UMA METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA A DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE COMBUSTÃO EM MOTORES ALTERNATIVOS

Pedro Barbosa Mello e-mail <u>mello@mecanica.ufrgs.br</u> Giovani Souza de Andrade , e-mail <u>govanirs@terra.com.br</u> Universidade Federal do Rio Grande do Sul Programa de `´os-Graduação em Engenharia Mecânica Rua Sarmento Leite, 425,, 90050-170, Porto Alegre, RS, Brasil

Abstract. Neste trabalho se desenvolve e se avalia uma metodologia alternativa para determinar a duração de combustão de alguns combustíveis líquidos derivados do petróleo e etanol. Em cada bateria de testes, utilizou-se um combustível de composição química conhecida para seis relações de ar-combustível e quatro relações de compressão, sendo eles: o Etanol, o Metanol, o Metil Terc Butil Éter (MTBE) e compostos aromáticos como Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos. Determinou-se o tempo de combustão dos combustíveis, em um motor ádr]ap AST,-CFR, em função da variação da relação de compressão e razão de mistura ar-combustível Os resultados obtidos mostram a validade desta metodologia para determinar-se a velocidade de combustão em motores de ignição or centelha

Palavras chave: Combustíveis, combustão, ASTM-CFR, velocidade de queima

1. INTRODUÇÃO

A propagação da chama é um importante processo em motores à combustão interna, pois este determina o tempo para que ocorra a transferência da energia química do combustível em energia mecânica no cilindro. Ela está diretamente relacionada à velocidade de chama do combustível, determinando a duração da combustão, pois, conforme o tipo de combustível juntamente com parâmetros geométricos e operacionais do motor como: relação de compressão, condição de mistura, tipo de câmara de combustão, turbulência, entre outros comentados no decorrer do trabalho, ocorre uma variação no tempo de combustão. Se a duração da combustão for pequena, ou seja, uma velocidade de chama alta, mais eficiente pode se tornar a operação do motor.

A velocidade de queima dos combustíveis em motores a combustão é um parâmetro importante para otimizar o mapa de ignição, como nos motores que utilizam a tecnologia Flex Fuel, que podem utilizar diferentes combustíveis no mesmo motor, como a gasolina, o álcool ou o gnv. Este parâmetro também é de extrema importância nos motores de performance que trabalham em regimes de rotação elevado, acima de 15 000 rpm, tendo um tempo pequeno para que ocorra a combustão, e que necessitam também otimizar a eficiência do motor.

Este trabalho tem por objetivo, desenvolver uma metodologia experimental simples utilizando poucos equipamentos limitados recursos financeiros para a determinação do tempo de queima de diferentes combustíveis em um motor padrão, normalmente usado para ensaio de combustível, denominado ASTM CFR. O tempo de combustão é determinado com base nos dados de pressão no cilindro, obtida através de um sensor que informa a velocidade de variação da pressão (taxa) e um sistema que registra o momento do início da centelha.

Os combustíveis utilizados nos testes foram: Etanol, MTBE, Tolueno, Xilenos, Metanol, Penteno e Etilbenzeno.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para a realização dos ensaios dos combustíveis, foi utilizado um motor padrão ASTM-CFR, pur se tratar de um equipamento simples e de fácil operação,. O motor tem taxa de compressão variável e portanto, favorecendo a garantia da repetibilidade dos ensaios, pois tem câmara de combustão plana e também apresenta os parâmetros de funcionamento constantes, permitindo que, em um experimento, seja alterada apenas a variável de interesse. O sistema de ignição e de admissão de combustível foi modificado, usando-se um módulo de injeção eletrônica . A ECU é alimentada por sinais de entrada de um conjunto de sensores distribuídos no motor o qual gerencia os atuadores: a bomba de combustível, as bobinas de ignição, o atuador de marcha lenta e os atomizadores de combustível. A variação de pressão dentro da câmara de combustão é medida através do sensor de pressão tipo D-1, componente padrão do CFR, normalizados pela ASTM ..O sinal de saída de tensão resultante é proporcional à relação de mudança da pressão da câmara de combustão, ou seja, o sensor não mede diretamente a pressão no cilindro, mas a velocidade de variação (taxa) da pressão na câmara de combustão.

