

# **ESTUDO DA COMBUSTÃO DA OPERAÇÃO BICOMBUSTÍVEL DIESEL/ETANOL NUMA MÁQUINA DE COMPRESSÃO RÁPIDA**

**Aluno: Gabriel Werpel Fernandes**  
**Orientador: Carlos Valois Maciel Braga**  
**Coorientador: Julio César Cuisano Egúsquiza**

## **Introdução**

Combustíveis para motores de combustão interna é um assunto que tem sido estudado por um longo período de tempo. Inúmeras pesquisas são realizadas nessa área, indicando assim um avanço importante nos conhecimentos e estudos dos fenômenos da combustão em motores, fazendo com que seja possível uma melhor compreensão dos mecanismos que afetam o desempenho, consumo de combustível e emissões.

No mercado atual, devido à competição do setor automotivo, junto às exigentes legislações de emissão de poluentes, é acelerado não apenas a corrida pelo aumento de qualidade e redução de custo dos produtos, mas como também o desenvolvimento de novas fontes alternativas de combustíveis para serem utilizadas em motores de combustão interna.

Devido à necessidade de cumprir as metas de redução de emissão dos automóveis, prevista pelo Protocolo de Kyoto que entrou em vigor obrigando os países a colocar em prática medidas para reduzir o consumo dos combustíveis fósseis, tendo como alguns exemplos: os poluentes primários (monóxido de carbono (CO), o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), entre outros), material particulado (MP) e os hidrocarbonetos (HC), a produção de combustíveis naturais, limpos e renováveis ganhou um destaque especial no mundo.

Em virtude da frequente preocupação com a questão do aquecimento global e mudanças ambientais em geral, faz-se cada vez mais necessária a busca por fontes de energia mais limpas. Uma alternativa para este problema é o uso do etanol em motores de combustão interna, substituindo parcialmente os derivados líquidos do petróleo.

A conversão dos motores diesel para a operação bicomcombustível diesel/etanol pode em muito contribuir para a redução das emissões de particulados, óxidos de nitrogênio e enxofre. A emissão de dióxido de carbono, produto dessa combustão, contribuirá posteriormente no processo de fotossíntese da cana-de-açúcar (matéria prima do combustível renovável alternativo). Portanto, no balanço global, a emissão de CO<sub>2</sub> na operação bicomcombustível seria drasticamente reduzida.

No entanto, em determinados regimes de funcionamento o desempenho motor bicomcombustível é afetado pela presença do etanol. Nessas condições, as emissões de monóxido de carbono e hidrocarbonetos podem aumentar em relação ao funcionamento original à diesel. Portanto, ainda é necessário realizar pesquisas que contribuam para o melhor aproveitamento dos combustíveis e a redução dos poluentes do motor diesel/etanol. Neste ponto a MCR é um aparato muito eficiente, pois avalia com muita precisão dados que demorariam muito para ser retirados em bancadas de testes de motores de combustão interna. É um instrumento de grande otimização, pois além de utilizar poucas quantidades da mistura combustível, salva tempo, algo totalmente essencial na atualidade.

## Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo estudar e analisar os resultados obtidos pela MCR. Dentre os objetivos específicos do trabalho temos:

1. Investigar experimentalmente as características da combustão diesel/etanol numa máquina de compressão rápida (MCR).
2. Investigar experimentalmente o impacto das técnicas do avanço de injeção do óleo diesel, a taxa de compressão do motor, o grau de hidratação do etanol, sobre os parâmetros globais de desempenho e emissões do funcionamento bicom bustível.

## Metodologia

Inicialmente é realizado uma revisão bibliográfica sobre o funcionamento diesel/etanol.

O óleo diesel é um derivado da destilação do petróleo bruto usado como combustível nos motores diesel, constituído basicamente por hidrocarbonetos. O óleo diesel é um composto formado principalmente por átomos de carbono, hidrogênio e em baixas concentrações por enxofre, nitrogênio e oxigênio. O diesel é selecionado de acordo com suas características de ignição e de escoamento, adequadas ao funcionamento dos motores ciclo diesel.

O etanol é uma substância orgânica obtida da fermentação de açúcares, hidratação do etileno ou redução a acetaldeído, como nas bebidas alcoólicas e na indústria de perfumaria. No Brasil, tal substância é também muito utilizada como combustível de motores de combustão interna, constituindo assim um mercado em ascensão para um combustível obtido de maneira renovável e o estabelecimento de uma indústria de química de base, sustentada na utilização de biomassa de origem agrícola e renovável (Andreoli et al., 2006).

