

PREVISÃO DE COEFICIENTES DE WIEBE PARA UM MOTOR SI BASEADO EM VARIÁVEIS DE CONTROLE

Thomaz Ernesto de Sousa Savio^{1,2}, Luis Henrique Ferrari^{1,2} e Ezio Castejon Garcia¹

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA

²Ford Motor Company - Brasil

E-mails: tsavio@ford.com, lferra21@ford.com, ezio@ita.br

RESUMO

A proposta deste trabalho é prever os coeficientes de Wiebe para um motor de ignição por centelha de quatro cursos 1.6l com duplo comando de válvulas variável baseado em seis parâmetros de controle, trabalhando com E100. Os parâmetros de controle são: Rotação do motor, ponto de centelha, relação de equivalência (λ), carga do motor (representada pela eficiência volumétrica absoluta), ponto de abertura de válvula de admissão e ponto de abertura de válvula de exaustão. A partir de dados experimentais são obtidas regressões lineares para as frações queimadas ao longo do ângulo de manivela, e utilizando o método de mínimos quadrados, é possível encontrar uma combinação de duração de combustão, constante de Wiebe e expoente de Wiebe, garantindo mais fidelidade ao modelamento do fenômeno.

INTRODUÇÃO

Na realização de estudos envolvendo simulação de motores de combustão interna a pistão, geralmente aplicados em automóveis e caminhões, um dos limitantes é a confiabilidade quanto ao modelo de predição de liberação finita de calor. Para o caso de simulações de motores de carga homogênea e ignição por centelha, os softwares mais comuns utilizam uma curva de Wiebe para a modelagem e o usuário tem a opção de controlar os coeficientes da equação que rege tal curva, economizando tempo de processamento e ampliando a fidelidade do modelo, porém nem sempre estes coeficientes são conhecidos. Baseado em dados experimentais de um motor foi construído um software que, usando regressões lineares e interpolações, fornece ao engenheiro de motores os coeficientes necessários para calibrar uma curva de Wiebe de acordo com a condição de operação do motor.

1. CURVA DE WIEBE

A curva de Wiebe pode ser descrita por:

$$f = 1 - e^{\left[-a \left(\frac{\theta}{\Delta\theta} \right)^b \right]} \quad (1)$$

Onde (f) é a fração queimada de combustível, (θ) é o ângulo em graus de virabrequim a partir da centelha, $(\Delta\theta)$ é a duração da combustão, (a) é a constante de Wiebe e (b) o expoente de Wiebe.

A energia liberada em forma de calor durante a combustão é diretamente proporcional a fração de combustível queimada, quando esta é conhecida a evolução de pressão e temperatura dentro da câmara de combustão pode ser obtida com maior precisão, resultando em simulações com maior nível de confiabilidade.

2. PARÂMETROS DE CONTROLE

Analisando o funcionamento do motor, podemos definir como parâmetros de controle: Rotação, ponto de centelha, relação de equivalência, carga e pontos de abertura das válvulas de admissão e exaustão.

A rotação do motor rege os níveis de velocidade do escoamento de ar e combustível dentro da câmara de combustão, o que influi na troca de calor com as paredes, no grau de turbulência do gás e na mistura dos reagentes, desta forma a rotação é um parâmetro importante na análise da combustão.

O ponto de centelha define o início da combustão, influenciando assim no regime de pressões ao longo do decorrer do movimento do pistão, impactando assim no desenrolar da combustão.

A relação de equivalência (λ) define o grau de dissociação da reação de combustão, de modo que mais reações de dissociação tornam a combustão mais lenta, modificando assim os coeficientes da curva de Wiebe.

A carga, aqui representada pela eficiência volumétrica global, indica a massa de ar e, se combinada com a relação de equivalência, a massa de combustível admitida pelo motor, sendo que a massa de ar define a pressão obtida durante a compressão, influenciando então na evolução da combustão.

O ponto de abertura de válvula de admissão está diretamente ligado ao ponto de fechamento da válvula, dado que o sistema de comando de válvulas variável consegue apenas alterar o início e não a duração da abertura, e o ponto de fechamento da válvula de admissão definem o início da compressão e, indiretamente, o fator de compressão real do motor, logo, é influente no comportamento da combustão.

O ponto de abertura de válvula de exaustão, também ligado ao ponto de fechamento da válvula, apesar de ocorrer após a combustão influencia nesta porque altera a fração residual de gases queimados. Em motores que utilizam turbocompressor o efeito do ponto de válvula de exaustão é mais influente porque determina o “blow down”, sendo este o responsável por fornecer energia a turbina, de modo que este efeito acaba por modificar a massa e pressão de ar admitido.

A combinação destes seis parâmetros de controle define um regime de operação do motor.

