

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ALEXANDRE GIORDANI ANDREOLI

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

**INJEÇÃO ELETRÔNICA PROGRAMÁVEL PARA
AUTOMÓVEIS**

Porto Alegre
(2009)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

INJEÇÃO ELETRÔNICA PROGRAMÁVEL PARA AUTOMÓVEIS

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Tiaraju Vasconcellos Wagner

Porto Alegre
(2009)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ALEXANDRE GIORDANI ANDREOLI

INJEÇÃO ELETRÔNICA PROGRAMÁVEL PARA AUTOMÓVEIS

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Tiaraju Vasconcellos Wagner, UFRGS

Mestre em Eng. Elétrica pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. MSc. Tiaraju Vasconcellos Wagner, UFRGS

Mestre em Engenharia Elétrica pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Engenheiro Mecânico Julio Cesar Salgado Gaudioso, UFRGS

Engenheiro Mecânico pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Hamilton Duarte Klimach, UFRGS

Doutor em Engenharia Elétrica pela UFSC – Florianópolis, Brasil

Porto Alegre, dezembro de 2009.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos os membros da minha família, em especial pela dedicação e apoio em todos os momentos difíceis, e a todas as pessoas que acreditaram no meu potencial.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, à minha irmã e à minha namorada, pelo apoio e suporte.

Ao Brasil e em especial ao Rio Grande do Sul, pela infra-estrutura disponível.

Aos colegas da Engenharia Elétrica e da Engenharia Mecânica, os quais admiro bastante, pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e apoio na revisão deste trabalho.

Ao meu orientador Tiaraju Vasconcellos Wagner, pela ajuda, pelo estímulo e pelo aprendizado.

À UFRGS, professores e funcionários, em especial ao Manoel Eduardo Hoffmeister pelas diversas vezes que me ajudou.

À minha banca examinadora, Dr. Hamilton Duarte Klimach e Eng. Julio Cesar Salgado Gaudioso, pelo aceite do meu convite para participação na avaliação do meu trabalho.

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica descreve a real necessidade do uso da injeção eletrônica de combustível em automóveis, o estado-da-arte da mesma e o panorama mundial de inserção no mercado, bem como características de produtos existentes e tecnologias desenvolvidas. As informações serão expostas em forma de quadros comparativos, tabelas e gráficos, além do texto e figuras, tudo de forma a despertar o interesse do leitor na área, porém apresentando dados atualizados e analisados pelo autor, formulando um conhecimento de uso prático e teórico para projetistas e pesquisadores, ainda assim introduzindo o assunto de forma clara ao público leigo.

Será feito um protótipo que terá sua análise de alternativas e custo, sua criação, seu desenvolvimento e sua análise de resultados relatados aqui. Os problemas e as soluções encontradas ao longo do projeto e execução do protótipo serão detalhados, sem antes ser elucidado pelo menos um dos tantos caminhos para se começar uma injeção eletrônica sem precisar re-inventar tudo, mas aproveitando-se ao máximo o material intelectual existente na bibliografia.

O autor expõe os passos para a criação de uma injeção eletrônica programável para automóveis e espera que seu trabalho transmita seu conhecimento na totalidade aos interessados em lê-lo.

Palavras-chaves: Engenharia Elétrica. Automóvel. Injeção Eletrônica Programável de Combustível. Estado-da-arte. Tecnologia. Protótipo.

ABSTRACT

This work exposes several relevant aspects to the best understanding of the reader about the subject, based in a research made by the author. The real necessity of using an automobile electronic fuel injection are described, the state-of-the-art of it and the world market insertion scenario, as well as characteristics of existing products and developed technologies. The information will be exposed in way of comparative charts, tables and graphics, besides the text and figures, all in shape to increase the interest of the reader in the field, thus showing new and analyzed data by the author, formulating a knowledge of practical and theoretical use for developers and researchers, but still introducing clearly the subject to the general public.

It will be made a prototype that will have its alternatives and costs analysis make, its creation, its development and its results analysis written here. The problems and its solutions finded during the project and the prototype construction will be detailed, but not before being elucidated at least one of the many ways to begin a electronic injection without needing to re-invent everything, but using the maximum of the intellectual material existing in the publications.

The author shows the steps to the creation of a programmable electronic fuel injection for automobiles and hope that his work transmit his knowledge in the totality to the interested in reading it.

Keywords: Electrical Engineering. Automobile. Programable Electronic Fuel Injection. State-of-the-art. Technology. Prototype.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 MOTIVAÇÃO.....	16
1.2 OBJETIVOS.....	18
1.2.1 Objetivos gerais.....	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	19
2 FUNDAMENTOS DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA E A INJEÇÃO ELETRÔNICA DE COMBUSTÍVEL.....	21
2.1 MECÂNICA DOS MOTORES.....	21
2.2 VISÃO GERAL SOBRE MOTORES ALTERNATIVOS DE COMBUSTÃO INTERNA.....	21
2.3 COMPONENTES PRINCIPAIS DE UM MOTOR A COMBUSTÃO.....	21
2.3.1 O pistão.....	22
2.3.2 A biela.....	23
2.3.3 A árvore de manivelas (Virabrequim).....	24
2.3.4 O bloco do motor e o cárter.....	25
2.3.5 O trem de acionamento de válvulas.....	25
2.3.6 O comando de válvulas.....	26
2.3.7 Válvulas, guia das válvulas e assento das válvulas.....	28
2.4 A DINÂMICA DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA.....	29
2.5 UMA BREVE HISTÓRIA DO MOTOR DE CICLO OTTO.....	32
2.6 CLASSIFICAÇÃO DE MOTORES.....	33
2.7 O FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DE QUATRO TEMPOS.....	35
2.8 INFORMAÇÕES SOBRE A RELAÇÃO ENTRE O AR E OS COMBUSTÍVEIS.....	37
2.8.1 Mistura estequiométrica.....	39
2.8.2 Detonação.....	44
2.8.3 Melhorando a “dieta de um motor”.....	46
2.8.4 Dietas especiais.....	49
2.8.5 Os problemas da Distribuição Central de Combustível.....	50
2.9 IGNIÇÃO: COMEÇA A COMBUSTÃO.....	54
2.9.1 A vela de ignição.....	57
2.9.2 Circuito de Alta Tensão e Distribuição.....	58
2.9.3 Geração do Pulso para a Centelha.....	60
2.10 ALIMENTAÇÃO DE COMBUSTÍVEL.....	61
2.11 O CARBURADOR.....	61
2.12 O SISTEMA DE INJEÇÃO ELETRÔNICA DE COMBUSTÍVEL E SEU FUNCIONAMENTO BÁSICO RESUMIDO.....	62
2.13 O ESTADO-DA-ARTE.....	62
2.14 OS BICOS INJETORES.....	64
2.15 O SISTEMA DE IGNIÇÃO MODERNO.....	65

3 ANÁLISE DE ALTERNATIVAS	66
3.1 CLASSIFICAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DE INJEÇÕES ELETRÔNICAS NO MERCADO.....	66
3.1.1 Quanto ao tipo de módulo de injeção eletrônica.....	66
3.1.2 Quanto à quantidade de bicos injetores.....	69
3.1.3 Quanto à forma de injeção do combustível.....	70
3.1.4 Quanto às variáveis lidas.....	71
3.1.5 Quanto ao controle de ignição.....	71
3.1.6 Tipos de realimentação.....	73
3.1.7 Interface com o usuário.....	73
3.2 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE INJEÇÕES ELETRÔNICAS NO MERCADO.....	75
3.3 ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS NECESSÁRIAS PARA PROTOTIPAGEM.....	76
3.4 CARACTERÍSTICAS RELACIONADAS AO MICROCONTROLADOR.....	79
3.5 ESCOLHA DO MICROCONTROLADOR.....	85
3.6 ANÁLISE DAS TOPOLOGIAS DE CIRCUITOS EXISTENTES.....	86
3.6.1 Análise de topologia de circuitos de acionamento de bicos injetores.....	87
3.6.2 Análise de topologia de circuitos de ignição.....	89
3.6.3 Análise de topologia de circuitos de entrada e saída de periféricos.....	91
3.6.4 Análise de integração de circuitos com sensores, atuadores e demais componentes de uma injeção eletrônica.....	93
3.6.5 Análise de viabilidade de confecção do protótipo completo quanto ao custo, à complexidade, à disponibilidade de componentes e ao desempenho esperado.....	96
3.7 ALTERNATIVA ESCOLHIDA PARA SER IMPLEMENTADA.....	97
4 MÉTODOS, PROCESSOS E DISPOSITIVOS.....	98
4.1 INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES.....	98
5 O HARDWARE.....	99
5.1 PROJETO.....	99
5.1.1 Circuito de Acionamento dos Bicos Injetores de Combustível.....	99
5.1.2 Circuito de Acionamento da Bobina de Ignição.....	101
5.1.3 Circuito de Fonte.....	103
5.1.4 Circuito do Microcontrolador.....	103
5.1.5 Circuito de Entradas.....	103
5.1.6 Circuito de Medição da Rotação.....	104
5.1.7 Circuito de Saídas.....	105
5.2 MONTAGEM.....	105
5.3 TESTES.....	111
5.4 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	116
6 O SOFTWARE.....	117
6.1 O MICROCONTROLADOR.....	118
6.2 O AMBIENTE DE PROGRAMAÇÃO.....	118
6.3 A LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO.....	118
6.4 PROGRAMANDO O MICROCONTROLADOR.....	119
6.5 DEFININDO O SOFTWARE PARA A INJEÇÃO ELETRÔNICA PROGRAMÁVEL.....	121

6.5.1 Características gerais de um programa de injeção eletrônica.....	121
6.5.2 Fluxograma do programa.....	124
6.5.3 Criando o programa de teste para operação em conjunto com as placas.....	125
6.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	126
7 CONCLUSÃO.....	127
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - CORTE DE UM MOTOR QUATRO CILINDROS DE QUATRO TEMPOS COM IGNIÇÃO POR CENTELHA. [HEYWOOD, JOHN B., 1988.]	22
FIGURA 2 - SEQUÊNCIA DE EVENTOS QUE ACONTECEM DENTRO DO CILINDRO DO MOTOR [HEYWOOD, JOHN B., 1988.]	30
FIGURA 3 - CICLO DE UM MOTOR DE QUATRO TEMPOS [BEER, A.; CYPRA, A., 1999]	36
FIGURA 4 - CICLO OTTO PARA UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA. [FERNANDEZ, BRENO ORTEGA, 2006]	37
FIGURA 5 - CURVA DE HOOK. [AIRD, FORBES, 2001]	47
FIGURA 6 - CURVA DE HOOK, CONSUMO EM MOTOR DE CICLO OTTO. [WILDNER, FABIANO, 2006]	48
FIGURA 7 - IGNIÇÃO SISTEMA KETTERING COM DISTRIBUIDOR. [KOSIK, RICHARD BOHUSLAV, 2000, P.10]	55
FIGURA 8 - IGNIÇÃO SEM DISTRIBUIDOR. [KOSIK, RICHARD BOHUSLAV, 2000, P.10]	55
FIGURA 9 - CONFIGURAÇÃO DA VELA DE IGNIÇÃO. [RIBBENS, WILLIAM B., 1998, P.13]	57
FIGURA 10 - ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO KETTERING DE IGNIÇÃO. [RIBBENS, WILLIAM B., 1998, P.13]	58
FIGURA 11 - ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DE IGNIÇÃO. [RIBBENS, WILLIAM B., 1998, P.14]	59
FIGURA 12 - ESTADO-DA-ARTE DA INJEÇÃO ELETRÔNICA DI-MOTRONIC DA BOSCH. [HARTMAN, JEFF, 2003, P.6]	63
FIGURA 13 - BICO INJETOR ELETRÔNICO DO TIPO PISTONETE DA BOSCH. [HARTMAN, JEFF, 2003, P.17]	64
FIGURA 14 - CIRCUITO DE ACIONAMENTO DOS BICOS INJETORES. (MEGASQUIRT)	87
FIGURA 15 - CIRCUITO DE IGNIÇÃO DE ALTA CORRENTE. (MEGASQUIRT)	90

FIGURA 16 - CIRCUITO DE IGNIÇÃO. [KOSIK, RICHARD BOHUSLAV, 2000, P.32]	90
FIGURA 17 - CIRCUITO DE ENTRADAS. (MEGASQUIRT)	92
FIGURA 18 - FIGURA 18: CIRCUITO DE FONTE. (MEGASQUIRT)	94
FIGURA 19 - ONDA DE TENSÃO GERADA NO SENSOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL. (MEGASQUIRT)	95
FIGURA 20 - SEQÜÊNCIA DE PROCEDIMENTOS REALIZADOS PARA A CRIAÇÃO E AVALIAÇÃO DO PROTÓTIPO	98
FIGURA 21 - CIRCUITO DE ACIONAMENTO DOS BICOS INJETORES SIMULADO NO MICROCAP	100
FIGURA 22 - RESPOSTA CIRCUITO DE ACIONAMENTO DOS BICOS INJETORES SIMULADA NO MICROCAP	100
FIGURA 23 - CIRCUITO DE ACIONAMENTO DA IGNIÇÃO SIMULADO NO MICROCAP	102
FIGURA 24 - RESPOSTA CIRCUITO DE ACIONAMENTO DA IGNIÇÃO SIMULADA NO MICROCAP	103
FIGURA 25 - SOFTWARE PCB123	106
FIGURA 26 - PLACA MONTADA DO CIRCUITO DE ACIONAMENTO DOS BICOS INJETORES	108
FIGURA 27 - PLACA MONTADA DO CIRCUITO DE ACIONAMENTO DE IGNIÇÃO	108
FIGURA 28 - PLACA MONTADA DO CIRCUITO DE FONTE	109
FIGURA 29 - PLACA MONTADA DO CIRCUITO DE ENTRADAS	109
FIGURA 30 - PLACA MONTADA DO CIRCUITO DO MICROCONTROLADOR .	110
FIGURA 31 - PLACA MONTADA DO CIRCUITO DE LEITURA DOS SINAIS DE ROTAÇÃO	110
FIGURA 32 - PLACA MONTADA DO CIRCUITO DE SAÍDAS	111
FIGURA 33 - TESTES REALIZADOS EM LABORATÓRIO DO CIRCUITO DE ACIONAMENTO DOS BICOS INJETORES	112
FIGURA 34 - CIRCUITO DE ACIONAMENTO DOS BICOS INJETORES NO OSCIOSCÓPIO	113

FIGURA 35 - SOFTWARE MPLAB IDE	118
FIGURA 36 - CIRCUITO DE TESTE DO DISPLAY LCD	120
FIGURA 37 - INTERFACE DO SOFTWARE HONDATA. [HARTMAN, JEFF. 2003, P.70]	122
FIGURA 38 - INTERFACE DO SOFTWARE FREESCAN. [HARTMAN, JEFF. 2003, P.72]	123
FIGURA 39 - FLUXOGRAMA BÁSICO DO PROGRAMA	125
FIGURA 40 - CIRCUITOS PROJETADOS DA INJEÇÃO ELETRÔNICA	126

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - RESUMO DOS CAPÍTULOS	16
TABELA 2 - SISTEMAS DE INJEÇÃO ELETRÔNICA DE MERCADO ANALISADAS	69
TABELA 3 - PRINCIPAIS CANDIDATOS A MICROCONTROLADOR PARA O PROTÓTIPO	79

LISTA DE ABREVIATURAS

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RPM: Rotações Por Minuto

MTBE: Éter Metil-Butil-Terciário

HC: Hidrocarboneto

TBI: Injeção por Corpo de Borboleta

V8: Motor com oito cilindros dispostos na forma de “V”

A/F: Relação ar/combustível

OEM: Fabricante de Equipamentos Originais

CPU: Unidade Central de Processamento

EMI: Interferência Eletro-Magnética

TPS: Sensor de Posição da Borboleta

LCD: Display de Cristal Líquido

USB: Universal Serial Bus

PWM: Pulse Width Modulation

A/D: Analógico para Digital

CAN: Controller Area Network

TCC: Trabalho de Conclusão de Curso

I/O: Entrada/Saída

PDIP: Plastic Dual In-line Package

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor

LED: Light Emitter Diode

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Em um cenário mundial em que a demanda crescente por qualquer tipo de energia vem elevando preços dos combustíveis, em que o desenvolvimento de chips cada vez menores e mais complexos dita em ritmo acelerado a oferta por componentes de eletrônica embarcada, em que o acesso à informação é praticamente irrestrito pela internet, em que o aquecimento global e sua ligação com o número de poluentes expelidos é tão discutida pelos cientistas e ambientalistas, em que a demanda por segurança, conforto e confiabilidade de todo produto industrializado cresce, em que os produtos eletrônicos dotados de certa inteligência são os mais vendidos, enfim, em um cenário dinâmico, insere-se o mundo automobilístico. E a área que mais se desenvolve dentro do setor automobilístico é a de eletrônica embarcada, transformando carros em verdadeiros invólucros de tecnologia de ponta, envolvendo engenheiros de todas as áreas, mestres, doutores, pesquisadores, todos trabalhando juntos para desenvolver produtos melhores, mais baratos e mais atrativos.

A indústria automobilística é extremamente competitiva, motivada pelo sempre crescente mercado consumidor e pelos grandes montantes de dinheiro envolvidos. Sendo assim, não poderia ser diferente a situação: grandes fabricantes de automóveis detêm o conhecimento, pois desenvolvem dentro de si as tecnologias que serão usadas em seus carros. Isto leva a aumentar o sigilo industrial, o que é normal, porém inviabiliza pequenas empresas de conseguirem produzir um produto competitivo aos das gigantes fábricas, que monopolizam as melhores invenções.

Grande parte da frota de veículos circulando pelas ruas ainda utiliza-se de carburadores ao invés de injeção eletrônica de combustível, ou seja, um recurso puramente mecânico ao invés de um recurso provido de eletrônica embarcada.

Por questões históricas, a crise do petróleo de certa forma associou não só os carros de grandes motores, mas os carburadores também, ao consumo excessivo de combustível. À medida que os computadores são cada vez mais utilizados e desenvolvidos, a engenharia desenvolve soluções que integram recursos eletrônicos e computacionais para adequar os carros ao novo cenário de consumo de combustível.

Surge o aumento de desempenho como fator promissor, pois o ajuste fino dos motores pode proporcionar também melhor dirigibilidade, maior flexibilidade, entre outros. Um motor que consegue se auto-regular chega ao mercado com a injeção eletrônica, e à medida que ela ganha as ruas os carros começam a ter melhor controle sobre seus poluentes expelidos no ar da descarga. A conciliação entre diversos requisitos constituem um desafio de engenharia, porém abre portas para uma nova geração de motores, os gerenciados eletronicamente.

O consumidor apenas compra a tecnologia fechada por um tempo, mas cresce o número de usuários que gostariam de customizar seus veículos, inclusive no que diz respeito ao gerenciamento do motor. O mercado, necessitando de alguma solução, termina por receber a oferta de empresas que vendem sistemas de injeção eletrônica programáveis, para que os usuários consigam mexer em determinados parâmetros de controle do motor. O uso nas competições esportivas aumenta, as pessoas perdem o medo literalmente de modificar o que por anos era complexo, e começam a querer hardwares customizáveis também, para fugir das fabricantes de produtos do gênero.

A população com acesso à internet troca informações em fóruns cada vez mais especializados e a idéia do software aberto cresce, trazendo consigo a idéia de hardware aberto também. Eles são os chamados “*Open Source Projects*”: projetos sem fins lucrativos, criados e modificados constantemente por entusiastas que gostam de fazer eles mesmos as coisas.

Quanto mais informações antes sigilosas forem divulgadas, discutidas e estudadas, maior será a qualidade das injeções eletrônicas programáveis, tanto as caseiras quanto as industriais, e todos só têm a ganhar com isto.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos foram divididos em duas partes, conforme segue abaixo:

1.2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho sobre Injeção Eletrônica Programável para Automóveis tem como um dos objetivos o de estimular o leitor a compreender e a gostar desta área de tecnologia tão crescente, que é inclusive um negócio relativamente novo no Brasil, mas que já apresenta produtos de qualidade e vendas expressivas em nível mundial.

Entretanto, é necessário para motivar o leitor a conhecer o assunto e incentivá-lo a desenvolver esta tecnologia, para que ele possa criar seu próprio projeto, ou desenvolver melhorias em projetos existentes, ou, até mesmo, trabalhar em alguma empresa deste ramo. Mencionado o caráter de fomento à pesquisa científica, é importante lembrar que este trabalho tem também o intuito de tentar mudar a visão do consumidor apenas usuário. Ele pode ser um consumidor projetista, modificando soluções existentes no mercado ou desenvolvendo a tecnologia. Seja por hobby, seja para fins comerciais, seja para fins de estudo ou emprego, o importante é direcionar mais profissionais para esta área.

A melhor forma encontrada para realizar tais feitos de motivação foi a prototipação de uma injeção eletrônica programável, a qual será descrita em detalhes da melhor forma possível, mostrando as fases de projeto e execução. A partir do protótipo serão analisados os

resultados obtidos, como desempenho, entre outros, e será feita uma análise geral para verificar se o objetivo do trabalho foi atingido, sem antes apresentar o levantamento de futuras linhas de pesquisa e desenvolvimento na área, inclusive como seqüência deste.

1.2.2 Objetivos específicos

O objetivo é construir uma injeção de cunho didático, dividida em módulos com o intuito de facilitar não só o entendimento e visualização, mas como os testes e as futuras melhorias. Trata-se de um aglomerado de circuitos que formarão um sistema que controlará a injeção de combustível e a ignição de um motor de forma não comercial, mas didática, aberta.

É um objetivo específico deste trabalho aplicar o aprendizado durante o curso de graduação de engenharia elétrica e aprender cada vez mais sobre o assunto.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é dividido em 8 capítulos, cada um com um tópico diferente. Os capítulos são divididos em subcapítulos de acordo com os subtópicos e com o tamanho dos mesmos, tudo para melhor entendimento do leitor.

O capítulo 2 mostra uma visão geral do funcionamento de um motor de combustão interna, já inserindo na seqüência o funcionamento da injeção eletrônica de combustível, mostrando o estado-da-arte de um sistema de injeção, e partindo para uma visão no país e no mundo do desenvolvimento atual da mesma, respeitando a cronologia dos fatos.

O capítulo 3 apresenta determinadas características técnicas de alguns produtos de mercado, introduzindo o estudo das alternativas de projeto de uma injeção eletrônica, que serão então analisadas para a determinação do protótipo a ser construído.

Já o capítulo 4, relata as fases de criação do protótipo, mostrando o cronograma do projeto.

O capítulo 5, por sua vez, é o capítulo que descreve o hardware do protótipo, com todas as etapas de sua criação e testes.

O capítulo 6 mostra a parte de software da injeção eletrônica, falando desde os conhecimentos de programação relevantes até sobre o programa em si. Bem como o teste final de hardware e software definitivos.

O capítulo 7 relata as conclusões do trabalho, bem como apresenta sugestões para melhorias futuras.

O capítulo 8 descreve as referências bibliográficas.

A Tabela 1 abaixo apresenta de forma resumida o número, título e conteúdo dos capítulos do trabalho:

Nº	Título do capítulo	Conteúdo do capítulo
2	Fundamentos de Motores de Comb. Int. e a Inj. Eletrônica	Teoria, Visão geral
3	Análise de Alternativas	Alternativas de Projeto
4	Métodos, Processos e Dispositivos	Etapas, Cronograma
5	O Hardware	Criação do Hardware
6	O Software	Criação do Software e seu teste com o hardware
7	Conclusões e Sugestões para Melhorias Futuras	Conclusões, Sugestões
8	Referências Bibliográficas	Bibliografia

Tabela 1: Resumo dos capítulos

2 FUNDAMENTOS DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA E A INJEÇÃO ELETRÔNICA DE COMBUSTÍVEL

2.1 A MECÂNICA DOS MOTORES

A fundamentação teórica necessária para entendimento completo do papel de uma injeção eletrônica de combustível num motor de um automóvel começa pelo entendimento da mecânica e dinâmica dos motores, que deve ser explanada desde o básico até os assuntos específicos do trabalho. Para isso, este capítulo foi subdividido em subcapítulos contendo as diversas informações relevantes de forma mais organizada.

2.2 VISÃO GERAL SOBRE MOTORES ALTERNATIVOS DE COMBUSTÃO INTERNA

Segundo Heywood (1988), o propósito dos motores de combustão interna é a produção de trabalho a partir da energia química que o combustível tem. Ao contrário de motores de combustão externa, nos motores de combustão interna esta energia é liberada por queima ou oxidação do combustível, dentro do motor. Ambas a mistura ar-combustível antes da combustão quanto os resíduos da queima são fluidos que realizam o trabalho. A saída de potência desejada virá das transferências de trabalho envolvidas provindas diretamente destes fluidos e dos componentes mecânicos do motor.

2.3 COMPONENTES PRINCIPAIS DE UM MOTOR A COMBUSTÃO

Os componentes principais podem ser ditos como: pistão, biela, árvore de manivelas, bloco do motor e cárter, trem de acionamento de válvulas e válvulas.

A Figura 1 na seqüência é um desenho de um motor de combustão interna por centelha de quatro cilindros, mostrando melhor as partes que em geral compõem um motor deste tipo, bem como dão uma idéia geral de como é um motor num todo.

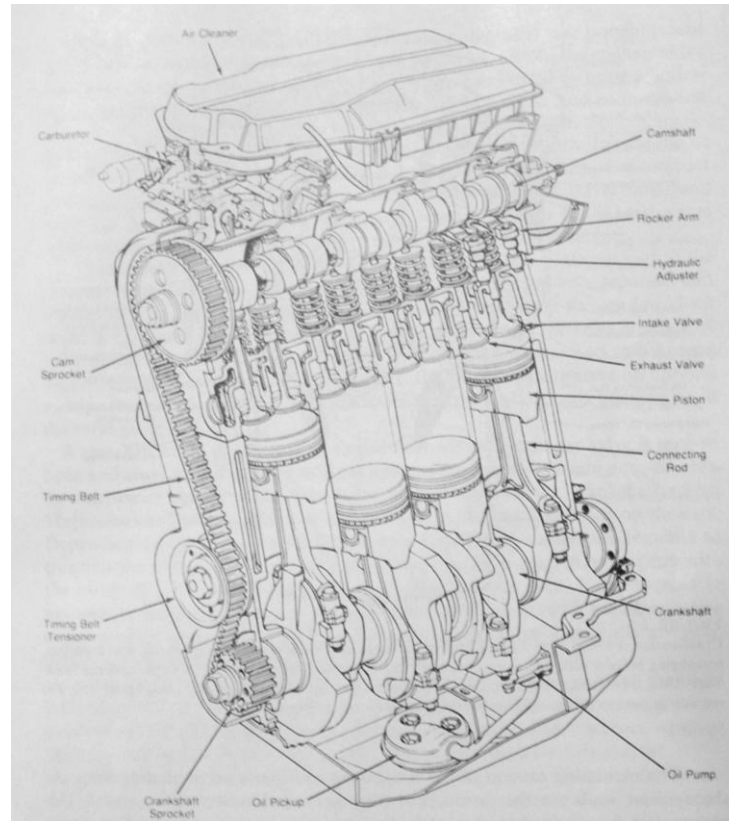


Figura 1: Corte de um motor quatro cilindros de quatro tempos com ignição por centelha.

(HEYWOOD, 1988)

2.3.1 O pistão

É uma peça de metal no formato de uma espécie de copo cilíndrico, que desliza dentro dos cilindros ao longo dos ciclos do motor, preso à biela por meio de um pino também de metal e apoiado no cilindro por meio de anéis embutidos em fendas ao longo da circunferência do pistão. Os anéis possuem função de apoio, transferência de calor, vedação, lubrificação, entre outras.

Os pistões são feitos, conforme Heywood (1988), de alumínio em pequenos motores ou ferro fundido em grandes motores de baixa rotação.

De acordo com Bosch (2005), os pistões dos motores atuais de veículos automotores devem desempenhar as seguintes funções:

- transmitem a força gerada pelo gás de combustão às bielas;
- são usados como prolongamentos que definem o percurso das bielas dentro dos cilindros;
- são responsáveis por apoiar a força normal aplicada contra as paredes do cilindro em questão, enquanto a pressão do mesmo é transportada para a barra de ligação;
- juntamente com os elementos de vedação (como os anéis), isolam a câmara de combustão da árvore de manivelas;
- também absorvem calor para posteriormente transferir ao sistema de arrefecimento do motor;

2.3.2 A biela

De acordo com Bosch (2005), a biela é o elemento de junção, conexão, entre o pistão e o eixo de manivelas (virabrequim), sofrendo esforços de compressão e tração e de flexão, ainda alojando numa extremidade o pino do êmbolo (pistão) e, na outra, rolamentos ou mancais da árvore de manivela. Seu comprimento é determinado pela geometria do pistão e raio do contrapeso.

