



Juan Carlos Valdez Loaiza

Ignição por Compressão com Reatividade Controlada de Óleo Diesel e Etanol em 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 Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Sergio Leal Braga

Rio de Janeiro
Agosto de 2014



Juan Carlos Valdez Loaiza

**Ignição por Compressão com Reatividade Controlada de
Óleo Diesel e Etanol em Máquina de Compressão Rápida**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor 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

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Tadeu Cavalcante Cordeiro de Melo

Centro de Pesquisas da PETROBRAS

Prof. Wladimyr Mattos da Costa Dourado

Instituto de Aeronáutica e Espaço

Ricardo Hernandez Pereira

Prof José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de Agosto de 2014

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

Juan Carlos Valdez Loaiza

Graduou-se em Engenharia Mecânica pela Universidad Católica de Santa Maria, Arequipa-Perú em 2006. Obteve o Título de Mestre em Engenharia Mecânica na PUC-Rio em 2009 (Termociências, numérico, com ênfases na simulação de sistemas e componentes de refrigeração e condicionamento de ar, sistemas secundários e nanofluidos). Atualmente é pesquisador no LEV/PUC-Rio, estando envolvido no uso de combustíveis alternativos em motores de combustão interna.

Ficha Catalográfica

Loaiza, Juan Carlos Valdez

Ignição por compressão com reatividade controlada de óleo diesel e etanol em máquina de compressão rápida / Juan Carlos Valdez Loaiza; orientador: Sérgio Leal Braga. – 2014.

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

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2014.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Combustão. 3. Ignição por compressão com reatividade controlada. 4. Dual-fuel. 5. Diesel-etanol. 6. Máquina de compressão rápida. I. Braga, Sergio Leal. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Deixa ir às pessoas que só chegam para compartilhar queixas, problemas, histórias desastrosas, medo e juízo dos outros. Se alguém procura um cubo para jogar seu lixo, procura que não seja tua mente – DALAI LAMA.

Agradecimentos

A minha mãe e irmã por seu amor e apoio incondicional.

Ao Professor Sérgio Leal Braga, meu orientador, pelo apoio recebido e pela ideia original do trabalho.

A meus amigos Mijail, Marco, Oberdan, Marvin, Daniela, Veronica, Dario, Javier pela amizade e pelos bons momentos compartilhados nestes anos.

Aos Engenheiros, Giovanni Calfa, Severino Wanderley, Nestor Correa, Fernando Zegarra e Leonardo Costa Braga, pela colaboração, interesse e apoio técnico na realização deste trabalho.

Aos funcionários do ITUC, Marco, Renato, Leandro, Luciano, pelo suporte e apoio.

Aos técnicos do laboratório de Engenharia Veicular, assim como ao estagiário Felipe Murad.

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

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

A todos aqueles que contribuíram **positivamente** para a realização deste trabalho.

Resumo

Loaiza, Juan Carlos Valdez; Braga Sergio Leal. **Ignição por Compressão com Reatividade Controlada de Óleo Diesel e Etanol em Máquina de Compressão Rápida**. Rio de Janeiro, 2014. 134p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Serão necessários muitos anos para que os biocombustíveis sejam capazes de substituir integralmente os derivados fósseis. Este trabalho visa estudar formas alternativas de conversão de energia contida nos combustíveis utilizados em motores de combustão interna. Maiores eficiências na conversão da energia contida no combustível e uma menor emissão dos gases de exaustão são benefícios associados à ignição por compressão de reatividade controlada, RCCI, onde dois fluidos com diferentes reatividades são introduzidos na câmara de combustão em instantes diferentes. Optou-se pelo uso de uma máquina de compressão rápida, MCR, capaz de controlar parâmetros relevantes, como taxa de compressão, pressões, tempos de injeção, que foi adaptada para receber dois sistemas de injeção direta na câmara de combustão. Como segundo combustível, que substitui parcialmente o óleo diesel, que é empregado tradicionalmente em motores de ignição por compressão, optou-se pelo etanol hidratado. Os estudos revelaram que diferentes formas de injeção dos dois combustíveis produzem processos muito diferentes, para as mesmas quantidades de combustíveis injetados. Os resultados são apresentados na forma de pressão indicada como função do ângulo equivalente, bem como calor liberado e atraso de ignição. Experiências foram conduzidas para uma ou duas injeções de etanol por ciclo, em diferentes tempos. Altas razões de substituição do combustível fóssil foram obtidas, quando comparadas com a técnica de fumigação, onde o segundo combustível é misturado externamente ao ar de combustão.

