



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica

RELATÓRIO TCC
MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UMA MÁQUINA DE
COMBUSTÃO INTERNA A DIESEL

Aluno: Gutemberg Gonçalves dos Santos Júnior
Professor: Antonio Marcus Nogueira Lima
Ph.D Péricles Rezende Barros

Campina Grande - PB, Agosto de 2007



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

Sumário

Sumário	1
1 Glossário	2
2 Introdução	6
3 Histórico	7
4 Classificação	8
5 Ciclos básicos de funcionamento	9
5.1 Ciclo de 4 tempos	10
5.2 Ciclo de 2 tempos	11
6 Emissão de gases poluentes	11
7 Características Operacionais	12
7.1 Velocidade Instantânea	12
7.2 Volume	13
7.3 Trabalho	14
7.4 Pressão Média Efetiva	15
7.5 Torque e Potência	16
7.6 Relação Ar/Combustível	18
7.7 Consumo Específico de Combustível	18
7.8 Eficiência da Máquina de Combustão Interna	19
7.9 Eficiência Volumétrica	20
8 Modelagem e Simulação da Máquina	20
9 Conclusão	26
Referências	27

1 Glossário

Os principais componentes das máquinas de combustão interna são apresentados a seguir:

- *Bloco*: Trata-se do corpo da máquina que contém os cilindros, as bielas e o virabrequim.
- *Eixo do Comando*: Uma espécie de eixo com uma protuberância utilizado para abrir as válvulas no tempo correto.
- *Carburador*: Mede a quantidade correta de combustível a ser adicionado ao fluxo de ar a partir de uma diferença de pressão.
- *Conversor catalítico*: Trata-se de uma câmara acoplada ao sistema de exaustão. Dentro desta, é colocado um material catalítico que diminui a quantidade de emissão de poluição a partir de uma reação química.
- *Afogador*: Válvula em forma de borboleta acoplada ao carburador. Quando esta é ativada, uma maior quantidade de combustível é adicionada ao fluxo de ar pelo carburador. Normalmente é acionada para melhorar a partida em climas frios.
- *Câmara de combustão*: Parte do cilindro localizada entre superfície superior do pistão e a cabeça do cilindro. Como o pistão se move ao longo do ciclo de funcionamento da máquina, o volume desta área varia de acordo com o ângulo do virabrequim.
- *Biela*: Armação que conecta o pistão ao virabrequim permitindo a conversão do movimento retilíneo do pistão em movimento de rotação de um eixo.
- *Casquilho de Biela*: Suporta que liga a biela ao virabrequim.
- *Cooling fins*: Espécie de barbatana de metal que reveste os cilindros de uma máquina com resfriamento por ar. Tem a finalidade de resfriar os cilindros através dos processos de condução e convecção.
- *Mancal de Bloco*: Parte do bloco da máquina em volta do virabrequim. Em algumas máquinas, o reservatório de óleo utilizado para a lubrificação de algumas peças localiza-se nesta câmara.
- *Virabrequim*: Peça conectada ao pistão que transforma o movimento linear deste em movimento circular. É conectada a um eixo onde o trabalho realizado pela máquina é fornecido para sistemas externos.

- *Cilindros*: Trata-se de cilindros circulares onde os pistões se movimentam durante o ciclo de funcionamento.
- *Coletor de Escape*: Tubo, feito normalmente em aço, por onde os gases de exaustão vindos do cilindro passam.
- *Sistema de exaustão*: Sistema que tem como função remover os gases de exaustão provenientes do processo de combustão. É composto pelo coletor de escape, o conversor catalítico, o cano de escape e o cano ejetor.
- *Ventoinha*: Trata-se de uma espécie de ventilador, movido eletricamente ou mecanicamente, que aumenta a circulação de ar pelo radiador e pelos compartimentos da máquina para melhorar o sistema de resfriamento.
- *Volante do Motor*: Massa com grande momento de inércia conectada ao virabrequim. Tem a função de armazenar energia para garantir que o virabrequim continue girando e que este giro seja de forma suave.
- *Bico de combustível*: Bocal pressurizado que injeta combustível para a combustão. Nas máquinas de ignição por centelha o combustível é injetado no ar antes deste ser inserido no cilindro. Nas de ignição por compressão, o ar é inserido no ar comprimido dentro da câmara de combustão.
- *Bomba de combustível*: Bombeia o combustível do tanque para a máquina.
- *Vela de pré-aquecimento*: Pequena resistência elétrica localizada dentro da câmara de combustão. É utilizada para pré-aquecer as paredes do cilindro para facilitar a primeira combustão em dias frios.
- *Cabeçote*: Parte metálica que fecha a parte superior do cilindro próximo a câmara de combustão.
- *Junta do Cabeçote*: Vedação entre o bloco do motor e o Head.
- *Intake Manifold*: Sistema de tubulação que leva o ar aos cilindros.
- *Jake Brake*: Freio a motor que corta o fluxo de combustível e interrompe a transferência de energia mecânica ao mecanismo. Normalmente é utilizado em motores a diesel de caminhões.

- *Reservatório de Óleo*: Reservatório onde é colocado o óleo que serve para lubrificação. Quase sempre este reservatório está localizado no mancal de bloco.
- *Bomba de Óleo*: Bomba utilizada para distribuir óleo com o propósito de lubrificar a máquina.
- *Pistão*: Massa de formato cilíndrico que se movimenta na direção de seu eixo vertical dentro de um cilindro. Este movimento é feito com a ajuda de uma haste que conecta este corpo ao virabrequim.
- *Anéis do Pistão*: Anéis localizados no cilindro próximo ao Ponto Morto Superior (PMS) - ponto no qual o pistão atinge seu maior deslocamento vertical na direção do topo do cilindro - feitos de materiais polidos com o intuito de vedar o pistão para evitar a passagem de ar entre o pistão e o cilindro durante o processo de expansão.
- *Vareta*: Haste de metal localizada entre o eixo do comando e a válvula para sincronizar a abertura da mesma de forma mecânica.
- *Radiador*: Reservatório de água onde circula ar quente proveniente do motor, utilizado para o resfriamento do mesmo.
- *Vela de Ignição*: Dispositivo elétrico que produz uma centelha para dar início à combustão. Utilizado apenas em motores com ignição por centelha.
- *Controle de velocidade (Cruise Control)*: Muitas vezes também conhecido como piloto automático, este sistema mantém o motor funcionando com uma velocidade constante e é desativado com um simples toque no freio.
- *Motor de Partida*: Apesar de vários métodos serem utilizados para ocasionar a partida de uma máquina de combustão interna, um dos mais usados é a utilização de um motor elétrico acionado por uma bateria. Quando o sistema alcança uma tensão de 42 volts, este motor é desligado, tornando-se parte do volante do motor juntamente com o gerador.
- *Supercharger*: Compressor mecânico movido através de uma ligação com o eixo do comando utilizado para comprimir o ar antes deste ser colocado no cilindro.

