

ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO GLOBAL DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

Ricardo Ricci Bordonal^a
e Ana Marta de Souza^a

^a Universidade Federal de Uberlândia - Brasil
Informações para Contato:
ricardoricbord@gmail.com
amsouza@ufu.br

RESUMO

Através de modelos matemáticos adequados, as simulações numéricas tornam-se extremamente úteis para o desenvolvimento de novas tecnologias para aperfeiçoamento dos motores devido a seu baixo custo financeiro comparado com testes experimentais. Assim surgiu a motivação de desenvolver uma modelagem matemática capaz de simular o comportamento global de um motor de combustão interna a baixo custo computacional quando comparado às técnicas de fluidodinâmica computacional. O presente trabalho tem o principal objetivo de apresentar um código computacional simples, rápido, confiável e capaz de oferecer uma previsão do desempenho global do motor de ignição por centelha a diferentes velocidades de rotação. O código desenvolvido (RODFIRE) leva em consideração o modelo de combustão a duas zonas, um modelo empírico para a transferência de calor, além de considerar o avanço da ignição, o cruzamento de válvulas, e as perdas devido ao atrito. A confiabilidade nos modelos propostos cria a possibilidade de analisar previamente as alterações das curvas características do motor devido a alterações em parâmetros geométricos e operacionais. As curvas de torque e potência apresentaram boa concordância com os dados experimentais e o código mostrou-se interessante para comparação de diferentes motores. Estabelecida a capacidade do modelo computacional, foi também desenvolvida uma interface gráfica a fim de facilitar seu uso e favorecer a didática no ramo de estudo de motores. Acredita-se que a grande dificuldade da simulação de motores endotérmicos é um problema que só encontrará solução com a intensificação das pesquisas, pois a teoria sobre o assunto está praticamente difundida. As teorias matemáticas servem de ferramenta para efetuar as análises e o uso de processamento digital possibilita a obtenção de resultados em curto prazo. Sendo assim, a compreensão dos erros provenientes da artificialidade das simulações computacionais torna-se a chave para prever o funcionamento dos motores.

Palavras chaves: simulação computacional, motor de combustão interna, ignição por centelha.

NOMENCLATURA

CFD	Computational Fluid Dynamics
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
ICE	Ignição por Centelha
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
RPM	Rotações por minuto
UMBC	University of Maryland Baltimore

INTRODUÇÃO

Diversos foram os autores que pesquisaram e discutiram modelos algébricos para simular o funcionamento de motores. Estes modelos utilizam de

uma biblioteca de equações algébricas derivadas das relações da termodinâmica clássica, associadas a eficiências que corrigem os resultados do ciclo ideal, aproximando-os ao de um ciclo real. O grande impasse desta modelagem provinha da barreira imposta pela quantidade de equações a se resolver para obtenção dos resultados. O advento tecnológico no ramo da computação foi um trunfo nesta área de pesquisa viabilizando a resolução das equações em curtíssimo espaço de tempo, o que refletiu em um avanço significativo desta ciência. Assim, começaram a surgir modelos matemáticos que visavam representar o processo de combustão e o comportamento global do motor através de modelagem algébrica.

Apesar dos avanços significativos no desenvolvimento de motores nos últimos anos, ainda há melhorias a serem alcançadas, especialmente em

relação à eficiência de conversão de energia química em energia mecânica, que hoje é de, no máximo, 40%. A maior eficiência do motor também resultaria em um menor consumo de combustíveis e menores emissões de poluentes.

Um ponto importante a se observar é a irreversibilidade dos processos no âmbito termodinâmico durante o funcionamento do motor, no qual cada ciclo o motor pode se comportar de maneira diferente do anterior. Devido a estes e outros complexos fatores, ligados à variabilidade dos parâmetros de funcionamento do motor, hoje em dia, a maneira mais precisa de se efetuar a análise do comportamento de um motor é ainda experimental. Porém, este tipo de análise requer um investimento alto em sua execução devido aos gastos envolvidos na prototipagem.

Uma melhor compreensão dos fenômenos físicos e químicos envolvidos no funcionamento do motor é de extrema importância para o desenvolvimento de modelos matemáticos que sejam capazes de descrever o seu comportamento real. Com os modelos matemáticos adequados, as simulações numéricas tornam-se úteis para o desenvolvimento de novas tecnologias a baixo custo para o aperfeiçoamento de motores. Diante desse contexto, surge a proposta de realizar uma modelagem matemática que seja capaz de simular numericamente o comportamento global de um motor de combustão interna a baixo custo computacional e financeiro.

MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo computacional inicial

Como base para o desenvolvimento do trabalho foi escolhido o modelo computacional proposto na tese de mestrado de Costa [5] pela Universidade do Porto (FEUP) em conjunto com a University of Maryland, Baltimore County (UMBC) devido ao seu baixo custo computacional e sua simplicidade na resolução de problemas complexos. Tal modelo foi desenvolvido via métodos algébricos através do *software* livre SCILAB. Os resultados deste modelo fornecem uma boa perspectiva, em termos qualitativos do funcionamento real de um motor ICE, mas os resultados distanciavam-se em termos quantitativos.

Dados de referência

Para estabelecer os parâmetros de referência para o modelo computacional foi utilizado um motor estacionário monocilíndrico Robin EH17-2D fabricado pela empresa Robin SUBARU Industrial engines, exibido pela Figura 1.



Figura 1. Motor estacionário EH17-2D (Robin SUBARU Industrial Engines Service Manual, Models EH12-2, EH17-2, EH25-2 Engines).

Este motor foi selecionado por se adequar às características iniciais do modelo, sendo monocilíndrico, carburado, de quarto tempos e de ignição por centelha. As informações dimensionais são apresentadas na Tabela 1, enquanto informações operacionais são apresentadas na Figura 2 e suas curvas características na Figura 3.

Tabela 1. Dados do motor estacionário EH17-2D.

Parâmetro	Valor
Comprimento da biela	0,0850000 m
Diâmetro do cilindro	0,0670000 m
Curso do pistão	0,0490000 m
Deslocamento do pistão	172 cm ³
Relação de compressão	8,5
Diâmetro da haste da válvula de admissão	0,0054475 m
Diâmetro da haste da válvula exaustão	0,0054475 m
Diâmetro do pórtilo de admissão	0,0200000 m
Diâmetro do pórtilo de exaustão	0,0200000 m
Elevação máxima da válvula de admissão	0,0127215 m
Elevação máxima da válvula de exaustão	0,0127215 m

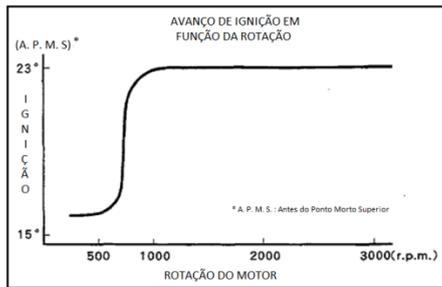


Figura 2. Avanço de ignição em função da rotação do motor EH17-2D. (Adaptado de Robin SUBARU Industrial Engines Service Manual, Models EH12-2, EH17-2, EH25-2 Engines).

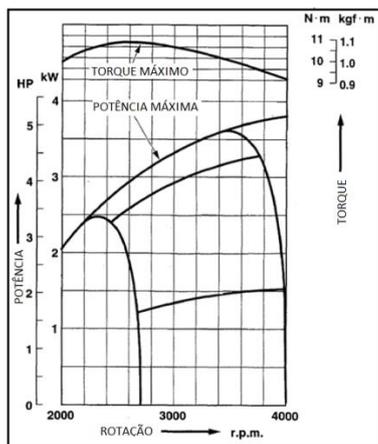


Figura 3. Curvas de torque e potência do motor EH17-2D (Adaptado de Robin SUBARU Industrial Engines Service Manual, Models EH12-2, EH17-2, EH25-2 Engines).

Intervenções no modelo

Inicialmente o modelo proposto por Costa [5], que fora desenvolvido através do *software* SCILAB, foi transposto para o *software* MATLAB, devido a maior familiaridade com a linguagem e melhor domínio das funções. Seguido desta modificação foi desenvolvida uma rotina computacional que possibilitou ao modelo, que antes operava em somente uma rotação, fornecer respostas de potência, torque e eficiência ao longo de uma faixa de rotação pré-definida. A faixa de rotação definida foi correspondente à disponibilizada nas curvas reais do manual do motor, de 2000 a 4000 rpm.

Em seguida, para possibilitar a comparação dos dados reais com os computacionais, foram inseridas no código as equações que caracterizavam as curvas reais de torque e potência do motor EH17-2D. Nesta etapa foi utilizado o *software* Microsoft Excel para determinar a equação característica das curvas através de interpolação polinomial de grau três.

