

TÉCNICAS DE ESTIMAÇÃO DA RELAÇÃO AR-COMBUSTÍVEL ATRAVÉS DA PRESSÃO NO CILINDRO

Fabiano Tadeu Mathias Costa

Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, fabianoc@sc.usp.br

Luís Carlos Passarini

Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo

Resumo: A crescente demanda de diminuição das emissões e redução do consumo dos motores de combustão interna exige a melhoria dos métodos para diagnose, em tempo real, e para melhor controle do processo de combustão. Portanto, é desejável determinar a relação ar-combustível sobre uma extensa faixa de condições de operação para obter um melhor controle transiente do motor. Este artigo descreve cinco técnicas de estimação da relação ar-combustível baseadas na medida da pressão no cilindro. Estas técnicas são aplicadas sob dados experimentais em uma extensa faixa de condições de operação em regime permanente e alguns transientes do motor com níveis satisfatórios de precisão.

Palavras-chave: estimação da relação ar-combustível, pressão no cilindro, controle de motores.

1. INTRODUÇÃO

Desde a sua criação os motores de combustão interna ciclo Otto foram submetidos a extensos estudos devido ao seu importante papel no desenvolvimento da indústria automobilística. Um dos principais enfoques destes estudos é a utilização da pressão no cilindro para controle, diagnóstico e monitoramento dos motores de combustão interna. Por volta de 1930 a pressão no cilindro já era utilizada para análise da combustão em regime permanente, algumas propostas de projeto e ocasionalmente para auxiliar os pesquisadores a encontrar o melhor avanço da centelha, para uma determinada condição de operação do motor. Entretanto, nesta época os sensores de pressão existentes não permitiam o traço completo da pressão no cilindro o que limitou a sua utilização por vários anos.

Nas últimas décadas os estudos sobre os motores de combustão interna foram intensificados devido ao seu enorme papel na produção de gases poluentes para a atmosfera. Em 1940, na cidade de Los Angeles, foi detectado pela primeira vez o problema da poluição do ar devido ao trânsito de veículos motorizados. Haagen-Smit (1952) mostrou que os gases poluentes da atmosfera, na cidade de Los Angeles, eram o resultado de reações fotoquímicas entre óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos sendo que, posteriormente, foi comprovado que estes gases eram provenientes de motores de combustão interna.

Diante destas informações o estado da Califórnia introduziu em 1959 a primeira legislação para regulamentação de padrões de emissão de gases poluentes produzidos por motores automotivos (Krier, 1977). Esta iniciativa foi seguida pelo governo federal dos Estados Unidos e depois pelo Japão, Europa e demais países do mundo. No Brasil as primeiras leis neste sentido foram introduzidas em 1986 pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA que instituiu o PROCONVE (Programa de Controle de Poluição do Ar, 1988) com o intuito de reduzir os níveis de emissões de gases poluentes

por veículos automotores e de incentivar o avanço tecnológico brasileiro na área de engenharia automotiva, métodos, ensaios e medições de poluentes.

Na década de 60 surgiram os primeiros sensores eletrônicos de pressão que permitiram o traço completo da pressão no cilindro, o que possibilitou ampliar infinitamente o seu emprego na pesquisa dos motores de combustão interna, principalmente, no controle transiente do motor, o qual não podia ser avaliado até este momento devido às limitações técnicas dos antigos sensores. Entretanto, o seu alto custo limitou a sua utilização as pesquisas acadêmicas.

Desde a iniciativa do estado da Califórnia foram instituídos padrões cada vez mais rígidos com o intuito de reduzir drasticamente as emissões de poluentes dos veículos motorizados, o que, obrigou a indústria automobilística a adotar novas tecnologias para controlar os índices de poluição dos automóveis. A primeira inovação foi à introdução, em 1975, do conversor catalítico bivalente (conversor catalítico por oxidação), para redução das emissões de hidrocarbonetos e monóxido de carbono. Em 1976, foi adotado o primeiro conversor catalítico trivalente (conversor catalítico de oxidação/redução), que é capaz de reduzir a emissão dos três gases poluentes controlados: hidrocarbonetos, monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio.

