

**Antonio Carlos Scardini Villela**

**Desempenho e Combustão de Etanol Anidro e Hidratado em  
Motor Multicombustível**

**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: Sérgio Leal Braga  
Carlos Valois Maciel Braga

Rio de Janeiro,  
Outubro de 2010

**Antonio Carlos Scardini Villela**

## **Desempenho e Combustão de Etanol Anidro e Hidratado em Motor Multicombustível**

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

**Prof. Sérgio Leal Braga**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Sérgio Leal Braga**

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Carlos Valois Maciel Braga**

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Luis Fernando Alzuguir Azevedo**

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Fabício José Pacheco Pujatti**

UFMG

**José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 29 de abril de 2010

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

### **Antonio Carlos Scardini Villela**

Engenheiro Mecânico, graduado pela PUC-Rio em 2000. Atua há 7 anos no segmento de pesquisa e desenvolvimento, com foco no desempenho de combustíveis em motores.

#### Ficha Catalográfica

Villela, Antonio Carlos Scardini

Desempenho e combustão de etanol anidro e hidratado em motor multicomcombustível/ Antonio Carlos Scardini Villela ; orientadores: Sérgio Leal Braga, Carlos Valois Maciel Braga. – 2010.

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

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Motor. 3. Etanol. 4. Anidro. 5. Hidratado. 6. Desempenho. 7. Combustão. 8. Multicomcombustível. I. Braga, Sérgio Leal. II. Braga, Carlos Valois Maciel III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

À minha família e amigos.

## Agradecimentos

Ao engenheiro Leonardo Oliveira de Carvalho pela ajuda na realização dos ensaios em motor e pelas sugestões enriquecedoras.

Ao engenheiro Tadeu Cavalcante Cordeiro de Melo pela referência ao etanol como tema de realização do presente trabalho e pela troca de experiências.

Aos engenheiros Guilherme Bastos Machado, Rogério Nascimento de Carvalho, Ricardo Almeida Barbosa de Sá e Julio Cesar Cuisano Egúsquiza pelas opiniões, esclarecimentos e sugestões que contribuíram para a conclusão desse trabalho.

À estatística Fernanda Villela e ao estagiário Fernando Hofmeister pela ajuda na coleta e tratamento dos dados experimentais.

Aos colegas do CENPES/PDAB/DPM, Eudes Bezerra, Carlos Henrique da Rocha, Romeu Carvalho, Manoel dos Santos, Carlos Leonardo Barbosa, Vinicius Guarabyra, Jader Mendes e Ronaldo Aguiar pela ajuda na disponibilização da infraestrutura experimental.

Aos meus orientadores Sérgio Leal Braga e Carlos Valois Maciel Braga que direcionaram a realização do trabalho.

À PETROBRAS e, em especial, ao gerente geral de P&D do Abastecimento do CENPES, Alípio Ferreira Pinto Júnior e ao gerente de Desempenho de Produtos em Motores do CENPES, Décio Magioli Maia pela oportunidade de realização do presente trabalho.

## Resumo

Villela, Antonio Carlos Scardini; Braga, Sérgio Leal. **Desempenho e Combustão de Etanol Anidro e Hidratado em Motor Multicombustível**. Rio de Janeiro, 2010. 153p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho apresenta um estudo comparativo do desempenho, em banco de provas, de um motor multicombustível do ciclo Otto equipado com um sistema de injeção eletrônica programável, funcionando com etanol hidratado e etanol anidro. Para tanto, foram obtidos resultados de parâmetros de desempenho com esses dois combustíveis, em diferentes condições de operação. A partir dos resultados de pressão, adquiridos por um sensor instalado em um dos cilindros do motor, foram calculados, entre outros, o calor liberado, a taxa de liberação de calor, a fração de massa queimada e a duração da combustão. Os ensaios ocorreram em três condições operacionais do motor multicombustível: potência máxima, torque máximo e em uma condição representativa de velocidade de cruzeiro do motor. Devido à possibilidade de se variar livremente alguns parâmetros normalmente fixos em um motor com um sistema de injeção eletrônica de combustível convencional foi possível otimizar o torque do motor para cada combustível e nas condições operacionais escolhidas, no que se refere ao avanço de ignição e à relação ar-combustível. Dessa forma, pôde-se simular os efeitos da utilização do etanol anidro em motor calibrado para o etanol hidratado. Os resultados mostram os efeitos da variação do conteúdo de água no etanol, bem como a influência da relação ar-combustível e do avanço de ignição sobre o desempenho e a combustão em motor multicombustível. São apresentadas ainda correlações entre as variáveis de desempenho medidas e os parâmetros de combustão calculados, bem como comparações com resultados de desempenho obtidos em veículos multicombustível.