A mistura do álcool no óleo diesel, sem a dosagem de aditivos, é o método mais simples para o uso de combustível alternativo em motores de ignição por compressão.

A adição de etanol ao óleo diesel afeta certas propriedades chave, com particular referência à miscibilidade da mistura, viscosidade, lubricidade, conteúdo de energia e número de cetano. Por conseguinte, o etanol é restringido às pequenas concentrações na mistura, tipicamente a 20% v/v ou uma quantidade inferior. Portanto um combustível com 20% de taxa de substituição diesel/etanol será utilizado em nosso experimento.

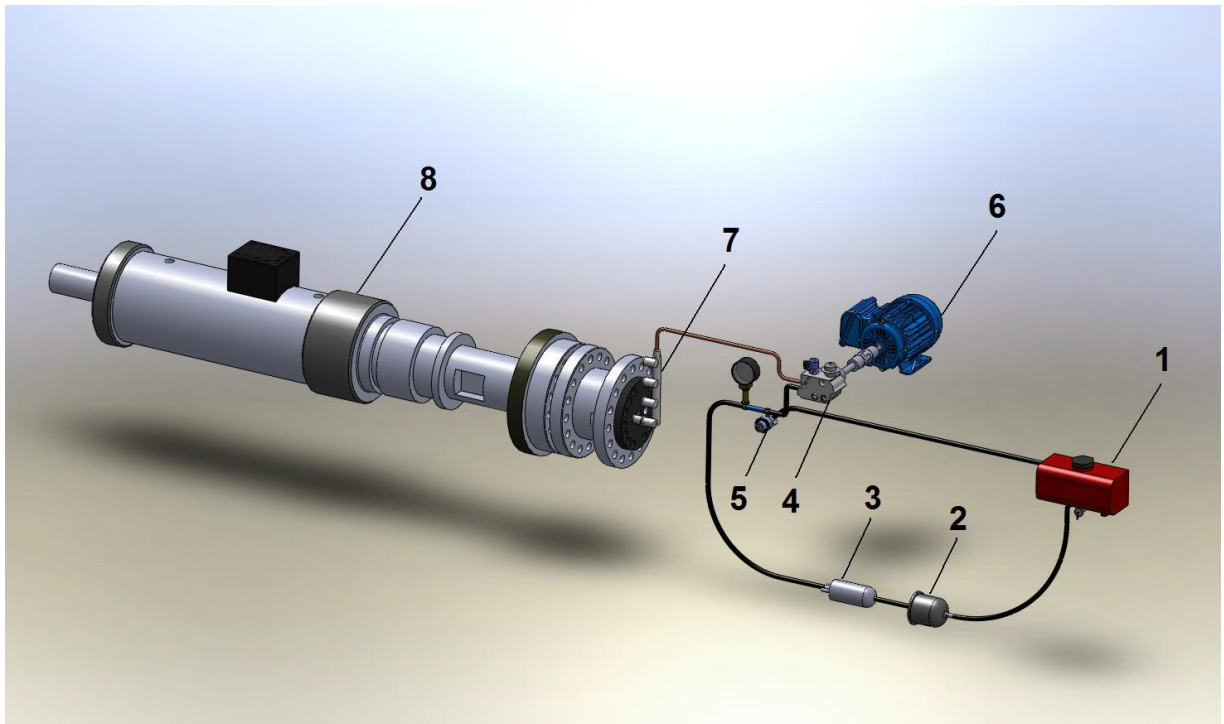
Uma das maiores dificuldades encontradas com o uso das misturas diesel/etanol é a sua tendência à separação de fases. Essa tendência aumenta com a presença de água, diminuição da temperatura, aumento da concentração do etanol e com a composição do óleo diesel, em especial seu conteúdo de aromáticos (Egúsquiza, 2011).

A Máquina de Compressão Rápida é o aparato utilizado no desenvolvimento do experimento.

A MCR é capaz de simular uma compressão única, incluindo parcialmente o processo de expansão de um motor sob condições termodinâmicas iguais às de um motor real dentro de um intervalo de  $\pm 40$  graus de ângulo de manivela próximos ao ponto morto superior. Permite estudo mais detalhado dos processos de injeção, vaporização das gotas de combustível, mistura ar-combustível, ignição e combustão, incluindo diagnóstico ótico, bem como coleta de dados de deslocamento do pistão e de pressão na câmara de combustão.