2.3.3 A árvore de manivelas

A árvore de manivelas, popularmente conhecida como virabrequim, é sem dúvida um elemento complexo quando trata-se do projeto de um motor, pois ela é quem faz a transferência de potência originada da combustão para qualquer peça que nela conectada estiver como, por exemplo, uma árvore de transmissão (caixa de câmbio) e, por final, as rodas de um veículo automotor. Portanto deve ser resistente a vibrações, impactos, flexões, etc, de diversas ordens de grandeza e de frequência, entre outros aspectos construtivos desejados.

De acordo com Bosch (2005), a árvore de manivelas, deve desempenhar a função de converter o movimento alternado dos pistões, transmitido pelas bielas, em movimento rotativo e disponibilizar o torque efetivo na extremidade da árvore de manivelas. Portanto as forças que agem na árvore de manivelas são caracterizadas por periodicidades altamente variáveis, variando também muito com a localização. Os torques e momentos de flexão, bem como as vibrações secundárias geradas por eles, representam fatores de tensão intensos e altamente complexos para o virabrequim, resultando em propriedades estruturais e padrões de resposta de vibrações obtidos por cálculos precisos e dimensões meticulosamente definidas. Ainda para aumentar a complexidade do cálculo e dimensionamento, existe necessidade de instalação de múltiplos mancais radiais de apoio como precaução, esses com número determinado primariamente pelo fator de carga global e pela rotação máxima do motor. Os fatores de carga e de tensão são considerados também quando da seleção de materiais e processos de fabricação, sendo forjadas as árvores de manivelas que são submetidas a altas tensões, ao contrário das fundidas, essas cada vez mais utilizadas em motores menores e com menores tensões, aproveitando a vantagem do menor massa e menor custo.

2.3.4 O bloco do motor e o cárter

O bloco do motor é chamado assim justamente por ser um bloco de metal usinado no qual são montadas as diversas outras partes do motor, como o cárter, que é uma vasilha que fecha e veda a parte inferior do motor, sendo utilizada como escoadora do óleo utilizado pelo motor e, na maioria das vezes, como seu próprio reservatório.

Segundo Bosch (2005), o bloco, juntamente com o cárter, suporta o efeito de transferência de força entre o cabeçote do cilindro e o conjunto da árvore de manivelas, apoiando os mancais de suporte do conjunto do virabrequim e incorporando as paredes dos cilindros. Incluem-se aqui também a camisa d'água, ou aletas, e as galerias de óleo vedadas. O bloco também é a superfície de montagem e suporte para a maior parte das unidades auxiliares do motor. O bloco fundido e a unidade da árvore de manivelas constituem a configuração padrão para as aplicações automotivas. Os parafusos do cabeçote do cilindro desempenham o importante papel de oposição das forças de gás para facilitar uma transferência de força com linearidade máxima e tendência mínima de flexão, através das paredes de suporte e para os mancais principais. Para obter-se uma maior resistência, o cárter é freqüentemente prolongado abaixo do eixo de manivelas. Blocos de ferro fundido cinza ainda muito utilizados em caminhões estão sendo substituídos nos automóveis gradativamente pelo alumínio, que é mais leve e, portanto, proporciona uma redução de peso no veículo com ele equipado, bem como maior dissipação térmica.

2.3.5 O trem de acionamento de válvulas

Trata-se de um conjunto de mecanismos, ou conjunto válvula-engrenagem, que em um motor de quatro tempos permite acionar as válvulas e com isso controlar a troca de gases

dentro do mesmo, existindo diversas configurações. A mais comum configuração é a que possui um eixo de cames, o comando de válvulas ou popularmente chamado apenas de comando, as válvulas, as molas de válvula e seus fixadores, e um conjunto de tuchos que acionam as válvulas através do contato com os ressaltos do comando. Nesse caso, a válvula tem sua abertura determinada, portanto, pelo formato dos cames desse eixo girante chamado de comando. Em poucas palavras, um ressalto tem o perfil físico da abertura mecânica das válvulas de um motor, controlando diretamente a quantidade de mistura ar/combustível que pode entrar e a quantidade de gases de escapamento que pode sair, tudo isso dinamicamente, ou seja, variando no tempo e na frequência, conforme as condições de contorno em que encontra-se o motor.

2.3.6 O comando de válvulas

É uma parte importante e complexa de um motor de combustão interna de quatro tempos, e, sem dúvida, uma das peças que exige maior estudo e testes para obtenção do resultado esperado: o comportamento dinâmico do motor.

Segundo Bosch (2005), Algumas disposições do comando de válvulas são amplamente utilizadas, como nas quais o eixo de comando de válvulas localiza-se no cabeçote do cilindro. Seguem algumas delas:

- Conjunto tucho-haste superior: no qual uma “haste” que se move alternadamente ao longo do próprio eixo no cabeçote do cilindro absorvendo a força lateral do came, transferindo sua pressão linear de comando à haste das válvulas;

- Roda acionada do came ou conjunto de balancim único acionado por came superior: em que as forças laterais e lineares do ressalto do came são absorvidas por uma alavanca montada no cabeçote do cilindro que oscila para frente e para trás entre os ressaltos do came

e da válvula. Além de transferir forças e absorver forças laterais, o balancim intermediário pode também ser projetado para aumentar o efeito de passo do came;

- Conjunto de balancim duplo acionado pelo came superior: em que o eixo de oscilação do balancim está localizado entre o came e a válvula. Aqui o balancim também é projetado normalmente como multiplicador de passo do came, para assegurar o percurso desejado das válvulas.

Quando o came é instalado dentro do bloco, o ressalto do came age contra um mecanismo de levantamento intermediário e conjunto da haste impulsora e não diretamente contra a válvula. (BOSCH, 2005)

As considerações sobre a forma do ressalto do comando de válvulas são necessárias para seu entendimento completo, visto que todo o fenômeno de combustão é baseado na quantidade de mistura ar/combustível que entra no motor através da válvula de admissão controlada pelo comando de válvulas e baseando na quantidade de gás de escapamento após a queima da mistura que sai do motor através da válvula de escapamento, também controlada pelo comando de válvulas. Ou seja, o sincronismo de todas as etapas do processo se dá pela sincronia de eventos determinada por tal comando.

O ressalto do came deve possibilitar a abertura (e fechamento) das válvulas o mais rápida e uniformemente possível. A força de fechamento para as válvulas é aplicada pelas molas das válvulas, que também são responsáveis pela manutenção do contato entre o ressalto do came e a válvula. As forças dinâmicas impõem limites no came e levantamento das válvulas. O conjunto válvula-engrenagem pode ser visto como um sistema mola/massa, no qual a conversão de energia armazenada em energia livre provoca vibração forçada. Os conjuntos válvulas-engrenagens com eixos de comando das válvulas suspensos podem ser representados com precisão suficiente por um sistema de massa única (que consiste da massa impulsionada, rigidez do conjunto válvula-engrenagem e os efeitos de amortecimento

correspondentes). Os sistemas de massa dupla estão se tornando cada vez mais populares para utilização em eixos de comandos de válvulas e haste impulsora montados no bloco. (BOSCH, 2005)

2.3.7 Válvulas, guia das válvulas e assento das válvulas

As válvulas são hastes na forma parecida com um cálice, de modo que suas bordas são em formato de circunferência e vedam a passagem tanto da mistura ar/combustível para dentro do motor quanto à saída de gases pelo escapamento, denominando-se válvulas de admissão e escapamento, respectivamente. As guias de válvula são cilindros, ou orifícios cilíndricos, pelos quais passam as hastes das válvulas, enquanto que os assentos de válvula são a parte do cabeçote, ou bloco em alguns casos, que é responsável por dar assentamento às válvulas, ou seja, vedá-las quando estas estiverem fechadas. O assento é a região de encosto da válvula, porém é por ali, entre ele e a válvula, que entra a mistura ou saem os gases do escapamento, quando da abertura da válvula de admissão ou de escapamento, respectivamente. (BOSCH, 2005)

2.4 A DINÂMICA DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

Em motores de combustão interna o ar e o combustível são normalmente misturados ambos no sistema de admissão antes de entrar no cilindro do motor, usando um carburador ou um sistema de injeção de combustível. Em aplicações em automóveis, a temperatura do ar que entra no sistema de admissão é controlada misturando ar atmosférico com ar aquecido pelo contato com o coletor de escapamento. A razão de quantidade de ar para quantidade de combustível em massa deve ser mantida aproximadamente constante em aproximadamente 15

para garantir uma combustão confiável. O carburador mede uma quantidade aproximada de combustível para uma quantidade de ar para o motor deste modo: O ar flui através de um venturi (um bocal convergente-divergente) e cria uma diferença de pressão entre a entrada do venturi e a garganta, a qual é usada para medir uma quantidade apropriada de combustível provindo da cuba do carburador, através de uma série de orifícios, dentro da garganta do venturi. Logo abaixo do venturi está uma válvula do acelerador ou borboleta a qual controla a vazão de mistura ar/combustível, e, portanto, a resposta do motor. O escoamento de admissão é acelerado para abaixo da pressão atmosférica reduzindo a área de passagem quando a potência requerida (em qualquer rotação do motor) está abaixo do máximo que é obtido quando o acelerador estiver no fundo. O coletor de admissão é normalmente aquecido para promover uma evaporação mais rápida do combustível líquido e obter uma distribuição mais uniforme de combustível entre os cilindros.

A injeção de combustível dentro do coletor de admissão ou no duto de admissão é uma crescente alternativa comum para um carburador. Com injeção no duto, o combustível é injetado através de injetores individuais por um sistema de fornecimento de baixa pressão de combustível em cada duto de admissão. Existem diversos diferentes tipos de sistemas: injeção mecânica usando uma bomba de injeção tocada pelo motor; injeção contínua sem ser tocada pelo motor; injeção eletronicamente controlada sem ser tocada pelo motor. No sistema eletrônico, a vazão de ar é medida diretamente; as válvulas de injeção são dispositivos atuados duas vezes por revolução do comando de válvulas por injeção de pulsos cuja duração é determinada pela central eletrônica da injeção para proporcionar a quantidade desejada de combustível por ciclo. Uma aproximação alternativa é usar um único injetor de combustível localizado acima da borboleta, na posição normalmente ocupada por um carburador. Esta aproximação permite um controle eletrônico de combustível a um custo reduzido. A seqüência de eventos que acontecem dentro do cilindro do motor é ilustrada na Figura 2.

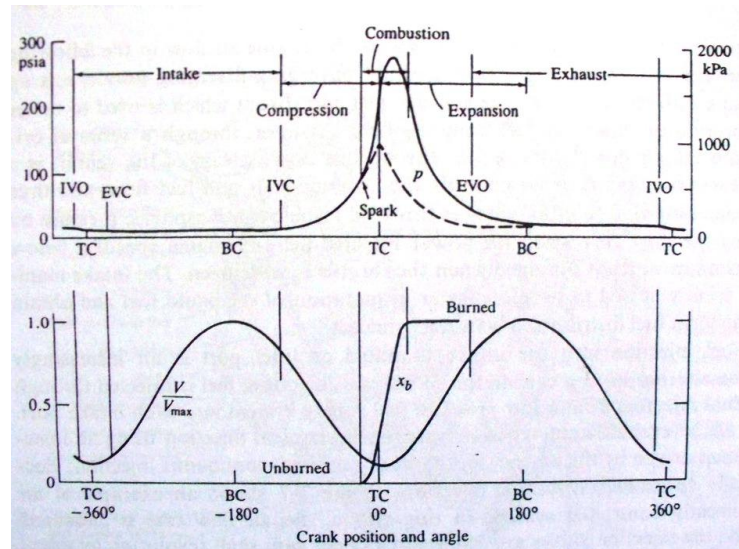


Figura 2: seqüência de eventos que acontecem dentro do cilindro do motor (HEYWOOD, 1988)

Muitas variáveis estão plotadas por ângulo do virabrequim ao longo de todo o ciclo de quatro tempos. O ângulo do virabrequim é uma útil variável independente porque os processos do motor ocupam intervalos quase constantes de ângulo de virabrequim ao longo de um grande intervalo de rotações de motor. A figura mostra relação entre a temporização das válvulas e volume para um típico motor automotivo de ignição por centelha. Para manter altas taxas de mistura a altas rotações (e, portanto, alta potência de saída) a válvula de admissão, a qual abre antes do ponto morto superior, fecha substancialmente depois do ponto morto inferior. Durante a admissão, o combustível e o ar admitidos se misturam no cilindro com o gás residual da queima do ciclo anterior. Depois que a válvula de admissão se fecha, o conteúdo do cilindro é comprimido acima da pressão atmosférica e temperatura, ao passo que o volume do cilindro é reduzido. Alguma troca de calor ao pistão, cabeçote, e paredes do cilindro ocorre, mas o efeito nos gases não queimados é modesto.

Entre 10 e 40 graus em relação ao ângulo do virabrequim antes do ponto morto superior, uma descarga elétrica através da vela de ignição começa o processo de combustão.

Um distribuidor, uma chave rotatória girada pelo comando de válvulas, interrompe a corrente da bateria através do circuito primário da bobina de ignição. O enrolamento secundário da bobina de ignição. Conectado à vela, produz alta tensão através dos eletrodos da vela até que o campo magnético se extinga. Tradicionalmente, distribuidores normais tocados pelo comando de válvulas têm sido usados; na maioria dos motores de automóveis, o chaveamento agora é feito eletronicamente. Uma chama turbulenta desenvolve-se a partir da faísca da vela, propaga-se ao longo da mistura de ar, combustível e gás residual no cilindro, e extingue-se na parede da câmara de combustão. A duração do processo de queima varia de acordo com o design e operação do motor, mas é tipicamente um processo de 40 a 60 graus em relação ao ângulo do virabrequim, como mostrado na Figura 2. Enquanto a mistura ar/combustível queima na chama, a pressão do cilindro na Figura 2 (linha sólida) sobe acima do nível devido à compressão sozinha (linha pontilhada). Esta curva seguinte – chamada de linha de pressão do cilindro – é a linha traçada de pressão obtida de um motor tocado por outro ou de um motor não dando ignição. Note que devido à diferença característica no escoamento e na composição de mistura entre os cilindros, e ao longo de cada cilindro de ciclo para ciclo, o desenvolvimento de cada processo de combustão difere de alguma forma. Como resultado, a forma da curva de pressão por ângulo de virabrequim em cada cilindro e de ciclo por ciclo não é exatamente a mesma.

Existe uma temporização (ponto de ignição) ideal para a faísca que, para uma dada massa de combustível e ar dentro do cilindro, produz o torque máximo. Ponto de ignição mais avançado (antes) ou retardado (depois) que este ponto ideal produz menor torque. Chamado de ponto ignição de máximo torque, este ponto ideal é uma relação empírica entre começar muito cedo a combustão no ciclo de compressão (quando a transferência de trabalho é para os gases do cilindro) e completando a combustão muito tarde na fase de expansão (e então diminuindo o pico de pressões do ciclo de expansão).

Em torno de dois terços ao longo da fase de expansão, a válvula de escape começa a abrir. A pressão do cilindro é maior do que do coletor de escape, e um processo de queda de pressão ocorre. Os gases não queimados fluem através da válvula através do duto de escape e do coletor até que as pressões do cilindro e do escapamento se equilibrem. A duração deste processo depende do nível de pressão no cilindro. O pistão então empurra os gases não queimados do cilindro para o coletor de escape durante a fase de escapamento. O ponto real é uma relação que de equilíbrio entre a redução do trabalho transferido ao pistão antes do ponto morto inferior e a redução do trabalho transferido ao conteúdo do cilindro depois do ponto morto inferior.

A válvula de escape continua aberta até logo após o ponto morto inferior; a válvula de admissão abre-se justamente antes do ponto morto inferior. As válvulas são abertas e fechadas devagar para evitar barulho e desgaste excessivo do comando de válvulas. Para garantir que as válvulas estão totalmente abertas quando as velocidades do pistão estão nos seus máximos, muitas vezes as válvulas permanecem abertas juntas no mesmo período. Se o escoamento de admissão é acelerado para mais baixo do que a pressão do coletor de escapamento, então um retorno de gases não queimados ocorre no coletor de admissão quando a válvula de admissão é aberta antes. (HEYWOOD, 1988)

2.5 UMA BREVE HISTÓRIA DO MOTOR DE CICLO OTTO

O motor de combustão interna começou a ser concebido quando em 1862 o físico francês Alphonse Beau de Rochas propôs as condições necessárias para que um motor de combustão interna, a quatro tempos, funcionasse com um máximo de economia. Rochas chegou a descrever também a seqüência de eventos, por meio da qual a economia e a eficiência poderiam ser conseguidas. Essa seqüência, que totalizava quatro tempos, é, em

síntese, o que hoje ocorre basicamente em todo motor de combustão interna. Porém, Rochas não chegou a construir motor algum, tendo apenas formulado, as condições de funcionamento econômico que ele havia imaginado. O motor apenas construído experimentalmente em 1872, só foi realizado praticamente em 1876 por Nikolaus Otto, que foi, inclusive, quem determinou o ciclo teórico sob o qual trabalha o motor de combustão interna. Quando a firma alemã Otto und Langen passou a fabricar os motores quatro tempos, de pistões móveis, ligados a uma árvore de manivelas, este motor passou a se chamar popularmente de motor Otto. (PASSARINI, 1993)

2.6 CLASSIFICAÇÃO DE MOTORES

Segundo Heywood (1988), existem diferentes tipos de motores de combustão interna, podendo ser classificados por:

1. Aplicação: automóveis, caminhões, locomotivas, aviões leves, aplicações marítimas, sistemas de geração de potência portáteis e geração de potência.
2. Design básico de motor: motores cíclicos alternativos (subdivididos em pela disposição dos cilindros: em linha, em “V”, radiais, opostos, etc.) e motores rotativos (Wankel e outros).
3. Ciclo de trabalho: a) Quatro tempos: motores aspirados naturalmente (aditem ar direto da atmosfera), supercomprimidos (aditem mistura recém pré-comprimida) e turbocomprimidos (aditem mistura recém comprimida em um compressor integrado a uma turbina movida pelos gases de escape); b) Dois tempos: admissão por sucção do cárter através de janela no bloco, supercomprimidos e turbocomprimidos.

4. Design e localização das válvulas e dutos: a) Válvulas na cabeça, válvulas no bloco, válvulas rotativas, fluxo cruzado (dutos de admissão e escape em diferentes lados do cilindro), fluxo em looping (dutos de admissão e escape do mesmo lado do motor) e fluxo direto (dutos de admissão e escape ou válvulas em diferentes lados do cilindro).
5. Combustível: gasolina, óleos combustíveis, gás natural, GLP, alcoóis (metanóis e etanóis), hidrogênio e bi-combustíveis. Acrescenta-se a Heywood os motores poli-combustíveis.
6. Método de preparação da mistura: carburação, injeção de combustível nos dutos de admissão, injeção direta de combustível. Acrescenta-se a Heywood as injeções eletrônicas de combustível.
7. Método de ignição: ignição por centelha (motores convencionais, onde a mistura é homogênea, e motores estratificados, onde a mistura é não-homogênea) e ignição por compressão (motores diesel em geral, bem como em motores a gás por injeção piloto de óleo combustível).
8. Design da câmara de combustão: câmara aberta (muitos designs: redonda, elíptica, hemisférica, câmara no pistão), câmara dividida (pequenas e grandes câmaras auxiliares, com muitos designs, como redemoinho, pré-camaras, etc.).
9. Método de controle de carga: admissão de combustível misturado com ar controlada por uma borboleta, controle apenas de combustível, ou uma combinação dos dois métodos.
10. Método de refrigeração: refrigeração por água, por ar, ou sem um sistema de refrigeração (somente por convecção natural e radiação).

2.7 O FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DE QUATRO TEMPOS

O motor de combustão interna de quatro tempos, ou o mais conhecido motor de combustão por faísca é um gerador de potência de combustão interna que se baseia em uma faísca de ignição induzida externamente para iniciar a ignição da mistura ar-gasolina. Os motores de quatro tempos de hoje se baseiam em um coletor de admissão para misturar combustíveis com ar antes de introduzir a mistura na câmara de combustão durante o ciclo de admissão. O nome motor de combustão interna de quatro tempos vem da distinção das quatro fases de combustão, que suprem energia cinética à árvore de manivelas.

Os quatro ciclos envolvem primeiramente a fase de admissão, em segundo a fase de compressão e ignição, em terceiro a fase de combustão, e finalmente a fase de exaustão. A fase de admissão envolve uma válvula de admissão aberta, uma válvula de escape fechada, e a jornada do pistão para se movimentar para baixo. À medida que o pistão se move para baixo, ele aumenta o volume efetivo dos cilindros. Assim criando um efeito de vácuo, o que aspira a mistura ar-gasolina através de uma válvula de admissão aberta. A fase de compressão enxerga ambas as válvulas de admissão e de escape fechadas, e o pistão se movendo para cima. O movimento do pistão para cima, combinado com o fechamento das válvulas diminui o volume do cilindro, portanto comprimindo a mistura ao longo da câmara de compressão. A fase de potência compreende uma válvula de escape e uma de admissão fechada, forçando o pistão para baixo devido à rápida expansão dos gases quentes produzidos após a ignição da mistura ar-combustível comprimida. Finalmente, a fase de escapamento com uma válvula de admissão fechada, uma válvula de escape aberta, e o pistão se movendo para cima expelle os gases quentes da câmara de combustão. A fase inteira então segue a repetir-se com uma nova fase de admissão.

A Figura 3 mostra visualmente as quatro fases completas de combustão, e é visto como um ciclo leva 720 graus para ser completado, o que é equivalente a duas voltas no virabrequim. (BEER, A.; CYPRA, A., 1999)

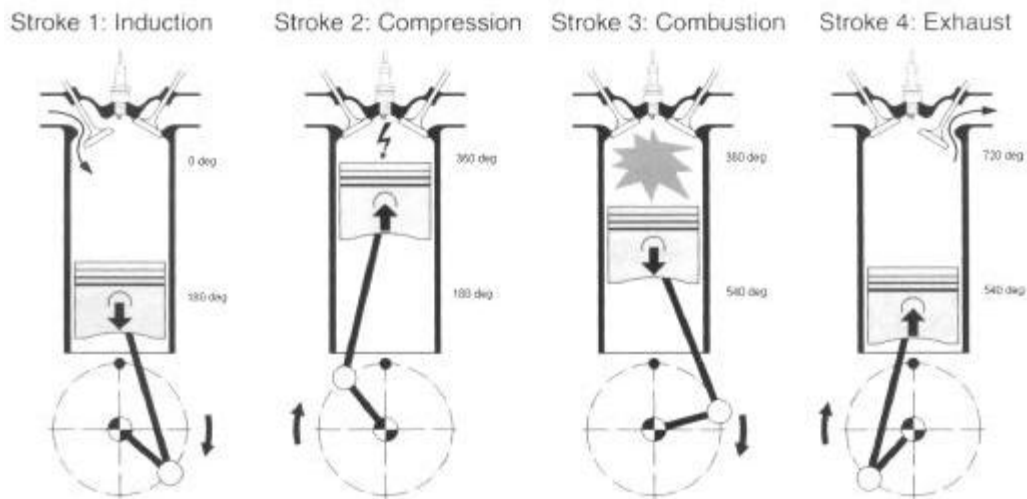


Figura 3: Ciclo de um motor de quatro tempos (BEER, A.; CYPRA, A., 1999)

Uma explicação talvez mais fácil de ser entendida por leigos é a dada por Aird, (2001). Segundo ele, se uma quantidade fixa de ar ou algum outro gás for confinada em um recipiente fechado e depois aquecida, a pressão dentro do mesmo, que é maior que a externa, subirá a tal ponto que, se alguma das paredes for móvel, empurrará a parte móvel com um certo montante de força proporcional ao calor entregue ao gás confinado.

Ainda segundo Aird (2001), aquele ambiente é o princípio de funcionamento de todos os motores de combustão interna, em que cada cilindro é o recipiente fechado, a parte móvel é representada por um pistão, o calor é gerado pela queima de um combustível e o gás confinado é um resíduo gasoso da queima. Enquanto isso, as outras partes móveis de um motor servem para permitir uma ou duas outras funções de auxílio ao motor. A parte de baixo do motor, como o virabrequim, ou árvore de manivelas, e as bielas (êmbolos) converte o

movimento retilíneo dos pistões em movimento circular ou rotatório e quando retornam ao topo do ciclo, deixam os recipientes com seus tamanhos originais. A parte de cima do motor, como válvulas, comando de válvulas, e demais componentes, simplesmente providenciam o esvaziamento dos gases residuais da combustão, bem como o reenchimento dos cilindros com uma mistura nova, pronto para ser queimada.

Já a Figura 4 a seguir, mostra resumidamente a termodinâmica envolvida nas diversas partes do ciclo de um motor de combustão interna:

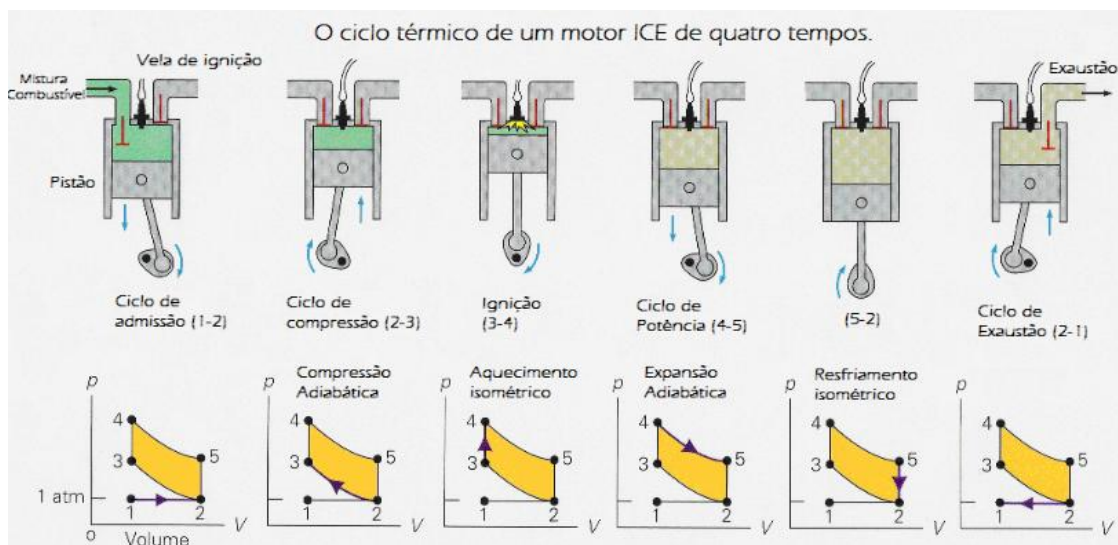


Figura 4: Ciclo Otto para um motor de combustão interna. (FERNANDEZ, 2006)

2.8 INFORMAÇÕES SOBRE A RELAÇÃO ENTRE O AR E OS COMBUSTÍVEIS

Alguns combustíveis contêm mais energia específica do que outros, e, assim, podem produzir mais calor quando queimados. Ainda limitando a discussão à gasolina, o fato de que a gasolina tipo C dos postos de combustível é uma mistura de centenas de diferentes compostos inflamáveis, e que cada um desses compostos tem um potencial diferente para gerar calor quando queimado. A exata natureza da mistura desses compostos varia de uma bomba de um posto de combustível a outro e de uma temporada a outra, então um kilo de

gasolina de uma bomba em um dia pode liberar um pouco mais ou menos calor quando queimada do que um kilo vindo de outra bomba, ou da mesma bomba em outro dia.

Enquanto cada um é único, todas as centenas de componentes fazem a gasolina ter uma coisa em comum – todos são hidrocarbonetos. Isto é, todos são feitos de apenas dois tipos de átomos, hidrogênio (H) e carbono (C). A diferença entre um desses hidrocarbonetos e outro está em ambos o número de átomos de hidrogênio e de carbono, ou na forma com que esses dois elementos compostos são arranjados, ou as duas coisas.

Agora, combustão é um processo de oxidação – uma combinação com oxigênio (O) – então, reduzindo ao seu básico, com um combustível de hidrocarboneto como a gasolina queima, moléculas individuais de hidrocarboneto da gasolina combinam com moléculas individuais de oxigênio do ar. O hidrogênio (H) no hidrocarboneto combina-se com um pouco do oxigênio (O) no ar para produzir água (H_2O) enquanto o carbono (C) no hidrocarboneto combina-se com o resto do oxigênio para formar o dióxido de carbono (CO_2). Neste processo, uma grande quantidade de energia é liberada, na forma de calor. Esta dança química remete basicamente a um reverso do processo que acabou criando os hidrocarbonetos em primeiro lugar.

Ar também é uma mistura de substâncias, contudo todas elas são gases à temperatura ambiente. Aproximadamente 78% da nossa atmosfera é nitrogênio (N); apenas aproximadamente 21% disto é oxigênio. O 1% aproximado remanescente é composto por diversos gases raros, como neônio e argônio, mais CO_2 e vapor de água.

A reação química da gasolina em combustão – especialmente dentro dos cilindros de um motor a gasolina em funcionamento – é muito mais complicada pela presença desses outros elementos, e particularmente do nitrogênio.

