

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

Nota final
9,5 (nove e cinco)

[Signature]
22/01/04

Controle Eletrônico de Injeção de Álcool como combustível adicional para um Motor Turbo-Diesel

Alexandre Edgard Trinhain
Eduardo Marconcim Pfeiffer

Orientador: Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

São Paulo
2003

Dedicatória

À nossa família pela paciência, investimento e todo o apoio prestado durante o tempo de permanência no curso de graduação da Escola Politécnica.

Aos nossos colegas de curso Marcos Augusto Kiyan, Wilson Hsu, Marco Antônio Poli Jr., Frederico Augusto de Melo Prado e Alessandra Melikuti Zagni pelo apoio durante as fases mais difíceis do curso.

Agradecimentos

Agradecemos aos engenheiros Leônidas Hildebrand e Marcelo Feitosa pelo fornecimento de informações sem as quais não seria possível a realização deste trabalho.

Agradecemos também ao Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury por aceitar a tarefa de se tornar nosso orientador neste projeto, ao Prof. Lucas Moscato pela coordenação geral dos trabalhos e a todos os nossos professores do curso de graduação pelo empenho em zelar pela qualidade de nossa formação técnica como engenheiros.

Resumo

O escopo deste trabalho consiste no projeto de um controle de injeção de álcool no coletor de admissão de um motor diesel cujo conceito objetiva promover uma redução no consumo de diesel para uma mesma carga sobre o motor, reduzindo, assim, a quantidade de óxidos de nitrogênio e particulados emitidos pelos gases de escape provenientes da queima de combustível no interior da câmara do motor.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

1. Introdução	6
2. Combustíveis	7
2.1. O Uso do Álcool como combustível	7
2.2. Histórico do PROÁLCOOL	8
2.3. Uso da mistura álcool-diesel na Índia	10
3. Características dos motores diesel	12
3.1 Características de um sistema de injeção diesel	16
4. O Sistema de Injeção de Álcool em Motor Diesel	17
5. Detalhes do Projeto	18
5.1 Regulagem do sistema de injeção de etanol hidratado	21
6. Bibliografia	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Instalação dos bicos injetores no coletor	18
Figura 2 – Posição da bomba injetora de diesel	19
Figura 3 – Posição do sensor de pressão na câmara.....	19
Figura 4 – Posição do sensor de gases para análise	20
Figura 5 - Sistema monoponto de injeção eletrônica. (BOSCH, 2001).....	21
Figura 6 - Bomba elétrica de combustível. (BOSCH, 2001).....	22
Figura 7 - Regulador de pressão de combustível. (BOSCH, 2001)	23
Figura 8 - Válvula injetora de combustível. (BOSCH, 2001).....	23
Figura 9 - Esquema elétrico do gerador de pulsos com osciloscópio.....	24
Figura 10 - Osciloscópio mostrando comprimento onda do controlador de vazão	25
Figura 11 - Osciloscópio mostrando a variação com alteração da frequência	25
Figura 12 - Osciloscópio mostrando a variação com alteração do período	26
Figura 13 - Osciloscópio mostrando variações na frequência e período	26
Figura 14 - Foto do protótipo do controlador de vazão de álcool.....	27
Figura 15 - Gráfico de vazão do controlador.....	29

1. Introdução

A preocupação em utilizar o álcool (etanol ou metanol) como combustível para motores de combustão interna de êmbolos (MCIE), em substituição total ou misturado aos derivados de petróleo, não é novidade. No Brasil, a preocupação mais séria com a questão da substituição de combustíveis fósseis por oriundos de biomassa vegetal, efetivou-se com o Decreto 76593, de 14/11/1975, da Presidência da República, instituindo o Programa Nacional do Álcool - PNA. Esse programa, também conhecido como PROÁLCOOL, desencadeou um dos mais vigorosos avanços tecnológicos, em todo o mundo, tanto no setor agroindustrial de produção de álcool, como no segmento industrial automotivo. Apesar da enorme contribuição dada ao país, o PROÁLCOOL não foi objeto de políticas governamentais implementadoras de atualizações/revisões e com o passar do tempo, as fábricas de automóveis voltaram a fabricar cada vez menos veículos a álcool, cessando atualmente o interesse em projetos de P&D.

Na década de 80 houve tentativas de se utilizar álcool como substituto parcial em motores diesel. Os resultados não foram satisfatórios pela dificuldade em se vaporizar o álcool no coletor de admissão.

Recentes pesquisas obtiveram bons resultados ao adicionar o sistema de turbo-alimentação ao circuito, aproveitando a energia decorrente da compressão do ar de admissão para auxiliar no processo de vaporização do álcool no interior do coletor de admissão.

O controle da injeção de álcool neste tipo de motor será o escopo deste trabalho. Nessa primeira parte serão abordados dados relativos ao uso de combustíveis, focando-se o histórico do uso do álcool no Brasil e o uso da mistura álcool-diesel na Índia.

2. Combustíveis

2.1. O Uso do Álcool como combustível

O Álcool tem sido usado como combustível para motores de combustão interna desde a invenção destes. Estudos a respeito do uso do álcool como combustível foram publicados em 1907 e pesquisas mais detalhadas foram conduzidas na década de 20 e de 30. Historicamente, o nível de interesse no uso do álcool como combustível seguiu ciclos de falta de combustível ou queda no preço dos insumos dos quais o álcool é derivado, como a cana-de-açúcar.

As propriedades dos álcoois metílico, etílico e butílico são comparadas com octano (gasolina de alta qualidade) e hexadecano (diesel de alta qualidade) na tabela 1. Nota-se que o octano e hexadecano (derivados do petróleo) têm pontos de ebulição mais elevados, menores calores latentes e são insolúveis em água. Os álcoois se tornam mais parecidos com os combustíveis derivados do petróleo conforme seu peso molecular aumenta. Além disso, os álcoois queimam mais completamente, aumentando a eficiência da combustão.

O álcool metílico tem a menor energia de combustão de todos os combustíveis citados. Entretanto, tem também a menor relação estequiométrica de ar-combustível. Portanto, um motor queimando álcool metílico como combustível seria o mais potente. Também é possível utilizar uma razão maior de álcool etílico e metílico na gasolina e aumentar a razão de compressão do motor. Isto aumentaria a eficiência da conversão de energia potencial de combustão em potência.

Há, no entanto, muitas desvantagens no uso de álcool, principalmente álcool etílico e metílico. Embora esses álcoois, quando utilizados próximo a sua razão estequiométrica ar-combustível produzam mais potência, uma

maior quantidade de combustível é necessária para produzir uma determinada potência. No caso de um automóvel, mais combustível é necessário para cada quilômetro rodado.