- *Borboleta*: Válvula borboleta, localizada no fim do sistema de admissão de ar, utilizada para controlar o fluxo de ar na direção do cilindro.
- *Turbocharger*: Sistema turbina-compressor utilizado para comprimir o ar antes da entrada do mesmo no cilindro. A turbina é acionada através dos gases que passam pelo sistema de exaustão, reaproveitando a energia dos mesmos para realizar a compressão do ar.
- *Válvulas*: Utilizadas para controlar a entrada e saída de ar no cilindro.
- *Camisa de Água*: Sistema que se localiza nas paredes dos cilindros por onde passa um líquido para evitar a ocorrência de um sobreaquecimento. Normalmente, este líquido é uma mistura composta por água e *ethylene glycol*.
- *Bomba de Água*: Bomba utilizada para fazer circular, entre a máquina e o radiador, um líquido para resfriar a máquina.
- *Wrist Pin*: Usualmente conhecido como Pino de pistão, este pino conecta a biela ao pistão.

2 Introdução

Um motor de combustão interna pode ser definido como uma máquina térmica que converte a energia química presente no combustível em energia mecânica. Primeiramente, a energia química é convertida em energia térmica através do processo de combustão, provocando um aumento da temperatura e da pressão dos gases presentes no cilindro da máquina. Com este aumento de pressão, os gases se expandem provocando um movimento linear do pistão. Este movimento é realizado no sentido de obter-se um aumento no volume disponível da câmara de combustão. O pistão é acoplado a uma manivela que, por sua vez, converte o movimento linear anteriormente descrito em um movimento rotacional. Desse modo, a energia mecânica obtida da conversão da energia química do combustível é disponibilizada em um eixo acoplado à manivela.

As máquinas de combustão interna podem conter diversos cilindros de vários tamanhos, os quais podem ser arranjados das mais variadas maneiras. Isto resulta em máquinas com características bastante diferentes dependendo da escolha feita com relação a forma física destas. A flexibilidade destes fatores do ponto de vista estrutural da máquina podem ser combinados de forma a ser possível encontrar tanto motores com potência da ordem de 50 watts, até alguns que atingem uma ordem de milhares de kilowatts por cilindro.

3 Histórico

Os primeiros relatos de desenvolvimento de máquinas de combustão interna datam do século XVII, onde alguns protótipos utilizando fluxos de vapor foram apresentados. Apesar disto, estas máquinas não apresentaram boa aceitação no mercado devido à falta de desenvolvimento na área de combustíveis, rodas e materiais. Apenas no século XIX as primeiras máquinas de combustão interna moderna foram apresentadas, o que coincide com o início do desenvolvimento dos primeiros automóveis.

Diante desta nova tecnologia, muitos esforços foram feitos na primeira metade do século XIX para a melhora destas máquinas. Assim, em 1859, na Pensilvânia, a descoberta do petróleo tornou possível o desenvolvimento de combustíveis com mais qualidade para alimentar estes motores, resultando em um melhor desempenho da máquina. Apesar desta descoberta, produtos obtidos do refinamento do petróleo, como a gasolina tão utilizada nos dias de hoje, só foram descobertos no século XX.

Outra importante descoberta durante a evolução das máquinas de combustão interna, foi a invenção do pneumático de borracha, conhecido popularmente como pneu. Com a existência deste artefato, o automobilismo sofreu um grande crescimento, aumentando a demanda por motores de combustão interna e, assim, ocasionando um grande crescimento no setor.

Durante a segunda metade do século XIX, diversas máquinas de combustão interna foram desenvolvidas. A primeira a causar um grande impacto no campo científico foi a de J.J.E. Lenoir, em 1860, que apresentava uma eficiência mecânica em torno de 5% e uma potência em torno de 4.5kW (6hp). Em 1867, Nicolaus Otto e Eugen Lagen inventaram a máquina de Otto-Langen, a qual apresentava uma melhora no rendimento da máquina de forma a conseguir-se até 11% de eficiência. O ciclo de funcionamento destas máquinas já era o mesmo 4 tempos utilizado nos dias de hoje e, apesar de diversos cientistas terem trabalhado com estas máquinas, Otto recebeu o crédito devido ao seu protótipo ter sido construído em 1876. Assim, nos dias de hoje muitas vezes o ciclo de 4 tempos é referenciado como ciclo de Otto.

Em 1892, Rudolf Diesel apresentou a primeira versão funcional da sua máquina de combustão interna que não precisava de um mecanismo de gatilho para ocasionar a combustão. No lugar disto, o próprio ar era comprimido de forma a alcançar uma temperatura alta o suficiente para causar a combustão do combustível quando em contato com o ar. As primeiras máquinas com ignição por compressão apresentavam bastante barulho, eram enormes e bastante lentas.

4 Classificação

Antes de dar início à descrição do funcionamento de uma máquina de combustão interna, é importante saber que características estas máquinas podem ter. Assim, esta seção descreve algumas configurações possíveis para este tipo de máquina que influenciam diretamente no seu desempenho e funcionamento.

- Tipo de Ignição:
 - *Ignição por centelha* → O processo de combustão é ocasionado por uma centelha decorrente de uma descarga elétrica entre dois eletrodos.
 - *Ignição por compressão* → A combustão é iniciada por uma auto-ignição do combustível, decorrente das altas temperaturas dos gases internos ao cilindro.
- Ciclo de trabalho:
 - *4 tempos* → Para cada ciclo, são necessários quatro movimentos (cursos) do pistão, o que corresponde a duas revoluções da manivela.
 - *2 tempos* → Neste tipo de ciclo, são necessários apenas dois movimentos do pistão (uma revolução da manivela) para o término do mesmo.
- Posicionamento dos cilindros:
 - *Cilindro único* → A máquina possui apenas um cilindro e um pistão conectado à manivela.
 - *Cilindros em linha* → Os cilindros são posicionados em uma única linha.
 - *Cilindros em V* → São organizados em duas linhas formando um ângulo qualquer entre 15° e 120° .
 - *Cilindros opostos* → Nesta configuração, os cilindros são organizados em uma forma especial do caso V, onde o ângulo entre as duas linhas é 180° .
 - *Cilindros em W* → Os cilindros podem ser organizados de duas formas. Na primeira, os cilindros são organizados em três linhas paralelas, formando três bancos de cilindros. Na segunda maneira, dois motores V8 são conectados juntos (caso do Bugatti W16).