Entretanto, os catalisadores apresentam eficiência máxima somente com a relação ar-combustível dentro de uma faixa bem estreita ao redor da mistura estequiométrica (quantidade de oxigênio teoricamente suficiente para oxidar toda a massa de combustível) o que obrigou a indústria automobilística a substituir o carburador pelos sistemas de gerenciamento eletrônico de motores e a adoção do sensor de oxigênio (também conhecido como sonda lambda) com o intuito de obter um controle rigoroso da relação ar-combustível e se adequar às legislações vigentes. A partir deste momento o controle da relação ar-combustível passou a ser o principal foco de estudos para o controle dos níveis de emissão de poluentes.

Diante desta nova realidade a pressão no cilindro passou a ser uma importante alternativa para o controle dos motores de combustão interna uma vez que, é uma variável fundamental da combustão e pode ser usada para caracterizar o processo de combustão tanto em condições de operação em regime permanente quanto em condições transientes.

Diversas propostas de utilização da pressão no cilindro foram apresentadas para controle e monitoramento dos motores. Sellnau et al. (2000) apresentou resultados da utilização da pressão no cilindro para controle do momento da centelha, recirculação de gases de exaustão, detecção de falhas e detonação, controle da relação ar-combustível cilindro a cilindro e na fase de aquecimento do motor e, concluiu que o controle do motor baseado na pressão no cilindro é capaz de se adaptar a fatores ambientais, variações dos componentes manufaturados e desgastes de componentes reduzindo efetivamente as emissões de exaustão. Além disso, demonstrou a possibilidade de utilização de sensores de pressão de baixo custo montados nas velas de ignição.

A estimativa do torque, também, foi possível com a utilização da pressão no cilindro (Haskara et al., 2001) assim como o controle da relação ar-combustível, em condições de misturas muito pobres (excesso de partes de ar em relação à quantidade de combustível), no limite da estabilidade dos motores (Hata et al., 1989).

Entretanto, para realizar o controle da relação ar-combustível através do sinal da pressão de combustão, em tempo real, é necessário utilizar técnicas de estimativa da relação ar-combustível. Estas técnicas serão apresentadas e discutidas a seguir.

2. CONTROLE DA RELAÇÃO AR-COMBUSTÍVEL

A estimativa da relação ar-combustível dentro de cada cilindro é de fundamental importância para obter um melhor controle transiente do motor, reduzir as emissões e melhorar a eficiência da combustão e, consequentemente, reduzir o consumo de combustível.

O sinal de pressão no cilindro fornece informações sobre a relação ar-combustível, permitindo sua estimativa para cada cilindro, tanto para misturas estequiométricas quanto para misturas pobres, sem qualquer restrição quanto às condições de funcionamento do motor.

Entretanto, o traço da pressão no cilindro contém informações sobre outras variáveis do motor como, por exemplo, avanço da centelha, rotação e carga que precisam ser separadas para se obter a relação ar-combustível, isto pode ser feito através dos métodos apresentados a seguir: taxa de pressão, momentos, pesos moleculares, observadores e duração da combustão.

2.1. Taxa de Pressão

Este método foi desenvolvido por Matekunas (1986) e consiste basicamente da taxa de energia adicionada pela combustão do combustível, obtida através de duas medidas de pressão em ângulos idênticos do virabrequim sendo que, uma é obtida antes do ponto morto superior (PMS) e a outra depois, quando a combustão foi completada.

Posteriormente, Gasseneit et al. (1989) verificou o comportamento deste método quanto às variações na estimativa da taxa equivalente $\bar{\phi}$ (relação entre a mistura estequiométrica e a mistura de ar-combustível empregada) ciclo a ciclo e, observou que melhores resultados eram obtidos coletando um maior número de medidas de pressão entre 60 graus antes do PMS e 120 graus depois do PMS, dentro dos tempos de compressão e expansão do ciclo motor, respectivamente.

