



**FUNDAÇÃO
UNIVERSIDADE
FEDERAL DE
MATO GROSSO DO SUL**

**FACULDADE DE ENGENHARIAS,
ARQUITETURA E URBANISMO E
GEOGRAFIA**

ENGENHARIA ELÉTRICA

APRIMORAMENTO DO SISTEMA ELETRÔNICO DE INJEÇÃO PARA MOTORES CICLO OTTO

Gleidson Thiaky de Aguiar Kumagai

**Campo Grande MS
15 de agosto de 2022**



**FUNDAÇÃO
UNIVERSIDADE
FEDERAL DE
MATO GROSSO DO SUL**

**FACULDADE DE ENGENHARIAS,
ARQUITETURA E URBANISMO E
GEOGRAFIA**

ENGENHARIA ELÉTRICA

APRIMORAMENTO DO SISTEMA ELETRÔNICO DE INJEÇÃO PARA MOTORES CICLO OTTO

Gleidson Thiaky de Aguiar Kumagai

Orientador: Professor Doutor Raymundo Cordero García

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal
de Mato Grosso do Sul na Faculdade
de Engenharias, Arquitetura e
Urbanismo e Geografia, como
requisito parcial para obtenção do
título de Engenheiro Eletricista.

Campo Grande MS
15 de agosto de 2022



Serviço Público Federal
Ministério da Educação

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

No dia 12 de julho de 2022, às 8:30, no BATLAB, o acadêmico **Gleidson Thiaky de Aguiar Kumagai**, RGA nº 2016.2103.059-8, defendeu em sessão pública o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: "**Aprimoramento do sistema eletrônico de injeção para motores ciclo Otto**".

A seguinte Comissão Avaliadora se reuniu para a avaliação do trabalho:

Prof. Dr. Raymundo Cordero García (Orientador)
(Universidade Federal de Mato Grosso do Sul)

Prof. Dr. Luigi Galotto Junior
(Universidade Federal de Mato Grosso do Sul)

Me. Thyago Vasconcelos Estrabis
(Membro Externo - Doutorando - Universidade Federal do Rio de Janeiro)

Tendo sido considerado:

☒ **Aprovado** ☐ **Aprovado com restrições** ☐ **Reprovado**

Observações da banca (em caso de restrições ou de reprovação):

Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica (FAENG/UFMS):

Ciente,

Prof. Dr. Jurandir de Oliveira Soares
Coordenador de curso



Documento assinado eletronicamente por **Raymundo Cordero Garcia**, **Professor do Magisterio Superior**, em 12/07/2022, às 11:08, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luigi Galotto Junior**, **Professor do Magisterio Superior**, em 12/07/2022, às 11:09, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Thyago Vasconcelos Estrabis**, **Usuário Externo**, em 12/07/2022, às 11:09, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3402785** e o código CRC **139677DA**.

FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA

Av Costa e Silva, s/nº - Cidade Universitária

Fone:

CEP 79070-900 - Campo Grande - MS

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me permitir ter saúde e determinação e ter a família que possuo.

Agradeço imensamente aos meus pais pelo apoio dado nesses anos todos, pela paciência e por entenderem que a educação é importante. Sem eles, nada disso seria possível.

Agradeço a minha esposa Meire pelo apoio e compreensão. Agradecimento às minhas filhas Lara e Clara pelo carinho e admiração.

Agradeço a todos os professores pelo importante papel na batalha diária por uma sociedade melhor.

Agradeço ao meu orientador, prof. Dr. Raymundo Cordero García pelo apoio e paciência durante o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço a instituição de ensino UFMS pela oportunidade de cursar o curso de engenharia elétrica.

RESUMO

A operação eficiente do sistema de injeção de combustível é um fator importante para reduzir o consumo de combustível e diminuir os poluentes produzidos por um veículo com motor de combustão ciclo Otto. Este trabalho tem por objetivo a elaboração de um *hardware* aprimorado para uso em conjunto com *firmware* do tipo *open source* para o controle do sistema de injeção programável. Dentre as vantagens alcançadas, destacam-se a grande quantidade de recursos de controle oferecidos pelo relativo baixo custo, a fácil instalação por ser um produto finalizado pronto para uso, redução das dimensões da PCB, fácil e rápida construção, robustez e imunidade à ruídos aprimorados em relação ao design padrão da plataforma. Um estudo teórico dos processos que envolvem a combustão nos motores automotivos de ciclo Otto é realizado, assim como o estudo teórico dos sinais dos sensores e atuadores que compõem o sistema. Utilizando o software Kicad foi desenvolvido um circuito de controle aprimorado, com base no circuito original, para a elaboração de um novo *layout* da PCB. Para colocar em funcionamento o projeto finalizado, utilizou-se as ferramentas da própria plataforma escolhida, instalando o *firmware* no microcontrolador e criando um novo projeto no *software* da injeção programável. Realizou-se testes em bancada utilizando um simulador de roda fônica gravado em um Arduino, testando as entradas e saídas do hardware para diversos pontos de operação. Por fim, o projeto desenvolvido mostrou grande potencial de superar a impressão de difícil implementação e complexidade que a plataforma causa. Mostrou também potencial comercial, por ser um produto finalizado, com bastante recursos e de baixo custo.

Palavras-chaves: controle de motores à combustão; injeção eletrônica; sensores e atuadores automotivos; layout de placas eletrônicas; circuitos eletrônicos.

ABSTRACT

Efficient operation of the fuel injection system is an important factor to reduce fuel consumption and decrease pollutants produced by a vehicle with Otto cycle combustion engine. This work aims to develop an improved hardware that operate with an open-source firmware for the control of a programmable injection system. The great amount of control resources offered by the relative low cost, easy installation as it is a ready-to-use finished product, reduced PCB dimensions, easy and fast construction, robustness, and noise immunity improved over the standard platform design are the most important achieved benefits. A theoretical study of processes involving combustion in Otto cycle automotive engines is carried out, as well as the theoretical study of the signals from the sensors and actuators that compose the system. Using Kicad software, an improved circuit of control, based on the original circuit, was developed, for the elaboration of a new PCB layout. To put the finished project into operation, we used the tools of the chosen platform, installing the firmware on the microcontroller and creating a new project in the programmable injection software. Bench tests were performed using a trigger wheel simulator recorded in an Arduino, testing the hardware inputs and outputs for various points of operation. Finally, the project developed shown great potential to overcome the problems such as difficult implementation and complexity. The developed hardware also has commercial potential, as it is a finished product, with a lot of resources and low cost.

Keywords: combustion engine control; electronic fuel injection; automotive sensors and actuators; layout of electronic boards; electronic circuits.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Motor de combustão externa (esquerda) e motor de combustão interna (direita).	19
Figura 2 – Motor de combustão interna volumétrico (esquerda) e MCI dinâmico (direita).	19
Figura 3 – Ciclo do motor alternativo a quatro tempos e ignição por faísca.	22
Figura 4 – Ciclo do motor alternativo a dois tempos e ignição por faísca.	23
Figura 5 – Representação esquemática da combustão normal.	26
Figura 6 – Variação de pressão na região da combustão	26
Figura 7 – Faísca adiantada, atrasada e ideal, respectivamente.	27
Figura 8 – Variação do torque, consumo e concentração de HC, CO e NOx com a variação da mistura ar/combustível.	31
Figura 9 – Variação do torque, consumo e concentração de HC e NOx com a variação do ponto de ignição.	33
Figura 10 – Conversor catalítico de oxidação. Eficiência de conversão pela temperatura.	34
Figura 11 – Eficiência de conversão de um TWC pela mistura ar/combustível.	34
Figura 12 – Processamento de sinais na ECU.	36
Figura 13 – Representação do sistema de controle do motor.	37
Figura 14 – Exemplo de uma configuração de sensor MAP.	38
Figura 15 – Exemplo de circuito de um transdutor MAP.	39
Figura 16 – Exemplo de sensor de rotação do tipo indutivo e roda fônica.	41
Figura 17 – Sensor de efeito Hall.	42
Figura 18 – Efeito hall, princípios da voltagem hall.	43
Figura 19 – Circuito típico de um sensor Hall <i>switch</i>	43
Figura 20 – Sensor de temperatura Bosch NTC M12. Curva resistência x temperatura.	45
Figura 21 – Sensor de posição da borboleta.	47
Figura 22 – Ilustração de um sensor EGO.	48
Figura 23 – Tensão de saída do sensor vs lambda.	48
Figura 24 – Tensão no terminal do injetor.	50
Figura 25 – Circuito simplificado do sistema de ignição eletrônica.	50

Figura 26 – Tela inicial do software TunerStudio com firmware speeduino carregado.	54
Figura 27 – Ferramenta para gravação do firmware e demais arquivos necessários.	55
Figura 28 – Placa padrão Speeduino V0.4.3b. Vista superior e inferior.	56
Figura 29 – Aplicativos para Android. RealDash à esquerda e MSDroid à direita.	56
Figura 30 – Comparativo entre Arduino Mega PRO e Arduino Mega 2560 clássico.	59
Figura 31 – Circuito completo da fonte de alimentação.	60
Figura 32 – Entradas analógicas TPS, O ₂ , Aux ₁ e Aux ₂ .	62
Figura 33 – Filtro passa-baixas RC.	62
Figura 34 – Circuito dos sensores de temperatura.	64
Figura 35 – Circuito do sensor MAP integrado.	64
Figura 36 – Diagrama de bloco MAX9926.	66
Figura 37 – Circuito típico para o modo de operação A2.	67
Figura 38 – Circuito condicionador de sinal para sensor de relutância variável.	67
Figura 39 – MC33810. Diagrama de aplicação simplificado.	68
Figura 40 – Saída de potência para injetores.	70
Figura 41 – Mosfets de potência das saídas dos atuadores	70
Figura 42 – Circuito das saídas de ignição com driver TC4424.	71
Figura 43 – Circuito das saídas do tacômetro, eletroventilador e bomba temporizada, respectivamente.	72
Figura 44 – Layout da PCB simulação em 3D. Face superior (à esquerda) e inferior (à direita).	74
Figura 45 – Placas nas cores branco e preto. Vista da face superior (acima) e vista da face inferior (abaixo).	75
Figura 46 – Placa branca montada.	75
Figura 47 – Placa preta montada.	76
Figura 48 – Montagem na case. Vista inferior.	76
Figura 49 – ECU finalizada montada em case com chicote padrão automotivo.	77
Figura 50 – Produto final com chicote personalizado e cabo blindado no sinal de rotação.	77
Figura 51 – Gravando o firmware com speedyloader.	78
Figura 52 – Iniciando novo projeto no TunerStudio.	78

Figura 53 – Calibração dos sensores.....	79
Figura 54 – Configurações iniciais do projeto.....	79
Figura 55 – Programa simulador de sinal de rotação (Ardu-Stim).....	80
Figura 56 – Bancada de testes para simulação dos sinais dos sensores.	80
Figura 57 – ECU rodando a 2000 RPM com simulador de roda fônica.	81
Figura 58 – Mapas de injeção, ignição e AFR em um ponto de operação do motor.	82
Figura 59 – Comparativo das PCB's. Speeduino padrão (à esquerda) e novo hardware (à direita). Comparativo de altura (abaixo).	83
Figura 60 – Comparativo entre o speeduino com case genérica (acima) e o novo hardware (abaixo).	84

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Diferenças entre injeção programável e injeção original	13
1.2	Injeção programável do tipo open source	15
1.3	Objetivos	15
1.3.1	Objetivos gerais.....	16
1.3.2	Objetivos específicos.....	16
1.4	Organização dos capítulos	16
1.5	Considerações finais	17
2	MOTOR CICLO OTTO - CLASSIFICAÇÃO E PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO	18
2.1	Classificação das máquinas térmicas	18
2.2	Classificação dos motores alternativos	20
2.2.1	Classificação quanto à ignição	20
2.2.1.1	<i>Motor de ignição por faísca ou Otto.....</i>	<i>20</i>
2.2.1.2	<i>Motor de ignição espontânea ou motor a Diesel</i>	<i>21</i>
2.2.2	Classificação quanto ao número de tempos.....	21
2.2.2.1	<i>Motores alternativos a quatro tempos e ignição por faísca.....</i>	<i>21</i>
2.2.2.2	<i>Motores alternativos a dois tempos e ignição por faísca</i>	<i>22</i>
2.2.3	Outras classificações.....	24
2.3	Emissão de poluentes	24
2.4	A combustão nos motores Otto	25
2.5	Calibração e mapeamento do motor	27
2.6	A mistura de ar e combustível	28
2.6.1	Definição da relação ar/combustível.....	28
2.6.2	Definição de relação ar/combustível estequiométrica	29
2.6.3	Definição do fator lambda.....	30
2.6.4	Tipos de mistura quanto ao comportamento do motor	30
2.7	Efeito da mistura ar/combustível no desempenho e na emissão de poluentes	31
2.8	Efeito do ponto de ignição no desempenho e na emissão de poluentes	32

2.9	Conversor catalítico	33
2.10	Considerações finais	35
3	SISTEMAS DE INJEÇÃO DE COMBUSTÍVEL	36
3.1	Módulo de controle	36
3.2	Sensores	37
3.2.1	Sensores de pressão.....	37
3.2.1.1	<i>Strain gauge MAP sensor.....</i>	<i>38</i>
3.2.2	Sensor de Rotação.....	40
3.2.2.1	<i>Sensor de relutância variável (VR)</i>	<i>41</i>
3.2.2.2	<i>Sensor HALL</i>	<i>42</i>
3.2.3	Sensor de fase	44
3.2.4	Sensores de temperatura.....	45
3.2.5	Sensor de posição da borboleta.....	46
3.2.6	Sensor de oxigênio.....	47
3.3	Atuadores principais.....	49
3.3.1	Injetor de combustível	49
3.3.2	Sistemas de ignição	50
3.4	Considerações finais	51
4	METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO	52
4.1	Sistema de gerenciamento de motores speeduino	52
4.1.1	Características do speeduino	53
4.1.2	Ferramentas para utilizar o speeduino	53
4.2	Motivação para o desenvolvimento de um novo layout	56
4.3	Microcontrolador	59
4.4	Desenvolvimento dos circuitos de entrada e de condicionamento de sinais	59
4.4.1	Circuito da fonte	60
4.4.2	Filtros e proteções nas entradas analógicas	61
4.4.3	Entradas dos sensores de temperatura.....	63
4.4.4	Circuito do sensor MAP.....	64
4.4.5	Circuito do sensor de rotação e do sensor de fase (VR conditioner)	64
4.5	Desenvolvimento dos circuitos de saída	68
4.5.1	Saídas de potência para injetores e atuadores	68

4.5.2	Saídas de ignição	71
4.5.3	Saídas de baixa corrente para relês e acessórios.....	71
4.6	Desenvolvimento do layout da PCB	72
4.7	Considerações finais	73
5	RESULTADOS E TESTES DE FUNCIONAMENTO	74
5.1	Layout da PCB finalizado	74
5.2	ECU finalizada	74
5.3	Testes de funcionamento	78
5.4	Comparativo entre os dois sistemas	82
5.5	Considerações finais	84
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	85
	REFERÊNCIAS.....	87
	APÊNDICE A – DIAGRAMA DO CONECTOR PRINCIPAL.....	89
	APÊNDICE B – DIAGRAMA DE UMA INSTALAÇÃO GENÉRICA COMUM	
		90

1 INTRODUÇÃO

Na década de 60, fenômenos de fumaça (*smog*) fotoquímica foram primeiramente evidenciados na cidade de Los Angeles e posteriormente em outras grandes cidades americanas. A expressão *Smog* vem da junção das palavras *smoke* (fumaça) e *fog* (névoa) e surgia em certas épocas do ano em grandes centros urbanos com denso tráfego de veículos.

No ano de 1970 surgiram leis que restringiam os teores máximos dos poluentes emitidos nos gases de escape nos EUA. O *smog* estimulou uma maior consciência nacional sobre a questão da poluição do ar e passou a ser tratado como um problema sério e uma questão política. Atualmente, o efeito dos gases de escape é uma preocupação a nível internacional.

Visto que a questão ambiental é um assunto bastante extenso, que envolve diversas organizações mundiais, tratados e cada região pode ter seu próprio conjunto de legislações, um ponto importante é que ano após ano as leis de emissões foram ficando cada vez mais exigentes e mais complexas atuando principalmente no controle dos níveis de emissão dos gases considerados nocivos para o homem e o meio ambiente. No motor Otto procura-se controlar principalmente o monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos (HC), além de aldeídos emitidos pelo motor a etanol (BRUNETTI, 2012, v.2, p.142).

O monóxido de carbono (CO) pode causar intoxicação pois ao ser inalado se liga à hemoglobina prejudicando o transporte de oxigênio para os tecidos do corpo.

Hidrocarbonetos não queimados (HC) associados aos NO_x em contato com luz solar dão origem ao ozônio troposférico (O₃), principal causador do “smog” fotoquímico. O ozônio estratosférico é benéfico pois filtra as radiações ultravioletas, porém na superfície terrestre causa problemas respiratórios e diminuição das capacidades pulmonares (BRUNETTI, 2012, v.2, p.138).

A busca, pelas montadoras, por soluções eficientes que fazem reduzir ou apresentar menores índices de emissão de poluentes, ocorreu pelas exigências das leis de emissões em diferentes países. Assim, tecnologias foram surgindo e diferentes áreas nunca se desenvolveriam ou jamais teriam sido pensadas se tais obrigações não existissem.

O controle dos motores à combustão foi ficando cada vez mais difícil de ser realizado com as antigas soluções mecânicas. Com isso, a partir da década de 1980, houve a transição dos carburadores para os sistemas de injeção *port fuel* (PFI) que injeta o combustível mais próximo da válvula de admissão de cada cilindro. Esses sistemas utilizam eletroválvulas que são controladas eletronicamente e trouxe algumas vantagens como o aumento da potência e torque devido a melhor eficiência volumétrica, distribuição mais uniforme do combustível, resposta mais rápida do motor nas mudanças no acelerador e controle mais preciso da mistura ar/combustível (HEYWOOD, 2018).

Com o advento da tecnologia digital, fez com que acontecesse uma revolução nos sistemas de controle automotivos, permitindo assim, a utilização de estratégias mais complexas e eficazes, trazendo um sistema mais flexível quanto às misturas de combustível e dados de calibrações. Nos antigos sistemas, como no carburador e na injeção eletrônica analógica, a mudança de parâmetros de calibração envolvia ações no hardware. Já nos sistemas digitais os dados ficam armazenados na memória da unidade de controle e podem ser alterados atuando simplesmente no “*software*” (BRUNETTI, 2012, p.471).

A evolução das tecnologias digitais proporcionou também o surgimento de sistemas de gerenciamento de motores *aftermarket*, ou seja, do mercado de reposição. Os controladores eletrônicos deixaram de ser exclusividade das grandes montadoras e dos veículos originais e passaram a ser uma alternativa para quem busca atualizar um veículo mais antigo ou extrair mais desempenho nos veículos de competição.

O sistema de injeção é um dos sistemas mais importantes para garantir a eficiente utilização do combustível em um motor de ciclo Otto. Assim, é possível diminuir o consumo de combustível e a quantidade de gases poluentes. Na sequência, serão explicadas informações sobre tipos de sistemas de injeção. É importante destacar que, além da informação em projetos de injeção de código e hardware aberto (*open source*), os fabricantes geralmente não oferecem muita informação técnica detalhada sobre a estrutura dos sistemas de injeção que vendem (segredo industrial).

1.1 Diferenças entre injeção programável e injeção original

Um sistema de injeção eletrônica programável tem a capacidade de monitorar e controlar com um único módulo um motor de ciclo Otto sem a necessidade de comunicação com outros módulos originais de fábrica do veículo. Este tipo de sistema de injeção é compatível com uma grande variedade de motores automotivos (não inclui os motores diesel) e são ótimas para atualizar o controle de veículos antigos que utilizam carburadores e veículos de competição/pista. Sua instalação é relativamente simples e necessita apenas de alguns sensores e atuadores.

Visando economia de combustível e menores emissões de poluentes, as técnicas de gerenciamento e mapeamento da injeção de combustível e do sistema de ignição utilizadas nos veículos originais podem ser facilmente aplicadas através de ajustes no *software* e depois gravadas na memória da ECU. Técnicas que favorecem somente o desempenho também são possíveis.

Assim como afirma [Banish \(2009\)](#), os sistemas originais de fábrica são muito limitados em flexibilidade. Não se tem fácil acesso a todos os parâmetros de configuração e mapas de acerto. Um ajuste em torno das configurações originais pode ser perdido pela atuação automática das estratégias de correções presentes nas diversas camadas de programação da ECU de fábrica. Sem o total acesso e ou o entendimento de toda a complexidade desses sistemas, o acerto do motor fica muito difícil.

Os sistemas de injeção originais são concebidos de forma específica para atender aquele hardware específico e com uma calibração específica. Isso os torna quase inviáveis de se instalar em outro motor diferente ao que foram originalmente projetados. Além disso, nos veículos atuais o módulo de controle do motor trabalha em conjunto com outras unidades de controle, se comunicando e compartilhando informações de sensores e de diagnóstico, não sendo possível removê-las totalmente sem qualquer prejuízo no funcionamento geral do veículo.

Para isso as programáveis se tornam a melhor opção, seja em uma instalação padrão ou em instalação em paralelo com a ECU original. Nesse último tipo, a programável coleta informações de alguns sensores e atua nos injetores, em alguns atuadores e no sistema de ignição. Enquanto isso, a ECU original permanece instalada com todas as suas ligações (exceto atuadores).

1.2 Injeção programável do tipo *open source*

Apesar de trazer certas facilidades, as injeções programáveis de mercado podem custar muito caro. Quanto mais funcionalidades de controle, refino no *firmware* e melhor *hardware*, maior é o preço.

Como são feitas por empresas privadas, obviamente não se tem acesso aos processos de programação do *software*, do *firmware*, esquemáticos do *hardware*, nomenclatura de componentes, etc. Nesse aspecto, assim como as injeções originais de fábrica, as programáveis de mercado se tornam “caixas pretas”.

Nessa última década, surgiram algumas poucas iniciativas que resolveram essa questão. O speeduino por exemplo, que será explicado com mais detalhes posteriormente, foi criado para ser um sistema de gerenciamento de motores programável, totalmente aberto, de baixo custo e com avançados recursos de controle.

A comunidade speeduino oferece todo o suporte com acesso à documentação do código fonte, esquemático de um *hardware* base e ainda conta com ambientes que facilitam a proximidade e comunicação entre desenvolvedores, colaboradores e usuários. Assim, os entusiastas são livres para adquirir uma placa pronta, ou adquirir placa e componentes e realizar a montagem, ou até mesmo aplicar melhorias no *firmware* e desenvolver seu próprio *hardware* colaborando com aprimoramentos que contribuem com o sucesso dos projetos.

Embora apresente inúmeras vantagens, o speeduino possui algumas particularidades no *hardware* padrão. Como não é um produto finalizado pronto para uso, a implementação exige algumas adaptações que podem oferecer certa dificuldade na implementação nos projetos de alguns usuários.

Para resolver esse problema e mais alguns outros que serão apontados no capítulo 4, é necessário realizar um novo projeto da placa de circuitos, adotando soluções mais adequadas que trarão mais facilidade no uso e manuseio, agilidade na instalação, robustez, durabilidade, melhora na imunidade à ruídos e melhorias de alguns recursos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos gerais

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um *hardware* de uma injeção programável pronta para uso, com conector, chicote e case baseado em plataforma *open source*.

Para atingir tal objetivo, é necessário compreender o funcionamento básico da injeção eletrônica de um motor de ciclo Otto, compreender os sinais que envolvem os sensores e os atuadores e desenvolver um novo *hardware* no intuito de melhorar aspectos construtivos do *hardware* base.

Ao concluir espera-se obter um produto de rápida e fácil fabricação, de relativo baixo custo, fácil instalação e fácil manutenção.

1.3.2 Objetivos específicos

De forma a alcançar o objetivo geral desse *Trabalho de Conclusão de Curso*, foram estabelecidas as seguintes etapas a serem cumpridas:

- a) Estudo teórico dos processos que envolvem a combustão nos motores automotivos de ciclo Otto;
- b) Estudo teórico dos sensores e atuadores mais comuns utilizados nos sistemas com injeção eletrônica, com ênfase nos sinais característicos de cada um;
- c) Desenvolvimento aprimorado do esquemático completo da injeção eletrônica baseado no circuito base da plataforma;
- d) Desenvolvimento aprimorado do desenho (*layout*) da PCB;
- e) Realizar a montagem do protótipo e fazer testes de funcionamento utilizando as ferramentas da plataforma *open source* escolhida;
- f) Desenvolver documentação básica como diagramas de instalação e montagem para facilitação do uso;

1.4 Organização dos capítulos

No Capítulo 1, são apresentados os motivos que levaram à crescente evolução das tecnologias de controle dos motores de ciclo Otto. É estabelecido a importância

do tema de estudo. Definiu-se os problemas a serem tratados e os objetivos do trabalho.

No Capítulo 2, são apresentados as classificações e princípios de funcionamento dos motores à combustão, emissão de poluentes e estratégias de controle adotados para redução das emissões dos motores de ciclo Otto.

No Capítulo 3, são apresentados os sensores e atuadores mais comuns utilizados nos sistemas com injeção eletrônica, seus princípios de funcionamento e os sinais elétricos utilizados para leitura e acionamento de cada um deles.

No Capítulo 4, é apresentado o sistema proposto, abordando o projeto do circuito eletrônico, detalhando os circuitos de condicionamento de sinais e os circuitos de potência de saída e o projeto do desenho (*layout*) da PCB.

No Capítulo 5, são apresentadas as ferramentas para gravação de *firmware* no microcontrolador, a instalação do *software* e testes em bancada utilizando as ferramentas da própria plataforma *open source*.

No Capítulo 6, são apresentadas as conclusões finais a partir da análise do trabalho e as propostas para pesquisas futuras.

1.5 Considerações finais

Este capítulo abordou a motivação da indústria para criar novas tecnologias e alcançar menores índices de poluentes e melhor eficiência no gerenciamento dos motores à combustão. A constante evolução chegou ao mercado de reposição e posteriormente surgiram os projetos *open source*. Os objetivos do trabalho foram propostos. No capítulo 2 será apresentado os conceitos mecânicos e quais variáveis o sistema de controle deve atuar para o correto gerenciamento.

A redução do uso de combustíveis fósseis estimulou a produção e venda de veículos elétricos e híbridos. Porém, estes veículos ainda têm um alto custo. Por este motivo, a maior parte da população utiliza veículos de combustão ciclo Otto. Portanto, a eficiente operação do sistema de injeção ainda é um tema muito importante para a redução de poluentes e uso de combustíveis fósseis. Tal consideração justifica a importância do trabalho desenvolvido.

2 MOTOR CICLO OTTO - CLASSIFICAÇÃO E PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

Nesse capítulo será apresentado uma abordagem qualitativa nos processos químicos e mecânicos de um motor ciclo Otto. Indo desde suas classificações, funcionamento e definições até respostas das saídas em relação à variação das variáveis de entrada.

