eq .	21
1.3	Ciclo termodinâmico do motor de ignição por compressão para a combustão de óleo diesel e etanol	23
2.1	Fases de combustão - ignição por compressão.	31
2.2	Atraso da ignição.	35
2.3	Etapas do atraso da ignição.	37
2.4	Composição do ED 95.	54
2.5	Fórmula molecular do polietileno glicol.	58
2.6	Cota do mercado em 2014 para n-butanol.	63
3.1	MCR instalada no LEV (PUC-Rio).	67
3.2	Adaptação e instalação da MCR para testes de ignição por compressão.	68
3.3	Desenho representativo do interior da MCR.	70
3.4	Posição do sistema no início do processo de compressão.	71
3.5	Ação do fluido da válvula de estrangulamento entre o pistão de equilíbrio mássico e a ação da válvula quando o pistão está próximo ou no PMS (Stop).	72
3.6	Posição do sistema no final do processo de compressão.	72
3.7	Fotografias do cabeçote da MCR.	73
3.8	Tela de interface do usuário na MCR(RCM CAMAS V3.3).	73
3.9	Vista em corte de uma bomba de alta pressão Bosch modelo CP3.3.	75
3.10	Acumulador de pressão e injetor instalado na bancada de teste.	76
3.11	Injetor Common Rail (acima) e em corte (abaixo).	77
3.12	Injetor Common Rail instalado no cabeçote da MCR.	77
3.13	Sistema de injeção EFS e fotos da tela da interface do usuário no EFS.	78
3.14	Câmera de alta velocidade, esquema de filmagem dos ensaios e capturas do vídeo de combustão de diesel.	79
3.15	Sistema de aquisição de dados de pressão na bancada de teste.	79
4.1	Volume de controle considerando as válvulas fechadas na máquina de compressão rápida.	81
4.2	Determinação do início da combustão através da curva de calor liberado.	86
4.3	Determinação do início da combustão mediante a utilização das curvas de pressão e suas respectivas derivadas.	87
5.1	Pressão no cilindro para o teste com Diesel S50, 1500 rpm e RC = 15,92:1.	103

- 5.2 Ignição e combustão no teste com diesel S50, 1500 rpm, RC = 15,92:1 e IDI = 2,40 mm ( $\sim 15^\circ$  - Quadro 11) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 103
- 5.3 Pressão no cilindro para o teste com ED95, 1750 rpm e RC = 20,65:1. 104
- 5.4 Ignição e combustão no teste com ED95, 1750 rpm, RC = 20,65:1 e IDI = 4,10 mm ( $\sim 20^\circ$  - Quadro 8) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 104
- 5.5 Ignição e combustão no teste com ED95, 1750 rpm, RC = 20,65:1 e IDI = 6,20 mm ( $\sim 25^\circ$  - Quadro 6) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 105
- 5.6 Pressão no cilindro para o teste com ED95, 1900 rpm e RC = 24,75:1. 106
- 5.7 Ignição e combustão no teste com ED95, 1900 rpm, RC = 24,75:1 e IDI = 2,40 mm ( $\sim 15^\circ$  - Quadro 7) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 106
- 5.8 Ignição e combustão no teste com ED95, 1900 rpm, RC = 24,75:1 e IDI = 4,30 ( $\sim 20^\circ$  - Quadro 6) mm antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 107
- 5.9 Ignição e combustão no teste com ED95, 1900 rpm, RC = 24,75:1 e IDI = 6,60 mm ( $\sim 24^\circ$  - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 107
- 5.10 Pressão no cilindro para o teste com a mistura de etanol e PEG400 (13%), 1750 rpm e RC = 21,64:1. 112
- 5.11 Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (13%), 1750 rpm, RC = 21,64:1 e IDI = 4,70 mm ( $\sim 24^\circ$  - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 113
- 5.12 Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (13%), 1750 rpm, RC = 21,64:1 e IDI = 6,10 mm ( $\sim 27^\circ$  - Quadro 4) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 113
- 5.13 Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (13%), 1750 rpm, RC = 21,64:1 e IDI = 9,50 mm ( $\sim 33^\circ$  - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 114
- 5.14 Pressão no cilindro para o teste com a mistura de etanol e PEG400 (13%), 1900 rpm, RC = 25,88:1. 115
- 5.15 Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (13%), 1900 rpm, RC = 25,88:1 e IDI = 7,30 mm ( $\sim 24^\circ$  - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 115
- 5.16 Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (13%), 1900 rpm, RC = 25,88:1 e IDI = 8,80 mm ( $\sim 27^\circ$  - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 116
- 5.17 Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (13%), 1900 rpm, RC = 25,88:1 e IDI = 11,00 mm ( $\sim 31^\circ$  - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 116
- 5.18 Pressão no cilindro para o teste com a mistura de etanol e PEG400 (15%), 1750 rpm e RC = 22,28:1. 117
- 5.19 Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (15%), 1750 rpm, RC = 22,28:1 e IDI = 2,60 mm ( $\sim 17^\circ$  - Quadro 7) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 117