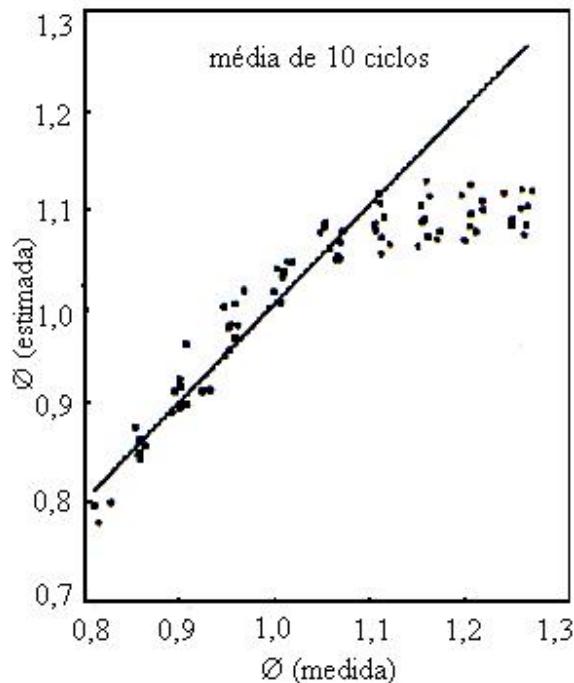


Figura 1. Estimativa média de $\bar{\phi}$ versus a medida de $\bar{\phi}$ em regime permanente

Com estes dados de pressão foi possível encontrar a taxa de pressão (P_r) e estimar $\bar{\phi}$, levando em consideração os efeitos das medidas de pressão efetiva do coletor de admissão (P_{man}) e rotação do motor (N) e, obtendo os coeficientes a_n da aproximação linear descrita na Equação (1).

$$\phi = a_1 N + a_2 P_{man} + a_3 P_r + a_5 \quad (1)$$

Os resultados obtidos com este método, apresentados na Figura (1), foram analisados por Powell (1993), que foi o responsável pela orientação dos trabalhos de Gassensfeit et al. (1989), Gilkey et al. (1985) e Patrick et al. (1990) na Universidade de Stanford nos Estados Unidos. Esta análise mostrou que a estimativa para $0,8 < \bar{\theta} < 1,1$ utilizando o método da taxa de pressão, apresentou um erro de precisão de 2,4 por cento, utilizando uma média de 10 ciclos para diversas condições de operação do motor. Já o erro apresentado ciclo a ciclo aumentou para 3,3 por cento, utilizando uma amostragem de pressão a cada 2 graus de giro do virabrequim, e para 4 por cento, utilizando uma amostragem de pressão a cada 16 graus de giro do virabrequim. Estes resultados mostraram que é possível melhorar significativamente o desempenho da estimativa de $\bar{\theta}$ aumentando o número de amostras da pressão no cilindro, apesar disto aumentar consideravelmente a computação requerida para realização da estimativa. Também, foi possível apontar a variação da temperatura da carga como principal fonte de erros para este método.

Este método também foi utilizado por Leonhardt et al. (1999), com algumas modificações, para o desenvolvimento de um sistema de supervisão do motor utilizando a teoria de redes neural, o que resultou em uma melhora significativa da supervisão de motores, maior desempenho e economia de combustível, melhor dirigibilidade e menor custo de calibração do motor.

2.2. Momento

Este método foi desenvolvido por Gilkey et al. (1985) e estudado, posteriormente, por Arsie et al. (1998) em condições transientes de operação do motor. Este método é baseado no uso de momentos centrados, apresentados por Mood et al. (1974), para descrever o histórico da pressão no cilindro, devido à correlação linear da relação ar-combustível e os momentos de segunda (M_2) e terceira ordem (M_3). Um pequeno número de momentos é capaz de capturar a forma do histórico da pressão no cilindro. A Equação (2) mostra o momento central de ordem n onde, $\bar{\theta}$ é o centróide da distribuição de pressão $P(\theta)$ avaliado dentro da janela angular compreendida entre θ_0 , ângulo de posição do virabrequim no momento da centelha, e θ_f , posição do virabrequim 128 graus após o momento da centelha.