2.2. Histórico do PROÁLCOOL

Após seus 15 anos de funcionamento, as análises e os estudos sobre o Programa Nacional do Alcool PROÁLCOOL são em número elevado e procuram analisá-lo em seus diversos aspectos: econômicos, técnicos, tecnológicos, políticos, etc. Algumas delas, procuram realçar as qualidades do Programa, outras, suas principais contradições e críticas

O PROÁLCOOL, criado em novembro de 1975, através do Decreto-Lei nº 76.593/75, nasceu da necessidade de "salvar" a indústria do açúcar, em crise face aos baixos preços do açúcar no mercado internacional e sem condições objetivas de escoar a sua produção.

Progressivamente, outros setores da economia brasileira passaram a apoiar o Programa: o Governo, através do setor energético, face à deterioração do balanço de pagamentos com as importações de petróleo; o setor automobilístico, que em 1979, assinou um protocolo de intenções com o Governo para a produção de veículos movido a álcool, e o setor produtor de bens de capital, particularmente os fabricantes de usinas e destilarias.

Diante das evidências rapidamente apresentadas, o PROÁLCOOL, em sua primeira fase (1975-79), não chegou a se constituir em um programa energético "strictu sensu", servindo apenas para viabilizar o escoamento dos excedentes de açúcar, cuja exportação tinha sido suspensa por não compensar.

Vale a pena mencionar que nos anos que se seguiram ao primeiro choque do petróleo, em 1973, os preços do petróleo apresentaram uma relativa estabilidade no mercado internacional, chegando mesmo a declinar em termos reais. Por outro lado, entre primeiro de janeiro de 1975 e 31 de

dezembro do mesmo ano, os preços do açúcar caíram de 990 a 300 dólares a tonelada métrica, contrastando com os níveis extremamente elevados dos seus preços em 1974, quando chegou a ser cotado a mais de 1500 dólares a tonelada métrica.

Tendo, desde o ano de 1976, recebido investimentos em ordem sempre crescente por parte do Governo Federal, a ponto de, em 1981 e 1984, ter ultrapassado a cifra de 1,0 (um) bilhão de dólares (1.636,4 milhões de dólares, em 1981, e 1.131,3 milhões de dólares em 1984), o PROÁLCOOL, a partir de 1985, vem sofrendo uma redução significativa nos investimentos destinados ao seu desenvolvimento (153,9 milhões de dólares em 1985, 84,6 milhões de dólares em 1986, 312,6 milhões de dólares em 1987), caracterizando um quadro típico de crise setorial.

A justificativa utilizada pelo Governo Federal para que tal fato ocorra é que, os motivos que, no passado, levaram à criação e "decolagem" do PROÁLCOOL, não existem mais no presente ou, se existem, não justificam mais o grande aporte de recursos financeiros antes destinados ao Programa. Quando foi criado em 1975, a crise do petróleo ameaçava levar o preço do barril do combustível a níveis bem altos. Um estudo do Banco Mundial, divulgado à época, indicava que o barril de petróleo, cujo preço histórico era de 3 dólares, poderia vir a custar 90 dólares. O PROÁLCOOL foi projetado, então, como um investimento rentável, caso o combustível da cana tivesse que concorrer com a gasolina, retirada de barris de petróleo vendidos ao preço de 40 dólares cada um, pelo menos. Caso o petróleo custasse menos do que isso, o Programa seria um despropósito econômico, pois o custo real de um barril de álcool ficava em torno de 45 dólares, no início de 1979. A estabilização no preço do barril de petróleo e, mesmo a sua queda em termos reais, verificada a partir do início dos anos oitenta e, o aumento do preço internacional do açúcar, colocaram em xeque a continuidade do Programa.

Com a desaceleração dos investimentos, a crise não tardou a chegar. Esta foi marcada pela falta intermitente do produto nas principais cidades do país, começou em abril de 1989 e não poupou nem mesmo os postos de

abastecimento da região de Ribeirão Preto e Sertãozinho, que concentra 40% da produção de álcool do Estado de São Paulo, responsável pela produção de 7 bilhões dos 11 bilhões de álcool que são feitos anualmente no Brasil.

2.3. Uso da mistura álcool-diesel na Índia

Apesar dos méritos comprovados do uso do etanol como um combustível seguro, de alta performance e, acima de tudo, renovável, por quase 75 anos, infelizmente a Índia não demonstrou vontade política para aplicar em larga escala essa solução para veículos automotores.

No meio da década de 1930, misturas de gasolina e álcool foram utilizadas no serviço de ônibus municipal de Bangalor como uma medida experimental. Foi constatado que a Índia poderia gradualmente implementar a tecnologia de motores a álcool – inicialmente utilizando uma mistura de álcool e gasolina e, subseqüentemente, como um combustível em substituição à gasolina e ao diesel.

É interessante salientar que a Índia foi o primeiro lugar a reconhecer os méritos de se utilizar etanol em motores diesel. O sistema duplo de combustível, desenvolvido no Instituto Indiano de Ciências em Bangalor, no início da década de 1950, foi o foco do primeiro trabalho de literatura técnica publicado que tratou da mistura de álcool e diesel.

Essencialmente, esse método envolve a utilização de duas vias diferentes para os dois combustíveis, já que, ao contrário da gasolina, o álcool não se mistura ao diesel sem o auxílio de um emulsificante. O álcool era suprido através de um carburador, enquanto apenas uma pequena quantidade de diesel é injetada através do sistema habitual de injeção.

O óleo combustível injetado, em menor quantidade, serve apenas como uma fonte de ignição. Escolhendo-se adequadamente o combustível a ser injetado (óleo diesel ou óleo vegetal), uma grande quantidade de etanol –

40 a 90% - pode ser utilizada nesse método. Essa técnica pioneira não conseguiu uma aceitação generalizado pois a oferta de petróleo aumentou e não havia restrições ambientais naquele momento quanto ao uso de diesel.

A experiência pioneira no Instituto de Ciências em Bangalor promoveu uma série de investigações em vários lugares na Índia, como Universidades e centros de pesquisa (como o Instituto Indiano de Petróleo). Há um entendimento generalizado quanto às vantagens desse método, como o aumento de 10 a 15% na potência devido à uma melhor utilização do ar, aumento da eficiência térmica e uma menor densidade de fumaça dentro de certas faixas de carga e velocidade.

O que é também significativo é o fato de o álcool a ser utilizado não precisar ser anidro, ao contrário das misturas de álcool em motores à gasolina. Isso é vantajoso pelo fato do álcool anidro ser caro. A presença de água no álcool na realidade provou-se vantajosa pois possibilitou a redução, juntamente com as temperaturas baixas de combustão causadas pelo alto calor latente do álcool, das emissões de óxido nítrico, características dos motores a diesel.

Os motores veiculares a diesel são motores de velocidade variável e, para se ter a máximo rendimento da fumigação, o etanol somente deve ser fumigado no sistema de indução de uma forma controlada após a certificação da carga e velocidade nas quais ocorre baixa emissão de fumaça e alta eficiência volumétrica e térmica. Em 1980, pesquisadores do Instituto de tecnologia de Madras embarcaram em um projeto que aplicava o etanol por fumigação num veículo à diesel e conduziram testes de percurso.