Desta maneira, o código estava apto a receber intervenções e possibilitar a análise de como estas interfeririam nas curvas de resposta do modelo,

aproximando ou distanciando das curvas reais fornecidas pelo fabricante.

Implementação da curva de ignição

O ponto de ignição é um parâmetro operacional extremamente importante no funcionamento do motor, pois está intimamente ligado à combustão ideal da mistura ar-combustível.

O modelo inicial operava com ponto de ignição 0° antes do PMS. Nesta etapa foi obtida a equação característica da curva de ignição do motor, fornecida no manual, através do *software* Microsoft Excel via interpolação polinomial de grau três e então implementada uma rotina que determinava o ponto de ignição de acordo com a rotação em análise. Neste caso esta rotina não é de grande valia pois na faixa de rotação de análise a curva de ignição é uma reta com ponto de ignição a 23° antes do PMS, porém como nem todos os motores tem essa característica o desenvolvimento da rotina foi necessário.

Implementação do cruzamento de válvulas

O tempo de abertura e fechamento das válvulas é uma característica que pode resultar em melhor funcionamento do motor a determinadas faixas de rotação, pois aproveitando a energia cinética da mistura ar-combustível que entra no motor e dos gases provenientes da combustão.

O grande impasse desta etapa se deu devido ao manual do motor não conter os dados de abertura e fechamento das válvulas. Deste modo, para sanar o problema, foram utilizados valores médios para o tempo de abertura e fechamento de válvulas de motores monocilíndricos encontrados na literatura. Os valores assumidos podem ser vistos na Figura 4.

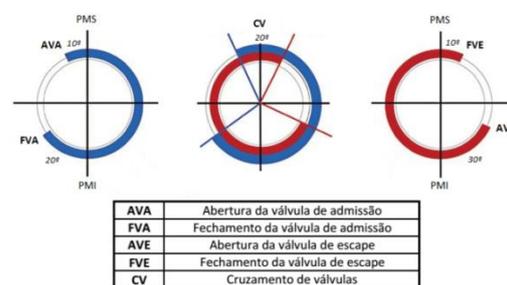


Figura 4. Diagrama de abertura e fechamento de válvulas utilizado no modelo.

Implementação do atrito

O atrito entre os mecanismos que compõe o motor acarreta em grandes perdas de trabalho produzido durante o ciclo termodinâmico. A energia despreendida para superar as forças de atrito reflete diretamente na eficiência do motor.

Uma modelagem do atrito em função das forças dinâmicas e coeficientes de atrito envolvem diversas

variáveis do motor, tais como: materiais, área dos anéis de contato, área dos mancais, etc.. Assim sendo, sua criação seria inviável, além de desconsiderar os atritos gasosos e o trabalho de bombeamento de ar. Optou-se utilizar um modelo algébrico empírico, o qual quantifica a potência despendida em função das forças de atrito [7].

O modelo quantifica tanto os atritos entre metais quanto os gasosos e também potência despendida no bombeamento de ar através de uma equação que quantifica a pressão média de atrito, de modo que este seja aplicável a motores de diferentes cilindradas. Isto é possível pelo fato da pressão ser estabelecida da mesma forma que a pressão média efetiva do motor, ou seja, é uma variável que quantifica o atrito por unidade de volume deslocado. Sendo assim, conhecida a pressão média de atrito e o volume deslocado em cada ciclo é possível determinar o trabalho de atrito consumido por ciclo.

A equação característica do modelo foi obtida através de uma interpolação polinomial de resultados experimentais que forneciam os valores de atrito ao longo da rotação para diversos motores. Os resultados experimentais foram estabelecidos através de ensaios reversos em dinamômetros de bancada. A Figura 5 traz o gráfico com alguns dados experimentais e a curva característica da equação.

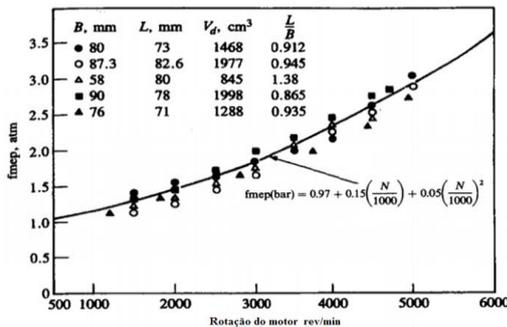


Figura 5. Pressão média de atrito em função da velocidade de rotação (Adaptado de Heywood [7]).

