

INJEÇÃO DIRETA DE COMBUSTÍVEL EM MOTORES DE IGNIÇÃO POR CENTELHA

Rodrigo Fernando Estella dos Santos

Leônidas Hildebrand Júnior

Luís Carlos Passarini

Antônio Moreira dos Santos

Adriano Carlos Nogueira Bezerra

Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Dr. Carlos Botelho, 1465 – 13560.030 – São Carlos, SP, Brasil. E-mail: santosrf@sc.usp.br

Resumo

Desde a criação dos motores de ignição por centelha (ICE), ou ciclo Otto, extensivos estudos têm sido realizados afim de se alcançar alto desempenho, baixa emissão de gases poluentes e boa economia de combustível, simultaneamente. Recentemente, indústrias automobilísticas, após retomarem suas pesquisas, começaram a produzir motores com sistemas de injeção eletrônica direta de combustível. Essa tecnologia apresenta características que contribuem de forma positiva na busca dos objetivos citados acima. Este artigo apresenta o estado da arte da injeção eletrônica direta de combustível em motores do ciclo Otto, a tecnologia atual para viabilizar sua realização, as características dos motores que utilizam este sistema, uma comparação com os sistemas que utilizam a injeção indireta de combustível, os resultados obtidos em experimentos de laboratório realizados em um motor com injeção direta e indireta de combustível e conclusões.

Palavras-chave: Injeção direta de combustível, Mistura, Motores de ignição por centelha.

1. INTRODUÇÃO

A história da injeção direta de combustível em motores do ciclo Otto é tão antiga quanto o próprio motor. Experiências nesta área têm sido realizadas desde antes da Segunda Guerra Mundial, utilizando para isto instalações do tipo das empregadas nos motores diesel (HILDEBRAND JR., 1998).

Antes da invenção de carburadores sofisticados, alguns dos motores aeronáuticos adaptaram sistemas de injeção direta usando a tecnologia de motores de ignição por compressão. Esta tecnologia desapareceu com o progresso dos carburadores. Durante este período de pesquisas, os motores com injeção direta adaptaram a estratégia de injeção antecipada, isto é, o combustível era injetado durante o curso de admissão para preparar a mistura ar-combustível (A/C) homogênea. Devido a isto, não era possível obter-se uma boa economia de combustível (IWAMOTO et al., 1997).

Segundo GLÖECKLER et al. (1981), em 1930, o Instituto Alemão de Pesquisas de Aviação iniciou um concentrado programa de desenvolvimento em injeção direta de

combustível na câmara de combustão, utilizando um injetor de motor diesel. A meta era realizar um completo enchimento do cilindro, resultando em máxima potência do motor. Este experimento teve como resultado um aumento na potência da ordem de 4%.

Em 1931, TAYLOR et al. realizaram testes com injeção direta em um motor do ciclo Otto afim de comparar os resultados com os obtidos utilizando o sistema de carburador. Tiveram como resultado um aumento de 7 a 11% na potência máxima e uma melhora significativa no consumo específico de combustível.

Em 1935, ROTHROCK e WALDRON, da National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), fizeram testes com injeção direta a fim de analisar os efeitos do avanço do ângulo de injeção do combustível, temperatura do motor e velocidade de combustão.

Durante a Segunda Guerra Mundial, os alemães utilizaram extensivamente a injeção direta nos motores de seus aviões (HILDEBRAND JR., 1998).

Em 1957, DOLZA et al., num motor monocilíndrico, realizaram ensaios com injeção direta com o intuito de comparar este sistema com o de carburador convencional nas diferentes condições de velocidade, carga e temperatura do motor.

DAVIS et al. (1961), da Texaco Research Center - Beacon, utilizaram um sistema de injeção direta dentro do cilindro com o objetivo de desenvolver um motor com alta eficiência térmica associada com combustão de misturas pobres (economia). Este processo, chamado TCP (Texaco Combustion Process), tinha como principal característica a rotação da mistura ar-combustível na câmara de combustão. Essa rotação (Figura 1), ocorria devido ao ângulo existente entre o bico injetor e a parede do cilindro. Os objetivos destas pesquisas foram alcançados, porém a produção de motores que utilizassem este processo não foi adiante devido ao alto custo de fabricação.