$$M_n = \int_{\theta_0}^{\theta_f} \left(\theta - \bar{\theta} \right)^n P(\theta) d\theta \quad (2)$$

A rotação do motor (N) e a pressão efetiva do coletor de admissão (P_{man}) são os fatores que influenciam na estimativa de $\bar{\theta}$. A P_{man} e o desvio sistemático do valor medido pelo sensor de pressão são calculados através de uma porção do histórico de pressão, obtida depois do fechamento das válvulas de admissão e antes do momento da centelha, utilizando uma aproximação resultante da aplicação do método dos mínimos quadrados. Desta forma, é possível encontrar o valor dos parâmetros a_n , utilizando novamente o método dos mínimos quadrados, e obter o valor de $\bar{\theta}$ estimado como mostra a Equação (3).

$$\phi = a_1 N + a_2 P_{man} + a_3 M_2 + a_4 M_3 + a_5 \quad (3)$$

Os dados experimentais foram coletados, tanto por Gilkey et al. (1985) como por Arsie et al. (1998), variando os valores de rotação do motor, abertura da borboleta, e valores de $\bar{\theta}$ compondo assim um conjunto de condições de operação do motor. Os resultados obtidos por Gilkey et al. (1985) são apresentados na Figura (2) onde se pode notar que ocorre um desvio na estimativa de $\bar{\theta}$ para valores maiores do que 1,1. Isto ocorre devido a um maior peso atribuído, na estimativa dos parâmetros, as

misturas pobres, pois se trata do maior interesse das pesquisas atuais para se alcançar à redução de emissões e consumo de combustível.

Os resultados apresentados por Gilkey et al. (1985) também foram analisados por Powell (1993), o qual verificou que a estimativa para $0,8 < \bar{\theta} < 1,1$ apresenta o mesmo erro do método da taxa de pressão, assim como a variação da temperatura da carga, também, é a principal fonte de erros para este método. Já o erro da estimativa ciclo a ciclo do método dos momentos é 20 por cento menor do que o da taxa de pressão, entretanto, a computação requerida pelo método dos momentos é 10 vezes maior do que a requerida pelo método da taxa de pressão. Este método, também, pode ter seus resultados significativamente melhorados aumentando o número de amostras da pressão por giro do virabrequim, apesar disto comprometer o tempo de computação da estimativa de $\bar{\theta}$.

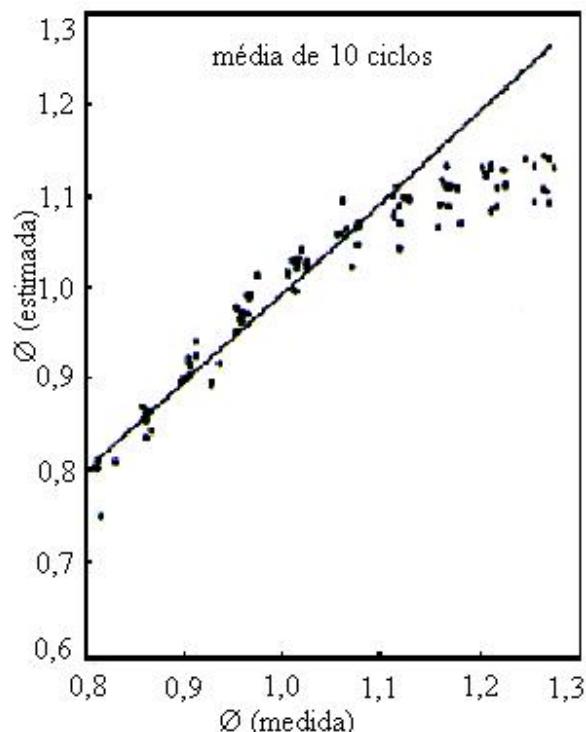


Figura 2. Estimativa média de $\bar{\theta}$ versus a medida de $\bar{\theta}$ em regime permanente

2.3. Peso Molecular

Patrick et al. (1990) desenvolveu o método do peso molecular, também conhecido como “*G-ratio*”, motivado, principalmente, pelos erros que os dois métodos descritos acima apresentaram devido às variações na temperatura da carga. Estas variações não são tão percebidas com o motor aquecido, mas no período de aquecimento do motor provocam erros consideráveis nos métodos anteriores.