Com o uso do software SolidWorks foi realizados desenhos de peças, suportes para a instalação, entre outros.

A figura 1 ilustra uma visão esquemática do aparato experimental.



**Figura 1 – Adaptações e setup do sistema “common-rail” na MCR**

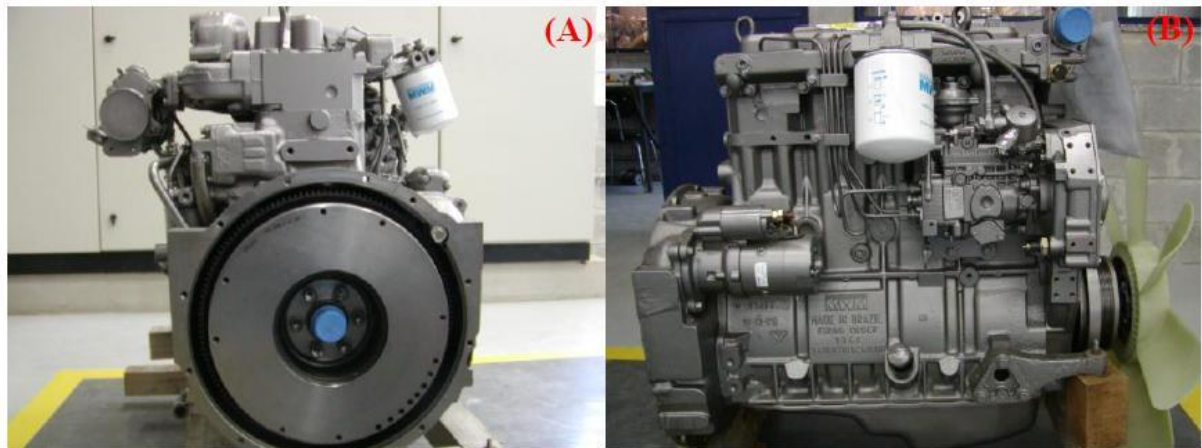
Os experimentos eram realizados com a ajuda de um sistema de injeção de combustível “common-rail” utilizados comumente em motores diesel de injeção direta.

Com o auxílio da figura 1 é possível dar uma explicação breve do processo de alimentação de combustível na MCR. O combustível se localiza no tanque de combustível (1). Primeiramente o combustível segue por um filtro (2), onde se retira as impurezas presentes da mistura, e posteriormente passa por duas bombas, controladas por um regulador de pressão (5), uma de baixa pressão (3) e a outra de alta pressão (4), chegando respectivamente a pressões de 4,5 bar e 200 bar aproximadamente. A bomba de alta pressão é acionada a partir de um motor elétrico (5), antes de seguir para o “rail” e injetor (6), onde lá o combustível é injetado câmara de combustão da MCR (7).

Posteriormente, foram definidas as condições de funcionamento do motor simulado na MCR. Os dados digitalizados da MCR foram analisados e posteriormente comparados com ensaios do motor real.

Foi utilizado um motor Diesel de quatro tempos com quatro cilindros em linha, de fabricação MWM, modelo 4.10 TCA, com potência máxima de 107 kW a 2.600 rpm e torque máximo verificado de 430 Nm a 1.800 rpm. Este motor é comumente empregado na propulsão de caminhões leves e veículos comerciais.

A figura 2 ilustra algumas vistas do motor testado e a tabela 1 apresenta suas principais características técnicas.



**Figura 2 – Vista do motor ensaiado – modelo MWM 4.10 TCA**

Tabela 1 – Principais características técnicas do motor MWM 4.10 TCA.

Número de cilindros e disposição	4 em linha
Válvulas por cilindro	2
Diâmetro x curso	103 mm x 129 mm
Cilindrada total	4,3 litros
Razão de compressão	15,8 : 1
Aspiração	turbo / pós arrefecido
Máxima rotação de trabalho	2.600 rpm
Máximo torque verificado (após reparação)	430 Nm a 1.800 rpm
Máxima potência	107 kW a 2.600 rpm
Início da injeção (APMS)	9°
Abertura da válvula admissão (APMS)	3°
Fechamento da válvula admissão (DPMI)	23°
Abertura da válvula escape (APMI)	33°
Fechamento da válvula escape (APMS)	1°

## Resultados

Primeiro obtivemos resultados do motor simulado. Os resultados apresentados na figura 3 são de curvas representativas da pressão no cilindro, obtidas nas distintas posições angulares do início da injeção de óleo diesel (P0, P1, P2 e P4). O resultado apresentado corresponde a uma carga parcial do motor (0,9MPa), relativo a 1.800 rpm.