Assim, seguindo os modelos de Heywood [7], conhecida a pressão média de atrito é possível se determinar o trabalho “gasto” no ciclo e também a potência despendida com o atrito por ciclo através das seguintes equações:

$$f_{mep} [kPa] = \left(\left(0.97 + 0.15 \left(\frac{N}{1000} \right) + 0.05 \left(\frac{N}{1000} \right)^2 \right) \times 100 \right) \quad (1)$$

$$W_{at} [kJ] = f_{mep} \times V_{deslocado} \quad (1)$$

$$P_{at} [kW] = W_{at} \times \left(\frac{N}{60} \right) \times \left(\frac{1}{nr} \right) \quad (2)$$

Onde:

- f_{mep} - Pressão média de atrito total em kPa;
- N - Velocidade de rotação do motor em rpm;
- W_{at} - Trabalho de atrito em kJ;
- $V_{deslocado}$ - Volume deslocado durante o ciclo em m³;
- P_{at} - Potência de atrito em kW;
- nr - número de voltas do eixo manivela para um ciclo completo.

Através destas equações foi implementada uma rotina computacional no modelo, sendo essa, capaz de descontar o trabalho despendido em atrito por ciclo daquele produzido pela queima do combustível.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As modificações efetuadas no código inicial trouxeram melhorias gradativas aos resultados do modelo conforme foram sendo aplicadas. Portanto, os resultados das simulações aproximaram-se cada vez mais das curvas reais, como pode ser observado nas Figuras 6 e 7.

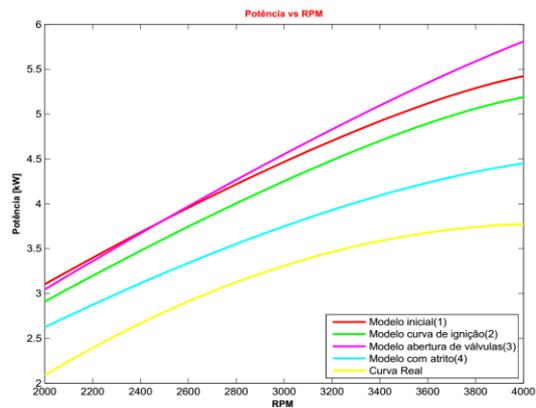


Figura 6. Curvas de potência em função da velocidade de rotação do motor sob efeito das modificações gradativas no código.

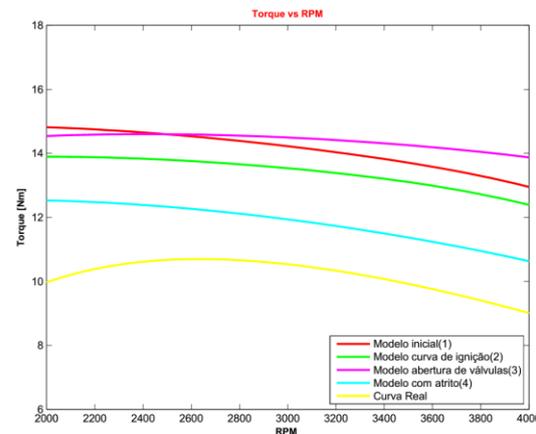


Figura 7. Curvas de torque em função da velocidade de rotação do motor sob efeito das modificações gradativas no código

Conforme foram sendo efetuadas as modificações, a curva de eficiência térmica foi aproximando-se cada vez mais de valores realistas (na faixa dos 30%), como pode ser visto na Figura 8, dando credibilidade ao modelo. Além disso, a curva de potência foi aproximando seus valores e perfil da curva real.

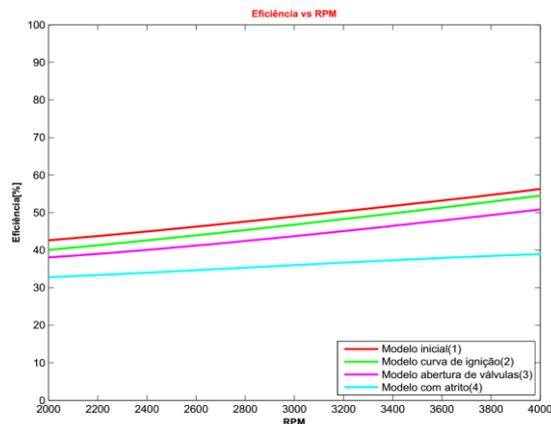


Figura 8. Curvas de eficiência térmica em função da velocidade de rotação do motor sob efeito das modificações gradativas no código.