A técnica por trás desse veículo estava num condutor especial de ar e álcool, projetado após extensivos testes em laboratório utilizando-se um dinamômetro.

A novidade desse dispositivo reside no fato de que, sob condições de partida e de baixa velocidade, não há fluxo de álcool para o motor e o veículo

se comporta como um veículo normal à diesel. O fluxo de álcool só começa a ser liberado quando a velocidade pré-determinada, compatível com a eficiência e com os dados coletados pelos testes no dinamômetro, for alcançada.

A velocidades maiores que essa, há um fluxo controlado de uma quantidade pré-determinada de álcool para que sejam alcançados os parâmetros de eficiência e redução de poluentes desejados. Essa técnica permite que o veículo opere somente com diesel em caso de problemas com o suprimento de álcool.

Testes de rodagem com esse veículo indicaram que até 45% de substituição de óleo diesel foi possível sob condições transientes. Deve ser lembrado que veículos utilizando diesel e álcool como combustível podem ser construídos sem a necessidade de se realizar grandes alterações nas suas peças, com a exceção de um tanque a mais para o armazenamento de álcool. Essa solução poderia ser adotada para a frota de veículos à diesel sem grandes mudanças no suprimento de combustíveis ou a infra-estrutura de distribuição.

Esse sistema funcionaria com máxima substituição de diesel por álcool em locomotivas, que se utilizam de grandes velocidades e carga constante por longas distâncias.

3. Características dos motores diesel

O desenvolvimento dos motores diesel ocorreu devido a algumas características particulares desse tipo de motor que o diferencia dos demais existentes. Uma dessas características é a maneira como o motor diesel transforma a energia química do combustível em energia interna do cilindro (taxa de liberação de calor).

As características vantajosas do diesel se devem, principalmente, à utilização de um sistema de injeção e altas taxas de compressão que

ocorrem no processo, necessárias para que ocorra combustão completa pela compressão do combustível fornecido.

Através do sistema de injeção, é possível estabelecer o início da alimentação de combustível, em cada ciclo, o quão próximo se queira do final da etapa de compressão. Isso, por sua vez, favorece as tentativas de redução da ocorrência de ignição prematura e detonação, apesar da natureza quase isocórica e instantânea da combustão que também caracteriza os motores de ignição por faísca. Assim, é possível controlar a formação de pontos quentes dentro do volume do cilindro, que agem como geradores de pré-ignição, tornando o tempo de propagação de ondas de pressão, geradas pela movimentação da carga dentro do cilindro, insuficiente para ter uma amplitude elevada, não ocasionando, assim, o comprometimento do início efetivo desejável da combustão.

O sistema de injeção, considerando que é comum haver excesso de ar disponível para a combustão, pode permitir condições de controle mais favoráveis sobre seu funcionamento em situações adversas, tais como a marcha lenta e a plena potência. Podem ser obtidas reduções nos limites das relações ar-combustível, em função do combustível diesel a ser utilizado, que se encontram praticamente entre 50:1 e 20:1. Isto faz com que o motor diesel seja ideal para a sobrealimentação.

De uma forma simplificada, pode-se dizer que a combustão em um motor diesel de ignição por compressão é dividida em quatro etapas:

- Na primeira etapa ocorre atraso de ignição do combustível, que corresponde ao tempo acumulado nos períodos de atrasos físico e químico;
- A segunda etapa é caracterizada pela rápida elevação da pressão ocasionada pela ignição da mistura de ar e vapor de combustível formada no período de atraso de ignição;

- Na terceira etapa ocorre a elevação controlada da pressão obtida pela queima da mistura formada posteriormente ao início da ignição, regulada de forma parcial pela taxa de injeção;
- E, finalmente, na quarta etapa ocorre queima no tempo de expansão, após o término da injeção, do combustível restante na câmara de combustão, devido à maneira não uniforme que se distribui nesta, ainda no período de atraso da ignição.

Este período é inserido entre o início da injeção e a obtenção das condições adequadas para a reação ocorrer. Nele, o combustível é atomizado, vaporizado, misturado ao ar e tem sua temperatura elevada para a condição de início de reação.

Já o atraso químico é o período que imediatamente sucede o atraso físico, compreendido desde o início lento da reação até o instante em que a inflamação se torna efetiva.

Essas observações permitem demonstrar que existe uma grande interdependência entre o ciclo motor e o sistema de injeção. Através delas, torna-se possível a avaliação da importância e o grande empenho concentrado no desenvolvimento desse componente pela sua influência no desempenho dos motores diesel.

Pelo fato de ocorrer combustão espontânea, através da injeção de combustível no ar comprimido, esse tipo de motor exige um projeto no qual sejam utilizadas taxas de compressão maiores do que aquelas habitualmente utilizadas nos motores de ignição por faísca. Desta forma, esperam-se obter melhores rendimentos térmicos. Realmente, são obtidas eficiências próximas às aquelas ocorridas em ciclos padrão-ar teóricos. Isso se deve à qualidade de ignição (número cetano) dos combustíveis modernos quanto à incessante procura por uma maneira de minimizar o efeito das irreversibilidades intrínsecas ao processo de combustão.

As altas taxas de compressão, requeridas para a obtenção das temperaturas de auto-ignição da carga podem exigir uma construção mais robusta do motor. Mas, ao mesmo tempo, fazem com que esse tenha melhores características de segurança de operação, durabilidade e versatilidade.

Somaram-se a várias das características importantes aqui citadas evoluções conseguidas com a pesquisa, desenvolvimento e uso de novos materiais de construção mecânica que lhe atribuem melhor característica de desempenho e relação peso-potência.

Pode-se dizer que expectativas favoráveis ao uso desses motores foram confirmadas com o amadurecimento da geração dos chamados motores de combustão interna rápidos, ou seja, de altas velocidades angulares de funcionamento.

Para se reduzir a relação peso-potência surgiu a necessidade de tornar a rotação do motor um parâmetro mais significativo na função que otimiza a potência específica.

A ausência de recursos computacionais efetivos na implementação de cálculos elaborados provenientes de considerações fenomenológicas foi um impasse, durante muito tempo, à compreensão e simulação da injeção. Desta forma os projetos de injeção acabavam se baseando, quase que exclusivamente, nas características geométricas e mecânicas de seus componentes. Pode-se dizer que os recursos computacionais com esse propósito só passaram a ser utilizados nas últimas três décadas.

O emprego desses recursos possibilitou o desenvolvimento dos motores diesel rápidos. Foram ainda obtidas otimizações relativas a consumo de combustível e produção de poluentes utilizando-se a simulação computacional, deixando de ser conseguidas unicamente através de análises experimentais.