O sistema de aquisição de dados compõe-se de três computadores com processador AMD K6-2 de 100 Mh e 64 Mb de memória RAM para realização deste trabalho. Em todos eles foi utilizado o sistema operacional Windows 98SE. Um dos computadores foi usado para controlar a injeção de combustível programável, Electromotive II, que permite monitorar e tempo real os parâmetros de funcionamento do motor e transferir os dados de mapeamento para o módulo de injeção.Em outro computador, foram registrados os sinais dos sensores, utilizando-se uma placa de aquisição

equipada com um conversor analógico/digital de dados da Computer Boards, modelo CIO DAS 16/330: 16 canais com 12 bits de resolução, tensões de entrada variáveis e velocidade máxima de conversão de 300 kHz (300 000 amostras por segundo) divididos pelos canais utilizados. O programa utilizado para a aquisição dos dados foi o SAD32, desenvolvido pelo LMM - Laboratório de Medições Mecânicas da UFRGS, que permite gerenciar o funcionamento da placa e exportar os dados em arquivos de extensão (DAT). Este programa, apesar de não ser o mais atualizado, apresentou uma excelente repetitividade na taxa de aquisição dos dados. A taxa de amostragem utilizada foi de 55 kHz para cada canal, registrando os sinais dos sensores de ignição, do sensor de variação da pressão na câmara de combustão e posição do eixo de manivelas. No terceiro computador, foi instalado o hardware para aquisição das temperaturas Pico Technology TC 08 pela entrada serial do computador e seu programa de controle e aquisição. A verificação da relação arcombustível foi realizada através do equipamento denominado PLM MOTEC - "Professional Lambda Meter", que faz a leitura de um sensor de oxigênio colocado no sistema de escapamento do motor. O sensor de oxigênio utilizado neste dispositivo é o Bosch LSU /NTK UEGO (banda larga) com certeza de medição de $\pm 1,5\%$ para 0% a 20% de O₂ nos gases de escapamento. O parâmetro lambda não deverá variar mais do que $\pm 0,01$ durante os testes. Esse sistema ainda possui uma saída analógica que permite registro do sinal pelo sistema de aquisição de dados.

A determinação angular do eixo de manivelas constituído de uma roda dentada ou de uma roda fônica de aço carbono, com 600 mm de diâmetro e 304 dentes retos, e de um sensor de relutância magnética (figura 2.1). O sensor foi fixado em um suporte localizado próximo à parte traseira da árvore de manivelas. O sensor é protegido das perturbações eletromagnéticas por um revestimento com malha de aço. Um segundo revestimento em p.v.c. o protege das altas temperaturas.

A tensão de pico a pico produzida por esse sensor varia desde poucos volts em baixa rotação até algumas dezenas de volts em alta rotação. É extremamente importante que a distância entre o núcleo do sensor e a extremidade do dente seja de 0,4 a 1,0 mm e que a roda esteja bem centrada para evitar a formação de freqüência portadora, dificultando tratamento de dados posterior.

O sinal do sistema fornece uma onda senoidal, sendo que cada período desta onda equivale ao espaçamento dos dentes, que equivale a um deslocamento angular de 1,18º da árvore de manivelas. Este sinal é adquirido através de um conversor analógico-digital e gravado no microcomputador. Analisando os dados, determinamos os pontos de máximo do sinal (figura 2.2). O tempo entre dois pontos de máximo refere-se ao deslocamento de 2,36 graus da árvore de manivelas a cada 2,36 graus.



Figura 2.1 – Roda dentada em vermelho e o sensor magnético utilizado com encoder.

Na roda fônica, existe uma região onde o espaçamento entre os dentes é maior. Este espaçamento está sincronizado fisicamente com o PMS do motor.

O sinal gerado pelo sensor é uma onda senoidal com a freqüência de acordo com a rotação do motor e apresenta um pico que cruza o nível de tensão zero, determinando, neste instante, o PMS do motor, conforme a figura 2.2.