Este método consiste na medição da pressão no cilindro (P_1, P_2) e da temperatura nos coletores de admissão (T_1) e escape (T_2) antes e depois da combustão em ângulos idênticos, antes e depois do PMS, como mostra a Figura (3).

A relação entre os pesos moleculares (G_2/G_1) é obtida pela expressão descrita na Equação (4) da qual pode-se estimar $\bar{\theta}$. A relação entre os pesos moleculares e $\bar{\theta}$ é sensível somente à quantidade relativa de hidrogênio e carbono na composição química do combustível utilizado e da porcentagem de recirculação de gases de exaustão.

$$\frac{G_2}{G_1} = \frac{P_1 T_2}{P_2 T_1} \quad (4)$$

Na análise de Powell (1993), o método do peso molecular, cujos resultados são mostrados na Figura (4), apresentou um erro de precisão para a estimativa de $0,8 < \bar{\theta} < 1,3$ de 4,85 por cento. Apesar deste método apresentar um erro maior que os métodos da taxa de pressão e momento, seu desempenho pode ser significativamente melhorado através da inclusão de um algoritmo de estimativa da temperatura da carga dentro do cilindro, Arsie et al. (1998), em vez de se utilizar às temperaturas medidas nos coletores.

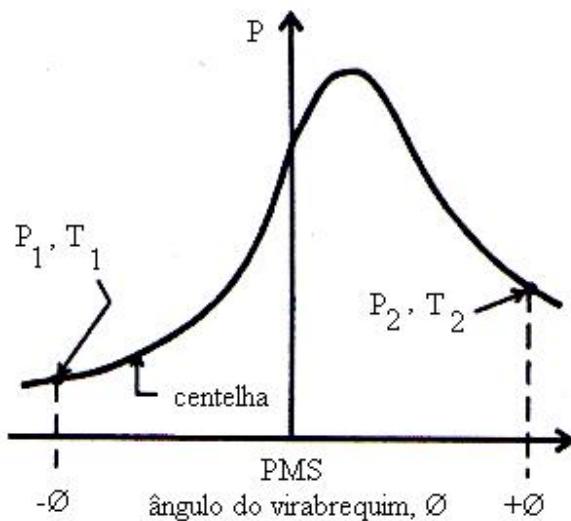


Figura 3. Posição da coleta de dados segundo o ângulo do virabrequim

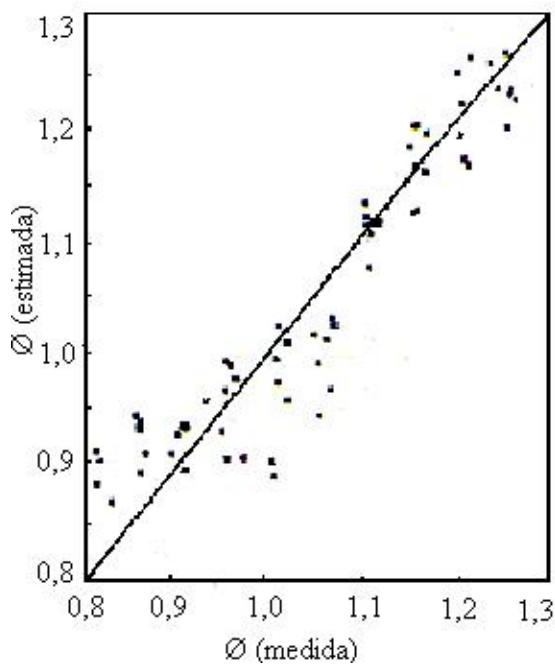


Figura 4. Estimativa média de $\bar{\theta}$ versus medida de $\bar{\theta}$ em regime permanente

2.4. Observador

A teoria básica do filtro de Kalman (1960), também conhecido como observador, pode ser encontrada em livros de sistemas de controle (Franklin et al., 1991). A sua aplicação em motores automotivos foi apresentada por Athans (1978) através da filtragem do ruído do sinal de pressão no cilindro.

