

Análise da influência da injeção eletrônica e da mistura nas curvas características de um motor ciclo Otto

Analysis of the influence of electronic injection and mixing on the characteristic curves of an Otto cycle engine

Tony Corrêa Silva

Graduando do curso de Engenharia Mecânica (UNIPAM).

E-mail: tonycorrea@unipam.edu.br

João Rodrigo Andrade

Professor orientador (UNIPAM).

E-mail: joaorandrade@unipam.edu.br

Resumo: Nos últimos anos, o Brasil teve um aumento significativo na frota de veículos. Nos últimos doze anos, a frota praticamente dobrou. Grande parte dos veículos é movida a combustíveis fósseis, e o uso desses combustíveis em longo prazo é prejudicial à saúde humana e ao ambiente. O mau gerenciamento do sistema de injeção de combustível aumenta significativamente os danos, principalmente porque, no Brasil, não há leis rigorosas sobre o assunto. No presente trabalho, foi realizada uma análise do sistema de alimentação de um motor ciclo Otto com intuito de melhorar a eficiência das curvas características do sistema.

Palavras-chave: Motores de combustão interna. Injeção eletrônica. Carburador. Ciclo Otto. Curvas características.

Abstract: In recent years, Brazil has had a significant increase in the fleet of vehicles. In the last twelve years, the fleet has practically doubled. A great part of these vehicles are powered by fossil fuels, and the use of these fuels in the long run are harmful to human health and the environment. Bad management of the fuel injection system significantly increases the damage, mainly in Brazil because there are no strict laws on the subject. In the present work an analysis of the fuelling system of an Otto cycle engine was carried out, aiming at improving the efficiency of the characteristic curves of the system.

Keywords: Internal combustion engines. Electronic injection. Carburetor. Otto cycle. Characteristic curves.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Departamento Nacional de Trânsito (Denatran), de 2007 a 2017, a frota de veículos no Brasil teve um aumento de aproximadamente quarenta e oito milhões de unidades, totalizando quase noventa e sete milhões de veículos. Com base nos dados do IBGE, o país possui um pouco mais de dois habitantes por veículo. Segundo a base de dados do Denatran, grande parte desses veículos é movida a

combustíveis fósseis, e o uso prolongado desses combustíveis é responsável por danos ambientais, que também são prejudiciais à saúde humana. Uma das alternativas para reduzir os danos é analisar e desenvolver meios para que os motores sejam menos poluentes.

O mau gerenciamento do sistema de injeção de combustível, juntamente com o aumento do número de veículos leves, aumenta significativamente os danos ambientais, principalmente no Brasil, porque não existem leis rigorosas, permitindo índices de poluição relativamente altos quando comparado aos dos países desenvolvidos. Nesse contexto, no presente trabalho será realizada uma análise do sistema de injeção eletrônica de um motor de combustão interna movido à gasolina, com intuito de melhorar a eficiência do sistema.

Com o aumento significativo de veículos no Brasil, há também um aumento de consumo de combustível, pois a grande maioria desses veículos é movida a combustíveis fósseis, e o uso prolongado desses combustíveis é responsável por danos ambientais, e eles são prejudiciais à saúde humana. Uma das alternativas para reduzir esses danos é analisar e aprimorar o sistema de injeção de combustível dos motores ciclo Otto.

A injeção eletrônica tem grande destaque nesse meio, pois o mau gerenciamento do sistema de injeção de combustível aumenta significativamente os danos ambientais.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 CICLO OTTO – HISTÓRICO E DESENVOLVIMENTO

Segundo Varella (2006), até o início do século XIX acreditava-se que o calor era um fluido chamado calórico contido em todos os objetos quentes que possuíam mais fluido calórico que os objetos frios; quando os dois entravam em contato, esse fluido passava de um para o outro a fim de se estabelecer o equilíbrio. O equívoco desse conceito atrasou o desenvolvimento da termodinâmica e, conseqüentemente, a construção dos motores a combustão.

De acordo com Varella (2006), Laplace e Lavoisier (1783) apresentaram o conceito de calor específico. Nessa mesma época, esboçou-se a ideia de que o calor era uma forma de energia. Papin construiu a primeira máquina a vapor usando o princípio de que o volume de um gás é inversamente proporcional à sua pressão. Vom Rumford (1798) notou o surgimento do calor por fricção. Mayer e Poisson (1842) calcularam a equivalência do trabalho em calor a partir da expansão adiabática dos gases e definiram a equação do gás ideal. Joule mediu diretamente a equivalência do trabalho e calor.

Segundo Varella (2006), sucessivas descobertas foram feitas até que Helmholtz (1847) concluiu a primeira lei da termodinâmica sobre a conservação da energia. Clausius (1865) concluiu a segunda lei sobre a disponibilidade de calor para conversão em energia mecânica (entropia).