2.1 Classificação das máquinas térmicas

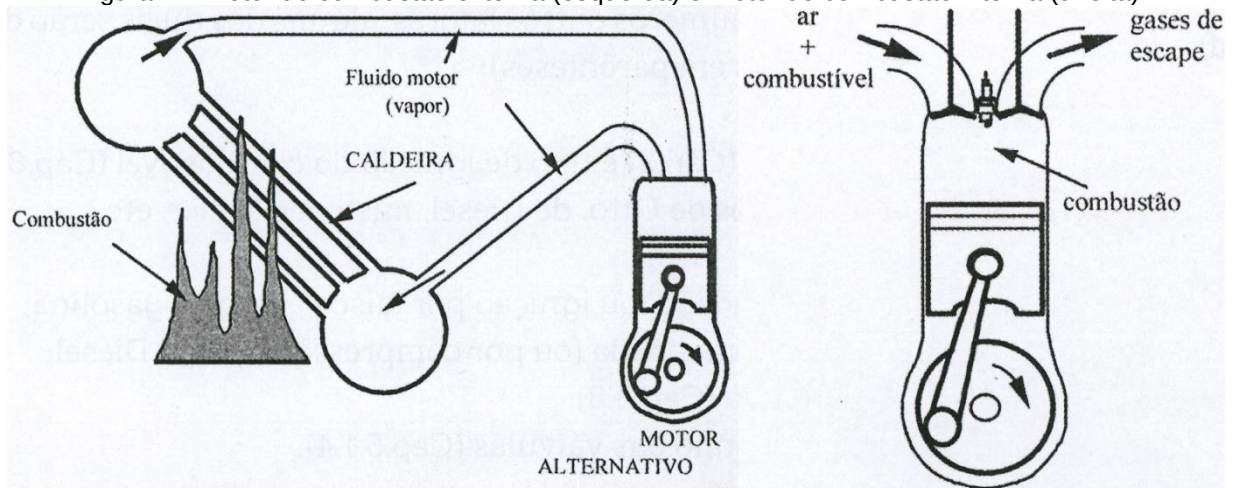
As máquinas térmicas são dispositivos que transformam energia térmica em energia mecânica. A energia térmica pode ser obtida através de combustíveis, vapor, energia elétrica, energia atômica, etc. Toda máquina térmica utiliza uma substância de trabalho, que no caso das máquinas a vapor é a água, tanto na forma líquida, quanto na forma de vapor e no caso automóveis é uma mistura de ar e combustível.

Para que a máquina térmica realize trabalho de forma contínua a substância de trabalho deve operar em ciclo, ou seja, uma série fechada de processos termodinâmicos chamados tempos ([HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009](#)).

A substância de trabalho também pode ser conhecida como fluido motor ou fluido ativo.

Com relação ao comportamento do fluido motor, as máquinas térmicas são classificadas em máquinas de combustão interna e máquinas de combustão externa. Nas máquinas de combustão externa o fluido motor não participa da combustão. Nesse caso, apenas servirá de veículo da energia térmica que será transformada em trabalho, exemplo uma turbina a vapor. Já no caso das máquinas de combustão interna o fluido motor participa diretamente da combustão. Tais características podem ser observadas na Figura 1.

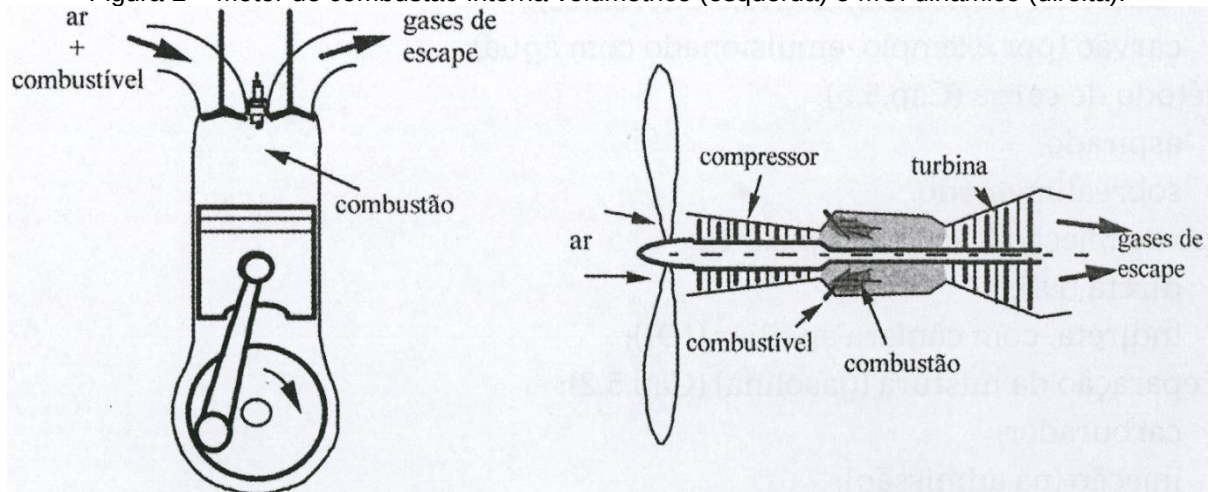
Figura 1 – Motor de combustão externa (esquerda) e motor de combustão interna (direita).



Fonte: (MARTINS, 2013, p.3)

O fluido motor oferece trabalho através de variações de pressão e volume criadas pelo fornecimento de calor. Se a cavidade onde isso ocorre possui volume variável, então a máquina é classificada como volumétrica. Nesse tipo de máquina o fluido motor ou fluido ativo possui fluxo pulsante. Já nas máquinas denominadas dinâmicas ou turbo-máquinas o fluido tem fluxo contínuo, com utilização de sua energia cinética passando através de pás com perfis aerodinâmicos. Essa energia cinética pode ser usada como energia mecânica através de um acoplamento no eixo da máquina, como acontece nas turbinas a gás e nas turbinas a vapor e pode ser usada sob a forma de impulso, como acontece nos motores a jato utilizados em aeronaves, conhecidos também por motores de reação. A Figura 2 apresenta exemplos de um motor volumétrico e um motor dinâmico.

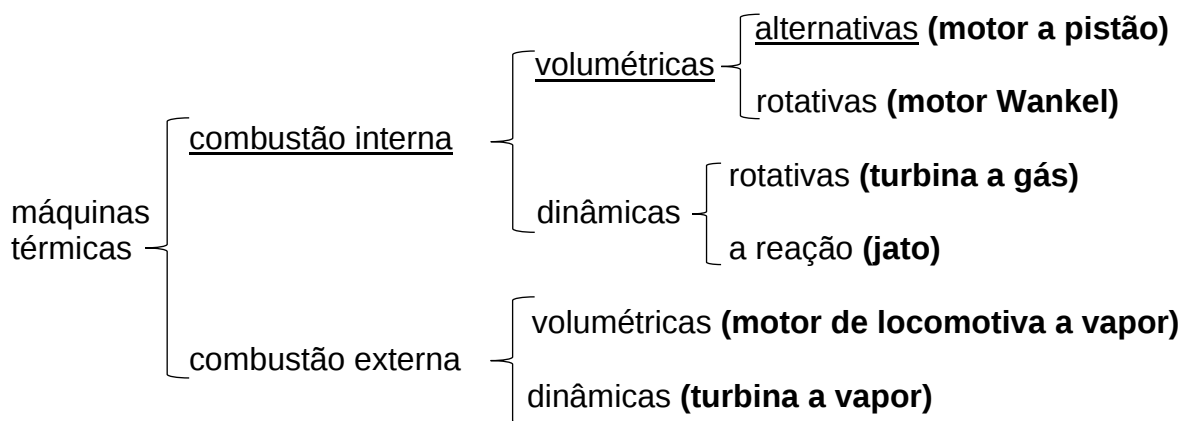
Figura 2 – Motor de combustão interna volumétrico (esquerda) e MCI dinâmico (direita).



Fonte: Adaptado de (MARTINS, 2013, p.3).

As máquinas volumétricas podem ser alternativas e rotativas. Nas máquinas alternativas uma característica marcante é a presença do sistema biela-manivela que transforma o movimento de vai e vem do pistão em rotação. Nas máquinas volumétricas rotativas, não há a presença desse sistema e a variação de volume é feita através de um rotor envolvido por uma carcaça. Os motores Wankel são um exemplo desse tipo de motor.

Martins (2013, p.2) apresenta em sua obra um diagrama que resume e ajuda a compreender de forma geral, como são classificadas as máquinas térmicas. A máquina térmica que terá ênfase nesse trabalho se encontra sublinhada, ou seja, máquina térmica de combustão interna, volumétrica, alternativa (motor a pistão).



2.2 Classificação dos motores alternativos

Além das classificações das máquinas térmicas apresentadas anteriormente, somente entre os motores alternativos encontram-se diversos fatores que os diferenciam e que impactam diretamente na forma de controle dos injetores e atuadores e a existência ou não do sistema de ignição.

2.2.1 Classificação quanto à ignição

2.2.1.1 Motor de ignição por faísca ou Otto

O motor Otto emprega a grande maioria dos veículos de passeio, tem como característica marcante a presença de velas de ignição. Neste tipo de motor, a mistura ar-combustível é formada previamente e depois admitida para o interior do cilindro ou formada dentro da câmara de combustão (quando há o sistema de injeção direta de combustível) e depois disso, a queima ocorre através da faísca formada no eletrodo da vela.

2.2.1.2 Motor de ignição espontânea ou motor a Diesel

No motor a diesel não há vela de ignição para realizar a faísca. Nesse motor somente o ar é admitido e comprimido até o ponto que se atinja uma temperatura suficientemente elevada (temperatura de autoignição do combustível). Bem próximo ao ponto morto superior (PMS) injeta-se o combustível no ar quente, onde inicia-se uma combustão espontânea.

2.2.2 Classificação quanto ao número de tempos

Nos motores alternativos, o termo tempo está diretamente ligado ao curso do pistão dentro de um ciclo de operação. São os movimentos descendentes e ascendentes que o pistão faz do ponto morto superior (PMS) ao ponto morto inferior (PMI) e do PMI ao PMS.

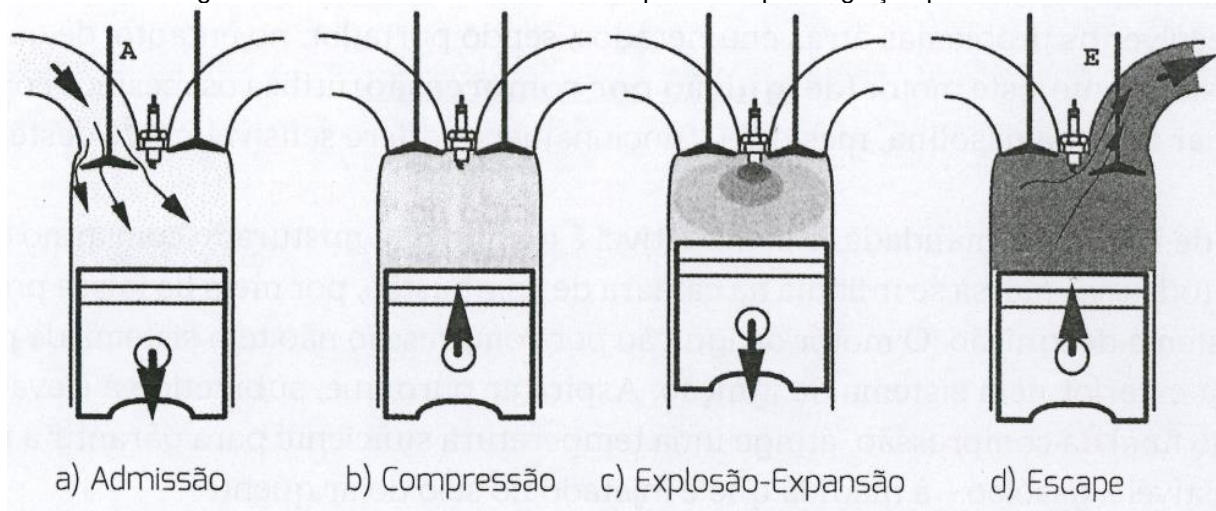
2.2.2.1 Motores alternativos a quatro tempos e ignição por faísca

Ocorre quatro cursos do pistão e duas voltas da manivela (720 graus) para completar um único ciclo.

Na Figura 3, observa-se que no primeiro tempo (admissão), o pistão se encontra em movimento de descida, enquanto a válvula de admissão está aberta permitindo a sucção da mistura ar combustível. No segundo tempo (compressão), o pistão está subindo e ambas as válvulas estão fechadas, permitindo que a mistura seja comprimida. Quando o pistão se aproxima do PMS, a faísca é liberada pela vela e ocorre o terceiro tempo, onde o fluido motor é queimado. A explosão provoca repentino aumento de pressão forçando o pistão em direção ao PMI. Essa é a única

etapa em que o motor fornece trabalho. Ao atingir o PMI, o pistão começa a fazer seu movimento de retorno em direção ao PMS. Nesse momento a válvula de escape é aberta para permitir a saída dos gases de escape, sendo esse o quarto e último tempo desse tipo de motor.

Figura 3 – Ciclo do motor alternativo a quatro tempos e ignição por faísca.

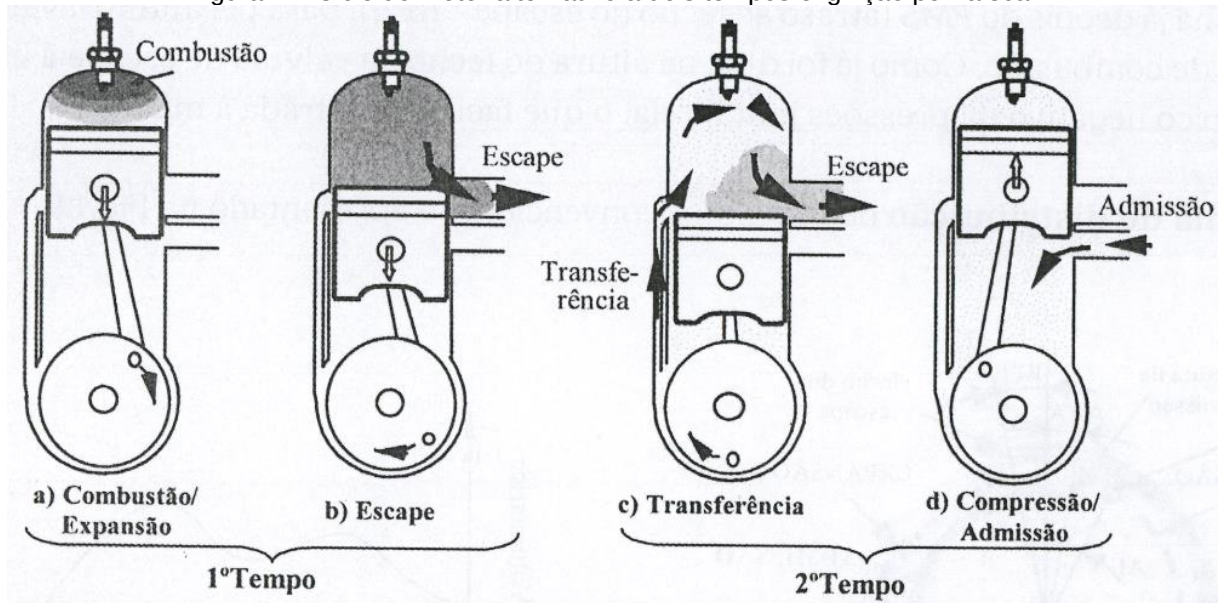


Fonte: (MARTINS, 2013, p.7).

2.2.2.2 Motores alternativos a dois tempos e ignição por faísca

Ocorre dois cursos do pistão e apenas uma volta da manivela (360 graus) para completar um único ciclo. A Figura 4 ilustra o funcionamento desse tipo de motor.

Figura 4 – Ciclo do motor alternativo a dois tempos e ignição por faísca.



Fonte: (MARTINS, 2013, p.12).

No primeiro tempo, com o pistão próximo do PMS, ocorre a faísca e inicia-se a combustão, forçando o pistão ao PMI. Em certo ponto do curso a janela de escape é descoberta e os gases de escape começam a sair. Nesse mesmo momento o cárter vai adquirindo pressão conforme o pistão se aproxima do PMI.

No segundo tempo, com o pistão no PMI, a janela de transferência é descoberta e uma comunicação entre o cárter e o cilindro é estabelecida. A pressão no cárter força a mistura a preencher o cilindro.

Quando o pistão sobe em direção ao PMS, a janela de transferência é fechada e em seguida a de escape também. Em certo ponto do curso, a janela de admissão é aberta e uma nova mistura entra no cárter por sucção devido ao movimento de ascendência do pistão. Na parte superior do cilindro a nova mistura é comprimida e em seguida ocorre a faísca reiniciando o ciclo.

A ausência de válvulas nos motores a dois tempos os torna de simples construção, leves, pequenos e de baixo custo, porém sem as válvulas para fechar a câmara de combustão no momento certo, uma pequena parte do combustível é expelido sem queimar, prejudicando sua eficiência. Além disso, a lubrificação é feita adicionando lubrificante ao combustível, agravando a emissão de poluentes. A incapacidade de se adequar aos níveis de emissões exigidos por lei, fez as montadoras substituírem os motores a dois tempos por motores a quatro tempos.

2.2.3 Outras classificações

Embora existam diversos tipos de motores à combustão, nos veículos de passeio os motores à gasolina são mais comumente usados, tanto no Brasil, quanto na maioria dos países. Esses motores, são motores de combustão interna, volumétricos, alternativos a quatro tempos, ignição por faísca e refrigerados a líquido. Veículos do tipo *flex-fuel* e álcool participam dessa mesma classificação, pois são os mesmos motores do ponto de vista do sistema de controle da injeção e da ignição. Será considerado o sistema de injeção deste tipo de motor no presente trabalho.

Algumas classificações impactam diretamente nos processos de controle e nos atuadores, como ocorre nos motores com ignição espontânea (movidos a diesel) ou os de injeção direta de gasolina (GDI – *Gasoline Direct Injection*).

Existem outras classificações para esses motores, sendo elas:

- Quanto aos componentes internos – cilindros em linha, em V, opostos e radial;
- Quanto ao sistema de arrefecimento – arrefecido a água ou a ar;
- Quanto às válvulas – nas laterais, no cabeçote, multiválvulas;
- Quanto à admissão de ar – aspirado ou sobrealimentado;
- Tipo de injeção – direta ou indireta;
- Tipo de ignição – por bateria ou magneto;
- Tipo de preparação da mistura – por carburador, por injeção eletrônica direta ou indireta.

2.3 Emissão de poluentes

De acordo com [Martins \(2013, p.343\)](#), os motores de combustão interna são os principais responsáveis pela poluição do ar nos centros urbanos. São conhecidas três formas nas quais esses motores emitem, diretamente ou indiretamente esses elementos na atmosfera:

- Pela evaporação do combustível no depósito (carburador) ou no circuito de alimentação de combustível;
- Pela emissão dos gases contidos no cárter;
- Pelos gases do escape.

Os dois primeiros exemplos foram resolvidos com soluções mecânicas através de filtros e métodos de recirculação desses elementos e, portanto, os estudos serão concentrados no problema dos gases do escape.

Os gases de escape consistem nos produtos da combustão da mistura de ar e combustível. A gasolina por exemplo, é uma mistura de compostos químicos que são chamados de hidrocarbonetos devido à presença da união química de hidrogênio (H) e carbono (C).

Durante o processo de combustão, o carbono e o hidrogênio se combinam com o oxigênio do ar e libera energia térmica formando outros compostos químicos. Se a queima fosse perfeita, então apenas o dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O) se formariam, onde nenhum é considerado prejudicial à saúde humana na atmosfera (CO_2 é indesejável, porém não tóxico).

Infelizmente, a combustão não é perfeita e dadas as condições de pressão e temperatura que ocorrem dentro do motor, outros compostos são formados, como H_2 , CO, hidrocarbonetos não queimados – HC, O_2 , NO, NO_2 , N_2 e partículas sólidas (PM).

2.4 A combustão nos motores Otto

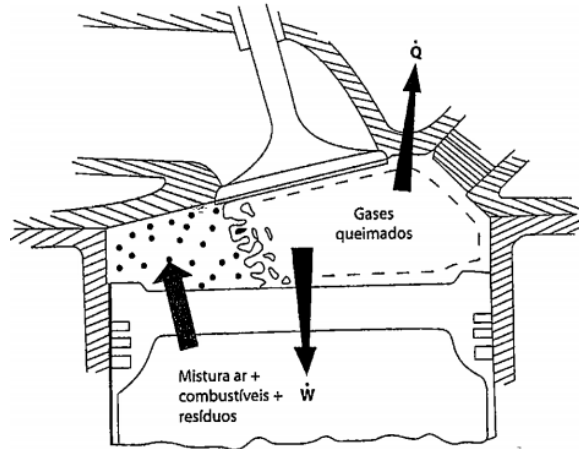
Nos motores de combustão interna com ignição por faísca e injeção indireta de combustível, seja via carburador ou injeção eletrônica, os cilindros são alimentados no tempo de admissão com uma mistura de ar-combustível previamente dosada.

Após esse tempo, a válvula de admissão se fecha e ocorre o processo de compressão. Nele a vaporização e a homogeneização da mistura são realizadas e quando o pistão se aproxima do PMS, a combustão se inicia pela faísca no eletrodo da vela.

Conforme descreve [Brunetti \(2012, p.412\)](#), a combustão no cilindro apresenta uma primeira fase, durante a qual não se registra aumento de pressão. Essa fase é conhecida como “retardamento químico da combustão ou “atraso de ignição”. Para tal atraso, se faz necessário um avanço da faísca em relação ao PMS.

Na segunda fase, ilustrada pela Figura 5, a combustão se propaga na câmara através de uma frente de chama, que se inicia na região da vela de ignição em direção às paredes do cilindro, abandonando os gases queimados e mistura não queimada à sua frente.

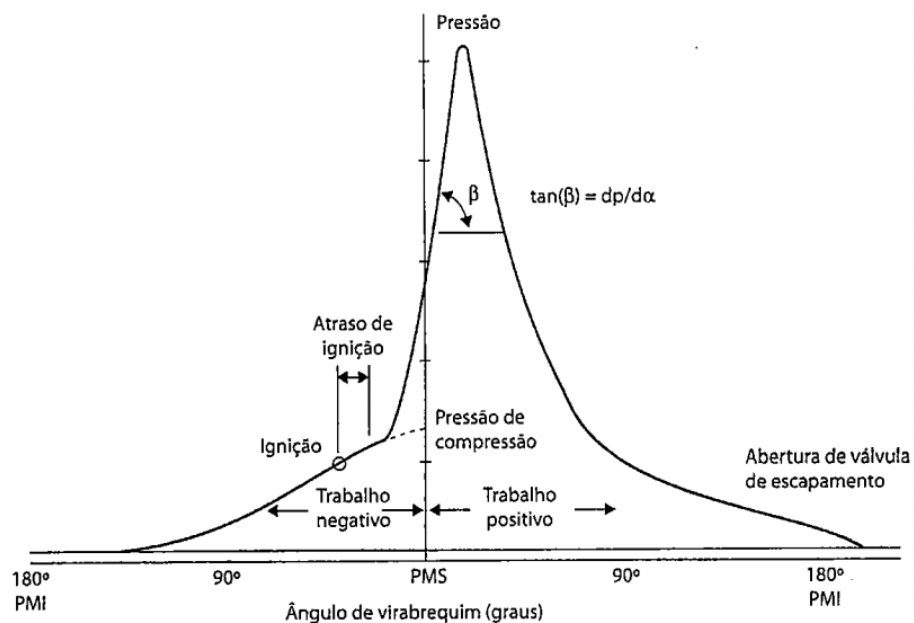
Figura 5 – Representação esquemática da combustão normal.



Fonte: (BRUNETTI, 2012, p.412).

Ambas as fases podem ser visualizadas através da variação de pressão no diagrama da Figura 6.

Figura 6 – Variação de pressão na região da combustão

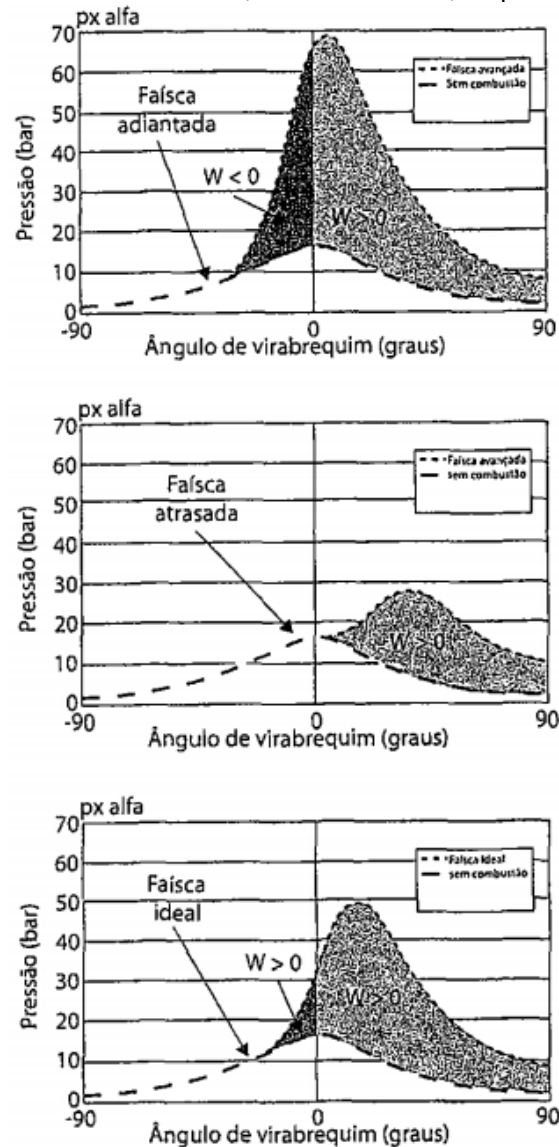


Fonte: (BRUNETTI, 2012, p.413).

Brunetti (2012) ainda afirma que existe um ponto de avanço de ignição que traz o melhor compromisso entre o trabalho negativo na compressão e o trabalho positivo na expansão, denominado “mínimo avanço para máximo torque” ou em inglês “*MBT – Maximum Brake Torque*” spark timing.

Uma faísca muito adiantada provoca um trabalho negativo muito acentuado, grande fadiga nos componentes e ruídos elevados, e que são indesejáveis no funcionamento do motor. Já uma faísca muito atrasada provoca um pequeno trabalho positivo e isso influi negativamente no desempenho e na eficiência do motor. Um exemplo simplificado dos três pontos pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Faísca adiantada, atrasada e ideal, respectivamente.



Fonte: (BRUNETTI, 2012, p.414).

2.5 Calibração e mapeamento do motor

O avanço da eletrônica, dos microprocessadores, microcontroladores, sensores e atuadores tornou possível o controle dos motores através da injeção eletrônica digital. Esse tipo de injeção é muito mais flexível que os antigos sistemas de injeção mecânicos a carburador e as injeções eletrônicas analógicas. As injeções eletrônicas digitais proporcionaram o aumento da eficiência dos motores e redução das emissões de poluentes.

