

XXIV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 11 a 15/09/2017 – Rio Grande - RS

PREDIÇÃO DOS PARÂMETROS DA FUNÇÃO DE VIBE UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO

Sara Pacheco Leão, Hendrick Maxil Zárate Rocha, Manoel Fernandes Martins Nogueira

Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Mecânica

Rua Augusto Corrêa, 01 - Guamá. CEP 66075-110. Belém - Pará

sarapacheco40@gmail.com, hendrick@ufpa.br, mfmn@ufpa.br

RESUMO: Este estudo investiga o uso do algoritmo genético para prever os parâmetros da função de Vibe que permitam estimar a pressão no interior do cilindro de um grupo gerador diesel, utilizando parâmetros de fácil obtenção como a potência elétrica gerada e o consumo específico de combustível. Para a predição dos parâmetros da função de Vibe foram utilizados dois programas computacionais o AVL BOOST e o AVL Design Explorer, onde o modelo termodinâmico do motor foi criado usando o programa AVL-BOOST utilizando o modelo de combustão de Vibe de duas zonas e o algoritmo genético foi implementado como método de otimização no programa AVL Design Explorer. Para a verificação dos resultados numéricos, eles foram comparados com a curva de pressão obtida com um sensor de pressão instalado no interior do cilindro do motor. O grupo gerador operou com uma mistura de 7% de biodiesel no diesel (B7) e 60% da potência nominal máxima. Em função dos resultados obtidos foi verificado que os parâmetros encontrados da função de Vibe conseguiram prever a pressão no interior do cilindro utilizando o algoritmo genético, mas o pico da pressão máxima foi maior que o obtido experimentalmente com erro relativo percentual de 3,02%.

Palavras-Chave: Motor diesel, predição, otimização

ABSTRACT: This study investigates the use of the genetic algorithm to predict the parameters of the Vibe function that allows to estimate the pressure inside the cylinder of a diesel generator set using easily obtainable parameters such as the electric power generated and the specific fuel consumption. For prediction of the parameters of the Vibe function, two AVL BOOST and AVL Design Explorer computational programs were used, where the thermodynamic model of the motor was created using the AVL-BOOST program using the two-zone Vibe combustion model and the algorithm was implemented as an optimization method in the AVL Design Explorer program. To verify numerical results, they were compared to the pressure curve obtained with a pressure sensor installed inside the engine cylinder. The generator set operated with a mixture of 7% biodiesel in diesel (B7) and 60% of the maximum rated power. It was verified that parameters of the Vibe function could predict pressure inside the cylinder using the genetic algorithm, but the peak of the maximum pressure was higher than the one obtained experimentally with a relative error of 3.02%.

Keywords: Diesel engine, prediction, optimization.

INTRODUÇÃO

O processo de combustão em motores diesel é muito complexo pois envolve diferentes fenômenos físicos e químicos. Uma forma de analisar esse processo é medindo a pressão no interior do cilindro em função do ângulo do eixo de manivelas. Conhecida essa pressão, é possível determinar diversos parâmetros que permitem analisar o processo de combustão, desempenho do motor e formação de poluentes, entre outros (GHOJEL, 2010).

Esta técnica poderia ser aplicada nos grupos geradores a diesel que operam nas usinas termelétricas, permitindo o ajuste dos parâmetros operacionais do motor para atingir melhores eficiências para cada tipo de combustível utilizado. Devido a sua complexidade não é possível monitorar a pressão no interior do cilindro de cada grupo gerador, tornando-se imprescindível a utilização de ferramentas de simulação computacional que permitam prever esta pressão, conjuntamente com a combinação de parâmetros determinados de forma experimental. Um dos modelos mais utilizados pela indústria, embora muito simples, deriva da Primeira Lei da Termodinâmica e das equações de estado dos gases ideais, considerando os gases queimados e não queimados como um gás homogêneo ideal com temperatura e pressão uniformes, este modelo geralmente é chamado de modelo zero dimensional (COLAÇO *et al.*, 2010b; a).