De acordo com Varella (2006), James Watts construiu, em 1767, um motor a vapor com sistema de resfriamento de cilindros. B. Thompson (1907), conde Rumford,

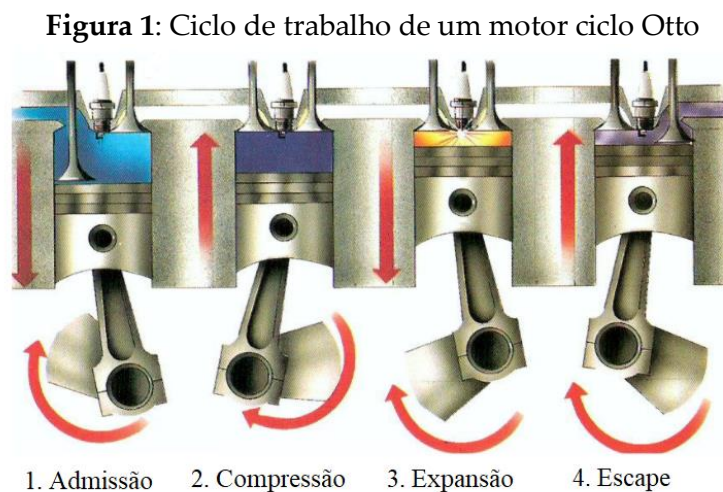
durante a construção de um canhão, começou a observar a equivalência entre calor e trabalho, aumentando com isso as possibilidades de cálculos sobre os motores. O inventor da iluminação a gás, Phillip Leben, em 1801, a patente de um motor de combustão, que funcionava tendo como princípio a expansão dos gases proveniente da combustão de uma mistura ar e gás inflamado.

Para Varella (2006), em 1862, Beau de Rochás propôs e patenteou os princípios de funcionamento dos motores de 4 tempos de combustão interna com êmbolos, que, devido a suas características, apresentavam condições de eficiência elevada. Segundo Varella (2006), Beau de Rochás nunca obteve sucesso na aplicação de suas teorias, ou seja, nunca conseguiu construir seu motor.

Na sua exposição, Varella (2006) menciona Nikolaus August Otto (1876), alemão, caixeiro viajante e sócio de uma fábrica de motores a gás. Foi esse alemão quem construiu o motor silencioso chamado de OTTO. Após esse experimento, Otto conseguiu formar uma opinião e solidificar seus conhecimentos para, somente em 1878, apresentar seu motor na Feira Internacional de Paris.

2.1.1 Funcionamento

De acordo com Brunetti (2012), o ciclo de Otto é um ciclo termodinâmico que descreve o funcionamento de um motor de pistão de ignição por centelha. É o ciclo termodinâmico mais comum em motores de automóveis. Nesses motores, o ciclo de trabalho corresponde a duas voltas da árvore de manivelas. À medida que a árvore de manivelas realiza o movimento rotativo, os pistões se movem dentro dos cilindros. As bielas são responsáveis por transmitirem o movimento dos pistões para a árvore de manivelas. Com as duas voltas da árvore de manivelas, os quatro tempos são executados, como mostra a figura a seguir.



Fonte: <http://www.oleodieselparageradores.com.br/como-e-o-funcionamento-de-combustao-interna/>

Os quatro tempos de um motor Otto estão descritos a seguir.

1. Admissão: caracteriza-se pelo movimento do pistão do ponto mais alto de seu curso (ou ponto morto superior, PMS) até o ponto mais baixo (ou ponto morto inferior, PMI), com a válvula de admissão aberta e a válvula de escape fechada. Com o movimento do pistão, a mistura ar-combustível flui para dentro do cilindro.
2. Compressão: o pistão se desloca do PMI para o PMS, com as válvulas fechadas, comprimindo a mistura na câmara de combustão. O sistema de ignição produz uma centelha através da vela de ignição. A centelha provoca a queima da mistura, fazendo a pressão do cilindro elevar-se.
3. Expansão/Explosão: a alta pressão no cilindro, causada pela queima da mistura, faz o pistão deslocar do PMS para o PMI, com as válvulas fechadas. Durante esse ciclo, a energia contida no combustível é liberada.
4. Exaustão: o pistão desloca-se do PMI para o PMS; a válvula de exaustão se abre permitindo que o produto da queima da mistura seja expelido para a atmosfera.

2.2 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO

O sistema de alimentação é um conjunto de mecanismos que tem por função fornecer ao motor as quantidades adequadas de ar e combustível, de acordo com as condições impostas.

De acordo com Brunetti (2012), o carburador ainda é utilizado em aplicações de baixa potência, nas quais as limitações de emissão de poluentes são menos restritivas. A injeção de combustível, além de mais precisa, permite melhores resultados no controle de emissões, podendo ocorrer no coletor de admissão (PFI – *Port Fuel Injection*) ou diretamente na câmara (GDI – *Gasoline Direct Injection*).

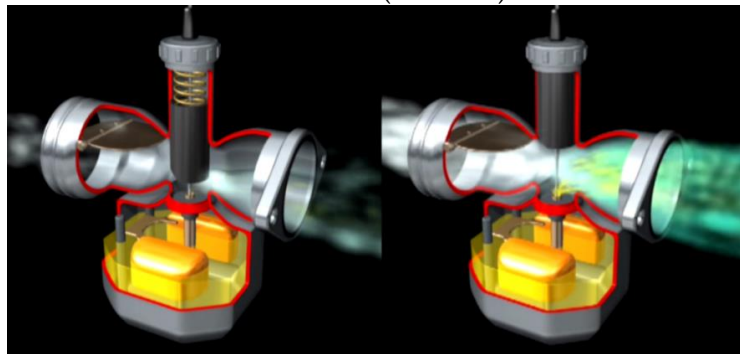
2.2.1 Carburador

O carburador é um componente mecânico responsável pela alimentação de um motor de combustão interna. É responsável pela criação da mistura ar-combustível e a dosagem da mistura. Seu funcionamento é totalmente mecânico. O carburador passou por algumas mudanças antes de ser finalmente substituído pela injeção eletrônica. O carburador possui uma manutenção relativamente mais barata comparado com a injeção eletrônica, porém possui maior consumo, é mais poluente, além da necessidade de manutenção periódica.