Através de um programa, determina-se a quantidade de combustível e o ponto de ignição em função dos comandos do motorista. São calibradas previamente as tabelas de injeção e ignição, que guardam os valores base para cada condição de carga em função à velocidade (RPM) do motor.

Além disso, utilizam outras variáveis de entrada para determinar condições de funcionamento do motor ou para fazer ajustes e correções na injeção e na ignição sobre os valores base da tabela. Com um sensor adicional é possível também fazer o controle em malha fechada e definir qual o nível de autoridade na correção a ser aplicado pelo programa.

Para realizar a calibração, o motor ou o veículo são colocados em um dinamômetro e testados em diversos pontos de velocidade e faixas de carga, enquanto as variáveis de saída são medidas.

Variando a relação de ar/combustível na entrada e o controle da faísca de maneira sistemática para cada ponto de operação, valores de desempenho como potência e torque são medidos e as taxas de emissões dos gases de escape são também mensuradas. A calibração ideal é um compromisso entre desempenho e as taxas de emissões permitidas.

Posteriormente, esses valores são inseridos nas tabelas de calibração de combustível e de ponto de ignição e gravados memória da injeção eletrônica.

2.6 A mistura de ar e combustível

2.6.1 Definição da relação ar/combustível

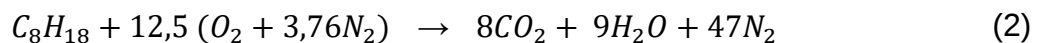
É a razão entre a massa do ar e a massa de combustível que formam a mistura.

$$AFR = \frac{m_a}{m_c} \quad (1)$$

2.6.2 Definição de relação ar/combustível estequiométrica

Como afirma Brunetti (2012), a mistura estequiométrica é altamente significativa nos sistemas de injeção eletrônica de combustível e corresponde com uma proporção de ar e combustível combinadas de tal forma que a queima é perfeita, em que todo hidrogênio e carbono da composição do combustível é convertida em H₂O e CO₂.

Para uma gasolina com composição média de C₈H₁₈ e o ar tendo aproximadamente 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio, tem-se:



Sabendo os pesos atômicos onde, C=12, H=1, O=16, N=14, temos para o combustível:

$$C_8H_{18} = (8 \times 12) + (18 \times 1) = 114 \quad (3)$$

E para o ar:

$$12,5 (O_2 + 3,76N_2) = (12,5 \times 16 \times 2) + (12,5 \times 3,76 \times 14 \times 2) = 1716 \quad (4)$$

Logo, a relação ar/combustível estequiométrica para esse combustível é dada por:

$$AFR_e = \frac{m_a}{m_c} = \frac{1716}{114} \cong 15,0 \quad (5)$$

O resultado obtido mostra que para o combustível do exemplo, necessita-se de quinze partes de ar para uma parte de combustível, e que, mantendo essa proporção obtém-se a mistura estequiométrica.

A composição da gasolina, assim como do etanol é variável e pode conter outros elementos misturados que podem alterar o valor da razão estequiométrica.

2.6.3 Definição do fator lambda

Lambda (λ) é a relação entre a mistura real admitida de ar/combustível pela mistura ar/combustível ideal ou estequiométrica, ou seja:

$$\lambda = \frac{AFR}{AFR_e} \quad (6)$$

No qual:

$\lambda = 1$, mistura estequiométrica;

$\lambda < 1$, mistura rica;

$\lambda > 1$, mistura pobre.

2.6.4 Tipos de mistura quanto ao comportamento do motor

[Brunetti \(2012\)](#) classifica as misturas em quatro tipos fundamentais:

- Limite pobre: é o limite mínimo de mistura que ainda possibilita o funcionamento do motor. É uma condição indesejada pois a chama fica extremamente lenta causando *back fire* e superaquecimento da câmara. Em condições normais de funcionamento e operando em MBT, normalmente ocorre para lambda entre 1,25 e 1,3;
- Mistura econômica: é uma mistura levemente pobre que produz o mínimo consumo específico e contribui para a redução da emissão do monóxido de carbono (CO);
- Mistura de máxima potência: é uma mistura levemente rica que em certas condições de RPM e posição do acelerador produz a máxima potência, porém contribui para o aumento da emissão de monóxido de carbono (CO);
- Limite rico: ao ultrapassar o limite rico o motor não funciona, pois, a vaporização em excesso provoca a diminuição da temperatura na câmara de combustão e conseqüentemente pode causar a extinção da chama por falta de ar.

2.7 Efeito da mistura ar/combustível no desempenho e na emissão de poluentes

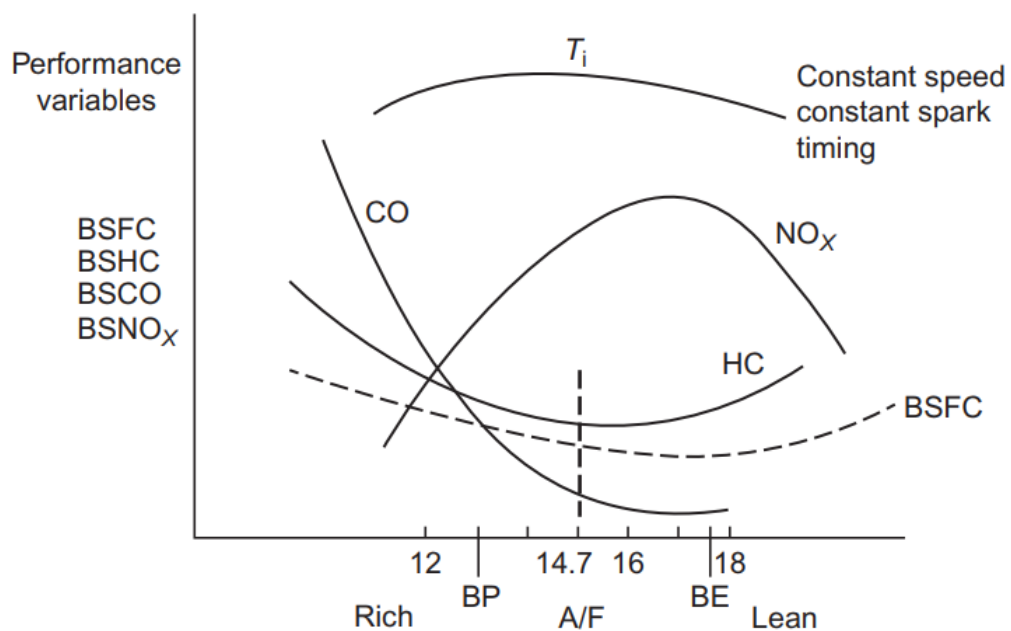
Na Figura 8 mostra-se que para um motor com tempo de ignição fixo e velocidade (RPM) fixa, variando a mistura ar/combustível, tem-se um compromisso entre consumo (BSFC), Torque (T_i) e níveis de emissões (NO_x , HC e CO).

Observa-se que conforme se desloca a mistura para uma área mais rica (AFR < 14,7), o torque (T_i) aumenta e as emissões de NO_x diminuem, ambas condições desejadas. No entanto, tem-se aumento do consumo de combustível e maiores emissões de CO e de hidrocarbonetos não queimados (HC), condições indesejadas.

Ao deslocar a mistura para a área mais pobre (AFR > 14,7) o processo inverso ocorre, reduz-se o consumo de combustível e a emissão de CO e HC até certo ponto, porém perde-se torque e as emissões de NO_x aumentam.

Ribbens (2017, p.158) ainda conclui que não há relação de ar/combustível que minimize simultaneamente todos os gases de escape regulados pelas leis de emissões.

Figura 8 – Variação do torque, consumo e concentração de HC, CO e NO_x com a variação da mistura ar/combustível.



Fonte: (RIBBENS, 2017, p.158).

Nesta figura, algumas variáveis como as de emissões e de consumo foram representadas na forma *brake-specific*. É uma forma de representar essas grandezas em relação à uma carga imposta (normalmente de um dinamômetro elétrico) ao motor. A unidade de medida de *brake power* (P_b) é kW ou hp.

$$BSHC = \text{brake} - \text{specific HC concentration} = \frac{r_{HC}}{P_b} \quad (7)$$

$$BSCO = \text{brake} - \text{specific CO concentration} = \frac{r_{CO}}{P_b} \quad (8)$$

$$BSNO = \text{brake} - \text{specific NO concentration} = \frac{r_{NOx}}{P_b} \quad (9)$$

$$BSFC = \text{brake} - \text{specific fuel consumption} = \frac{\dot{f}}{P_b} \quad (10)$$

Em que, $\dot{f}$ é a vazão de combustível (em kg/h ou lb/h) e BSFC em kg/(kWh) ou lb/(hp.h). Os termos r_{HC} , r_{CO} , r_{NOx} são as taxas de vazão de HC, CO e NO_x respectivamente e torque (T_i).

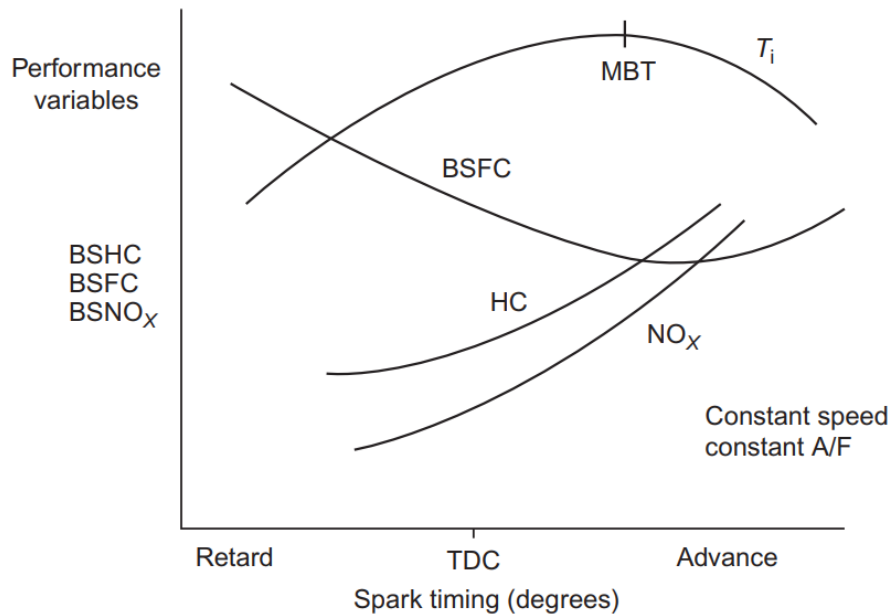
2.8 Efeito do ponto de ignição no desempenho e na emissão de poluentes

Para essa análise considera-se as mesmas variáveis do tópico anterior, porém dessa vez, a mistura ar/combustível e a velocidade do motor permanecem fixos e somente o avanço da ignição é modificado.

Como visto anteriormente, existe um atraso na combustão e o avanço de ignição serve para minimizar esse efeito, melhorando a eficiência e o desempenho do motor. Tal avanço é contabilizado em graus em relação ao PMS do motor e ocorre um tempo antes do pistão no topo do seu curso. Ponto de ignição em atraso ocorre no tempo depois do PMS.

Na Figura 9 observa-se que ao avançar o ponto de ignição o torque (T_i) aumenta até certo ponto e o consumo de combustível (BSFC) do motor diminui, situações desejadas. Por outro lado, as emissões de hidrocarbonetos (HC) e NO_x aumentam.

Figura 9 – Variação do torque, consumo e concentração de HC e NOx com a variação do ponto de ignição.



Fonte: (RIBBENS, 2017, p.159).

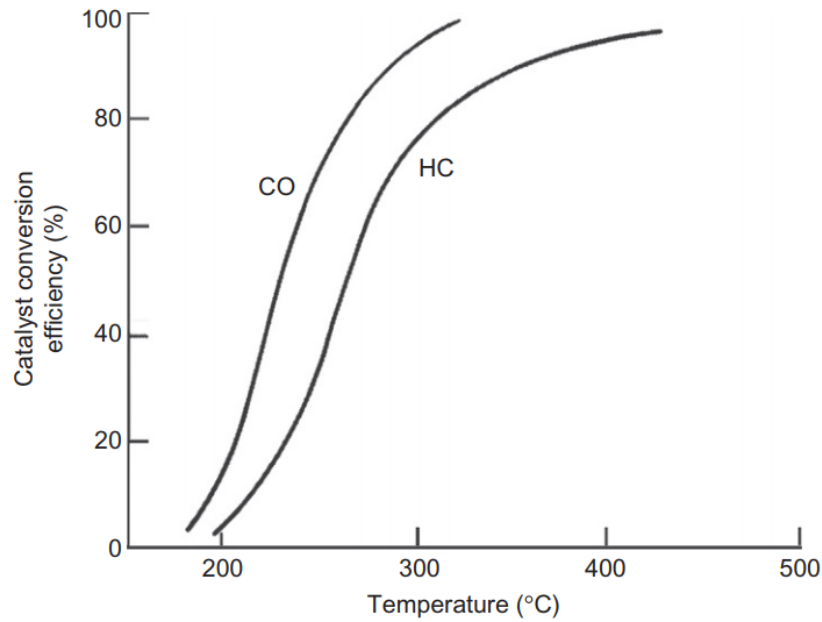
2.9 Conversor catalítico

A função do conversor catalítico é reduzir os gases poluentes que saem do escape. Um exemplo de conversor catalítico muito importante nos modernos sistemas de controle de emissão é chamado de conversor catalítico de três vias ou *three-way catalyst* (TWC). Dentre as suas funções desejadas estão a redução do NOx e a oxidação dos CO e HC.

Para que o rendimento seja elevado, o conversor deve operar em temperaturas acima de 300 °C, o controle da mistura deve estar em uma faixa muito estreita (0,1 AFR), centralizada no AFR estequiométrico de 14,7:1 no caso da gasolina (RIBBENS, 2017, p. 163). Além disso, o combustível utilizado deve ser livre de chumbo pois trata-se de um contaminante para os conversores.

Na Figura 10 observa-se que acima dos 300 °C a eficiência de conversão para a função de oxidação de CO e HC se aproxima dos 99% para CO e fica acima dos 95% para HC.

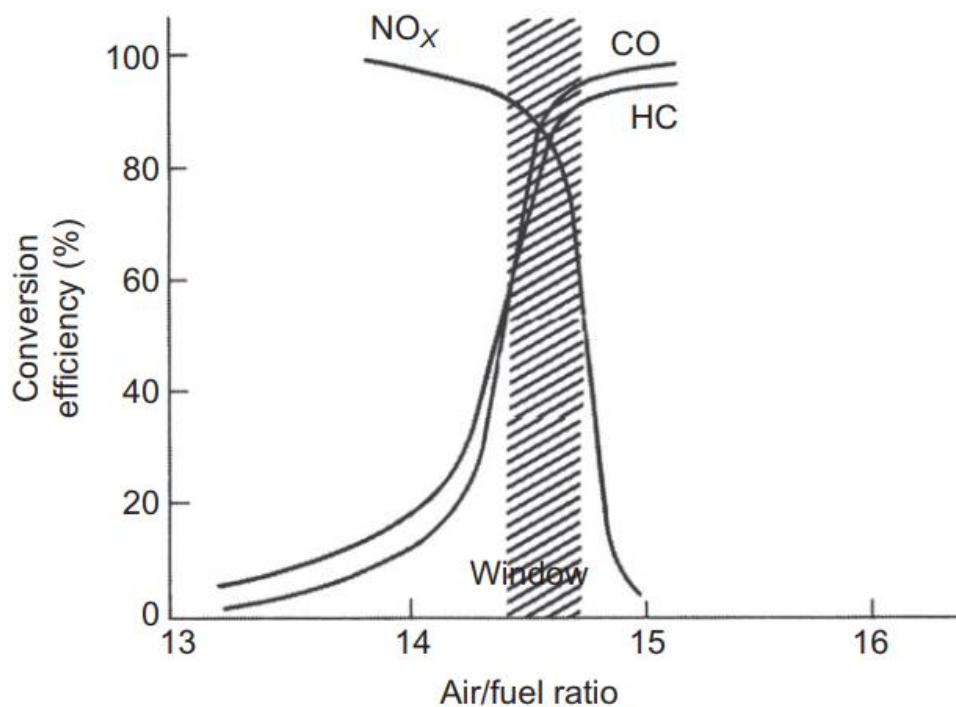
Figura 10 – Conversor catalítico de oxidação. Eficiência de conversão pela temperatura.



Fonte: (RIBBENS, 2017, p.162).

Para o catalisador de três vias existe o compromisso entre a conversão de CO e HC para os níveis de conversão dos NO_x. Nesse caso a eficiência de conversão fica ligeiramente reduzida para aproximadamente 90%. A Figura 11 mostra a eficiência de conversão em relação ao AFR da mistura.

Figura 11 – Eficiência de conversão de um TWC pela mistura ar/combustível.



Fonte: ([RIBBENS, 2017, p.163](#)).

2.10 Considerações finais

Nesse capítulo foram abordadas as classificações das máquinas térmicas, as classificações dos motores alternativos, o funcionamento do motor ciclo Otto, a formação da mistura ar/combustível, a emissão de poluentes, os efeitos da injeção de combustível e do ponto de ignição no desempenho e nas emissões e a função do conversor catalítico.

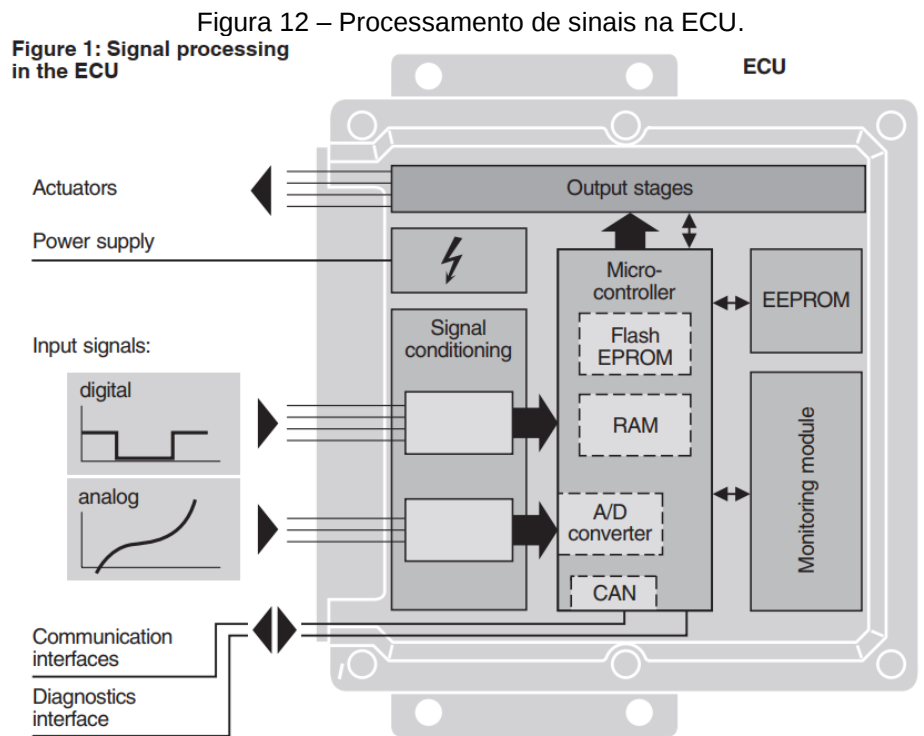
Com a utilização do conversor catalítico de três vias, observou-se que é necessário um sistema de gerenciamento do motor muito preciso para manter a mistura estequiométrica e dentro da estreita janela de alta eficiência do conversor.

No capítulo 3 será mostrado os sensores e atuadores que compõem os sistemas de injeção eletrônica.

3 SISTEMAS DE INJEÇÃO DE COMBUSTÍVEL

3.1 Módulo de controle

O módulo de controle chamado de ECU (*Electronic Control Unit*) ou UCM (*Unidade de Controle do Motor*) representado na Figura 12, recebe os sinais dos sensores analógicos e digitais, os processa e calcula os sinais de disparo para os atuadores. O *firmware* é armazenado na memória (por exemplo, flash EPROM) de um microcontrolador que executa o programa (BOSCH, 2022, p. 1620).



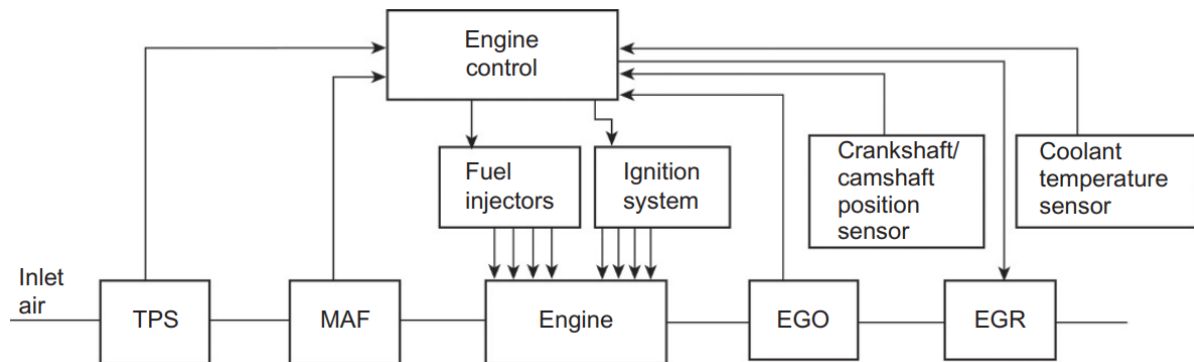
Fonte: (BOSCH, 2022, p.1620).

Em muitos casos a escolha desses sensores é um compromisso entre desempenho e custo. Em outros casos, apenas medições indiretas de certas variáveis são viáveis. A partir da medição dessas variáveis, a variável desejada é obtida por meio computacional (RIBBENS, 2017, p. 143).

O avanço da tecnologia também permitiu a integração de mais sistemas em um único módulo como o controle da ignição, controle da marcha lenta, bomba temporizada, controle do eletroventilador, entre outros componentes.

Na Figura 13 tem-se um diagrama de blocos simplificado contendo os sensores e atuadores mais relevantes utilizados no controle de um motor. Alguns deles serão abordados com mais detalhes posteriormente.

Figura 13 – Representação do sistema de controle do motor.



Fonte: (RIBBENS, 2017, p.185).

Descrição dos sensores mais utilizados nas injeções eletrônicas:

- *Throttle plate angular position* (TPS) – ângulo da posição do corpo de borboleta;
- *Mass airflow rate* (MAF) – mede o fluxo de ar na entrada do coletor;
- *Exhaust gas oxygen concentration* (EGO) – sensor de oxigênio;
- *Exhaust gas recirculation* (EGR): válvula de recirculação dos gases;
- *Crankshaft angular position* (CKP): sensor de rotação/posição do virabrequim;
- *Camshaft angular position* (CMP): sensor de fase;
- *Coolant temperature sensor* (CLS): sensor de temperatura d'água;
- *Intake air temperature* (IAT): sensor de temperatura do ar;
- *Manifold absolute pressure* (MAP): sensor de pressão do coletor de admissão;
- *Vehicle speed sensor* (VSS): sensor de velocidade.

3.2 Sensores

3.2.1 Sensores de pressão

Em aplicações automotivas existem vários tipos de sensores de pressão aplicados em diversos pontos de um automóvel moderno, incluindo pressão do ar ambiente, pressão no coletor de admissão, pressão dos pneus, pressão de óleo, pressão do combustível, pressão do sistema de arrefecimento, sistema de ar condicionado, entre outros (RIBBENS, 2017, p. 191).

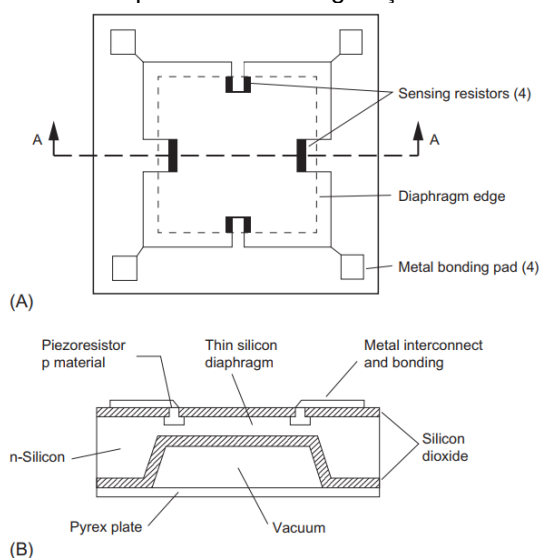
Em alguns casos, um sensor simples do tipo *switch* é requerido. Em casos que a leitura de pressão exata é necessária, sensores do tipo eletromecânicos, piezorresistivos ou piezoelétricos são usados. Sensores potenciométricos, *strain gauges* usando ponte de *Wheatstone* ou capacitivos, transdutores piezoelétricos e sensores de pressão diferencial são exemplos que podem ser utilizados. (HOLLEMBEAK, 2011, p. 264).

3.2.1.1 Strain gauge MAP sensor

Normalmente são transdutores de pressão do tipo piezorresistivos. Possuem um diafragma de silício com extensômetros semicondutores infundidos no substrato de silício. Comumente apresentam circuitos de amplificação, compensação de efeitos de temperatura e não linearidade (AGUIRRE, 2013, p.239).

A Figura 14 mostra o exemplo de uma configuração de sensor MAP.

Figura 14 – Exemplo de uma configuração de sensor MAP.

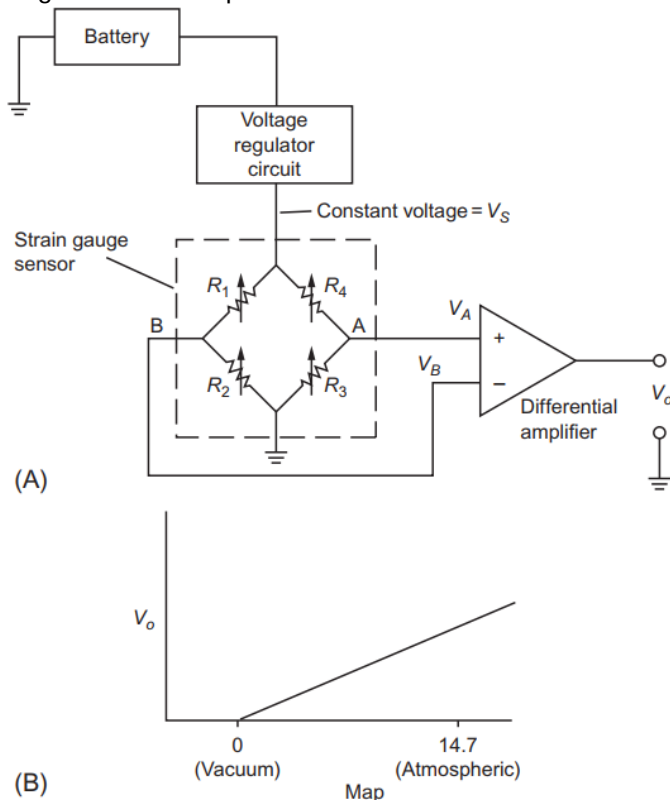


(A) Vista superior e (B) seção A-A.