## Palavras-chave

Motor; Multicombustível; Etanol; Anidro; Hidratado; Desempenho; Combustão

## Abstract

Villela, Antonio Carlos Scardini; Braga, Sérgio Leal (Advisor). **Anhydrous and Hydrous Ethanol Performance and Combustion in Multifuel Engine**. Rio de Janeiro, 2010. 153p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present work includes a comparative performance engine test bed study of a multifuel engine equipped with a programmable electronic central unit (ECU), fueled with anhydrous and hydrous ethanol. It is reported fuel consumption, power, torque and exhaust emissions with these two fuels for different operational points. Using pressure data, acquired by a sensor installed in one engine cylinder, it was possible to calculate heat release, rate of heat release, mass fraction burned, combustion duration and others, for selected cases. Tests occurred at three multifuel engine operational points: maximum power, maximum torque and one selected cruise condition. Due to the possibility of setting some parameters normally fixed in commercial engines, torque was optimized regarding spark advance and air fuel ratio, for all selected operational points. So, it was possible to simulate anhydrous ethanol usage in an engine calibrated to hydrous ethanol. Test results presented the effects of water ethanol content, air-fuel ratio and ignition advance influence on performance and combustion of a multifuel engine. Additionally, it is presented some correlations between performance measured and calculated and combustion parameters, as well as comparisons to multifuel vehicle results.

## Keywords

Engine; Multifuel; Ethanol; Anhydrous; Hydrous; Performance; Combustion

# SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVO DO TRABALHO	18
1.1. DESENVOLVIMENTO DA DISSERTAÇÃO	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1. ASPECTOS GERAIS	20
2.2. ETANOL OU ÁLCOOL ETÍLICO	20
2.2.1. HIDRATAÇÃO DO ETANOL	..22
2.3. TECNOLOGIA FLEXÍVEL	22
2.4. TRABALHOS EXPERIMENTAIS	25
3. ANÁLISE TEÓRICA	31
3.1. PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO MOTOR	31
3.2. PARÂMETROS DE DESEMPENHO	33
3.3. PARÂMETROS DE COMBUSTÃO	38
4. APARATO EXPERIMENTAL	43
4.1. SISTEMA DE AUTOMAÇÃO	43
4.2. UNIDADE DE CONDICIONAMENTO DO AR DE ADMISSÃO	44
4.3. UNIDADES DE CONDICIONAMENTO E MEDIÇÃO DE CONSUMO DO COMBUSTÍVEL	45
4.4. MEDIÇÃO DA PRESSÃO E ANÁLISE DE COMBUSTÃO	47
4.5. MOTOR DE TESTE SELECIONADO	51
4.6. INSTALAÇÃO DE UNIDADE PROGRAMÁVEL DE CONTROLE ELETRÔNICO DO MOTOR	53
4.7. MEDIÇÃO DE EMISSÕES	54
5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	56
5.1. COMBUSTÍVEIS	56
5.2. METODOLOGIA DE TESTE	56
5.3. INCERTEZAS DE MEDIÇÃO	62
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
6.1. INCERTEZAS DE MEDIÇÃO	64
6.2. PARÂMETROS DE DESEMPENHO	64
6.2.1. POTÊNCIA	65