Segundo Brunetti (2012), o carburador promove a dosagem da quantidade de combustível desejada para certa vazão de ar admitida no motor. Constitui-se de um reservatório, no qual o nível do combustível é mantido aproximadamente constante por uma boia, e uma válvula de agulha regula a entrada de combustível. A vazão de ar é regulada pela perda de carga estabelecida por uma borboleta aceleradora, à qual o operador tem acesso por meio do acelerador.

O funcionamento de um carburador, uma forma simplificada, de acordo com Truosolo (2012), é através de um conector acionado pelo acelerador, ligado a um controlador da vazão dentro de um tubo de Venturi. Esse tubo é responsável pela passagem e entrada de combustível para o coletor de admissão.

Figura 2: Funcionamento de um carburador simples em marcha lenta (à esquerda) e acelerado (à direita)

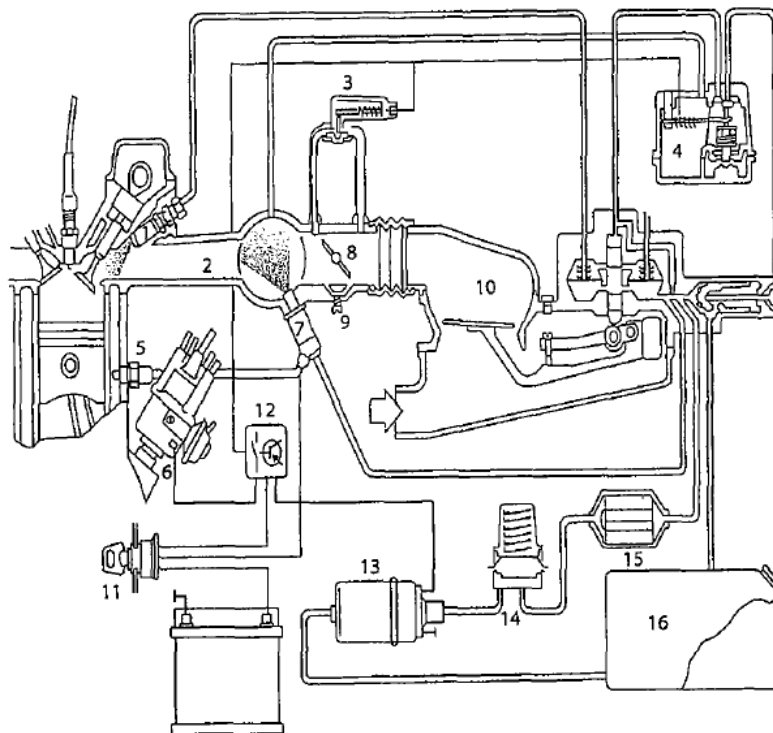


Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=cYPSk6FZiqA>

2.2.2 Injeção Mecânica

Segundo Brunetti (2012), o sistema de injeção mecânica é utilizado em aviões desde 1925. Esse sistema independe dos efeitos da gravidade, permitindo trabalhar em qualquer posição, garantindo uma pequena vantagem sobre o carburador. A partir de 1950, começou a ser utilizado em veículos de competição. Porém, esse sistema possui várias desvantagens quando comparado com a injeção eletrônica, pois não possui sistema eletrônico de gerenciamento, injetando combustível continuamente.

Figura 3: Sistema mecânico de injeção de combustível. Motores de combustão interna



Fonte: Brunetti (2012, vol. 1, p. 461)