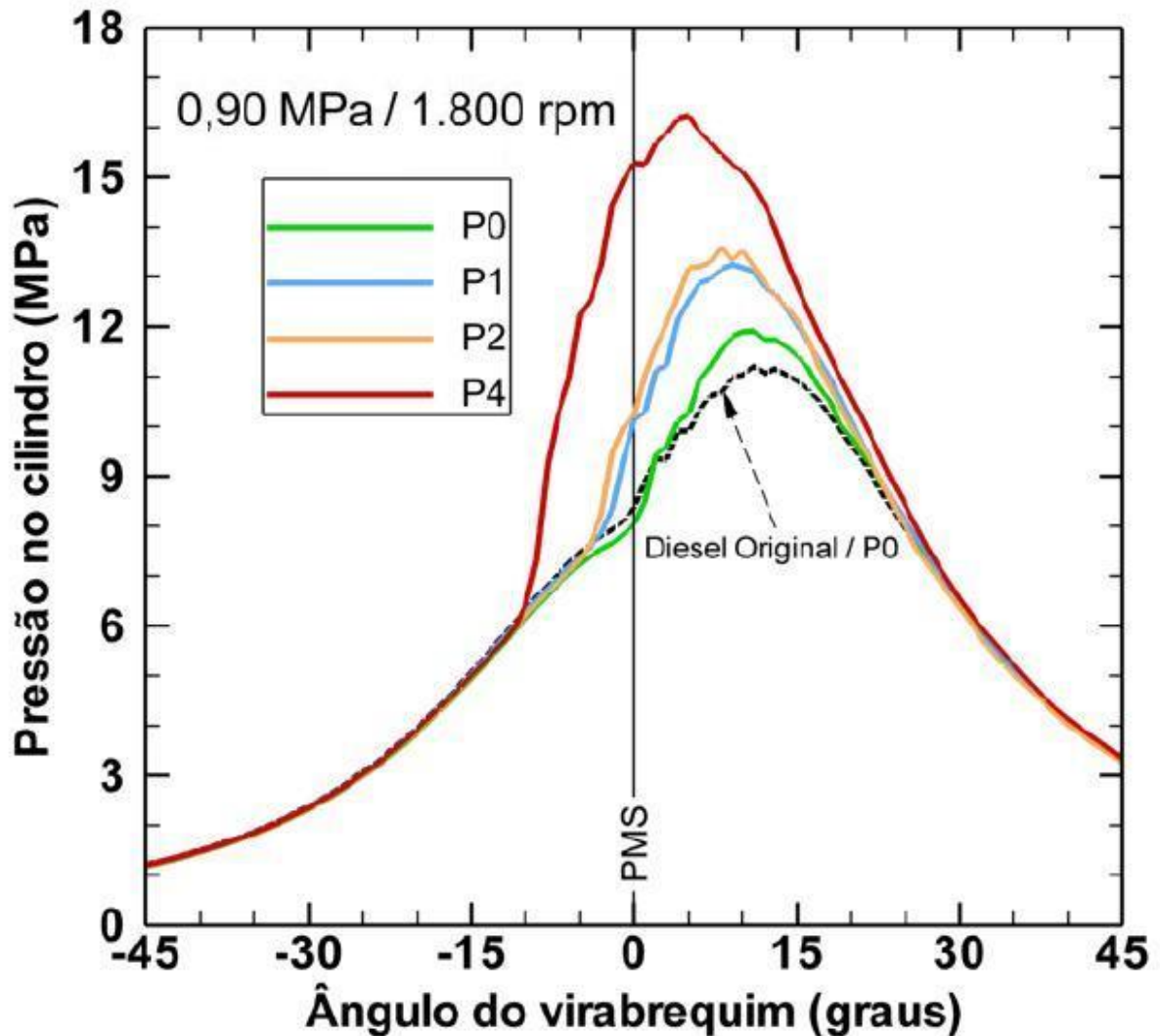
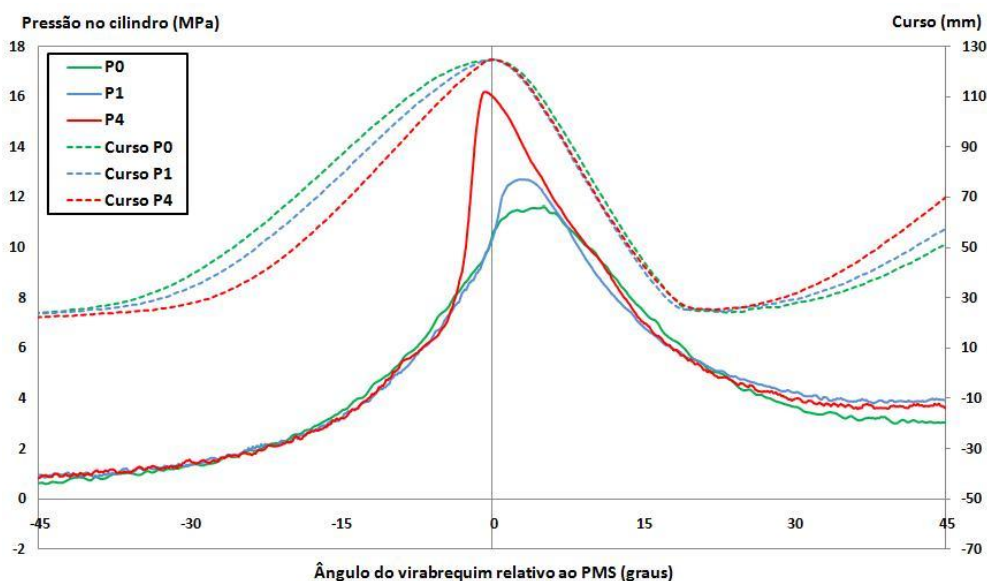