6.2.2. TORQUE	67
6.2.3. CONSUMO MÁSSICO DE COMBUSTÍVEL	68
6.2.4. CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL	71
6.2.5. RENDIMENTO TÉRMICO	73
6.2.6. RENDIMENTO VOLUMÉTRICO	74
6.2.7. PRESSÃO MÉDIA EFETIVA	76
6.2.8. EMISSÕES DE POLUENTES	78
6.2.8.1. HIDROCARBONETOS TOTAIS – THC	78
6.2.8.2. MONÓXIDO DE CARBONO – CO	81
6.2.8.3. ÓXIDOS DE NITROGÊNIO – NO <sub>x</sub>	83
6.2.8.4. DIÓXIDO DE CARBONO – CO <sub>2</sub>	85
6.3. PARÂMETROS DE COMBUSTÃO	87
6.3.1. PRESSÃO NO CILINDRO	87
6.3.1.1. POTÊNCIA MÁXIMA	89
6.3.1.2. TORQUE MÁXIMO	93
6.3.1.3. RPM DE CRUZEIRO	96
6.3.2. TEMPERATURA NO CILINDRO	99
6.3.2.1. POTÊNCIA MÁXIMA	100
6.3.2.2. TORQUE MÁXIMO	102
6.3.2.3. RPM DE CRUZEIRO	103
6.3.3. CALOR TOTAL LIBERADO	104
6.3.3.1. CALOR APARENTE E CALOR PERDIDO	105
6.3.4. FRAÇÃO DE MASSA QUEIMADA DE COMBUSTÍVEL (FMQ)	109
6.3.4.1. POTÊNCIA MÁXIMA	111
6.3.4.2. TORQUE MÁXIMO	113
6.3.4.3. RPM DE CRUZEIRO	115
6.3.5. TAXA DE LIBERAÇÃO DE CALOR	117
6.3.5.1. POTÊNCIA MÁXIMA	118
6.3.5.2. TORQUE MÁXIMO	120
6.3.5.3. RPM DE CRUZEIRO	123
6.4. COMPARAÇÃO COM RESULTADOS EM VEÍCULOS	126
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	130
7.1. CONCLUSÕES	130
7.2. TRABALHOS FUTUROS	133

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134
APÊNDICE I - CERTIFICADOS DE ANÁLISE DOS COMBUSTÍVEIS	139
APÊNDICE II - INCERTEZAS DE INSTRUMENTOS	142
APÊNDICE III - RESULTADOS DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO	144
APÊNDICE IV - INCERTEZAS DE MEDIÇÃO DE PARÂMETROS DE COMBUSTÃO	152

## LISTA DE SÍMBOLOS

$(A/C)$	relação ar-combustível
$(A/C)_{esteq}$	relação ar-combustível estequiométrica
$(A/C)_{real}$	relação ar-combustível real no motor
$10\%FMQ$	ângulo em que 10% da fração de massa de combustível é queimada
$90\%FMQ$	ângulo em que 90% da fração de massa de combustível é queimada
$A$	área transversal do cilindro
$a$	coeficiente da equação de Wiebe
$A(\theta)$	área superficial de troca de calor instantânea
$A_c$	área lateral de troca de calor da câmara de combustão,
$A_{cil}$	área lateral do cilindro
$A_L$	área superficial total do cilindro,
APMS	antes do ponto morto superior
$b$	alavanca
$C$	curso do pistão:
$CEC$	consumo específico de combustível
$CO$	monóxido de carbono
$CO_2$	dióxido de carbono
$c_p$	calor específico a pressão constante
$c_v$	calor específico a volume constante
$D$	diâmetro interno do cilindro
$DP$	desvio padrão das medições
$DPMS$	depois do ponto morto superior
$f_{cor}$	fator de correção do modelo de cálculo das perdas convectivas pelas paredes do cilindro
$F$	força
$FMQ$	fração de massa de combustível queimada
$h$	coeficiente de transferência de calor por convecção
$I_A$	incertezas do tipo A
$I_B$	incertezas do tipo B
$I_C$	incerteza combinada