Figura 2.2.- Sinal característico do sensor magnético - posição PMS.

No lugar do sensor de pressão, que fica em cima do êmbolo, se introduz um relógio comparador para determinar com precisão o PMS do motor. Com isso, se posiciona a região da roda dentada com espaçamento maior entre os dentes exatamente abaixo do sensor, determinando-se, assim, o PMS.

Utilizando o motor CFR como compressor, ou seja, sem combustão, o pico de pressão deve ocorrer exatamente no PMS. Com o auxílio de um osciloscópio digital, modelo TDS 220 da Tektronics, adquirimos o sinal do sensor de PMS em um canal do osciloscópio, e o sinal do sensor de pressão em outro. Tendo como referência o ponto em que os dois sinais passam por zero (retirando qualquer nível de tensão contínua dos sinais), calculando a diferença na base de tempo, encontramos a incerteza do PMS de 10 µs. Os sinais adquiridos permitem determinar a posição do PMS com boa exatidão, o número de rotações do motor e também o avanço real da ignição.

O sistema de ignição é gerenciado pelo módulo da injeção ECU, que controla o chaveamento do primário da bobina de ignição com base no sinal de uma roda fônica de 36-2 dentes sincronizado com o PMS do motor.



Figura 2.3 – Tensão e corrente no primário da bobina de ignição.

A estratégia utilizada pela ECU para determinar o mapa de avanço de ignição é fazer o chaveamento do negativo (primário) da bobina de ignição, sendo que o positivo (primário) permanece sempre alimentado com 12 V.

Não há nenhuma corrente no primário até o período do chaveamento, quando a bobina é ligada à massa (negativo), e a tensão vai a zero. Este tempo de chaveamento, denominado ângulo de permanência ('dwell'), é controlado pelo circuito de potência do módulo.

Quando o limite da corrente é alcançado em torno de 10 ampéres, o negativo é removido. Este é o momento que inicia a centelha, o qual corresponde ao pico de 200 volts. Esta é a tensão induzida indicada pela linha azul na figura 2.3. A tensão gerada no secundário é proporcional à tensão induzida no primário. A duração da centelha é em torno de 1 ms no sistema de ignição utilizado nos testes.

A determinação do momento (tempo) de início da centelha foi implementada no Matlab 7, através de uma rotina na matriz de dados, na qual se determinou todos os pontos (tempo, amplitude) de ocorrência do início da centelha, conforme mostra a figura 2.4. Para cada arquivo de teste, devido ao tipo de ignição que apresenta centelha perdida, isto é, para cada subida do pistão ocorre uma centelha, tem-se em torno de 200 centelhas para 100 ciclos de potência. A rotina elaborada fornece um arquivo de saída (*.txt) com todos os tempos em que ocorreram as centelhas, referente somente ao ciclo de potência (combustão).



Figura2.4 - Determinação do tempo onde iníciou a centelha em cada ciclo, 15º APMS.

A outra rotina implementada visou à determinação do momento em que ocorreu o pico máximo de pressão na matriz de dados, uma vez que o sinal adquirido é a taxa da pressão no cilindro, que corresponde à derivada da pressão no cilindro. Com isso, o momento do pico de pressão máximo é aquele em que o sinal passa pelo zero (figura 2.5). A rotina determina todos estes pontos e fornece um arquivo de saída formado por aproximadamente 100 pontos, que correspondem aos 100 ciclos completo do motor, decorrente do tempo de aquisição.



Figura 2.5 - Determinação do tempo em que ocorreu o pico máximo de pressão em cada ciclo.

Com estes dois momentos definidos, conforme mostra a figura 2.6 abaixo, pode-se determinar a duração da combustão e comparar os combustíveis utilizados no motor, variando a relação de compressão e a relação de arcombustível.