Fonte: (RIBBENS, 2017, p.192).

Para maximizar o desempenho do sensor, alguns fabricantes podem utilizar um arranjo com quatro piezoresistores ligados em ponte. Um circuito equivalente é mostrado na Figura 15. O regulador de tensão mantém uma alimentação constante (V_s) através da ponte. Os resistores infundidos no diafragma indicados por R_1 , R_2 , R_3 e R_4 são arranjados de tal forma que dois deles aumentam a resistência (R_1 e R_3), enquanto os outros dois diminuem (R_2 e R_4) ao mesmo tempo para uma mesma deflexão. Isso faz a ponte se desequilibrar pela diferença nas resistências e surge uma tensão entre os pontos A e B proporcional à pressão aplicada. O amplificador diferencial gera uma tensão de saída proporcional à tensão gerada nos pontos A e B. (RIBBENS, 2017, p. 192).

Figura 15 – Exemplo de circuito de um transdutor MAP.



(A) Circuito e (B) tensão de saída $V_o \times$ MAP.
Fonte: (RIBBENS, 2017, p.193).

Os sensores *Manifold absolute pressure* (MAP), *Barometric absolute pressure* (BAP) e o Turbo MAP são classificados como sendo sensores de pressão normal (0-5 bar) e que medem pressão absoluta.

O sensor MAP é usado para determinar a pressão no coletor de admissão. Juntamente com o sensor de temperatura do ar e o sensor de rotação, permite que a massa de ar (necessária para determinar a razão ar/combustível) seja calculada pela ECU. Range típico 0,2 – 1,1 bar.

O BAP é utilizado para determinar a pressão ambiente para informar à ECU a pressão do ar para diferentes altitudes. Range típico 0,5 – 1,1 bar.

Turbo MAP tem a mesma aplicação que o sensor MAP, com a única diferença que tem um range um pouco mais elevado e aceita leitura de pressões positivas (acima da pressão atmosférica). Range típico 0,5 – 2,5 bar ou mais ([BASSHUYSEN, 2004, p.540](#)).

Nas instalações automotivas é bastante comum o uso dos TMAP's. Os TMAP's são sensores MAP com sensor de temperatura do ar integrados no mesmo componente.

3.2.2 Sensor de Rotação

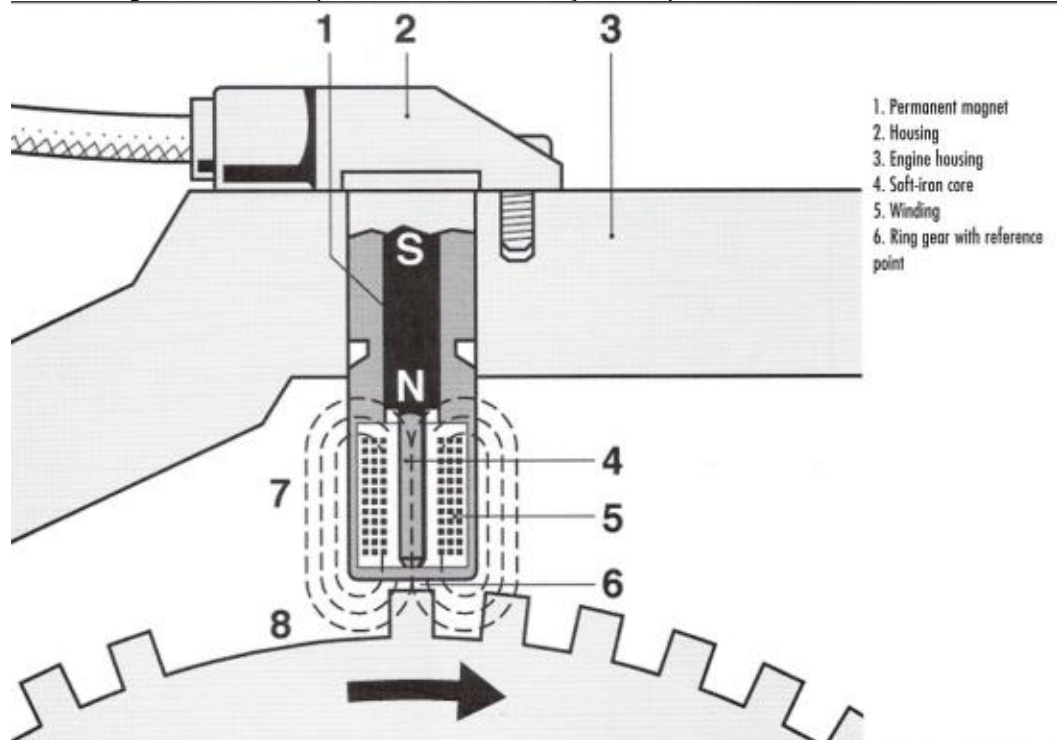
Também conhecido por *Crankshaft Angular Position* (CKP), o sensor de rotação serve para informar a velocidade de rotação do motor e a posição do eixo de manivelas. É através do sinal desse sensor que a unidade de comando consegue cronometrar os pulsos de injeção de combustível e de ignição.

A velocidade de rotação também é utilizada juntamente com o MAP e a temperatura do ar para calcular a massa de ar, dado necessário para determinar a razão ar/combustível. Esse método é conhecido como *speed-density*.

Quanto ao aspecto construtivo os sensores de rotação poder ser encontrados principalmente de relutância variável (indutivo) ou do tipo hall.

O sensor é instalado junto à uma roda dentada feita de material ferromagnético acoplada ao eixo de manivelas. Tal dispositivo possui um ou mais dentes ausentes que servem como referência do PMS do primeiro cilindro ver Figura 16.

Figura 16 – Exemplo de sensor de rotação do tipo indutivo e roda fônica.



Fonte: (AIRD, 2001, p.69).

3.2.2.1 Sensor de relutância variável (VR)

Os sensores de relutância variável ou sensores indutivos consistem basicamente em um ímã permanente e um pino ferromagnético cercado por uma bobina de indução como mostra a Figura 16. Quando a roda dentada gira, a distância entre o sensor e o material ferromagnético muda, causando uma variação de fluxo magnético em um intervalo de tempo. Essa variação de fluxo atravessa a bobina e gera uma tensão induzida em seus terminais.

Como o efeito de medição do elemento sensor é relativamente alto, elimina a necessidade de eletrônica no próprio sensor e por esse motivo é chamado de sensor passivo. No entanto como a tensão nos seus terminais depende da velocidade de rotação, em baixas rotações é altamente dependente da distância entre o sensor e a roda fônica (BOSCH, 2022, p.1738).

O sinal gerado nos terminais da bobina do sensor VR se aproxima à uma senoide. Como a tensão gerada é dependente da velocidade, em baixas rotações o sinal é bem pequeno e atinge alguns milivolts de amplitude. Nessas condições o

sistema fica muito sensível à ruídos provenientes do próprio ambiente ruidoso que o sensor está instalado.

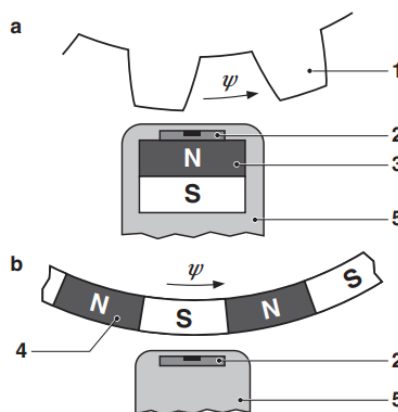
Em altas rotações a tensão nos terminais pode passar facilmente algumas dezenas e até centenas de volts. Isso impede que o sensor seja ligado diretamente ao microcontrolador onde normalmente as entradas são de 0 – 3,3V ou de 0 – 5V. Um circuito adicional é necessário para condicionar esse sinal aos níveis adequados para o microcontrolador.

3.2.2.2 Sensor HALL

O sensor de rotação automotivo de efeito hall possui um ímã permanente atrás do elemento sensor separados por um pequeno espaço. O item a da Figura 17 ilustra um sensor com roda fônica de material ferromagnético. Aplicação típica em sistemas automotivos.

Figura 17 – Sensor de efeito Hall.

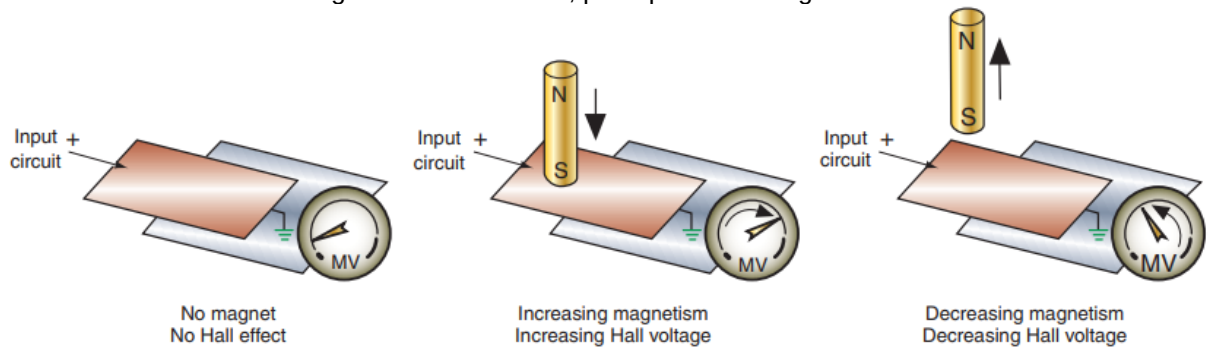
- a) Sensor arrangement with passive rotor (ferromagnetic gear),
- b) Sensor arrangement with active rotor (multipole wheel).
- 1 Increment rotor,
- 2 Hall IC,
- 3 Permanent magnet,
- 4 Multipole wheel,
- 5 Housing.
- ψ Rotational speed.



Fonte: (BOSCH, 2022, p.1738).

A Figura 18 mostra o princípio básico do efeito hall, onde há a produção de uma diferença de potencial em um material condutor quando um campo magnético é aplicado perpendicularmente ao sentido do fluxo de corrente.

Figura 18 – Efeito hall, princípios da voltagem hall.

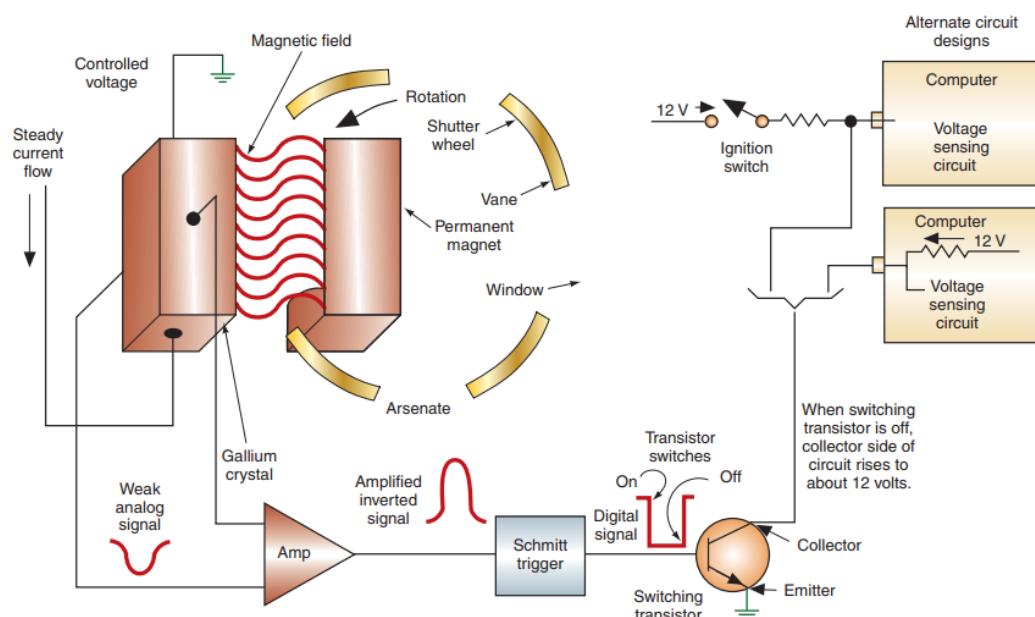


Fonte: (HOLLEMBEAK, 2011, p.273).

De forma semelhante, no sensor automotivo como o *gap* entre o sensor e a roda fônica de material ferromagnético é bem pequeno, quando um dente passa pelo sensor, altera o campo magnético. Esse campo atravessa perpendicularmente o elemento sensor que está entre o ímã permanente e a roda dentada e provoca uma pequena tensão (em milivolts).

Como esse sinal é muito pequeno, internamente o sensor possui circuitos adicionais que primeiramente invertem e amplificam o sinal. Em outra etapa um circuito comparador *Schmitt trigger* digitaliza o sinal analógico que é usado para disparar um transistor na configuração de coletor aberto. A Figura 19 mostra um circuito típico de um sensor hall automotivo.

Figura 19 – Circuito típico de um sensor Hall switch.



Fonte: ([HOLLEMBEAK, 2011, p.273](#)).

Na prática o sensor de rotação hall automotivo fornece um sinal terra quando se aproxima de um material ferromagnético, ou seja, o transistor está conduzindo. Ao afastar, se comporta como circuito aberto.

Para que o sinal oscile é necessário um resistor de *pull-up* externo, que normalmente se encontra dentro da ECU de controle. O resultado é uma onda quadrada na saída do sensor com amplitude fixa determinada pelo *pull-up* externo (típico 0-12V ou 0-5V).

Em relação ao sensor indutivo que é passivo, o sensor hall necessita de alimentação e possui circuitos amplificadores internamente, por isso, também pode ser classificado como sensor ativo.

Difere-se também pelo fato de ter os sinais de saída com amplitude fixa, independente da rotação do motor. Tal amplitude só depende da tensão imposta ao circuito de *pull-up*. Com um sinal digital (onda quadrada) variante apenas em frequência, é possível ligá-lo diretamente nas entradas microcontrolador sem necessidade de circuitos de condicionamento adicionais.

3.2.3 Sensor de fase

Como um motor a quatro tempos um ciclo completo ocorre a cada 720°, ou seja, precisa de duas voltas completas, é preciso informar para a ECU em qual das duas voltas se inicia o ciclo ou em qual delas é o PMS do primeiro cilindro em fase de admissão. Para esse fim, um sensor chamado *Camshaft Angular Position* (CMP) ou sensor de fase é inserido normalmente no eixo de comando das válvulas que gira à metade da velocidade do eixo de manivelas, ou seja, 360° ou uma volta completa por ciclo.

Com ambos os sensores CMP e CKP disponíveis, a ECU sabe a posição exata e a fase de cada ciclo. Dessa forma, consegue controlar tanto a injeção quanto a ignição de maneira sequencial. Sem o sensor CMP somente injeção semissequencial e ignição centelha perdida são possíveis.

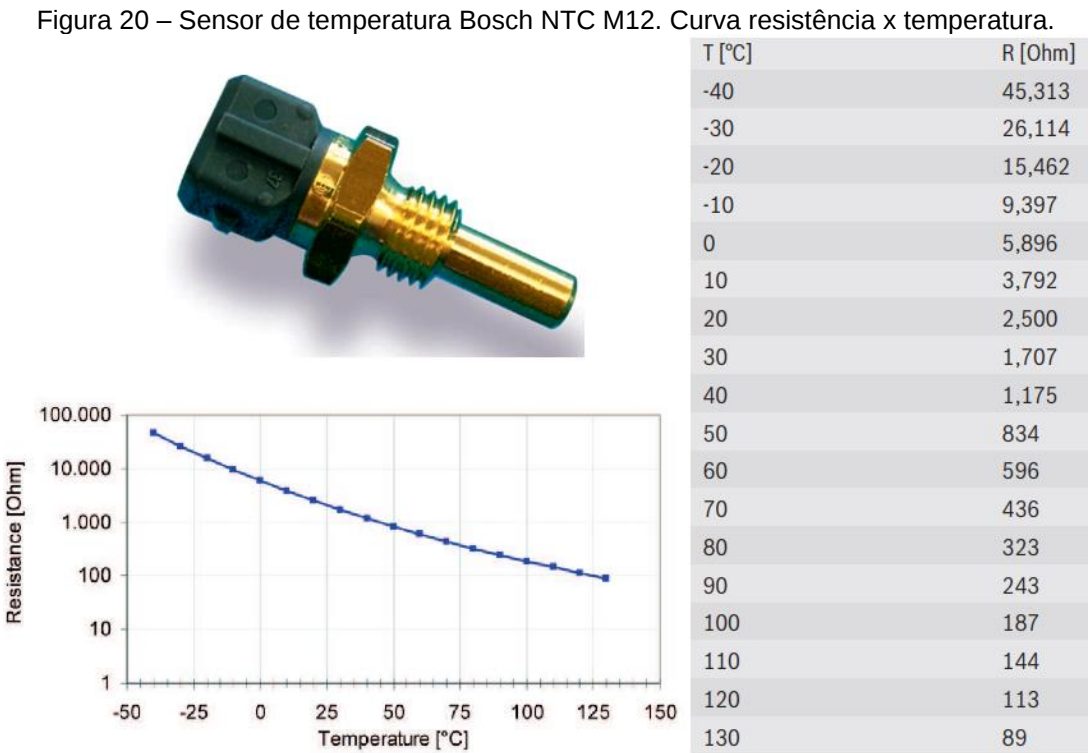
Quanto ao aspecto construtivo os sensores de fase são muito semelhantes aos sensores de rotação indutivo ou hall descritos anteriormente. Apenas a frequência de

trabalho muda, pois no sensor de rotação a roda dentada pode conter até 60 dentes e gira duas vezes por ciclo. No sensor de fase apenas um único dente (ou pulso) é necessário para identificar a fase e como está na velocidade do eixo de comando, gira apenas uma vez por ciclo.

3.2.4 Sensores de temperatura

Na maioria das aplicações automotivas são utilizados termistores de coeficiente de temperatura negativo (NTC), isto é, a resistência diminui conforme a temperatura aumenta. Esses sensores podem apresentar calibrações diferentes de um veículo para outro, mas no geral percebe-se que variam muito a resistência com pouca variação de temperatura. Isso os torna bastante sensíveis e simples de serem implementados ([DENTON, 2018, p.40](#)).

A Figura 20 mostra uma calibração típica de um sensor de temperatura BOSCH.



Fonte: Adaptado de ([BOSCH MOTORSPORT, 2020](#)).

Através do sensor de temperatura do líquido de arrefecimento a ECU consegue determinar a temperatura do motor. Essa informação é utilizada para tomada de ações na injeção e nos periféricos. Enriquecimento à frio e o controle do eletroventilador são exemplos.

O sensor de temperatura do ar informa a temperatura de admissão que é uma variável utilizada juntamente com os sensores MAP e rotação para determinar a massa de ar. Determinando a massa de ar a ECU calcula a razão ar/combustível e a quantidade de mistura a ser injetada.

3.2.5 Sensor de posição da borboleta

O sensor de posição da borboleta, também conhecido como *Throttle Angle Sensor* (TPS) determina o ângulo de abertura da borboleta. O corpo de borboleta é o componente que realiza o controle da vazão de ar que entra no coletor de admissão (BRUNETTI, 2012, p.546).

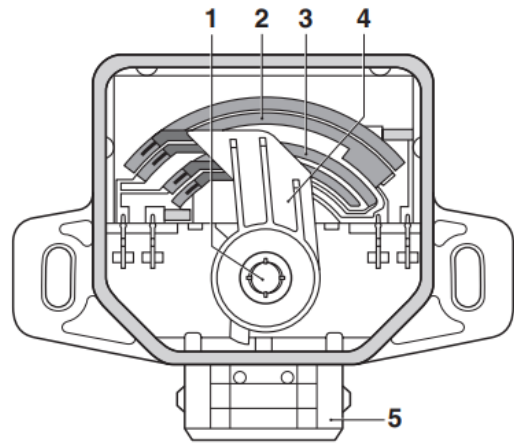
A posição da borboleta pode ser usada como dado para cálculo de carga do motor, atuando diretamente na injeção de combustível. Em sistemas que o cálculo é feito através da massa de ar, a leitura do TPS determina uma condição especial conhecida como aceleração rápida.

Aceleração rápida é uma condição transitória em que a ECU calcula o quanto e o quão rápido foi a solicitação de carga no acelerador. Com essa informação é feito um enriquecimento momentâneo da mistura para uma resposta mais rápida do motor. A aceleração solicitada no acelerador pode ser de maneira suave e progressiva ou rápida e repentina como em situações de arrancada ou de uma retomada por exemplo.

Os sensores TPS comuns funcionam de forma semelhante à um potenciômetro. Na Figura 21 observa-se um ponto comum representado por (1) que percorre as pistas (2 e 3). As duas extremidades do elemento resistivo recebem a alimentação (normalmente 5V) da ECU e um sinal terra. Na saída tem-se um sinal de tensão proporcional ao ângulo de abertura da borboleta.

Figura 21 – Sensor de posição da borboleta.

- 1 Throttle-valve shaft,
- 2 Potentiometer track 1,
- 3 Potentiometer track 2,
- 4 Wiper arm with wipers,
- 5 Electrical connection.



Fonte: (BOSCH, 2022, p.1725).

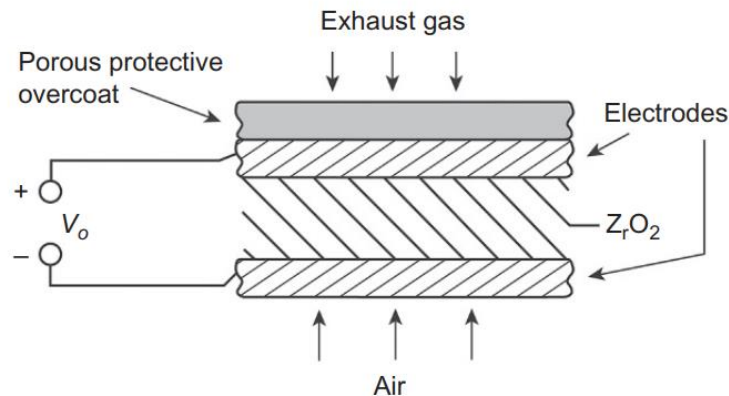
3.2.6 Sensor de oxigênio

O sensor de oxigênio é o elemento que permite realizar o controle da injeção eletrônica em malha fechada pois mede a concentração de oxigênio no escape. Assim, é possível manter a mistura ar/combustível a um nível desejado.

Esse sensor é conhecido *exhaust gas oxygen* (EGO) ou sensor lambda. Esses sensores normalmente formados por óxidos de zircônia (ZrO_2) ou dióxido de titânio (TiO_2). Basicamente o sensor EGO consiste em uma seção de ZrO_2 em forma de dedal com eletrodos finos de platina no interior e no exterior do ZrO_2 . O eletrodo interno é exposto ao ar (referência) e o eletrodo externo é exposto aos gases de exaustão através de um revestimento protetor poroso (RIBBENS, 2017, p.215).

A Figura 22 ilustra os aspectos construtivos desse sensor.

Figura 22 – Ilustração de um sensor EGO.



Fonte: Adaptado de (RIBBENS, 2017, p.216).

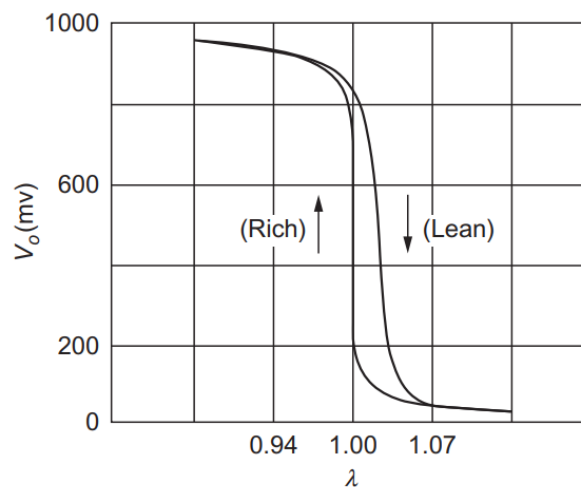
Devido à ação eletrolítica, esses íons permeiam o eletrodo e migram através do eletrólito de ZrO_2 e isso cria uma diferença de potencial que depende da porcentagem de oxigênio saindo nos gases de escape (DENTON, 2018, p.55).

Quando a diferença de O_2 entre os gases de escape e a câmara de referência é grande, a tensão entre os eletrodos é alta e atinge valores acima de 500mV, significa que a mistura está com baixo teor de O_2 resultantes de uma mistura rica.

Quando a diferença de O_2 entre os gases de escape e a câmara de referência é pequena a tensão entre os eletrodos é baixa e atinge valores da ordem de 100mV, significa que a mistura está com alto teor de O_2 resultantes de uma mistura pobre.

Na estequiometria uma tensão próxima de 450mV é gerada. A Figura 23 mostra uma curva característica de um sensor EGO comercial comum.

Figura 23 – Tensão de saída do sensor vs lambda.



Fonte: (RIBBENS, 2017, p.218).

3.3 Atuadores principais

Atuadores são dispositivos que recebem sinal elétrico da central eletrônica e produzem uma saída de forma física diferente, como ação mecânica, térmica ou outras. Os atuadores incluem vários tipos de motores elétricos e solenoides (RIBBENS, 2017, p.247).

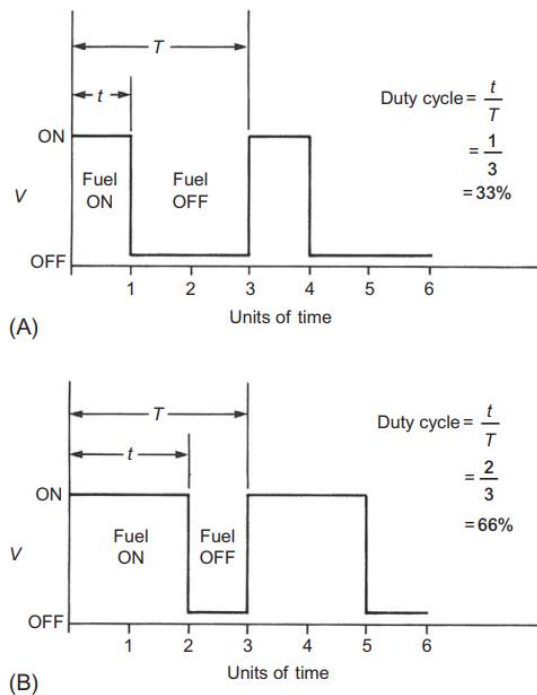
3.3.1 Injetor de combustível

O injetor de combustível é uma válvula operada por solenoide. Instalada em uma linha pressurizada com combustível, a válvula abre e fecha para permitir ou bloquear a passagem desse combustível ao motor. Sem tensão aplicada em seus terminais uma mola a mantém fechada de modo que nenhum combustível passe através de seu bico. Com tensão de amplitude suficiente o solenoide puxa um pino que sai de seu assentamento e permite a passagem de combustível.