- 5.20 Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (15%), 1750 rpm, RC = 22,28:1 e IDI = 4,90 mm ( $\sim 23^\circ$  - Quadro 6) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 118
- 5.21 Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (15%), 1750 rpm, RC = 22,28:1 e IDI = 5,80 mm ( $\sim 25^\circ$  - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 118
- 5.22 Pressão no cilindro para o teste com a mistura de etanol e PEG400 (15%), 1900 rpm e RC = 25,58:1. 119
- 5.23 Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (15%), 1900 rpm, RC = 25,58:1 e IDI = 2,60 mm ( $\sim 17^\circ$  - Quadro 7) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 119
- 5.24 Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (15%), 1900 rpm, RC = 25,58:1 e IDI = 5,00 mm ( $\sim 23^\circ$  - Quadro 6) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 120
- 5.25 Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (15%), 1900 rpm, RC = 25,58:1 e IDI = 7,00 mm ( $\sim 27^\circ$  - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 120
- 5.26 Pressão no cilindro para o teste com a mistura de etanol e PEG400 (20%), 1750 rpm e RC = 20,83:1. 121
- 5.27 Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (20%), 1750 rpm, RC = 20,83:1 e IDI = 4,00 mm ( $\sim 20^\circ$  - Quadro 6) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 122
- 5.28 Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (20%), 1750 rpm, RC = 20,83:1 e IDI = 5,60 mm ( $\sim 24^\circ$  - Quadro 6) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 122
- 5.29 Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (20%), 1750 rpm, RC = 20,83:1 e IDI = 7,20 mm ( $\sim 27^\circ$  - Quadro 6) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 123
- 5.30 Pressão no cilindro para o teste com a mistura de etanol e PEG600 (7%), 1750 rpm e RC = 22,06:1. 127
- 5.31 Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG600 (7%), 1750 rpm, RC = 22,06:1 e IDI = 5,20 mm ( $\sim 24^\circ$  - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 128
- 5.32 Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG600 (7%), 1750 rpm, RC = 22,06:1 e IDI = 6,60 mm ( $\sim 27^\circ$  - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 128
- 5.33 Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG600 (7%), 1750 rpm, RC = 22,06:1 e IDI = 8,50 mm ( $\sim 31^\circ$  - Quadro 4) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 129
- 5.34 Pressão no cilindro para o teste com a mistura de etanol e PEG600 (7%), 1900 rpm e RC = 26,50:1. 129
- 5.35 Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG600 (7%), 1900 rpm, RC = 26,50:1 e IDI = 6,50 mm ( $\sim 25^\circ$  - Quadro 4) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 130
- 5.36 Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG600 (7%), 1900 rpm, RC = 26,50:1 e IDI = 8,60 mm ( $\sim 29^\circ$  - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps. 131