O modelo zero dimensional não inclui submodelos para descrever a cinética química das reações envolvidas no processo de combustão, por esse motivo dependem de alguma correlação empírica ou semi-empírica para determinar a taxa de calor liberado pelo combustível e com ela posteriormente a pressão no interior do cilindro. A correlação mais

utilizada é a função de *Vibe* também chamada de *Wiebe*, que relaciona quatro parâmetros o início da combustão, a duração da combustão e os parâmetros de forma (m) e eficiência da combustão (a) (MERKER *et al.*, 2012). Embora todos os modelos sejam muito simples e fáceis de usar, foi evidenciado que os parâmetros da função de Vibe são específicos para cada motor e condição de operação, podendo variar drasticamente em função das mudanças de carga e combustível. Por esse motivo não é possível manter os parâmetros constantes para tentar prever comportamentos com mudanças de carga e alterações do combustível, já que isso implica que a fração mássica do combustível queimado será a mesma em todas as condições analisadas, somente se obtendo mudanças na taxa de liberação de calor devido ao aumento ou diminuição da massa e do poder calorífico inferior do combustível (ILIEV, 2014).

O objetivo principal deste trabalho foi determinar, utilizando o algoritmo genético, os parâmetros adequados da função de Vibe que permitam prever a pressão no interior do cilindro do motor em função de parâmetros de fácil obtenção, como é o caso da potência elétrica e do consumo específico de combustível. Para isso foram utilizados dois programas computacionais o AVL BOOST e o AVL Design Explorer.

METODOLOGIA

A simulação numérica é uma parte fundamental do processo de desenvolvimento de motores de combustão interna. Um dos programas atualmente usado por diversos pesquisadores é o programa de simulação AVL-BOOST (LEŠNIK *et al.*, 2014; NIKZADFAR e SHAMEKHI, 2014; RIMKUS *et al.*, 2015), criado para aplicações termodinâmicas e desenvolvido exclusivamente para a modelagem de motores de combustão interna. O programa consiste principalmente de dois modelos de combustão, zero dimensional e o unidimensional.

Dentro dos modelos frequentemente utilizados no AVL-BOOST para motores diesel estão o modelo Vibe duas zonas e o modelo AVL-MCC (combustão de mistura controlada). Para este trabalho foi escolhido o modelo Vibe duas zonas, onde o principal componente deste modelo é a fração mássica de combustível queimado (x) em função do avanço do ângulo do eixo de manivelas (θ), que é obtida por meio da função de Vibe (MERKER *et al.*, 2012), essa função empírica expressa a fração mássica do combustível queimado como uma função exponencial envolvendo o início da combustão (θ_0), a duração da combustão ($\Delta\theta$), o parâmetro de forma (m) e o parâmetro (a), como se mostra na Eq. 1.

$$x(\theta) = 1 - \exp \left[-a \left(\frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta} \right)^{m+1} \right] \quad (1)$$

Utilizando a função de Vibe definida pela Eq. 1 determina-se a taxa de liberação de calor do combustível ($dQ/d\theta$), como se mostra na Eq. 2, em função do poder calorífico inferior do combustível (PCI_{comb}) e da massa de combustível existente na câmara de combustão por ciclo (m_{comb}).

$$\frac{dQ(\theta)}{d\theta} = m_{comb} PCI_{comb} a (m+1) \left(\frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta} \right)^m \exp \left[-a \left(\frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta} \right)^{m+1} \right] \quad (2)$$

Conhecida a taxa de liberação de calor do combustível é possível determinar a pressão no interior do cilindro do motor, mas para isso inicialmente devem ser definidos os parâmetros da função de Vibe.

Uma forma para determinar estes parâmetros é a utilização de métodos de otimização como é o caso do algoritmo genético (VERMA e LAKSHMINARAYANAN, 2006), com ele é possível resolver o problema inverso, que neste artigo aborda a estimativa da potência efetiva e consumo específico do combustível relacionado com os obtidos experimentalmente. Dessa forma a função objetivo foi definida como a minimização do erro global (ε_{obj}) determinado para ambos parâmetros como se mostra na Eq. 3.

$$\varepsilon_{obj} = \frac{Abs|P_{e,exp} - P_{e,simu}|}{P_{e,exp}} + \frac{Abs|Cesp_{comb,exp} - Cesp_{comb,simu}|}{Cesp_{comb,exp}} \quad (3)$$

Onde $P_{e,exp}$ e $P_{e,simu}$ são a potência efetiva determinada de forma experimental e simulada em kW, já $Cesp_{comb,exp}$ e $Cesp_{comb,simu}$ são o consumo específico de combustível experimental e simulado em g/kW-h.

O método do Algoritmo genético surgiu inspirado na teoria da evolução de Darwin em função da análise do processo natural de evolução em populações biológicas, na qual os indivíduos mais adaptados a um meio tendem a sobreviver nele e perpetuar a informação genética armazenada nos cromossomos evoluindo através das gerações, na procura da convergência para um indivíduo ideal. O método parte de uma população inicial, para posteriormente formar um novo conjunto de indivíduos evoluídos (possíveis soluções), resultado de vários cruzamentos e mutações ao longo das iterações.