3.1 Características de um sistema de injeção diesel

Visando uma combustão o mais eficiente possível, independentemente do tempo disponível para se efetuar, um sistema de injeção diesel deve ter determinadas características. A taxa de fornecimento de combustível ao motor no início da injeção não deve ser muito elevada, evitando-se assim um aumento exagerado da pressão no cilindro quando for efetivamente iniciado o processo de combustão, pelo acúmulo de combustível na câmara de combustão durante o período de atraso da ignição e reduzindo o nível de ruído de funcionamento do motor. Após esse período o fornecimento de combustível deve ocorrer seguindo uma taxa crescente, facilitando que as gotículas de óleo diesel, obtidas através de uma boa atomização atinjam os pontos mais remotos da câmara, fazendo com que ocorra a preparação de uma mistura vapor de combustível-ar adequada para a queima.

Deve-se ainda ter um encerramento abrupto da injeção, evitando que grandes gotas e de pequena energia cinética sejam formadas, provocando a geração de fuligem, pela quantidade insuficiente de ar presente nas proximidades do injetor que é incapaz de queimar completamente essas partículas, que provavelmente seria expelida na atmosfera, gerando poluição.

Assim sendo, conclui-se que o sistema de injeção deve ser composto por elementos que lhe permitam iniciar e controlar todo o processo de combustão, permitindo que ocorra uma dosagem, seguindo uma curva de injeção no tempo, de quantidades adequadas de combustível e promovendo sua atomização e distribuição na câmara de combustão.

4. O Sistema de Injeção de Álcool em Motor Diesel

O sistema em questão consiste basicamente na injeção de etanol hidratado no interior do coletor de admissão de ar, totalmente vaporizado, utilizando a energia proveniente do turbo-compressor para vencer o calor latente de vaporização do etanol e vaporizá-lo completamente no interior do coletor de admissão. Este processo ocorre pela saturação do etanol que realiza uma troca de calor adiabática com o ar admitido pelo motor. Isso faz com que o etanol seja vaporizado ao mesmo tempo em que diminui a temperatura do ar admitido na mistura, diminuindo portanto a sua densidade e, conseqüentemente, aumentando a potência do motor, como ilustra a equação abaixo:

$$\text{Potência} = \eta_{\text{mec}} \cdot \eta_{\text{term}} \cdot \eta_{\text{vol}} \cdot (V_d \cdot \text{Rpm} / 120) \cdot (H_{\text{comb}} / \lambda \cdot \text{esteq}) \cdot \rho_{\text{ar}}$$

O sistema dispensa o uso de um sistema auxiliar de partida a frio por funcionar no ciclo Diesel. Não existe sistema de ignição como no ciclo Otto, o que torna o sistema de controle ainda mais barato.

5. Detalhes do Projeto

A quantidade de combustível é controlada pela vazão das válvulas injetoras instaladas no coletor de admissão, como ilustra a Fig. 1:

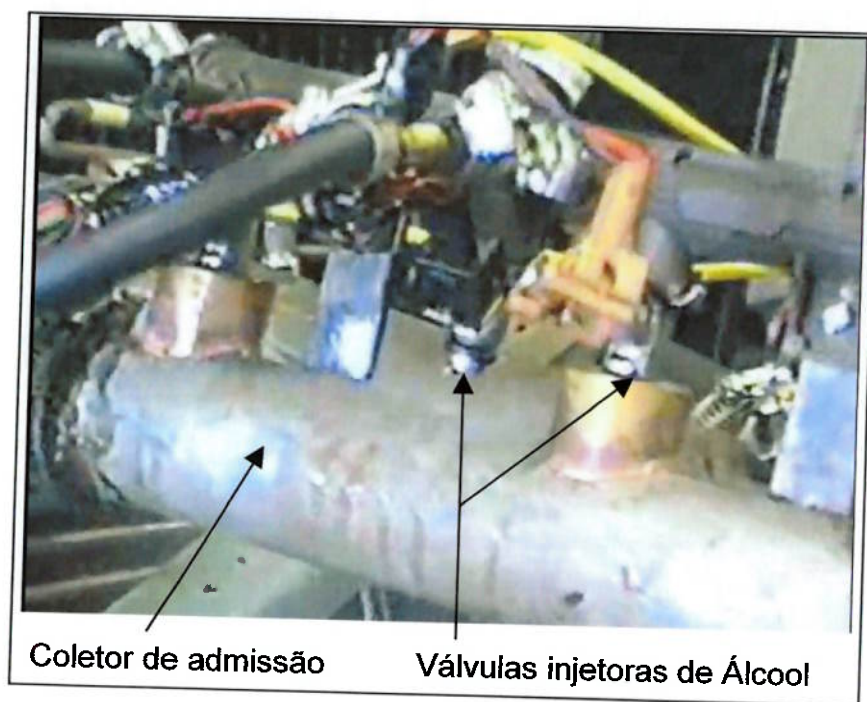
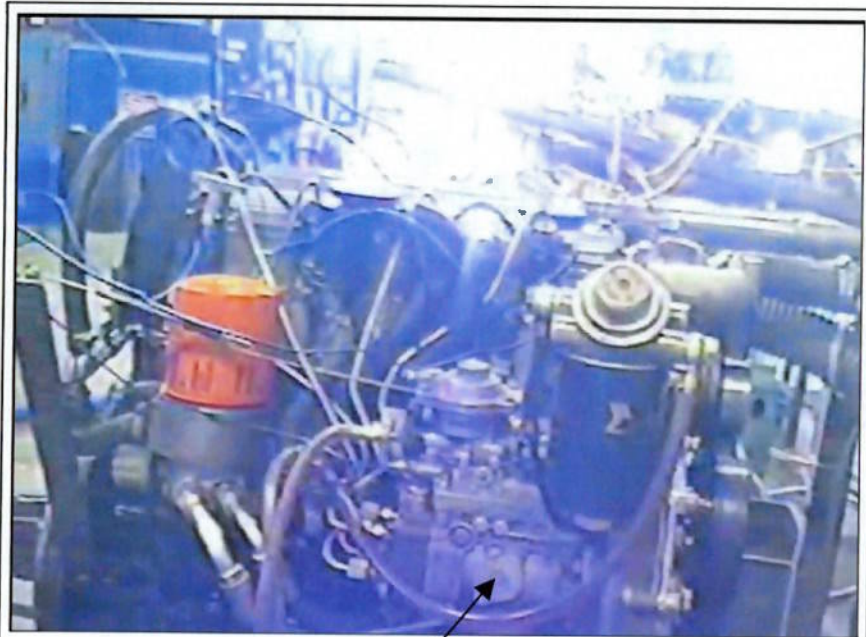