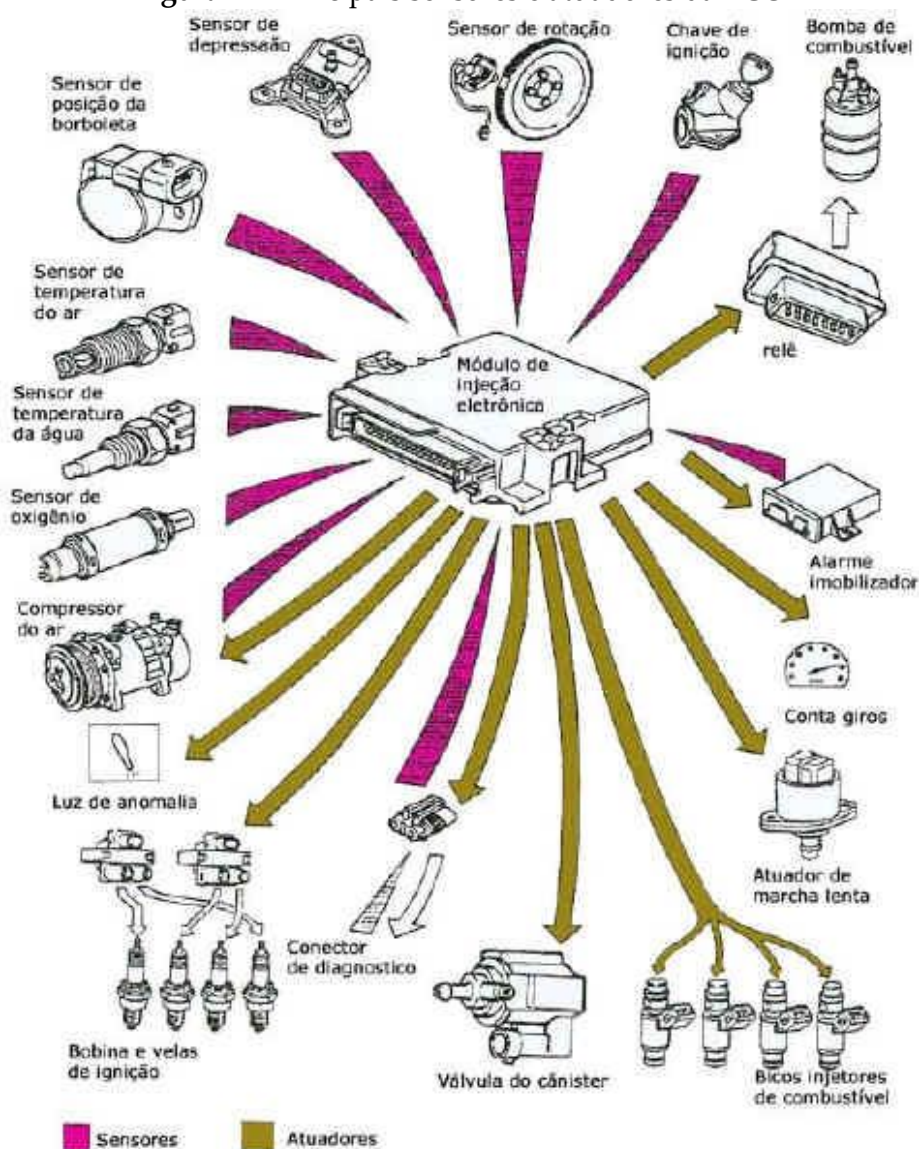
Na figura acima, estão apresentados os seguintes componentes: 1. Injetor de combustível; 2. Coletor de admissão; 3. Regulador de ar adicional; 4. Regulador de pressão de comando; 5. Sensor de temperatura do motor (NTC); 6. Distribuidor de ignição; 7 Injetor suplementar; 8. Borboleta de aceleração; 9. Parafuso de regulagem da marcha lenta; 10. Regulagem de mistura; 11. Chave de ignição; 12. Relé de comando; 13. Bomba de combustível; 14. Acumulador de combustível; 15. Filtro de combustível e 16. Tanque de combustível.

2.2.3 Injeção Eletrônica

De acordo com Brunetti (2012), os requisitos cada vez mais exigentes para as emissões dos gases de escape fazem com que se busquem métodos cada vez mais aperfeiçoados e independentes de recursos humanos, para a alimentação de combustível dos motores. A injeção eletrônica de combustível para motores ciclo Otto é um desenvolvimento antigo, que saiu de modelos puramente mecânicos, que foram desenvolvidos graças à evolução e à redução de custos pelos quais passou a eletrônica. As principais vantagens da injeção eletrônica, comparada aos sistemas de alimentação acima, são maior controle da mistura ar-combustível, maior economia de combustível, melhor dirigibilidade, (principalmente a frio), controle automático de rotações máximas e mínimas do motor e melhor controle do nível de emissões.

Além disso, a injeção eletrônica possui uma Unidade de Comando do Motor, conhecida como *Engine Control Unit* (ECU), popularmente conhecida como módulo de injeção; é praticamente o cérebro de um motor, capaz de adquirir as principais informações dos sensores a bordo do veículo e de controlar os diversos atuadores no veículo.