O processo repete-se até atingir o objetivo desejado, encontrando soluções ótimas (podendo ser locais ou globais) chegando ao ponto em que os indivíduos não consigam mais obter uma outra solução com valores melhores, identificando dessa forma os possíveis mínimos ou máximos globais (GARCIA e TASINAFPO, 2008; ZHU *et al.*, 2015).

Para a implementação do método do algoritmo genético foi utilizado o programa Design Explorer, sendo necessário definir as variáveis e os objetivos que se deseja atingir. Para reduzir o tempo computacional, em função de diversas referências bibliográficas foi atribuído o valor de 6,908 para o parâmetro a que representa uma conversão de energia de 99,9% (GUPTA, 2013; FERRARI, 2014; ILIEV, 2014; CATON, 2016).

Como anteriormente mencionado, considerando conhecido o parâmetro a neste trabalho foram utilizadas três variáveis a serem determinadas que são os parâmetros desconhecidos da função de Vibe, o início da combustão (θ_0), a duração da combustão ($\Delta\theta$) e o parâmetro de forma m . A faixa de variação de cada parâmetro foi previamente definida para poder atingir o objetivo global que represente da melhor forma a realidade do funcionamento do motor.

Para o caso do início da combustão a faixa de variação foi determinada em função do atraso mínimo e máximo provável. Neste trabalho foi considerado um atraso da combustão mínimo de 0,5ms e um atraso máximo de 1,5 ms definidos em função dos valores apresentados por MOLLENHAUER e TSCHOEKE (2010) e HEYWOOD (1988). Considerando que o motor trabalha com rotação constante de 3600 rpm e o combustível é injetado 16° antes do ponto morto superior, foi determinada a faixa de variação do início da combustão de $-5,2^\circ \leq \theta_0 \leq 16,4^\circ$. Já para os parâmetros $\Delta\theta$ e m as faixas de variação foram determinadas em função dos valores máximos e mínimos recomendados no manual do programa (AVL-BOOST, 2014b), obtendo os seguintes valores $40^\circ \leq \theta_0 \leq 130^\circ$ e $0,01 \leq m \leq 2,6$.

Em função das faixas anteriormente determinadas foram calculados os valores iniciais utilizados no processo de otimização, onde os valores iniciais do θ_0 e $\Delta\theta$ foram de $5,6^\circ$ e 85° respectivamente, ambos determinados em função da média aritmética dos valores máximos e mínimos dos parâmetros. Por outro lado, o valor inicial de m não foi calculado em função da média aritmética, uma vez que diversas referências bibliográficas sugerem o valor de 0,5 para motores diesel (AVL-BOOST, 2014b; a).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 1 mostra a convergência do método de otimização quando definidos como objetivos a serem atingidos os valores experimentais da potência efetiva de 2,86 kW e o consumo específico de combustível de 377,6 g/kW-h. Após 100 gerações com uma população de 50 indivíduos foi verificado que existem diversas variações dos parâmetros de Vibe (θ_0 , $\Delta\theta$ e m) que satisfazem os objetivos estabelecidos, como se observa na Fig. 1 (a). Onde cada esfera representa um indivíduo e o tamanho das mesmas o erro global do objetivo determinado em função da Eq. 3.