$I_E$	incerteza expandia
$L$	comprimento da biela
$m$	coeficiente da equação de Wiebe
$m_{comb}$	massa de combustível.
$\dot{m}_{ar,s}$	vazão mássica de ar em base seca;
$\dot{m}_{ar,u}$	vazão mássica de ar em base úmida.
$\dot{m}_{comb}$	vazão mássica de combustível.
$\dot{m}_{escape,u}$	vazão mássica dos gases de escape em base úmida.
$m_{mist}$	massa total da mistura ar-combustível
$n$	número de cilindros.
$n$	número de pontos medidos
$N$	rotação do motor
$NO_x$	óxidos de nitrogênio
$n_R$	número de revoluções do eixo de manivelas para cada ciclo por cilindro
$P$	poluente
$P$	potência
$p$	pressão no cilindro
$p_0$	pressão no interior da câmara na compressão sem a ocorrência de combustão
$p_1$	pressão no ângulo de fechamento da válvula de admissão
$p_1, V_1, T_1$	pressão, volume e temperatura no fechamento da admissão
$PCI$	poder calorífico inferior do combustível
$PME$	pressão média efetiva
$PMI$	ponto morto inferior
$PMS$	ponto morto superior
$P_{sat}$	pressão saturação vapor d'água
$Q_a$	calor aparente
$Q_p$	calor perdido pela parede do cilindro
$R$	constante de gás perfeito do ar
$R$	constante universal dos gases

$R$	raio do virabrequim
$r$	taxa de compressão
$s$	índice de base seca
$s$	distância entre o pistão e o centro do eixo de manivelas (m)
$s(P)$	emissões específicas
$s(\theta)$	posição do pistão
$S_1, S_2, \dots$	componentes de calibração, resolução e padrões dos instrumentos
$S_i$	
$T$	temperatura
$T$	torque
$T(\theta)$	temperatura dos gases no interior do cilindro em função do ângulo do eixo de manivelas
$T_l$	temperatura no ângulo de fechamento da válvula de admissão
$T_{amb}$	temperatura ambiente
$THC$	hidrocarbonetos não queimados
$T_p$	temperatura da parede do cilindro, assumida nesse trabalho como constante e igual a 100°C
$u$	índice de base úmida
$U_r$	umidade relativa do ar
$V(\theta)$	volume instantâneo
$V_l$	volume no ângulo de fechamento da válvula de admissão
$V_c$	volume da câmara de combustão.
$V_c$	volume da câmara de combustão.
$V_d$	volume deslocado pelo pistão
$v_g$	velocidade dos gases no cilindro
$v_p$	velocidade do pistão
$V_t$	cilindrada total
$w$	fator de correção de $R$
$W$	trabalho
$W_{por\ ciclo}$	trabalho por ciclo
$x(\theta)$	fração de massa de combustível queimada.

## SÍMBOLOS GREGOS

$\Delta\theta$	duração da combustão (entre $\theta = 0$ até $\theta = 1$ )
$\Delta\theta_{b}^{*}$	duração da combustão
$\Delta\theta_{id}^{*}$	atraso da combustão
$\Delta\theta_{id}$	atraso de liberação de energia
$\gamma$	razão de calores específicos
$\eta_c$	eficiência da combustão
$\eta_{\max}$	eficiência máxima de combustão
$\eta_T$	rendimento térmico
$\eta_V$	rendimento volumétrico
$\lambda$	lambda
$\theta$	ângulo do eixo de manivelas
$\theta_i$	ângulo de início de liberação de energia
$\theta_s$	momento de liberação da centelha
$\rho_{ar}$	massa específica do ar nas condições de admissão no motor.