Se a pressão da linha de combustível for mantida constante, então a vazão do injetor totalmente aberto é constante, exceto por breves transientes durante a abertura e fechamento da válvula. (RIBBENS, 2017, p.252).

O sinal de controle que atua nos injetores é do tipo PWM e a massa de combustível injetada depende primeiramente da capacidade de vazão desse injetor e o tempo que permanece no estado “on” dentro de um certo período, ou seja, o *duty cycle* que a injeção envia para o atuador.

Figura 24 – Tensão no terminal do injetor.



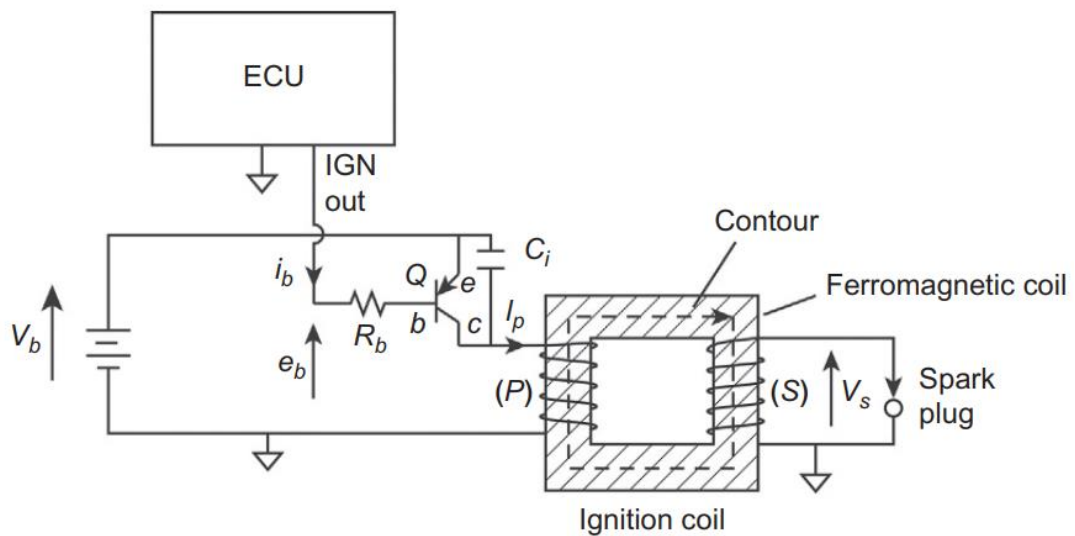
(A) injetando pouco combustível (B) injetando muito combustível.

Fonte: (RIBBENS, 2017, p.253).

3.3.2 Sistemas de ignição

É um sistema formado pelas velas de ignição, pelas bobinas de ignição e pelos circuitos eletrônicos dos drivers conforme mostra a Figura 25.

Figura 25 – Circuito simplificado do sistema de ignição eletrônica.



Fonte: (RIBBENS, 2017, p.270).

A bobina de ignição é formada por duas bobinas e um núcleo ferromagnético. O número de espira no secundário é muito maior que o número de espiras no primário $N_s \gg N_p$. No tempo adequado, determinado pela posição do virabrequim, a ECU envia um sinal que faz o transistor entrar em saturação ligando o primário da bobina. O tempo de permanência deve ser suficiente para atingir a saturação. Esse tempo é chamado tempo “*dwell*”. Quando esse sinal é retirado, o fluxo magnético atua no secundário da bobina gerando uma alta tensão. A tensão no secundário da bobina é de curta duração, porém com alta amplitude devido ao elevado valor de N_s (RIBBENS, 2017, p.270).

3.4 Considerações finais

Nesse capítulo foram apresentados os sensores e atuadores mais comuns que compõem os sistemas de injeção eletrônica indireta de motores ciclo Otto. Alguns conceitos e principalmente os sinais elétricos desses componentes. No capítulo 4 será realizado o desenvolvimento do sistema proposto, desde o diagrama esquemático até o desenho (*layout*) do circuito de controle de injeção.

4 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é apresentado o sistema de gerenciamento de motores utilizado como base para o desenvolvimento do trabalho. São mostradas de forma resumida suas características e as ferramentas necessárias para a sua utilização.

Será realizado o desenvolvimento dos circuitos de condicionamento de sinais e os circuitos de potência de saída e o projeto do PCB (*layout*).

4.1 Sistema de gerenciamento de motores speeduino

Criado pelo australiano Josh Stewart, o speeduino surgiu inicialmente em 2013 por e para “*tinkerers*”, como ele mesmo descreve no site oficial. O termo é uma alusão a uma pessoa que faz adaptações, ajustes, pequenos trabalhos por conta própria, sem a ajuda de um profissional.

Até o surgimento do speeduino havia dois tipos de sistemas de gerenciamento de motores: os originais de fábrica e os *aftermarket* feitos por empresas privadas. Por questões comerciais ou de segredo industrial, obviamente nenhuma das opções se tratava de um projeto aberto com total acesso a esquemáticos, *firmwares* e detalhes do desenvolvimento. A documentação nesses casos, era restrita a manuais de utilização ou manuais de reparação.

Para gerenciar um sistema qualquer, com seus respectivos sensores e atuadores, uma injeção original de fábrica não é uma boa opção se originalmente não foi concebida para aquele sistema específico. Existem injeções programáveis de ótima qualidade que oferecem essa flexibilidade, tanto no mercado nacional, quanto importado, mas custam caro. Milhares de dólares e milhares de reais são preços comuns para esses produtos.

O speeduino então surgiu do desejo de criar um sistema de gerenciamento programável, totalmente aberto e de custo muito baixo (no máximo 100 dólares na época que surgiu). Desde 2013 o speeduino está em desenvolvimento e lança atualizações de seus recursos de *hardware* e *firmware* regularmente. Com o tempo, ele passou a ficar mais conhecido e a comunidade foi crescendo e surgiram inúmeras colaborações.

4.1.1 Características do speeduino

Speeduino tem muitos recursos avançados no controle da injeção, ignição e periféricos do motor. Possui grande flexibilidade permitindo a calibração para todos os sensores e suporta diversos padrões de roda dentada para o sinal de rotação. Muitas das funcionalidades que possui só são encontradas em injeções programáveis de linha *premium* de mercado. A seguir uma lista com algumas funções:

- Controle da injeção por eficiência volumétrica;
- Suporte para motores de 1 a 8 cilindros;
- Injeção e Ignição sequencial para motores até 4 cilindros;
- Mapas de 16x16 totalmente interpolados para combustível, avanço de ignição e AFR alvo;
- *Logging* detalhado e de alta velocidade;
- Função *Launch control*;
- Suporte para *Flex fuel*;
- Mapas secundários;
- Função *staged injection*, pode controlar duas bancadas de injetores;
- Controle de marcha lenta on/off, PWM, PWM 3 fios e motor de passo em malha aberta e malha fechada;
- Controle do eletro ventilador, bomba temporizada e tacômetro;
- Controle do sistema VVT;
- *Boost control* em malha aberta e malha fechada.

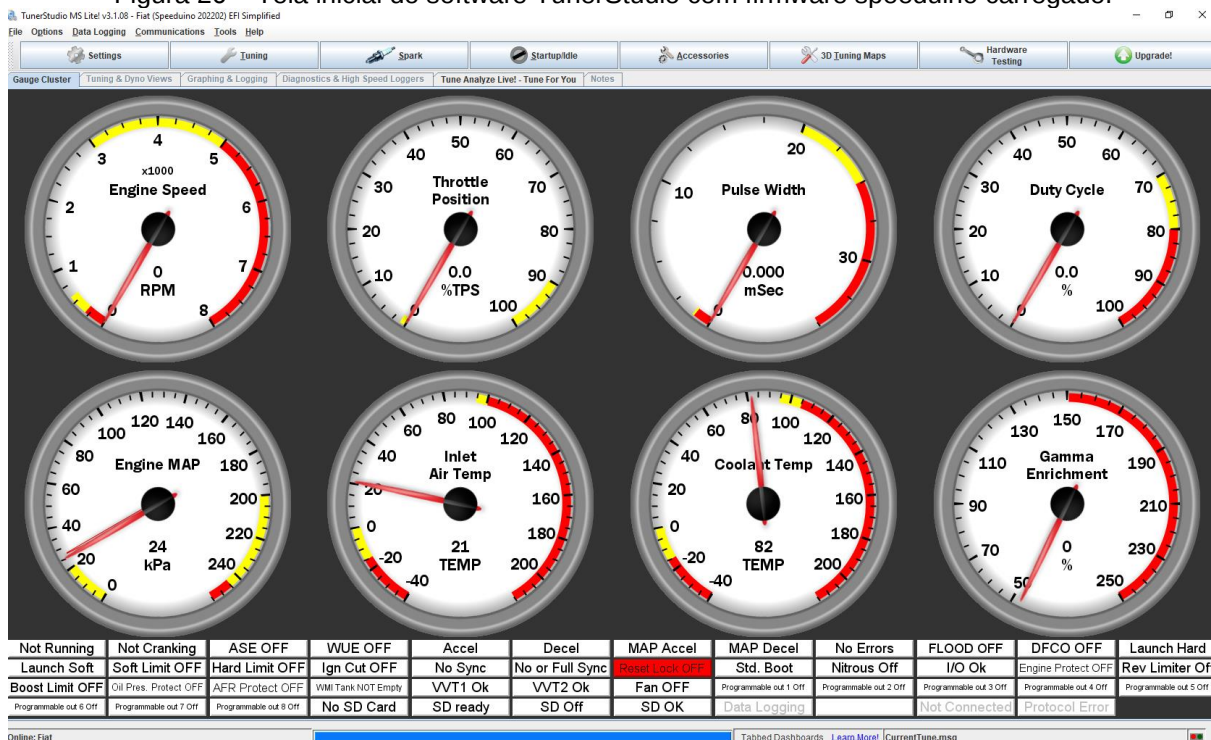
4.1.2 Ferramentas para utilizar o speeduino

Para utilização do speeduino alguns componentes são necessários. São essenciais: o *software*, o *firmware* e o *hardware*.

O *software* – Speeduino utiliza o software TunerStudio MS disponível em versão gratuita nas plataformas *Windows* e *Linux*. Criado pela *EFI Analytics*, o *software* é o ambiente onde se faz as calibrações de sensores, construção de mapas de combustível e ignição e toda configuração existente na injeção programável.

O software grava esses dados na memória da ECU. O monitoramento das variáveis em tempo real também é possível, funcionando assim como uma Interface Homem-Máquina (HMI) conforme mostra a Figura 26.

Figura 26 – Tela inicial do software TunerStudio com firmware speeduino carregado.



Fonte: O autor.

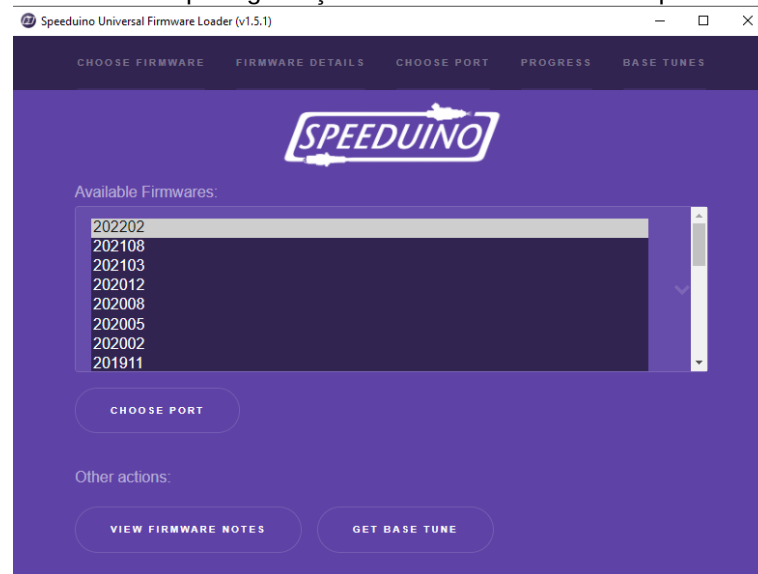
O *firmware* – O firmware fica gravado na memória do microcontrolador e é responsável pelo funcionamento do equipamento em si. Criado por Josh Stewart e colaboradores da comunidade speeduino, o *firmware* faz o controle da injeção recebendo os sinais dos sensores e controlando as saídas de potência dos atuadores. Atua também na comunicação serial com o *software* e com aplicativos *mobile* de terceiros, recebendo dados de configurações e enviando dados de monitoramento em tempo real.

Para a gravação do *firmware*, a ferramenta chamada *speedyloader* baixa automaticamente os arquivos necessários e grava o *firmware* diretamente no microcontrolador através da porta USB, conforme mostra a Figura 27.

Para acesso direto ao código fonte, seja para consulta, alterações ou gravação manual, está disponível para descarga em página do *github* todos os arquivos

incluindo os esquemáticos, desenho (*layout*) das placas base speeduino e lista de componentes. Todos os links e informações são encontrados facilmente no site oficial.

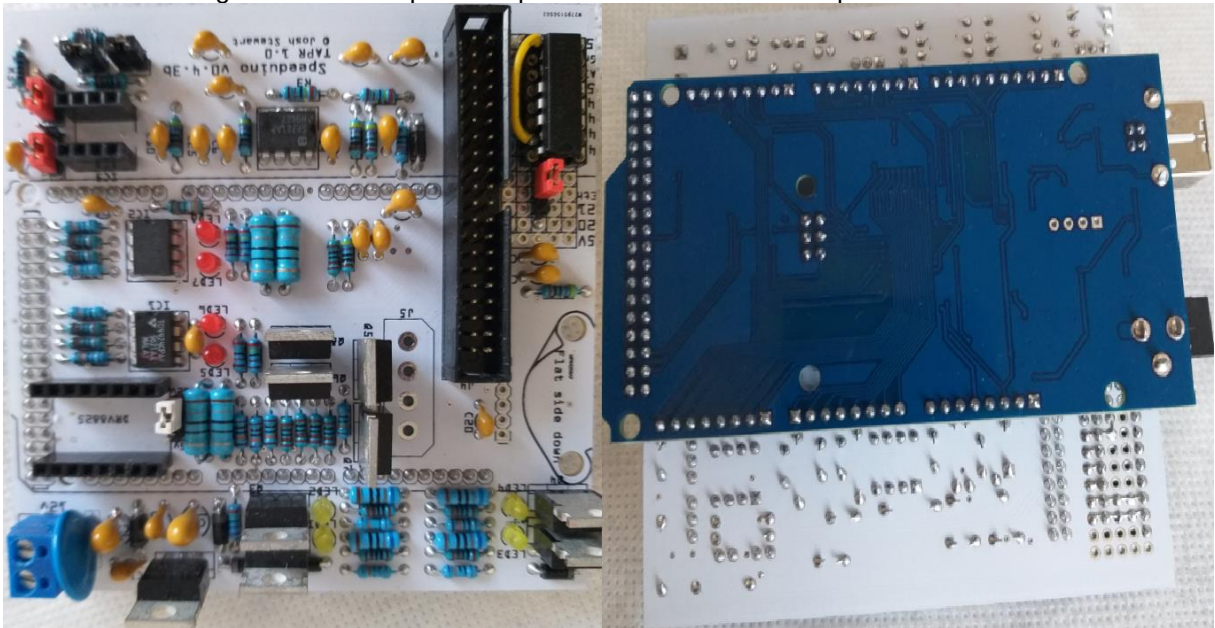
Figura 27 – Ferramenta para gravação do firmware e demais arquivos necessários.



Fonte: O autor.

O hardware – O speeduino utiliza como microcontrolador uma placa Arduino Mega 2560 conectada à uma outra PCB de 100x100mm onde há os circuitos de fonte, circuitos condicionadores de sinal, proteção e potência. A Figura 28 mostra uma versão bastante comum com componentes do tipo *pin through hole* (PTH), com montagem dos terminais passando através de orifício.

Figura 28 – Placa padrão Speeduino V0.4.3b. Vista superior e inferior.



Fonte: O autor.

Aplicativos *mobile* – Opcionalmente é possível ter uma Interface Homem-Máquina (HMI) em dispositivos móveis utilizando aplicativos de terceiros. A comunicação pode ser via USB ou *bluetooth*.

A Figura 29 ilustra duas ferramentas gratuitas para Android comumente utilizadas em conjunto com o speeduino.

Figura 29 – Aplicativos para Android. RealDash à esquerda e MSDroid à direita.



Fonte: O autor.

4.2 Motivação para o desenvolvimento de um novo layout

O speeduino pode ser facilmente replicado utilizando ferramentas relativamente simples. Em sua versão PTH basta realizar a aquisição dos componentes, enviar o projeto da placa para um fabricante e posteriormente, realizar

a montagem que pode ser feita com um simples ferro de solda. Porém, se houver a necessidade de se produzir em uma escala um pouco maior ou a necessidade de um produto finalizado, com case e chicote, encontram-se as seguintes barreiras:

- **Tempo soldagem muito longa** – A montagem no padrão PTH requer diversas etapas manuais e a soldagem é ponto a ponto. A limpeza após término do processo também é complicada. Uma placa finalizada nesse processo leva horas de trabalho e a produção é feita somente uma unidade por vez.
- **Conector principal com posicionamento ruim e dificuldade de confecção do chicote** – No speeduino utiliza-se o conector IDC-40, muito semelhante a conectores utilizados em equipamentos de informática antigos. Esse conector traz inúmeras desvantagens e que torna a confecção do chicote extremamente trabalhosa e demorada. O espaço para encaixar os cabos é muito estreito e exige cabos especiais de espessura reduzida no material isolante, para que não seja perdida a capacidade de corrente adotando um cabo de bitola menor. Mesmo assim, os terminais *dupont* utilizados nesse conector são bastante frágeis e limitados em corrente para uma aplicação automotiva. Um melhor posicionamento do conector também é desejado.
- **Adaptação da case** – Speeduino padrão não tem case específica. Em todos os casos é adaptado em gabinetes genéricos de plástico ou alumínio ou impressos em 3d. Em nenhuma das alternativas é uma solução barata e rápida ao mesmo tempo e o acabamento fica como de uma adaptação e não de um produto finalizado.
- **Adaptação do *Vr conditioner*** – No *hardware* do speeduino original para que seja compatível com sensores de rotação e fase do tipo indutivo, um módulo adicional é necessário. Chamada de *variable reluctance signal conditioner (VR conditioner)*, esse módulo faz a conversão do sinal analógico desse sensor em sinal digital para a ECU. Por ser separada, acaba pesando nos custos de produção de PCB. Esse pequeno circuito se integrado à ECU principal, reduziria os custos.

- **Sensibilidade no plano de terra** – As placas speeduino foram construídas com apenas um único plano de terra. Acredita-se que por esse motivo o speeduino é relativamente sensível à ruídos no plano de terra. Um desenho (*layout*) mais aperfeiçoado pode trazer benefícios nesse aspecto.
- **Placa speeduino padrão SMD** – Existe uma versão que adota os componentes todos em SMD. Essa característica permite adotar técnicas que diminui muito o tempo de produção em relação às placas PTH. Possibilita também a confecção de mais unidades por vez e a limpeza é mais simples, ou seja, melhora significativamente todos os processos de produção. Porém, o projetista adotou nas saídas de potência *dual MOSFETS* com *package* SOIC-8. *MOSFETS* com essas características e com as tecnologias necessárias para esse projeto são muito específicos e difíceis de serem encontrados, mesmo em modelos equivalentes para substituição. Os outros problemas citados nas versões PTH também permanecem nessa versão em SMD.

Como visto, a melhor maneira de resolver todos esses detalhes ao mesmo tempo é projetando um novo layout, trazendo melhorias em todos os aspectos.

Nesse trabalho será realizado a construção do esquemático, tendo como base o circuito original, fazendo análises e desenvolvimento dos filtros, dos circuitos de condicionamento de sinais e dos circuitos de saída, realizando alterações, melhorias e incorporando mais funções suportadas pelo *firmware* e que não estão disponíveis no *hardware* padrão.

No layout da PCB espera-se alcançar:

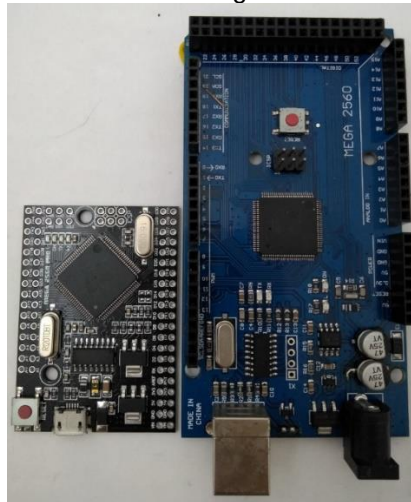
- Melhor posicionamento dos componentes;
- Adotar conector de padrão automotivo;
- Adotar gabinete mais apropriado;
- Utilizar somente componentes discretos nos circuitos de saída;
- Selecionar componentes nas saídas de potência com tecnologias e proteções para aumento da robustez e longevidade da ECU;
- Adotar trilhas com maior capacidade de corrente nas saídas de potência;
- Aplicar técnicas de design para melhor mitigação de ruídos no plano de terra;

- Separar os planos de terra;
- Reduzir o tamanho da placa (menor que 100x100mm);
- Aumentar a quantidade de leds para efeito de diagnóstico visual;
- Integrar placa *bluetooth*, circuito *vr conditioner*, sensor MAP, circuito do sensor barométrico;
- Prever conexão para serial 3.

4.3 Microcontrolador

Como a miniaturização é importante nesse projeto, a placa controladora escolhida é o Arduino Mega PRO. Difere-se da placa utilizada pelo speeduino padrão apenas em tamanho e disposição dos pinos, conforme mostra a Figura 30 . Ambas utilizam o mesmo microcontrolador ATMEGA2560.

Figura 30 – Comparativo entre Arduino Mega PRO e Arduino Mega 2560 clássico.



Fonte: O autor.

4.4 Desenvolvimento dos circuitos de entrada e de condicionamento de sinais

Para o desenvolvimento do projeto é utilizado o *software open source* Kicad. Esse software é do tipo plataforma cruzada e fornece a captura do esquemático e *layout* de PCB com saída *gerber*.

A partir desse ponto será apresentado o desenvolvimento do circuito, com explicação do funcionamento e se necessário algumas formulações matemáticas que possam auxiliar no entendimento do que foi desenvolvido.

4.4.1 Circuito da fonte

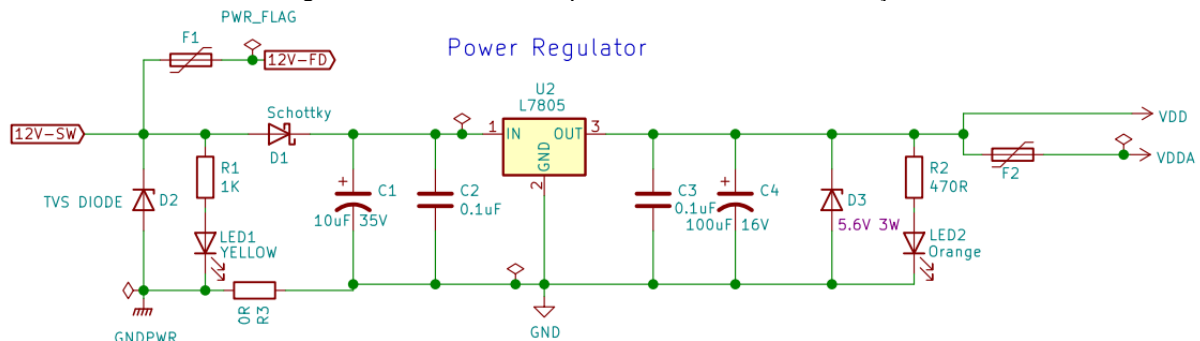
Existem formas diferentes de se alimentar uma placa Arduino. Uma delas é fornecendo alimentação +5Vcc estabilizada diretamente à placa sem passar pelo seu regulador interno, através do pino 5V.

A utilização do Arduino nesse projeto simplifica bastante o circuito de fonte de alimentação, pois com uma única fonte de +5Vcc estabilizada é possível alimentar tanto o microcontrolador quanto os sensores.

A grande maioria dos sensores dos sistemas de injeção eletrônica que necessitam de alimentação, recebem +5Vcc da própria ECU e fornecem sinais digitais ou analógicos com nível de tensão de 0 – 5V. Isso faz com que não seja necessário nenhum conversor de nível lógico nas entradas, pois esses sinais são compatíveis com as entradas do Arduino.

Para reduzir a tensão de 12~13,6Vcc da bateria do veículo para 5Vcc é possível utilizar conversores abaixadores cc-cc ou reguladores lineares. Para realizar a conversão, optou-se pelo regulador. Embora menos eficiente, fornece uma saída muito limpa e a aplicação é bem simples, necessitando apenas de alguns capacitores para filtragem. A Figura 31 mostra o circuito completo da fonte de alimentação.

Figura 31 – Circuito completo da fonte de alimentação.



Fonte: O autor.

Algumas proteções foram inclusas, como proteção contra reversão (D1) e proteção contra surtos na entrada de alimentação 12V (D2). Leds para indicação de 12v e 5v foram previstos e fusíveis autorresetáveis (F1 e F2) para alimentação dos sensores externos à placa e para alimentação do driver motor de passo.

Nos capacitores (C1 e C4) optou-se por utilizar capacitores de tântalo. Comparando com os eletrolíticos por exemplo, tem-se principalmente uma maior vida útil e menores dimensões.

O Diodo (D3) é uma proteção adicional caso o regulador apresente alguma falha ou tensões mais altas que 5,6V inseridas por acidente na saída +5V para sensores.

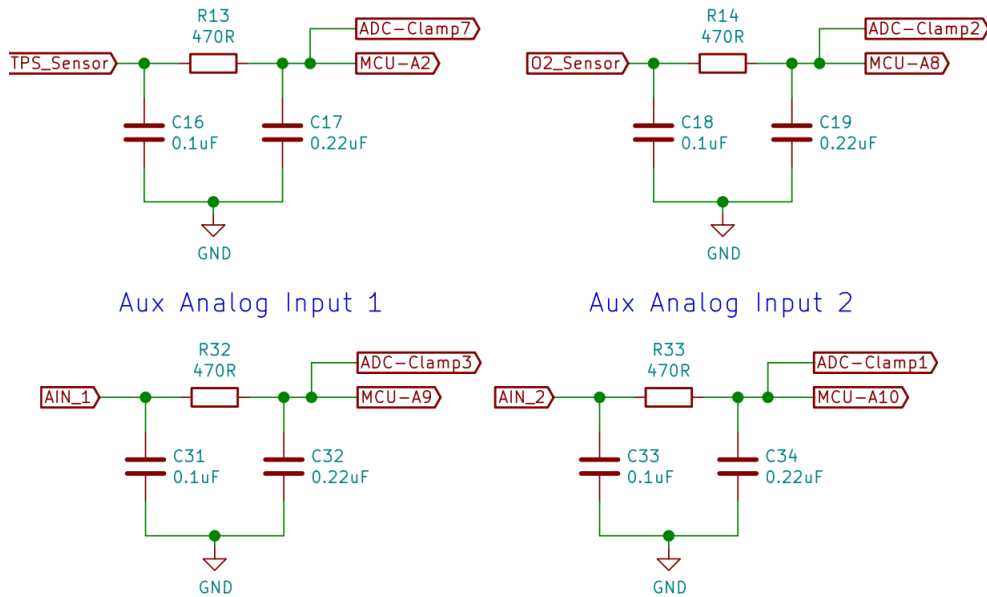
4.4.2 Filtros e proteções nas entradas analógicas

A maioria das entradas analógicas vindas dos sinais dos sensores do motor são entradas com sinais de 0-5V de baixa frequência. Um grande problema nas injeções eletrônicas automotivas é a presença de ruídos captados pelos cabos devido ao ambiente ruidoso onde são instalados. Possíveis fontes de ruído: interferências eletromagnéticas e laços de terra. Sendo assim, é importante que as entradas tenham algum tipo de filtro que permita passar os sinais CC de baixa frequência e atenuar os sinais de mais alta frequência.