- *Pistões opostos* → Diferentemente da configuração com cilindros opostos, nesta dois pistões são colocados dentro de um mesmo cilindro e a câmara de combustão fica localizada entre estes.
 - *Cilindros radiais* → Esta configuração foi utilizada em algumas máquinas de grande porte, como no caso de alguns aviões, submarinos e navios. Os cilindros são organizados em forma de um anel em volta da manivela.
- Entrada de ar:
 - *Naturalmente aspirado* → O ar que entra no cilindro não é comprimido.
 - *Supercharged* → O ar que entra no cilindro passa por um compressor movido através de uma ligação direta deste com a manivela.
 - *Turbocharged* → Neste sistema, o ar comprimido passa por um sistema turbina/compressor movido pelos gases provenientes do processo de exaustão.
 - Método de injeção de combustível para máquinas com ignição por compressão:
 - *Injeção direta* → O combustível é injetado na câmara de combustão principal.
 - *Injeção indireta* → O combustível é injetado em uma câmara secundária de combustão.
 - *Carga homogênea para ignição por compressão* → Uma pequena quantidade de combustível é adicionado durante o ciclo de absorção de ar. Isto melhora a velocidade com a qual o combustível encontra partículas de oxigênio para a ocorrência da combustão.

5 Ciclos básicos de funcionamento

Basicamente, as máquinas de combustão interna possuem dois ciclos de operação. Estes são válidos tanto para aquelas cujo processo de combustão se dá por meio de centelha, como aquelas em que se dá por compressão. Estes ciclos, que serão apresentados a seguir, denominam-se ciclo de 2 tempos e ciclo de 4 tempos.

5.1 Ciclo de 4 tempos

1. *Processo de admissão de ar:* Neste tempo, o pistão desloca-se da sua posição inicial, o ponto morto superior até o ponto morto inferior. Durante este movimento, a válvula de admissão de ar é aberta e a de exaustão é fechada. Assim, o movimento do pistão ocasiona uma diferença de pressão em relação ao ar localizado no ambiente fazendo com que o ar entre no cilindro através da válvula de admissão. No caso das máquinas com combustão por centelha, o combustível é adicionado ao ar na medida que este passa através da tubulação de admissão.
2. *Processo de compressão e de combustão:* O pistão encontra-se no início deste tempo no ponto morto inferior e desloca-se em direção ao ponto morto superior. Durante este tempo, todas as válvulas encontram-se fechadas e, assim, o ar é comprimido através do movimento do pistão. Quando o pistão alcança uma certa posição próximo do ponto morto superior, é provocada uma centelha, no caso dos motores com ignição por centelha, ou é injetado o combustível ao ar quente resultante da compressão (no caso dos motores com ignição por compressão), para dar início ao processo de combustão. Este processo leva a mistura ar/combustível localizada dentro do cilindro a alcançar altíssimos valores de pressão e temperatura.
3. *Processo de expansão:* Neste tempo, o pistão localiza-se inicialmente no ponto morto superior e desloca-se na direção do ponto morto inferior ao longo do curso. Como todas as válvulas continuam fechadas neste movimento, a combustão causa um grande aumento na temperatura e pressão dos gases e assim estes se expandem, deslocando o pistão na direção do ponto morto inferior. Este é o tempo que produz o trabalho para a saída da máquina e, por isso, também é conhecido como tempo de força. Na medida que o volume dos gases aumenta devido ao movimento do pistão, a temperatura e a pressão destes gases decrescem. No final deste movimento, a válvula de exaustão é aberta, fazendo com que boa parte dos gases aquecidos passem pelo sistema de exaustão na direção do ambiente. Apesar de tal processo diminuir a eficiência térmica da máquina, ele é realizado devido ao tempo necessário para retirar os gases resultantes da combustão da câmara antes do próximo ciclo.
4. *Processo de exaustão:* No instante em que o pistão alcança o ponto morto inferior, este processo dá-se início. Com a válvula de exaustão aberta, o movimento do pistão na direção do ponto morto superior

desloca os gases resultantes do processo de combustão para o sistema de exaustão. No final deste tempo, a válvula de admissão é aberta e a de exaustão é fechada, dando início a um novo ciclo.

5.2 Ciclo de 2 tempos

1. *Processo de expansão*: Após o processo de combustão, a grande pressão dos gases resultantes decorrentes deste executa um trabalho sobre o pistão, deslocando-o de sua posição original (ponto morto superior) em direção ao ponto morto inferior. Como resultado deste movimento, a pressão e a temperatura dos gases internos ao cilindro diminuem. Quando a manivela chega em uma posição próxima a 75° antes do ponto morto inferior, a válvula de exaustão é aberta. Isto faz com que os gases localizados dentro do cilindro sejam expelidos através do sistema de exaustão da máquina. Chegando em uma posição em volta de 50° antes do ponto morto inferior, a válvula de admissão é aberta para dar início à entrada de ar no cilindro. No caso das máquinas com ignição por centelha, o combustível é adicionado ao ar durante a passagem pela válvula de admissão por meio de carburador ou por injeção. A válvula de exaustão é então fechada e o ar proveniente do exterior começa a ser acumulado internamente ao cilindro.
2. *Processo de compressão e de combustão*: No início deste tempo, a válvula de admissão é fechada e o pistão continua com sua trajetória partindo do ponto morto inferior na direção do ponto morto superior. Com isso, a pressão e temperatura nos gases de dentro do cilindro aumentam. Próximo ao ponto morto superior, uma centelha é realizada com o intuito de dar início ao processo de combustão, no caso dos motores com ignição por centelha. No caso das máquinas com ignição por compressão, o combustível é injetado no lugar da centelha neste ponto. Com isso, o processo de combustão dá-se início, ocasionando um grande aumento de pressão e temperatura, levando o pistão a se deslocar no sentido contrário (na direção do ponto morto inferior), dando início a um novo ciclo.

6 Emissão de gases poluentes

Nos dias atuais, um problema que vem ganhando bastante espaço na mídia, devido ao seu crescimento nos últimos anos, é a poluição atmosférica. Um dos fatores que mais favorecem o crescimento deste tipo de poluição

são os gases provenientes do processo de combustão, tornando o sistema de exaustão de um automóvel uma peça chave para a melhora da qualidade de vida no planeta.

Diante de tal problema, diversos cientistas estão mostrando interesse na diminuição da emissão de gases poluentes pelos automóveis. De fato, esta característica é considerada uma das mais importantes para uma máquina de combustão interna. Dentre os gases emitidos pelo processo de combustão em um automóvel, pode-se destacar quatro tipos: Hidrocarbonetos (HC), Monóxido de Carbono(CO), Óxido de Nitrogênio (NOx) e partículas sólidas (fuligem).