Figura 4 – Principais sensores e atuadores da ECU



Fonte: <http://www.ssautomotiva.com.br/injecao-eletronica>

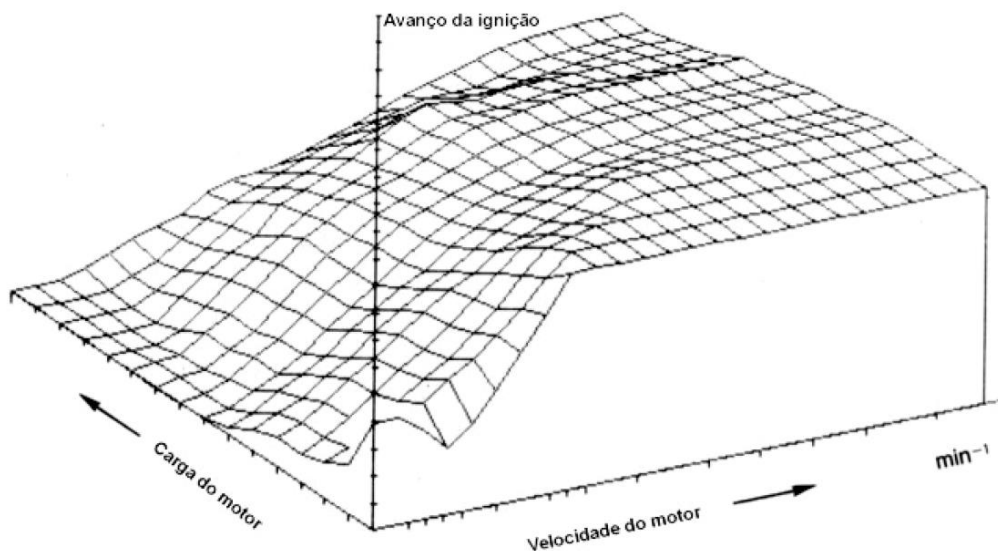
2.3 CURVAS CARACTERÍSTICAS

De acordo com Varella (2010), as curvas características de um motor são utilizadas para analisar o comportamento do motor em geral, o comportamento do torque, a potência, o consumo de combustível em função da rotação do motor e a mistura ar-combustível.

Segundo Milhor (2002), o gerenciamento do motor a partir dos subsistemas descritos passou a ser possível com o desenvolvimento da eletrônica, o que viabilizou a utilização de sistemas microprocessados, realizando o controle digital do motor. Para que o sistema de controle possa gerenciar o funcionamento do motor, é necessário que a unidade de comando eletrônico (ECU) receba sinais de sensores indicando a condição de funcionamento. Esses sinais são processados e enviados para os atuadores, de forma que o motor opere de acordo com o mapeamento. Uma exigência para qualquer

sistema de controle é o conhecimento da “planta”, ou seja, o sistema a ser controlado. No caso dos motores de combustão interna, o conhecimento do sistema a ser controlado vem de um processo experimental denominado mapeamento, também conhecido como processo de calibração. Esse processo é realizado em uma bancada dinamométrica, e a partir das curvas de torque, potência consumo específico e nível de emissões desejadas, montam-se tabelas de carga x rotação x ponto de ignição, carga x rotação x tempo de injeção, temperatura do motor x tempo de injeção (mais utilizada na partida do motor), responsáveis pela compensação no tempo de injeção, ponto de ignição etc. Essas curvas são armazenadas na memória da ECU em forma de tabelas (*lookup tables*), que serão utilizadas de acordo com a condição de operação do motor. A figura a seguir ilustra o mapa do avanço da ignição em função da carga e rotação do motor.

Figura 5 – Mapa para o avanço da ignição

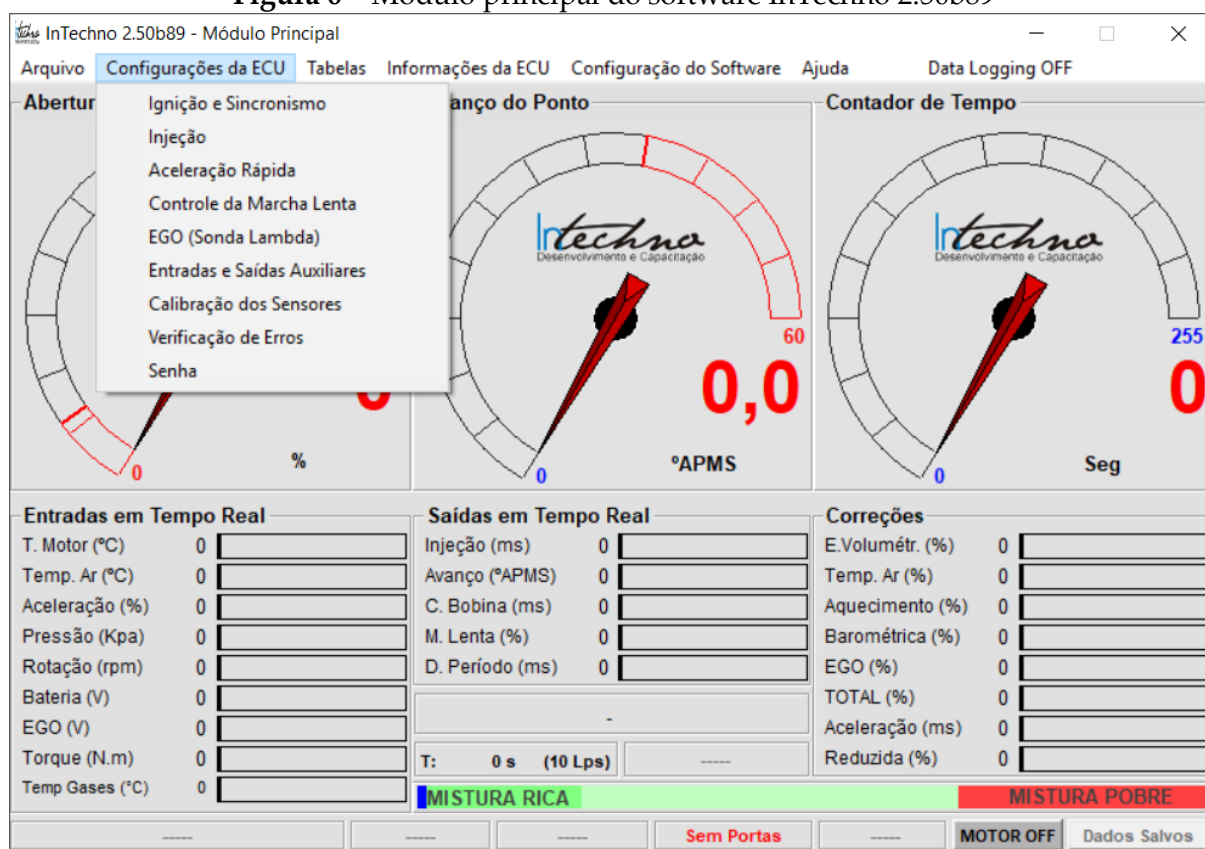


Fonte: Milhor (2002, p. 21)

3 METODOLOGIA

Primeiramente, foi feita uma revisão bibliográfica de manuais do fabricante. Fizeram-se também exercícios práticos para trabalhar com o software da injeção eletrônica InTechno 2.50b89.