Figura 3 – Curvas de pressão no cilindro, pontos de injeção de óleo diesel e carga do motor (RPM: 1.800)

Observa-se que a ligeira queda da pressão, graus antes do final da compressão, deixa de ser notória através do progressivo avanço da injeção de diesel. Esta técnica acarreta também antecipação da combustão e maior trabalho realizado na compressão, equilibrado pelo maior trabalho útil no lado da expansão.

Posteriormente colocamos os dados do motor no software da MCR com propósito de simular o mesmo e comparar os dois resultados. O software da MCR nos fornece dados de posição do pistão e pressão na câmara de combustão em relação ao tempo relativo ao PMS como pode ser visto na figura 4 a seguir:



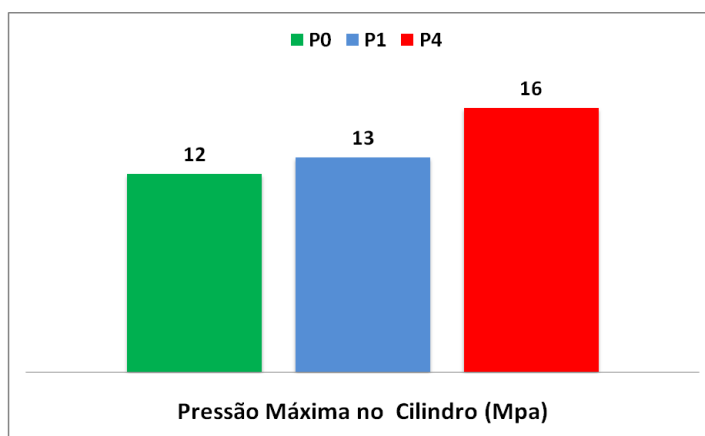
**Figura 4 – Simulação da curvas de pressão no cilindro, pontos de injeção de óleo diesel e carga do motor (RPM: 1.800)**

Devido ao fato do curso do pistão não ser mecanicamente definido como em um pistão, as curvas de deslocamento não são totalmente simétricas. É possível observar na figura 4 que a posição máxima do pistão se encontra próxima de 127mm, um valor relativamente bom, pois é similar aos 129mm do curso do pistão do motor. A taxa de compressão se encontra aproximadamente em 15,7:1.