Basicamente, dois métodos são utilizados para a redução do número de partículas provenientes do processo de combustão. O primeiro é melhorar a tecnologia envolvida na queima do combustível e na fabricação dos combustíveis, melhorando assim a eficiência do processo de combustão. O segundo método é o tratamento dos gases provenientes deste processo através de reações químicas, diminuindo assim a quantidade de gases nocivos ao meio ambiente.

7 Características Operacionais

7.1 Velocidade Instantânea

Considerando uma máquina de combustão interna, cujo virabrequim possui um raio representado por a , temos que o tamanho do trajeto do pistão entre o ponto morto superior e o inferior é dado pela equação 1. Assim, a velocidade linear média do pistão, para uma dada velocidade N da máquina, é fornecida pela expressão 2.

$$S = 2a \quad (1)$$

$$U_{med_p} = 2SN \quad (2)$$

A maior velocidade média do pistão é limitada em uma faixa entre 5 e 20 m/s devido a dois fatores. O primeiro está relacionado com um limite de segurança tolerado pela resistência dos materiais utilizados na construção do pistão. Já o segundo diz respeito ao fluxo de ar/combustível que passa pelas válvulas de admissão e exaustão durante o ciclo de trabalho da máquina. Quanto maior a velocidade, maior é a pressão para a passagem desses gases pelas válvulas, tornando-se necessárias válvulas cada vez mais largas.

A partir da figura 1, pode-se definir a posição do pistão em função do ângulo θ da manivela. A expressão 3 mostra esta relação, onde a variável r é o comprimento do eixo que conecta a manivela ao pistão.

$$s = a \cos(\theta) + \sqrt{r^2 - a^2 \sin^2(\theta)} \quad (3)$$

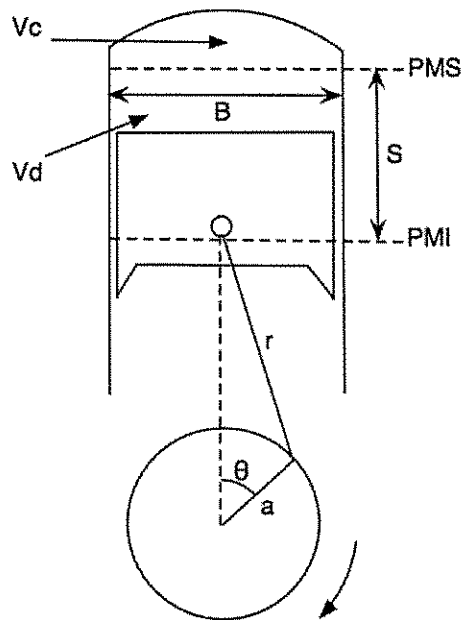


Figura 1: Geometria do Pistão e do Cilindro

Tendo a posição do pistão para um certo ângulo θ , pode-se definir a velocidade instantânea do pistão através da derivada da posição em relação ao tempo. A expressão 4 relaciona a velocidade instantânea com a velocidade média, onde $R = r/a$.

$$\frac{U_p}{U_{med_p}} = \frac{\pi}{2} \sin(\theta) \left[1 + \left(\frac{\cos(\theta)}{\sqrt{R^2 - \sin^2(\theta)}} \right) \right] \quad (4)$$

7.2 Volume

O volume deslocado pela máquina durante seu movimento do ponto morto inferior ao superior, ou vice-versa, é dado pela expressão 5, onde os índices *PMI* e *PMS* referenciam a estes pontos. Este volume é bastante conhecido como cilindrada unitária.

$$V_d = V_{PMI} - V_{PMS} \quad (5)$$

Para uma máquina com N_c cilindros de diâmetro B , tomando como referência a câmara de combustão mostrada na figura 1, pode-se chegar na seguinte relação para o cálculo da cilindrada unitária:

$$V_d = N_c \frac{\pi}{4} B^2 S \quad (6)$$

Quando o pistão localiza-se no PMS, o volume disponível no cilindro é conhecido como volume da câmara de combustão. A partir do volume deslocado e do volume da câmara de combustão, pode-se definir a taxa de compressão de um motor pela expressão 7. O volume em função do ângulo da manivela pode ser visto a partir da expressão 8.

$$r_c = \frac{V_{PMI}}{V_{PMS}} = \frac{V_c + V_d}{V_c} \quad (7)$$

$$\frac{V}{V_c} = 1 + \frac{1}{2}(r_c - 1)[R + 1 - \cos(\theta) - \sqrt{R^2 - \sin^2(\theta)}] \quad (8)$$

7.3 Trabalho

Todo o trabalho disponível na saída de uma máquina de combustão interna é proveniente do processo de combustão dos gases. Após este processo, os gases se expandem movendo o pistão na direção do PMI e, assim, realizando trabalho. Este trabalho pode ser calculado através da expressão 9.

$$W = \int F dx = \int P A_p dx = \int P dV \quad (9)$$

Assim, para um ciclo de uma máquina de combustão interna, a área entre as linhas do processo no gráfico da Pressão em função do Volume do cilindro, mostrado na figura 2, representa o valor do trabalho específico w .

O trabalho específico gerado dentro da câmara de combustão é chamado *trabalho indicado*. O trabalho resultante das perdas parasitas como bomba de óleo, bomba de combustível dentre outros, é chamado *trabalho de fricção*. Assim, o trabalho resultante por ciclo é dado pela expressão 10, onde w_i refere-se ao trabalho indicado e w_f ao trabalho de bombeamento.

$$w_b = w_i - w_f \quad (10)$$

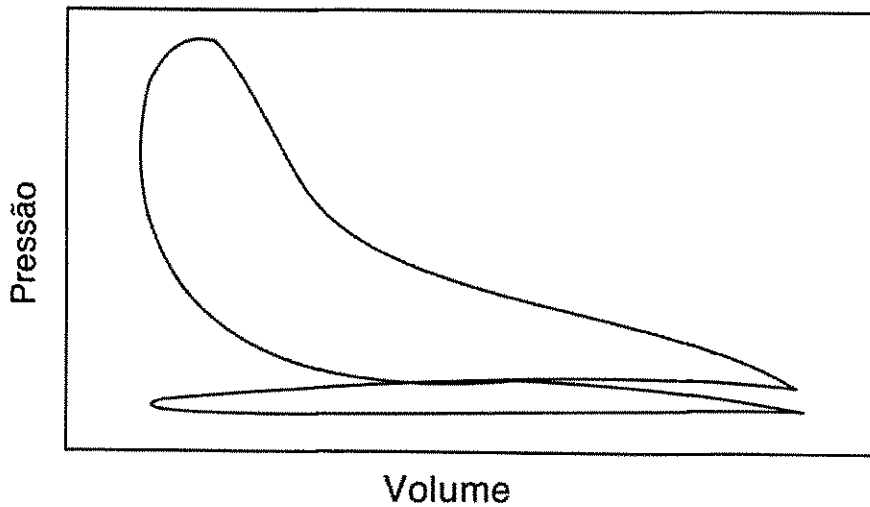


Figura 2: Diagrama Pressão x Volume

Com base nos trabalhos apresentados, pode-se definir a eficiência mecânica de uma máquina de combustão interna como sendo a razão entre o trabalho de bombeamento e o trabalho indicado, conforme mostrado na expressão 11.