Em 1963, HUSSMANN et al. testaram um sistema de injeção direta para analisar o comportamento do motor durante a operação com carga estratificada e o efeito da variação do intervalo de tempo entre injeção de combustível e ignição da mistura.

De 1965 até o final dos anos 80, outros motores com este sistema foram desenvolvidos, como o MAN-FM em 1968, o Ford-PROCO em 1971, o Daimler-Benz OCC em 1976 e o IRVW-Futura, da Volkswagen, em 1989 (QUEIROZ & TOMANIK, 1997). Segundo IWAMOTO et al. (1997), neste período extensivos estudos continuaram sendo realizados com o sistema de injeção direta a fim de se alcançar uma alta economia de combustível. Concluiu-se que o motor com este sistema deveria ser operado em uma condição extremamente pobre, estratificando a carga e preparando uma mistura levemente rica ao redor da vela de ignição. Em função disso, vários conceitos de combustão em carga estratificada foram propostos neste período.

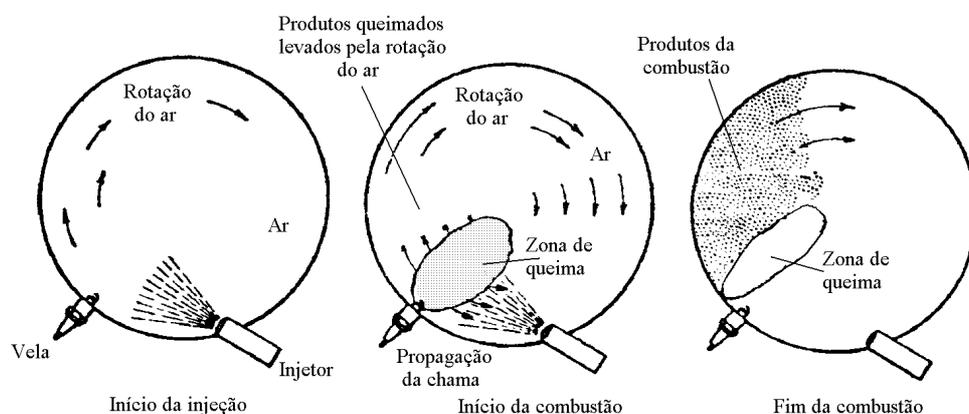


Figura 1: Rotação da mistura A/C na câmara de combustão (OBERT, 1971).

Estes conceitos adotaram uma configuração na qual a vela está localizada bem próxima ao jato de combustível. Embora tenha sido confirmado que pode ser realizada uma combustão estável com esta configuração, os seguintes problemas impediram que estes conceitos fossem desenvolvidos para produção em massa:

Emissão de hidrocarbonetos: grande quantidade de hidrocarbonetos foi emitida devido à dificuldade de se completar a combustão.

Incrustação na vela de ignição: com o jato de combustível próximo à vela, formava-se fuligem em seus eletrodos.

Baixo desempenho: a variação do tempo de injeção realizada pelo equipamento mecânico de injeção de combustível empregado neste período era limitado, e a mudança da injeção atrasada para a antecipada não era possível. Conseqüentemente, esses motores deveriam ser operados com a mistura estratificada uniforme em altas cargas. Afim de se prevenir a emissão de fuligem, a taxa de excesso de ar deveria ser mantida alta, resultando em baixo desempenho.

Diluição do óleo lubrificante: era difícil impedir que as gotas de gasolina chocassem-se com as paredes do cilindro ou com a superfície do pistão. Neste contato a gasolina diluía o óleo lubrificante.

Acúmulo de sedimentos na câmara de combustão: com este sistema de injeção, formava-se uma camada de combustível líquido sobre o pistão causando o acúmulo de sedimentos na câmara de combustão.

Após 1990, a economia de combustível continuou sendo o principal objetivo da indústria automobilística, pois este é o fator chave para a economia de energia e redução de CO, um dos gases mais nocivos à camada de ozônio. Para alcançar este objetivo, pesquisas na área energética começaram estabelecer as tecnologias de injeção direta que realmente podem ser aplicadas nos motores atualmente produzidos (IWAMOTO et al., 1997).