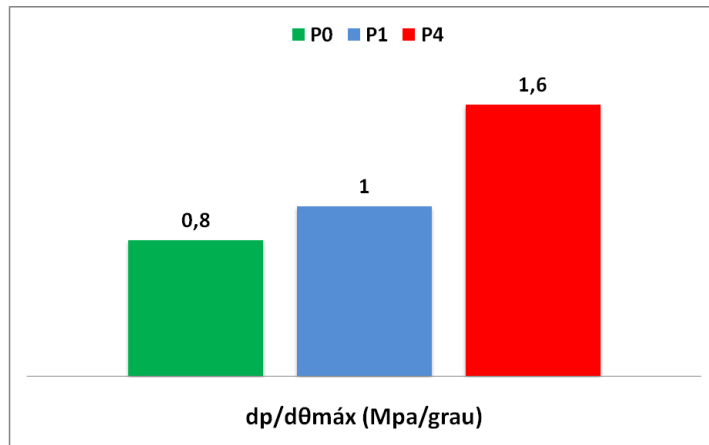
Foram feitos apenas algumas das curvas de pressão no cilindro, pois a figura 4 é uma demonstração preliminar dos resultados que podem ser feitos pela MCR com propósito de futuros estudos.

É importante lembrar que cada curva representada na figura 4 é obtida através de um único “shot” da MCR, sendo um aparato eficiente e muito mais rápido.

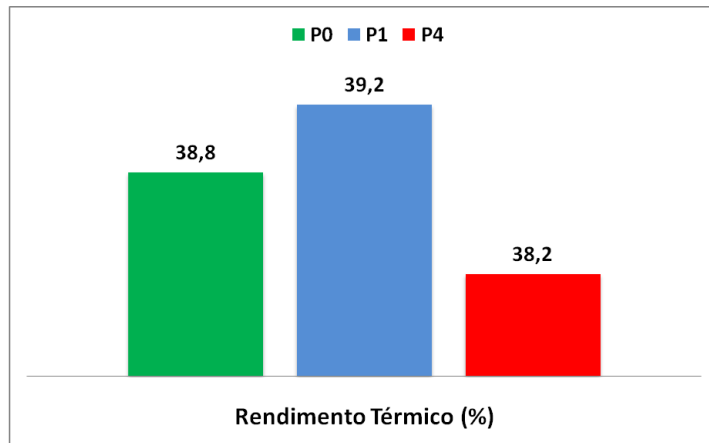
Decorrente desses dados é possível obter outros parâmetros de desempenho tais como: taxa máxima de aumento de pressão, pressão máxima no cilindro e rendimento térmico.