Nitrogênio é uma substância comparativamente inerte – ela não reage prontamente com quase nada, então numa descrição da combustão da gasolina no ar, o nitrogênio é ignorado,

assumindo que ele atravessa toda a operação sem mudança. De fato, isso não é bem verdade. Exposto a enormes temperaturas e pressões na câmara de combustão de um motor, um pouco do nitrogênio termina combinando-se com um pouco do oxigênio, formando vários óxidos de nitrogênio NO_2 , NO_3 e assim por diante - conhecidos coletivamente por NO_x .

Enquanto para a maioria dos propósitos o pequeno envolvimento do nitrogênio não faz muita diferença, esses óxidos de nitrogênio são poluentes. Portanto, enquanto a idéia de queimar um combustível parece um negócio simples, aqui está apenas um fato que começa a revelar que isto é, de alguma forma, mais sutil e complexo do que antes parecia. (AIRD, Forbes. 2001)

É essencial comentar sobre quando a equação química da mistura de combustível e ar atinge o equilíbrio e passa a se chamar de mistura estequiométrica. A seguir, um subcapítulo detalhando este importante aspecto de todo motor a combustão.

2.8.1 Mistura estequiométrica

Na química é dita estequiométrica uma equação química cujos elementos que reagem entre si estão em quantidades estritamente necessárias para produzir uma determinada quantidade de um produto da reação sem que haja sobras de reagentes. Dentro de limites estreitos, uma quantidade fixa (isto é, em peso) de ar contém certo número específico de moléculas de oxigênio e qualquer peso dado de qualquer tipo específico de gasolina ou derivados contém um número definido de moléculas de hidrocarbonetos. Por causa do processo de queima resumir-se em átomos individuais combinando-se entre si, segue que existe apenas uma razão gasolina/ar que pode garantir que todas as moléculas de oxigênio combinam-se com todas as moléculas de hidrocarbonetos. Este ideal teórico é chamado de uma mistura estequiométrica.

Se existe excesso de moléculas de oxigênio, algumas delas não encontrarão parceiros. Em termos de número de pares oxigênio/hidrocarbonetos, e, portanto, quantidade de energia liberada, o efeito é como se estivesse começado com uma quantidade menor de ar. Ao mesmo tempo, se existem muitas moléculas de hidrocarbonetos em relação à quantidade de ar, então alguma parte dos hidrocarbonetos aparecerá não queimada a partir do processo de combustão. Uma parte da gasolina é simplesmente perdida.

Não apenas isso, mas uma pequena parte de oxigênio significa que existe uma tendência entre alguns átomos de carbono nos combustíveis de hidrocarbonetos de se combinarem com apenas um átomo de oxigênio, ao invés de dois, liberando monóxido de carbono (CO) ao invés de dióxido de carbono (CO₂). Enquanto o CO₂ é um dos gases mais causadores de efeito estufa que são parcialmente responsáveis pelo aquecimento global, pelo menos é apenas diretamente nocivo à vida animal quando sua concentração cresce tanto que ocupa muito mais lugar que o oxigênio que nós precisamos respirar. CO, pelo outro lado, é tóxico até mesmo em pequenas doses.

Diz-se que apenas 14.7g de ar contêm o correto número de moléculas de oxigênio para fazer par ao número de moléculas de hidrocarbonetos em 1g de gasolina. A relação de ar/gasolina para atingir uma mistura estequiométrica, em outras palavras, é aproximadamente 14.7:1, pelo peso. Note que é dito aproximadamente – não existe um único número que corretamente identifica a mistura estequiométrica para todas as gasolinas. Para explicar, lembre que a gasolina é uma mistura de hidrocarbonetos. Cada uma tem sua mistura estequiométrica, indo de menos que 13:1 até mais que 15:1, de modo que a razão estequiométrica para a mistura inteira depende das proporções dos diferentes hidrocarbonetos que a compõe. Parte das variações incidentes, as maiores companhias de petróleo modificam deliberadamente a quantidade de hidrocarbonetos na mistura do combustível de temporada

em temporada e de lugar a lugar, de modo que a mistura estequiométrica pode corresponder variando levemente, de acordo com onde e quando você compra o combustível.

Como dito, gasolina, estritamente definida, contém apenas hidrocarbonetos, porém companhias produtoras de petróleo já começaram também, recentemente, a incluir alguns aditivos na gasolina que afetam a mistura quimicamente correta. Dentre os aditivos comumente encontrados em ambas as gasolinas de postos de combustível e de corrida são o álcool etílico (etanol) e o éter metil-butil-terciário (MTBE). Ambas essas substâncias são exemplos do que são chamados aditivos – como os hidrocarbonetos mencionados, eles contém hidrogênio e carbono, mas diferentemente dos hidrocarbonetos eles também contém oxigênio. Um combustível carregando seu próprio oxigênio adiciona ao conteúdo aspirado pelo motor, de modo que a presença de aditivos significa que um pouco mais de combustível é necessário em relação à quantidade de ar que o motor está aspirando, para compensar o oxigênio adicional sendo carregado juntamente com o combustível – a razão estequiométrica torna-se um pouco menor (numericamente). Esta é agora outra razão porque não é possível especificar exatamente a proporção da mistura estequiométrica para qualquer uma das gasolinas.

Note, também, que a proporção da mistura estequiométrica é expressa como uma razão de pesos ou mais corretamente massas – não volumes. (A massa de alguma coisa é, na verdade, uma “conta” do número de moléculas nela.). Certa massa de ar – que é certo número de moléculas – ocupará mais ou menos volume, de acordo com sua temperatura. Um metro cúbico de ar quente contém menos moléculas gasosas, incluindo moléculas de oxigênio, que um metro cúbico de ar frio. Outros fatores, como pressão atmosférica e altitudes também afetarão a densidade de ar – o peso de certo volume, em outras palavras. Em relação a isso, a densidade de gasolina também variará com a temperatura, porém não tanto.

Enquanto que a estequiometria ideal expressa a mistura quimicamente correta para qualquer mistura de gasolina, a gasolina irá, de fato, queimar no ar ao longo de um intervalo de razões de aproximadamente 6:1 a mais de 24:1. As misturas que contém mais combustível que as teoricamente ótimas são ditas como “ricas”, enquanto que aquelas com excesso de ar são denominadas “pobres”. Para máxima produção de potência existe alguma coisa a ser dita para misturas mais ricas que as estequiométricas.

Para começar a explicar, considere um motor de quatro cilindros girando a 6000 rpm. A essa velocidade, cada tempo do ciclo de combustão dura apenas 1/400 de segundo. Para se ter uma idéia de quão curto esse tempo é, olhe através do obturador de uma câmera sem filme configurada para tal velocidade e aperte o botão. Mesmo que a combustão envolva extrema turbulência que violentamente agita e mistura as diferentes moléculas, é extremamente improvável que toda molécula de oxigênio estará hábil a achar uma molécula de hidrocarboneto para reagir em um tempo tão curto. Agora, para máxima potência é desejado máximo calor, e o calor vem da combinação entre as moléculas de hidrocarbonetos no combustível e as moléculas de oxigênio do ar.

Um cilindro de um motor tem um tamanho fixo, entretanto a máxima quantidade de ar, e, assim, o número de moléculas de oxigênio que cada cilindro consegue aspirar é limitado. Para máxima potência é deseja-se ter certeza de que todas as moléculas disponíveis na quantidade fixa de ar dentro do cilindro reajam com um hidrocarboneto, e o modo para fazer isso é prover algumas moléculas extras de hidrocarbonetos. E o modo para fazer isso, por sua vez, é prover uma mistura que tenha pequeno excesso de combustível – uma mistura levemente rica. Como observado, contudo, essa gasolina extra é perdida; isto também aumenta a poluição. Hidrocarbonetos não queimados, ou “HC”, são outros poluentes do escapamento que as leis ambientais tentam controlar.

Por outro lado, se estamos preparados para sacrificar um pouco de potência, podemos obter o máximo uso da quantidade de combustível queimado provindo uma mistura levemente pobre. Do mesmo modo que um pouco de combustível excedente garante que todo oxigênio seja usado, um pouco de ar excedente ajuda a assegurar que toda molécula de hidrocarboneto encontre uma molécula de oxigênio para fazer par. Isso pode reduzir se não eliminar, as emissões de hidrocarbonetos. Dentro dos limites, isso pode também levar a diminuir o consumo de combustível para uma dada potência de saída.

A maioria dos sistemas de injeção de combustível – e a maioria dos carburadores – levam em conta essas considerações no seu design e em sua operação. Durante operação com carga leve, como quando ocorre quando andando em velocidade de cruzeiro com uma comparativamente pequena abertura de borboleta, o sistema empobrece a mistura um pouco, para aumentar a economia de combustível e minimizar a emissão de HC poluentes. Quando o motorista acelera fundo e a borboleta abre bastante, demandando máxima potência, o sistema provém uma mistura mais rica, ao custo de economia de combustível e níveis de HC no escapamento. Existem outros aspectos para a questão mistura rica é igual à máxima potência. Primeiramente, quando a gasolina evapora, ela absorve bastante calor no processo, o que provavelmente sabemos ao observar a evaporação das nossas mãos no clima frio. O efeito de refrigeração interna de uma mistura levemente rica reduz as temperaturas internas de algum modo, especialmente nas áreas críticas como as cabeças de pistões e as extremidades das válvulas de escapamento. Enquanto motores modernos de rua são confiáveis, a refrigeração interna provinda de um excesso de combustível pode fazer diferença considerável quando da sobrevivência de um motor de corrida que está funcionando no limite da autodestruição térmica.

Além disso, o calor absorvido no processo de ebulição da gasolina líquida excedente em vapor pode reduzir a temperatura da mistura ar/combustível que entra no motor.

Conforme discutido, ar frio é mais denso do que ar quente, então um cilindro cheio de mistura fria provinda da admissão será deste modo mais pesado (e então contendo mais moléculas de oxigênio) do que o contrário. Isso conta para algum possível ganho de potência de saída. (AIRD, 2001)

2.8.2 Detonação

Outra consideração relacionada à relação entre diluição da mistura e potência é a questão da tendência da mistura ar/gasolina detonar. Para explicar, a queima de combustível dentro de um cilindro do motor é constantemente caracterizada como uma explosão, mas apesar de o evento da combustão ser extremamente rápido, ele não é, tecnicamente, uma explosão. Uma vez iniciado pela centelha, a queima começa como uma pequena bolha de chama em torno dos eletrodos das velas. Em condições normais, o processo de queima então se espalha rapidamente, mas suavemente, através do resto da mistura como uma bola de fogo em expansão.

Em algumas circunstâncias, contudo, a combustão pode começar suave o suficiente, porém ao passo que a frente de chama se expande através da câmara de combustão, a temperatura que cresce rapidamente e a pressão a frente dela causa mudanças químicas complexas na mistura não queimada mais longe, chamada de gás final. Comprimida e aquecida pela bola de fogo que se aproxima, ela muda de uma previsível e lenta mistura sendo queimada para algo muito mais instável. Como resultado, o gás final inflama espontaneamente quase que completo de uma vez só, e a frente de onda de choque resultante ecoa ao longo do motor. Isto é detonação, ou “batida de pino”.

O pico de pressão agudo que resulta quando este evento secundário encontra-se com a onda da chama original pode criar orifícios nos pistões. Mesmo que não crie, a turbulência

criada pela detonação vai contra as superfícies da câmara de combustão, deixando o calor ser retirado dos redemoinhos de gases e entre o metal circundante muito mais rápido do que o normal. Como uma consequência os gases perdem calor, suas pressões caem de acordo e a potência diminui imediatamente. (Apesar de o pico de pressão durante a detonação ser muito mais que o da combustão normal, a pressão média esta bem abaixo por causa da perda por calor.)

Por causa de as medidas anteriores à detonação serem químicas, a habilidade de uma específica mistura de gasolina resistir à detonação depende da química da mistura, e, portanto, depende de vários hidrocarbonetos que fazem isso. Em geral, a resistência à detonação de qualquer amostra de gasolina é expressa pela sua octanagem, mas esse número assim obtido depende se algum componente da diluição da mistura. Alguns compostos da gasolina detonam pior quando em mistura rica; outros aumentam substancialmente a resistência à detonação com enriquecimento. Previsivelmente, esses últimos são encontrados em abundância na gasolina de corrida.

Para a gasolina de bomba de posto de combustível em um motor típico, a razão da mistura de pico de potência é mais provável que esteja na área de 12:1. Dependendo da composição da gasolina, qualquer coisa mais rica que isso pode aumentar os problemas de detonação, e o efeito de refrigeração em excesso pelo combustível, se levada aos extremos, pode absorver parte do calor que preferiríamos que estivesse trabalhando para aumentar a pressão gasosa. Para menor consumo e mais baixas emissões de HC, alguma coisa perto de 16:1 é desejada. De fato, num motor a relativamente altas rotações com carga muito pesada, misturas tão pobres quanto 18:1 podem oferecer ainda mais economia de combustível. Essas misturas já queimam quentes, porém, com o calor extra, juntamente com todas essas moléculas extras de oxigênio, fazem com que seja mais provável que o nitrogênio

supostamente inerte se combine com um pouco de oxigênio, piorando as emissões de NOx. (AIRD, 2001)

2.8.3 Melhorando a “dieta de um motor”

Enquanto as generalizações feitas anteriormente são amplamente aplicáveis a todos os motores, estabelecer a correta dieta de ar/combustível para qualquer motor em particular em uma faixa completa de rotações e cargas só pode ser atingida por um longo e tedioso processo que envolve teste em dinamômetro. O motor é testado para algumas rotações aberturas de borboleta, e a carga é ajustada para manter a rotação constante. Começando com uma mistura de razão muito rica de ar/combustível, a mistura é ajustada para mais pobre em pequenos decrementos, e o fluxo de combustível é medido para cada variação em unidades por hora. Conforme a mistura é gradualmente empobrecida, a potência inicialmente aumenta até que um máximo é atingido. Seguintes empobrecimentos resultam numa redução de potência, mas pelo menos inicialmente a quantidade de combustível queimado para cada cavalo de potência produzido aumenta menos. (AIRD, 2001)

A relação entre consumo de combustível e produção de potência é chamada de Consumo Específico de Combustível, que basicamente é o quanto de combustível o motor precisará queimar por hora para por cavalo de potência na potência máxima.

Segundo Aird (2001), o motor produzirá um máximo valor de Consumo Específico de Combustível utilizando uma mistura de determinada concentração, porém este máximo de potência por quantidade de combustível não reproduzirá a potência máxima possível, que se encontrará em uma concentração um pouco mais rica, a qual exigirá que o motor queime um pouco mais de combustível. À medida que a mistura é empobrecida, ela passa do ponto de Consumo Específico Máximo e a potência cai consideravelmente. Um aspecto interessante é

o fato de que a partir de um determinado ponto é inútil aumentar a quantidade de combustível queimado pois ela não representará mais um ganho de potência, mas um aumento de consumo apenas. O resultado plotado em gráfico é chamado de Curva de Hook, conforme mostra a Figura 5 a seguir.

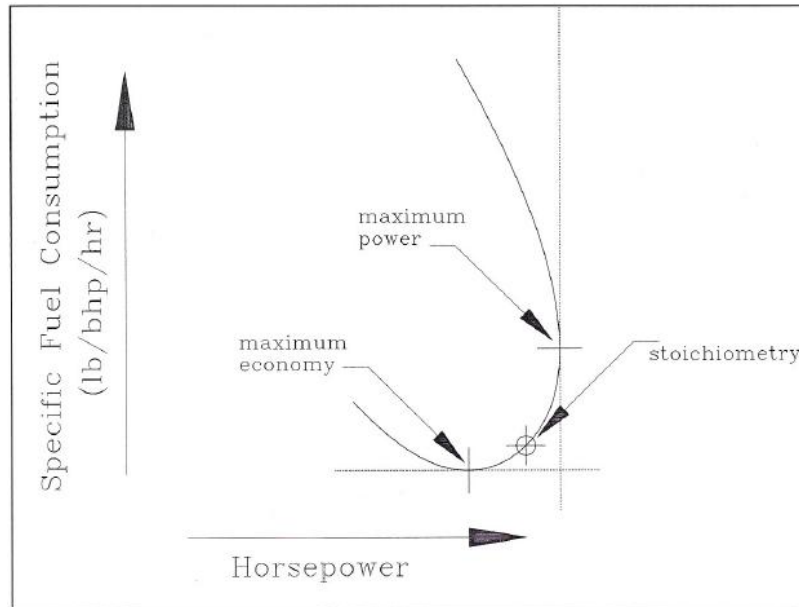


Figura 5: Curva de Hook. (AIRD, 2001)

Ainda segundo Aird (2001), uma vez terminado o teste, ele deve ser repetido no mesmo motor novamente, só que para outras rotações, de modo que toda a faixa de operação do motor seja coberta, com incrementos de 500 rotações por minuto, por exemplo. O mesmo conjunto de testes deve ser repetido para diferentes níveis de abertura de borboleta.

A Figura 6 a seguir mostra a Curva de Hook com a marcação de alguns pontos importantes.

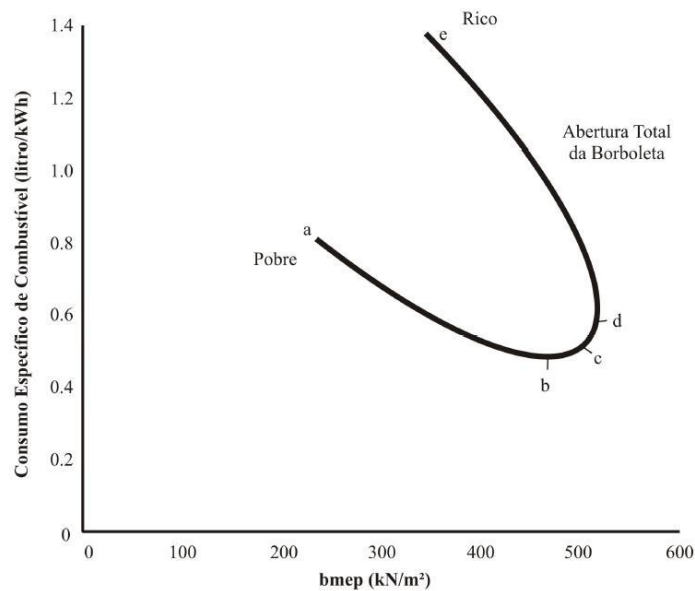


Figura 6: Curva de Hook, consumo em motor de ciclo Otto. (WILDNER, 2006)

Segundo Wildner (2006), os pontos da Curva de Hook da Figura 6 são:

- Ponto a: mistura pobre, com potência bastante reduzida, consumo específico podendo ser o dobro do consumo específico de melhor eficiência do motor;
- Ponto b: melhor eficiência térmica do motor, ou seja, maior desempenho do mesmo;
- Ponto c: razão de mistura estequiométrica;
- Ponto d: maior potência do motor, porém com aproximadamente 10% maior consumo específico do que o ponto b, o ponto de melhor eficiência térmica do motor;
- Ponto e: máximo valor de mistura rica com o qual o motor ainda consegue funcionar;

Algumas características da relação ar/combustível para combustíveis líquidos são ressaltadas por Wildner (2006), como o fato de que, para misturas ricas, a partir da zona de máxima potência em direção à mistura estequiométrica, tem-se uma rápida combustão de chama azul e que se cessa no ciclo de expansão rapidamente. É ressaltado também que ao tornar-se a mistura mais pobre, ela se propagará durante o ciclo de expansão, ocasionando o retorno de explosões no coletor de admissão. Já quando a mistura é tornada mais rica que a de

máxima potência, ocorrerá formação de chama amarela, devido a partículas incandescentes de carbono que se propagam até a abertura da válvula de escape, podendo gerar explosões no sistema de escapamento.

2.8.4 Dietas especiais

Uma circunstância especial que requer uma mistura muito mais rica do que a mistura estequiométrica é a partida a frio. Pode não ser surpresa aprender que os vários hidrocarbonetos que compõem a gasolina têm pontos diferentes de ebulição e, portanto, evaporam a diferentes taxas. Em temperaturas muito baixas, algumas podem nem evaporar, então o único modo de garantir que existe gasolina suficiente que seja vaporizada para fazer uma mistura no ar que possa ser queimada é fornecendo muita gasolina. Razões de misturas ar/combustível típicas para partidas a frio estão entre 2:1 e 1:1.

Historicamente, existem outras duas situações em que se pensa (ou pensava-se) demandar uma mistura rica – em marcha lenta e na aceleração. Certamente o enriquecimento na marcha lenta é necessário em típicos motores carburados, e para uma menor parte de motores com sistemas TBI (*Throttle Body Injection*), mas isto é apenas uma parte dos problemas que começam com a tentativa de distribuir a partir de um ponto central toda a mistura ar/combustível necessária para um motor multi-cilíndrico. Prova de que em princípio muito pouco enriquecimento na marcha lenta é necessário vem dos atuais motores produzidos com certificados de emissões de poluentes, os quais consomem na marcha lenta misturas muito perto das estequiométricas.

A outra situação na qual convencionalmente pensava-se demandar enriquecimento significativo é a aceleração. Todo carburador de sucesso já feito tinha ou uma bomba de aceleração que injetava combustível extra toda vez que a borboleta era aberta, ou (mais

raramente) alguns outros meios de temporariamente enriquecer a mistura quando a borboleta era subitamente aberta. Parece que quase toda (porém não toda) essa “necessidade”, também se deve a fatores secundários – neste caso, da natureza dos carburadores – ao invés de ser uma característica das necessidades dos próprios motores. (AIRD, Forbes. 2001)

2.8.5 Os problemas da Distribuição Central de Combustível

Para operação satisfatória do motor, qualquer coisa que misture o combustível e o ar adequar, em termos de razão ar/combustível, as diversas necessidades de alimentação do motor em diferentes condições, e precisa ser capaz de transitar suavemente e continuamente entre elas conforme a situação requer. E ainda por cima, contudo, mantendo as proporções corretas. Grandes bolhas de combustível, mal distribuídas no ar, não satisfarão suas necessidades, mesmo que a as proporções estejam corretas. Para começar a entender as razões para isto, imagine colocar fogo numa colher de sopa de gasolina. Sim, ela queimará rapidamente, mas considere um motor que produz 225 cavalos gasta isso a cada segundo. Devido ao fato de que cada ciclo de potência ocupa no máximo metade de uma revolução do virabrequim, e que demora duas revoluções completas para um ciclo completo do motor, o evento de combustão no motor obviamente ocupa no máximo um quarto do tempo. Você não consegue queimar uma colher de sopa de gasolina em um quarto de segundo. (AIRD, 2001)

O que foi dito acima significa dizer que se a gasolina estiver em estado líquido, aglomerada, ela não queima em tempo suficiente quando se trata de um motor usual que consuma um pouco mais de combustível, por ser um motor de maior potência ou cilindrada. É sabido que é desejável, portanto, que o combustível esteja vaporizado, misturado com ar em suspensão e na forma mais gasosa possível para que consiga ser queimado rapidamente. O contrário disso é uma mistura ruim, na qual o combustível entra na forma praticamente

líquida, sem se misturar com o ar, dentro da câmara de combustão, causando uma má combustão, com baixo rendimento e grande emissão de poluentes, sem contar com problemas como a dissolução da parede de óleo das paredes do cilindro – ocasionando maior atrito e, por sua vez, pior rendimento e maior desgaste do motor. Será visto na seqüência alguns conceitos relacionados em maior detalhe.

Vaporização: se houvesse que dividir a mesma quantidade de combustível em na medida de três colheres de chá de combustível e acendê-las todas simultaneamente, então a gasolina queimaria mais rapidamente que uma colher de sopa. Se houvesse a divisão em grandes gotas, seria ainda mais rápida a queima. Quanto mais dividir o combustível, mais área de superfície cada partícula terá em contato com o oxigênio do ar, em relação ao volume de combustível de cada gota, então mais rápido a energia será liberada. O ideal seria dividir o combustível em partículas de menor unidade possível – moléculas individuais. Neste caso, não seria possível ver combustível líquido; ele existiria todo como vapor. De fato, não é possível normalmente chegar tão perto da perfeição, então o enchimento da admissão consistirá numa mistura de ar, gasolina vaporizada e pequenas gotas. Uma das vantagens inerentes da injeção de combustível em relação aos carburadores é a de que o combustível é introduzido no ar de admissão em comparativamente alta pressão. Do mesmo modo que um chuveiro produz um spray fino quando a torneira está toda aberta, mas produz um spray com grandes gotas quando a torneira está quase toda fechada, a mistura pressurizada provinda de um injetor de combustível ajuda nesse processo de vaporização.

Fluxo do duto de admissão: existe mais do que isso. Considere um cilindro de um motor V8 de 5,3 litros girando a 6000 rotações por minuto. Cada cilindro individual desloca 0,66 litros e, portanto, aspira esse conteúdo de ar a cada duas revoluções (assumindo um motor de quatro tempos), para um total de aproximadamente 1966,45 litros de ar por minuto. Este ar flui através dos dutos de admissão no cabeçote e do coletor de admissão, que deve ter

uma área de seção de alguma coisa em torno de $19,35 \text{ cm}^2$. A taxa média de escoamento através desse orifício é simplesmente o volume dividido pela área do buraco pelo qual flui isso, de modo que a velocidade da mistura é: $1966,45 / 0,001935 =$ metros por minuto, ou algo em torno de 61 km/h. Agora 61 km/h não parece uma velocidade muito alta, mas o ar a caminho do cilindro normalmente tem que fazer algumas curvas, e elas podem ser fechadas ou podem ter um raio de 7,62cm, por exemplo. De acordo com a aritmética, será descoberto que a passagem de ar ao longo de uma curva de raio de 7,62cm pode experimentar uma aceleração equivalente a 382 vezes a força da gravidade (382 g). Agora, se tudo isso que está fluindo através de dutos de admissão é ar e combustível vaporizado, esses 382 g não perturbarão os gases. Mas com qualquer arranjo que misture o combustível e o ar de um ponto central, essas curvas fechadas de alta velocidade realmente atrapalham o movimento de quaisquer gotas de combustível que sejam misturadas com esses gases. O que irá acontecer, de fato, é que elas serão centrifugadas para a parte externa do duto e formarão poças líquidas nas superfícies interiores das portas. À primeira vista pode parecer que não importa tanto; o combustível será carregado adiante pelo ar passando e será eventualmente direcionado para dentro do cilindro e a mistura ar/combustível será mantida, pelo menos na média. Mas “na média” não é bom o suficiente; a densidade da mistura no cilindro pode variar de momento para momento, de acordo com a vontade das poças. Claro que se existe apenas um cilindro, existe menos necessidade de curvas no encanamento do coletor de admissão, mas as coisas realmente se tornam feias quando se lida com mais de um cilindro sendo alimentado pelo mesmo canal, para assim dizer. Quando múltiplos cilindros são alimentados por uma fonte comum, como é o caso da TBI e a indução por sistemas carburados, existem inevitavelmente curvas, e provavelmente muitas delas. Inevitavelmente, este efeito de decantação de combustível somente favorecerá alguns cilindros e não outros. Nos dias antes de conscientização sobre emissões (o que significa dias de carburadores), uma

variação de quatro números na concentração da mistura entre cilindros do mesmo motor não são incomuns – alguns cilindros podem estar trabalhando com 16:1, outros com 12:1. Para manter o motor ligado na lenta, é necessário fornecer um combustível excedente a fim de garantir que o cilindro funcionando com a mistura mais pobre tenha uma mistura inflamável. Com o desenvolvimento metucioso do coletor de admissão, é possível reduzir essa variação de cilindro para cilindro, e coletores com design moderno para motores com carburadores ou sistemas TBI são muito melhores do que os passados. Ainda assim, a vontade de garantir vaporização mais próxima da completa possível deve ser óbvia. Em rotações de marcha lenta, a velocidade do fluxo dos gases através dos dutos é obviamente muito reduzida, então a tendência das gotas de se separar do fluxo gasoso porque as forças centrífugas serão drasticamente reduzidas. Ao mesmo tempo, o alto vácuo existente no coletor de admissão de um motor na marcha lenta ajuda as gotas de combustível a se vaporizarem. Do mesmo modo que a água ferve a temperaturas mais baixas (isto é, evapora mais facilmente) no topo de uma montanha do que no nível do mar, a gasolina evapora mais facilmente em ar rarefeito do que quando é mais denso. Ironicamente, o problema de atomização incompleta permanece – pelo menos para motores carburados – simplesmente porque a baixa taxa de fluxo significa turbulência reduzida, o que pode de outro modo dividir grandes gotas em gotas menores. Além da questão da taxa de fluxo, existem outros fatores em jogo que obriga os motores com um “misturador central” – e especialmente aqueles com um carburador – a operar com misturas ar/combustível ricas na marcha lenta. Dois desses são a diluição de carga e a reversão, termos a serem definidos mais adiante. A temporização, ou ponto, da ignição é uma questão muito importante que influencia fortemente o consumo de combustível, características de torque, e emissões de poluentes no escapamento. (AIRD, 2001)

2.9 IGNIÇÃO: COMEÇA A COMBUSTÃO

Para produzir potência, o motor a gasolina precisa não apenas ter a mistura correta de combustível e ar, mas também meios de iniciar a combustão da mistura. Essencialmente a única maneira prática é com uma faísca elétrica produzida através de um arco entre um par de eletrodos de uma vela de ignição. O arco elétrico ou faísca libera energia suficiente para ocasionar a combustão. Este fenômeno é chamado de ignição. (RIBBENS, 1998)

A temporização, ou ponto, da ignição é uma questão muito importante que influencia fortemente o consumo de combustível, características de torque, e emissões de poluentes no escapamento nos motores de combustão interna. O método de ignição passou por diversas mudanças ao longo dos últimos vinte anos. Os primeiros sistemas eram os de bobina de ignição; este era um sistema completamente mecânico onde um magneto sólido e seu campo magnético excitavam a bobina quando passava por ela, resultando na centelha na bobina quando o campo magnético se extinguia. Um número de designs eletro-mecânicos teve sua participação na indústria automotiva seguindo o sistema de bobina de ignição; esses eram o sistema de ignição transistorizada e o sistema de ignição com semicondutores. Ambos desses sistemas tinham partes mecânicas, que de alguma forma não eram confiáveis, já que as partes mecânicas são propensas a falhas se não receberem manutenção correta. O sistema de ignição sem distribuidor por semicondutores, por outro lado, é um completo sistema eletro-eletrônico menos propenso a falhas do que o seu predecessor mecânico. Nas Figuras 7 e 8 abaixo estão as diferenças entre os sistemas de ignição com distribuidor e sem distribuidor.