Figura 1 – Instalação dos bicos injetores no coletor



Bomba de Diesel

Figura 2 – Posição da bomba injetora de diesel



Sensor de Pressão na Câmara

Figura 3 – Posição do sensor de pressão na câmara

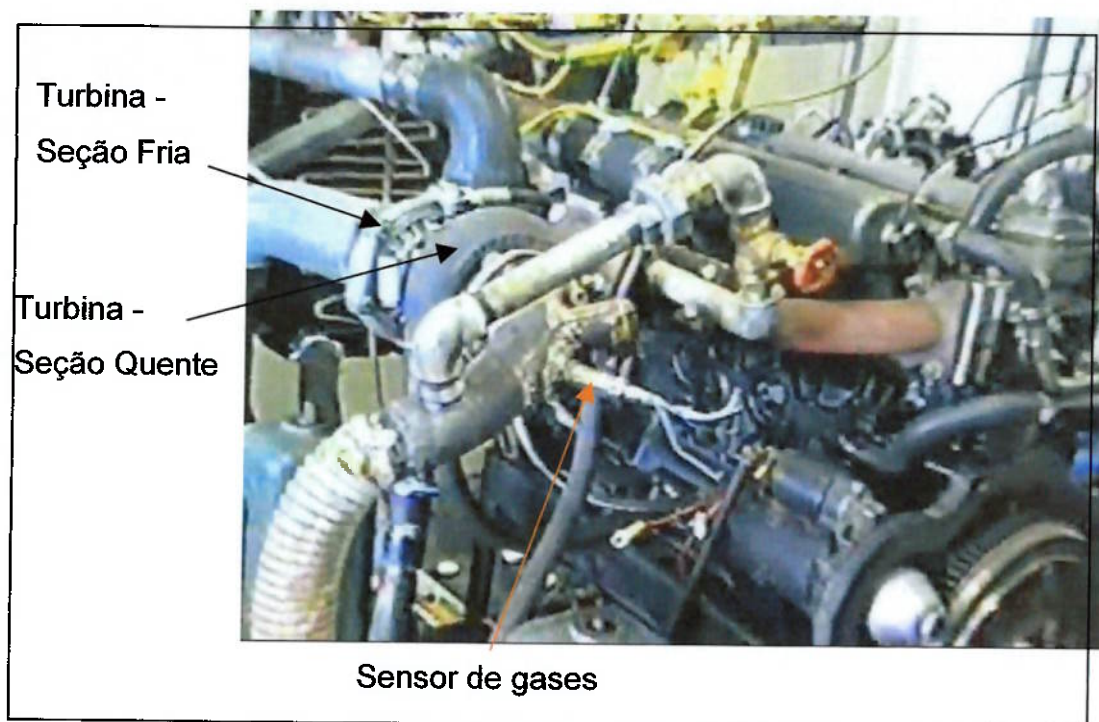


Figura 4 – Posição do sensor de gases para análise

A vazão da válvula é comandada pelo controlador, que recebe como sinais de entrada a vazão de ar admitido (sensor resistivo), a vazão na bomba de diesel, a rotação do motor (sensor de rotação), a pressão na turbina, o sinal da sonda lambda e o ponto de detonação (sensor de detonação) para regular o atraso do ponto de injeção de combustível na câmara.

Todos estes parâmetros de entrada são bem conhecidos na indústria automobilística, não havendo nenhuma novidade técnica com relação a um controlador convencional para motores turbo-alimentados.

Estes parâmetros, combinados, irão gerar como saída os intervalos de tempo de abertura e fechamento das válvulas injetoras instaladas no coletor de admissão, bem como a vazão da bomba injetora de diesel.

Basicamente, portanto, o sistema consiste em regular a vazão de combustível mediante a medição dos parâmetros de entrada, com especial atenção para a vazão de ar, vazão na bomba de diesel e a rotação do motor.

5.1 Regulagem do sistema de injeção de etanol hidratado

A injeção eletrônica de combustível pode ser feita por um bico injetor para todos os cilindros (monoponto) ou por um bico injetor para cada cilindro (multipoint). O acionamento é efetuado através de impulsos elétricos, enviados por um módulo eletrônico de controle, que recebe sinais de alguns sensores estrategicamente colocados, que indicam a quantidade exata de combustível que a(s) válvula(s) injetora(s) deve(m) injetar para a otimização do funcionamento do motor. O combustível é enviado à(s) válvula(s) injetora(s) por uma bomba elétrica, que mantém sua pressão controlada através da válvula reguladora de pressão (BOSCH, 2001).

Este experimento utilizou o sistema monoponto, cujo esquema está mostrado na figura 5.

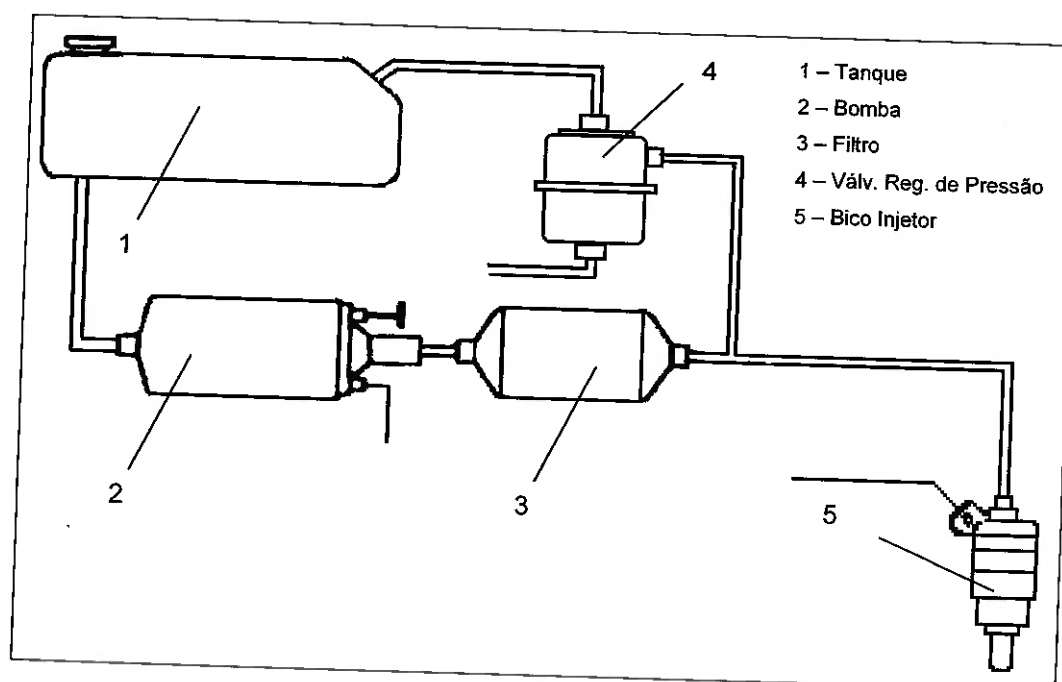


Figura 5 - Sistema monoponto de injeção eletrônica. (BOSCH, 2001)

Conforme BOSCH (2001), quando se dá a partida no veículo, os pistões do motor sobem e descem. No movimento de descida, é produzida no

coletor de admissão uma aspiração (vácuo), que aspira ar, chegando até os cilindros do motor.