Segundo GETTING (1997), as principais indústrias automobilísticas, como a Mitsubishi, Toyota, Audi, Chrysler e Mercedes-Benz, já trabalham com seus respectivos motores com IEDC.

A Mitsubishi lançou seu motor com injeção direta (GDI - Gasoline Direct Injection) no mercado japonês em agosto de 1996. A injeção direta de gasolina permite ao motor (4 cilindros em linha, 1800 cilindradas e 16 válvulas) operar com misturas muito pobres, da ordem de 35:1, para condições de cruzeiro, o que ajuda a melhorar a economia de combustível em mais de 30% em carga parcial. Um aumento na eficiência volumétrica permite que a taxa de compressão aumente de 10,5:1, da versão convencional do motor, para 12:1 no GDI. Este aumento na taxa de compressão ajuda o motor obter um aumento de 10% no torque e na potência.

O motor da Toyota (denominado D4), com 4 cilindros em linha, 16 válvulas e 2000 cilindradas, é um pouco mais evoluído que o da Mitsubishi. O D4 possui dois dutos de admissão separados para cada cilindro, sendo que em um deles existe uma válvula do tipo borboleta que é controlada eletronicamente e no outro encontra-se um dispositivo gerador de vórtices do tipo helicoidal. Deste modo, quando o motor está operando em regime de carga estratificada, a válvula borboleta é fechada e o ar é introduzido no motor pelo duto que possui o gerador de vórtices. Isto faz com que o ar entre no cilindro com auto grau de redemoinhos (QUEIROZ & TOMANIK, 1997).

O D4 emprega três modos diferentes de injeção, possibilitando ao motor operar com diferentes razões A/C. Para cargas parciais e tráfego com até 100 km/h, é usado o sistema de recirculação de gases de exaustão (EGR), o motor trabalha com carga estratificada com a injeção de combustível ocorrendo no tempo de compressão. A razão A/C neste caso encontra-se entre 25 e 50:1. Para plena carga ou acelerações rápidas, quando se deseja obter altas potências, o motor trabalha com mistura estequiométrica, com razão A/C em torno de 12 a

15:1 e, nesta situação, a injeção de combustível ocorre no tempo de admissão. Entretanto, entre as regiões de carga estratificada, mistura homogênea e estequiométrica, existe uma zona de combustão que compreende misturas homogêneas pobres, com razão A/C entre 15 e 23:1 (HILDEBRAND JR., 1997).

A Audi também lançou seu motor com injeção direta recentemente. Trata-se do AL2, um motor de 1200 cilindradas, com 3 cilindros, cada um possuindo 5 válvulas. O AL2 produz 75 CV a 5500 rpm, 11,7 kgfm de torque e tem uma economia de combustível entre 15 e 20% em relação ao motor similar convencional da montadora, chegando a fazer mais de 33 km/l.

Outros fatores que têm contribuído para o avanço dos estudos nesta área são os progressos obtidos nas tecnologias de tratamento de gases provenientes da combustão e o aperfeiçoamento dos sistemas de controle do motor e de sistemas de injeção eletrônica de combustível. Para reforçar a necessidade de se continuar aperfeiçoando este sistema, há ainda leis que regulamentam as emissões dos gases de escape dos motores.

2. O SISTEMA DE INJEÇÃO DIRETA

A injeção eletrônica direta de combustível (IEDC) na câmara de combustão dos cilindros de um motor do ciclo Otto, é um conceito que oferece muitas vantagens sobre os mais sofisticados motores com sistema de injeção indireta (IEIC). O potencial termodinâmico para reduzir o consumo específico de combustível, juntamente com as vantagens da partida rápida, melhoraram a resposta em regime transiente do motor e possibilitaram uma maior precisão no controle da mistura A/C (ZHAO et al., 1997). Uma comparação ilustrativa entre os sistemas IEDC e IEIC é apresentada na “Figura 2”.