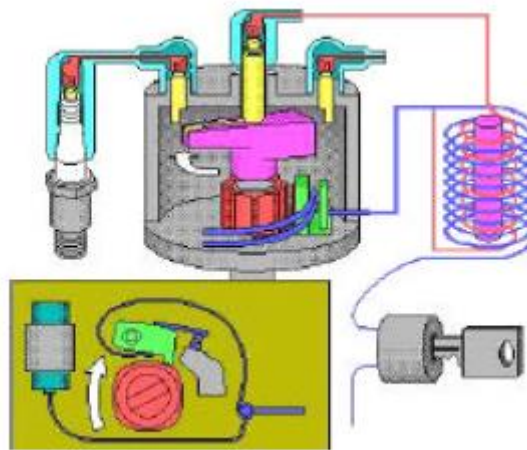


Figura 7: Ignição sistema Kettering com distribuidor. (KOSIK, 2000)

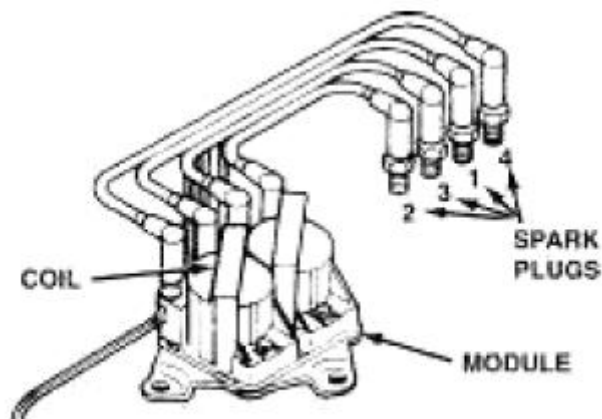


Figura 8: Ignição sem distribuidor. (KOSIK, 2000)

Fica claro que o sistema com distribuidor tem numerosas partes mecânicas para serem projetadas que são propensas a falhas se não tiverem manutenção constante, ao contrário do sistema sem distribuidor que não possui partes mecânicas móveis e não requer manutenção. (KOSIK, 2000)

O sistema de ignição deve realizar, com confiabilidade, a ignição da mistura comprimida em um momento definido com precisão, mesmo sob condições operacionais dinâmicas com as flutuações substanciais nos padrões de fluxo da mistura e relações

ar/combustível. A ignição confiável pode ser obtida através da seleção das localizações da vela de ignição com um bom acesso da mistura e padrões eficientes de turbilhonamento. Estas são considerações especialmente importantes para uma operação pobre com aberturas de estrangulamento muito baixas. Melhorias similares também podem ser atingidas através do posicionamento da vela de ignição em pequenas câmaras de ignição auxiliares.

As exigências de energia de ignição dependem da relação da mistura ar/combustível (A/F). É necessária uma energia de ignição de 0,2 mJ para misturas de gasolina/ar na faixa estequiométrica, enquanto são necessários 3 mJ para a ignição de misturas mais ricas ou mais pobres.

A tensão de ignição necessária aumenta com a pressão do gás no momento da ignição. O aumento da folga do eletrodo é uma maneira de melhorar a confiabilidade da ignição, mas isto requer uma tensão de ignição mais alta e provoca o desgaste acelerado do eletrodo. O teor de energia da mistura inflamada pela vela deve ser suficiente para a ignição da mistura adjacente. Isto define a mistura mais pobre possível e o momento precoce de ignição. (BOSCH, 2005)

De acordo com Ribbens (1998), depois de uma combustão estável ter começado, não existe necessidade de uma centelha, esta que tipicamente deve persistir por um período em torno de um milissegundo. É possível obter durações como essa, relativamente curta, usando circuitos muito eficientes de transformadores de pulso, nos quais um circuito tendo uma relativamente baixa corrente média pode fornecer um pulso de tensão muito alta, ou pico alto de potência, para a vela. O sistema de ignição por si consiste de alguns componentes como a vela de ignição, bobinas (que são transformadores), circuitos de controle de ponto de ignição, e algum dispositivo que faz a distribuição do pulso de alta tensão ao cilindro correto.

2.9.1 A vela de ignição

A centelha produzida pela aplicação de um pulso de alta tensão de 20 kV a 40 kV (1 kV é 1000 volts) entre o eletrodo central e massa. A tensão real necessária para começar o arco varia de acordo com o tamanho da folga entre os eletrodos, com a taxa de compressão, e com a razão de ar/combustível. Uma vez que o arco é iniciado, a tensão necessária para mantê-lo é muito menor porque a mistura gasosa perto da folga dos eletrodos fica altamente ionizada. (Um gás ionizado permite que a corrente flua mais livremente.). O arco é mantido tempo suficiente para dar ignição à mistura ar/combustível. Uma vela típica é mostrada na Figura 9. A vela consiste de um par de eletrodos, chamados eletrodo central e de massa, separados por uma folga. A folga é importante e é especificada para cada motor. A folga deve ser 0,6 mm para um motor e 1 mm para outro. O eletrodo central é isolado do eletrodo de massa e da carcaça metálica. O eletrodo de massa é eletricamente aterrado porque um dos terminais da bateria que fornece corrente para gerar o pulso de alta tensão para o sistema de ignição é conectado ao bloco do motor e ao chassi. (RIBBENS, 1998)

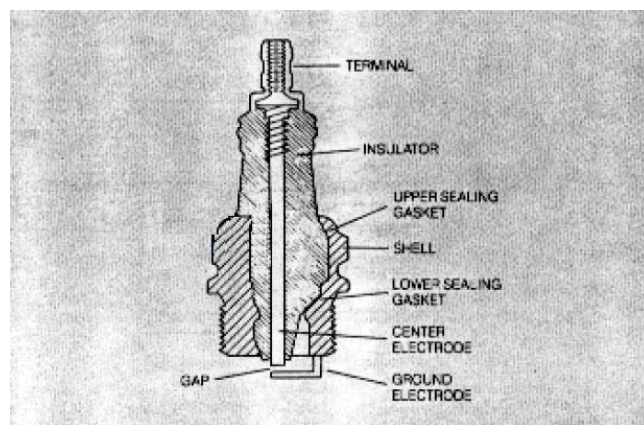


Figura 9: Configuração da Vela de Ignição. (RIBBENS, 1998)

2.9.2 Circuito de Alta Tensão e Distribuição

O sistema de ignição fornece um pulso de alta tensão que inicia o arco. A Figura 10 é um esquemático do circuito elétrico do sistema de ignição. O pulso de alta tensão é gerado pela descarga indutiva de um transformador especial de alta tensão comumente chamado de bobina de ignição. O pulso de alta tensão é entregue para a vela de ignição apropriada no tempo correto para a ignição através de um circuito de distribuição. Antes dos modernos controles eletrônicos, a distribuição de pulsos de alta tensão era realizada por uma chave rotatória chamada de distribuidor.

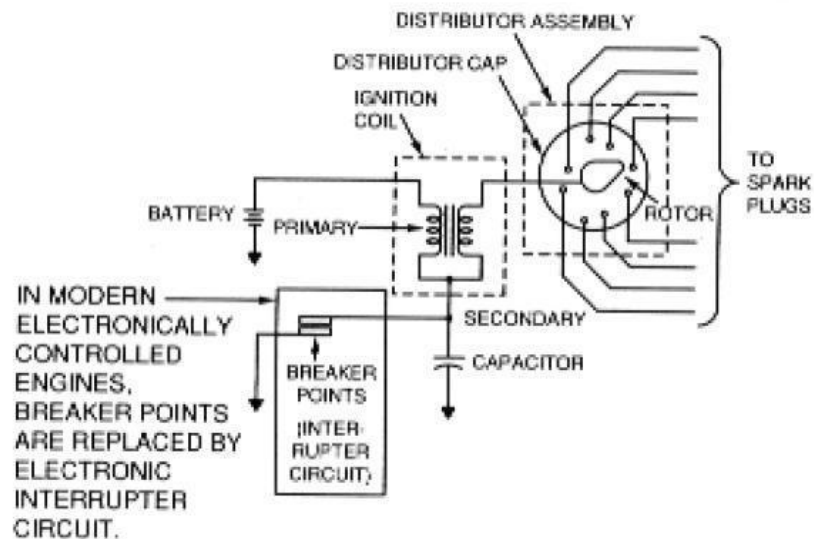


Figura 10: Esquemático do circuito Kettering de ignição. (RIBBENS, 1998)

A Figura 10 acima mostra um esquemático típico de um distribuidor, enquanto que a Figura 11 a seguir é um típico *layout* físico.

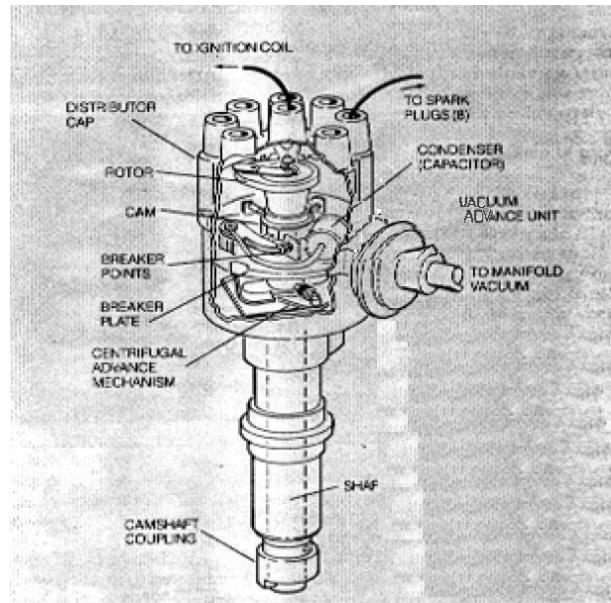


Figura 11: Esquemático do circuito de ignição. (RIBBENS, 1998)

O eletrodo central é mecanicamente tocado por um comando de válvulas (por engrenagens) e gira sincronamente na velocidade do comando (por exemplo, metade das rotações do virabrequim). O distribuidor é um meio obsoleto de distribuir a centelha para a vela de ignição adequada, e está sendo substituído por múltiplas bobinas, tipicamente uma para cada par de cilindros. Novamente, como no caso de alimentação de combustível, a distribuição de centelha será explicada em termos de um distribuidor e iniciação de uma centelha em termos de um distribuidor de platinado, de modo a fornecer um cenário para uma discussão do moderno sistema de ignição sem distribuidor. Deste modo, é possível ver os benefícios do controle eletrônico. Um conjunto de ligações elétricas, comumente chamados de cabos de vela, é conectado entre os vários terminais centrais das velas de ignição e os terminais individuais na tampa do distribuidor. O terminal central da tampa do distribuidor é conectado ao secundário da bobina de ignição.

2.9.3 Geração do Pulso para a Centelha

A atual geração dos pulsos de alta tensão é conseguida por chavear a corrente através do circuito primário. O mecanismo do distribuidor de um tradicional sistema de ignição para chavear o circuito primário da bobina consiste em abrir e fechar os contatos de um platinado (uma chave) por um came que gira no distribuidor. Durante os intervalos entre os pulsos de ignição (por exemplo, quando o rotor está entre os contatos), os contatos do platinado estão fechados (conhecido por “*dwell*”). A corrente passa através do primário da bobina, criando um campo magnético que liga o primário e o secundário de uma bobina. No instante em que o pulso para a centelha é necessário, os contatos do platinado são abertos. Isso interrompe o fluxo de corrente no primário da bobina e o campo magnético se acaba rapidamente. O rápido desaparecimento do campo magnético induz um pulso de alta tensão no secundário da bobina. Esse pulso é chaveado através do rotor do distribuidor, do terminal da tampa do distribuidor, e o cabo da vela de ignição até a apropriada vela de ignição. O capacitor absorve a corrente do primário, a qual continua passando pelo pequeno intervalo no qual os contatos do platinado estão abrindo, e limita o arco sobre o platinado.

A corrente do primário aumenta com o tempo depois do platinado fechar. No momento que o platinado abre, esta corrente começa a cair rapidamente. É durante esta rápida queda na corrente do primário que o pulso de alta tensão no secundário ocorre. A corrente do primário oscila por causa do circuito ressonante formado pela bobina e pelo capacitor. Um comando tendo o mesmo número de lóbulos que o número de cilindros é montado na haste do distribuidor. À medida que esse comando roda, ele alterna entre aberto e fechado o platinado. O braço móvel do distribuidor tem uma parte isolada que é pressionada contra o comando por uma mola. Quando esta parte isolada é alinhada com uma superfície lisa do comando, os contatos do platinado são fechados. Quando o comando gira, esta parte isolada é movida por

um lóbulo (um ponto alto) no comando. Nesta hora o platinado abre e ocorre a centelha. (RIBBENS, 1998)

2.10 ALIMENTAÇÃO DE COMBUSTÍVEL

A alimentação de combustível se dá por meio de uma bomba mecânica de combustível de baixa pressão nos sistemas carburados, já que o combustível não deve ser pressurizado dentro do carburador para seu bom funcionamento. Em sistemas de injeção direta mecânica de combustível a bomba é de alta pressão.

Em motores com injeção eletrônica o uso de uma bomba elétrica de combustível, com pressão comparativamente alta em relação à bomba mecânica de sistemas carburados, porém existe ainda o sistema de alta pressão, para injeções diretamente dentro da câmara de combustão, onde esse nível de pressão é necessário.

2.11 O CARBURADOR

O carburador é um sistema mecânico de mistura de combustível, no qual ao variar a posição da borboleta de admissão quando pisa-se o pedal do acelerador, sua quantidade de ar admitido aumenta e o carburador dosa a quantidade de combustível a ser misturada, tendo o carburador um reservatório de combustível regulado por uma bóia, chamado de cuba.

A medição de ar ocorre no carburador com a ajuda de um funil de ar em forma de Venturi. O estreitamento da seção transversal aumenta a velocidade do ar e gera com isso uma determinada depressão na parte mais estreita da seção, que pode ser aumentada com um difusor secundário. A diferença de pressão, assim produzida, em relação à cuba da bóia, vai

alimentar o combustível. O ajuste da quantidade de combustível é feito pelos sistemas dosadores. (BOSCH, 2005)

2.12 O SISTEMA DE INJEÇÃO ELETRÔNICA DE COMBUSTÍVEL E SEU FUNCIONAMENTO BÁSICO RESUMIDO

A partir de bicos injetores, que são válvulas eletromagnéticas, o combustível flui em forma de spray e se mistura no ar admitido pelo motor. O controle dessas válvulas por uma CPU, bem como a leitura de diversos sensores que informam as condições de uso do motor, e bem como o controle da ignição, são os pontos principais de uma injeção eletrônica.

Assim, a partir de um microcontrolador embarcado, todas medidas são analisadas e todas decisões são tomadas quanto à quantidade de combustível a ser injetada, bem como seu momento, sem deixar de mencionar o momento de dar a faísca. O desenvolvimento dos seus módulos proporciona cada vez mais funcionalidades extras a uma injeção eletrônica atual, porém sua função básica é controlar eletronicamente o processo de combustão dentro de um motor.

2.13 O ESTADO-DA-ARTE

Atualmente o nível de desenvolvimento das injeções é muito grande, portanto várias soluções são estudadas e desenvolvidas ao redor do mundo. Será mostrado apenas um sistema de injeção eletrônica de combustível, que se destaca na atualidade. A Figura 12 a seguir mostra o sistema Bosch DI-Motronic.

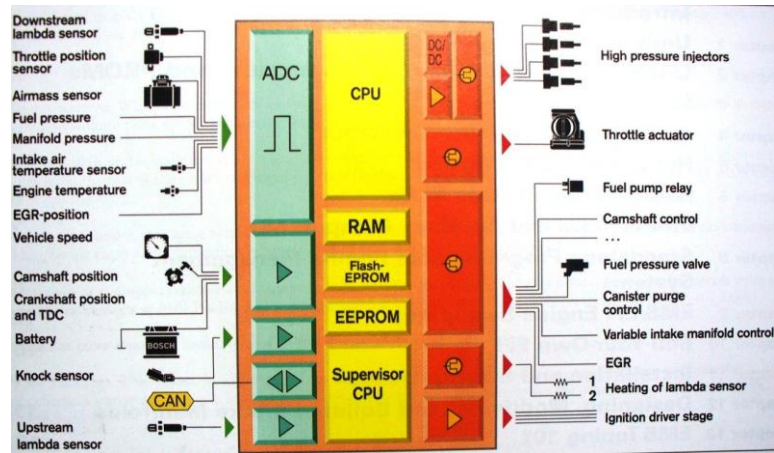


Figura 12: Estado-da-arte da injeção eletrônica DI-Motronic da Bosch. (HARTMAN, 2003)

Analisando-se a figura percebe-se os dispositivos a serem lidos à esquerda e, a comunicação via CAN, e os dispositivos a serem atuados à direita. Por ordem na Figura 12, de cima para baixo e da esquerda para direita, tem-se os sinais analógicos primeiro. Eles provêm da sonda lambda, do sensor de posição de borboleta, do sensor de massa de ar, do sensor de pressão de combustível, do sensor de pressão no coletor de admissão, do sensor de temperatura do ar do coletor de admissão, do sensor de temperatura do motor e da posição da válvula de recirculação de gases do escapamento. Os sinais digitais provêm do velocímetro, do sensor de posição do comando de válvulas, do sensor de posição do virabrequim e da tensão da bateria. O sensor de detonação é um caso especial e necessita de um filtro para filtrar seu sinal. No barramento CAN transitam as informações trocadas entre componentes do mesmo. Por fim a sonda de banda larga também possui circuito específico para aquisição de seu sinal.

À direita são mostrados os atuadores, que são os bicos injetores de alta pressão, o atuador da borboleta de controle de ar do motor, o relé da bomba de combustível, o controle de um comando de válvulas variável, a válvula de alívio de pressão de combustível, a válvula de controle de respiro de óleo, o atuador do coletor de admissão variável, a válvula de

recirculação de gases do escape, o aquecimento das sondas lambda, e o acionamento das bobinas individuais de ignição.

O sistema por si só mostra que gerencia um motor completamente, mesmo o mais moderno, bem como demonstra a quantidade de variáveis a serem calculadas pela CPU, entre outros aspectos.

2.14 OS BICOS INJETORES

Os bicos injetores, resumidamente, são válvulas eletromagnéticas, ou solenóides, pelos quais passa o combustível pressurizado pela linha de combustível. Abaixo a Figura 13 mostra em detalhe um bico injetor.

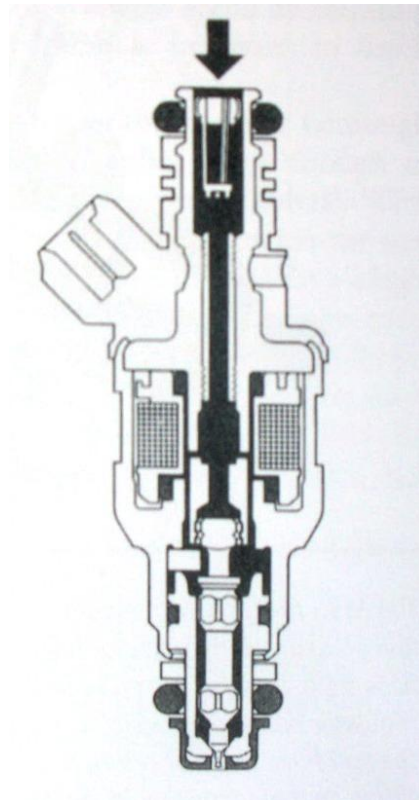


Figura 13: Bico injetor eletrônico do tipo pistonete da Bosch. (HARTMAN, 2003)

A região central quadriculada na Figura representa os enrolamentos da bobina do bico injetor, esta que, quando acionada, atrai o pistonete para cima e libera a passagem de combustível para o orifício no extremo inferior do bico na figura. A seta mostra por onde entra o combustível, que não consegue atravessar o bico injetor enquanto a bobina dele não for energizada e liberar a passagem do mesmo. Alguns sistemas apresentam altas pressões de combustível e de mola, para efetuar suas vedações, o que torna o acionamento ainda mais complexo.

2.15 O SISTEMA DE IGNIÇÃO MODERNO

O sistema de ignição moderno constitui basicamente o acionamento das bobinas individuais, estas instaladas junto às velas de ignição, sem necessidade de utilização de distribuidores, nem de cabos de velas. Os sistemas permitem inclusive um ponto para cada cilindro, se necessário. Mas o grande benefício de tais sistemas é o acionamento direto das velas pela sua bobina correspondente, tendo o módulo de injeção chaveando apenas a tensão de 12 V diretamente no primário da bobina, não ocorrendo perdas em cabos, o que é significativo.

3 ANÁLISE DE ALTERNATIVAS

A idéia deste trabalho é a de utilizar ao máximo as tecnologias já existentes, analisando as alternativas de topologias de projeto de circuitos para construção do protótipo, bem como fazer uma análise de custo/benefício, analisando economicamente se é algumas topologias são viáveis bem como se seu desempenho será adequado ao que está sendo proposto no trabalho.

Uma análise profunda será feita na escolha dos componentes dos circuitos, principalmente na escolha do microcontrolador a ser utilizado.

Os padrões de mercado para características também serão analisados criteriosamente, para que a injeção eletrônica a ser estudada e construída esteja dentro dos parâmetros modernos e atuais.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DE INJEÇÕES ELETRÔNICAS NO MERCADO

A análise geral das características de injeções eletrônicas atuais fica mais clara após uma divisão e posterior classificação conforme algumas de suas características técnicas principais. A classificação feita é a seguinte:

3.1.1 Quanto ao tipo de módulo de injeção eletrônica

- OEM: as injeções eletrônicas mais comuns são as ditas “de fábrica”, ou, em inglês, OEM. São sistemas fechados em que o usuário limita-se a usar o sistema pré-programado pelo fabricante do automóvel em parceria com o fornecedor da injeção eletrônica, se esta não for fabricada pelo próprio fabricante do automóvel. A maioria delas, hoje em dia, é

adaptativa, ou seja, o usuário não consegue reprogramar a CPU diretamente, apenas indiretamente, conforme o modo de uso do veículo, bem como o ambiente, entre outras variáveis. A forma mais conhecida de tentativa de modificação da programação original de fábrica é pela troca de componentes, como as memórias (EEPROM, EPROM) – os famosos “chips modificados”. Outra forma é por by-pass de alguns de seus sensores ou alterações elétricas nos sinais dos mesmos, tentando “enganar” a CPU ao enviar medidas alteradas. Enfim, as alterações existem e algumas podem ser feitas, outras são de complexidade extrema e, em geral, causam inclusive danos irreversíveis aos motores e/ou automóveis em questão. Portanto a maioria dos usuários apenas utiliza os sistemas de injeção eletrônica de seus automóveis da maneira mais espartana possível: apenas dirigindo.

São particularmente sistemas muito seguros, muito complexos e de extrema confiabilidade. Em geral quem desenvolve sistemas de injeção OEM são empresas tradicionais no mercado, gigantes por assim dizer, que possuem vasta experiência no ramo. Vale mencionar que as falhas - que são bem raras, bem mais inclusive do que os sistemas mecânicos carburados, - são tratadas pela CPU e também podem ser informadas ao usuário quando da realização de uma manutenção em oficinas que tenham todo equipamento especializado, bem como profissionais muito qualificados.

Elas equipam praticamente todos automóveis produzidos hoje em dia, salvo exceções, como, por exemplo, algumas réplicas de veículos antigos que, para tentar preservar suas características originais de época, ainda vem com o sistema carburado.

- Programáveis: difundem-se cada vez mais pelo mundo, e pelo Brasil inclusive, injeções eletrônicas programáveis pelo usuário. Basicamente elas diferem-se por possuírem a possibilidade de interface com o usuário, este que pode alterar diversos parâmetros seus quase sempre em tempo real, ou seja, em funcionamento.

O impulso inicial foi dado quando a injeção eletrônica conquistou de vez o mundo automobilístico com seus prós, porém começou a existir a necessidade de modificar os sistemas existentes de forma mais fácil e em tempo real – ao contrário de trocar-se um componente e depois testar o resultado, muitas vezes insatisfatório. E os maiores impulsionadores deste mercado foram os próprios usuários, nem tanto os fabricantes, pois eram clamados por todos eles sistemas flexíveis para uso em carros modificados, em geral para obter maior desempenho. A indústria de equipamentos de “*performance*” acompanha os automóveis praticamente desde sua criação, crescendo sempre e movimentando cada vez mais dinheiro. Sendo assim, soluções cada vez melhores - mais complexas em sua manufatura, porém muitas vezes não tão mais simples ao usuário, - chegam às lojas ao redor de todo globo.

A reprogramação consiste, para resumir, em alterar os parâmetros relacionados ao combustível, como, por exemplo, tempo de injeção, os parâmetros relacionados à ignição, como, por exemplo, o ponto de ignição, bem como alguns parâmetros para obter maior desempenho em carros modificados (preparados), como, por exemplo, pressão de turbo através do controle de uma válvula de alívio, etc. Basicamente as alterações são feitas através da alteração de mapas de injeção de combustível e de mapas de ignição.

- *Open Source*: com apenas um representante principal seria dispensável comentar sobre esse tipo de sistema de injeção eletrônica programável, não fosse a relevância mundial, bem como o sucesso, que um sistema desses tem.

O representante principal desta categoria é a Megasquirt, um sistema de injeção eletrônica digital programável com hardware e software disponíveis a qualquer um pela internet. Basicamente, apenas basta ter algum conhecimento de mecânica de automóveis e já estaria apto a utilizar o sistema que pode ser disponibilizado por uma série de pontos de

venda completo, parcial, ou até mesmo montado e/ou modificado pelo usuário, que compra os componentes ele mesmo.

A idéia é ter uma injeção eletrônica constantemente aprimorada e discutida em diversos fóruns, em milhares de tópicos, por qualquer um no mundo, tudo via internet. O resultado até hoje é impressionante. Os criadores da idéia mencionam nos sites relacionados que existem muitas injeções eletrônicas Megasquirt funcionando no mundo, o que é impressionante. Para brasileiros a dificuldade de se usar um sistema desses não pode deixar de ser mencionada. A língua inglesa, principalmente o inglês técnico, os componentes muitas vezes importados difíceis de serem encontrados no Brasil, talvez o menor nível de instrução geral e de condições financeiras – o custo pode ser bem alto – enfim, diversos aspectos corroboram contra o seu sucesso aqui.

O número de estudantes qualificados descobrindo tais fontes de conhecimento é crescente. O cenário futuro no Brasil tende a ser o de produzir esta tecnologia de forma gratuita e bem desenvolvida.

3.1.2 Quanto à quantidade de bicos injetores

- Mono-ponto (Mono-point): é o sistema pelo qual apenas um bico injetor central de alta vazão injeta combustível no coletor de admissão motor, sendo que a distribuição homogênea da mistura ar/combustível para os cilindros fica a cargo do projeto e da dinâmica do motor, ou seja, o coletor de admissão deve proporcionar condições para que o motor consiga dinamicamente admitir a mesma quantidade volumétrica de mistura quando em rotação constante, por exemplo.

- Multi-ponto (Multi-point): é o sistema pelo qual mais de um bico injetor de vazão reduzida injeta combustível no coletor de admissão, no duto de admissão ou direto dentro do

cilindro do motor, sendo que a distribuição homogênea da mistura ar/combustível para os cilindros fica a cargo do módulo da injeção eletrônica, já que ele controla eletricamente a quantidade de combustível e a temporização de cada injetor, ou seja, cada cilindro recebe injeções de seu determinado bico injetor.