Figura2.6 – Determinação da duração da combustão ou tempo de combustão usando Matlab 7

Assim, foram definidas as relações de compressão de 8:1, 9:1, 10:1, 11:1. Estas relações abrangem a faixa típica de operação dos motores comerciais. No experimento, foi realizada a variação da relação ar-combustível (lambda) para cada relação de compressão, sendo 0,7, 0,8, 0,9, 1,0 (mistura estequiométrica), 1.1 e 1.2, correspondentes às faixas de funcionabilidade dos motores à combustão convencionais. Em todos os testes, a rotação do motor foi de 885 ± 5 rpm, e o avanço de ignição (momento em que inicia a centelha) foi de 15 ± 1 graus antes do PMS.

Neste trabalho, a duração da combustão é definida como o intervalo entre a ignição e o pico de pressão no interior da câmara de combustão, adotando-se duas hipóteses: o início da combustão corresponde ao início da centelha; o pico máximo de pressão é o final da combustão. Entretanto, convém esclarecer que o início da centelha não corresponde exatamente ao início da combustão, e o momento do pico de pressão máximo no cilindro não corresponde ao tempo final da combustão propriamente dito. Como o trabalho é comparativo, utilizou-se estas hipóteses em todos os testes.

A velocidade de queima está relacionada ao inverso do tempo da combustão do combustível, sendo um parâmetro comparativo para as diferentes condições de testes realizados. O valor do "tempo de combustão" para cada combustível numa determinada condição foi a média de aproximadamente 100 ciclos consecutivos, após a completa estabilização das condições operacionais.

Controlando todas as condições operacionais, buscando diminuir as variações para o mesmo teste, obtém-se uma certa repetitividade dos ciclos de combustão, o que possibilita a comparação dos resultados obtidos.

Para cada combustível, após a coleta dos dados de todas as relações de ar-combustível e das relações de compressão, retornava-se a primeira condição do teste e repetia-se todo o procedimento mais duas vezes, obtendo-se três ensaios em cada condição. O valor final do tempo de queima é a média das médias.

3. RESULTADOS

Nas figuras a seguir, são apresentados dados comparativo dos resultados do tempo de combustão entre os diferentes combustíveis para diferentes taxas de compressão.

Observa-se, na figura 5.22, que o Etanol apresenta o menor tempo de combustão, ou seja, a velocidade de chama é superior à do Metanol e do MTBE.

Apesar do Etanol apresentar um atraso maior na ignição, devido a uma necessidade de maior energia de ativação para o inicio da combustão, na fase de desenvolvimento e de propagação da chama, ocorre uma grande formação de radicais instáveis reativos, acarretando uma velocidade de queima maior [Nick Marinov,1997].

Observa-se também, na figura 3.1, que o tempo de combustão apresenta maior sensibilidade para misturas pobres ocorrendo um aumento considerável deste tempo, devido à falta de oxigênio para a ocorrência das reações de oxidação.

Uma questão a ser discutida com base nos resultados dos combustíveis oxigenados é que, nos motores com a tecnologia Flex Fuel, utilizando combustíveis oxigenados, a ECU apresenta um mapa de avanço de ignição mais adiantado em relação à gasolina para compensar a potência devido à baixa relação de compressão. Mas, também devese avaliar se ocorre uma otimização para as emissões de poluentes e consumo de combustíveis nesta condição, já que os oxigenados apresentam maiores velocidades de queima necessitando de menor avanço de ignição para mesma relação de compressão, ficando como sugestão para trabalhos futuros esta análise.



Figura 3.1 – Comparativo do tempo de combustão para todos os combustíveis oxigenados na RC 8:1.

Na figura 3.2, estão os resultados do tempo de combustão de todos os hidrocarbonetos aromáticos e do Penteno (corte C_5) para a RC 8:1. Observa-se que os Xilenos apresenta maior duração de combustão, pois os 'Xilenos' apresentam dois radical metil ligados ao anel aromático presentes na sua estrutura química da molécula, diminuindo sua velocidade de combustão [Farrel el al.,2004].



Figura 3.2 - Comparativo do tempo de combustão para todos os combustíveis aromáticos e o Penteno na RC 8:1.