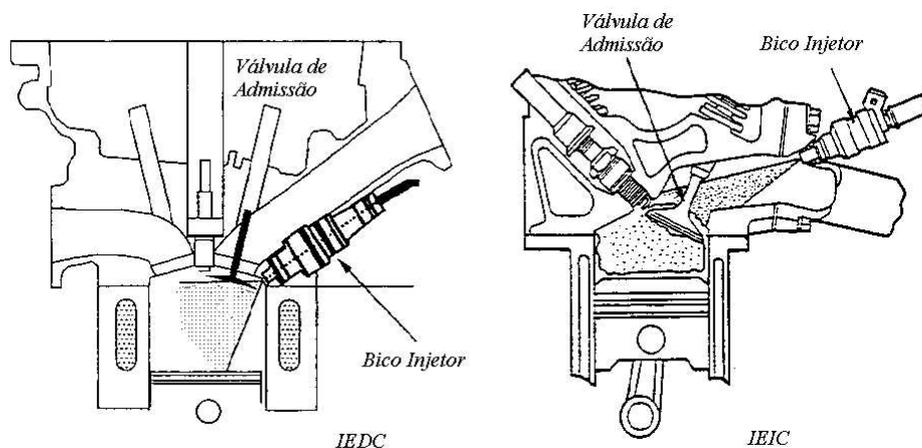


Figura 2: Comparação entre os sistemas IEDC e IEIC (ZHAO et al., 1997).

Para HARADA et al. (1997), o motor ICE à gasolina com sistema de injeção direta é o mais eficiente tanto na economia de combustível quanto no alto desempenho. Este sistema apresenta as seguintes vantagens:

- alta resposta de aceleração e ótima dirigibilidade em condições de baixa temperatura devido a injeção ser direta na câmara de combustão do cilindro;
- alta eficiência volumétrica e características anti-detonantes devido a baixa temperatura da carga de ar.

KOWALEWICZ (1984), cita outras vantagens:

- menor índice de emissões;
- maior economia, principalmente em cargas parciais;
- possibilidade de queimar combustíveis de baixa octanagem.

Entretanto, é importante salientar que para se obter as vantagens acima citadas, é necessário que o combustível seja injetado com pressões da ordem de 10 a 50 MPa (LENZ, 1992).

3. ENSAIOS COM O SISTEMA DE INJEÇÃO DIRETA

Ensaio comparativos entre os sistema IEDC e IEIC foram realizados em laboratório. Foi utilizado para os testes, um motor ICE, de 4 cilindros em linha, 1588 cc, taxa de compressão de 13,7:1, com sistema de injeção indireta. Um sistema de injeção direta foi adaptado a este motor posteriormente para obtenção de dados comparativos de torque, potência reduzida, consumo específico e rendimento global. Os resultados obtidos são mostrados nos gráficos à seguir.

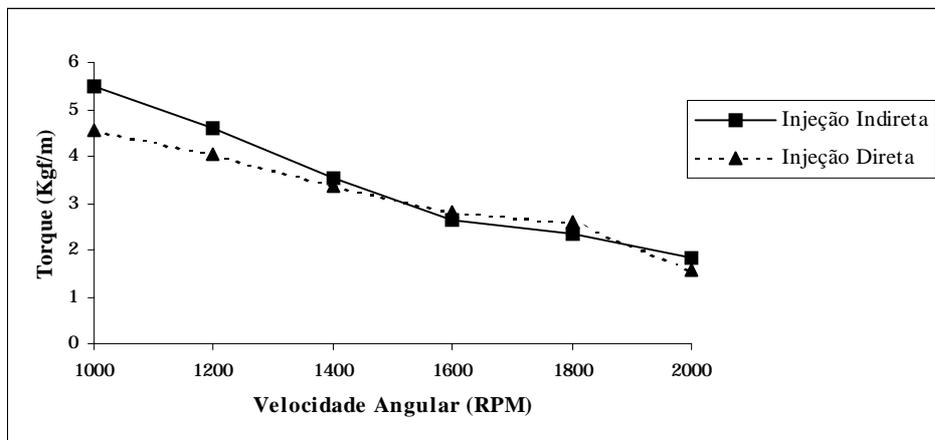


Figura 3: Torque em função da rotação para os sistemas de injeção direta e indireta.