3.1.3 Quanto à forma de injeção do combustível

- Indireta: é o tipo mais comum, no qual os injetores injetam o combustível no coletor de admissão ou no duto de admissão, sendo sistemas que necessitam de relativa baixa pressão de combustível para vaporizar a mistura.

- Direta: é ainda incomum em carros com motores a combustão interna por centelha, baseando-se na injeção dentro da câmara de combustão, sendo controlada no caso por um módulo de injeção. É importante destacar que devido às altas pressões dentro da câmara de combustão seus bicos precisam de uma alta pressão de combustível para conseguir que o combustível literalmente penetre na câmara e consiga se misturar rapidamente com o ar que já estava lá dentro, tudo isso perto do final do ciclo de compressão, o que faz com que o seu acionamento deva ser muito preciso. Para vencer a inércia da mola que veda o bico, bem como a alta pressão de combustível, seu acionamento deve proporcionar algo bem perto de um impulso de corrente bem controlado, o que faz com que seja difícil seu acionamento quando se acrescenta o fato de que ele deve ser de duração muito mais curta do que a de um bico injetor indireto.

Sistemas como esse são complexos e exigem um controle muito bem feito para obterem os benefícios de se injetar o combustível, misturá-lo e queimá-lo em menos tempo e de forma mais eficiente, com menores emissões de poluentes, maior economia e maior

desempenho. Seu potencial tem feito com que cresça cada vez mais o número de motores usando essa forma de injeção, porém é ainda em parte inexplorado por muitos fabricantes.

- Misto: é o sistema mais completo, misturando ambos os sistemas anteriormente mencionados. A injeção indireta é afastada ao máximo dos dutos de admissão dos cilindros de forma a servir mais de pré-mistura e de baixar a temperatura do coletor de admissão, do duto de admissão e válvulas de admissão. A injeção direta cumpre seu papel, porém com o auxílio de uma mistura melhor homogeneizada, principalmente quando se trata de um motor em rotações altíssimas, no qual o tempo de obter-se uma mistura total do ar com o combustível é reduzidíssimo, o que seria talvez impraticável. Sem contar nos benefícios de diminuição da temperatura do ar entrando no motor e do próprio, que se encontra, portanto, menos disposto à detonação.

3.1.4 Quanto às variáveis lidas

Uma classificação englobando diversos tipos não seria bem sucedida, portando vale apenas mencionar que as diferenças entre o número de variáveis lidas – provindas de sensores, – bem como a forma de leitura delas – diretamente ou via algum protocolo de comunicação, - e quais variáveis são lidas – pressão ou velocidade do ar no coletor de admissão, por exemplo, - são muito importantes na caracterização de um sistema de injeção eletrônica.

3.1.5 Quanto ao controle de ignição

Podem ter controle ou não ter controle de ignição integrado. As que não possuem controle de ignição integrado em geral apresentam a possibilidade de integração com um

módulo de controle de ignição. Porém, na atualidade, praticamente todas tem controle de ignição – o que faz muito sentido, pois a combustão é gerada não somente pela precisão da injeção de combustível, mas pela ignição também.

É importante mencionar a forma de atuação da ignição. Portanto são feitas as seguintes classificações quanto ao tipo de ignição:

- Ignição com distribuidor: algumas injeções podem gerenciar apenas uma bobina, sendo que esta então deve entregar sua alta tensão a um distribuidor que fará o chaveamento elétrico entre as velas dos cilindros, mecanicamente.

- Ignição sem distribuidor: dois tipos básicos existem, sendo o primeiro deles um no qual não existe distribuidor propriamente, porém o chaveamento é feito através de um módulo complementar, que é um módulo eletrônico de controle de chaveamento da centelha. O segundo tipo é o tipo no qual o módulo aciona diretamente a bobina correspondente a determinado cilindro – e aqui é lembrado que existem sistemas como o de *faísca perdida* ou *“wasted spark”* no qual são emitidas duas faíscas simultâneas em dois cilindros diferentes, um na fase de compressão e outro na fase de escape, para melhorar a queima de gases residuais, entre outros. O sistema de acionamento individual é o mais eficiente, pois permite acionar apenas a bobina correspondente ao cilindro desejado, deixando um tempo de recuperação para a mesma bem maior, diminuindo sua temperatura, bem como proporcionando maior precisão. Porém vale lembrar que é um muitas vezes consideravelmente sistema mais caro, já que num carro de oito cilindros, por exemplo, são necessárias oito bobinas de ignição.

Contudo a vantagem de colocar a bobina diretamente na cabeça da vela e, portanto, não necessitar de cabos de velas, que são responsáveis por uma perda considerável de energia na centelha, já que o cabo de vela nada mais é do que um fio muito bem isolado que recebe uma alta tensão e devido à sua resistência mesmo muito baixa gera uma perda de energia

grande. A potência consumida pode ser baixa se considerarmos o tempo como o ciclo todo e muitos desavisados podem achar que é desprezível, como o pulso de tensão que a ignição envia à bobina demora por vezes menos do que 1 ms. Em termos de energia, a diferença é grande, fazendo com que os sistemas com bobina de ignição direta na vela, e, portanto, de acionamento individual, trabalhem com tensões por vezes até 20 kV mais baixas do que sistemas tradicionais, diminuindo perdas e EMIs (Interferências Eletro-Magnéticas), e aumentando o rendimento. O encapsulamento, a isolamento e a fixação, porém, devem ser consideradas, pois as bobinas ficam muito próximas do bloco de metal do motor, quente e vibrante, o que pode causar fugas, sem contar o aquecimento e a trepidação dos enrolamentos.

3.1.6 Tipos de realimentação

O sistema mais conhecido de realimentação é o de realimentação por sonda lambda. Portanto será o único a ser mencionado.

Este sistema de realimentação por sonda lambda é um sistema pelo qual a relação ar/combustível é informada diretamente via um sensor chamado Sonda Lambda, ou via seu módulo de condicionamento de sinal. A medida é informada à CPU, que utiliza seus valores como fatores da realimentação no cálculo de injeção de combustível e de ponto de ignição.

3.1.7 Interface com o usuário

As mais diversas variações existem, indo desde sistemas com potenciômetros, chaves e leds apenas, passando por sistemas com visor LCD de 2 linhas e 16 colunas e poucas teclas, até sistemas com visor LCD do tipo “*touchscreen*”, bem como interfaces via PCs e *laptops*,

com entrada de dados e visualização através de seus monitores e comunicação por porta USB, com o uso de comunicação via “*Bluetooth*”, por exemplo. Outros exemplos de comunicação, como a via porta serial do computador são mais comuns.

A classificação mais adequada de interface com o usuário em vistas a esse projeto é a seguinte:

- Visor LCD de 2 linhas e 16 colunas e poucas teclas: o tradicional display LCD usado em diversas aplicações microcontroladas aparece como alternativa mais barata, portátil, porém com menores recursos visuais. Pode ser mais simples e mais funcional, porém pode dificultar o trabalho de acerto de um motor devido à visualização de menor número de variáveis simultâneas.

- PC ou *laptop*: um computador realizando as medidas pode congestionar um pouco o microcontrolador, que precisa manter uma comunicação com o mesmo a uma taxa suficiente para que os dados visualizados estejam constantemente sendo atualizados. Permite a visualização de diversas variáveis ao mesmo tempo, inclusive com o auxílio de programas feitos especialmente para visualizar as variáveis. Tem seu maior ponto desfavorável o fato de que um *laptop* – que é o mais adequado, visto que o usuário andarรก com o carro, - é mais pesado, em geral maior, necessita de bateria, roda em um sistema operacional sujeito a muito maior número de falhas, entre outros aspectos. Porém o mesmo fato de ser conectado a um computador pode ser bom, pois sua flexibilidade é muito maior para visualização dos parâmetros do motor e o custo do módulo de injeção é reduzido.

3.2 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE INJEÇÕES ELETRÔNICAS NO MERCADO

Uma análise baseada na pesquisa de mercado levantou diversas injeções eletrônicas existentes, sendo apenas algumas selecionadas devido ao fato da impossibilidade de listar e analisar todas elas, porém foi dada relevância maior às injeções eletrônicas nacionais. Segue abaixo a Tabela 2 com as analisadas:

Fabricante:	Modelo:
Bosch	DI-Motronic
MoTec	M880
Accel	GEN 8 ECM
Holley	Commander 950 EMS
Megasquirt	MS-II V3
Fueltech	RacePRO-1fi
Hardware	Profissional
Pandoo	EFI-4
Rolemotors	G1

Tabela 2: sistemas de injeção eletrônica de mercado analisadas

Com base na classificação feita anteriormente neste trabalho, serão analisadas de forma geral e não individual todas as injeções eletrônicas mencionadas.

3.3 ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS NECESSÁRIAS PARA PROTOTIPAÇÃO

Analisando-se a tabela acima são feitas as escolhas de quais características técnicas principais a injeção eletrônica programável deve ter. Para melhor descrever as escolhas feitas, será dada uma explicação item por item, conforme a classificação feita anteriormente. Após isso, será montada uma tabela com as características escolhidas, conforme a tabela anteriormente mencionada. Seguem as escolhas e suas justificativas:

- Tipo de módulo de injeção eletrônica: programável. Não haveria como projetar um módulo OEM, pois sua complexidade é muito grande e seus testes são extensos, entre vários outros aspectos. A prototipação de uma injeção eletrônica “*Open Source*” de verdade só se dá quando existe a participação de vários membros, o que não é o caso de um TCC, como este. Portanto, no momento, a escolha é apenas por uma do tipo programável.

- Quantidade de bicos: será do tipo multi-ponto, com 2 bancos de até 8 bicos injetores. A escolha por 2 bancos de 8 injetores se dá pelo fato de um motor comum no Brasil ter no máximo 8 cilindros, porém, em geral, a maioria da frota brasileira é de motores 4 cilindros. A necessidade de acionamento de dois bicos é justamente para conseguir acionar um banco de cada vez, sendo o primeiro banco a ser acionado aquele responsável pelas baixas rotações, e sendo o segundo banco a ser acionado, o responsável por complementar a ação dos bicos injetores do primeiro banco quando em altas rotações. O primeiro banco seria montado num motor perto do duto de admissão, o mais perto possível da válvula, e, se possível, direcionado à mesma. O segundo banco seria montado na prática o mais afastado possível do duto de admissão, de preferência dentro da parte comum do coletor de admissão, já que seria perigoso instalar em carros de rua os mesmos afastados das entradas de ar dos coletores, no caso de coletores individuais. O acionamento individual, ou seja, por cilindro, não será

escopo deste trabalho, mas de futuro desenvolvimento. Outro aspecto para futuro desenvolvimento será o acionamento seqüencial, ou seja, cilindro por cilindro. Portanto o acionamento individual seqüencial será descartado como alternativa para prototipação devido à questões de tempo e complexidade que fogem um pouco do intuito deste trabalho. Entretanto, a escolha por 2 bancos de múltiplos injetores ainda mantém nível de complexidade suficiente, bem como uma alternativa satisfatória para implementação em veículos, principalmente nos de alto rendimento que trabalham em altas rotações – nesses, a diferença de qualidade final da injeção diminui um pouco em relação aos de acionamento individual e seqüencial.

- Forma de injeção de combustível: indireta. Conforme foi descartado anteriormente a injeção de acionamento individual e seqüencial, não seria possível criar um sistema de injeção direta com acionamento multi-ponto com bancadas de bicos injetores. Num sistema direto, a injeção de combustível deve ser feita dentro do cilindro, cilindro por cilindro, e este é um dos seus grandes potenciais, o que tornaria ela fora do contexto se não fosse individual e seqüencial. Isso sem contar o custo de um bico de alta pressão, bem como as mangueiras e bomba de combustível do sistema. Até mesmo para pequenos testes o custo seria bem mais alto. Isto tudo sem mencionar a maior complexidade dos circuitos e do programa, que é o primeiro a ser feito para uma injeção eletrônica, entre outros aspectos construtivos e de projeto. Portanto, justifica-se a escolha pela forma indireta de injeção de combustível.

- Variáveis lidas: as variáveis serão lidas diretamente dos sensores, estes passivos, ou seja, não ativos. A utilização de sensores que se comunicassem com o módulo através de algum protocolo de comunicação aumentaria o custo dos sensores, bem como dificultaria inclusive suas aquisições. Isso sem contar ainda o fato de que aumentaria consideravelmente a complexidade do projeto, visto que seria necessário dar uma maior atenção ao tratamento de falhas na comunicação, bem como questões relacionadas a acesso ao barramento de

dados, como no caso do CAN, entre outros, como tratamento de interrupções, erros de leitura, taxas de transmissão, etc. Para estudos futuros, o uso do CAN ou FlexRay será de grande valia. Já em relação às variáveis mais importantes a serem lidas, conforme o visto no mercado, algumas escolhas foram feitas: temperatura do bloco, temperatura do ar, pressão ar do coletor de admissão, posição da borboleta e rotação do motor.

- Controle de ignição: a escolha do controle de ignição ser integrado à injeção eletrônica a ser prototipada baseia-se na sua importância e sua padronização de uso feita pelo mercado. Ela será uma ignição para trabalhar com o uso de distribuidor ou algum módulo eletrônico de chaveamento da centelha, devido ao fato de aumentar o custo de teste - já que múltiplas bobinas deveriam ser utilizadas. A complexidade de acionamento individual não é tão maior, porém foge um pouco do objetivo deste trabalho, deixando esse tipo de acionamento já como sugestão para melhorias futuras.

- Tipo de realimentação: será realimentada por TPS ou sonda lambda de banda larga, a escolha do usuário. O nível de complexidade de software aumenta consideravelmente, porém a utilização de um sistema realimentado traz incontáveis benefícios para a utilização da injeção eletrônica num automóvel real, que roda sob as mais diversas condições.

- Interface: a interface escolhida será a de um display do tipo LCD, de 2 linhas e 16 colunas (conhecido também como LCD 2x16), para a visualização das variáveis, bem como a utilização de botões (espécie de teclado). As escolhas tiveram em vista sua simplicidade para a primeira prototipação, bem como seu custo reduzido em relação a outras alternativas. A programação via outro PC, ou Laptop, seria muito difícil, pois um programa de configuração mais complexo deveria ser criado, bem como um programa de comunicação deveria sempre ser utilizado, com o computador, portanto, sempre ligado e conectado. A idéia de conexão com um computador é interessante e deve ser mencionada desde já como sugestão para

melhoria futura. Um sistema misto seria ainda mais ideal, porém as escolhas feitas todas têm o cunho educacional de confecção de um TCC.

3.4 CARACTERÍSTICAS RELACIONADAS AO MICROCONTROLADOR

A escolha de qualquer componente elétrico ou eletrônico deve começar, em geral, por uma pesquisa em sites de fabricantes renomados por palavras-chave relacionadas às características técnicas mínimas desejadas. No caso específico da escolha do microcontrolador, a pesquisa começou envolvendo grandes fabricantes como Atmel, Freescale, Microchip e Motorola. Após coleta de algumas informações básicas, a pesquisa foi aprofundada no intuito de preencher características básicas e deixar espaço para erro, visto que todas as características não podem ainda ser determinadas – os circuitos de I/O ainda não estão projetados.

A pesquisa parte para coleta de dados de injeções eletrônicas existentes, tentando-se descobrir modelos específicos de microncontroladores, ou microprocessadores, utilizados pelas mesmas.

A escolha do microcontrolador foi difícil, visto que existem infinitas soluções e, muitas vezes, a solução mais adequada não é possível por algum motivo. Justamente por isso é organizada uma lista mais abaixo neste documento dividida em subitens importantes, para que se tenha uma visão não só global, mas individual de características quando da escolha do chip mais adequado. A explicação sobre cada item analisado é de mesma importância, pois o entendimento real da necessidade pode ser o diferencial entre achar o componente ou não achá-lo.

Segue a lista com as principais características técnicas a serem analisadas e sua breve explicação no contexto da injeção eletrônica a ser prototipada:

- Clock: o clock do sistema deve ser o mais alto possível, com referência nas injeções eletrônicas utilizadas no mercado, porém a mais alta frequência de clock utilizada estima-se que não ultrapasse os 40 MHz. As rotinas típicas Um clock de 40 MHz é o suficiente para realizar o gerenciamento da injeção eletrônica de um motor, mesmo em microcontroladores de 8 bits apenas.

- Entradas Analógicas (A/D): o número de canais analógicos é muito importante, visto que a maioria dos sensores automotivos fornece sinal em tensão, ou seja, analógicos. A resolução dos conversores A/D utilizados pelas portas analógicas também é importante pelo fato de possibilitar uma melhor discretização das variáveis lidas, por sua vez possibilitando cálculos com variáveis de maiores grandezas em número de bits.

- Número de I/Os: a quantidade de I/Os define o número de periféricos que o módulo da injeção eletrônica pode controlar. Para que o sistema controle diversos atuadores é necessária a presença de diversas portas de I/O disponíveis, inclusive para futuras expansões. Incluem-se como I/O também as portas de interrupção externa, as portas comparadoras, capturadoras, de PWM, etc. O número de funcionalidades das portas I/O é, portanto, diretamente relacionado ao número de portas desse tipo, já que quanto mais portas existirem maior a flexibilidade do microcontrolador – e isto o fabricante do chip sempre deseja, pois amplia seu mercado consumidor.

- Número de timers: a utilização de timers é imprescindível em qualquer equipamento microcontrolado. A quantidade de timers possibilita um maior número de contagens independentes e simultâneas, bem como suas interrupções quando do estouro de seus contadores internos. Relacionado ao número de timers, existe a questão da resolução dos mesmos. Timers de 16 bits oferecem uma contagem mais longa em relação aos de 8 bits, possibilitando contagens de tempos maiores, estas que não seriam possíveis nem utilizando-

se um oscilador externo de baixa frequência para algumas aplicações. Um contador de tempos na casa de segundos, por exemplo.

- Tamanho da Memória de Programa: a memória de programa é a utilizada para armazenar o código do programa e suas constantes, como tabelas de constantes, por exemplo, entre outros. Portanto, para um código longo, no qual se usa diversas tabelas de constantes, e constantes propriamente ditas, seu tamanho torna-se relevante. Memórias de programa muito pequenas em tamanho levam o programador a utilizar recursos de software mais complexos, e custosos, para otimizar o código de programa e, assim, ocupar menos espaço. Muitas vezes recorre-se ao Assembly para isso, o que torna o código mais eficiente, porém mais difícil e longo de ser escrito, bem como mais difícil de ser entendido por outros projetistas de uma equipe – o que pode vir a dificultar futuras melhorias. A programação em C facilita o entendimento dos programadores em geral, porém exige maior espaço de memória de programa, pois os códigos em C, depois de compilados, não são tão bem otimizados como os em Assembly.

- Saída PWM: as injeções eletrônicas de combustível de hoje em dia necessitam de acionamentos por PWM para os bicos injetores. A existência de portas desse tipo é, portanto, importante como sinal de acionamento de *drivers* de bicos injetores. Sua resolução é de mesma importância, já que é ligada à determinação do período e do “*duty cycle*”.

- Software de desenvolvimento: um software de desenvolvimento é uma ferramenta que proporciona ao programador um ambiente amigável e de fácil utilização. A ausência de um software desse tipo impossibilitaria um programador de fazer a injeção eletrônica desejada neste trabalho, onde se programará em linguagem C, sendo que o será gravado eletricamente no circuito integrado, ou chip do microcontrolador, será binário em última instância. Um software de desenvolvimento deve oferecer utilitários como verificadores de erro de código, compiladores, simuladores, etc. Os “*debuggers*” em conjunto com os simuladores de sinais

ajudam a criar um código e testá-lo dentro do ambiente virtual do software de desenvolvimento, sem ter que testar fisicamente o sistema projetado, o que reduz os custos de produção e previne erros inesperados. Os softwares de desenvolvimento, de qualquer tipo, tendem a ser caros para desenvolvedores de sistemas e grátis para estudantes, de modo geral, apenas tendo limitações como quanto ao tamanho do código. Portanto, procura-se utilizar softwares gratuitos na medida do possível.

- **Compilador:** muitas vezes pertencente ao software de desenvolvimento, o compilador tem o papel de transformar uma linguagem de mais alto nível em linguagem de máquina, por assim dizer, para que seja possível a gravação no chip do microcontrolador. Ele é responsável também por agrupar e inserir dentro de um mesmo código as bibliotecas distintas necessárias dentro de um projeto, como, por exemplo, funções aritméticas de cálculos, cabeçalhos, etc.

- **Gravação do componente:** o componente deve possuir a mais simples gravação possível, observando-se o tipo de recurso computacional necessário e o disponível para isso. Alguns componentes exigem complexos gravadores, tanto em hardware como em software. Até mesmo a disponibilidade de um gravador eficiente e barato, caso seja um pouco custoso projetar e construir um, deve ser verificada. Os gravadores possuem um número determinado de componentes compatíveis, bem como possuem um determinado tipo de conexão de comunicação com o computador que irá programar os microcontroladores, como, por exemplo, a gravação via porta serial e a via USB. Vale mencionar que alguns microcontroladores possuem a qualidade de poderem ser gravados na própria placa do hardware de quem fazem parte.

- **Encapsulamento:** existem diversos tipos de encapsulamento. Existem vários formatos, várias disposições de pinos, vários tamanhos, materiais, etc. Porém uma característica se destaca que é o tipo de montagem. Alguns são para montagem de solda superficial, outros

são de montagem em soquetes muitas vezes caros, e outros possuem encapsulamento PDIP, por exemplo, possibilitando a montagem no mesmo padrão das *proto-boards* utilizadas no desenvolvimento de hardware de diversos circuitos eletrônicos.

- Fabricante: o ponto principal é tentar utilizar componentes de fabricantes (marcas) já conhecidas por si, bem como sempre preferir as mais renomadas ou mais utilizadas no mercado.

- Preço: dependendo do preço do microcontrolador um projeto pode tornar-se inviável, ainda mais se existir a intenção de que vire um produto, pois, em geral, a concorrência usa o mais financeiramente viável. Preços devem ser analisados juntamente com as características técnicas do chip. Muitas vezes o chip é mais caro, porém apresenta algum recurso que dispensará o custo de desenvolvimento e implementação de um hardware para realizar determinada tarefa, como, por exemplo, uma conversão A/D, o que o torna economicamente uma melhor alternativa. Os preços de circuitos integrados variam muito conforme o local de fabricação, de venda, frete, etc. Deve ser cogitada também a compra de grandes quantidades, pois os descontos são atrativos.

- Disponibilidade/aquisição: parece ser irrelevante à primeira vista, porém muitas vezes o microcontrolador escolhido não se encontra disponível no mercado nacional, o que pode tornar um projeto inviável dependendo do custo de importação e/ou frete, bem como o tempo decorrido da importação. É importante procurar saber se os componentes a serem adquiridos são de um revendedor consolidado, para que se consiga uma garantia de suprimento dos mesmos, em caso de produção em série de um produto. No caso de um protótipo para fins didáticos o problema é diminuído, porém não pode ser deixado de lado. Envios internacionais estão sempre sujeitos a maior burocracia e demandam mais tempo, portanto a escolha por adquirir componentes no Brasil deve ser a primeira opção. A aquisição de um

vendedor desconhecido pode causar transtornos de mau acondicionamento do componente, que no caso do microcontrolador, é muito sensível.

- Modernidade: como a evolução de todos os tipos de circuitos integrados é dinâmica, utilizar um chip antigo pode significar um erro de projeto, visto que muitas empresas descontinuam seus componentes continuamente. Deve-se, portanto, buscar a utilização de modernas tecnologias, para não ter um projeto novo com componentes obsoletos. Sem contar que com as melhorias nas tecnologias de confecção de circuitos integrados eles em geral possuem desempenhos superiores e menor consumo de energia, bem como pequenas melhorias internas.

- Software de código disponível: é outra questão importante, visto que um projeto de um software desde o zero, início, é muito mais complexo do que quando se possui códigos que implementam funções parecidas com as necessitadas, gratuitamente na internet, por exemplo. Às vezes, o trabalho de montar toda uma estrutura de programa pode ser poupado, ou facilitado, pela observação de estruturas existentes. É um dito popular e corrente no meio profissional o de que não se deve reinventar a roda toda a vez que houver necessidade de usá-la em determinado projeto.

- Possibilidade de expansão ou *upgrade*: o engenheiro projetista deve sempre imaginar que seu projeto será obsoleto, apenas numa questão de tempo. Portanto a necessidade de pesquisar a tendência evolutiva do mercado relaciona-se diretamente com a pesquisa por chips mais modernos. Se um projeto utilizar o microcontrolador mais avançado possível, sua necessidade de *upgrade* diminuiu, porém deve ser avaliada. Quanto à expansão apenas, a possibilidade de utilizar outros microcontroladores ou circuitos integrados que se comuniquem entre si em um barramento, utilizando um protocolo CAN ou FlexRay, por exemplo, pode significar uma sobrevida considerável a um projeto já existente sem ter que remodelá-lo expressivamente, tanto em hardware como em software.

3.5 ESCOLHA DO MICROCONTROLADOR

Com base na lista de características desejadas ligadas ao microcontrolador é feita uma pesquisa de mercado. Após uma análise primordial é feita uma triagem. Os principais candidatos a microcontrolador para o protótipo são apresentados na Tabela 3 abaixo:

Código:	Fabricante:
PIC18F4685	Microchip
MC9S08QE128	Freescale
AT89S8253	Atmel
ATmega644P Automotive	Atmel

Tabela 3: principais candidatos a microcontrolador para o protótipo

Analisando o conjunto todo de itens classificados, a escolha foi pelo microcontrolador PIC18F4685, da Microchip. Suas características, baseadas na classificação do item 3.5, estão listadas abaixo:

- Clock: até 40 MHz;
- Entradas analógicas (A/D): 11 canais analógicos com conversores de 10 bits;
- Número de I/Os: 40 I/Os;
- Número de timers: 4 timers;
- Tamanho da Memória de Programa: 96 Kbytes;
- Saída PWM: 2
- Software de desenvolvimento: MPLAB
- Compilador: MCC18

- Gravação do componente: via USB, utilizando-se um gravador comum de mercado
- Encapsulamento: PDIP
- Fabricante: Microchip
- Preço: R\$45,00
- Disponibilidade/aquisição: disponível no Brasil pela Farnell
- Modernidade: 2007
- Software de código disponível: grande quantidade para PIC18xxxx
- Possibilidade de expansão ou upgrade: possibilidade de comunicação via protocolo CAN com outros dispositivos, com upgrade disponível para desenvolvimento com microcontroladores de 16 bits.

3.6 ANÁLISE DAS TOPOLOGIAS DE CIRCUITOS EXISTENTES

Após a escolha do microcontrolador, parte-se para a escolha de topologias de circuitos existentes, para que o protótipo compartilhe circuitos com as inovações mais recentes apresentadas no mercado, bem como para que o trabalho de engenheiros projetistas seja avaliado e, na medida do possível, aproveitado. Começar o projeto de uma injeção eletrônica programável desde o zero, sem nem ter noção de como outras são, seria trabalhoso, além de dispendioso demais.

Portanto, vista a importância desta análise, esta etapa consiste basicamente em entender o funcionamento do circuito elétrico a ser analisado, entender se seu funcionamento elétrico é adequado à sua função na mecânica de um automóvel, equacioná-lo, simulá-lo em software de simulação de circuitos elétricos, conferir o valor de componentes, e já imaginar possíveis modificações. As análises começam por blocos funcionais da injeção eletrônica, conforme

Conforme é possível observar, o circuito consiste em um mosfet de potência que funcionará como uma chave do tipo liga/desliga, chaveando os bicos injetores com usuais 12 V provindos de um circuito de alimentação com tensão da bateria do veículo, necessitando de alguns cuidados. O acionamento será por bancos de bicos injetores, todos conectados em paralelo, portanto.

Alguns detalhes são importantes salientar. O primeiro deles é que o mosfet é controlado por uma tensão em seu gate, necessitando de uma corrente muito baixa para seu acionamento, porém pode chavear cargas de potência relativamente grande. Outro detalhe é o de que um bico injetor pode ser eletricamente representado por um indutor com uma resistência em série. Portanto, durante o seu acionamento elétrico repentino, que é praticamente um degrau de tensão de 0 a 12 V (podendo variar conforme a tensão da bateria no exato momento de acionamento), sua tensão varia quase que instantaneamente ao passo que sua corrente demora um pouco mais aumentar devido à inércia na corrente que o indutor pode ocasionar. Essa demora gerará um atraso na efetiva abertura dos bicos, pois a variação da corrente é quem determinará a intensidade da força eletromagnética que atrairá o pistonete do bico injetor, determinando a velocidade com que ele conseguirá vencer a inércia mecânica da mola e da pressão de combustível que força-o no sentido de manter-se vedado. Este atraso deve mais adiante ser considerado no software de programação da injeção eletrônica.