Palavras chaves

Combustão; Ignição por Compressão com Reatividade Controlada; Dual – Fuel; Diesel – Etanol; Máquina de Compressão Rápida.

Abstract

Loaiza, Juan Carlos Valdez; Braga, Sergio Leal (Advisor). **Reactivity Controlled Compression Ignition of Diesel Fuel and Ethanol in Rapid Compression Machine**. Rio de Janeiro, 2014. 134p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Many years will be needed for biofuels or other renewable sources to be able to fully replace fossil fuels. This work aims to study alternative ways of converting energy contained in fuels used in internal combustion engines. Higher efficiencies in converting the energy contained in the fuel and lower emission of harmful exhaust gases are benefits associated with the Reactivity Controlled Compression Ignition, known for RCCI. In this type of combustion, two fluids with different ignition-reactivity characteristics are introduced into the combustion chamber at different times. To better understand this phenomenon, it was used a RCM, that is able to control, more easily, relevant parameters such as compression ratio, temperatures, pressures, injection times etc. As a second fuel, which partially replaces the diesel, which is traditionally used in compression ignition engines, it was used the ethanol. The RCM was then adapted to receive two systems for direct injection into the combustion chamber. Studies have shown that different forms of injection of the two fuels produce very different processes to the same amount of fuel injected. The results are presented in the form of indicated pressure as a function of position. Heat released and ignition delay are also presented. Experiments were conducted for one or two injections of ethanol per cycle at different times. High substitution rates of the fossil fuel were obtained when compared to injections of external mixtures of diesel and ethanol or fumigation technique, where the second fuel is mixed externally with the combustion air.

Keywords

Combustion; reactivity controlled compression ignition; dual-fuel; diesel-ethanol; rapid compression machine.

Sumário

1. Introdução	19
1.1. Objetivo	24
1.2. Justificativa	24
1.3. Contexto histórico	25
1.4. Conteúdo do trabalho	30
2. Revisão Bibliográfica	31
2.1 Mapa Razão de Equivalência - Temperatura (ϕ -T)	31
2.2. Novos Modos de Combustão em Motores CI	37
2.2.1 Ignição por Compressão de Carga Homogênea	37
2.2.2 ignição por Compressão de Carga Pré-misturada	38
2.2.3 Combustão em Baixa Temperatura	39
2.2.4 Ignição por Compressão de Reatividade Controlada	41
2.3 Estratégias de injeção de combustível	45
2.4 Estratégias de injeção Dual Fuel	50
2.4.1 Fumigação	51
2.4.2 Dupla Injeção Direta	56
3. Aparato e Procedimento Experimental	60
3.1 Máquina de Compressão Rápida	60
3.2 Princípio de Funcionamento da Máquina de Compressão Rápida	62
3.3 Configuração Dupla Injeção Direta	69
3.4 Equipamentos Complementários	73
3.5 Calibração dos Injetores para Óleo Diesel e Etanol	75
3.6 Procedimento Experimental	77
3.7 Cálculo da Quantidade de Combustível Injetada	78
3.8 Tempo de Compressão	80
3.9 Velocidade Média do Pistão	80
3.10 Calor Total Liberado	81
3.11 Vazão Mássica	82

4 Desenvolvimento dos Ensaios e Resultados	83
4.1 Etapa I - Caso Base - Diesel	84
4.2 Etapa II - Dual Fuel - Injeção Simples	90
4.3 Etapa III - Dual Fuel - Injeção Dupla de Etanol	94
5 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	114
5.1 Conclusões	114
5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	115
6 Referências Bibliográficas	117
Anexo I: Dados Técnicos do Sensor de Pressão Kistler tipo 2852A	129
Anexo II: iPOD 8427	130
Anexo III: High Pressure Regulator (HPR) 8244	131
Anexo IV: Propriedades Termofísicas	132
Anexo V: Análise de incertezas experimentais	133