$$\eta_m = \frac{w_b}{w_i} \quad (11)$$

7.4 Pressão Média Efetiva

A pressão nos cilindros de uma máquina de combustão interna varia continuamente ao longo do ciclo, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 2. Diante desta característica, torna-se bastante importante a determinação de uma pressão média efetiva para a comparação e o desenvolvimento destes tipos de máquinas, dado que esta variável não depende do tamanho nem da velocidade da máquina. A pressão média efetiva é definida pela expressão 12, onde $\Delta V = V_{PMI} - V_{PMS}$.

$$mep = \frac{w}{\Delta V} \quad (12)$$

A partir desta expressão, pode-se definir diversos tipos de pressão média efetiva, onde estas são utilizadas como importantes características do desempenho de uma máquina de combustão interna. Tais pressões são definidas a seguir:

- **Pressão média efetiva resultante:** $b_{mep} = w_b / \Delta V$

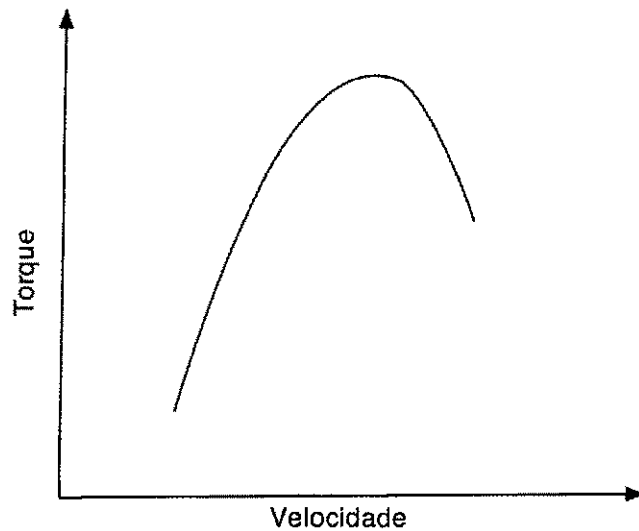


Figura 3: Diagrama Torque x Velocidade 1 (Real)

- Pressão média efetiva indicada: $i_{mep} = w_i / \Delta V$
- Pressão média efetiva de fricção: $f_{mep} = w_f / \Delta V$

7.5 Torque e Potência

Torque pode ser definido como a quantidade de momento produzido por uma força de 1 Newton em relação a um ponto a uma distância de 1 metro de sua linha de ação. O torque é um ótimo indicador no sentido de produção de trabalho pela máquina. A equação 13 relaciona torque e trabalho, onde n indica o número de revoluções da manivela por ciclo.

$$2\pi\tau = W_b = (b_{mep}) \frac{V_d}{n} \quad (13)$$

Normalmente, a curva de torque em função da velocidade de rotação tem um comportamento semelhante ao apresentado na Figura 3. Um resultado que diversos cientistas buscam conseguir é o achatamento da curva de torque, conforme pode ser visto na Figura 4. Com esse resultado, as máquinas de combustão apresentariam um ótimo torque em qualquer faixa de velocidade.

A potência é definida como a taxa de trabalho da máquina de combustão interna, sendo representada pela expressão 14.

$$\frac{dW}{dt} = \frac{WN}{n} = \frac{1}{2n} (mep) A_p U_{medp} \quad (14)$$

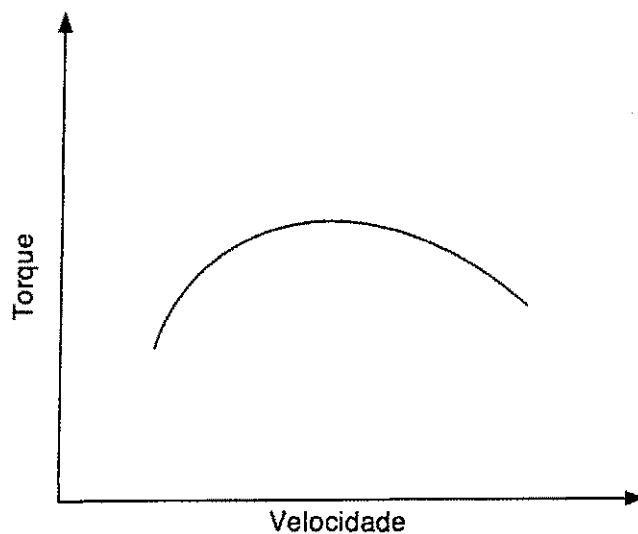


Figura 4: Diagrama Torque x Velocidade (Esperado)

Nestes tipos de máquinas, tanto o torque quanto a potência são funções da velocidade. A relação de torque em relação à velocidade pode ser melhor entendida acompanhando o gráfico mostrado na Figura 3. Para velocidades baixas, na medida que a velocidade aumenta o torque aumenta. Para velocidades altas, o torque diminui na medida que a velocidade aumenta. Tal mudança de comportamento se deve ao fato de que em altas velocidades o cilindro não recebe ar suficiente para garantir a combustão completa devido ao tamanho da abertura da válvula.

No caso da potência, tem-se que a medida que a velocidade aumenta, a potência aumenta até um máximo e depois começa a decair. Este fato se deve ao fato de na medida que a velocidade aumenta, as perdas relacionadas com a fricção crescem e tornam-se o fator dominante no processo.

A potência de um motor a combustão interna pode ser aumentada com o crescimento do volume deslocado, da velocidade ou da potência média efetiva. Apesar deste fato, os construtores preferem aumentar a potência da máquina através do aumento da velocidade de operação ou do aumento da pressão média efetiva por meio dos *turbocharges* e *supercharges*, dado que quanto maior o volume deslocado, maior e mais pesado torna-se o motor.