A unidade de comando, por sua vez, permite que as válvulas de injeção injetem a quantidade de combustível ideal para o volume de ar admitido, gerando a relação ar/combustível que é chamada de mistura.

Quanto mais adequada a mistura, melhor o rendimento, maior a economia e menor a emissão de gases poluentes.

O combustível é sugado do tanque através de uma bomba elétrica, que fornece o combustível sob pressão a um tubo distribuidor onde estão fixadas as válvulas de injeção.

A bomba fornece mais combustível do que o necessário, a fim de manter no sistema de combustível a pressão necessária para todos os regimes de funcionamento do motor. O excedente retorna ao tanque. A figura 6 ilustra uma bomba de combustível.



Figura 6 - Bomba elétrica de combustível. (BOSCH, 2001)

O regulador de pressão mantém o combustível sob pressão em todo o circuito de combustível, inclusive nas válvulas de injeção. Ele garante uma pressão uniforme no sistema de combustível em todos os regimes de funcionamento do motor.

Quando a pressão regulada é ultrapassada, ocorre a liberação de abertura para a tubulação de retorno, onde o combustível retorna para o tanque sem pressão. A figura 7 ilustra um regulador de pressão de combustível.



Figura 7 - Regulador de pressão de combustível. (BOSCH, 2001)

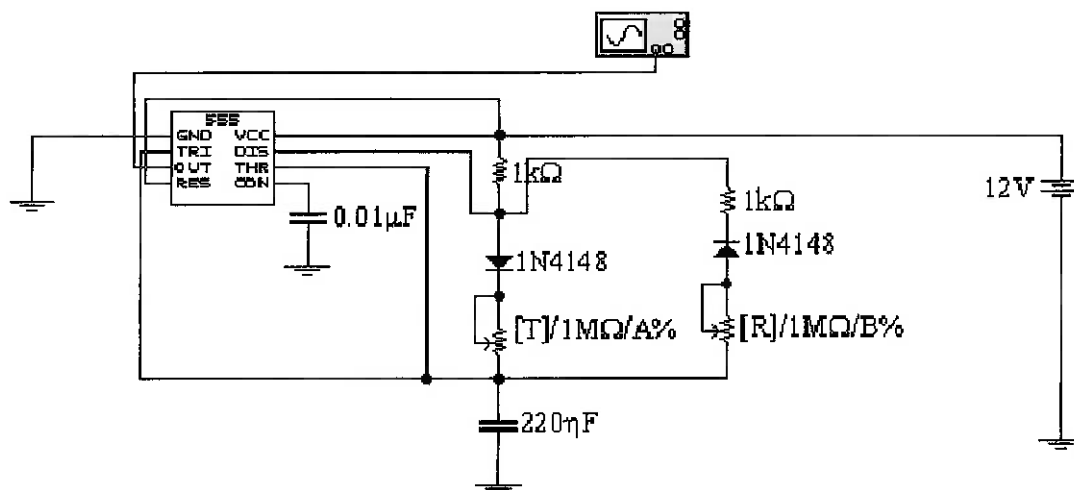
A válvula injetora pulveriza o combustível para o interior do motor. A figura 8 ilustra uma válvula injetora.



Figura 8 - Válvula injetora de combustível. (BOSCH, 2001)

Para medida de volume de álcool etílico hidratado carburante, utilizou-se um gerador de pulsos cujo esquema elétrico está demonstrado na figura 9. Na representação do osciloscópio, os valores A e B foram simulados com o software Electronics Workbench, versão 4.0d. Com esse programa consegue-se incrementar de 1% em 1% as resistências A e B.

Ao se ligar o circuito, o capacitor de 220 μ F é carregado até atingir 2/3 do valor da tensão de alimentação. Ao atingir o valor de 8V, um comparador interno do CI 555 desliga a saída. A seguir, inicia-se o ciclo de descarga do capacitor, até atingir 1/3 do valor de alimentação (4V). Isso é feito ciclicamente.



A regulação do volume de injeção é feita alterando-se a frequência do pulso e o período de abertura do bico injetor, através dos botões A e B do gerador de pulsos, ilustrado na figura 14.

Na figura 10, os valores de A e B foram fixados em 1% de $1M\Omega$, ou seja, valiam $10K\Omega$.

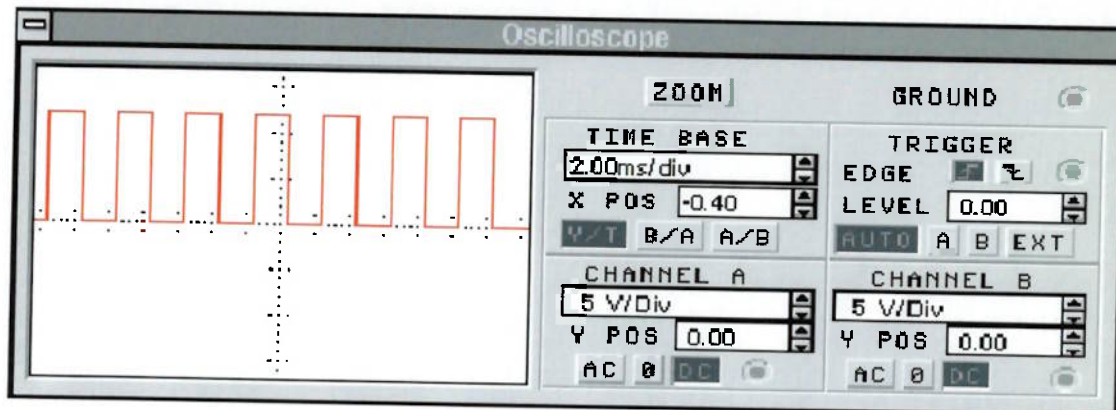


Figura 10 - Osciloscópio mostrando comprimento onda do controlador de vazão

Quando a frequência de pulsação é alterada através da alteração do resistor A, de $10K\Omega$ para $30K\Omega$, mantendo-se constante o período, há modificações no comprimento de onda conforme esquematizado na figura 11. Nesse caso o valor da resistência em B ficou em $10K\Omega$.