Para ligar esses sinais ao microcontrolador é previsto um resistor em série e um circuito contra sobretensão na entrada como formas de proteção.

A função do capacitor antes do resistor é filtrar os ruídos inerentes do circuito desde os cabos e trilhas da PCB, até o resistor de entrada. O resistor serve para limitar a corrente para o circuito de proteção em caso da tensão aplicada na entrada for maior que 5V. Já o capacitor após o resistor fica localizado o mais próximo possível do pino de entrada do microcontrolador, no intuito de mitigar as frequências indesejadas. A Figura 32 mostra o circuito proposto.

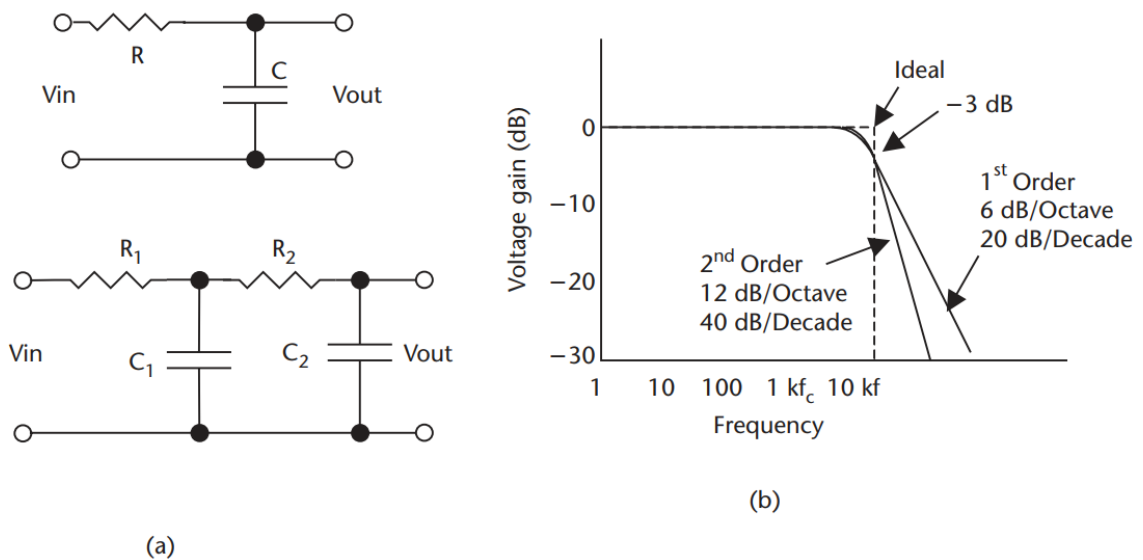
Figura 32 – Entradas analógicas TPS, O₂, Aux₁ e Aux₂.
Throttle Position Sensor O₂ sensor



Fonte: O autor.

A frequência de corte (f_c) é definida como a frequência que a saída é reduzida a -3dB ou $0,707V_{in}$ (DUNN, 2006, p.32). A Figura 33 mostra que até próximo da frequência de corte o ganho é unitário e depois da frequência de corte é atenuado 20dB/década para o filtro de primeira ordem e 40dB/década para filtros de segunda ordem.

Figura 33 – Filtro passa-baixas RC.



(a) Filtro de primeira e segunda ordem e, (b) característica ganho x frequência.

Fonte: (DUNN, 2006, p.32).

A frequência de corte (f_c) de um filtro passa-baixas de primeira ordem pode ser definida através da equação:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (11)$$

Fazendo para os valores dos componentes do projeto tem-se que a frequência de corte é aproximadamente $f_c = 1,5 \text{ kHz}$.

4.4.3 Entradas dos sensores de temperatura

A leitura dos sensores de temperatura resistivos pode ser feita transformando o sinal de resistência em um sinal de tensão. Isso pode ser feito por circuito divisor de tensão ou por configuração em ponte.

A ponte de Wheatstone por exemplo, apresenta resolução muito melhor que os divisores de tensão. É comumente utilizada para converter pequenas mudanças de impedância em tensão e depois disso podem ser amplificadas para obter alta sensibilidade (DUNN, 2006, p.34).

Como visto anteriormente no item 3.2.4, os sensores de temperatura automotivos variam muito a resistência com pequenas mudanças de temperatura e, portanto, um divisor de tensão pode ser usado sem nenhum problema de resolução.

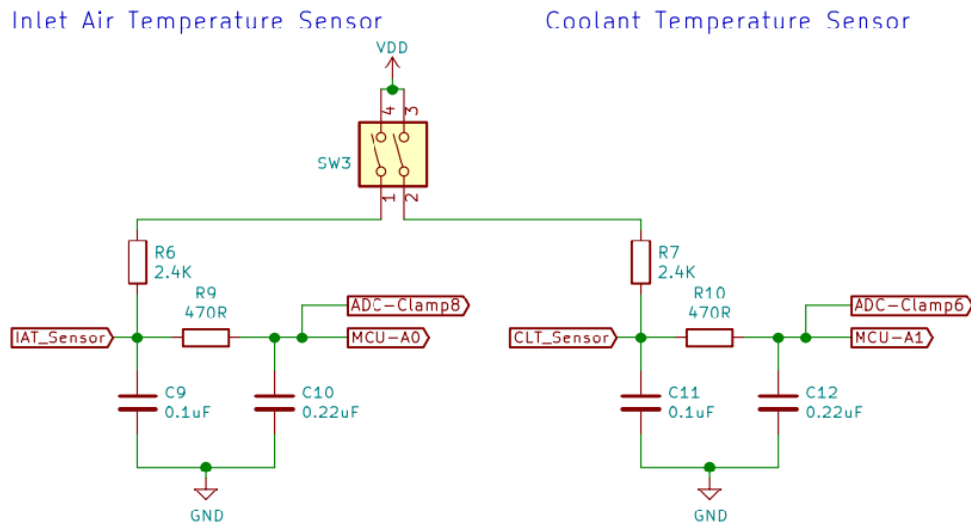
Para simplificar o circuito, um divisor de tensão é aplicado na entrada dos sensores de temperatura. A equação 12 mostra como é feita a conversão de resistência para tensão que pode ser lida pelo microcontrolador.

$$V_{out} = V_{dd} \times \frac{R_{sensor}}{R_{Pup} + R_{sensor}} \quad (12)$$

No qual, $V_{dd} = 5V$ e R_{Pup} é o resistor de *pull-up* escolhido.

O circuito é mostrado na Figura 34.

Figura 34 – Circuito dos sensores de temperatura.

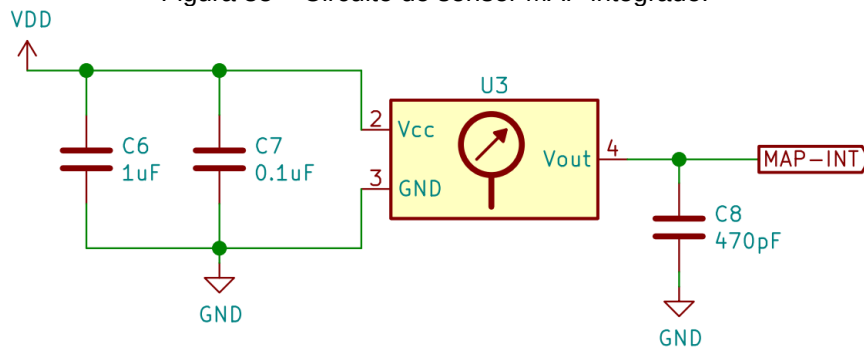


Fonte: O autor.

4.4.4 Circuito do sensor MAP

O circuito do sensor MAP integrado é bem simples contendo apenas capacitores de desacoplamento na alimentação e um pequeno filtro capacitivo na saída, seguindo as orientações do datasheet do fabricante. A Figura 35 ilustra o circuito proposto.

Figura 35 – Circuito do sensor MAP integrado.



Fonte: O autor.

4.4.5 Circuito do sensor de rotação e do sensor de fase (VR conditioner)

No item 3.2.2.2 verificou-se que os sensores do tipo HALL possuem sinal digital em sua saída (onda quadrada) e que a amplitude desse sinal é definida apenas pelo

resistor de *pull-up*. Esse tipo de sensor pode ser ligado diretamente ao microcontrolador sem nenhum problema.

Os sensores indutivos apresentam um sinal analógico (próximo à uma senoide) e que varia em frequência e amplitude dependendo da rotação do motor. Sendo assim, necessita-se de um circuito adicional que transforme esse sinal analógico em digital com frequência variável e amplitude fixa. Esse circuito é conhecido como *variable reluctance signal conditioner (VR conditioner)*.

O sinal de rotação é um dos sinais mais importantes para o funcionamento da injeção, pois é através dele que os tempos e sincronismos de todos os sistemas são referenciados e calculados. Uma falha no sinal desse sensor, a injeção perde o sincronismo ou até causa a parada total do motor. O sinal do sensor indutivo é o mais afetado por interferências eletromagnéticas e requer cuidados maiores durante o projeto do circuito e durante a instalação.

Na tentativa de realizar a interface do sinal analógico dos sensores de relutância variável e ao mesmo tempo gerar uma saída robusta, mesmo na presença de ruído considerável nos fracos sinais desses sensores, optou-se pela adoção do circuito integrado MAX9926.

O MAX9926 é um dispositivo dedicado para promover a interface de sensores de relutância variável automotivos bastante robusto e compacto, sua aplicação ocupa apenas uma pequena área da PCB.

Características:

- Entradas diferenciais que promovem imunidade à ruído aprimorado;
- Amplificadores operacionais de precisão e comparador que promovem a detecção de pequenos sinais;
- Limite de pico adaptativo (*adaptative peak threshold*);
- Detecção de cruzamento zero ([MAXIM INTEGRATED, 2018](#)).

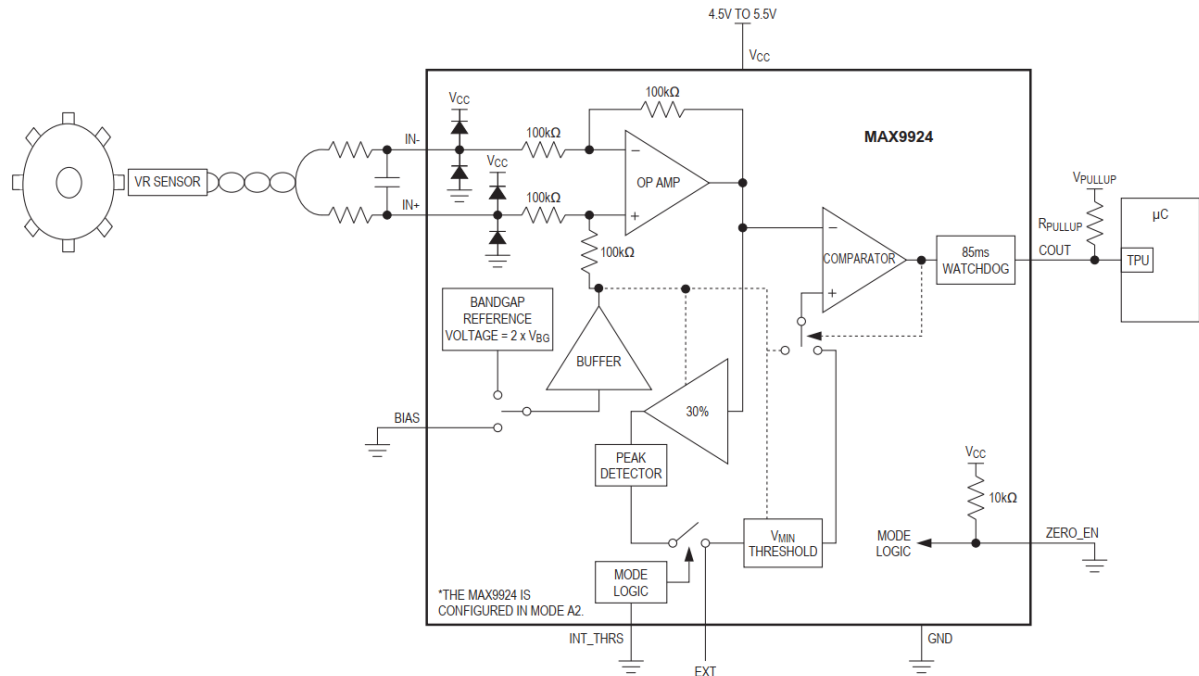
Um diagrama de blocos é mostrado na Figura 36.



Nesse projeção, entou-se pelo modo A2 descrito no *datasheet*, pois nesse modo

INT_THRS e BIAS. O datasheet traz um exemplo de um circuito típico para o modo A2, conforme mostra a Figura 37.

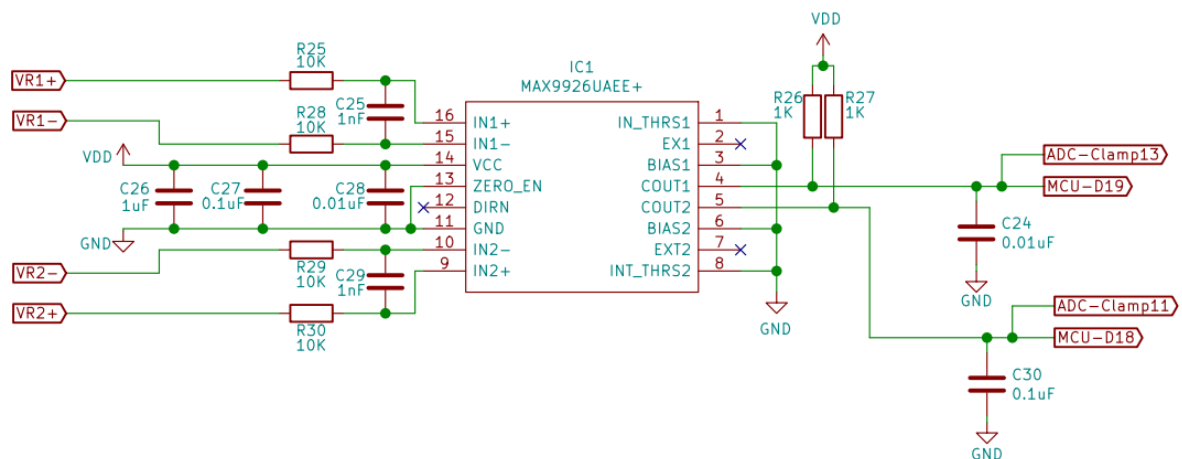
Figura 37 – Circuito típico para o modo de operação A2.



Fonte: (MAXIM INTEGRATED, 2018).

Para entendimento de como cada um desses circuitos promovem a maior robustez na leitura dos sinais de sensores VR é indicado a leitura completa da documentação desse componente. A Figura 38 mostra como ficou a implementação desse circuito.

Figura 38 – Circuito condicionador de sinal para sensor de relutância variável.



Fonte: O autor.

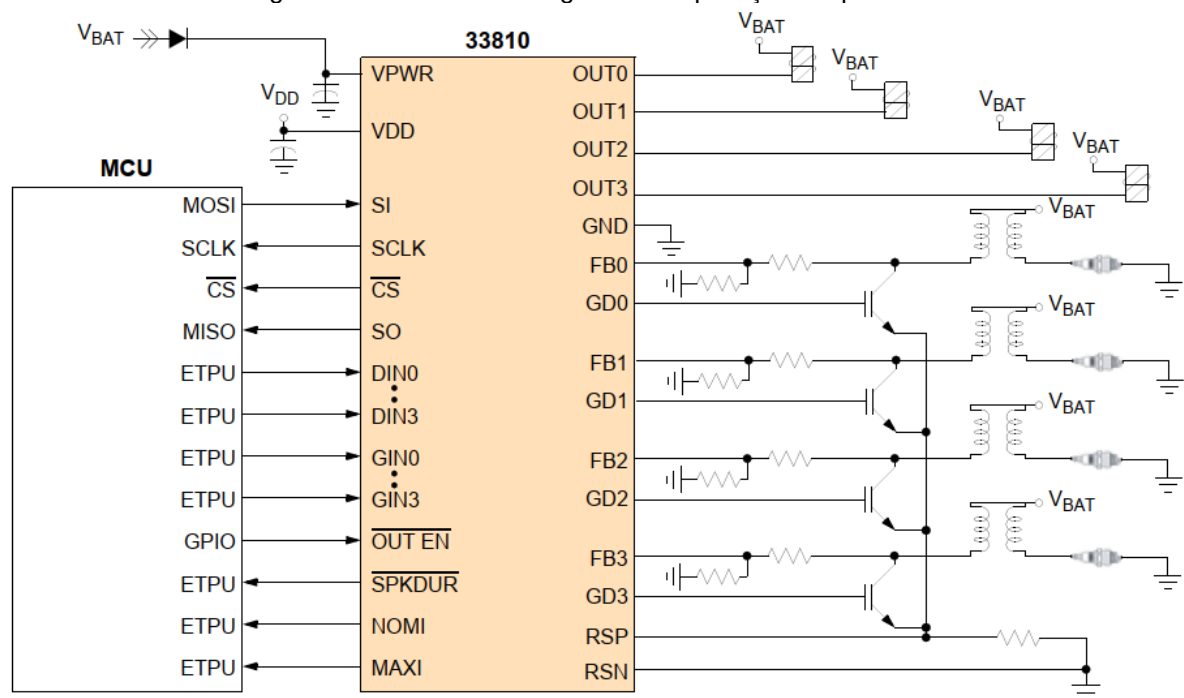
4.5 Desenvolvimento dos circuitos de saída

4.5.1 Saídas de potência para injetores e atuadores

Existem duas formas de se desenvolver os circuitos de saída de potência de um sistema de injeção eletrônica: usando circuitos integrados ou utilizando componentes discretos.

Há diversos modelos de circuitos integrados dedicados e de diferentes fabricantes que fornecem em um único componente quase todas as etapas de potência necessária para a aplicação em sistemas de injeção eletrônicas automotivas. Alguns permitem o controle direto das saídas através de pinos correspondentes de entrada, já outros utilizam o protocolo de comunicação SPI (*Serial Peripheral Interface*) para se comunicar com o microcontrolador e acionar as saídas. Alguns modelos aceitam os dois métodos. A Figura 39 mostra um exemplo de aplicação de um integrado da Freescale.

Figura 39 – MC33810. Diagrama de aplicação simplificado.



Fonte: (FREESCALE, 2014).

Apesar de facilitar bastante a aplicação, economizar espaço na PCB e reduzir o número de componentes, optou-se em não utilizar esse tipo de solução pelos motivos:

Baixa corrente máxima por saída: os integrados são projetados para uso com sistemas originais de fábrica. Nesses sistemas é comum utilizar apenas um único injetor por saída. Além disso, como estão em ambientes controlados, o projetista sabe as características dos atuadores e como serão instalados. Em uma injeção programável as possibilidades de instalação são muitas e a previsibilidade fica difícil. Ligações com mais de um injetor em paralelo por saída são bastante comuns. Sobrecarregar o integrado pode trazer problemas de dissipação térmica e até danificar o componente.

Manutenção mais complicada: a falha de um único componente afeta quase todas as saídas de potência. O componente é muito específico, pois além do encapsulamento, do *footprint* na PCB, do número de pinos e função de cada um, a substituição por modelo equivalente se torna quase impossível. Isso é um ponto muito negativo se o componente se torna obsoleto por exemplo, ou se os poucos fornecedores deixam de oferta-lo ou se sua escassez no mercado o torne caro demais.

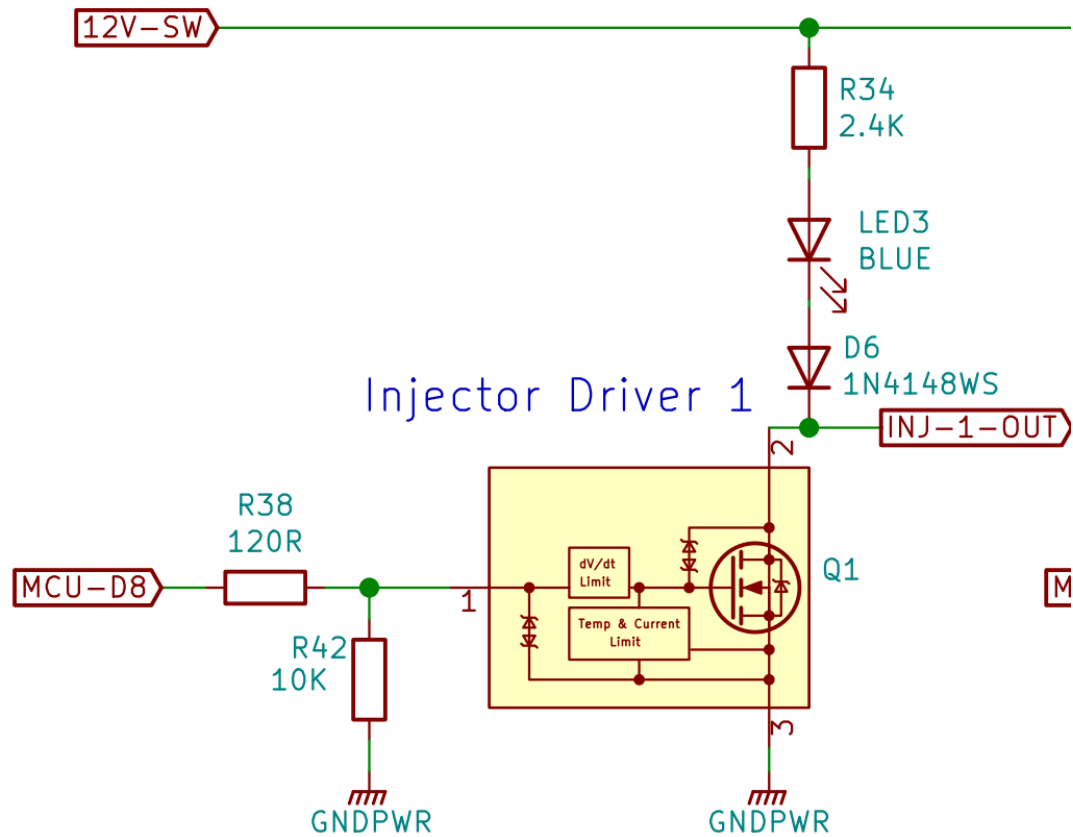
Por essas e outras questões optou-se por utilizar somente componentes discretos nas saídas. Para aumento da confiabilidade e robustez um estudo minucioso foi realizado para a escolha desses componentes.

Como as cargas são em sua maioria do tipo indutivas, não se pode utilizar *MOSFETs* comuns em uma injeção eletrônica. Assim, levantou-se alguns critérios necessários para a escolha dos componentes no intuito de obter maior robustez, redução de circuitos externos de proteção, menor preço possível.

Características dos MOSFET's: Os MOSFET's devem ser adequadas para cargas indutivas (clamp de sobretensão), proteções adicionais são desejáveis (proteção contra curto circuito, sobrecorrente, sobre temperatura), menor $RDS_{(on)}$ possível, maior capacidade de corrente possível, verificar se o nível lógico alto do microcontrolador é compatível para acionar o *gate* da chave (VGS), escolher um *package* comum.

O circuito proposto em cada saída dos injetores é mostrado na Figura 40.

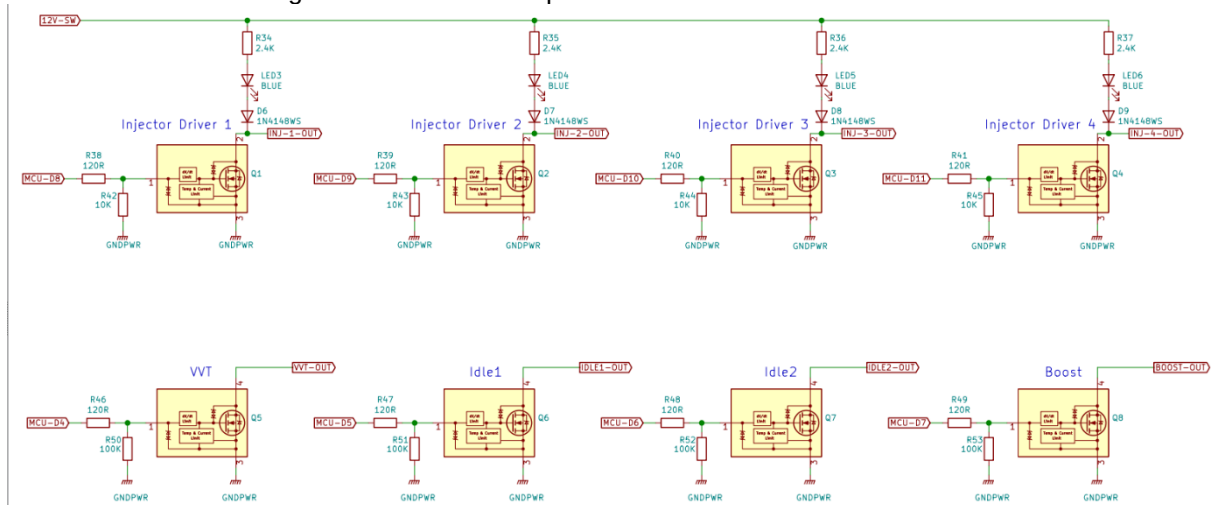
Figura 40 – Saída de potência para injetores.



Fonte: O autor.

As saídas para o restante dos atuadores possuem os mesmos critérios e diferenciam-se apenas pela ausência dos leds indicativos que as saídas dos injetores possuem. A etapa de potência completa está representada na Figura 41.

Figura 41 – Mosfets de potência das saídas dos atuadores



Fonte: O autor.