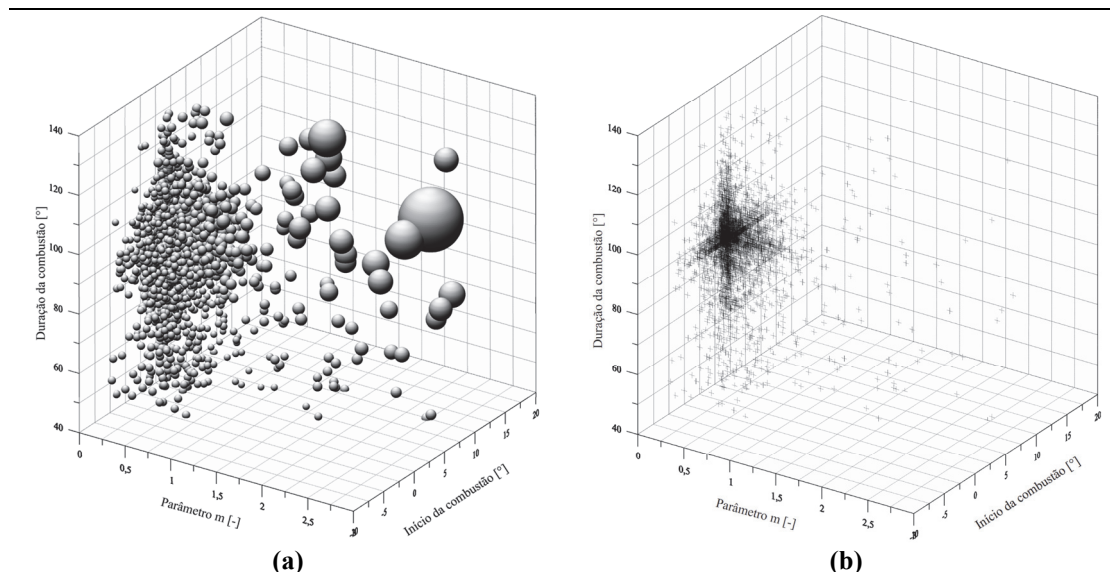


Figura 2. Convergência da função objetivo

Na Fig. 1 (a) observa-se uma grande concentração das esferas de menor tamanho (menor erro) em uma região específica, que pode ser melhor apreciada na Fig. 1 (b), evidenciando que mesmo obtendo baixos erros em locais diferentes a maioria das iterações com menor erro concentram-se em uma região específica, onde a média dos pontos

dessa região foi considerada como o resultado da otimização. Considerando a média das últimas mil iterações que obtiveram menor erro global, foi determinado o início da combustão de $3,35^\circ$; o valor de $88,38^\circ$ para a duração da combustão e o parâmetro m da função de Vibe de 0,038. Já a potência efetiva foi de 2,74 kW, obtendo um erro relativo 4,2% com relação ao objetivo definido de 2,86 kW e o consumo específico de combustível de 365,9 g/kW-h, com erro relativo de 3,1% com relação ao objetivo definido de 377,6 g/kW-h.

A Fig. 2 apresenta os resultados da predição da pressão dos gases no interior do cilindro quando usado o método de otimização. Observa-se que a pressão pico foi inferior a pressão experimental com uma proporção percentual de 3,02%, é muito provável que este comportamento ocorra porque a potência elétrica determinada numericamente foi menor que a experimental.

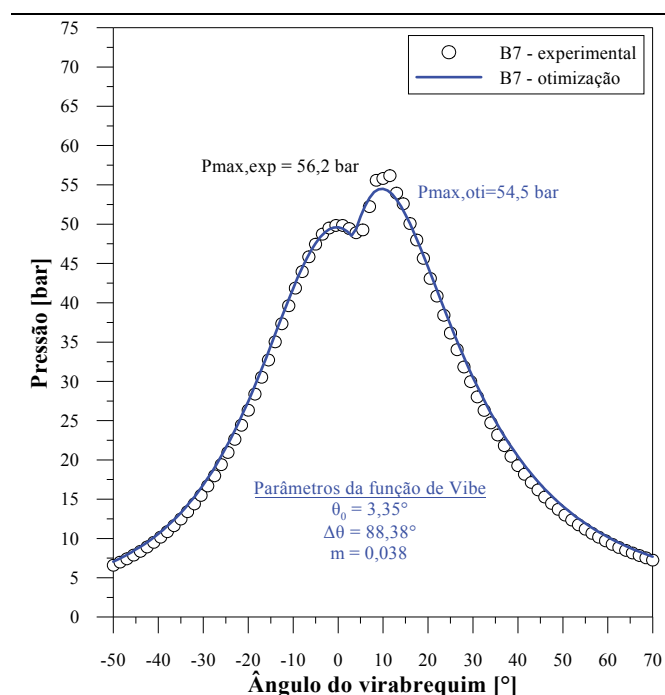


Figura 2. Pressão no interior do cilindro experimental e simulada

CONCLUSÃO

No estudo proposto foi analisada a capacidade da utilização do algoritmo genético para determinar os parâmetros desconhecidos da função de Vibe e consequentemente prever a pressão no interior do cilindro. Os resultados demonstraram que a técnica de otimização escolhida pode ser aplicável para a determinação dos parâmetros de combustão se a função objetivo foi corretamente definida.