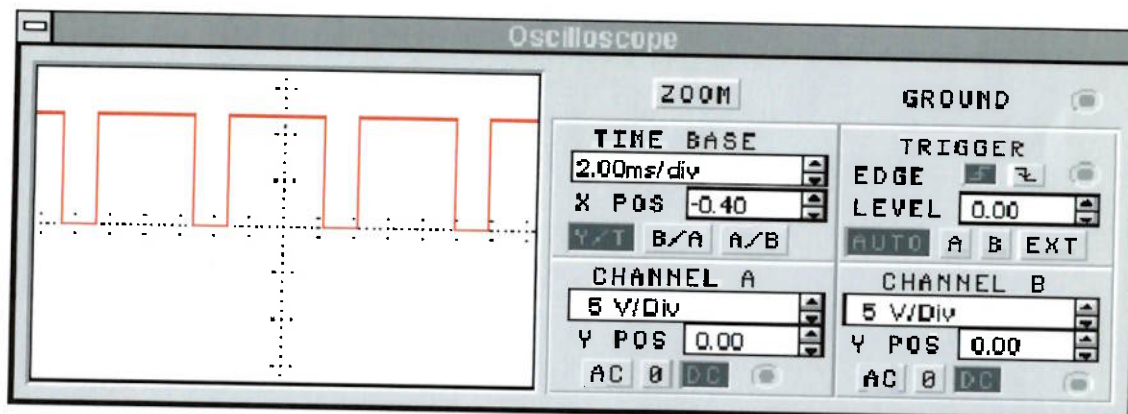


Figura 11 - Osciloscópio mostrando a variação com alteração da frequência

Quando o período de pulsação é alterado, alterando-se o valor da resistência em B de $10K\Omega$ para $30K\Omega$, mantendo-se constante a frequência,

há modificações no comprimento de onda conforme esquematizado na figura 12. Nesse caso o valor da resistência em A ficou em $10\text{K}\Omega$.

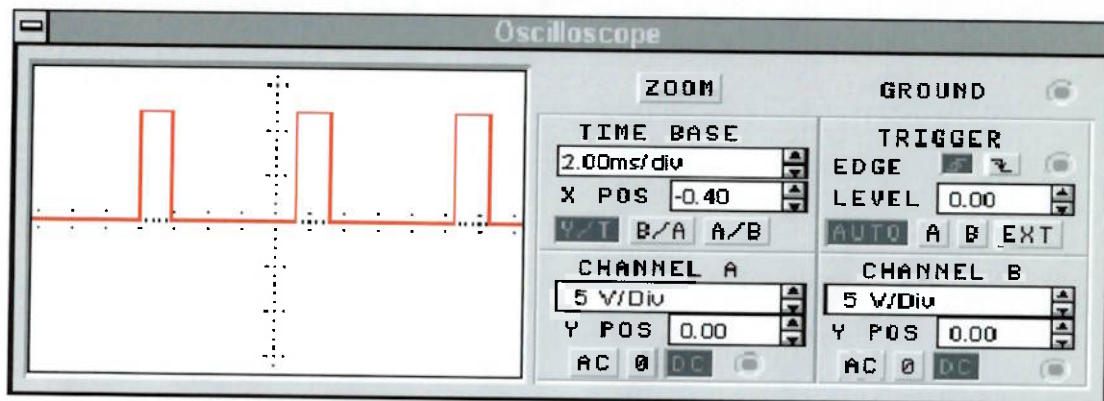


Figura 12 - Osciloscópio mostrando a variação com alteração do período

Alterando-se o período e a frequência em 3%, ou seja, fixando-se as resistências A e B em $30\text{K}\Omega$, o comprimento se comporta conforme mostrado na figura 13.

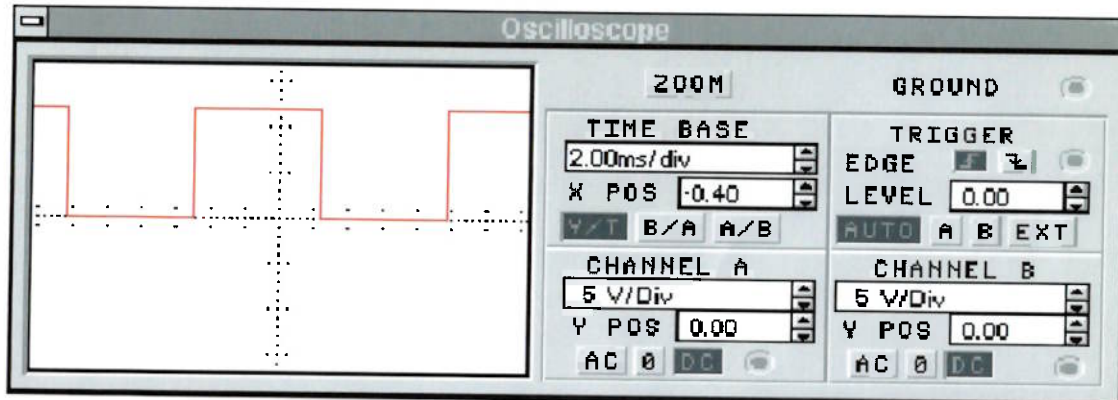


Figura 13 - Osciloscópio mostrando variações na frequência e período

O gerador de pulsos utilizado para a injeção de álcool é mostrado na figura 14.



Figura 14 - Foto do protótipo do controlador de vazão de álcool

Foram testadas várias graduações para verificação dos volumes injetados e observadas as formas de jato produzido pelo bico injetor, com a finalidade de calibrar o aparelho. Efetuaram-se diversas alterações de frequência e período e construiu-se uma tabela com as vazões conseguidas.

A tabela 1 mostra os volumes de álcool obtidos em diversas posições do potenciômetro do controlador:

Graduação	Vazão (l/h)
1	0,44
2	0,57
3	0,58
4	0,64
5	0,80
6	0,86
7	1,02
8	1,16
9	1,21
10	1,30
11	1,31
12	1,34
13	1,36
14	1,50
15	1,59
16	1,94
17	1,99
18	2,12
19	2,45
20	2,87
21	3,02
22	4,21
23	4,59
24	5,02
25	6,80
26	7,34
27	7,38
28	8,24
29	9,05

TABELA 1 – Tabela de vazões de álcool

Os jatos conseguidos foram os seguintes: as posições 1 e 2 produziram um vapor bem fino; as posições 3 e 4 produziram uma névoa

muito fina; da posição 5 até a posição 13, conseguiu-se uma névoa fina. Nas posições 14 e 15, obteve-se uma névoa mais grossa. A partir da posição 27, a névoa se transformou em jato fino. Consegue-se trabalhar abaixo da posição 1 e acima da posição 29, porém para vazões acima de 7 l/h (posição 27), será necessário mais um bico injetor, devido ao jato produzido ser difícil de ser pulverizado.

As posições mostradas na tabela 1 foram obtidas alterando-se posições dos botões A e B do controlador mostrado na figura 10 e não foram obtidas sequencialmente.

A figura 15 mostra o gráfico da vazão obtido com o controlador.