O fato de analisar-se o bico injetor em seu transitório elétrico, não somente como um indutor e um resistor estáticos, ocasiona a recirculação de corrente após o desligamento da chave mosfet através do mesmo, pois a corrente armazenada no indutor tenderá a continuar fluindo, ao mesmo tempo que ao abrir-se o circuito contendo um indutor carregado, sua derivada de corrente se torna elevadíssima, pois é um fenômeno rápido em que a corrente passa de alguns ampères a zero. Assim surge uma tensão bem elevada, o suficiente para

romper a tensão entre *drain* e *source* do mosfet, o que geraria uma corrente reversa. Essa corrente reversa sobre o mosfet pode danificá-lo, portanto é necessário um outro caminho para ela após o fechamento da chave, ou seja, o comando de desligamento do bico injetor. A alternativa apresentada é utilizar um diodo de recuperação rápida, que possa atuar e estar pronto para bloquear uma corrente reversa através dele rapidamente. Para descarregar a corrente fluindo através de tal diodo rápido a melhor alternativa é utilizar um circuito que determine a partir de que ponto a tensão sobre o mosfet pode danificá-lo no desligamento do bico injetor e utilizar um grampeador de determinada tensão, o que aparece como alternativa em um dos circuitos analisados. Outro artefato é controlar via microncontrolador um circuito capaz de determinar a tensão mínima sobre o diodo em relação à massa para que haja a condução, bem como algumas cargas para dissipar a potência necessária. Outro aspecto é o de acionamento dos mosfets de potência serem feitos por drivers de mosfets, garantindo um melhor acionamento, com formato de onda do tipo PWM.

3.6.2 Análise de topologia de circuitos de ignição

Como alternativa para o circuito de acionamento da ignição surgem classicamente os tiristores, IGBTs, Darlingtons, entre outros. As topologias usadas são tipicamente simples, quando se trata de ignições eletrônicas por descarga indutiva e não capacitiva. A primeira topologia a ser analisada consiste no uso de um componente específico para acionamento de bobinas de ignição, no caso o VB921 da Bosch. Por tratar-se de um componente dedicado, ele já possui controle interno de corrente, uma elevada tensão reversa de ruptura, controle de sobretemperatura, entre outros aspectos. Seu circuito torna-se bastante simples, portanto, conforme Figura 15 a seguir.

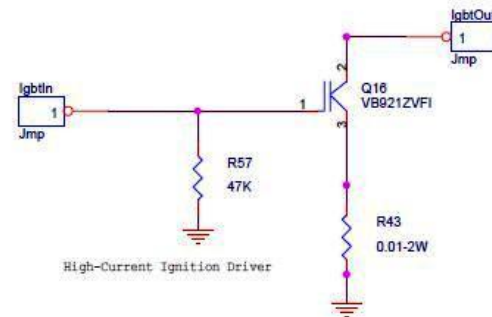


Figura 15: circuito de ignição de alta corrente. (MEGASQUIRT)

Outra alternativa analisada é o uso de IGBT. A topologia a ser analisada encontra-se na Figura 16 abaixo.

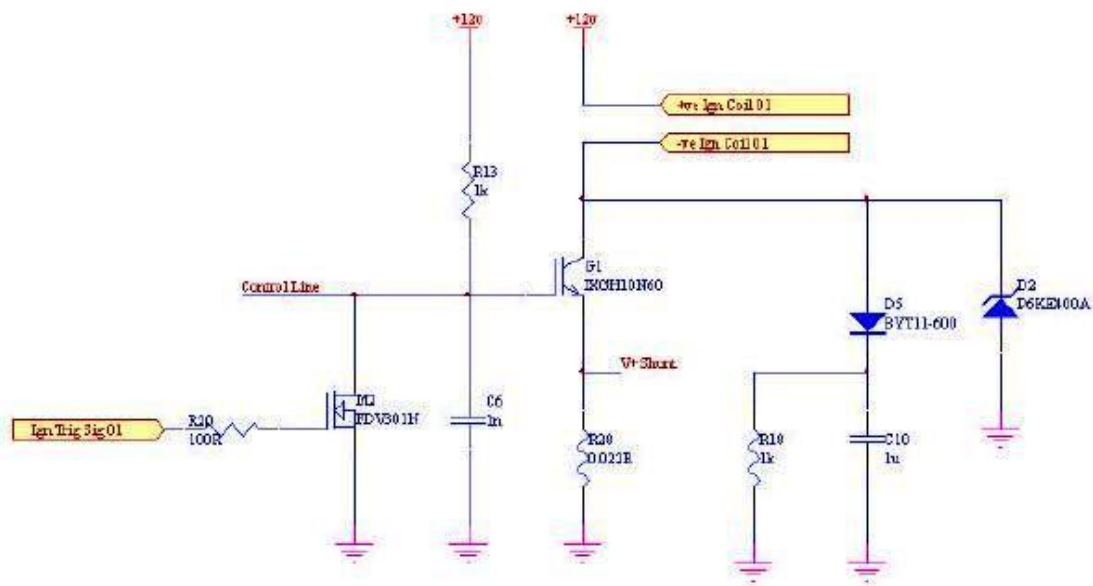


Figura 16: circuito de ignição. (KOSIK, 2000)

A idéia é semelhante a do circuito de acionamento dos bicos injetores, porém deve ser lembrado que a carga a ser acionada não é mais representada por um indutor e um resistor em série, mas sim por um transformador não ideal, um cabo com determinada impedância e uma vela centelhadora, cujo dielétrico varia conforme variam as condições internas do motor. Quanto maior a taxa de compressão, maior a temperatura e mais rica a mistura, mais difícil é de ocorrer a centelha, o que faz com que o arco voltaico precise de maiores tensões ainda para ocorrer. Portanto é necessário que tal circuito seja capaz de gerar altas tensões no secundário da bobina, sendo um pulso de curta duração, tipicamente menor que 1ms, e de altíssima tensão, tipicamente na ordem de 40 kV. Após fechado o arco, a tensão para mantê-lo é drasticamente reduzida, portanto o mais importante no acionamento é que a velocidade de acionamento seja rápida, bem como que exista uma rápida variação de corrente no primário da bobina, o que gerará tal impulso de tensão. Após a abertura da chave é necessário também um diodo rápido para que a corrente de primário não passe toda pelo IGBT, neste caso. Um grampeador de tensão também é usado.

No entanto, é analisado também o uso de um mosfet de potência, para que o acionamento possa ser feito diretamente da porta do microcontrolador, bem como mais rápido e com menores perdas, porém com pouco maior custo.

3.6.3 Análise de topologia de circuitos de entrada e saída de periféricos

Alguns circuitos de entrada de periféricos são analisados, como o condicionamento de sinal de um sensor de pressão do coletor de admissão, de temperatura do ar do mesmo, da temperatura do líquido de arrefecimento do motor, do sensor de posição da borboleta, da tensão da bateria, da sonda lambda, entre outros. Para a leitura de tais sensores é necessário que se tenha uma tensão de referência confiável, pois as medidas dos sensores dependerão

diretamente dela. As oscilações de leitura devem ser estabilizadas por filtros capacitivos, porém caberá ao software calcular médias de medidas, definir os intervalos de medição, bem como desconsiderar algumas medidas sabidamente incorretas. O software também conterà a curva de calibração dos sensores, o que possibilitará calcular valores mais próximos dos reais a partir das medições elétricas feitas. Alguns sensores especificam inclusive os componentes a serem utilizados em conjunto com eles baseados nas condições normais de uso. A tensão da bateria deve ser lida instantaneamente antes do acionamento dos bicos injetores, pois os bicos terão sua quantidade de combustível injetado diretamente relacionada a esta medida, portanto quanto mais real o sinal, melhor. A Figura 17 abaixo mostra as topologias mencionadas anteriormente.

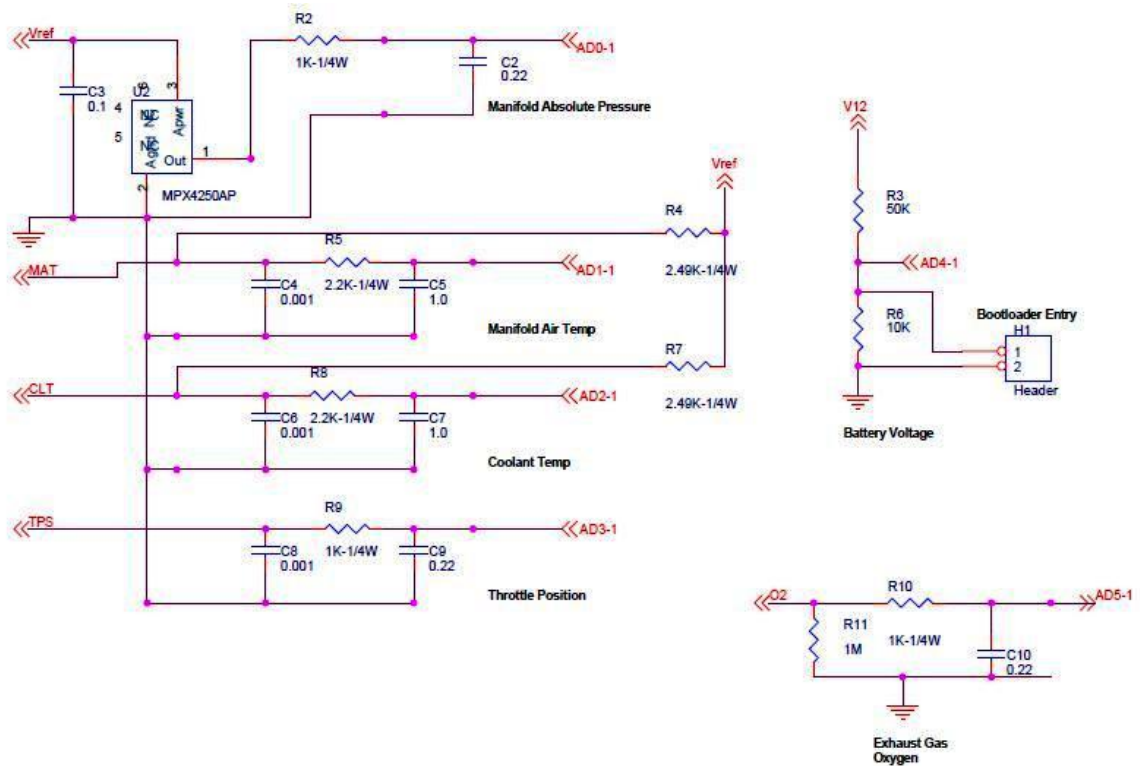


Figura 17: circuito de entradas. (MEGASQUIRT)

Os circuitos de saída de periféricos basicamente são os circuitos de acionamento de bomba de combustível, solenóides, displays, LEDs, entre outros. Nada muito relevante a ser analisado, visto que são circuitos relativamente simples de serem projetados.

3.6.4 Análise de integração de circuitos com sensores, atuadores e demais componentes de uma injeção eletrônica

Diversos circuitos analisados possuíam uma característica em comum: eram todos montados na mesma placa de circuito impresso, alguns com diversas camadas de circuito impresso.

É necessária uma fonte que alimente o microcontrolador e seus periféricos com tensão o mais constante possível, bem como que tenha proteção contra surtos de tensão, e deve fornecer uma tensão de referência confiável, visto que a tensão da bateria varia constantemente conforme o funcionamento do motor, bem como conforme ela se carrega ou descarrega à medida que diversas cargas são comutadas.

A seguir, na Figura 18, está uma das topologias usadas na análise.

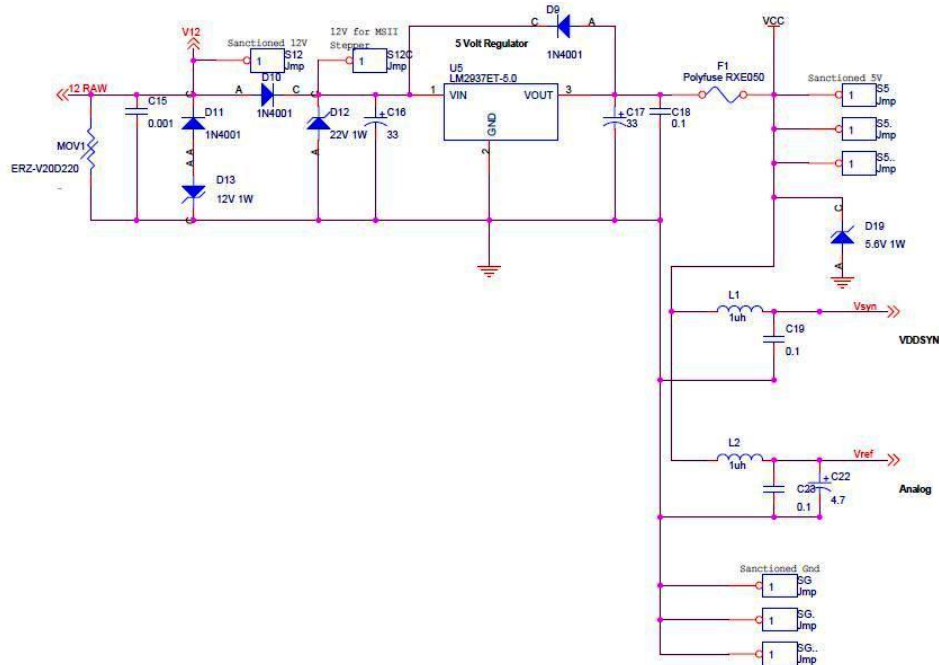


Figura 18: circuito de fonte. (MEGASQUIRT)

Em certos instantes é necessário fornecer energia extra, portanto o uso de capacitores para armazenar energia é uma boa alternativa, que complementa alguns circuitos analisados. A corrente de “*inrush*” ocasiona pela carga dos capacitores descarregados, quando girada a chave de ignição, no entanto é elevada e deve ser considerada no dimensionamento do circuito.

O circuito de entrada de pulsos de rotação do motor, ou tacômetro, exige especial atenção aqui. Os motores precisam de uma leitura de rotação correta para que a injeção eletrônica possa oferecer suas vantagens de precisão. A rotação pode ser medida tanto por um sensor Hall tanto por um sensor de relutância variável. No caso do sensor Hall, a exigência na complexidade é menor, visto que é necessário apenas o uso de um optoacoplador, para isolar eletricamente o circuito de medição da porta utilizada no microcontrolador, e proteger sua leitura de interferências eletromagnéticas. A tensão deve ser um pouco rebaixada para atingir os níveis do optoacoplador e capacitores de filtro devem ser

usados. Já o circuito de leitura de sensores de relutância variável é mais complexo. A utilização dele se dá devido ao fato de que motores são ambientes inóspitos, propensos a muita sujeira e calor, portanto sensores robustos são necessários – porém devem apresentar ainda sim uma precisão coerente. A roda fônica, ou roda dentada, é feita de metal e possui saliências (os dentes) e quando gira produz uma senóide de tensão no sensor. O fato construtivo da roda fônica de possuir um elevado número de dentes (36, por exemplo) possibilita uma senóide de frequência mais elevada, porém um dente (ou dois) faltando possibilita uma mudança no perfil da senóide, o que caracteriza o início do ciclo de combustão, ou ponto morto superior. É um detalhe importante o de mencionar que a montagem do sensor no sentido contrário ao sentido de rotação do motor, ou seja, adiantado, possibilita via software a previsão antecipada do momento certo em que o motor estará em ponto morto superior. Isso possibilita todos os cálculos de rotação e posição relativa do mesmo, que são determinantes na injeção de combustível.

O condicionamento do sinal lido pelo sensor de relutância variável tem o perfil senoidal com uma falha onde o dente está faltando. Esta onda que determinará o momento em que deverá ser feita a leitura pelo microcontrolador. Abaixo, na Figura 19 é mostrada a onda mencionada.

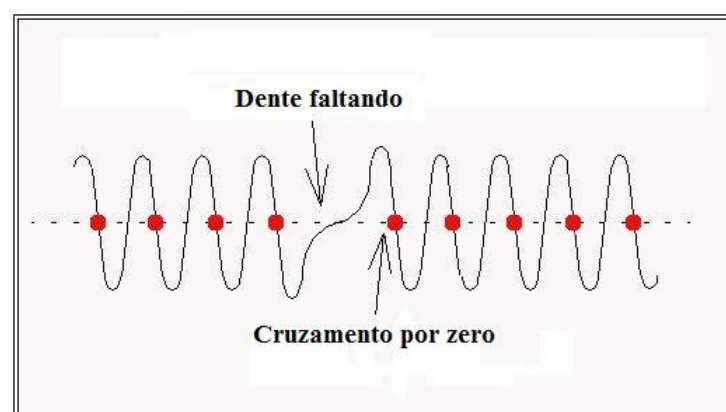


Figura 19: onda de tensão gerada no sensor de relutância variável. (MEGASQUIRT)

Como é possível perceber pela figura, o momento de leitura do microcontrolador é crucial para o sucesso da medição, já que o microcontrolador pode ler na borda descendente ou ascendente. Se o microcontrolador for ler na borda ascendente, um problema de leitura pode ocorrer, pois o cruzamento por zero pode se estender por mais tempo, não sendo tão instantâneo e característico como o ponto mostrado pela seta na Figura 19. O circuito deve ter meios de selecionar o offset necessário para que se escolha o meio da senóide, bem como deve ter o controle da histerese para conseguir ler corretamente o sinal.

3.6.5 Análise de viabilidade de confecção do protótipo completo quanto ao custo, à complexidade, à disponibilidade de componentes e ao desempenho esperado

O custo do projeto é relativamente alto, pois possui um grande número de componentes, sendo muitos deles caros, bem como indisponíveis nas proximidades do projetista, exigindo um custo ainda maior de frete. O custo estimado ultrapassa os R\$400,00. Porém, se for visto como um produto e não como um protótipo, seu custo é relativamente baixo, visto que uma injeção eletrônica de mercado pode custar pelo menos quatro vezes o custo gasto em componentes e materiais.

Quanto à complexidade, o projeto realmente exige uma preparação teórica grande, tanto na parte mecânica quanto na parte elétrica. Somente projetar a parte elétrica sem entender a parte mecânica pode não ter sentido algum quando se tentar implementar na prática um circuito testado somente por simulações elétricas ou testado em osciloscópio, por exemplo. A complexidade de uma injeção eletrônica completa é grande, portanto seu projeto e teste deve ser feito em módulos, facilitando a depuração de erros de projeto ou incompatibilidades mecânicas. Além do hardware, existe a complexidade de integrar todo projeto elétrico ao

software a ser criado. De pouco adianta ter um circuito que possibilite o rápido e preciso acionamento dos bicos injetores, por exemplo, se o software não computa o atraso de acionamento – que é diferente para a abertura e para o fechamento -, nem leva em conta o fato de que o combustível injetado no coletor não é todo de imediato misturado com o ar, entre outros exemplos.

A disponibilidade de componentes é grande, porém alguns precisam ser trocados por outros equivalentes ou, pelo menos, semelhantes. Quando o componente não possui nenhum semelhante disponível, a estratégia a ser adotada tende mais ainda por uma outra topologia de circuito.

O desempenho esperado do protótipo deste trabalho é bem aquém de uma injeção eletrônica programável de mercado, devido a diversos fatores. O tempo é reduzido para estudar, analisar, projetar, prototipar e testar o mesmo. A produção é artesanal, e tudo está sendo estudado e feito pela primeira vez, o que tornaria improvável um desempenho compatível com produtos tradicionais já. Um aspecto diretamente relacionado ao desempenho do protótipo é o fato de se ter uma proposta de ser didático e não comercial, portanto até sua construção visará melhor visualização das partes que o compõe.

3.7 ALTERNATIVA ESCOLHIDA PARA SER IMPLEMENTADA

Analisadas algumas topologias, a alternativa escolhida a ser implementada é de confeccionar as diversas placas o mais próximo das analisadas, sendo feitas alterações conforme a necessidade, tanto após verificação em software de simulação de circuitos elétricos, quanto na confecção do protótipo propriamente. Algumas modificações devem ocorrer quando for necessário substituir componentes equivalentes, porém nenhuma das alternativas mostrou-se incapaz de satisfazer as condições para sua escolha.

4 MÉTODOS, PROCESSOS E DISPOSITIVOS

A seqüência de procedimentos realizados para elaboração do projeto segue abaixo na Figura 20:

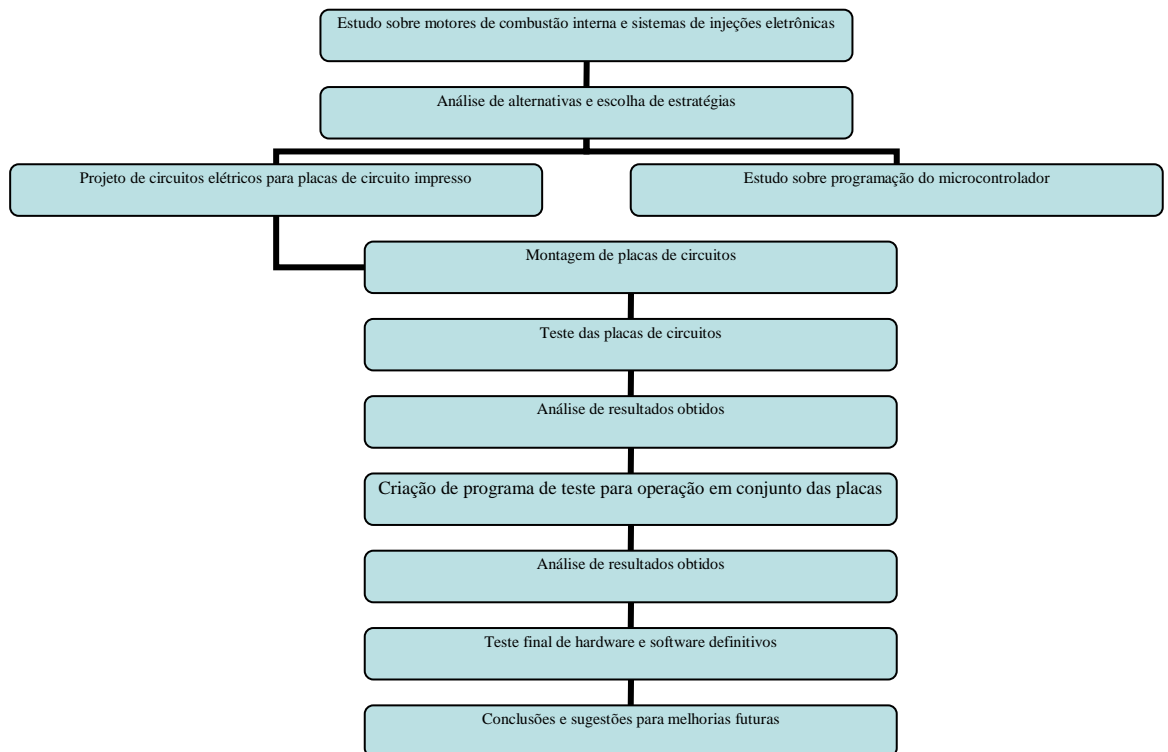


Figura 20: Seqüência de procedimentos realizados para a criação e avaliação do protótipo.

4.1 INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

Foi estuda a mecânica de motores, bem como a sua parte elétrica e eletrônica e também foi estudada a fundo a injeção eletrônica nos automóveis, como outros itens, para começar a cumprir o cronograma proposto anteriormente. No capítulo 5, O Hardware, será transmitido o conhecimento adquirido no projeto e confecção do hardware do protótipo. No capítulo 6, O Software, será mostrado o estudo para fazer o programa da injeção eletrônica.

5 O HARDWARE

Neste capítulo do trabalho será demonstrado o projeto dos circuitos elétricos que compõe a planejada injeção eletrônica, tendo em vista as características apresentadas no capítulo 3, onde foram feitas todas as análises julgadas necessárias para decidir a base do projeto de hardware que será feito.

Para facilitar a exposição das metodologias aplicadas, este capítulo será subdividido em partes correspondentes a cada circuito elétrico a ser projetado, começando pelos seus respectivos projetos, passando pelas suas montagens, seus testes e, por final, apresentando uma análise de resultados obtidos comparando seus testes, ou seja, os resultados obtidos, com o resultado que era esperado.

5.1 PROJETO

O projeto do hardware baseia-se nas topologias que foram escolhidas dentre as analisadas. As divisões são baseadas nas feitas no capítulo 3 nas análises correspondentes.

5.1.1 Circuito de Acionamento dos Bicos Injetores de Combustível

Optou-se por começar simulando a topologia analisada no capítulo 3 no software de simulação de circuitos chamado Microcap. Os resultados foram satisfatórios, dentro do esperado por tal circuito. As peculiaridades do circuito se justificaram.

Na seqüência, a Figura 21 apresenta o circuito de acionamento dos bicos injetores a ser simulado no software Microcap.

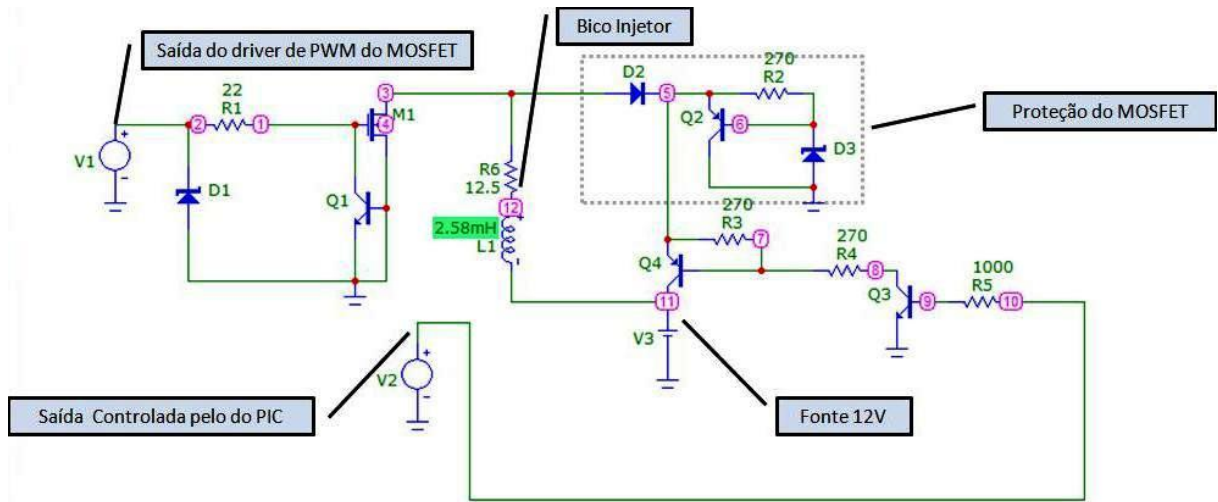


Figura 21: circuito de acionamento dos bicos injetores simulado no Microcap.

Abaixo na Figura 22 encontra-se a resposta simulada no Microcap.

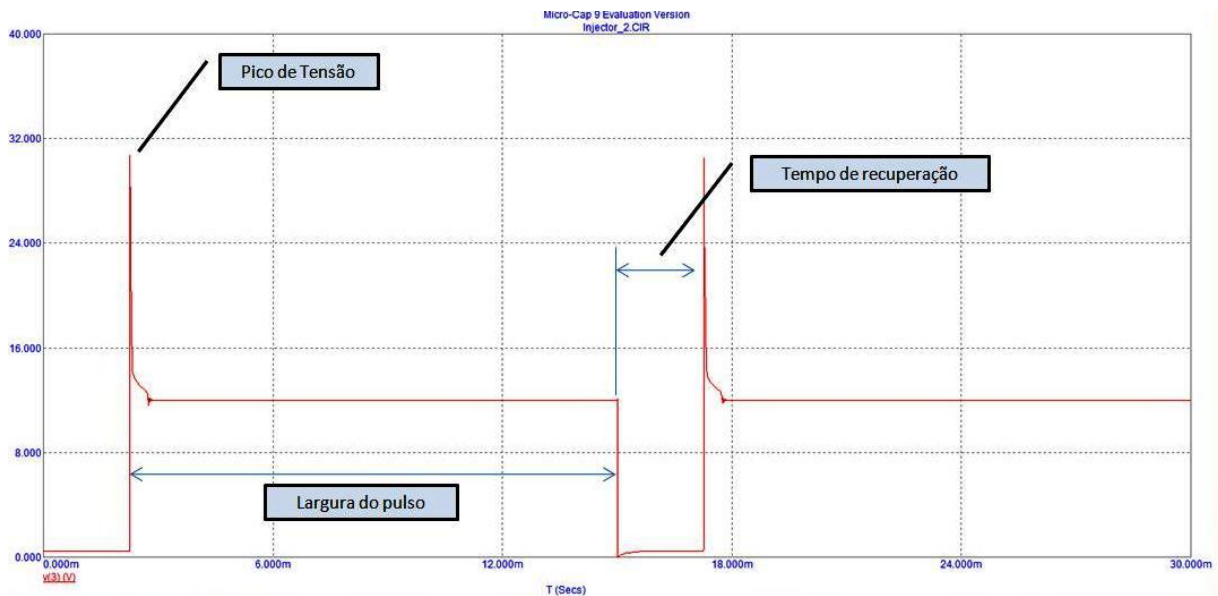


Figura 22: resposta circuito de acionamento dos bicos injetores simulada no Microcap.