Os resultados calculados por meio dos parâmetros de combustão determinados pela técnica de otimização tiveram boas aproximações dos resultados determinados experimentalmente, onde o resultado da pressão no interior do cilindro obtido pelo método de otimização apresentou como maior erro relativo encontrado nos picos máximos de pressão de 3,02%. Como a potência elétrica está diretamente relacionada com o imep (pressão média efetiva indicada), que por sua vez está relacionada com o trabalho realizado pelo pistão e este foi calculado em função da área embaixo da curva de pressão, isto implica que considerando os resultados numéricos a diminuição nos picos de pressão reflete na obtenção de baixas potências elétricas.

Analisando todos os resultados pode concluir-se que é possível prever o comportamento do motor em função da medição da potência elétrica e consumo específico de combustível corroborados com métodos de otimização para a determinação dos parâmetros desconhecidos da função de Vibe, da mesma forma que foi verificado por COLAÇO *et al.* (2010b).

REFERÊNCIAS

- AVL-BOOST. Theory version 2014.1. AVL LIST GmbH. Graz, Austria 2014a.
- _____. Users Guide version 2014.1. AVL LIST GmbH. Graz, Austria 2014b.
- CATON, J. A. An introduction to thermodynamic cycle simulations for internal combustion engines. John Wiley & Sons, Ltd., 2016.
- COLAÇO, M. J.; TEIXEIRA, C. V.; DUTRA, L. M. "Thermal analysis of a diesel engine operating with diesel-biodiesel blends". Fuel, v. 89, n. 12, p. 3742-3752, 2010a.
- _____. "Thermodynamic simulation and optimization of diesel engines operating with diesel and biodiesel blends using experimental data". Inverse Problems in Science and Engineering, v. 18, n. 6, p. 787-812, 2010b.
- FERRARI, G. Internal Combustion Engines. 2. Società Editrice Esculapio, 2014.
- GARCIA, V. R.; TASINAFPO, P. M. Algoritmos genéticos aplicados à modelagem ótima de problemas de planejamento e um estudo de caso. Anais do 14º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XIV ENCITA. São José dos Campos, SP, Brasil: Instituto Tecnológico de Aeronáutica 2008.
- GHOJEL, J. I. "Review of the development and applications of the Wiebe function: A tribute to the contribution of Ivan Wiebe to engine research". International Journal of Engine Research, v. 11, n. 4, p. 297-312, 2010.
- GUPTA, H. N. Fundamentals of Internal Combustion Engines. 2. PHI Learning, 2013.
- HEYWOOD, J. B. Internal combustion engine fundamentals. New York: McGraw-Hill, 1988. xxix, 930 p.
- ILIEV, S. "Simulation on single cylinder diesel engine and estimation of engine performance using AVL Boost software". XXII INTERNATIONAL SCIENTIFIC-TECHNICAL CONFERENCE, v. 156, n. 7, 2014.
- LEŠNIK, L.; ILJAŽ, J.; HRIBERNIK, A.; KEGL, B. "Numerical and experimental study of combustion, performance and emission characteristics of a heavy-duty DI diesel engine running on diesel, biodiesel and their blends". Energy Conversion and Management, v. 81, p. 534-546, 2014.
- MERKER, G. P.; SCHWARZ, C.; TEICHMANN, R. Combustion engines development: mixture formation, combustion, emissions and simulation. Berlin Heidelberg: Springer, 2012.
- MOLLENHAUER, K.; TSCHOEKE, H. Handbook of Diesel Engines. Berlin Heidelberg: Springer, 2010.
- NIKZADFAR, K.; SHAMEKHI, A. H. "Investigating the relative contribution of operational parameters on performance and emissions of a common-rail diesel engine using neural network". Fuel, v. 125, p. 116-128, 2014.
- RIMKUS, A.; ŽAGLINSKIS, J.; RAPALIS, P.; SKAČKAUSKAS, P. "Research on the combustion, energy and emission parameters of diesel fuel and a biomass-to-liquid (BTL) fuel blend in a compression-ignition engine". Energy Conversion and Management, v. 106, p. 1109-1117, 2015.
- VERMA, R.; LAKSHMINIARAYANAN, P. A. "A case study on the application of a genetic algorithm for optimization of engine parameters". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, v. 220, n. 4, p. 471-479, 2006.
- ZHU, Z.; ZHANG, F.; LI, C.; WU, T.; HAN, K.; LV, J.; LI, Y.; XIAO, X. "Genetic algorithm optimization applied to the fuel supply parameters of diesel engines working at plateau". Applied Energy, v. 157, p. 789-797, 2015.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.