Ao longo de todas as modificações o modelo comportou-se de maneira estável, fornecendo resultados condizentes com as teorias termodinâmicas existentes, o que pode ser comprovado na Figura 9.

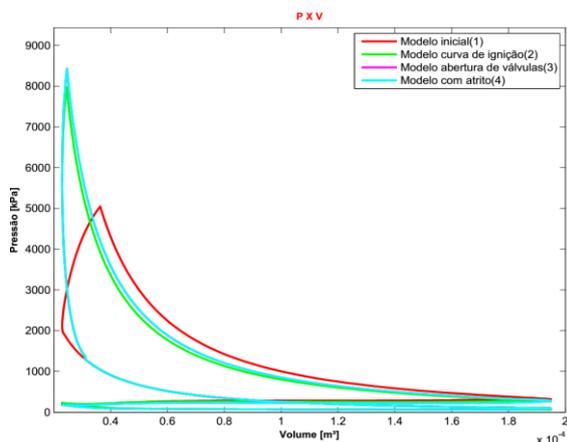


Figura 9. Gráficos de pressão por volume das simulações sob efeito das modificações gradativas no código.

Após as modificações iniciais, as curvas de torque e potência se localizam afastadas dos dados reais do motor assim como a curva de eficiência (Figura 8) se localiza distante de valores realistas, apresentando valores entre 40% e 60%. Atualmente os motores apresentam cerca de apenas 30% de eficiência térmica. Os valores encontrados podem ser justificados pelo fato de o modelo, ainda, não levar em consideração perdas por atrito, perdas por efeito das colunas gasosas, capacidade térmica dos materiais e os

erros provindos da dificuldade dos modelos representarem as diversas influências sobre os diversos parâmetros que influenciam o comportamento global dos motores.

A curva de ignição fez com o que o comportamento da simulação aproximasse-se ainda mais do comportamento real do ciclo, como pode ser observado na Figura 9. No entanto, pode-se observar também um pico de pressão muito acentuado e valores muito altos em relação ao esperado. Tal resultado pode ser justificado pelo fato de o modelo não prever o avanço da ignição no âmbito termodinâmico o que faz com que com a ignição adiantada haja um aumento de pressão por duas fontes: a própria compressão e a expansão abrupta dos gases devido à combustão. Pode ser verificada uma aproximação nas curvas de torque e potência e uma queda na eficiência térmica nos resultados do modelo com a curva de ignição. Acredita-se que tais resultados possam ser justificados pelo ajuste de ângulo de avanço baseado na capacidade térmica dos materiais, ou seja, o ângulo de avanço fornecido no manual do motor explora o máximo de potência visando o menor desgaste do motor, acarretando num motor menos eficiente, porém real, de baixo custo e duradouro.

A modificação do tempo de abertura de válvulas causa um distanciamento da curva de potência elevando-a gradativamente longo da rotação. Tal fato era esperado, pois segundo a teoria, o cruzamento de válvulas tende a favorecer um melhor desempenho do motor com o aumento da rotação. Vale ressaltar, não foram utilizados dados reais de cruzamento de válvulas do motor na simulação. A eficiência do processo sofreu uma queda, aproximando-se ainda mais de níveis reais. Outro ponto importante a salientar é o reflexo desta modificação na curva de torque, como poder ser verificado na Figura 10.

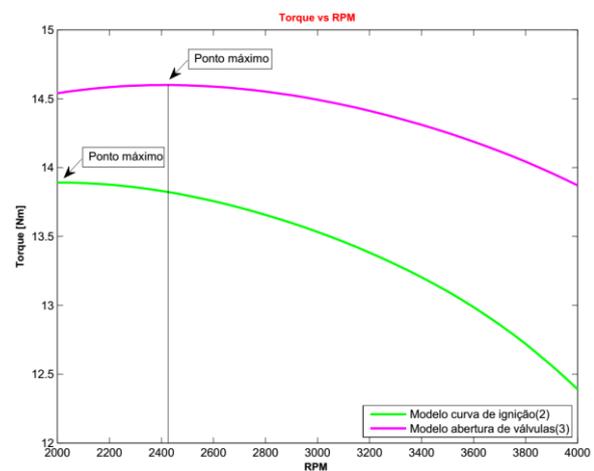


Figura 10. Curvas de torque dos modelos computacionais sob alterações no ponto de avanço e cruzamento de válvulas com destaque para o ponto de máximo de ambas as curvas.