3. TRATAMENTO DE DADOS

Os ângulos de frações queimadas de 5%, 10%, 50% e 90% foram medidos para regimes de operação de 1000 RPM a 6500 RPM, de IDLE a WOT, os outros parâmetros de controle foram ajustados conforme a calibração do motor, resultando em um banco de dados com cerca de 300 regimes ensaiados para E100.

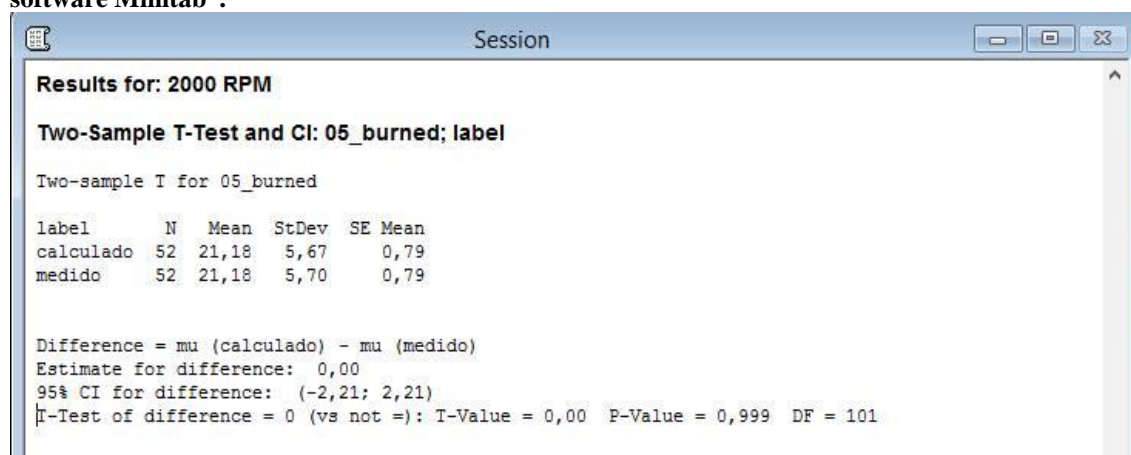
Usando o software Minitab®, para cada rotação analisada foram obtidas regressões lineares baseadas nos outros cinco parâmetros de controle para prever o ângulo de cada fração queimada analisada, resultando em quatro regressões lineares de entradas para cada rotação, sendo ao todo cinquenta e seis equações, todas com mais de 90% de representatividade.

Fazendo uma rotina em Matlab® foi possível concatenar todas as equações e então alimentá-las com as com os parâmetros de controle de cada regime de operação, de modo a confrontar os resultados obtidos pelas regressões lineares e os resultados obtidos experimentalmente.

Para testar a validade dos resultados foi usado o software Minitab®, que levou a conclusão que a população obtida pelas regressões lineares era igual à população de resultados obtidos experimentalmente, portanto as regressões lineares são válidas para a predição dos ângulos de manivela das frações queimadas.

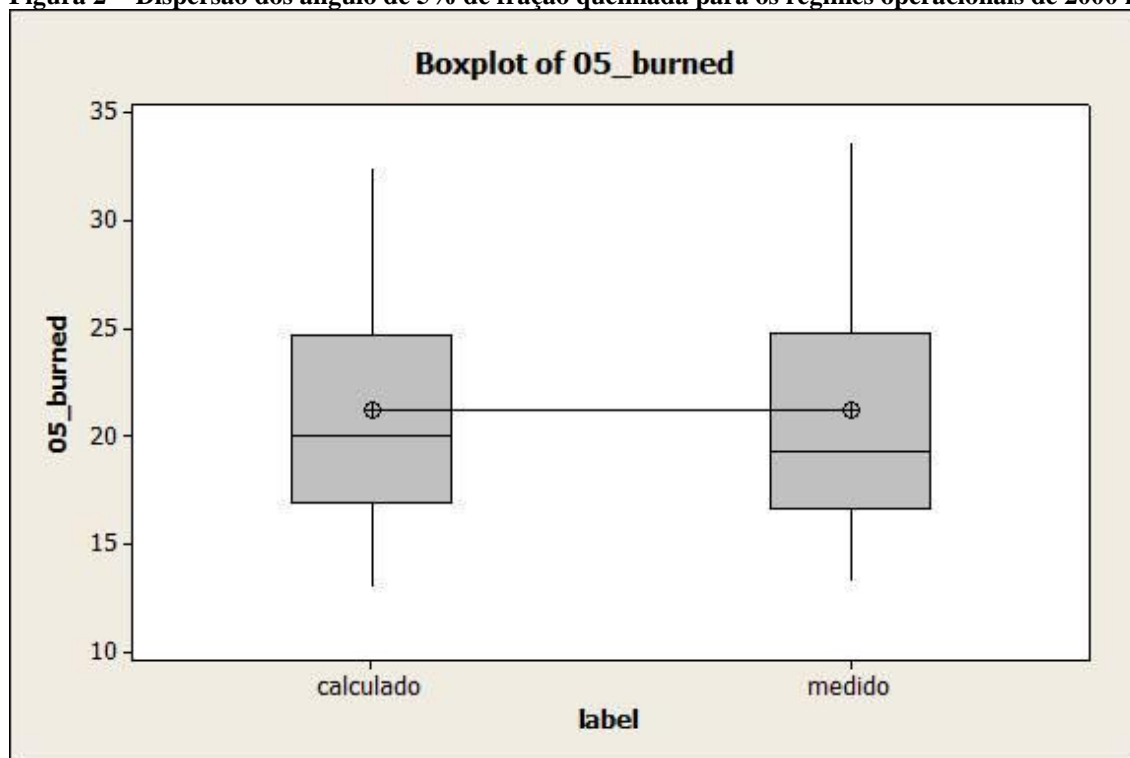
Na Figura 1, a análise estatística da população de regimes operacionais a 2000 rpm mostram que a média e o desvio padrão da amostra são similares, denotando assim uma confiabilidade elevada dos dados. Já na figura 2, é mostrada a distribuição dos dados, nota-se que a média para cada conjunto de dados é a mesma e o comportamento destes dados são muito similares. Este mesmo caso ocorre em todas as outras rotações.