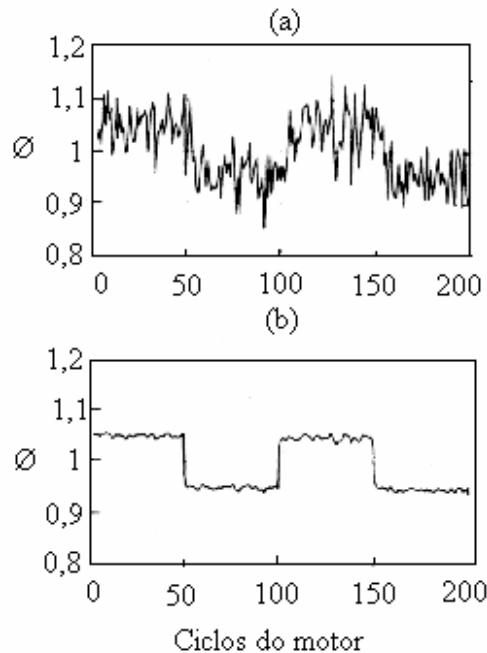


Figura 5. Transientes de Θ simulados; (a) Θ medido, (b) Θ estimado

Outra aplicação desta teoria em motores automotivos foi apresentada por Chang et al. (1993), o qual utilizou um observador para filtrar o sinal de Θ que podia ser obtido tanto pelo sensor de oxigênio quanto pela pressão medida no cilindro. Neste trabalho foi utilizado um modelo linear da dinâmica de Θ , com um período de amostragem igual a um ciclo motor (720 graus de giro do virabrequim), derivado de modelos da literatura (Aquino, 1981; Wu et al., 1983; Dobner, 1983 e Hendricks et al., 1992).

Os resultados com este observador são apresentados na Figura (5), onde a borboleta de aceleração foi submetida a uma onda quadrática, mantendo constante o combustível injetado, o que resultou em um erro na medida de Θ , devido à filtragem do sinal, de 3 por cento, portanto o modelo apresentado atenua significativamente o ruído das medições.

Entretanto, a utilização de um observador sobre um motor real, com todas as suas não linearidades e erros de sensores, não apresentaria uma redução tão drástica dos ruídos ciclo a ciclo como a apresentada sobre o modelo de Chang et al. (1993).

2.5. Duração da Combustão

O trabalho de Tunestal (1999, 2000) é o mais recente utilizando o método da duração da combustão para a estimativa da relação ar-combustível. Neste método foram desenvolvidos dois modelos de propagação de chama (um laminar e outro turbulento) aos quais foi incorporado o calor liberado pela combustão obtido através da pressão no cilindro.

Considerando que a compressão é politrópica pode-se utilizar a pressão de entrada p_0 , a temperatura e entrada T_0 , a rotação do motor (N), a variação do ângulo efetivo de queima $\Delta\alpha_b$ e o calor total liberado pela combustão (Q_{tot}) para estimar a relação ar-combustível (AFR), como mostra a Equação (5), através de um método de identificação adequado para encontrar os coeficientes c , μ , β e η .

$$AFR = c \frac{\Delta\alpha_b}{Q_{tot}} p_0^{1+\mu} T_0^{\beta-1} N^{-\eta} \quad (5)$$

Os resultados obtidos com este método, apresentados na Figura (6), mostraram um erro da ordem de 4 por cento na precisão da estimativa de AFR, excluindo as estimativas para as mistura muito pobres (misturas com AFR acima de 17), sendo que a umidade relativa apresentou efeitos consideráveis na precisão deste método.