5.37	Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG600 (7%), 1900 rpm, RC = 26,50:1 e IDI = 11,00 mm ( $\sim 33^\circ$ - Quadro 4) antes do PMS. Imagens a 30000 qps.	131
5.38	Pressão no cilindro para o teste com a mistura de etanol e n-Butanol (10%), 1900 rpm e RC = 26,81:1.	135
5.39	Ignição e combustão no teste da mistura etanol e n-Butanol (10%), 1900 rpm, RC = 26,81:1 e IDI = 5,70 mm ( $\sim 24^\circ$ - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.	136
5.40	Ignição e combustão no teste da mistura etanol e n-Butanol (10%), 1900 rpm, RC = 26,81:1 e IDI = 8,40 mm ( $\sim 29^\circ$ - Quadro 4) antes do PMS. Imagens a 30000 qps.	136
5.41	Ignição e combustão no teste da mistura etanol e n-Butanol (10%), 1900 rpm, RC = 26,81:1 e IDI = 9,40 mm ( $\sim 31^\circ$ - Quadro 4) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.	137
5.42	Pressão no cilindro para o teste com a mistura de etanol e n-Butanol (15%), 1900 rpm e RC = 26,81:1.	137
5.43	Ignição e combustão no teste da mistura etanol e n-Butanol (15%), 1900 rpm, RC = 26,81:1 e IDI = 7,50 mm ( $\sim 29^\circ$ - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.	138
5.44	Ignição e combustão no teste da mistura etanol e n-Butanol (15%), 1900 rpm, RC = 26,81:1 e IDI = 8,60 mm ( $\sim 31^\circ$ - Quadro 4) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.	138
5.45	Ignição e combustão no teste da mistura etanol e n-Butanol (15%), 1900 rpm, RC = 26,81:1 e IDI = 9,70 mm ( $\sim 33^\circ$ - Quadro 4) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.	139
5.46	Pressão no cilindro para o teste com óleo Diesel S10, 1500 rpm e RC = 16:1.	143
5.47	Calor aparente liberado para o teste com óleo Diesel S10, 1500 rpm e RC = 16:1.	144
5.48	Pressão no cilindro para o teste com óleo Diesel S10, 1900 rpm e RC = 20:1.	145
5.49	Calor aparente liberado para o teste com óleo Diesel S10, 1900 rpm e RC = 20:1.	146
5.50	Pressão no cilindro para o teste com óleo Diesel S10, 2400 rpm e TC = 24:1.	147
5.51	Calor aparente liberado para o teste com óleo Diesel S10, 2400 rpm e RC = 24:1.	149
5.52	Pressão no cilindro para o teste da mistura de etanol e PEG 400 (13%), 1900 rpm e RC = 20:1.	153
5.53	Calor aparente liberado para o teste da mistura de etanol e PEG 400 (13%), 1900 rpm e RC = 20:1	154
5.54	Pressão no cilindro para o teste da mistura de etanol e PEG 400 (13%), 2400 rpm e RC = 24:1.	155
5.55	Calor aparente liberado para o teste da mistura de etanol e PEG 400 (13%), 2400 rpm e RC = 24:1	156
5.56	Pressão no cilindro para o teste da mistura de etanol e n-butanol (10%), 2400 rpm e RC = 24:1.	160

5.57	Calor aparente liberado para o teste da mistura de etanol e n-butanol (10%), 2400 rpm e RC = 24:1	161
5.58	Pressão no cilindro para o teste de dois combustíveis com IDI = 2 mm ~ 13°, 2400 rpm e RC = 24:1.	165
5.59	Pressão no cilindro para o teste de dois combustíveis com IDI = 3 mm ~ 17°, 2400 rpm e RC = 24:1.	166

## Lista de tabelas

2.1	Composição do Aditivo	54
2.2	Propriedades físicas e químicas dos compostos do ED95	55
2.3	Principais parâmetros analisados e método de ensaio empregado na caracterização do combustível ED95.	55
2.4	Valores de massa de etanol aditivado, resíduo obtido e % final após os ensaios de destilação simples.	56
2.5	Valores de massa de etanol aditivado, resíduo obtido e % final após os ensaios de destilação simples.	57
2.6	Viscosidade de alguns PEG a $100C \pm 0,3^{\circ}C$ .	59
2.7	Composição de combustível testado em motor de ignição por compressão	59
2.8	Resultados obtidos para cada aditivo.	59
2.9	Dados sobre os isômeros do butanol	61
2.10	Propriedades dos combustíveis.	62
3.1	Especificações da MCR	74
4.1	Poder calorífico inferior dos combustíveis testados.	88
4.2	Condições de operações para o teste de Diesel S50.	89
4.3	Condições de operações para teste com ED95.	90
4.4	Condições de operações para teste com Etanol + PEG400 (7%).	90
4.5	Condições de operações para teste com Etanol + PEG400 (10%).	90
4.6	Condições de operações para teste com Etanol + PEG400 (13%).	91
4.7	Condições de operações para teste com Etanol + PEG400 (15%).	91
4.8	Condições de operações para teste com Etanol + PEG400 (20%).	92
4.9	Condições de operações para teste com Etanol + PEG600 (7%).	92
4.10	Condições de operações para teste com Etanol + n-Butanol (10%).	93
4.11	Condições de operações para teste com Etanol + n-Butanol (15%).	93
4.12	Condições de operações para o teste de Diesel S10.	95
4.13	Condições de operações para teste com Etanol + PEG400 (13%).	96
4.14	Condições de operações para teste com Etanol + n-Butanol (10%).	96
4.15	Principais características técnicas do motor DW10CTED4	97
5.1	Resultados dos testes com Diesel S50 e ED95.	100
5.2	Resumo dos parâmetros da combustão para os combustíveis testados (Diesel S50 e ED95).	101
5.3	Resultados dos testes das misturas de etanol e PEG400.	110
5.4	Resumo dos parâmetros da combustão para as misturas de etanol e PEG400.	111
5.5	Resultados dos testes das misturas de etanol e PEG600.	126
5.6	Resumo dos parâmetros da combustão para as misturas de etanol e PEG600.	127
5.7	Resultados dos testes das misturas de etanol e n-Butanol.	133
5.8	Resumo dos parâmetros da combustão para as misturas de etanol e n-butanol.	134