Figura 6 – Módulo principal do software InTechno 2.50b89

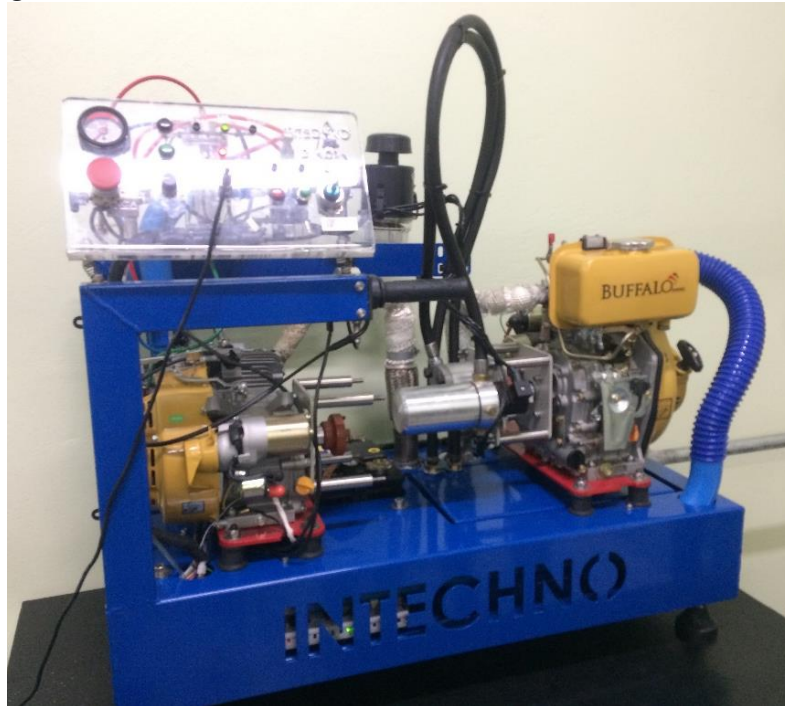


Fonte: InTechno Desenvolvimento e Capacitação

3.1 ESPECIFICAÇÕES DO MOTOR CICLO OTTO

O motor utilizado no projeto é um BUFFALO BFG/E 4T-6.5 a gasolina, quatro tempos, de um cilindro, com 196 cilindradas, taxa de compressão de 8,5:1, diâmetro de cilindro de 68 mm, curso de pistão de 54 mm, com filtro de ar seco, refrigeração a ar, sistema de ignição por CDI (ignição por descarga capacitiva), sistema de partida manual e elétrica, peso aproximado de 16 kg e dimensões de 430x380x390 mm (comprimento x largura x altura).