Lista de figuras

Figura 1 - Análises do ciclo Diesel em um motor ICO com diesel e Etanol	22
Figura 2 - Cotação do Barril de Petróleo: 1970 – 2005	28
Figura 3 - Evolução cronológica da legislação sobre poluentes Nos EUA em veículos de passageiros com motores ICO	29
Figura 4 - Evolução tecnologias dos motores ICO	30
Figura 5 - Emissão de CO ₂ por categoria de veículo	30
Figura 6 - Primeira representação gráfica do mapa ϕ - T	33
Figura 7 - Mapa (ϕ - T) pressão constante de 6 MPa e tempo de reação de 1 ms	34
Figura 8 - Mapa (ϕ - T) com tempo de reação 2ms representando regiões de formação de MP e NO _x	35
Figura 9 - Monóxido de Carbono (CO) como uma função da temperatura e a razão de equivalência	36
Figura 10 - Hidrocarbonetos não queimados (HC) como uma função da temperatura e a razão de equivalência	36
Figura 11 - Alta eficiência e regimes de combustão limpa sobre um mapa ϕ - T	37
Figura 12 - Modos de Combustão com alta eficiência e regimes de combustão limpa sobre um mapa ϕ - T	37
Figura 13 - Esquema das diversas estratégias de combustão LTC segundo a distância na qual acontece a injeção de Combustível	41
Figura 14 – Efeito sobre as emissões dos modos de combustão CDC, PCCI e RCCI	43
Figura 15 - Avanços das estratégias de combustão convergindo tanto em Hardware quanto em combustível	43
Figura 16 - Pressão do cilindro, para diferentes Modos de Combustão	44
Figura 17 - Classificação dos conceitos de combustão em fase pré-misturada segundo o método de injeção do combustível	46
Figura 18 - Estratégia de injeção de massa vs o tempo para as	

tipologias básicas de injeção múltipla: (a) estratégia de injeção piloto,	
(b) estratégia de pós injeção e (c) estratégia de injeção partida	48
Figura 19 - Esquema dos diferentes parâmetros que entram em jogo na hora de definir uma estratégia de injeção múltipla. Neste caso se representa uma estratégia de injeção partida	48
Figura 20 - Injeções múltiplas.	49
Figura 21 - Emissão de fumaça (FSN), NOx e consumo de Combustível com uma estratégia de três injeções vs o tempo entre pulsos "Dwell"	50
Figura 22 - Efeito da múltipla injeção no desempenho e emissões De um motor de injeção direta com alta velocidade de rotação	51
Figura 23: Fumigação aplicada ao método RCCI	55
Figura 24: Motor de quatro cilindros operando no modo Dual Fuel, com injeção indireta de gasolina e injeção direta de diesel, controladas através de uma só UCE	56
Figura 25 – Esquema do aparato experimental utilizado por Egusquis (2011)	57
Figura 26 - Variação das curvas de pressão com a substituição Diesel/etanol e a carga do motor (RPM: 1.800); injeção do diesel: $P_0 = 9^\circ$ APMS.	57
Figura 27 - Diagrama do posicionamento da injeção direta Dual Fuel	60
Figura 28 - Configuração de um injetor central e quatro válvulas em um motor ICO.	61
Figura 29 - Vista em corte de uma MCR mostrando a parte Interna	62
Figura 30 - Máquina de Compressão Rápida instalada no Laboratório de Engenharia Veicular (PUC-Rio)	64
Figura 31 - Áreas funcionais da Máquina de Compressão Rápida Instalada no Laboratório de Engenharia Veicular PUC-Rio	65
Figura 32 - Posição do sistema no início do experimento	65
Figura 33 - Posição do sistema no final do experimento	66
Figura 34 - Interface de operação da Máquina de Compressão Rápida, software CAMAS	68
Figura 35 - Interface de operação do Trigger Sinais no software CAMAS	69