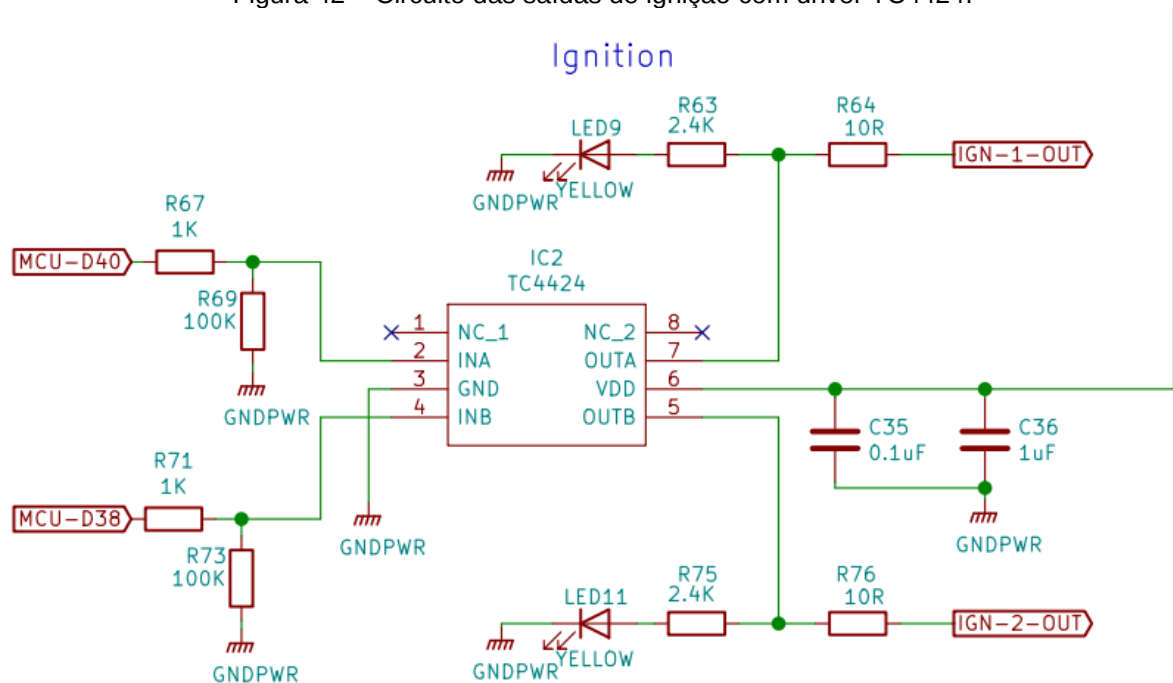
4.5.2 Saídas de ignição

As saídas de ignição foram projetadas para acionar bobinas que possuam módulo de ignição integrado ou externo à ECU. Nesse tipo de configuração a injeção eletrônica envia apenas o sinal de acionamento sem efetuar chaveamento de potência em seu interior. Mesmo assim, não é recomendável que o microcontrolador acione diretamente esses dispositivos sem nenhum tipo de amplificação. Para isso adotou-se os drivers TC4424 da microchip.

O circuito TC4424 possui drivers para MOSFETs do tipo dual não-inversores, de alta velocidade e de relativo baixo custo. Promovem economia de espaço em sua aplicação e fornecem alto pico de corrente de saída (3A). Sua finalidade no circuito é operar como um *buffer* e tornar as saídas de ignição mais robustas em ambientes elétricos agressivos.

O circuito proposto é mostrado na Figura 42.

Figura 42 – Circuito das saídas de ignição com driver TC4424.



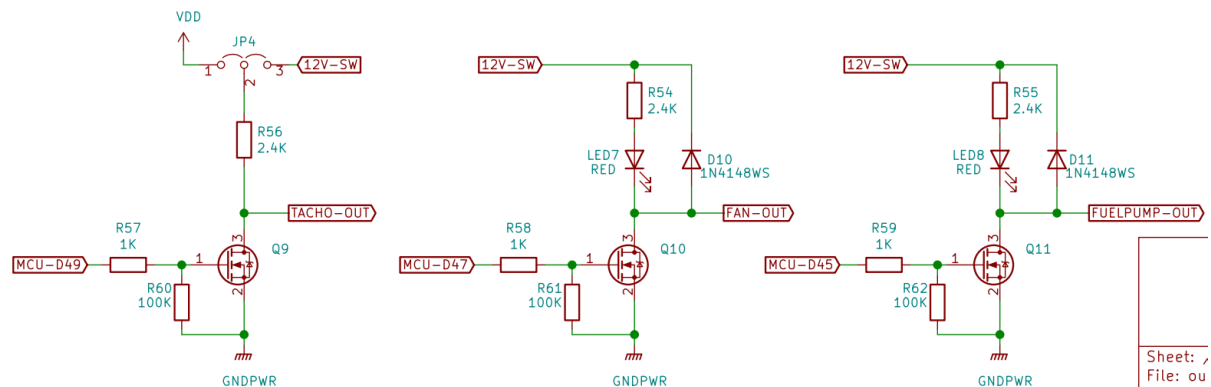
Fonte: O autor.

4.5.3 Saídas de baixa corrente para relês e acessórios

As saídas que acionam os relês não tem necessidade de ter alta corrente e nem tecnologias avançadas de proteção como as saídas para injetores e atuadores gerais. Como as cargas são acionadas indiretamente, a ECU deve fornecer apenas uma pequena corrente que seja suficiente para acionar as bobinas dos relês.

Adotou-se pequenos transistores comuns para economia de espaço e foi incluído um diodo roda livre para proteção contra cargas indutivas (bobina do relê). A Figura 43 mostra os circuitos de acionamento de relê que acionam o eletroventilador e a bomba de combustível. O circuito do tacômetro não aciona relê, mas também é de baixa corrente.

Figura 43 – Circuito das saídas do tacômetro, eletroventilador e bomba temporizada, respectivamente.



Fonte: O autor.

4.6 Desenvolvimento do layout da PCB

O desenvolvimento do *layout* da placa de circuito impresso (PCB) é o processo onde os objetivos apontados no item 4.2 *Motivação para o desenvolvimento de um novo layout* serão projetados e resolvidos.

Após o desenvolvimento do esquemático, é feita a anotação dos símbolos (ferramenta que nomeia cada um deles em ordem definida pelo software) e começa a atribuição dos *footprints* correspondentes a cada símbolo do esquemático. *Footprint* é a forma como os componentes serão representados na PCB, distância e tamanho dos *pads*, furos, etc.

Esse processo pode se tornar bem longo e trabalhoso. Nesse tipo de projeto poderá haver alguns componentes que não estão nas bibliotecas padrões do *software*

e tão pouco disponíveis em outros meios. Uma biblioteca própria deve ser criada para elaboração de todos os elementos necessários.

O Kicad possui as ferramentas necessárias para elaboração dos símbolos para esquemático (editor de símbolos) e dos *footprints* utilizados no layout da PCB (editor de *footprints*). Uma boa forma de fazer esse trabalho, caso outras alternativas estejam indisponíveis, é consultar o datasheet do componente ou da peça a ser projetada no item de *package information*. Nessa seção o fabricante informa as medidas do componente e pode informar também as medidas do *footprint*.

Após todos os componentes estarem com os *footprints* definidos, iniciou-se a construção do *layout* da PCB. O gabinete a ser utilizado é mensurado para definir as dimensões da PCB.

Algo muito importante antes de começar a rotear as trilhas e prosseguir com o projeto é investigar quais são as capacidades do fabricante de PCB (*PCB capabilities*). Essas informações são úteis para definir alguns critérios como espessura de trilha mínima, distância entre vias, distância entre furos, diâmetro mínimo e máximo de furos, distância entre trilha e borda da placa, distância entre trilhas, etc.

Visando a maior robustez e longevidade do equipamento e maior imunidade à ruídos, aplicou-se diversas técnicas para a confecção do *layout*. O posicionamento dos componentes, adequação à case utilizada, espessuras de trilhas, adoção de vias térmicas e separação dos planos de terra.

4.7 Considerações finais

Nesse capítulo foi apresentado o projeto *open source* que serviu como base para esse trabalho. Foi mostrada uma descrição mais detalhada dos problemas que levaram ao desenvolvimento desse projeto. Foi desenvolvido os circuitos de condicionamento dos sinais de entrada e os circuitos de potência das saídas para atuadores. No capítulo 5 serão apresentados os resultados, a montagem da ECU, as ferramentas para utilização da injeção e alguns testes de funcionamento.

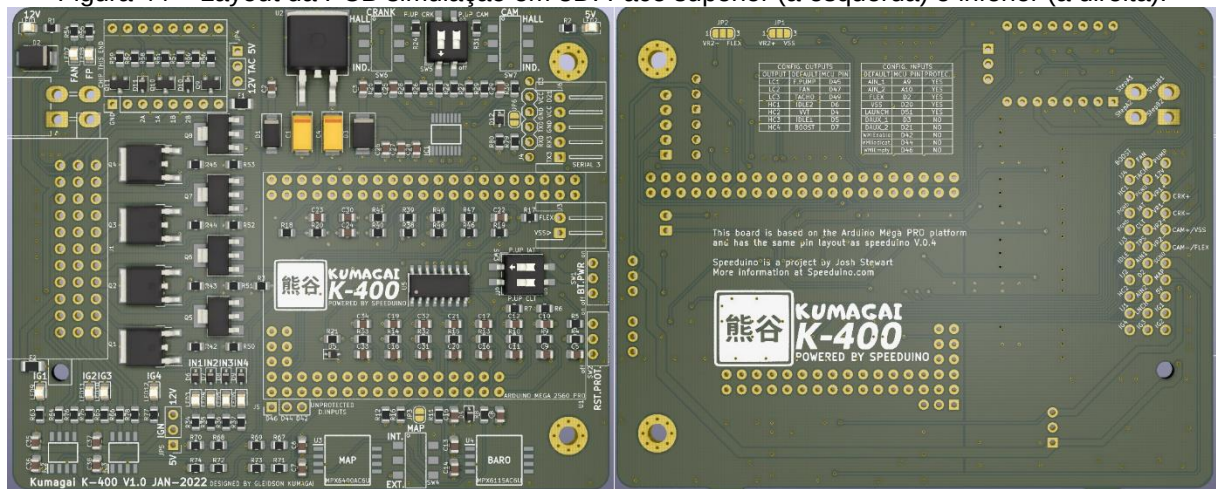
5 RESULTADOS E TESTES DE FUNCIONAMENTO

Neste capítulo é apresentado o resultado do projeto finalizado e testes em bancada do funcionamento geral utilizando as ferramentas da própria plataforma *open source* speeduino.

5.1 Layout da PCB finalizado

Após o posicionamento dos componentes e o roteamento das trilhas a Figura 44 mostra o resultado obtido em simulação 3d no software Kicad.

Figura 44 – Layout da PCB simulação em 3D. Face superior (à esquerda) e inferior (à direita).

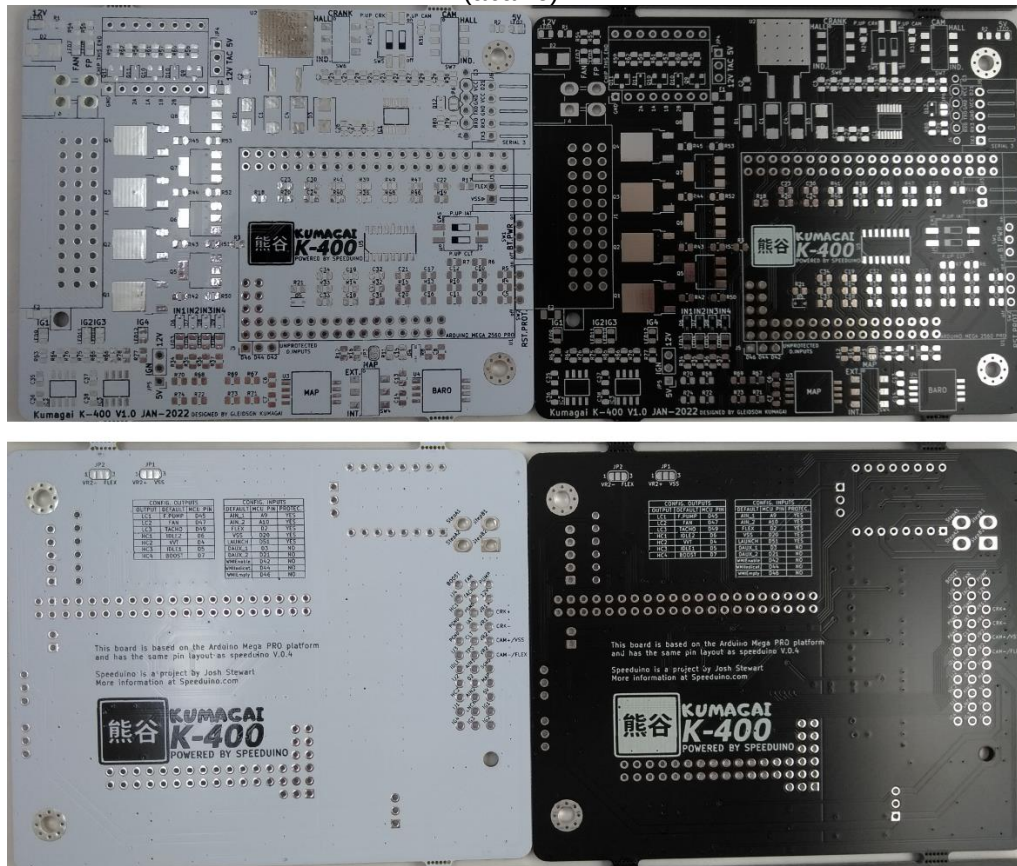


Fonte: O autor.

5.2 ECU finalizada

Uma vez finalizado todos os processos, foram gerados os arquivos *gerber* e encaminhados ao fabricante de PCB. Foram enviados a dois fabricantes diferentes para testes de velocidade de logística. Diferentes acabamentos de cores foram escolhidos e o resultado é mostrado na Figura 45 .

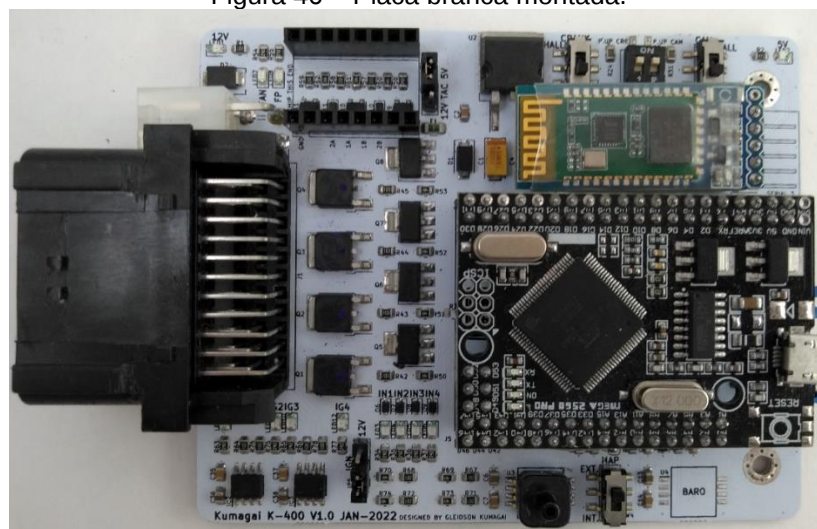
Figura 45 – Placas nas cores branco e preto. Vista da face superior (acima) e vista da face inferior (abaixo).



Fonte: O autor.

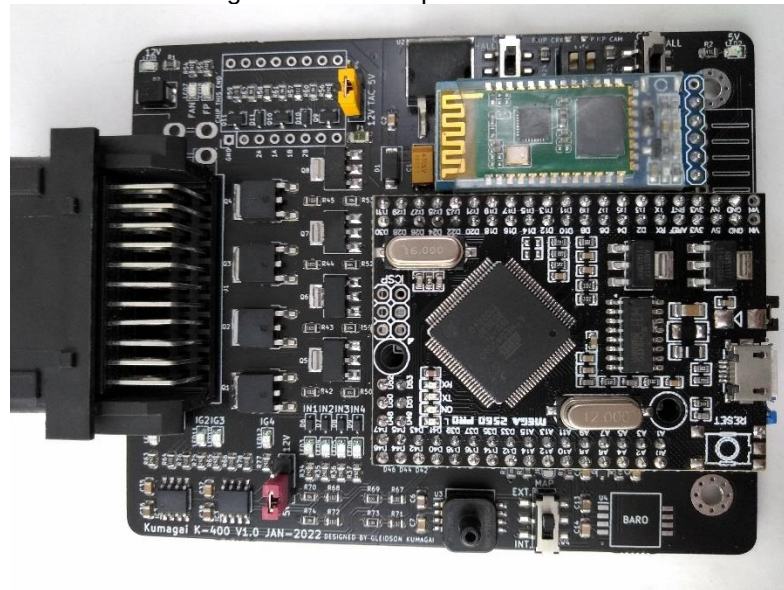
É realizada a montagem dos componentes e os resultados são mostrados na Figura 46 e na Figura 47.

Figura 46 – Placa branca montada.



Fonte: O autor.

Figura 47 – Placa preta montada.



Fonte: O autor.

Verificou-se os encaixes na case escolhida como mostra a Figura 48.

Figura 48 – Montagem na case. Vista inferior.



Fonte: O autor.

Foi realizada a montagem do chicote com alicate crimpador e o resultado é mostrado na Figura 49.

Figura 49 – ECU finalizada montada em case com chicote padrão automotivo.



Fonte: O autor.

Na Figura 50 a ECU finalizada com case, tomada de ar para MAP integrado, chicote de 3 metros e cabo blindado na entrada do sensor de rotação.

Figura 50 – Produto final com chicote personalizado e cabo blindado no sinal de rotação.

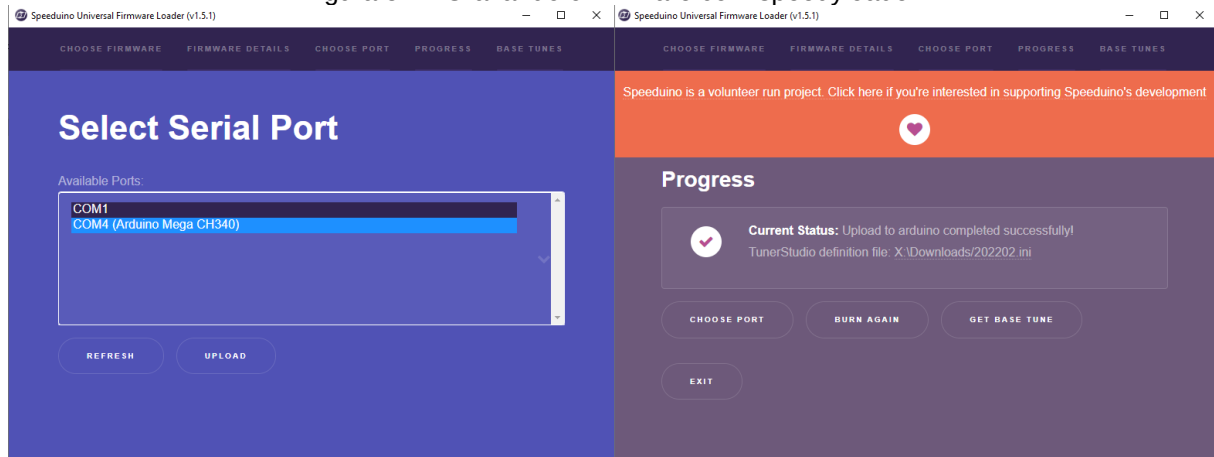


Fonte: O autor.

5.3 Testes de funcionamento

Para colocar em funcionamento é gravado o firmware no microcontrolador utilizando a ferramenta *speedy Loader*, descrita no item 4.1.2 e ilustrada na Figura 51.

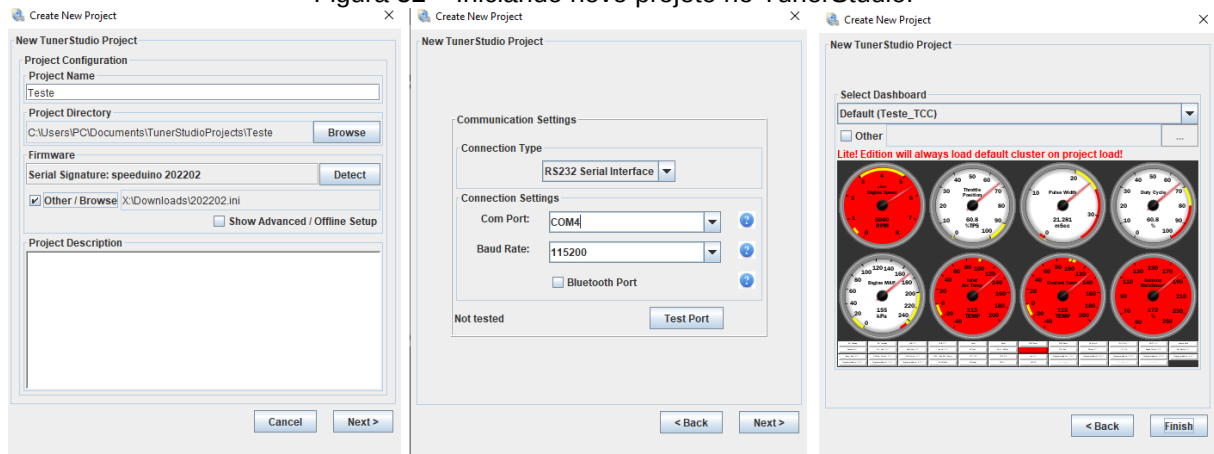
Figura 51 – Gravando o firmware com speedyloader.



Fonte: O autor.

Com o *firmware* gravado na injeção, inicia-se um novo projeto no *software* TunerStudio conforme ilustra a Figura 52.

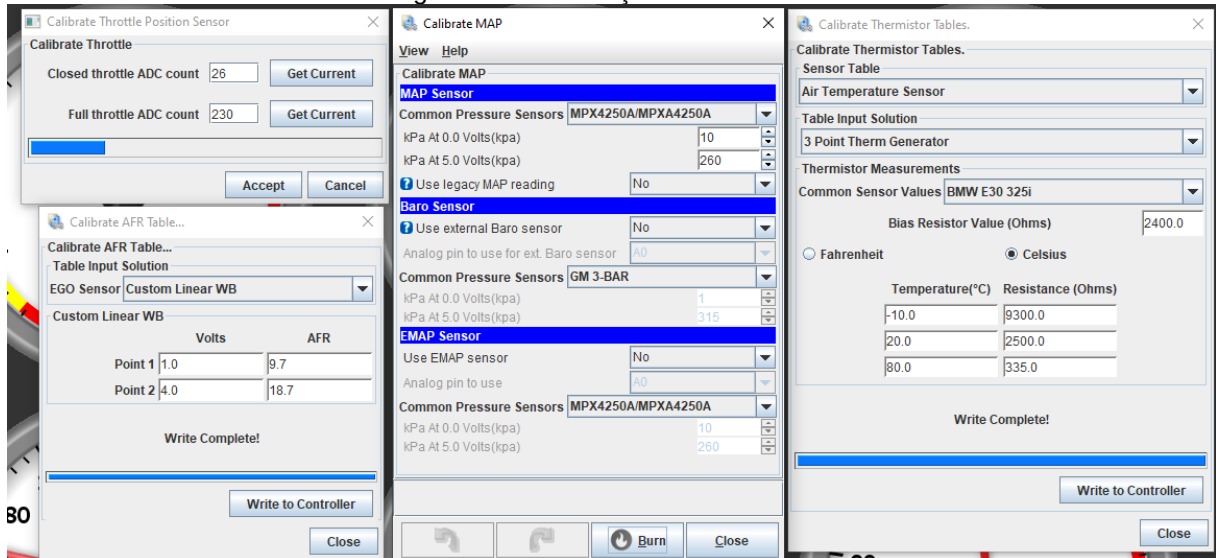
Figura 52 – Iniciando novo projeto no TunerStudio.



Fonte: O autor.

Quando a tela inicial se abre, inicia-se as configurações da injeção. Carrega-se o arquivo do mapa base e depois faz-se a calibração dos sensores conforme mostra a Figura 53.

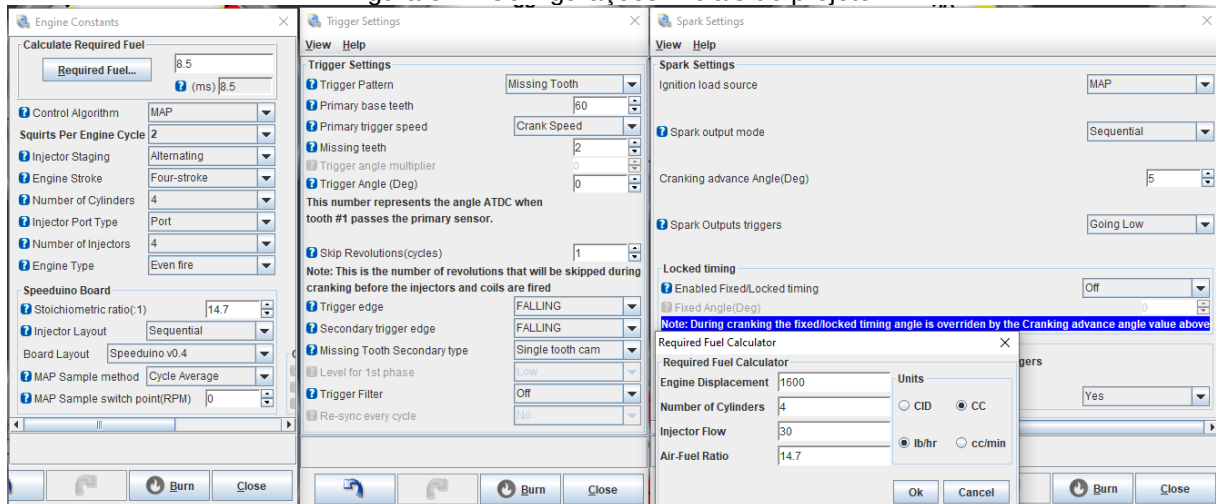
Figura 53 – Calibração dos sensores.



Fonte: O autor.

Os parâmetros do projeto são ajustados de acordo com o sistema a ser controlado. Para um teste rápido as configurações ilustradas na Figura 54 foram realizadas.

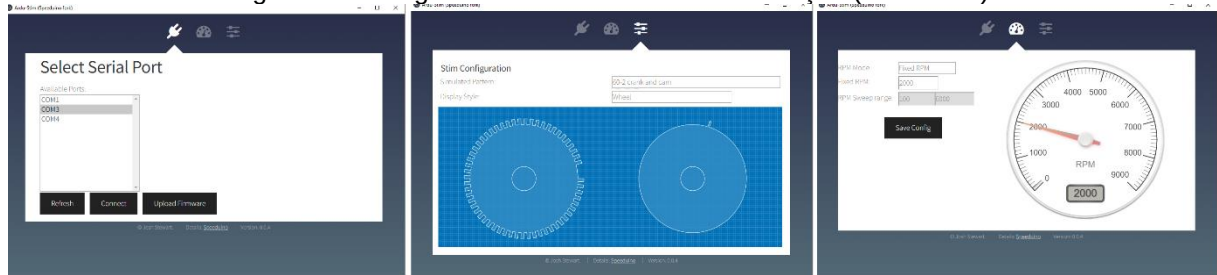
Figura 54 – Configurações iniciais do projeto.



Fonte: O autor.