7.6 Relação Ar/Combustível

Durante o ciclo de trabalho de uma máquina de combustão interna, toda a energia disponível após o processo de combustão é proveniente do combustível utilizado durante este processo. Normalmente, este combustível é um hidrocarboneto e necessita de oxigênio para que a combustão seja realizada. Este oxigênio é fornecido ao cilindro através do ar que entra através da válvula de admissão. Como toda reação química, esta acontece em termo de proporção, sendo necessária uma certa quantidade de oxigênio para garantir a combustão de todo o combustível inserido na máquina durante um ciclo. Esta relação denomina-se *relação ar/combustível* (A/F) e é definida pela expressão 15, onde o índice *f* se refere ao combustível utilizado e o índice *a* se refere ao ar.

$$AF = \frac{m_a}{m_f} = \frac{dm_a}{dm_f} \quad (15)$$

Uma máquina está operando com uma mistura rica quando a relação ar/combustível é muito baixa, caso contrário, diz-se que a mistura é pobre. Motores de automóveis normalmente operam com uma mistura rica quando se está acelerando ou quando se está dando a partida em um dia frio. Quando o motor não está sendo acelerado, é comum que este trabalhe com uma mistura ar/combustível pobre para diminuir o consumo de combustível. Sendo assim, motores de automóveis mudam sua relação ar/combustível dependendo da necessidade do sistema.

Uma outra importante relação a ser analisada no funcionamento de uma máquina de combustão interna é a taxa entre a relação ar/combustível para que uma combustão estequiométrica ocorra (combustão na qual tem-se a quantidade exata de oxigênio para a queima do combustível inserido) e a relação ar/combustível atual. Esta relação pode ser vista a seguir:

$$\lambda = \frac{AF_{atual}}{AF_{estequimetrica}} \quad (16)$$

7.7 Consumo Específico de Combustível

Pode-se definir o consumo específico de combustível como sendo a relação entre a taxa de fluxo de combustível e a potência da máquina. A equação 17 representa esta relação.

$$sfc = \frac{dm_f}{dW} \quad (17)$$

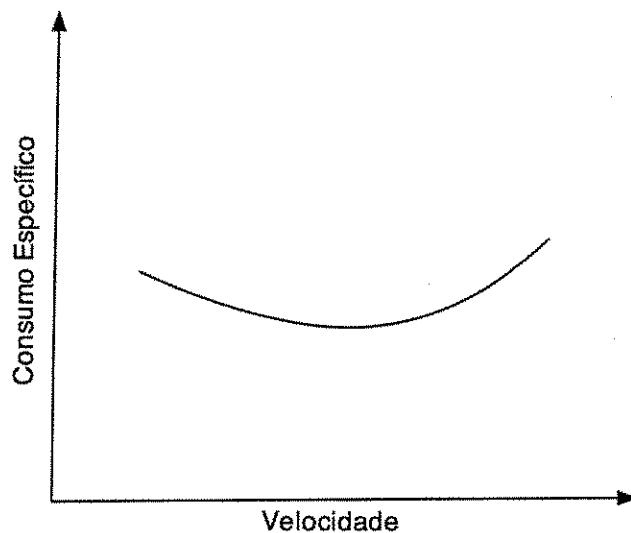


Figura 5: Diagrama do consumo específico em função da velocidade

O comportamento do consumo específico de combustível para uma máquina de combustão interna pode ser visto na Figura 5. Pode-se observar um decaimento do consumo específico na medida que a velocidade aumenta até encontrar um mínimo, onde a partir deste ponto volta a crescer. Este comportamento se deve ao aumento das perdas relacionadas com a fricção em altas velocidades. A partir do ponto de mínimo do gráfico, estas perdas tornam-se bastante significativas, influenciando o desempenho do motor de uma forma não satisfatória.

7.8 Eficiência da Máquina de Combustão Interna

Durante o processo de combustão, nem todo o combustível injetado é necessariamente queimado. Devido ao curto tempo disponível para este processo, algumas moléculas de combustível podem não encontrar com moléculas de oxigênio para que a reação aconteça, ou ainda a temperatura pode não ser favorável para esta reação. Quando isto acontece, parte do combustível injetado passa pelo sistema de exaustão sem ter sido aproveitado, diminuindo a performance da máquina. Ciente deste fato, a eficiência da combustão é definida segundo a equação 18, onde Q_{HV} é a quantidade de calor liberada pela queima do combustível. A partir desta definição, tem-se que a eficiência térmica da máquina é calculada segundo a expressão 19.

$$\eta_c = \frac{Q_{in}}{m_f Q_{HV}} \quad (18)$$

$$\eta_t = \frac{W}{Q_{in}} = \frac{dW}{Q_{in}} = \frac{dW}{dm_f Q_{HV} \eta_c} - \frac{\eta_f}{\eta_c} \quad (19)$$

7.9 Eficiência Volumétrica

Em uma máquina de combustão interna, quanto maior for a quantidade de ar que estiver dentro do cilindro, maior poderá ser a quantidade de combustível injetado para o processo de combustão, aumentando assim a potência da máquina. Ciente de tal fato, a processo de entrada de ar no cilindro torna-se um dos mais importantes do ciclo. Apesar disso, devido ao curto tempo dedicado ao processo de entrada de ar no cilindro, nem sempre tem-se a quantidade de ar necessária para a queima do combustível injetado. Assim, define-se o termo *eficiência volumétrica* através da equação 20, onde ρ_a é a densidade do ar nas condições atmosféricas sobre as quais a máquina está submetida.

$$\eta_v = \frac{m_a}{\rho_a V_d} \quad (20)$$

Para uma melhor medida da densidade do ar sobre a qual a máquina está submetida, normalmente executa-se esta medição antes da válvula de admissão. Neste ponto, o ar possui uma temperatura acima da observada no ambiente e uma pressão um pouco abaixo.

8 Modelagem e Simulação da Máquina

A máquina escolhida para o desenvolvimento da modelagem matemática foi um motor a diesel (ignição por compressão), trabalhando com o ciclo de 4 tempos. Esta máquina possui apenas um cilindro, entretanto, dependendo da aplicação do modelo em um ambiente real, este pode ser facilmente expandido de acordo com a necessidade apresentada. A máquina em questão possui uma entrada de ar naturalmente aspirada e a injeção de combustível é feita de forma direta.

O processo para um ciclo de operação pode ser resumido da seguinte forma:

- Primeiramente, o ar entra no cilindro através do sistema de aquisição e se mistura com o resto dos gases resultantes da combustão do ciclo anterior.