Figura 36 - Interface do Crank Calculator no software CAMAS	69
Figura 37 - Diagrama de montagem dos dois injetores na MCR	70
Figura 38 - Esquema de montagem simplificado do aparato experimental de dupla injeção direta Dual Fuel (Diesel-Etanol)	71
Figura 39 - Cabeçote do cilindro da MCR mostrando os dois injetores(Diesel-Etanol)	72
Figura 40 - Dados Geométricos da MCR no modo Dual Fuel	73
Figura 41 - Montagem dos sistemas de injeção de combustível Dual Fuel na MCR no LEV da PUC-Rio	73
Figura 42 - Sistema utilizado para pressurizar e controlar a injeção do Etanol	74
Figura 43 - Tela principal do software Kistler SCP, utilizado para redefinir o valor do sensor de pressão	74
Figura 44 - Tela principal do software XIPOD, interface com o Injetor de óleo diesel	75
Figura 45 - Tela principal do software WINHPR, interface com regulador da bomba de alta pressão para o óleo diesel	75
Figura 46 - Curva de calibração do injetor com etanol hidratado (H100), pressão de injeção 100 bar	77
Figura 47 - Curva de calibração do injetor do óleo diesel, pressão de injeção 1070 bar	78
Figura 48 – Pressão vs Ângulo no interior do cilindro para teste com óleo diesel	88
Figura 49 - Calor vs Ângulo no interior do cilindro para teste com óleo diesel	89
Figura 50 - Estratégia de injeção Dual Fuel, caso 1	90
Figura 51 - Estratégia de injeção Dual Fuel, caso 2	90
Figura 52 - Pressão vs Ângulo no interior do cilindro, cargas de óleo diesel puro y duas estratégias Dual Fuel (35% Etanol – 25% Diesel)	91
Figura 53 - Calor vs Ângulo no interior do cilindro, cargas de óleo diesel puro y duas estratégias Dual Fuel (35% Etanol – 25% Diesel)	92
Figura 54 - Pressão vs Ângulo no interior do cilindro, cargas de óleo diesel puro y duas estratégias Dual Fuel (30% Etanol – 45% Diesel)	92
Figura 55 - Calor vs Ângulo no interior do cilindro, cargas de óleo	

diesel puro y duas estratégias Dual Fuel (30% Etanol – 45% Diesel)	93
Figura 56 - Pressão vs Ângulo no interior do cilindro para teste com óleo diesel, Etapa III	95
Figura 57 - Calor vs Ângulo no interior do cilindro para teste com óleo diesel, Etapa III	96
Figura 58 - Imagens da Combustão Diesel, com TC=20:1	97
Figura 59 - Estratégia de injeção Dual Fuel, caso 1, Etapa III	98
Figura 60 – Pressão vs Ângulo no interior do cilindro para teste Dual Fuel (Etanol - Diesel) etapa III	98
Figura 61 - Vazamento no injetor de Etanol no interior da MCR durante os testes com TC=20:1	99
Figura 62 - Calor liberado vs Ângulo no interior do cilindro para teste Dual Fuel (Etanol - Diesel) etapa III	99
Figura 63 - Imagens da combustão Dual Fuel, Diesel Etanol com TC = 20:1 e razão de substituição igual a 80%	100
Figura 64 - Estratégia de injeção Dual Fuel, três injeções, Etapa III	101
Figura 65 - Pressão vs Ângulo no interior do cilindro, Estratégias Dual Fuel etapa III	102
Figura 66 - Calor vs Ângulo no interior do cilindro, Estratégias Dual Fuel etapa III	105
Figura 67 - Pressão vs Ângulo no interior do cilindro, influencia da Pós-injeção no atraso da combustão. Estratégias Dual Fuel etapa III	106
Figura 68 - Calor vs Ângulo no interior do cilindro, influencia da pós-injeção no atraso da combustão. Estratégias Dual Fuel etapa III	107
Figura 69 - Pressão vs Ângulo no interior do cilindro para teste com óleo diesel puro e estratégias Dual Fuel com duas e três injeções mudando o ponto de injeção do óleo diesel	108
Figura 70 - Calor vs Ângulo no interior do cilindro para teste com óleo diesel puro e estratégias Dual Fuel com duas e três injeções mudando o ponto de injeção do óleo diesel	108
Figura 71 - Pré-injeção de etanol – Injeção de óleo diesel	109
Figura 72 - Pós-injeção de etanol – Injeção de óleo diesel	109
Figura 73 - injeção simultânea óleo diesel – etanol	109
Figura 74 - Pressão vs Ângulo, mostrando o efeito do ponto de	