**Figura 5 – Pressão máxima no cilindro. Carga do motor (RPM:1.800)**



**Figura 6 – Taxa máxima de aumento de pressão. Carga do motor (RPM:1.800)**

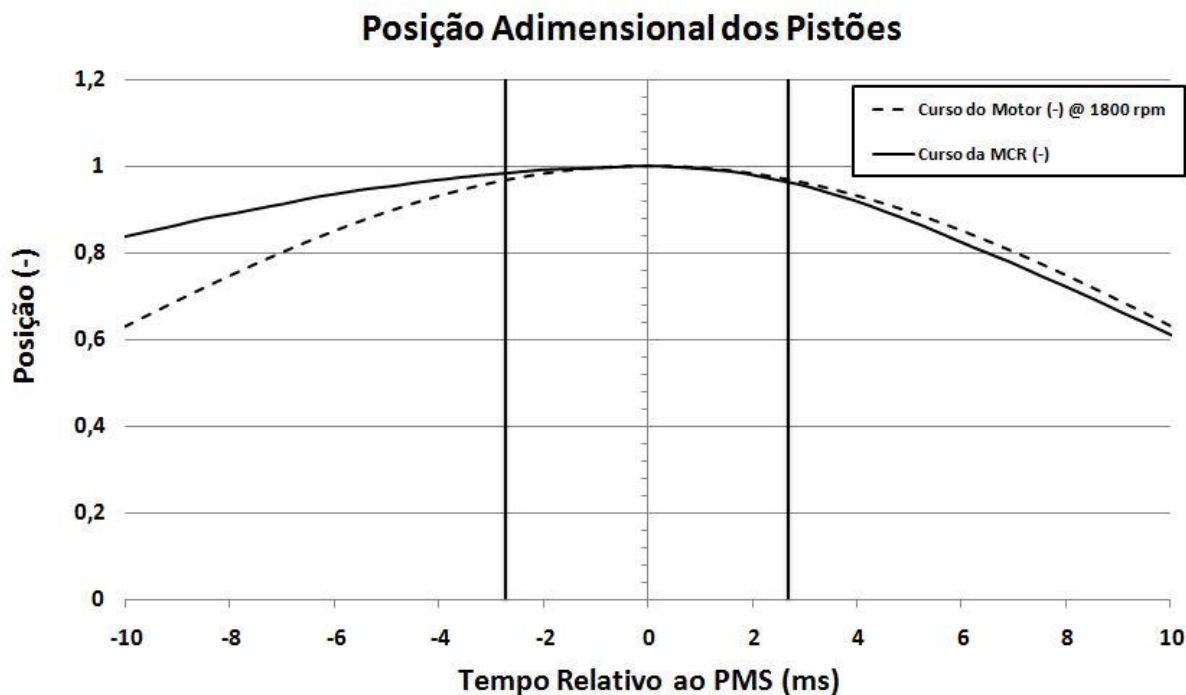


**Figura 7 – Rendimento Térmico. Carga do motor (RPM:1.800)**

Nas condições de carga e rotação analisada, o maior avanço da injeção (P4) apresentou um nível da taxa da pressão mais elevado que nos outros casos. A pressão máxima atingida no cilindro também é do que tem um avanço de injeção maior (P4). Porém é observado que mesmo com pressões elevadas, aquele que apresenta um maior rendimento térmico é o P1. Isso se deve pelo fato que com um avanço de injeção muito elevado, tem-se um início de combustão prematuro, fazendo com que parte da energia liberada pela combustão seja perdida no processo de compressão do cilindro na câmara da MCR.

Ainda não foi possível obter dados de emissões devido a limitações de instalações que não foram realizadas na MCR, porém seria de grande interesse para dar maior consistência aos estudos que foram realizados neste trabalho.

A figura 8 apresentada a seguir demonstra uma comparação do posicionamento adimensional do pistão da MCR com a de um motor real. Essa comparação serve para confirmar ainda mais a confiabilidade oferecida pela MCR.



**Figura 8 – Curvas de posição do motor e da MCR**

É possível observar que para uma devida rotação, similar a do motor à 1800 rpm, a MCR se aproxima bastante quando está próxima ao PMS (entre -3 ms e 3 ms). Sendo uma ferramenta muito útil para análise.

### Conclusões

Foi possível utilizar com sucesso na MCR o injetor com propósito de simular a combustão de uma mistura ar-combustível (Diesel/etanol).

Os resultados apresentados pela MCR reproduzem satisfatoriamente o comportamento de um motor de combustão interna real, tendo em vista que o posicionamento do pistão e a pressão na câmara de combustão foram o esperado apresentado pela teoria dos fundamentos básicos dos motores.

A utilização da MCR é relativamente simples e eficiente tendo em vista a mudança rápida dos tempos de centelha e taxas de compressão, algo que não é algo fácil de ser feito em bancos de testes para motores de combustão interna.

A MCR avalia testes de rapidez, porém muito precisos que requerem pouca quantidade da mistura, e que por ventura salva tempo e combustível.

Através do resultado das curvas de curso do processo de compressão, verifica-se que a MCR trabalha muito bem, ou seja, reproduz com fidelidade o processo de compressão no cilindro para posições próximas ao PMS. De fato, a simulação ocorre com maior precisão no período de tempo de -3 ms a 3 ms, o que equivale a 40° antes do PMS e 40° após o PMS.

A utilização do programa é muito simples, podendo-se facilmente modificar os dados para diferentes estruturas e carregamentos.



### Referências

- 1- 1- Andreoli, C., De Souza, S. P. “**Cana-de-açúcar: a Melhor alternativa para Conversão da energia solar e Fóssil em Etanol**”. Conferência Internacional de AgroEnergia, de 11 a 13 de dezembro de 2006, Londrina, PR.
- 2- Egúsquiza, J. C. C., “**Avaliação Experimental de um Motor do Ciclo Diesel Operando no Modo Bicombustível: Diesel/etanol e Diesel/gás**”. Tese de D.Sc., Engenharia Mecânica, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.
- 3- Heywood, J.B. (1988); **Internal Combustion Engine Fundamentals**; McGraw-Hill Book Co.; New York.
- 4- MWM INTERNATIONAL Motores (MWM). **Apostila de treinamento MWM Série 10**. Disponível em: <http://www.mwm.com.br>. Acesso em jan. 2011.
- 5- TESTEM GmbH. **RCM description Manual**, 2009.
- 6- Van WYLEN, G. J., SONNTAG, R. E., BOORGGNAKKE, G.. **Fundamentos da Termodinâmica**, 6a ed., Edgard BlücherLtda, 2003.