5.9	Resultados dos testes com Diesel S10.	142
5.10	Atraso da ignição para os testes com óleo Diesel S10.	149
5.11	Resultados dos testes da mistura de etanol e PEG 400 (13%).	152
5.12	Atraso da ignição para os testes da mistura de etanol e PEG 400 (13%).	157
5.13	Resultados dos testes da mistura de etanol e n-butanol (10%).	159
5.14	Atraso da ignição para os testes da mistura de etanol e n-butanol (10%).	162
5.15	Parâmetros da combustão para os diferentes combustíveis testados.	164
B.1	Incertezas dos equipamentos utilizados.	186



## Lista de Símbolos

### Símbolos Romanos

$A$	Constante para a determinação da relação $c_p/R$
$A/C$	Razão ar - combustível
AEHC	Álcool etílico hidratado combustível
AI	Atraso da Ignição
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BEN	Balanco Energético Nacional
$^{\circ}\text{C}$	Graus centígrados
$c$	Calor específico
$^{\circ}\text{CA}$	Ângulo de virabrequim
$\text{CO}$	Monóxido de carbono
$\text{CO}_2$	Dióxido de carbono
$\text{CH}_3\text{OH}$	Metanol
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	Etanol
$d/dt$	Primeira derivada em função do tempo
$d/dt^2$	Segunda derivada em função do tempo
$d/dt^3$	Terceira derivada em função do tempo
$DM$	Desvio da média
$dQ/dt$	Taxa de liberação de calor
E	Início da injeção de combustível
EGR	Sistema de recirculação dos gases de exaustão
fmq	Fração de massa queimada
$h$	Entalpia
$HC$	Hidrocarboneto
$\text{H}_2\text{O}$	Água
ICE	Ignição por centelha
ICO	Ignição por compressão
ICOM	Ignição por combustão
IDI	Início da injeção
INPM	Porcentagem de álcool em peso ou grau alcoólico
$J$	Joule
$kJ$	Quilo Joule
L	Varição na curva de pressão que indica o início da combustão
LEV	Laboratório de Engenharia Veicular

$lhv$	Poder calorífico inferior
$m$	Massa
MCR	Máquina de compressão rápida
$mg$	Miligrama
$ml$	Mililitro
MP	Material particulado
MON	Índice de Octanagem mediante a norma ASTM D2700
Mt	Megatonelada
$N_2$	Formula química do nitrogênio gasoso
NC	Numero de cetano
$NO_x$	Óxidos de nitrogênio
$O_2$	Oxigenio
$-OH$	Radical hydroxila
$p$	Pressão
PCI	Poder calorífico inferior
PEG	Polietilenoglicol
PEO	Óxido de polietileno
PFI	Injeção de combustível no pósito
$P_{Max}$	Pressão máxima
PMI	Ponto morto inferior
PMS	Ponto morto superior
$Q$	Calor liberado
$R$	Constante universal dos gases
RC	Relação de compressão
RCCI	Ignição por compressão com reatividade controlada
rps	Revoluções por segundo
$SO_2$	Dióxido de enxofre
$SO_4$	Sulfato
$T$	Temperatura
$t$	Tempo
$V$	Volume
$U$	Energia interna
$\bar{X}$	Média

### Símbolos Gregos

$\eta$	Eficiência
$\gamma$	Relação de calores específicos

## Sub-índice

<i>ar</i>	Ar
<i>ch</i>	Referente ao total calor liberado
<i>comb</i>	Combustível
<i>D</i>	Diesel
<i>e</i>	Etanol
<i>f</i>	Fluido
<i>ht</i>	Referente ao calor perdido pelas paredes
<i>i</i>	Instante de tempo
<i>n</i>	Referente ao calor líquido
<i>o</i>	Admissão de ar
<i>p</i>	Pressão constante
<i>v</i>	Volume constante