Figura 7 – Bancada de motores ciclo Otto e ciclo Diesel InTechno

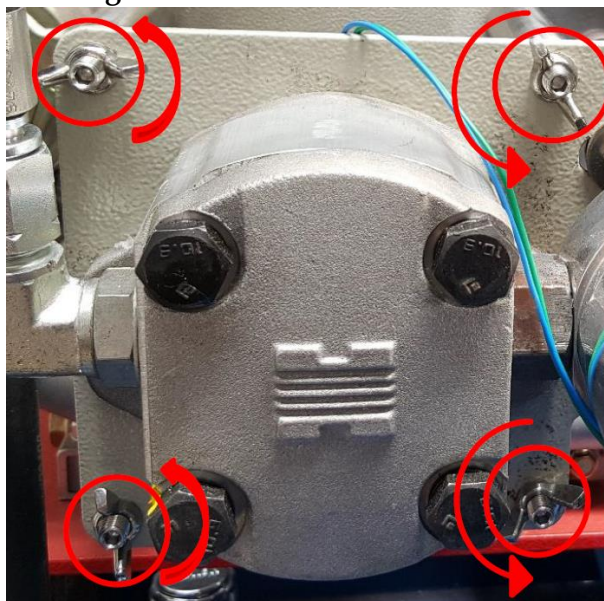


Fonte: Arquivos dos pesquisadores

3.2 FUNCIONAMENTO DO MOTOR

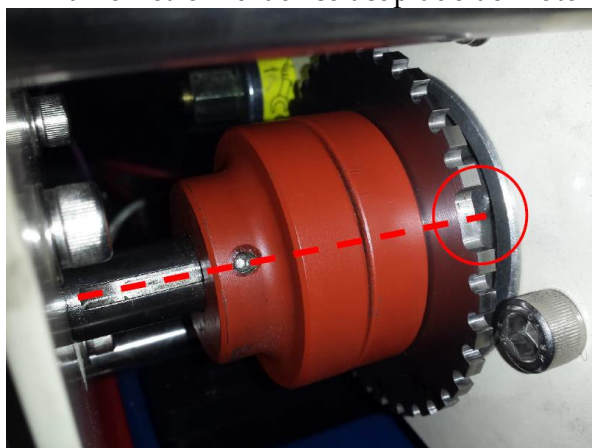
1. Primeiramente, deve-se verificar em qual motor o dinamômetro hidráulico está acoplado; caso não esteja acoplado no motor desejado, devem-se desparafusar as quatro porcas “borboleta” como se pode ver na Figura 8; deve-se desacoplar o dinamômetro; em seguida, deve-se girá-lo e acoplá-lo no outro motor. O motor Diesel é mais simples, porém o motor Otto exige um pouco mais de atenção; ao acoplar o dinamômetro no motor ciclo Otto, é necessário que o dente faltante de referência da roda fônica fique alinhado com o rasgo de chaveta do eixo virabrequim, como demonstrado na Figura 9.

Figura 8 – Dinamômetro hidráulico



Fonte: Manual InTechno

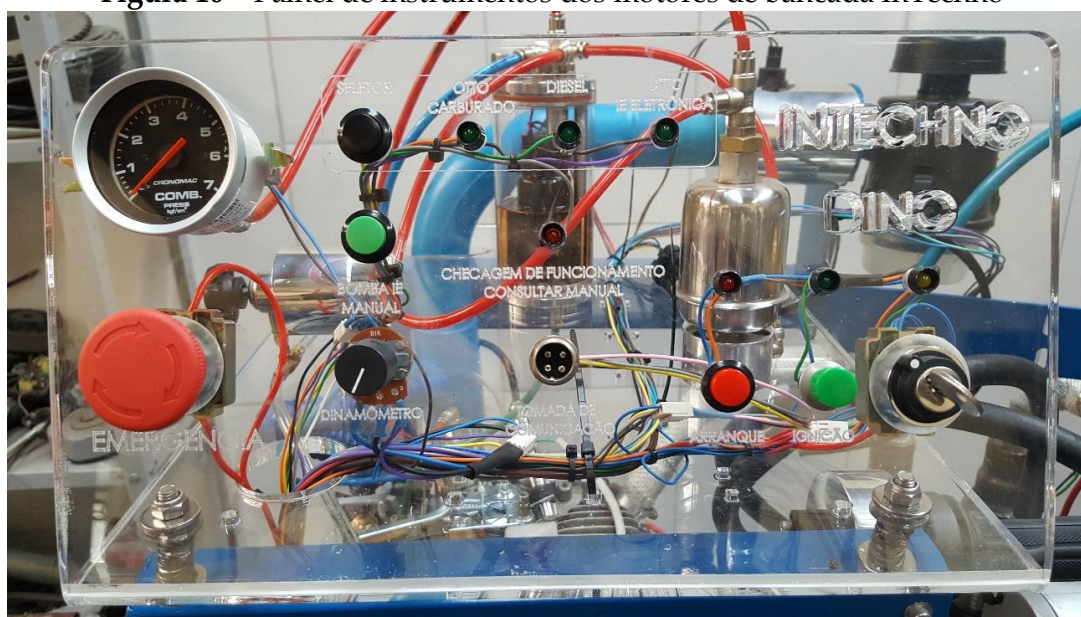
Figura 9 – Dinamômetro hidráulico acoplado ao motor ciclo Otto



Fonte: Manual InTechno

2. Deve-se conectar o cabo na tomada de comunicação do painel InTechno, o USB no computador e abrir o programa InTechno.

Figura 10 – Painel de instrumentos dos motores de bancada InTechno



Fonte: Arquivos dos pesquisadores

3. Deve-se verificar se o botão de emergência está desativado; caso esteja ativado, deve-se girá-lo no sentido horário.

4. Deve-se girar a chave no sentido horário e aguardar o sistema iniciar (o LED da checagem de funcionamento piscará quatro vezes).

5. Deve-se escolher qual o tipo de motor (Otto carburado, Diesel, Otto eletrônico) no botão seletor. Caso queira utilizar o motor Otto com injeção eletrônica, primeiramente se deve selecionar o Otto carburado, depois fechar o carburador e seguir os próximos passos até que o combustível que esteja dentro do carburador se esgote; após ter feito isso, deve-se selecionar o Otto eletrônico e seguir os passos novamente.

6. Deve-se ativar o botão ignição, EXCETO para o Diesel; caso esteja ativado e o motor escolhido for o Diesel, deve-se desativá-lo.

7. Caso o dinamômetro esteja acionado, deve-se desativá-lo, girando para o sentido anti-horário.

8. Com o acelerador levemente tracionado, deve-se pressionar o botão arranque até que o motor esteja em funcionamento. Caso necessário, deve-se acionar o afogador.

9. Para desligar o motor, deve-se girar a chave no sentido anti-horário.

Feito isso, foi iniciada a fase de testes e a coleta de dados, manipulando o motor e analisando seu comportamento. Foi manipulado com carburador e posteriormente com a injeção eletrônica, com intuito de desenvolver diferentes tipos de módulos.