Anteriormente esta curva apresentava máximo nas rotações iniciais de análise, em torno de 2000 RPM, e vinha decaindo com o aumento da rotação. Após a modificação, o máximo torque ocorre em torno

da rotação de 2400 RPM. O comportamento do motor simulado torna-se, então mais próximo ao do motor real, o qual apresenta torque máximo na faixa de 2600 RPM. Isto provavelmente ocorre devido à modificação no tempo de abertura das válvulas estar refletindo no modelo algébrico questões físicas relacionadas ao efeito inercial dos gases.

Após a inserção do modelo de atrito, pelo fato deste ser estabelecido em função da rotação de operação, a modificação não altera o comportamento da pressão x volume do motor, como pode ser observado pelo gráfico presente na Figura 9. O modelo de atrito traz uma aproximação notória entre as curvas computacionais e as reais de torque e potência, como pode ser observado pelos gráficos presentes nas Figuras 6 e 7, fundamentando o modelo algébrico de atrito proposto. Apesar desta aproximação o perfil da curva de torque se distancia da real, apresentando novamente seu máximo na rotação de 2000 RPM. Isto ocorre provavelmente pelo fato do modelo ter sido determinado através de motores multicilíndricos com faixa de cilindrada entre 800 cm³ a 2000 cm³, nos quais o efeito inercial dos gases é diferente de um motor monocilíndrico de baixa cilindrada, refletindo em valores distintos de atrito gasoso e potência de bombeamento de ar. Com o aumento da rotação o efeito inercial se torna bem definido para ambos os tipos de motores o que aproxima seus comportamentos, como pode ser observado no próprio gráfico de torque onde após as 2800 RPM ambas as curvas apresentam perfis quase idênticos. Já a curva de eficiência térmica sofreu uma queda de aproximadamente 10% em seus valores ao longo de toda a rotação de análise. Este comportamento era esperado, pois o atrito é considerado como uma fonte de perda de energia durante o funcionamento do motor o que incide em uma queda de eficiência do mesmo. Com esta mudança o modelo fornece eficiências na faixa dos 30% a 40%, ao longo da velocidade de rotação, valores que são mais condizentes com reais.

Diante da relativa simplicidade do modelo desenvolvido os resultados obtidos foram altamente satisfatórios, fornecendo valores próximos aos reais e perfis de comportamento similares.

Embora os resultados gerados pelo modelo ainda apresentem uma superestimativa em relação ao comportamento real, vale ressaltar que o baixo custo computacional e a simplicidade de uso o tornam eficiente para fornecer uma ideia inicial do comportamento global de um motor. Outro grande atributo do código está na capacidade de se realizar uma análise da variação de parâmetros geométricos nas respostas do motor.

A simulação computacional de motores endotérmicos é uma área que apresenta dificuldade na obtenção de resultados exatos. Isto ocorre devido ao fato do funcionamento dessas máquinas englobarem diversas interações entre vários mecanismos e processos termodinâmicos, e também por serem máquinas que operam de maneira cíclica, cujas

variabilidades são imprevisíveis. São diversos os fatores que influenciam nessa singularidade de funcionamento como pequenas variações na temperatura e pressão externa, nível de atomização do combustível, nível de turbulência na câmara de combustão, transitoriedade dos regimes de operação, entre outros. Já os computadores operam de maneira lógica e exata onde uma rotina computacional pode ser executada quantas vezes for necessária fornecendo o mesmo resultado, quando parametrizada com valores constantes. Assim, durante uma simulação de um motor através de um código computacional cada ciclo simulado será idêntico ao seu anterior fazendo com que, apesar de todas as correções, o processo se torne relativamente ideal. Sendo então o idealismo computacional uma fonte de erro inevitável durante a simulação de motores. Vale ressaltar que modelos computacionais normalmente não levam em consideração desvios geométricos e ou dimensionais, como por exemplo: tolerâncias dimensionais, desvios de cilindrada, desvios de planeza, valores de rugosidade, entre outros. Sendo estes fatores incrementadores do idealismo computacional dos modelos, quais não prevêm tais fatores.