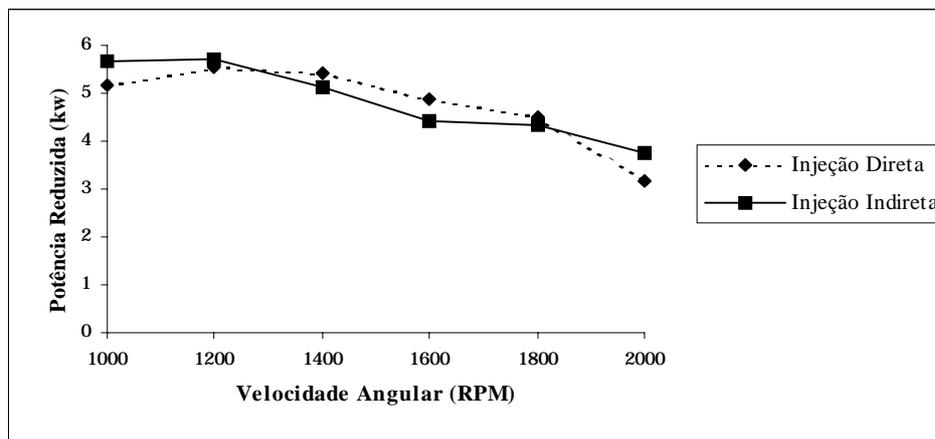


Figura 4: Potência reduzida em função da rotação para os sistemas de injeção direta e indireta.

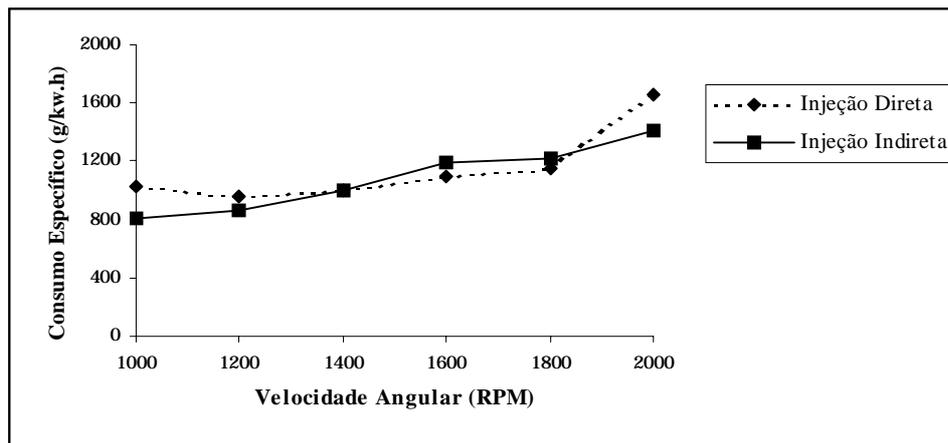


Figura 5: Consumo específico em função da rotação para os sistemas de injeção direta e indireta.

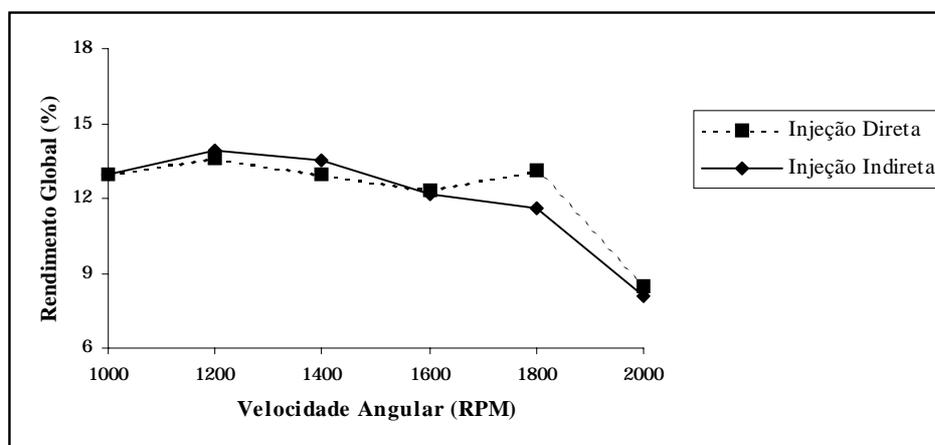


Figura 6: Rendimento global em função da rotação para os sistemas de injeção direta e indireta.