injeção do etanol com referência a injeção de óleo diesel	110
Figura 75 - Calor vs Ângulo, mostrando o efeito do ponto de injeção do etanol com referência a injeção de óleo diesel	110

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Etanol como combustível em motores ICO	23
Tabela 2 - Modos de combustão LTC	41
Tabela 3 - Resumo das principais conclusões decorrentes da fumigação de etanol em motores ICO	54
Tabela 4 - Características da MCR modelo TeRCM-k84.	67
Tabela 5 - Características do injetor para etanol hidratado (H100)	76
Tabela 6 - Especificações do injetor HDEV5	76
Tabela 7 - Características do injetor para óleo diesel.	77
Tabela 8 - Especificações do injetor tipo standard LD	78
Tabela 9 - Dados do Motor DW10 CTED4	79
Tabela 10 - Dados do teste na MCR para 100% da carga máxima.	79
Tabela 11 - Resumo das estratégias de injeção Dual Fuel	85
Tabela 12 - Calibração da MCR procurando uma pressão final=38,25±0,25 bar	86
Tabela 13 - Resultado dos testes na MCR com injeção de óleo diesel, TC=16:1	87
Tabela 14 - Resultado dos testes na MCR com injeção de óleo diesel, TC=20:1	95
Tabela IV – Propriedades termofísicas do ar, diesel e etanol (20°C e 1atm)	129

Lista de símbolos

A	Ar	[-]
AAVE	Ângulo de abertura das válvulas de escapamento	[-]
APMS	Antes do Ponto Morto Superior	[-]
BSU	Unidade de Fumaça Bosch	[-]
C	Carbono, Combustível	[-]
CAI	Auto Ignição Controlada	[-]
CCEU	Ciclo de Condução Extra-Urbano	[-]
CDC	Combustão Diesel Convencional	[-]
CEC	Consumo Específico de Combustível	[g/kW-h]
CO	Monóxido de Carbono	[-]
CO ₂	Dióxido de Carbono	[-]
Cv	Calor a Volume Constante	[J/kg-K]
dBA	Decibel com filtro tipo A	[-]
DCDC	Combustão Diesel limpa com combustível oxigenado	[-]
DF	Dual Fuel	[-]
DPF	Filtro de Partículas	[-]
DI	Injeção Direta	[-]
DME	Di-Methyl-Ether	[-]
DOE	Departamento de Energia dos Estados Unidos	[-]
DP	Duração de cada Pulso	[ms]
d	Derivada	[-]
EGR	Recirculação de Gases de Exaustão	[-]
EURO	Comissão Europeia para veículos leves e pesados	[-]
EPA	Agência de Proteção Ambiental	[-]
ETBE	Ethyl-Tertiary- Butyl-Ether	[-]
EtOH	Etanol	[-]
EUA	Estados Unidos de América	[-]
EUDC	Ciclo de Condução Extra-Urbano	[-]
FMQ	Fração de Massa Queimada	[-]
FP	Filtro de Partículas	[-]
g	Gramo	[-]
GBC	Biogás	[-]
GDI	Injeção Direta de Gasolina	[-]
GEE	Gases de Efeito Estufa	[-]
GNV	Gás Natural Veicular	[-]
GNC	Gás Natural Comprimido	[-]
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo	[-]
H	Hidrogênio	[-]
H100	etanol hidratado	[-]
HiMICS	Sistema Inteligente de Combustão com Carga Homogênea e Múltiplas Injeções	[-]
HC	Hidrocarbonetos não queimados	[-]
HCCI	Ignição por Compressão de Carga Homogênea	[-]
HCDC	Combustão Diesel com Carga Homogênea	[-]
HCLI	Injeção Atrasada com Carga Homogênea	[-]