Dentre as fontes de erros discretas encontradas na execução deste trabalho destacam-se: a falta de dados específicos e experimentais do motor; a falta da influência do efeito inercial dos gases no modelo algébrico; a desconsideração da capacidade térmica dos materiais; a desconsideração da influência da temperatura sobre as propriedades dos materiais; erros provindos dos dados da mistura ar-combustível; erros provindos dos modelos empíricos adotados; erros na coleta dos dados das curvas fornecidas pelo fabricante; erros derivados da não previsão do atraso de ignição pelo modelo; erros provindos dos tempos adotados para a abertura e fechamento das válvulas.

Desenvolvimento do software RODFIRE

Tendo em vista a capacidade do código desenvolvido em fornecer resultados condizentes com o comportamento de um motor surgiu a motivação do desenvolvimento de uma interface gráfica para o mesmo, a fim de facilitar e ampliar o seu uso. Dando início a etapa de desenvolvimento do *software* de simulação do funcionamento de motores endotérmicos alternativos: RODFIRE.

A plataforma escolhida para o desenvolvimento do RODFIRE foi o *software* Microsoft Visual Studio Express. A linguagem de programação utilizada foi o C#. O idioma adotado na criação foi o Inglês devido a sua abrangência e usualidade no cenário global de pesquisas.

O *software* possui ao todo oito formulários contando com o principal. O formulário principal é onde o usuário pode obter as curvas de torque, potência, eficiência térmica e o gráfico de pressão por volume de um motor previamente cadastrado no site. Ainda neste formulário é possível realizar alterações

em alguns parâmetros do motor e analisar as respostas sem que a configuração original do motor seja alterada no banco de dados. A Figura 11 exibe o formulário principal.

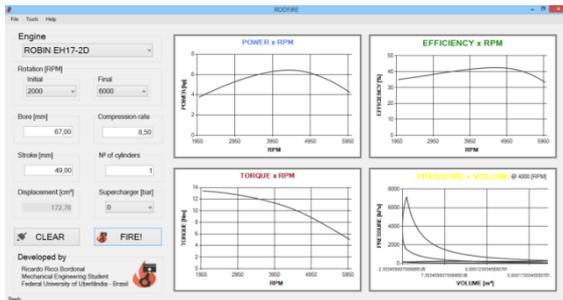


Figura 11. Formulário principal do software

O formulário de cadastro possibilita o cadastro de novos motores onde são exigidos os parâmetros quais o modelo considera para realizar a simulação, como pode ser visto na Figura 12.

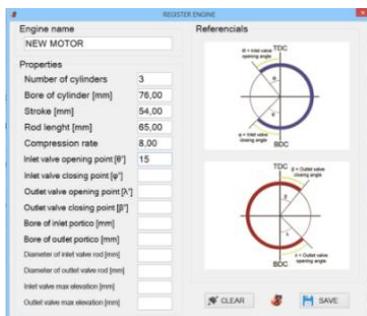


Figura 12. Formulário de cadastro de motores.

Além da análise do formulário principal é possível ainda se realizar comparação de dois motores através do formulário de comparação, exibido pela Figura 13.

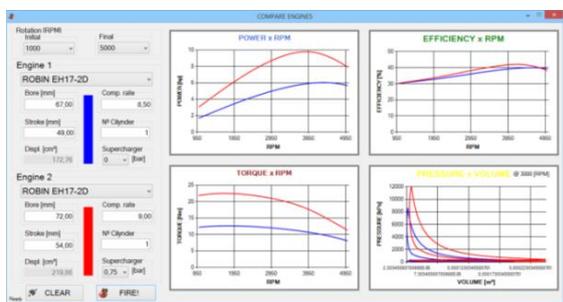


Figura 13. Formulário de comparação de motores.

O software ainda possibilita realizar uma análise do motor a uma determinada rotação através do formulário de análise específica. Neste formulário é obtido o valor de torque, potência e eficiência do motor aquela determinada rotação e gráficos de pressão por volume, temperatura interna do cilindro por ângulo de giro do virabrequim, temperatura de chama por ângulo de giro do virabrequim e energia térmica dissipada por ângulo de giro do virabrequim. A Figura 14 mostra o formulário de análise específica.