- Esta mistura é comprimida através do pistão e, quando o pistão alcança um ponto próximo ao ponto morto superior, o combustível é injetado na câmara de combustão.
- O combustível injetado entra em contato com a alta temperatura dos gases localizados no interior do cilindro e começa a evaporar. O combustível, já em estado gasoso, mistura-se com os gases e, na medida que se mistura com partículas de oxigênio, o processo de combustão é iniciado.
- Durante o processo de combustão, devido à grande quantidade de calor liberada pelos gases, as paredes do cilindro absorvem parte dessa energia. O aumento de temperatura das paredes do cilindro é aliviada pelo sistema de refrigeração da máquina.
- Este aumento de temperatura dos gases causam um processo de expansão dos mesmos, realizando uma força sobre o pistão, deslocando-o no sentido do ponto morto inferior. Este movimento do pistão caracteriza o início do tempo de expansão do ciclo de funcionamento da máquina.
- Quando o pistão alcança uma posição próxima ao ponto morto inferior, a válvula de exaustão é aberta. Com isso, inicia-se o processo de exaustão do ar. Este processo é finalizado após o pistão alcançar novamente o ponto morto superior, reiniciando o ciclo.

Diante das grandes dificuldades existentes no sistema descrito acima, considerou-se um modelo aproximado do ciclo padrão ideal. Para isto, foi necessária a consideração de diversas simplificações listadas a seguir:

- Foi considerado que durante o processo de exaustão, todos os gases provenientes do processo de combustão foram retirados do cilindro. Isto implica que na etapa de admissão, o ar que entra no cilindro não se mistura com gases resultantes de ciclos anteriores.
- A queda de pressão na válvula de admissão e na de exaustão foram desprezadas, admitindo-se a pressão nas suas extremidades como sendo a ambiente.
- Durante todos os ciclos o ar foi considerado um gás ideal, ou seja, todas as relações para estes tipos de gases puderam ser utilizadas.
- Os processos de expansão e compressão foram considerados processos isentrópicos, ou seja, a entropia foi considerada constante ao longo destes processos.

- O tempo no qual o combustível evapora e se mistura com partículas oxigênio para dar início à combustão foi desprezado. Assim, foi considerado que a combustão acontece de forma instantânea com a injeção de combustível.
- Foi desprezada a transferência de calor entre os gases e as paredes do cilindro durante o processo de combustão e de exaustão.

Dado que para análises termodinâmicas os calores específicos do ar a pressão constante e a volume constante podem ser tratados como funções da temperatura, foi realizada uma média entre os valores máximo e mínimo da relação entre eles. Os valores assumidos como máximo e mínimo foram: $k_{max} = 1.4$ e $k_{min} = 1.3$. Assim, a relação c_p/c_v , representado pela letra k , foi calculado pela expressão 21.

$$k = \frac{k_{max} + k_{min}}{2} = 1.35 \quad (21)$$

O volume do cilindro da máquina em questão foi adotado como sendo $V_d = 500cm^3$. A taxa de compressão adquirida durante a realização do respectivo processo foi considerada como sendo $r_c = 20$. A relação ar/combustível foi adotada como sendo $AF = 18$ e a relação entre o diâmetro do cilindro e o curso do pistão - distância entre o ponto morto superior e o inferior - foi adotado igual a $B/S = 1.025$. Diante destas características adotadas para a máquina em questão, calculou-se os valores para o volume da câmara de combustão, para o diâmetro do cilindro, para o curso do pistão e para o raio da manivela do virabrequim através das equações 22, 23, 24 e 25 respectivamente. Os ângulos de abertura e fechamento para a válvula de admissão foram 0° e 180° e para a de exaustão 540° e 720° .

$$V_c = \frac{V_d}{r_c - 1} \quad (22)$$

$$B = \left(\frac{1.025V_d}{\pi/4} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (23)$$

$$S = B/1.025 \quad (24)$$

$$a = S/2 \quad (25)$$

Em seguida, foi utilizada a expressão para o volume do cilindro em função do ângulo do virabrequim 26, conseguida através da análise da figura 1.

$$V = V_c + \frac{\pi}{4} B^2 (a - a \cos(\theta)) \quad (26)$$

Diante da consideração de que os processos de compressão e de expansão são isoentrópicos, consegue-se as seguintes equações para a temperatura e a pressão dos mesmos:

- Processo de Compressão:

$$P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k; \quad (27)$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1}; \quad (28)$$

- Processo de Expansão:

$$P_4 = P_3 \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^k; \quad (29)$$

$$T_4 = T_3 \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{k-1}; \quad (30)$$

Nos processos de exaustão e de admissão, a pressão foi considerada constante e igual à pressão atmosférica, tendo em vista que as respectivas válvulas estão abertas durante a realização destes processos.

Diante destas equações, conseguiu-se os primeiros resultados decorrentes da simulação do modelo. Estes estão dispostos em forma de gráficos que podem ser vistos nas Figuras 6 e 7 para um único ciclo de funcionamento da máquina.

Observando os gráficos mostrados nas Figuras 6 e 7, pode-se observar facilmente o início e o final de cada curso do pistão. Com o ângulo da manivela entre 0° e 180° , o pistão está em seu curso correspondente ao processo de admissão de ar. Com isso, este está se deslocando do ponto morto superior para o inferior, com a válvula de admissão aberta. Pode-se constatar que devido a abertura da válvula a pressão no interior do cilindro é adotada como igual a pressão atmosférica.

No segundo momento - o ângulo de 180° até 360° - o pistão inicia o curso correspondente ao processo de compressão. Esta observação pode ser feita através da análise do crescimento da pressão com o aumento do ângulo da manivela.

No terceiro instante, a curva apresenta um decréscimo de pressão na medida em que há um acréscimo no ângulo da manivela. Este instante, que está contido entre 360° e 540° , corresponde ao processo de expansão do gás.

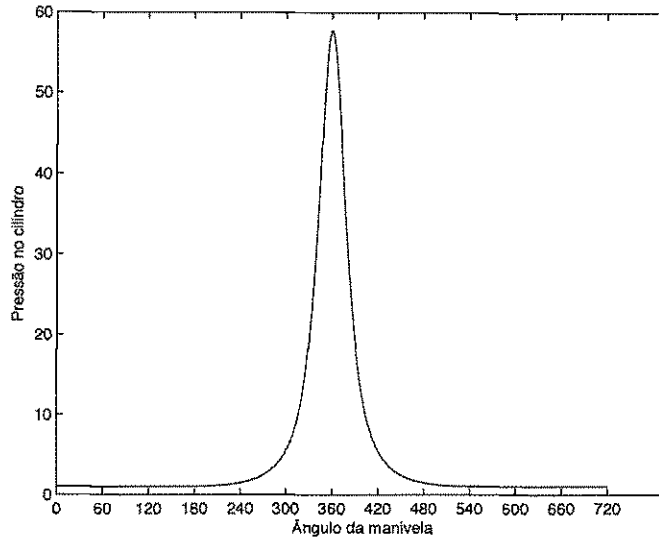


Figura 6: Gráfico da Pressão no Cilindro (bar) x Ângulo da Manivela (graus)

Neste processo também pode ser visto um decréscimo na temperatura dos gases do cilindro decorrentes do mesmo processo.