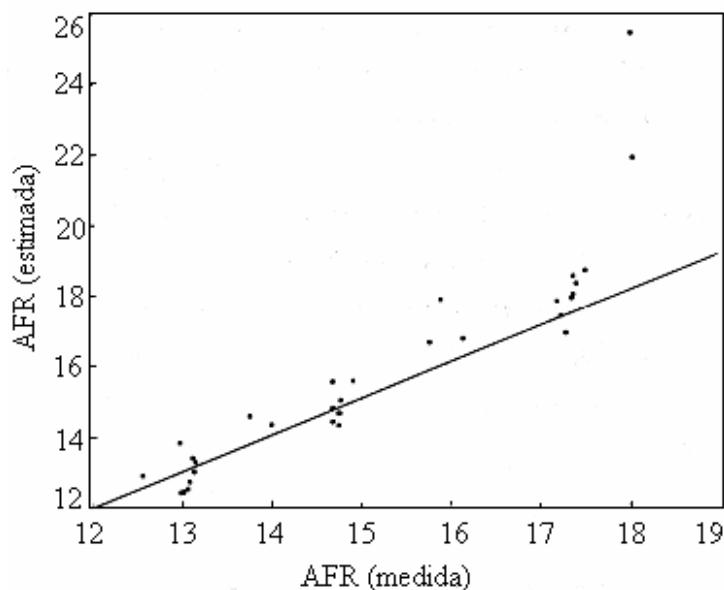


Figura 6. AFR média estimada versus AFR medida na exaustão

3. Conclusões

A estimativa da relação ar-combustível baseada na pressão no cilindro apresenta erros entre 2,4 e 4,85 por cento em regime permanente e de 3 por cento para ciclo a ciclo, enquanto que o sensor de oxigênio apresenta um erro médio de 0,5 por cento. A estimativa da relação ar-combustível apresenta altos níveis de ruídos ciclo a ciclo. Entretanto, as aplicações de observadores podem reduzir consideravelmente os ruídos nas medições em regime permanente, assim como, o desenvolvimento de modelos adequados as não linearidades e incertezas de um motor real poderão, também, reduzir os níveis de ruídos ciclo a ciclo.

A pressão no cilindro apresenta grande vantagem, em relação ao sensor de oxigênio, quanto a sua faixa de atuação, pois pode estimar a relação ar-combustível até os limites de mistura pobre, proporcionando um controle do motor capaz de reduzir as emissões de gases poluentes e de diminuir o consumo de combustível.

Outra vantagem, da pressão no cilindro, é a sua utilização durante o período de aquecimento do motor o que permite um melhor controle de $\dot{\theta}$ nestas condições de operação. Portanto, a utilização da

pressão no cilindro apresenta bons resultados na estimação da relação ar-combustível e pode ser empregada em sistemas de controle moderno, inclusive associada ao sensor de oxigênio com o intuito de obter o máximo aproveitamento destas duas estratégias de controle.