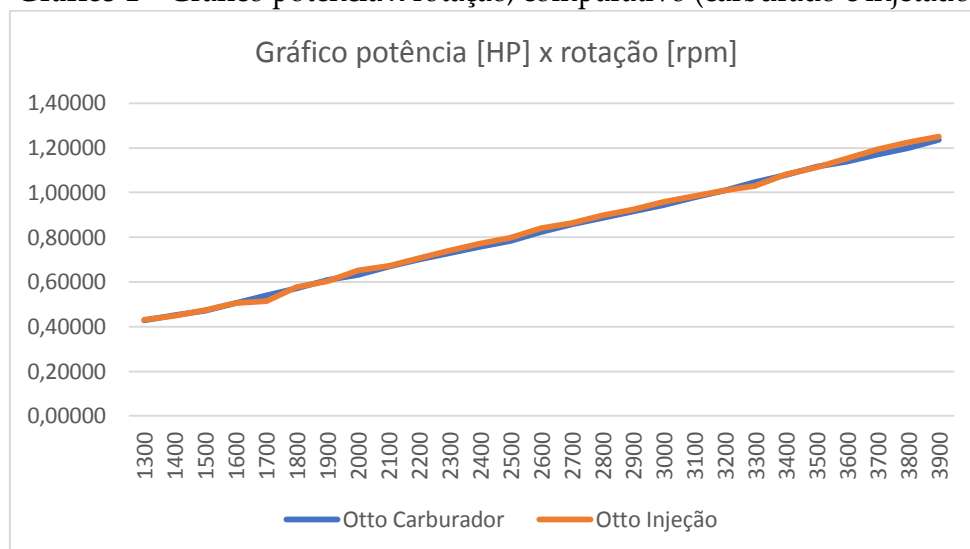
Foram realizados os testes no laboratório de sistemas térmicos do UNIPAM, utilizando o motor ciclo Otto da InTechno da bancada com dinamômetro. O motor foi utilizado tanto com carburador, quanto com injeção eletrônica; além disso, a injeção eletrônica foi manipulada, com objetivo de obter um programa de configuração da ECU (módulo ou mapa de injeção) específico para cada tipo de curva característica, um módulo para obter maior eficiência na curva de torque e consumo de combustível e

menor poluição. Esse módulo pode ser utilizado no perímetro urbano ou “overdrive” em estradas. Pode-se também desenvolver um módulo focado na curva de potência, o qual pode ser utilizado para facilitar ultrapassagens e obter um veículo mais agressivo, com respostas rápidas.

4 RESULTADOS

Após o estudo do motor de bancada a gasolina InTechno, disponível no laboratório de sistemas térmicos do UNIPAM, e a revisão bibliográfica, foi desenvolvido apenas um módulo: quando o acelerador fosse acionado com 30% ou menos, seria focado na curva de torque, com objetivo de obter menor consumo e menor poluição, e quando fosse acionado acima dessa porcentagem, fosse focado para a curva de potência, desenvolvendo melhor desempenho para o motor.

Gráfico 1 – Gráfico potência x rotação, comparativo (carburado e injetado)



Fonte: Dados da pesquisa

5 CONCLUSÕES

Com base no gráfico potência x rotação, fazendo um comparativo entre a potência no motor carburado e injetado, pode-se concluir que houve ganho de potência em rotações altas e uma pequena perda de potência em baixas rotações, em que o mapeamento foi realizado com foco na economia de combustível. O uso da injeção eletrônica sem nenhuma modificação produz resultados muito próximos do Otto carburado; conforme o gráfico, são praticamente iguais; porém, com o mapa de injeção alterado, é possível obter vantagens significativas nas curvas características, como pode ser observado no Gráfico 1.

Conclui-se que é possível desenvolver um mapeamento misto que entregue um motor mais eficiente e potente ao ser acelerado e mais econômico e menos poluente quando utilizado em acelerações baixas (abaixo de 30%), utilizando a injeção eletrônica para a otimização das curvas características.

REFERÊNCIAS

- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Projeções e estimativas da população do Brasil e das Unidades da Federação**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao>. Acesso em: 05 mar. 2018.
- DENATRAN (Departamento Nacional de Trânsito). **Frota de Veículos**. Disponível em: <http://www.denatran.gov.br/estatistica/237-frota-veiculos>. Acesso em: 5 mar. 2018.
- BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2012. v. 1.
- BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2012. v. 2.
- WIKIPÉDIA. **Desenvolvido pela Wikimedia Foundation**: apresenta conteúdo enciclopédico. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Carburador>. Acesso em: 26 fev. 2018.
- VARELLA, Carlos Alberto Alves. **Estimativa da potência dos motores de combustão interna**. Rio de Janeiro, 2010. v. 154. Apostila.
- VARELLA, Carlos Alberto Alves. **Histórico e desenvolvimento dos motores de combustão interna**. Rio de Janeiro, 2006. v. 154. Apostila.
- MILHOR, Carlos Eduardo. **Sistema de desenvolvimento para controle eletrônico dos motores de combustão interna Ciclo Otto**. Dissertação (Mestrado), São Carlos, 2002.
- TRUOSOLO, Marcel Esturari. **Sistema de injeção eletrônica multiponto**. São Caetano do Sul, 2012. Disponível em: <https://maua.br/files/monografias/completo-sistema-injecao-eletronica-multiponto-182259.pdf>. Acesso em: 09 fev. 2018.