No final, com a abertura da válvula de exaustão, a pressão dos gases internos ao cilindro permanece constante e igual à temperatura ambiente, dado que foi desprezada a queda de pressão na válvula de escape. Este processo está localizado entre os ângulos 540° e 720° e conclui o ciclo da máquina de combustão interna simulada.

Em seguida, algumas considerações foram feitas com o intuito de melhorar os resultados obtidos pelo modelo. Foi considerado a permanência de 2% dos gases, provenientes do processo de combustão, na etapa de admissão de ar. Com isso, o ar que entrava no cilindro se misturava com os gases remanescentes do ciclo anterior. Para manter a relação correta de ar/combustível, a massa de combustível a ser injetada por ciclo é dada pela equação 32 e a massa de ar pela expressão 31, onde P_o e T_o são a pressão e a temperatura nas condições ambiente respectivamente. O volume V_1 corresponde ao volume de ar dentro do cilindro no momento no qual as válvulas são fechadas e R é a constante universal dos gases.

$$m_{ar} = \frac{P_o V_1}{RT_o} \quad (31)$$

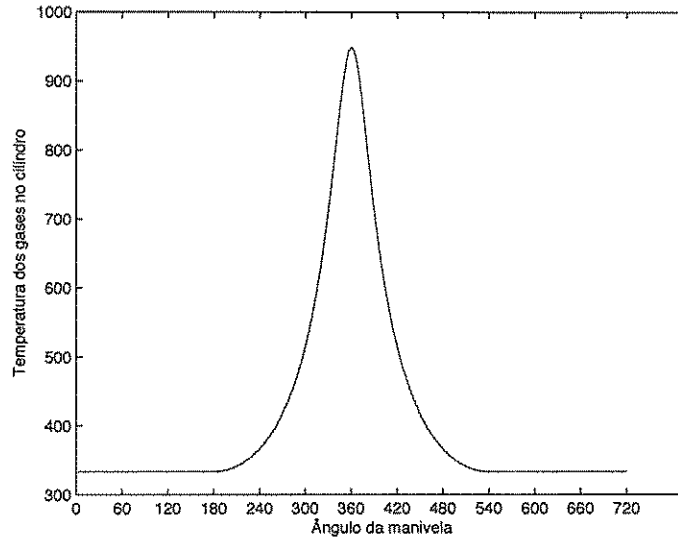


Figura 7: Gráfico da Temperatura dos Gases no Cilindro (K) x Ângulo da Manivela (graus)

$$m_{combustivel} = m_{ar}(1 - 0.02)\frac{1}{21} \quad (32)$$

Sabendo a quantidade de combustível injetado por ciclo para o processo de combustão dos gases no cilindro, é possível a determinação da quantidade de calor liberada pelo processo através da equação 33, onde Q_{HV} representa a quantidade de calor liberada por massa de combustível. Considerando que metade da quantidade total Q_{in} é liberada a volume constante, calcula-se a temperatura na qual ocorre o máximo de pressão através da equação 34, onde T_2 representa a temperatura no final do processo de compressão e c_v é o calor específico do gás a volume constante. Assim, utilizando a equação dos gases perfeitos, pode-se obter facilmente o valor máximo da pressão dentro do cilindro em bar, conforme mostrado em 35.

$$Q_{in} = m_{combustivel}Q_{HV} \quad (33)$$

$$T_x = \frac{Q_{in}/2}{m_{ar}c_v} + T_2 \quad (34)$$

$$P_{max} = \left(\frac{(m_{ar} + m_{combustivel})RT_x}{V_c 10^{-6}} \right) / 10^5 \quad (35)$$

9 Conclusão

Este trabalho teve como principal objetivo o fortalecimento de uma base teórica na área de máquinas de combustão interna. Este conhecimento adquirido será utilizado para o controle de um motor bi-combustível, cujos combustíveis são o gás natural e o diesel, localizado na UFCG, o qual atuará como um gerador acoplado à rede elétrica.

Os resultados obtidos durante a realização da simulação proposta condizem com os resultados apresentados em livros, onde diversas considerações são feitas com o intuito de diminuir a complexidade do sistema. Apesar destes resultados diferirem um pouco quando comparados àqueles obtidos em alguns artigos como o de D. T. Hountalas e R. G. Papagianakis [4], o comportamento da curva adquirida se assemelha aos mais complexos modelos utilizados, validando o sistema desenvolvido ao longo deste trabalho.

O modelo apresentado será melhorado com a adoção de métodos mais conceituados para a obtenção da curva de pressão e da temperatura do sistema, como a modelagem do processo de combustão em duas zonas. Por fim, diversos fatores desprezados neste modelo, como as quedas de pressão nas válvulas e a transferência de calor entre os gases e as paredes do cilindro, serão considerados.

Referências

- [1] [http://www.sincodives.com.br/m_servicos.php?codarea=32&coditem=.](http://www.sincodives.com.br/m_servicos.php?codarea=32&coditem=) Acessado em 24/08/2007.
- [2] Bernard Challen and Rodica Baranescu. *Diesel Engine Reference Book*. Butterworth Heinemann, 1999.
- [3] L. Guzzella and A. Amstutz. Control of diesel engines. *IEEE*, 1998.
- [4] D. T. Hountalas and R. G. Papagiannakis. Development of a simulation model for direct injection dual fuel diesel-natural gas engines. *SAE Technical Paper*, 2000.
- [5] D. T. Hountalas and R. G. Papagiannakis. A simulation model for the combustion process of natural gas engines with pilot diesel fuel as an ignition source. *SAE Technical Paper*, 2001.
- [6] Rolf Isermann, Stefan Sinsel, and Jochen Schaffnit. Modeling and real-time simulation of diesel engines for control design. *SAE Technical Paper*, 1998.
- [7] Andrei Makartchouk. *Diesel Engine Engineering*. Marcel Dekker, 2002.
- [8] Willard W. Pulkrabek. *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. Pearson Prentice Hall, 2004.
- [9] C. D. Rakopoulos, D. C. Rakopoulos, E. G. Giakoumis, and D. C. Kyritsis. Validation and sensitivity analysis of a two zone diesel engine model for combustion and emissions prediction. *Energy Conversion & Management*, 2003.