4. Referências

- Aquino, C.F., 1981, "Transient A/F Control Characteristics of the 5 Liter Central Fuel Injection Engine", SAE paper No. 810494.
- Arsie, I., Pianese, C., Rizzo, G., 1998, "Estimation of Air-Fuel Ratio and Cylinder Wall Temperature from Pressure Cycle in S.I. Automotive Engine", Proceedings of the 2nd IFAC Workshop Advances in Automotive Control, Loundville, USA, pp.167-173.
- Athans, M., 1978, "The Role of Modern Control Theory for Automotive Engine Control", SAE paper No. 780852.
- Chang, C.F., Fekete, N.P. and Powell, J.D., 1993, "Engine Air-Fuel Ratio Control Using an Event-Based Observer", SAE paper No. 930766.
- Dobner, D.J., 1983, "Dynamic Engine Models for Control Development Part I: Nonlinear and Linear Model Formulation", Application of Control Theory in the Automotive Industry, International Journal of Vehicle Design, Vol. SP4.
- Franklin, G.F., Powell, J.D. and Emami-Naeini, M.L., 1991, "Feedback Control of Dynamic Systems, 2nd edition, Addison-Wesley, 778p.
- Gassenfeit, E.H. and Powell, J.D., 1989, "Algorithms for Air-Fuel Ratio Estimation Using Internal Combustion Engine Cylinder Pressure", SAE paper No. 890300.
- Gilkey, J.G. and Powell, J.D., 1985, "Fuel-Air Ratio Determination from Cylinder Pressure Time Histories", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 107, pp.252-257.
- Haagen-Smit, A.J., 1952, "Chemistry and Physiology of Los Angeles Smog", Vol. 44, pp.1342.
- Haskara, I. and Mianzo, L., 2001, "Real-Time Cylinder Pressure and Indicated Torque Estimation Via Second Order Sliding Modes", Proceedings of the American Control Conference, Arlington, VA, pp.3324-3328.
- Hata, Y., Ikeura, K., Morita, T. and Abo, T., 1989, "Engine Control System Using a Cylinder Pressure Sensor", IEE Proceedings, Vol. 136, pp. 83-88.
- Hendricks, E., Vesterholm, T. and Sorensen, S.C., 1992, "Nonlinear, Closed Loop SI Engine Control Observers", SAE paper No. 920237.
- Kalman, R.E., 1960, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems", ASME Journal of Basic Engineering, Vol. 82, 34p.
- Krier, J.E., 1977, "Pollution and Policy", University of California Press, Berkeley, CA.
- Leonhardt, S., Muller, N. and Isermann, R., 1999, "Methods for Engine Supervision and Control Based on Cylinder Pressure Information", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 4, No. 3, pp. 235-245.
- Matekunas, F.A., 1986, "Engine Combustion Control with Ignition Timing by Pressure Ratio Management", U.S. Patent No. 4,622,939.
- Mood, A.M., Graybill, F.A. and Boes, D.C., 1974, "Introduction to Theory of Statistics", McGraw-Hill Publishing Co, 443p.
- Patrick, R.S. and Powell, J.D., 1990, "A Technique for the Real-Time Estimation of Air-Fuel Ratio Using Molecular Weight Ratios", SAE paper No. 900260.
- Powell, J.D., 1993, "Engine Control Using Cylinder Pressure: Past, Present, and Future", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 115, pp. 343-350.
- Programa de Controle da Poluição do Ar por veículos Automotores, 1988, 2 ed., Brasília: IBAMA.

- Sellnau, M.C., Matekunas, F.A., Battiston, P.A., Chang, C. and Lancaster, D.R., 2000, "Cylinder-Pressure-Based Engine Control Using Pressure-Ratio-Management and Low-Cost Non-Intrusive Cylinder Pressure Sensors", SAE paper No. 2000-01-0932.
- Tunestal, P.A., Wilcutts, M., Lee, A.T., and Hedrick, J.K., 1999, "In-Cylinder Measurement for Engine Cold-Start Control", Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications, Vol. 1, pp. 460-464.
- Tunestal, P.A., 2000, "The Use of Cylinder Pressure for Estimation of the In-Cylinder Air/Fuel Ratio of an Internal Combustion Engine", PhD Thesis, University of California, Berkeley.
- Wu, H., Aquino, C.F. and Chou, G.L., 1983, "A 1.6L Engine and Intake Manifold Dynamic Model", ASME paper No. 83-WA/DSC-39.

TECHNIQUES OF AIR-FUEL RATIO ESTIMATION BY CYLINDER PRESSURE

Fabiano Tadeu Mathias Costa

Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, fabianoc@sc.usp.br

Luís Carlos Passarini

Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo

Abstract: *The increasing demands for low emission and low fuel consumption in internal combustion engines require improved methods for diagnosis, in real-time and best possible control of the combustion process. Therefore, determining air-fuel ratio over a wide range of engine operating conditions is desirable for better transient engine control. This article describes five techniques for the air-fuel ratio estimation based on the measurement of the cylinder pressure. These techniques are applied under on a wide range of experimental data during steady-state operating conditions and for some transient engine with satisfactory levels of precision.*

Keywords: *air-fuel ratio estimation, cylinder pressure, engine control.*