Figura 1 – Análise do ângulo de fração queimada para os regimes de operação a 2000 rpm, utilizando o software Minitab®.



Fonte: Imagem do autor.

Figura 2 - Dispersão dos ângulo de 5% de fração queimada para os regimes operacionais de 2000 rpm.



Fonte: Imagem do autor.

4. OBTENÇÃO DOS COEFICIENTES DE WIEBE

As curvas de Wiebe são projetadas a partir da minimização da função de erro entre a equação (1) e os pontos experimentais da fração queimada, esta minimização é obtida através de um algoritmo de otimização Nelder-Mead (ou método de descida simples), o qual é um algoritmo estruturado para problemas numéricos onde as derivadas da função não podem ser conhecidas, como no caso dos pontos de dados experimentais obtidos para a obtenção das curvas Wiebe.

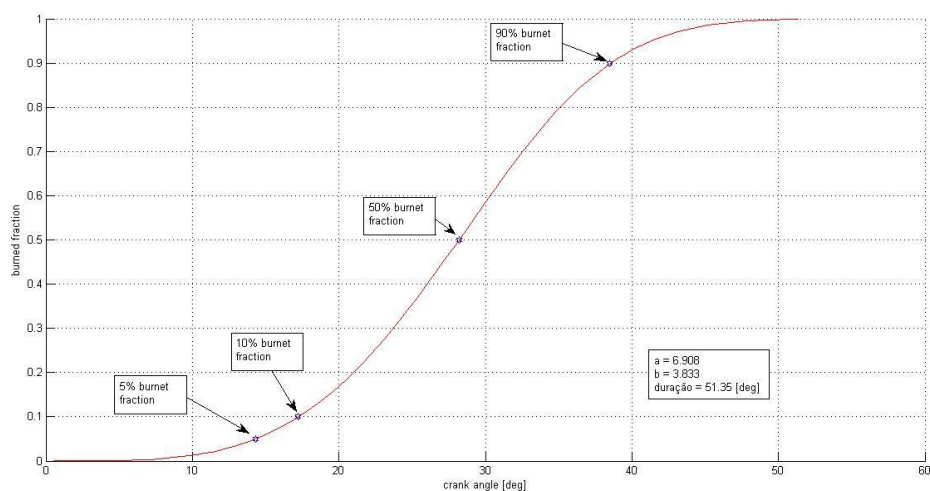
Depois de definir o processo de minimização da função erro entre os pontos de medição e a curva projetada de Wiebe, os coeficientes de Wiebe (a , b) são definidos para cada rotação.

CONCLUSÃO

Neste trabalho, os coeficientes de Wiebe foram previstos baseados em seis parâmetros de controle para o E100. As regressões lineares de primeira ordem se mostraram capazes de prever os ângulos de fração queimada com elevada confiabilidade.

O método de otimização se mostrou eficiente para prever as três incógnitas para a projeção da curva de Wiebe, na figura 3 pode-se observar os quatro pontos mostrando o ângulo das respectivas frações queimadas e a curva de Wiebe obtida através do método de otimização que retornou as variáveis a , b e $\Delta\theta$.

Figura 3 - Curva de Wiebe projetada, ângulos de fração queimada e obtenção dos coeficientes de Wiebe.



Fonte - Imagem do próprio autor.

REFERÊNCIAS

- [1] KULESHOV, Andrey; **Diesel RK website**. Disponível em <http://www.diesel-rk.bmstu.ru/Eng/> Acesso em: 12/05/2014.
- [2] HEYWOOD, John; **Internal Combustion Engine Fundamentals**, Massachusetts, EUA, 1988.
- [3] NELDER, John A.; R. Mead (1965). "A simplex method for function minimization". *Computer Journal* **7**: 308–313.