A partir da Figura 22, pode-se observar o pico de tensão gerado quando do início da abertura do bico injetor, bem como a largura de pulso (o “*duty cycle*”) e o tempo de recuperação para ocorrência de outro acionamento.

Alterações na topologia do circuito, como alguns resistores e capacitores com seus valores alterados, bem como simplificação do circuito, foram testadas sem que fosse possível obter resultados que justificassem as alterações, portanto o circuito projetado é o mesmo analisado. Mudanças só ocorrerão se necessárias na fase de montagem ou após testes reais.

5.1.2 Circuito de Acionamento da Bobina de Ignição

Como no circuito de acionamento dos bicos injetores, optou-se, também, por começar simulando a topologia no Microcap. A alteração no projeto foi o uso do mosfet ao invés de um IGBT, o que foi simulado mostrando resultados também satisfatórios. Algumas alterações foram também testadas, mas nada que as justificasse. A mudança maior, portanto, ficou no uso de um mosfet de potência.

O mosfet escolhido foi o 11N60C3, pois suas características técnicas supriam com folga as determinações de projeto, visto que entre suas principais características estão sua tensão máxima, que é de 650V, e a energia de avalanche de 340mJ em um pulso único.

Na seqüência, a Figura 23 apresenta o circuito de acionamento da ignição a ser simulado no software Microcap.

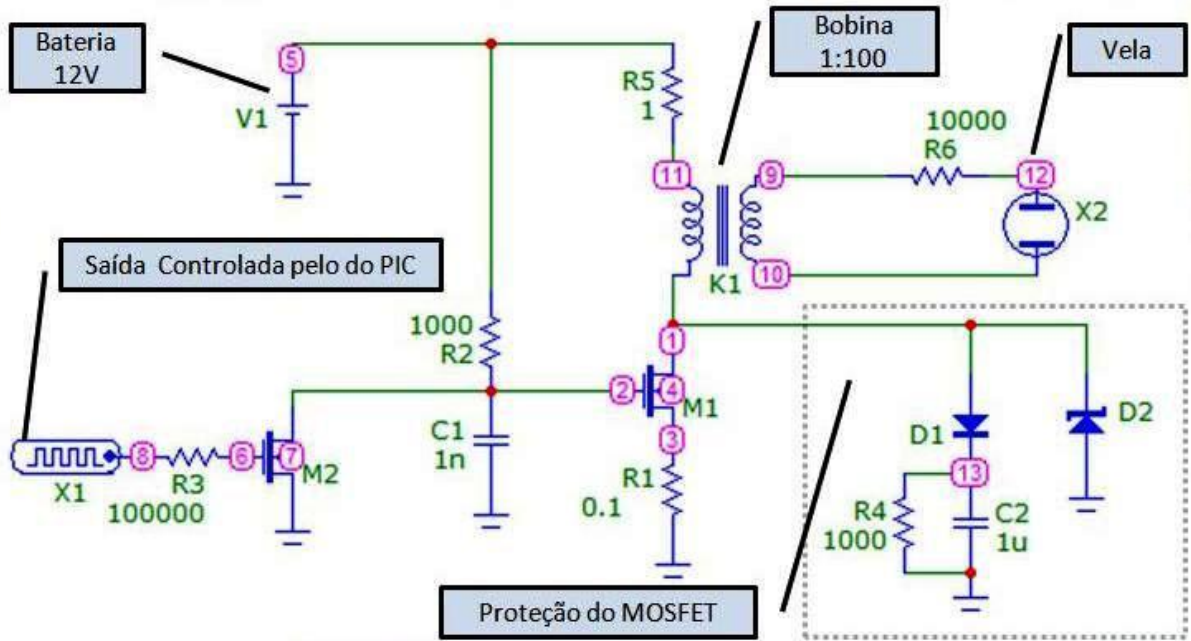


Figura 23: circuito de acionamento da ignição simulado no Microcap

Abaixo a Figura 24 apresenta a resposta do circuito de acionamento da ignição simulada com o uso do software Microcap.

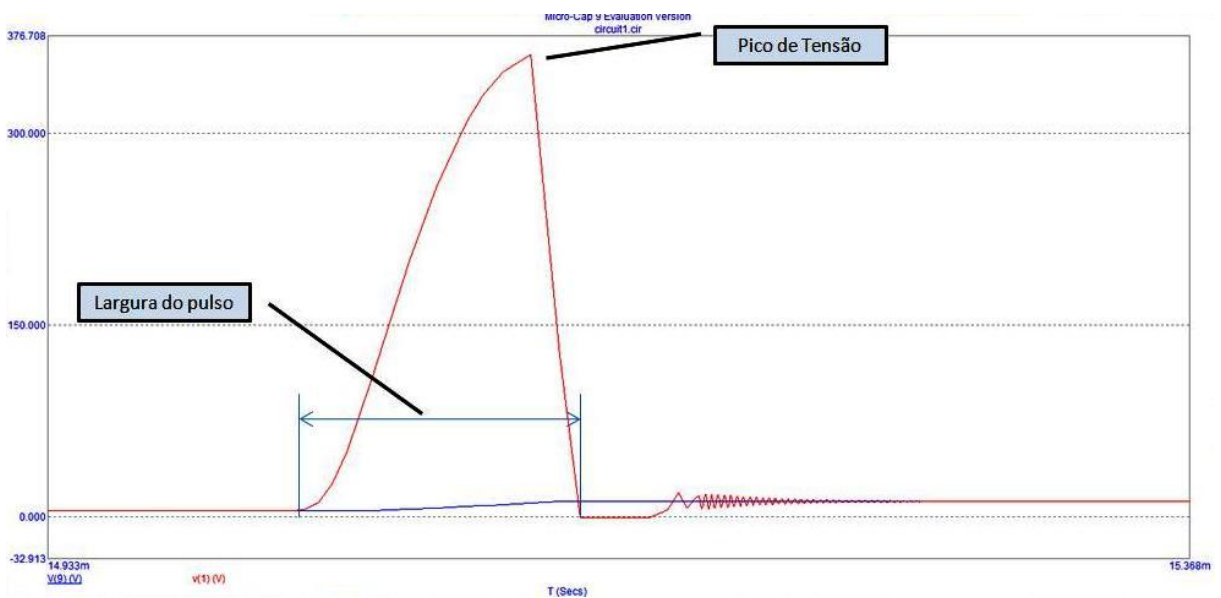


Figura 24: resposta circuito de acionamento da ignição simulada no Microcap.

Analisando-se a Figura 24, é observado que a largura de pulso é muito pequena, porém o pico de tensão é no primário da bobina é realmente alto, perto dos 400 V usuais de ignições eletrônicas de mercado, produzindo perto dos 40 kV diretamente na vela de ignição, o que caracteriza uma ignição de alto desempenho.

5.1.3 Circuito de Fonte

No circuito de fonte foi visto necessário o uso de um capacitor com capacitância suficiente para suprir a demanda extra de energia dos bicos injetores e da bobina de ignição. O cálculo resultou em uma capacitância ideal acima de 6800 uF, a capacitância de um capacitor ainda de dimensões reduzidas, preço acessível e tensão de ruptura de 25 V dentro do desejado. Portanto, decidiu-se utilizar dois capacitores destes capacitores de 6800uF em paralelo, chegando a uma capacitância de 13600uF, mais do que suficiente para alimentar o circuito.

5.1.4 Circuito do Microcontrolador

O circuito do microcontrolador basicamente é composto pelo clock e pelo reset. Foi projetado um reset utilizando um Schmitt trigger e o acionamento de um led indicativo. Todo acesso aos pinos ficará por meio de bornes.

5.1.5 Circuito de Entradas

Os circuitos de entrada, ou de leitura de sensores, permanecem praticamente inalterados em relação aos, exceto pelo valor de resistores e pela utilização de um medidor de

pressão absoluta ao invés de pressão atmosférica ou de diferencial de pressão. A escolha por um tipo de sensor um pouco mais caro (o MPX5700AP, que é automotivo) se deve ao fato de que a pressão absoluta oferece uma vantagem em relação aos demais: lê a pressão absoluta, não precisando de nenhum referencial. Assim é possível medir pressões de 0 a 700 kPa, com saídas de 0,2V a 4,7V, bem como medir o vácuo também, através de um orifício que será conectado a uma mangueira ligada ao coletor de admissão. Portanto, bastará fazer em programação uma escala de interesse baseada na leitura absoluta a qual será necessária para calcular o combustível a ser injetado. Os motores formam vácuo no coletor de admissão quando em aceleração ou sob carga, como subindo uma lomba, e se a medida fosse atmosférica (partindo de 1 atm) seu sensor não mostraria o vácuo. Esse detalhe pode ser essencial para identificar a carga sofrida no motor, não interessando se está abaixo do nível do mar, nem se está acima, ou em outra condição, como sob pressurização de um turbocompressor. Outras mudanças não são essencialmente necessárias por se tratar de circuitos previamente projetados em conformidade com manuais de fabricantes dos componentes automotivos.

Alguns botões, e algumas chaves, serão utilizados em protoboard, portanto seus circuitos serão projetados conforme for necessária a sua utilização.

5.1.6 Circuito de Medição da Rotação

O circuito de medição de rotação baseado nos analisados, como o da Megasquirt, teve o amplificador operacional MC34072AP trocado por um mais barato e de mesmo desempenho, o LM2904N, bem como o optoacoplador 4N25, que foi trocado pelo TIL111, este muito mais barato e facilmente encontrado. Os diodos 1N4001 também foram trocados

por 1N4007. Os transistores ZTX553 foram trocados por pelos A1013 Y-G10, mais baratos e com características semelhantes.

5.1.7 Circuito de Saídas

Foi projetado um circuito de acionamento de seis leds indicativos para a visualização de determinados eventos, inclusive para melhor depuração de falhas no software da injeção eletrônica. O acionamento de cargas poderia ser feito, por exemplo, substituindo-se tal circuito por uma placa de acionamento com relés, porém é maior a importância neste trabalho didático a visualização dos acontecimentos do que acionar, por exemplo, a bomba elétrica de combustível ou o atuador de marcha lenta.

O display LCD de 2 linhas e 16 colunas será testado conectado a uma protoboard, não necessitando de uma placa específica para ele no momento. Seu circuito basicamente é composto de fios e resistores de acoplamento com as portas do microcontrolador.

5.2 MONTAGEM

Os circuitos tiveram seus layouts feitos utilizando-se do software PCB123, visto que é um software gratuito e relativamente simples de ser utilizado. O roteamento foi todo manual e foi tentando ao máximo criar as trilhas de terra todas a partir de um mesmo ponto, bem como perto das trilhas com tensão positiva, visando diminuir a capacitância parasita. Capacitores também foram adicionados com este intuito. As trilhas foram feitas de modo a evitarem cantos vivos e ângulos retos, para diminuir os efeitos de interferências eletromagnéticas também. As espessuras das mesmas foram tomadas a partir de pontos de maior fluxo de potência, sendo as regras de espaçamento obedecidas via software.

Abaixo a Figura 25 mostra o ambiente de desenvolvimento das placas de circuito impresso, o PCB123, perto do momento final da criação do layout da placa de acionamento dos bicos injetores.

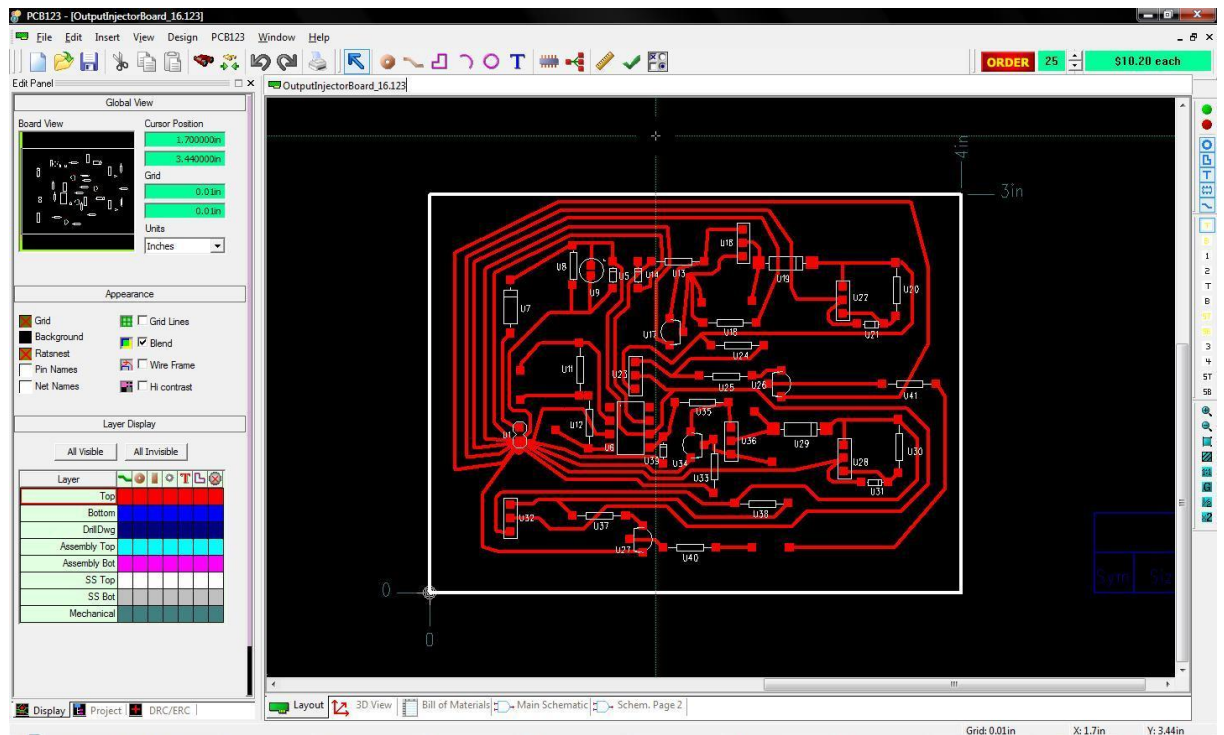


Figura 25: software PCB123.

Após o desenvolvimento em software computacional do layout, as placas foram impressas ou copiadas a laser em folhas de transparências, de modo que o método de impressão do mesmo possibilite que a transferência de tinta para a placa de circuito impresso correspondente. Para transferir, basta utilizar-se de um ferro de passar roupa, a seco, e passá-lo para a placa de cobre do circuito impresso. Assim que feito isso, a placa é deixada em banho em uma solução de percloreto de ferro para que seja corroída e, após, pintada com spray protetor contra a oxidação, perfurada e receba a soldagem dos componentes utilizados.

Quanto ao processo de montagem, ou confecção, em si, vale lembrar de que todas as placas de circuito impresso foram projetadas e feitas a mão, portanto o processo foi quase

que artesanal. Assim que uma topologia era criada e conferida, era impressa em tamanho real e analisada em relação às dimensões físicas do componente em questão. Algumas placas tiveram de ser refeitas, como uma delas que devido ao tamanho e disposição dos dissipadores de calor em seus componentes de potência precisava de espaçamento entre determinados componentes para sua montagem física.

A difícil disponibilidade de alguns componentes fez com que fosse necessária a procura por equivalentes, ou semelhantes. A preferência se deu também pelo menor preço de componentes caros.

Foram criadas sete placas, sendo elas correspondentes a cada um dos subitens anteriores, com conectores para conexão entre si. Uma complicação é o elevado número de fios utilizados, ao invés de trilhas em placas. Porém a flexibilidade de se poder testar isoladamente e facilmente placa por placa compensa a complicação criada. Os bornes de conexão utilizados são semelhantes aos usados em muitos equipamentos de automação industrial.

Os transistores receberam dissipadores sempre que julgado necessária uma maior dissipação de calor, visando uma utilização sob condições mais intensas de uso.

O circuito de fonte recebeu capacitores de tântalo para melhorar sua resposta em frequência a ruídos a serem filtrados, bem como recebeu diodos de maior corrente.

Abaixo, seguem as fotos dos circuitos montados, começando pelo circuito de acionamento dos bicos injetores, conforme Figura 26 a seguir.

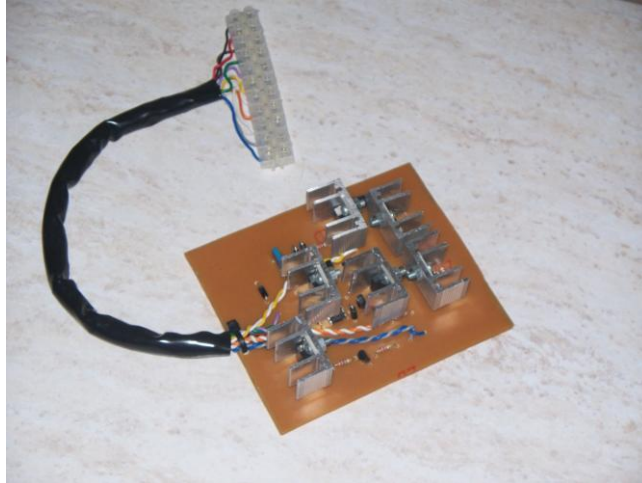


Figura 26: placa montada do circuito de acionamento dos bicos injetores.

Como foi o primeiro circuito a ser montado, apresenta maiores complicações devido à disposição física dos componentes. O padrão de bornes de conexão ainda não havia sido decidido, portanto os fios saem da placa diretamente e, então, conectam-se a bornes.

Na seqüência, a Figura 27 mostra o circuito de acionamento de bobinas de ignição.

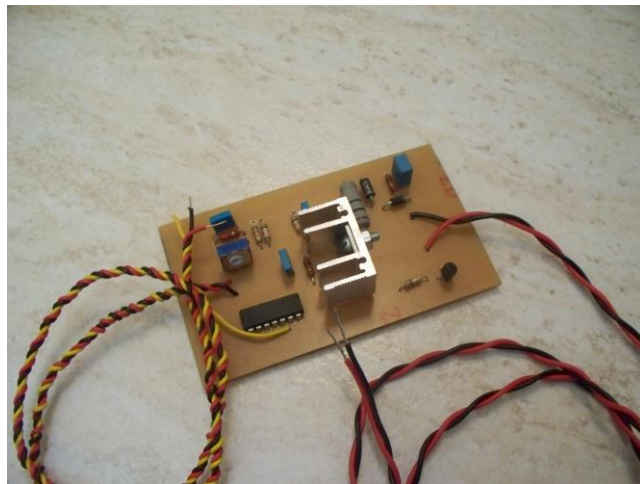


Figura 27: placa montada do circuito de acionamento de ignição.

A Figura 28 a seguir apresenta o circuito de fonte. Repara-se no tamanho dos capacitores utilizados.

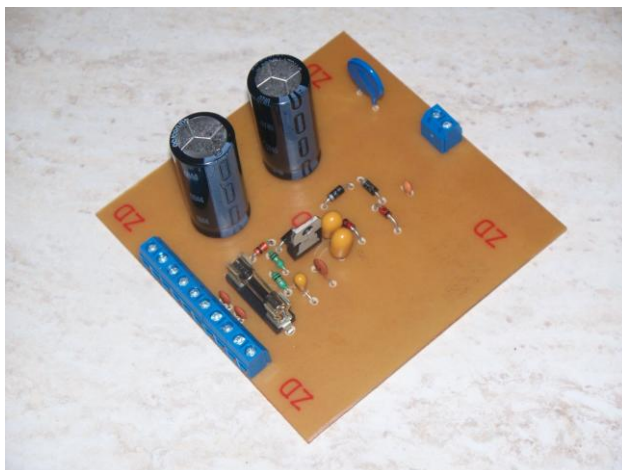


Figura 28: placa montada do circuito de fonte.

A Figura 29 apresenta o circuito de entradas de sinais, como temperatura do motor, pressão do coletor, etc.

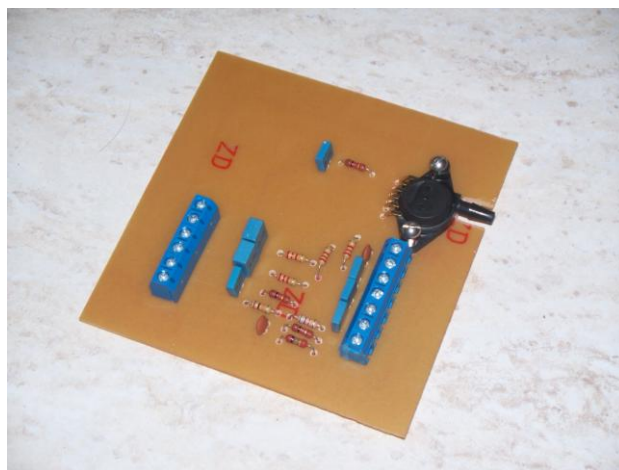


Figura 29: placa montada do circuito de entradas.

Na seqüência, a Figura 30 apresenta o circuito do microcontrolador, com o PIC18F4685 no seu lugar.

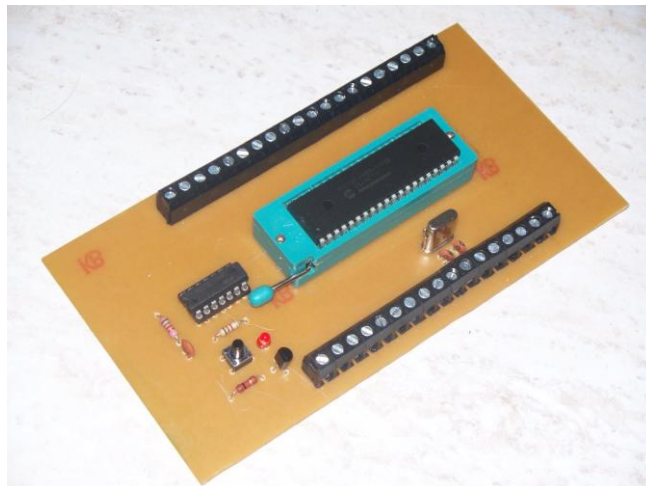


Figura 30: placa montada do circuito do microcontrolador.

Logo mais, é mostrada a Figura 31, a qual apresenta o circuito de leitura dos sinais de rotação, tanto provindos de sensor Hall quanto de relutância variável. Detalhe para os potenciômetros de ajuste.

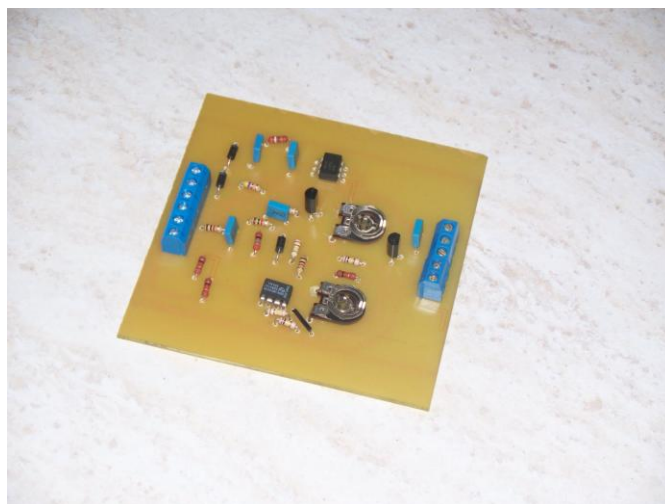


Figura 31: placa montada do circuito de leitura dos sinais de rotação.

A Figura 32 apresenta o circuito de saídas, basicamente formado por LEDs para visualização de sinais.

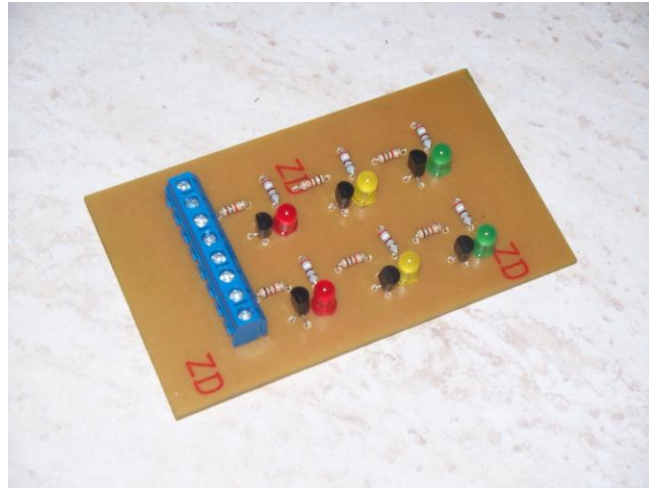


Figura 32: placa montada do circuito de saídas.

5.3 TESTES

Os testes consistiram inicialmente numa inspeção visual. Foi verificado se todos componentes estavam montados corretamente e se nenhum estava avariado.

Após isso, foi feita uma checagem elétrica de soldagem de componentes, em busca de curtos-circuitos e mal contatos, utilizando-se um multímetro.

Parte-se então para ligar os circuitos isoladamente. Os circuitos foram ligados inicialmente sem carga e operaram ligados por pelo menos 10 minutos sem serem desligados. Como alimentação foi utilizada tanto uma fonte de tensão regulável de 0 a 12V construída durante o curso, bem como fontes disponíveis de 0 a 12V em laboratórios e uma bateria automotiva de 12V.

Ligados os circuitos sem apresentar quaisquer problemas, eles devem ser submetidos ao acionamento de cargas.

No caso dos bicos injetores, o teste consistiu em ligar o bico injetor na placa de acionamento dos mesmos, suprir uma alimentação de 12V e verificar se os bicos seriam acionados. Porém, para simular o sinal de entrada do tipo PWM foi projetado e construído um

circuito oscilador com o famoso componente 555 para conseguir gerar tal onda e modificar-se a frequência e o duty cycle dela através de potenciômetros. Foi testado inicialmente em uma bateria automotiva de 12V e como não foi ouvido o barulho característico de chaveamento dos bicos injetores, mesmo sem combustível, a placa foi levada à bancada de testes. Conectada a um osciloscópio, foram feitas as medidas sem bico e com bico na saída de acionamento. Abaixo, algumas figuras mostram os procedimentos.

A Figura 33 mostra os procedimentos de teste do circuito de acionamento dos bicos injetores.

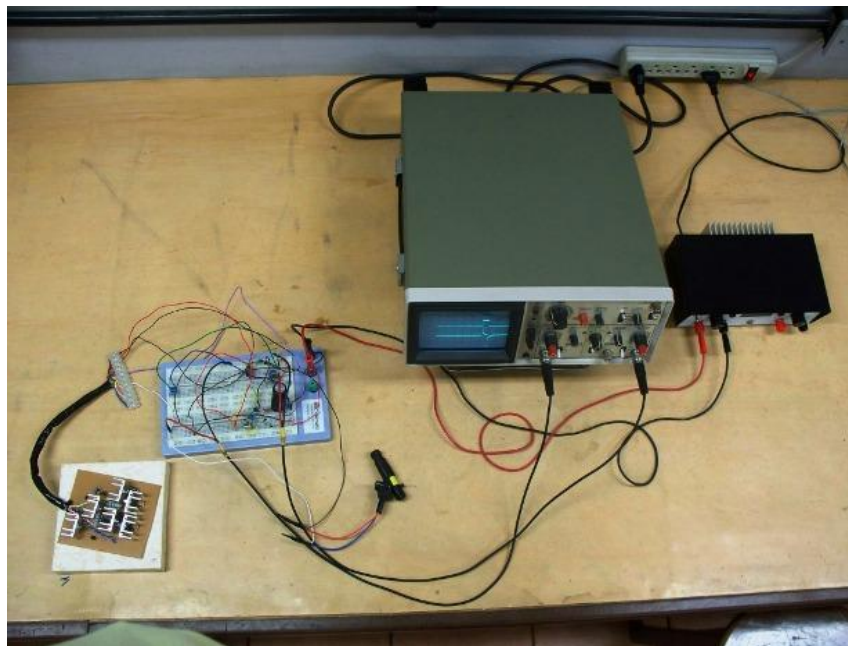


Figura 33: testes realizados em laboratório do circuito de acionamento dos bicos injetores.

A Figura 34 mostra a tela do osciloscópio durante um dos procedimentos de teste do circuito de acionamento dos bicos injetores.

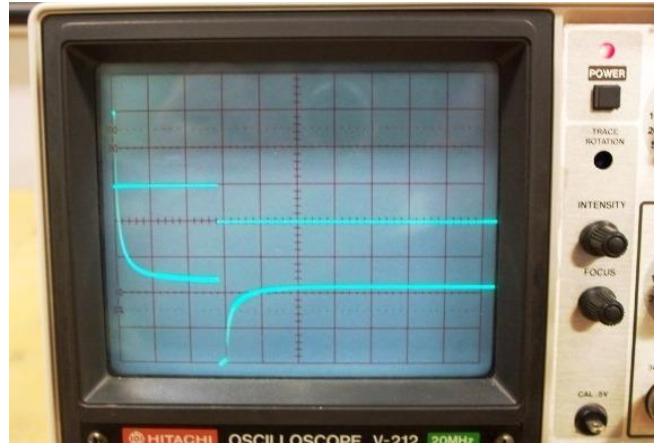


Figura 34: circuito de acionamento dos bicos injetores no osciloscópio.