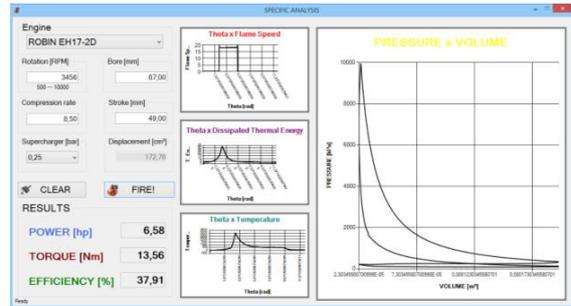


Figura 14. Formulário de análise específica.

Além destes formulários o software conta ainda com um formulário de edição de motores como já havia sido comentado, um de exclusão de motores, um formulário de ajuda com instruções de utilização do software e um formulário com informações sobre o software.

CONCLUSÕES

O estudo pôde comprovar que o modelo é estável e apresenta resultados condizentes com a teoria do funcionamento de motores endotérmicos alternativos. O grande destaque se dá à aproximação quantitativa dos resultados obtidos através das modificações inseridas no código original, fornecendo resultados mais condizentes com a realidade do funcionamento de motores com um custo computacional extremamente baixo.

As dificuldades de validação de um modelo computacional para o funcionamento global de um motor são conhecidas. Porém, os resultados encontrados foram satisfatórios trazendo a aproximação do modelo ao comportamento real de um motor. Estes resultados trouxeram a motivação do desenvolvimento de um software computacional a partir do código desenvolvido, a fim de fornecer uma ferramenta útil para a análise básica de diferentes parâmetros geométricos e ou operacionais no comportamento global do motor. O maior enfoque de aplicação do software é a didática para o ensino na área de motores de combustão interna. O software fornece resultados sensíveis a modificações nos parâmetros de entrada e é de fácil utilização. Outro ponto importante a respeito do software RODFIRE é que este poderá fornecer a maior utilização deste modelo científico e incentivar a pesquisa de melhoramento deste código.

Apesar das diferenças entre os resultados finais e os dados reais, o modelo desenvolvido opera respeitando as leis do funcionamento de motores alternativos, fornecendo resultados mais próximos da realidade, dando credibilidade ao trabalho desenvolvido e oferecendo a possibilidade de melhorias em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

1. BARROS, J. E. M., 2003. Estudo de Motores de Combustão Interna Aplicando Análise Orientada a Objetos. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós Graduação da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.
2. BOSCH, R., 2005. Manual de Tecnologia Automotiva/Robert Bosch. Tradução: Helga Madjderey, Gunter W. Prokesch, Euryale de Jesus Zerbini, Suely Pfeferman. Blucher, Ltda.
3. BRUNETTI, F., 2012. Motores de Combustão Interna – Volume 1. Blucher, Ltda.
4. CARVALHO, M. A. S., 2011. Avaliação de um Motor de Combustão Interna Ciclo Otto Utilizando Diferentes Tipos de Combustíveis. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial – Universidade Federal da Bahia.
5. COSTA, A. E. F., 2008. Computer Simulation of an Internal Combustion Engine. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal em conjunto com University of Maryland, Baltimore County.
6. FONSECA, L. G., 2014. Caracterização do Escoamento de Ar em um Motor de Combustão Interna Utilizando Mecânica dos Fluidos Computacional. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós Graduação da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.
7. HEYWOOD, J. B., 1988. Internal combustion engine fundamentals. McGraw-Hill, Inc.
8. LICHTY, L. C., 1951. Internal-Combustion Engines. McGraw-Hill, Inc.
9. MARTINS, J., 2006. Motores de Combustão Interna. 2ª edição. PUBLINDÚSTRIAS, EDIÇÕES TÉCNICAS.
10. OBERT, E. F., 1971. Internal Combustion Engines. Tradução: Fernando Luiz Carraro. Editora Globo.
11. ROBIN AMERICA, INC. Service Manual, Models EH12-2, EH17-2, EH25-2 Engines.
12. SOUZA, A. M., 2014. Notas de aula da disciplina Máquinas Térmicas - FEMEC41075, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.
13. TAYLOR, C. F., 1985. The internal combustion engine in theory and practice, Volume 1, Second Edition. MIT Press.
14. VARELLA, C. A. A., 2006. Histórico e Desenvolvimento dos Motores de Combustão Interna. Apostila didática da disciplina IT 154 Motores e Tratores da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, UFRRJ, Brasil.