Na figura 3.3, temos a duração de combustão para os oxigenados, na figura 5.25, temos esta mesma duração para os aromáticos e para o Penteno (corte C5). Para os oxigenados, ocorreu o mesmo comportamento da RC 8:1 na RC 9:1.



Figura 3.3 - Comparativo do tempo de combustão para os combustíveis oxigenados na RC 9:1.

Na figura 3.4, a tendência dos aromáticos se repetiu para as RC anteriores. O tolueno apresenta uma baixa velocidade de combustão, que é, atribuída a sua cinética química, pois, na combustão, ocorre a formação de radicais benzil muito estáveis. A alta estabilidade destes radicais reduzem a reatividade, ocasionando um oxidação mais lenta do combustível [Farrel el al.,2004].



Figura 3.4 - Comparativo do tempo de combustão para todos os combustíveis aromáticos e o Penteno na RC 9:1.

As figuras 3.5 e 3.6 mostram a ocorrência de uma diminuição no tempo de combustão para todos os combustíveis, resultados semelhantes ao dos testes anteriores com os demais combustíveis. Finalmente as figuras 3.7 e 3.8 mostram os demais dados dos testes realizados.



Figura3.5- Comparativo do tempo de combustão para os combustíveis oxigenados na RC 10:1.



Figura 3.6 - Comparativo do tempo de combustão para todos os combustíveis aromáticos na RC 10:1.



Figura 3.7 - Comparativo do tempo de combustão para os combustíveis oxigenados na RC 11:1.



Figura3.8 - Comparativo do tempo de combustão para todos os combustíveis aromáticos na RC 11:1.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado um método alternativo para determinar-se o tempo de combustão para varios combustíveis, pó r meio de um motor padrão ASTM CFR, com resultados plenamente satisfatórios considerando os métodos tradicionais utilizados para obte-se a velocidade de queima de comb ustíveis para mutureres de combustão interna.

O Etanol apresentou o menor tempo de combustão, ou seja, a máxima velocidade de propagação de chama, em relação a todos os outros combustíveis para todas as RC na condição de mistura de ($\lambda = 0.9$).

Pode-se observarf que o tempo de combustão do Etanol com o menor tempo de combustão dos outros combustíveis para cada RC, tendo como base para a relação somente os valores médios dos tempos de combustão. O Etanol apresentou menor a duração de combustão de 7,1% em relação ao Metanol para RC 8:1, e 23% menor para o Xilenos na RC de 11:1.

Pode-se observar também que o aumento da RC de compressão para o Etanol é mais significativo para diminuição do tempo de combustão em relação aos outros combustíveis.

5. REFERENCIAS

ASTM, "ASTM Manual for Rating Motor Fuels by Motor and Research Methods American Society for Testing and Materials", Standard Test Method, 5^a edição, 1964.

Anders Tunestal. "The use cylinder pressure estimation air fuel ratio of an internal combustion engine", CIVIN (Lund University, Sweden), 1993.

Arsie, I.; Pianese, C. et al. "An adaptive estimator of fuel dynamics in the intake port of a spark ignition engine". **Control Engineering Practice**, Itália, n.11, 303-309, 2003.

C. K. Westbrook, "Chemical Kinetcs of hidrocarbon Ignition in Pratical Combustion Systems", **28 th International Symbosium on Combustion**, Edinburg, Scotland, July 30-august 4, 2000.

Chiu, C. P.; Lin, M. H. and Wu H. W. "Effects of Blending Stocks MTBE on combustion Characterísticas in SI Engine", Department of Mechanical Engineering, National Cheng Kung University, Taiwan, 1980.

Chao F. Daniels, Guoming G. Zhu and James Winkelman, "Inaudible Knock and Burn Detection Using In Cylinder Ionization Signal", Visteon Corporation, SAE 013149, 2003

Derek Bradley, R. A. Head, "Engine autoignition: The relationship between octane numbers and autoignition delay times", **Combustion and Flame**, 2006.

Dailey, J., "Laser Fluorescence" in Laser Methods in Combustion", (D. Crosley, ed.) American Chemical Society, Washington, DC,1982.