O sistema operando com injeção direta, controlado por um gerador de pulsos analógico, apresentou uma queda de potência e torque entre 1000 e 1200 rpm em relação à injeção indireta. Foi observado que houve pouco uso da energia fornecida pelo combustível em 1000, 1200 e 2000 rpm com a injeção direta. Entretanto, utilizando o sistema de injeção indireta, a potência, o torque e o rendimento global foram menores em 1400, 1600 e 1800 rpm.

Como a combustão depende da homogeneidade da mistura A/C, a queda na potência e no torque, o baixo rendimento global e alto consumo específico, em 1000 e 1200 rpm, podem ser atribuídos ao excesso de líquido injetado dentro do cilindro. O gerador de pulsos, responsável pela ativação dos bicos injetores, causava um fornecimento de uma mistura extremamente rica nestas rotações. Em 2000 rpm, a mesma situação foi observada, devido ao fato de a injeção de combustível ocorrer a baixas pressões, o que proporciona gotas de diâmetro grande, e ao pequeno tempo que o sistema de injeção direta teve para formação e homogeneização da mistura A/C.

4. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou o estado da arte e o funcionamento básico do sistema de injeção direta de combustível. Testes foram realizados utilizando-se os sistemas de injeção direta e indireta. Mesmo com o uso de um gerador de pulsos analógico para ativar os injetores e com a baixa pressão de injeção, foi possível obter um pequeno ganho de potência em 1400, 1600 e 1800 rpm e de torque em 1600 e 1800 rpm.

Para as condições onde houve queda de torque e potência, o uso de melhores injetores e bomba elétrica de combustível, combinados com um controlador eletrônico para os injetores, poderia melhorar a formação e homogeneização da mistura A/C, melhorando o rendimento global, torque e a potência.

Em baixas pressões, o sistema de injeção direta poderia apresentar vantagens combinadas com um menor custo, comparado com a injeção indireta.

5. REFERÊNCIAS

- Automotive Engineering, 1997, Getting more direct, vol.105, n.12, pp.80-85.
- Davis, C. W. et. al., 1961, Fuel injection and positive ignition - a basis for improved efficiency and economy, SAE Transactions, vol.69, pp.120-134.
- Dolza, J. et. al., 1957, The General Motors fuel injection system, SAE Transactions, vol.65, pp.739-746.
- Glöckler, O. et. al., 1981, Gasoline fuel injection: an overview, Automotive Engineers, vol.89, n.1, pp.66-74.
- Harada, et. al., 1997, Development of direct injection gasoline engine, SAE Technical Paper Series, n.970540.
- Hussmann, A. W. et. al., 1963, Charge stratification by fuel injection into swirling air, SAE Transactions, vol.71, pp.421-444.
- Iwamoto, et. al., 1997, Development of gasoline direct injection engine, SAE Technical Paper Series, n.970541.
- Kowalewicz, A., 1984, Combustion systems - of high-speed piston I. C. engines, Warszawa, Elsevier.
- Lenz, H. P., 1992, Mixture formation in spark-ignition engine, New York, Springer-Verlag-Wien/SAE.
- Queiroz, C. & Tomanik, E., 1997, Gasoline direct injection engines - a bibliographical review, SAE Technical Paper Series, n.973113.
- Rothrock, A. M. & Waldron, C. D., 1935, Some effects of injection advance angle, engine-jacket temperature, and speed on combustion in a compression-ignition engine, NACA, n. 525, pp.343-35
- Taylor, et. al., 1931, Fuel injection with spark ignition in a Otto-cycle engine, SAE Transactions, vol. 26, pp.346-351.
- Yamaguchi, J., 1997, Toyota readies direct-injection gasoline engine for production, Automotive Engineering, vol.105, n.12, pp.110-112.
- Zhao, F. et. al., 1997, A review of mixture preparation and combustion control strategies for spark-ignited direct-injection gasoline engines, SAE Technical Paper Series, n.970627.