São observadas a onda de acionamento quadrada gerada pelo circuito projetado com o 555 e a onda de tensão resultante em cima do bico injetor.

Visto que a curva de tensão ao longo do tempo apresentava o formato desejado, porém não sabia-se se os bicos realmente teriam força suficiente para abrir sob pressão do combustível, levou-se o conjunto para um teste real nas dependências do laboratório de motores da Engenharia Mecânica da UFRGS.

No laboratório de motores da Engenharia Mecânica, conectou-se um bico injetor a uma bomba de combustível de alta pressão alimentando álcool e foi testado o circuito. O resultado foi insatisfatório, visto que o bico injetor não conseguiu vencer a inércia mecânica do sistema e abrir, formando o spray de combustível característico. Algumas considerações foram feitas a respeito do que poderia estar acontecendo, como a frequência elevada demais do sinal PWM, bem como seu ciclo muito alto, bem como a corrente baixa demais para acionar os bicos. O resistor limitador de corrente utilizado foi substituído por um curto-circuito no intuito de aumentar-se a corrente de saída, após uma checagem de que não ocasionaria problemas ao circuito. A solução para o problema foi esta e os bicos começaram a acionar perceptivelmente ao ouvido humano. Um novo teste em foi feito em casa e o resultado foi o esperado: o circuito era capaz de acionar periodicamente o bico injetor e formar o spray

característico. Foram testadas ambas a variação de frequência e a variação de duty cycle através do circuito oscilador, demonstrando visualmente o esperado.

O circuito de ignição foi testado em casa, utilizando-se uma bobina de alta tensão do VW Gol Mi de dois fios (positivo e negativo), cabo de vela não supressivo da marca Bosch e vela comum da marca NGK, modelo BP5ES (não supressivos) instaladas em um Chevrolet Opala 1973 o qual utiliza o sistema de ignição Kettering com distribuidor. Enfim, a centelha ocorreu e, comparando-se com o do veículo mencionado acima, que utiliza uma ignição eletrônica da Bosch original do Opala de 1988, mostrou-se mais satisfatória. Ou seja, seu desempenho visual parece melhor, mesmo sem um maior limite de corrente.

O teste do circuito da fonte foi mais simples. Conectou-se inicialmente uma fonte de tensão variável e foram medidas suas tensões. O resultado foi satisfatório também com a utilização de uma bateria automotiva, conectando-se o circuito ao motor do Opala 1973 em funcionamento, lembrando que os cabos não supressivos (ou diretos) aliados a velas não supressivas (ou resistivas) proporcionam um ambiente de maior ruído eletromagnético. Portanto, o ambiente pode ser considerado como real e ideal para testes de desempenho extremo da fonte.

O teste do circuito do microcontrolador foi feito após o término de todo o hardware, na parte de software, como será relatado no capítulo 6, visto que não há como testar o microcontrolador sem um programa. Apenas foi possível, então, testar o reset do circuito, o qual funcionou corretamente.

O teste do circuito de entradas de sensores foi feito com o auxílio de potenciômetros e de uma fonte de 12V, para simular os sinais de entrada reais de tensão a serem medidos pelo microcontrolador. O sensor de pressão absoluta foi testado no vácuo do motor em funcionamento e demonstrou ler os valores desejados. Uma curva de calibração feita em software para a correção de suas medidas em função da temperatura deve ser utilizada

Nenhum dos sensores apresentou qualquer tipo de problema, visto que não foi possível testar em um motor real em funcionamento dinâmico, onde as interferências eletromagnéticas poderiam causar erros de leitura. Porém, salienta-se dizer que o software pode corrigir alguns erros de medida de forma simples, como calculando a média de algumas medidas. Vale lembrar que nem toda variável necessita ser lida o mais rápido possível. A temperatura do motor, por exemplo, demora bastante para variar devido à inércia térmica do mesmo, portanto seu erro pode ser praticamente nulo, visto que o intervalo entre as médias de medidas pode ser maior do que o sinal de posição da borboleta. Este último, deve ser lido constantemente, o mais próximo do tempo real, bem como o sinal da sonda lambda – ambos são necessários no cálculo instantâneo de quantidade de combustível e ponto da ignição a serem utilizados.

Os circuitos de leitura de rotação foram testados utilizando-se um gerador de onda senoidal, apresentando medidas correspondentes à rotação correta, ou seja, suas leituras corresponderam à frequência de onda aplicada. No caso específico da simulação da onda gerada pela roda fônica, não foi possível simulá-la como deveria, tendo em vista que a roda fônica proporciona uma tensão de amplitude variável com a rotação, ou seja, quanto maior a rotação maior a sua amplitude, podendo chegar a dezenas de volts. O que não é possível representar no gerador de sinais do laboratório. Sem contar que existe a falta de um determinado período da senóide por ciclo do motor, bem como um sinal que varia no tempo, conforme se acelera ou desacelera o motor, conforme ele normalmente oscila as rotações, entre outros aspectos. Em resumo, o sinal real não é igual ao teórico, e difícil de simular sem que seja no ambiente real de uso, onde seria necessário o ajuste de ponto real de cruzamento por zero do sinal, bem como a sua histerese.

O circuito de saída, ou acionamento de leds, não teve problemas de funcionamento após teste do tipo liga/desliga com chaves alimentadas com tensões de 5V. Ele é um circuito necessário para evitar a sobrecorrente nas portas do microncontrolador e cumpre seu papel.

5.4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados foram satisfatórios de forma geral. O ambiente de utilização ocasionará alguns imprevistos, gerando alguns problemas, entretanto. Porém, como os circuitos são de cunho didático e não comercial, pode-se dizer que suprem o hardware necessário para a confecção de um protótipo de uma injeção eletrônica propriamente dita.

6 O SOFTWARE

Neste capítulo do trabalho será demonstrado o projeto do software da injeção eletrônica e, como no capítulo anterior, para facilitar a exposição das metodologias aplicadas, este capítulo será subdividido em partes, começando por um subcapítulo dedicado ao microcontrolador, seguindo na seqüência um sobre o ambiente de programação, outro sobre a linguagem de programação, depois sobre a programação do microcontrolador. Os subcapítulos seguintes serão sobre a definição de software para a injeção eletrônica programável para automóveis, com suas características gerais, variáveis envolvidas, cálculos, entradas/saídas, etc., depois o fluxograma do programa, a criação de programa de teste para operação em conjunto das placas e, por final, a análise dos resultados obtidos.

6.1 O MICROCONTROLADOR

O microcontrolador escolhido disponibiliza recursos computacionais dos mais diversos. Um estudo sobre ele é extremamente necessário antes de começar qualquer programa. Muitas vezes o microcontrolador oferece recursos de forma diferente do esperado, e isto só pode ser visto após o estudo do seu manual. Conhecer os recursos apresentados anteriormente no capítulo 3 é importante para começar a projetar o software, bem como as características elétricas do mesmo. Informações sobre o mesmo são extensas demais para colocar aqui, portanto sugere-se olhar a bibliografia, contendo o link de seu manual na internet.

6.2 O AMBIENTE DE PROGRAMAÇÃO

O ambiente de programação também possui manual, conforme link na bibliografia. Seu uso é cheio de detalhes, principalmente pelo fato de desejar programar usando a linguagem C, o que faz com que o programa precise encontrar arquivos necessários à sua compilação, bem como a fazer suas configurações.

A Figura 35 a seguir mostra o ambiente de programação da Microchip, o MPLAB IDE, sendo utilizado.

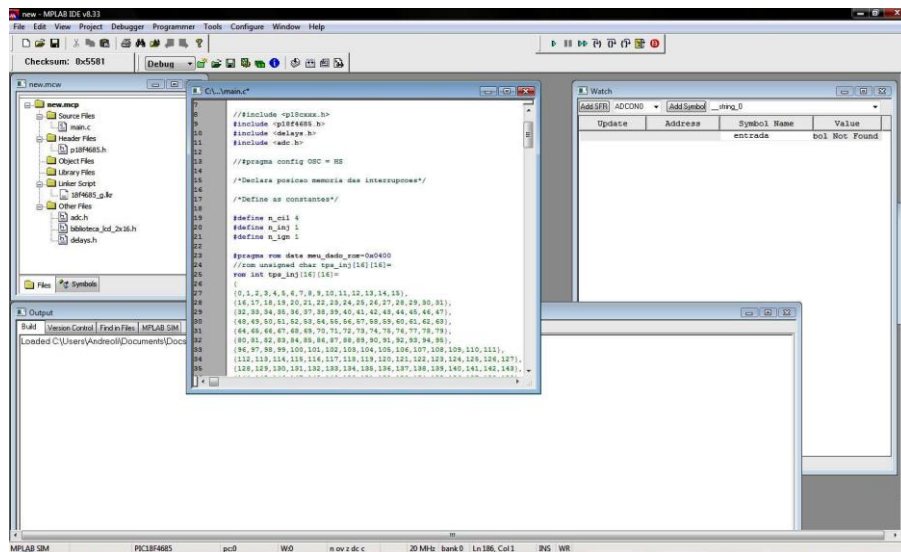


Figura 35: software MPLAB IDE.

6.3 A LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO

A linguagem de programação escolhida foi o C, pois é linguagem de mais alto nível do que o Assembly, facilitando a programação em relação à sua compreensão, já que será necessário antes começar a programar, estudá-la e aprendê-la muito melhor. Um aspecto bom é de que esta linguagem possui vasta bibliografia disponível inclusive na internet, além de

livros especializados, bem como possibilita em alguns casos a discussão corrente em fóruns especializados de aficionados por programação sobre algumas rotinas básicas, visto que as especializadas de uma injeção eletrônica são mais difíceis de serem encontradas. Porém, na bibliografia existe o *link* do site do fórum da Megasquirt, o qual contém muita informação a respeito de tal injeção eletrônica e pode fornecer diversas idéias ao projetista que está começando a programar sua injeção eletrônica, como é o caso aqui. A linguagem C é essencial para criação de códigos complexos e extensos, porém o uso de Assembly dentro do mesmo programa é comum e deverá ser necessário, por exemplo, no tratamento de interrupções, pois elas devem ser executadas o mais rápido possível. Quando uma linguagem como o C é compilada após ter “*linkadas*” suas diversas bibliotecas, existe um código em Assembly gerado que é, por muitas vezes, bem maior do que o código correspondente se feito diretamente em Assembly. Portanto, é essencial saber que, apesar de otimizados, os códigos em C consomem mais memória de programa e mais tempo para serem executados, pelos seus maiores tamanhos.

6.4 PROGRAMANDO O MICROCONTROLADOR

O primeiro passo para começar a programar foi dado quando foi feito um estudo em rotinas de programas existentes diversos, com rotinas básicas comuns a diversas aplicações. O segundo passo foi testar a adição de diversas bibliotecas ao programa original e utilização de seus recursos.

O teste do programa foi feito utilizando-se o simulador do ambiente de programação, este sendo utilizado constantemente à medida que os erros apareciam. A opção de ajuda do ambiente de programação soluciona diversos erros existentes inclusive.

O primeiro programa de teste propriamente dito foi para acionar leds utilizando-se a rotina de atrasos, chamada “*delays*”, e seu teste foi feito ligando-se um pino configurado como saída do microcontrolador na placa de saída.

Funcionado o teste, seguiu-se diretamente para a criação de um rotina de leitura de valores analógicos de tensão. Um potenciômetro ligado a uma fonte foi utilizado e acendeu os leds da placa de saída sequencialmente conforme a tensão foi aumentada, divididos em faixas de tensão.

Também obtido sucesso no teste, foi testada uma rotina de interrupção do microcontrolador, no qual o programa parava de rodar e acendia um led da placa de saída sempre que o botão era acionado, e não mais saía dali o programa, entrando em “*looping*”.

Diversas opções de teste são possíveis, porém foram executadas as mais simples imaginadas no momento de suas criações.

Feitas outras rotinas, estas testadas muitas vezes somente via simulador, partiu-se para a rotina de criação da escrita no display de LCD, obtendo-se sucesso. Acreditou-se ser o momento de partir para o próximo estágio de desenvolvimento de software, que era definir o software da injeção eletrônica propriamente dita.

Abaixo a Figura 36 do circuito de teste do display no microcontrolador.

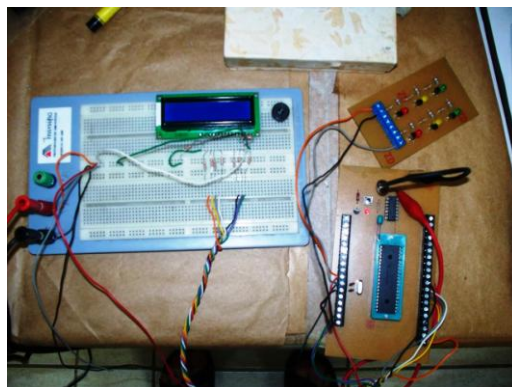


Figura 36: circuito de teste do display LCD.

6.5 DEFININDO O SOFTWARE PARA A INJEÇÃO ELETRÔNICA PROGRAMÁVEL

Antes de começar a programar, é necessário levantar algumas características gerais de injeções eletrônicas, para se ter uma base teórica inicial, mesmo que não seja possível a programação semelhante. Algumas idéias podem ser simplificadas, outras são essenciais e esta análise deve ser feita.

6.5.1 Características gerais de um programa de injeção eletrônica

Uma característica do programa é que ele trabalha com constantes armazenadas na memória de programa e na memória de dados, sendo a memória de programa não volátil, ou seja, desligando-se o motor ela não se apaga. Portanto, suas constantes necessárias para a injeção eletrônica saber as informações do motor, como, por exemplo, número de cilindros, número de bicos injetores, número de bobinas de ignição, rotação máxima, rotação de marcha lenta, entre outros, são armazenadas nela. Aqui se destaca uma parte essencial do programa de uma injeção eletrônica: a utilização de mapas de injeção de combustível e de ponto de ignição.

Falando primeiramente dos mapas de injeção de combustível, é essencial explicar como eles funcionam. São montadas tabelas de duas ou três dimensões, que são chamadas de mapas. Elas representam os valores base para começarem os cálculos de quanto combustível será necessário injetar no motor em determinada rotação e sob determinada carga – aí se tem o uso indireto da medida de pressão no coletor de admissão, simplesmente partindo-se do valor base do cruzamento de dados analisados da tabela. Por exemplo, para determinada carga a determinada rotação, como um carro subindo uma estrada íngreme em alto giro de motor, a

quantidade percentual de combustível na tabela é maior do que a quando o mesmo carro está em baixo giro descendo uma estrada, ou parado em um sinal de trânsito.

Abaixo a Figura 37 mostra uma tabela típica mencionada anteriormente.

Col	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	B11	B12	B13
mBar	134	220	306	420	592	764	879	937	994				-44
psi										0.6	3.3	7.9	
0	23	138	210	273	352	422	503	549	618	682	795	932	1040
600	23	138	210	273	352	422	503	549	618	682	795	932	1040
1000	23	138	210	273	352	422	503	549	618	682	795	932	1040
1500	23	138	224	308	386	468	517	559	624	694	800	937	1079
2025	23	138	210	273	352	422	503	549	618	682	795	932	1040
2500	34	153	218	284	364	445	525	567	640	716	835	960	1092
2975	48	165	225	298	386	470	547	585	660	728	840	1000	1112
3525	12	138	210	284	368	450	539	579	653	728	820	972	1092
4000	23	153	225	303	384	472	556	612	686	765	875	1024	1164
4525	34	174	243	348	438	525	608	657	738	818	930	1058	1196
4750	52	165	249	338	426	510	622	675	754	840	945	1081	1224
5000	52	180	278	345	420	520	648	696	763	874	990	1121	1274
5250	59	204	292	329	428	515	639	723	800	900	1010	1158	1328
5475	64	209	291	329	428	518	636	726	812	899	1005	1159	1339
6025	59	206	292	354	438	502	671	714	800	878	1005	1121	1313
6500	38	221	333	378	438	510	674	726	816	900	995	1116	1300
7025	36	213	315	369	450	510	674	726	816	911	1045	1167	1339
7500	36	212	315	362	440	510	674	726	816	911	1045	1167	1339
8025	36	214	318	394	478	555	674	726	816	911	1045	1167	1339
8950	36	212	314	422	510	595	674	726	816	911	1045	1167	1339

Figura 37: Interface do software Hondadata. (HARTMAN, 2003)

Abaixo a Figura 38 mostra a representação em três dimensões de uma tabela, gerando o mapa de injeção de combustível. Os eixos são: rotação (RPM), pressão do coletor de admissão ou MAP (bar) e quantidade a ser injetada de combustível (%). A tabela de entrada de dados pelo usuário encontra-se na parte inferior da Figura 38.

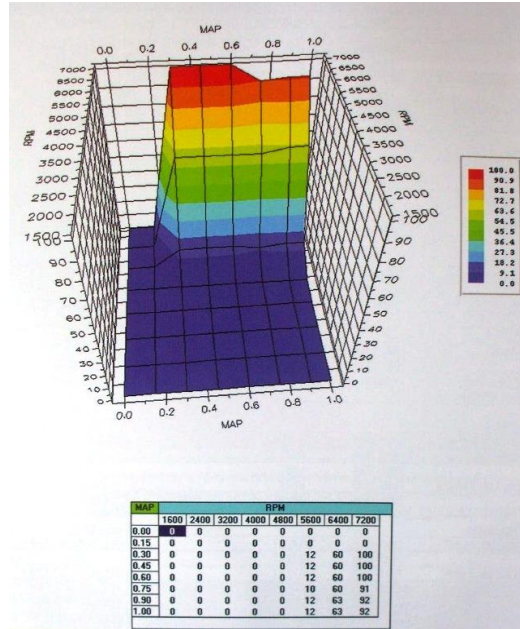


Figura 38: Interface do software Freescan. (HARTMAN, 2003)

As rotinas devem conter tratamento de interrupções, uso de temporizadores, de PWM, de contadores, cálculos aritméticos, leitura e escrita em tabelas, leitura de sinais digitais e analógicos, tratamento de erros, escrita no LCD, acionamento dos circuitos de saída, entre outros aspectos.

Um motor precisa saber as condições de contorno antes mesmo de começar a funcionar, quando se está prestes a dar arranque. Rotinas de teste de bicos injetores e demais partes do sistema são comuns, portanto.

Enquanto é dado o arranque, os sinais dos sensores já devem ser lidos e o momento de acionar os bicos injetores, com a quantidade calculada correspondente, bem como de dar a centelha, deve ser calculado e executado.

Assim que o motor arranca, ele deve ser mantido em rotação de marcha lenta, passando por uma rotina de aquecimento do motor, até que atinja sua temperatura ideal de funcionamento. É necessária, portanto, a criação de tal rotina, que é responsável por calcular o

combustível extra necessário para manter o carro em correto funcionamento durante tal momento. Os parâmetros de ignição também devem ser calculados.

Assim que atingida a temperatura ideal de funcionamento, o motor está apto a funcionar em outra rotina, a rotina normal, mantendo-se em marcha lenta, no aguardo de uma requisição por parte do usuário.

Quando requisitada uma aceleração, após a leitura do sensor de posição de borboleta do acelerador, entra em ação outra rotina, a de aceleração. Os cálculos são feitos com o acréscimo de um fator de aceleração, para que a quantidade de combustível injetado seja maior e o motor acelere propriamente, sem esquecer dos cálculos relacionados à ignição.

Ainda existem outras rotinas, como as de corte de combustível quando necessário, a de correção de mistura por medida de sonda lambda, acionamento de outros periféricos, comunicação com algum equipamento, etc.

Todas devem trabalhar em conjunto visando o essencial: combustível em quantidade correta com ponto de ignição adequado. Obviamente, cabe ao programador definir o que é essencial e adequado para cada motor e para cada aplicação.

6.5.2 Fluxograma do programa

Aqui será apresentado um fluxograma básico do programa, não entrando em detalhes muito específicos de funcionamento para proporcionar, inclusive, futuros estudos na área relacionada.

Na seqüência, na Figura 39, é apresentado o fluxograma básico do programa criado para a injeção eletrônica prototipada.

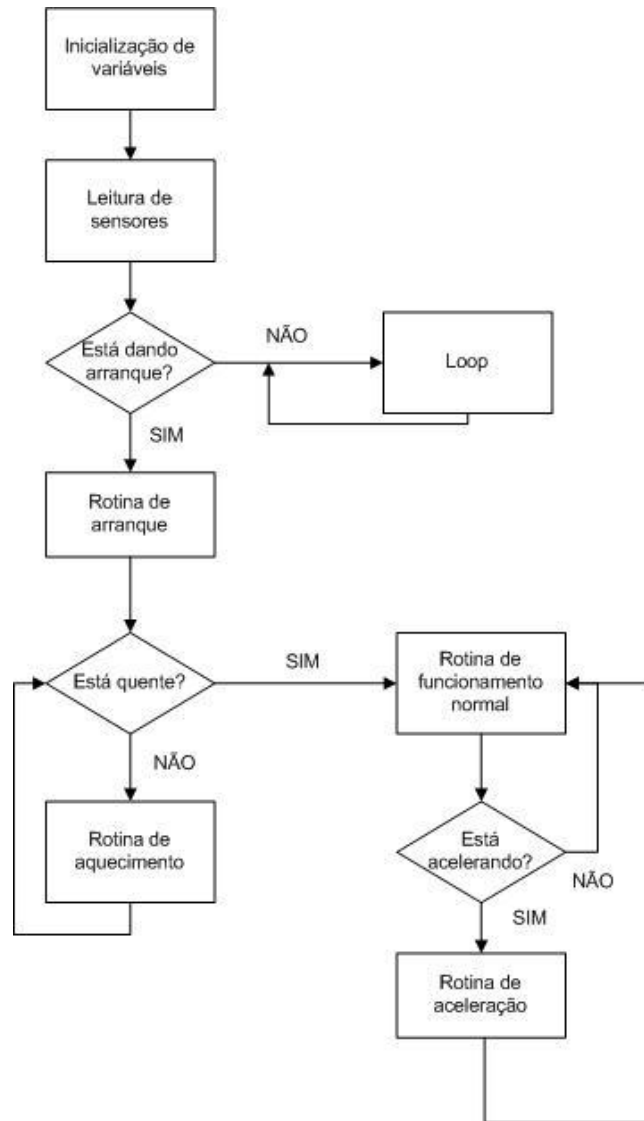


Figura 39: fluxograma básico do programa.

6.5.3 Criando o programa de teste para operação em conjunto com as placas

Após muitas dificuldades, muito estudo e muitos testes anteriores, o programa básico de teste que une todas as funcionalidades da injeção eletrônica programável em conjunto com a parte de hardware foi criado, porém cabe lembrar aqui que o universo de possibilidades de programação é considerado “infinito” por muitos programadores. Sendo assim, mesmo pronto um programa, sempre há mudanças a serem feitas, o que fará parte de um estudo futuro.

6.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos foram satisfatórios em termos de criação das rotinas, do estudo dos cálculos necessários e das possibilidades envolvidas. Diversas rotinas foram criadas e simuladas sozinhas e em conjunto, no ambiente de programação. Porém, devido ao pouco tempo hábil, não foi possível realizar todos testes desejados até o momento de entrega deste relatório.

A injeção eletrônica prototipada atende os requisitos de efetuar cálculos baseados nas medidas lidas e aciona os bicos injetores e a bobina de ignição, porém a definição de quais valores são desejados, como criação de mapas de injeção de combustível, por exemplo, baseados em valores reais não foi possível. Seria necessário, também, mais algum tempo para instalar a injeção eletrônica em um automóvel, validando o funcionamento da mesma, pois a diferença de operação em bancada é grande em relação à operação real.

Abaixo a Figura 40 mostra o projeto em totalidade, pronto para maiores testes e aprimoramentos, porém sem as ligações necessárias devido ao momento da foto.

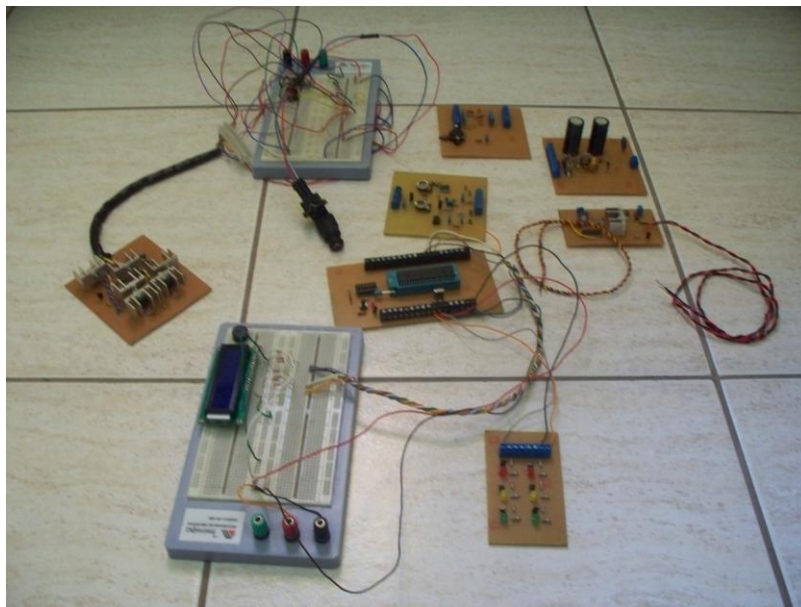


Figura 40: circuitos projetados da injeção eletrônica.

7 CONCLUSÃO

O trabalho foi muito maior em relação ao esperado antes de começá-lo, visto que foi necessário estudar diferentes áreas técnicas, inclusive da engenharia mecânica, passando por áreas como microcontroladores e eletrônica analógica, bem como a área de circuitos elétricos, entre outras. Neste quesito o trabalho conseguiu atingir seu objetivo. A forma com que foi exposto este trabalho é da mais didática possível, atingindo também um objetivo proposto inicialmente.

Em respeito ao protótipo em si, acredito que ele cumpre com o objetivo de ser um protótipo: confeccionado diretamente de projetos isolados, serve como base para desenvolvimento de novas tecnologias, mas não é um produto ainda. Apesar de não ter todas funções possíveis implementadas e exaustivamente testadas, trata-se de um protótipo feito em muito pouco tempo hábil, ao mesmo tempo que fornece condições plenas de desenvolvimento. Com mais tempo além dos apenas quatro meses utilizados, e disponibilizando de uma maior estrutura, os resultados poderiam ser ainda melhores, dando mais ênfase ao aprimoramento do protótipo em si do que ao detalhamento do trabalho feito, como é o caso deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Como sugestão para trabalhos futuros, ou para desenvolver uma injeção eletrônica comercial, seria necessário um aprimoramento no software, bem como a confecção e montagem de uma placa única, de forma industrial e não artesanal, computando-se inclusive os novos custos relacionados. Os testes deveriam ser feitos em ambiente automotivo, ou seja, em condições reais de uso, onde surgiriam diversos outros problemas e, após eles, suas soluções que alterariam o protótipo.

As melhorias seriam diversas, mas destaca-se a comunicação com um computador, a leitura e gravação de dados em um cartão de memória, para análise em ambiente de software externo, como planilhas ou programas específicos, a comunicação via protocolos variados,

entre outros aspectos como voltar seu desenvolvimento em direção à obtenção de maior desempenho do veículo. Seguindo a linha crescente do mercado que oferece como benefícios do uso de seus equipamentos a maior potência, menor consumo, maior segurança, etc, seria interessante aprimorar o software propriamente, principalmente na parte de cálculos e procedimentos de medidas, tendo em vista as necessidades reais de um veículo em funcionamento e o melhor desempenho possível, que é sempre almejado.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRD, Forbes. Bosch Fuel Injection Systems. HPBooks, 2001.

BEER, A., CYPRA, A. Ignition. Robert Bosch GmbH, Automotive Equipment Business Sector, 1999.

BOSCH, Robert. Manual de Tecnologia Automotiva. Editora Edgard Blücher, 2005.

FERNANDEZ, Breno Ortega. Considerações sobre outros empregos do sensor de detonação para o controle eletrônico de motores Ciclo Otto utilizando análise espectral. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.

HARTMAN, Jeff. How to Tune and Modify Engine Management Systems. Motorbooks, 2003.

HEYWOOD, John B. Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill, 1988.

KOSIK, Richard Bohuslav. Digital Ignition & Electronic Fuel Injection. Trabalho (Bacharelado) – Divisão de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Universidade de Queensland, 2000.

MEGASQUIRT. Disponível em: <<http://www.msefi.com/index.php>>. Acesso em: 08 dez. 2009.

MICROCHIP. Disponível em: <<http://www.microchip.com>>. Acesso em: 08 dez. 2009.

PASSARINI, L.C. Projeto e análise de válvulas eletromagnéticas injetoras de combustível: uma nova proposta. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1993.

RIBBENS, William B. Understanding Automotive Electronics. Butterworth-Heinemann, 1998.

WILDNER, Fabiano Disconzi. Estudo Experimental da Variação de Velocidade de Combustão para Diferentes Combustíveis, Relações de Mistura e Relações de Compressão em um motor ASTM CFR. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.