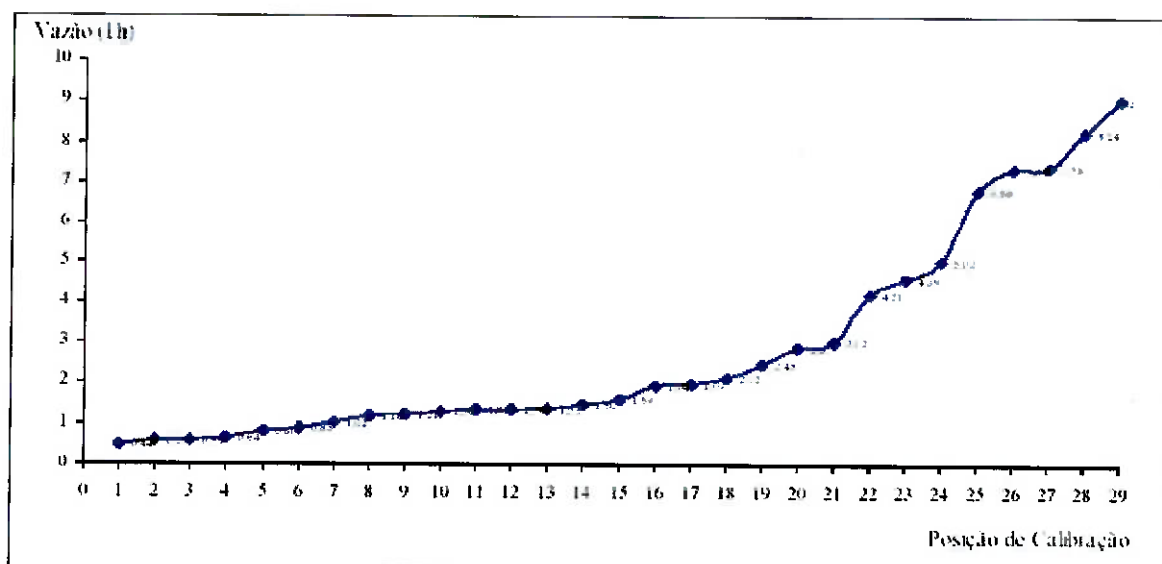


Figura 15 - Gráfico de vazão do controlador

Para injeção de etanol foram utilizados um conjunto de bomba de combustível utilizado no VW Golf GLX ano 1.996; uma válvula reguladora de pressão Bosch, referência 0 280 160 560, que pressuriza a linha de combustível em 3,0 kgf/cm²; um filtro de combustível marca Schuck, modelo SK 109; um distribuidor de combustível utilizado no VW Córdoba ano 1.996 e bicos injetores Magnetti Marelli referência 023 (utilizados no Gol 1000 16V ano 2.000). É importante ressaltar que estavam os 4 bicos colocados no

distribuidor de combustível, porém apenas um estava operante, porque sua vazão era suficiente para abastecer o volume de álcool necessário ao correto funcionamento do motor.

Condição	Rotação (rpm)	Carga (%)	Torque (kgf)	Vel. ar (m/s)	Consumo de diesel (ml/min)	Consumo de Álcool (ml/min)
ORIG	2500	100	15,5	15,80	200	0
BI-COMB	2500	100	15,7	15,96	150	70
ORIG	2500	50	8,0	15,76	150	0
BI-COMB	2500	50	8,0	15,8	110	25
ORIG	2000	100	16,1	13,11	150	0
BI-COMB	2000	100	16,2	13,23	60	90
ORIG	2000	50	8,0	13,42	80	0
BI-COMB	2000	50	8,1	13,53	75	30
ORIG	1500	100	15,3	11,05	100	0
BI-COMB	1500	100	15,2	11,13	60	70
ORIG	1500	50	7,5	11,44	100	0
BI-COMB	1500	50	7,5	11,44	45	36

Tab. 2 - Ensaio em motor diesel bi-combustível - aspirado

Em todo período do ensaio, monitorou-se a pressão de injeção de álcool. Para isso, foi instalado um manômetro na linha do etanol. A pressão manteve-se constante em 3 kgf/cm².

Foram calculadas as massas de álcool necessárias. A vazão foi determinada pelo sistema gravimétrico, conforme mostrado no vídeo da apresentação.

O módulo de controle eletrônico da injeção pode ser desenvolvido a partir de um modelo convencional já existente no mercado conforme especificado na Tabela 3 abaixo:

Microcontrolador	68HC11
Memória RAM	2,5 Kbytes
EPROM	128 Kbytes
EEPROM	0,5 Kbytes
Clock	4 MHz
Transferência de Dados	8 bits
Tecnologia	Placa SMD, 4 layers
KR (Knock)	L9119
Quantidade de pinouts	45

Tabela 3 – Especificações para a construção da ECU

Combustível	Peso Molecular (g/mol)	ρ (kg/m ³)	Razão Ar/Comb. Estequiom.	Temperatura de ebulição (°C)	Calor Latente de Vapor (kJ/kg)	Calor de combustão (kJ/kg)	Calor Específico (kJ/Kg °C)	Pressão de Vapor a 310 K (atm)
Metanol	32,04	792	6,5	66	1118	21100	2,6 (-4°<T<20°C)	0,31
Etanol	46,06	810	8,9	78	900	27710	2,64 (30°<T<80°C)	0,153
Butanol	74,1	805	11,2	117	578	33000	-	0,022
Heptano	100,2	684	15,2	98	318	44440	2,4 (0°<T<60°C)	0,11
Octano	114,22	692	15,1	125	297	47900	2,32 (-50°<T<25°C)	0,036
Gasolina	113,2	756	13,8	30 a 255	400	44000	2,35	0,62 – 0,90
Diesel		820	14,6	190 a 280	600	43000	-	0,0034

Tabela 4 – Características de alguns combustíveis líquidos

6. Bibliografia

TILLMAN, R. M.; SPILMAN, O.L.R.; BEACH, J.M. (1975). Potencial for Methanol as an Automotive Fuel. *Society of Automotive Engineers*, Warrendale, SAE paper n. 750118

POUNDER, C.C. (1955). Diesel Engines Principles and Practice. London, Newnes.

GOERING, C.E; SCHRADER, G.W. (1988). Effects of Ethanol Proof on Engine Performance. *American Society of Agricultural Engineers*. V. 31, n. 4, p.1059-1061, Jul-Aug.

BUENO, R. (1980). PROÁLCOOL: rumo ao desastre. Petrópolis, Ed.Vozes.

PEREIRA, J.A.D. (1990). 15 anos de PROÁLCOOL: da euforia à crise (1975-1989). João Pessoa, Monografia de Graduação em Ciências Econômicas, UFPb.

GOLDEMBERG, J. e MOREIRA, J.R. (1989). O Programa Nacional do Alcool em 1988. Revista Brasileira de Energia, Rio de Janeiro, 1 (1) : 25-44.

VAN WILLEN, G.J.; SONNTAG, R.R. (1994). *Fundamentos da termodinâmica clássica*. 4. ed., Massachusetts, MIT.