HDDI	Motores de cilindrada unitária elevada dedicados a Transporte de mercadorias	[-]
HPLI	Injeção Atrasada Altamente Pré-misturada	[-]
HSDI	Motores de cilindrada unitária pequena e injeção direta dedicados ao transporte de passageiros	[-]
ICE	Ignição por Centelha	[-]
ICO	Ignição por Compressão	[-]
IEA	Agência Internacional de Energia	[-]
ISAF	Simpósio Internacional de Álcool Combustível	[-]
IVO	Ângulo de fechamento das válvulas de admissão	[-]
kW	Kilowatt	[-]
kg	kilograma	[-]
L	litro	[l]
LEV	Laboratório de Engenharia Veicular	[-]
LTC	Combustão em baixa temperatura	[-]
m	massa	[kg, g]
MCI	Motor de Combustão Interna	[-]
MCR	Máquina de Compressão Rápida	[-]
MK	Cinética Modulada	[-]
MTBE	Methyl-Tertiary-Butyl Ether	[-]
MP	Material Particulado	[-]
MPa	Megapascal	[MPa]
ms	milisegundo	[ms]
MULDIC	Combustão Diesel de Fases Múltiplas	[-]
MWM	Motor Werke Mannheim – Motores Diesel LTda	[-]
NADI	Injeção Direta em Ângulo	[-]
NEDC	Novo Ciclo de Condução Europeu	[-]
NO _x	Todos os Óxidos de Nitrogênio	[-]
NTC	Coeficiente de Temperatura Negativa	[-]
N	Rotação do motor	[RPM]
N ₂	Nitrogênio	[-]
O ₂	Oxigênio	[-]
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo	[-]
ORNL	Oak Ridge National Laboratory	[-]
PCCI	Ignição por Compressão de Carga Pré-misturada	[-]
PCI	Combustão de Ignição por Compressão com Carga Pré-misturada	[-]
PDTB	Peroxido de di-terc-butilo	[-]
PFI	Injeção de combustível no pósito	[-]
PEG	Polietileno glicol	[-]
PMI	ponto morto inferior	[-]
PMS	Ponto morto superior	[-]
PME	Pressão Média Efetiva	[MPa]
PREDIC	Combustão Diesel Pré-misturada de Baixa Carga	[-]
ppm	Partes por Milhão	[-]
Qa	Calor Aparente	[J]
QD	Carga de óleo diesel	[g]
QE	Carga de etanol	[g]
RCCI	Ignição por compressão de reatividade controlada	[-]
RPM	Rotações Por Minuto	[min ⁻¹]

RPS	Rotações por segundo	[s ⁻¹]
SAE	Sociedade de Engenheiros Automotivos	[-]
SCR	Catalizador de Redução Seletiva	[-]
Sol	Início da Injeção	[-]
S	Curso do pistão	[mm]
T	Temperatura	[°C, K]
TGV	Turbina de Geometria Variável	[-]
TP	Tempo entre Pulsos	[ms]
TS	Taxa de Substituição	[-]
TC	Taxa de Compressão	[-]
UCE	Unidade de Controle Eletrônica	[-]
UMF	Unidade para medição de fumaça	[-]
Up	Velocidade média do pistão	[mm/s]

Subscritos e Letras Gregas

γ	Expoente politrópico	[-]
ΔT	Diferença de temperatura	[°C; K]
μ	Viscosidade	[N s m ⁻²]
ρ	Densidade ou massa específica	[kg/m ³]
ϕ	Razão de equivalência	[-]
r	real	[-]
e	estequiométrica, etanol	[-]
d	diesel	[-]
inj	relativo à injeção	[-]
rail	relativo ao rail de pressão	[-]
max	máximo	[-]
a	ar	[-]
c	combustível	[-]