A Figura 55 mostra uma ferramenta chamada *Ardu-Stim*. Essa ferramenta faz a gravação do próprio *firmware* no Arduino e controla a simulação de diversos padrões de roda fônica (sinal de rotação do motor). Gravou-se em um Arduino Nano presente na bancada de testes.

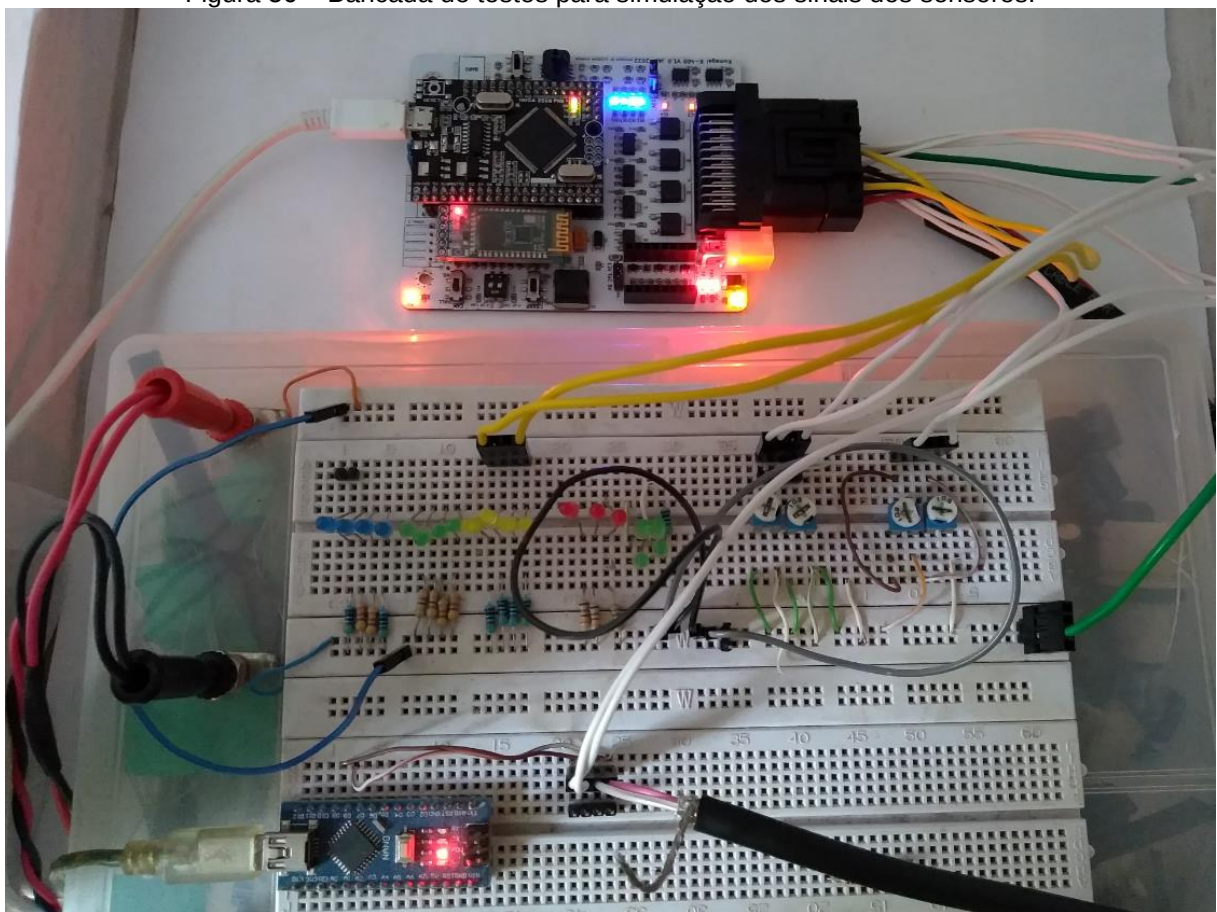
Figura 55 – Programa simulador de sinal de rotação (Ardu-Stim).



Fonte: O autor.

Foi montada uma bancada de testes utilizando protoboard com potenciômetros para simulação dos sinais analógicos dos sensores, alguns leds para testes das saídas e um Arduino nano como simulador de sinal de rotação, conforme mostra a Figura 56.

Figura 56 – Bancada de testes para simulação dos sinais dos sensores.

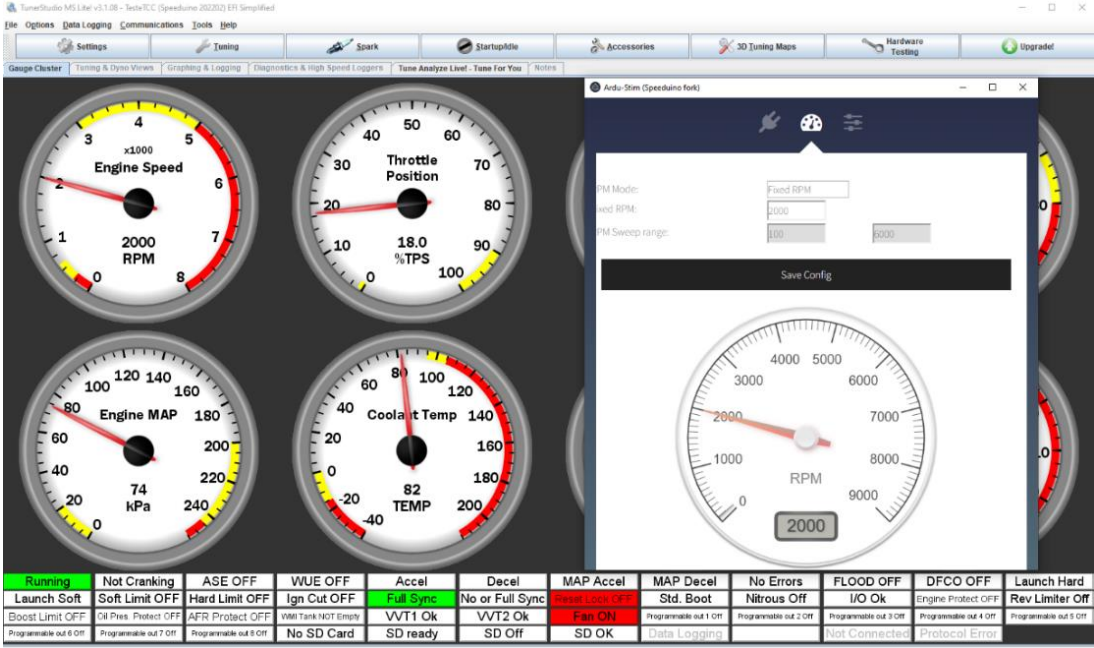


Fonte: O autor.

As ligações no conector são feitas seguindo os pinos descritos no **Apêndice A** – Diagrama do conector principal. Um diagrama no **Apêndice B** – Diagrama de uma instalação genérica comum ajuda a compreender de forma geral como são instalados os sensores e atuadores.

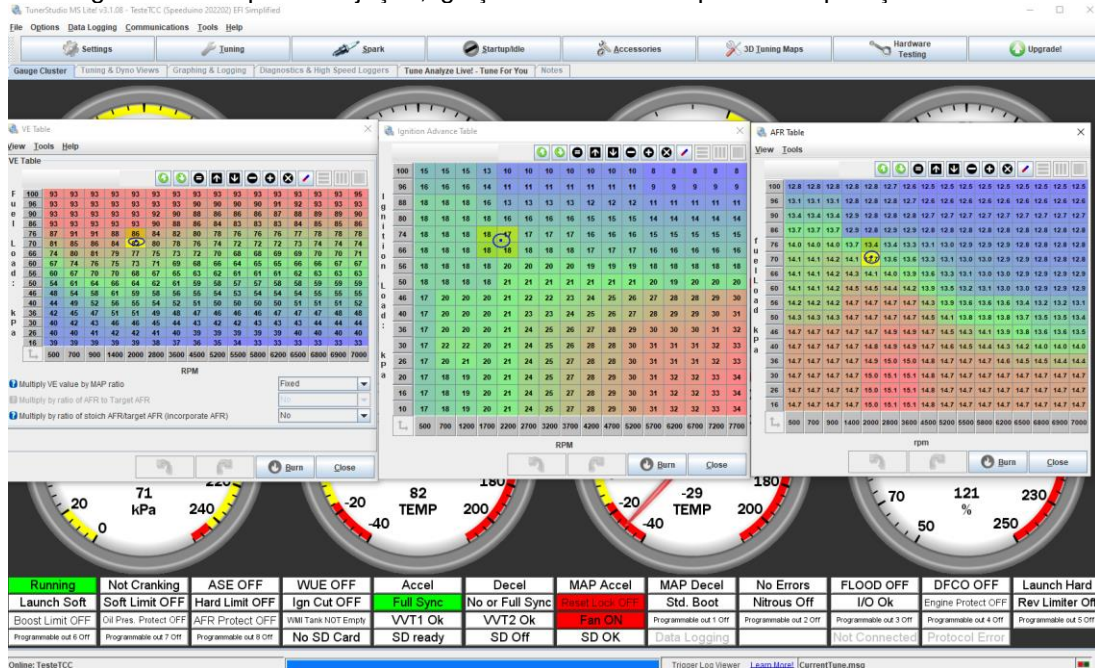
A Figura 57 ilustra o sistema em funcionamento e rotação em 2000 RPM. E a Figura 58 mostra os mapas de combustível, ignição e AFR para o mesmo ponto de rotação e carga.

Figura 57 – ECU rodando a 2000 RPM com simulador de roda fônica.



Fonte: O autor.

Figura 58 – Mapas de injeção, ignição e AFR em um ponto de operação do motor.



Fonte: O autor.

Alguns testes foram realizados variando os sinais de entrada simulados dos sensores e observou-se o funcionamento geral da injeção que se mostrou estar funcionando normalmente.

5.4 Comparativo entre os dois sistemas

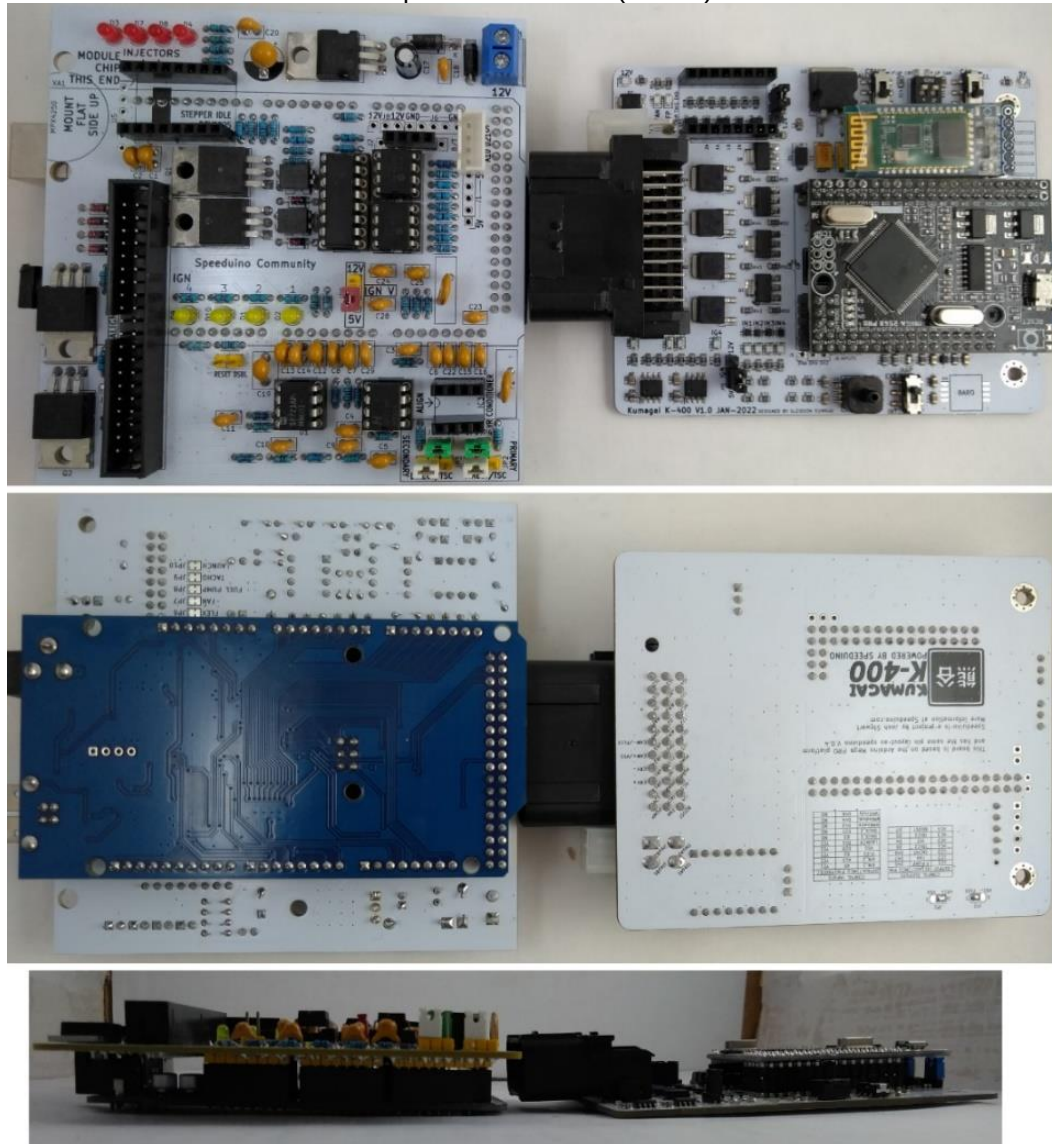
Na montagem dos dois sistemas desde o início da soldagem, até obter um produto finalizado e pronto para uso, houve melhora considerável no tempo de produção. A soldagem em componentes PTH é bastante desgastante e demorada.

Quanto ao custo, como o novo sistema possui mais recursos integrados, conector e case automotiva, chicote com cabos automotivos, sensor MAP, condicionador para sinal de rotação indutivo, obviamente o custo é um pouco maior que o sistema original. Mesmo assim, o novo *hardware* ainda possui relativo baixo custo se comparado com qualquer outra injeção programável. Com um modelo que tenha recursos semelhantes a diferença é maior ainda.

Quanto ao aspecto visual da PCB também houveram melhoras. A miniaturização e a melhor setorização dos componentes e outras melhorias é

perceptível visualmente. A Figura 59 mostra um comparativo entre ao PCB do speeduino padrão e a PCB desenvolvida no presente trabalho.

Figura 59 – Comparativo das PCB's. Speeduino padrão (à esquerda) e novo hardware (à direita).
Comparativo de altura (abaixo).



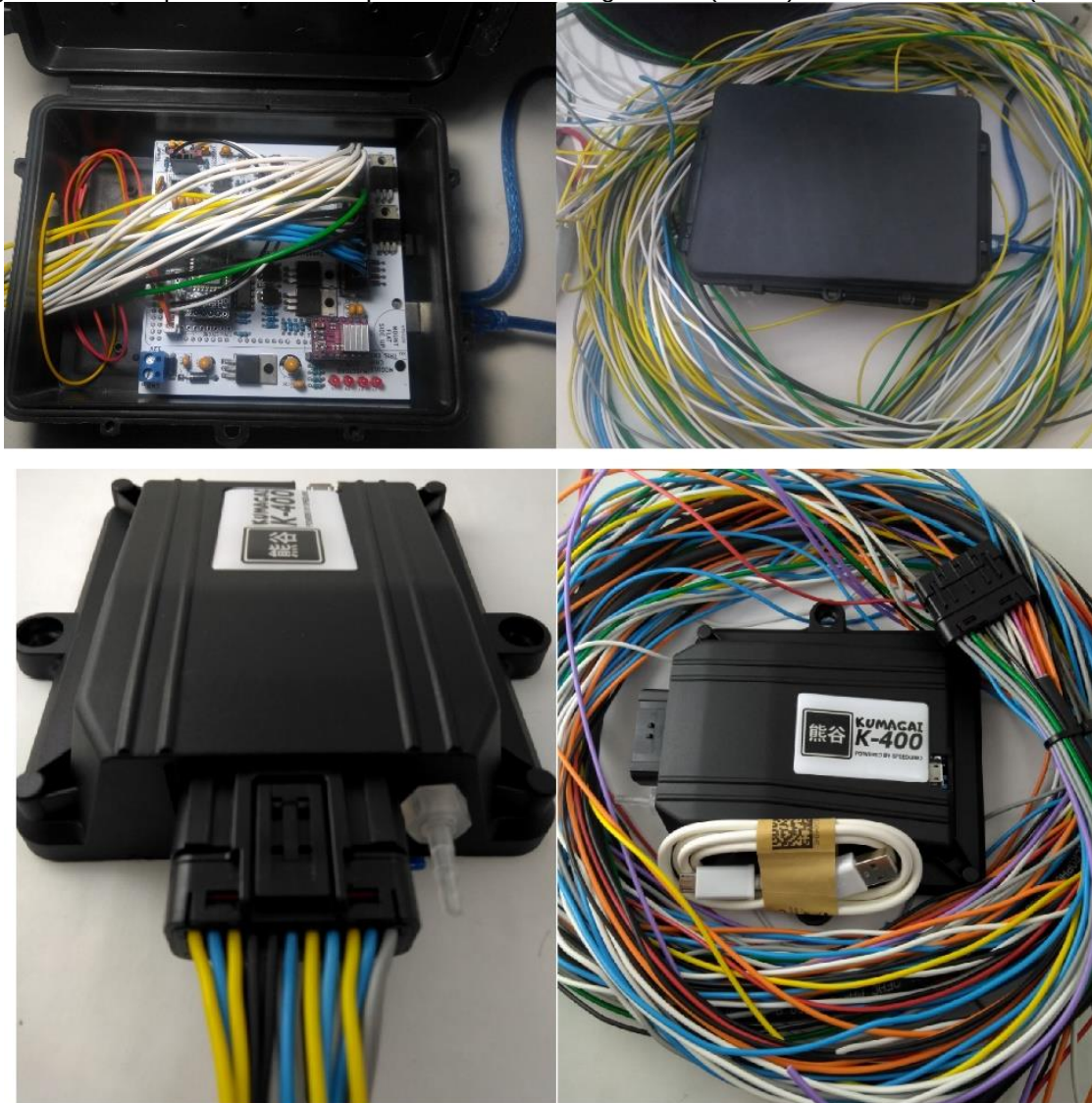
Fonte: O autor.

As etapas de adaptações na case por exemplo, agora são quase inexistentes e agilizam muito o processo de construção do equipamento.

No manuseio também houve melhora. Encaixar e desencaixar um conector automotivo é muito mais prático e seguro que o IDC-40 do speeduino padrão.

Um comparativo entre os dois equipamentos montados em case é mostrado na Figura 60.

Figura 60 – Comparativo entre o speeduino com case genérica (acima) e o novo hardware (abaixo).



Fonte: O autor.

5.5 Considerações finais

Nesse capítulo foi apresentada a PCB finalizada, a montagem e o resultado final do *hardware* proposto nesse trabalho. Uma breve explicação das ferramentas utilizadas para instalação do *firmware* no microcontrolador, os primeiros passos no *software* de configuração da injeção e as ferramentas utilizadas para simulação simples em bancada.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Foi proposto nesse trabalho o projeto de um sistema de injeção eletrônica programável baseado em plataforma *open source*. A crescente demanda para o fornecimento local do *hardware* desse sistema motivou a elaboração desse projeto. Os objetivos pretendiam melhorar as condições de fabricação, melhorias construtivas e de manuseio, melhorias no circuito e melhorias no layout da PCB.

Os sistemas de controle de motores à combustão possuem característica multidisciplinar, pois necessitam de conhecimentos de diversas áreas para entendimento do processo. Estudou-se as características mecânicas, de controle e elétricas. A partir de então, foi elaborado um circuito e um layout de PCB simples e robusto, focado na qualidade e no fácil manuseio.

Com o projeto finalizado a maioria dos objetivos foram alcançados. Na questão construtiva e visual os protótipos superaram as expectativas, pois ficou muito próximo de um produto final industrializado. O tempo de produção reduziu drasticamente, reduziram também os trabalhos artesanais que eram necessários para a instalação. As soluções e tecnologias adicionais integradas no projeto facilitaram a configuração e adequação do *hardware* ao projeto do usuário final. A documentação própria como diagramas e manuais de instalação também contribuíram a fácil compreensão do sistema.

Um grande ponto do trabalho realizado foi a adoção de técnicas no projeto do circuito e do layout da PCB no intuito de tornar a ECU mais resistente à ruídos, principalmente ruídos na malha de terra. Houveram tentativas sem sucesso de simular tais ruídos em laboratório. As fontes de interferência eletromagnética testadas não provocaram nenhum efeito nos testes realizados. Concluiu-se que é necessário implementar a ECU em uma planta real ou pelo menos, a implementação em conjunto com sensores e atuadores reais para testes desse tipo. Por enquanto, até a finalização do presente trabalho não foi possível realizar tais testes.

O projeto desenvolvido mostrou grande potencial de superar a barreira da impressão de sua difícil implementação e complexidade que o speeduino padrão causa, principalmente aos usuários brasileiros. Mostrou também potencial comercial que o speeduino não era capaz de alcançar devido às suas características físicas

externas. Ter um produto finalizado de baixo custo é fundamental para a prospecção do projeto speeduino no Brasil.

Para trabalhos futuros este sistema deve ser implementado em planta física real e avaliada a sua imunidade à ruídos e a qualidade dos sinais na entrada do microcontrolador. A implementação dessa injeção programável para estudos nas áreas de engenharia mecânica também é possível. A confecção de uma interface homem máquina (HMI) via comunicação serial ou um *hardware* de um *dashboard* que se comunique com o speeduino. O projeto de baixo custo de um condicionador de sonda banda larga (*wideband*) de pequeno tamanho para que possa ser integrado ou de uso externo com display.

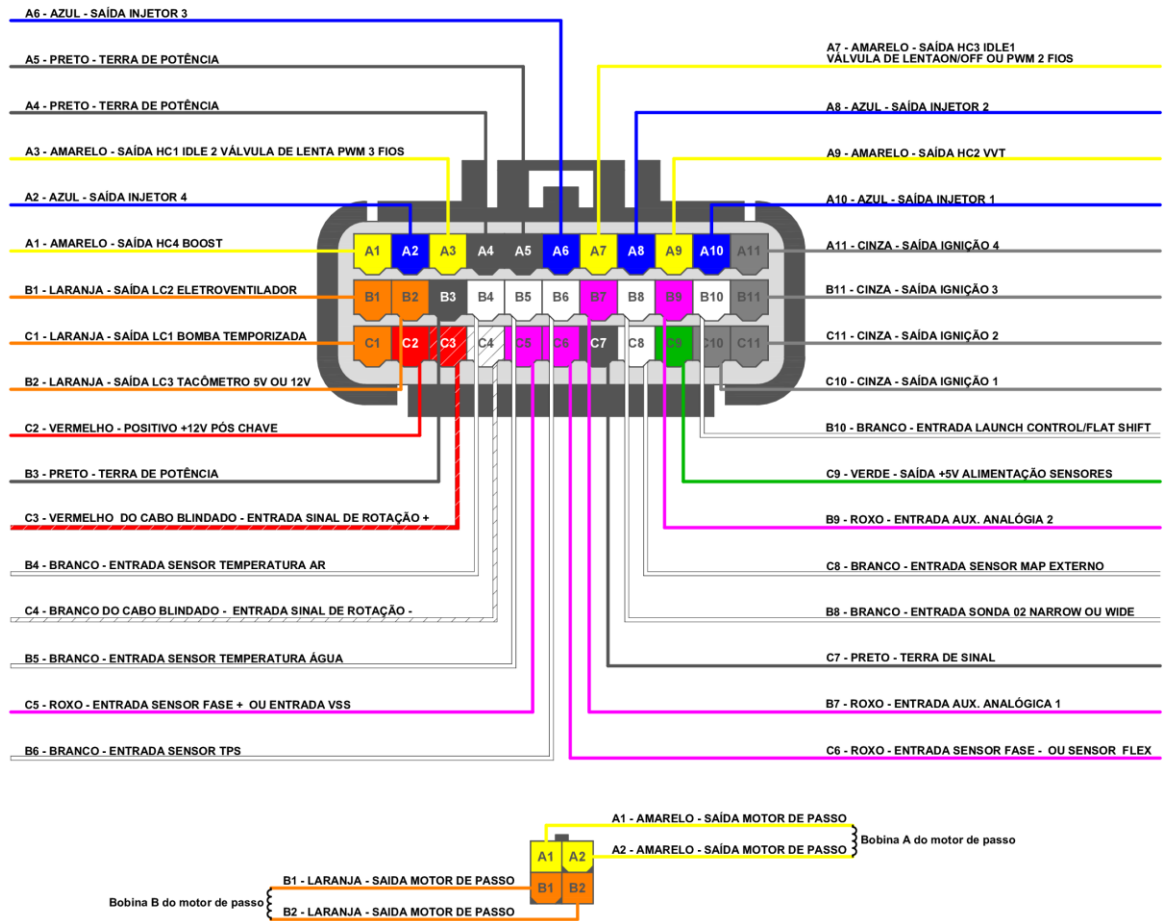
Visto que esse *hardware* se assemelha à um “*shield*” para Arduino, é possível o aproveitamento para implementação de outro *firmware* ou para testes e implementação de programas envolvendo sistemas de controle.

REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, Luis A. **Fundamentos de instrumentação**. São Paulo: Pearson, 2013.
- AIRD, Forbes. **Bosch fuel injection systems**. 1 ed. New York: HPBooks, 2001.
- BANISH, Greg. **Designing and tuning high-performance fuel injection systems**. North Branch: Cartech books, 2009
- BASSHUYSEN, R. V.; SCHÄFER, F. **Internal combustion engine handbook: basics, components, systems, and perspectives**. Warrendale: SAE, 2004.
- BOSCH MOTORSPORT. **Temperature sensor NTC M12**. V. 20 jul. 2020. Disponível em: https://www.bosch-motorsport.com/content/downloads/Raceparts/Resources/pdf/Data%20Sheet_70101387_Temperature_Sensor_NTC_M12.pdf. Acesso em: 29 jun. 2022.
- BOSCH, Robert GmbH. **Automotive handbook**. 11 ed. Chichester: Wiley, 2022.
- BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna**: volume 1. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2012.
- BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna**: volume 2. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2012.
- DENTON, Tom. **Automobile electrical and electronic systems**. 5 ed. Abingdon: Routledge, 2018.
- DUNN, William C. **Introduction to instrumentation, sensors, and process control**. Norwood: Artech House, 2006.
- FREESCALE. **MC33810 Automotive engine control IC**. Rev. 11.0 ago. 2014.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física: gravitação, ondas e termodinâmica**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, v2, 2009.
- HEYWOOD, John B. **Internal combustion engine fundamentals**. 2 ed. McGraw-Hill, 2018.
- HOLLEMBEAK, Barry. **Automotive Electricity and electronics**. 5 ed. New York: Delmar, 2011.
- MARTINS, Jorge. **Motores de combustão interna**: quarta edição, revista e aumentada. 4. ed. Porto: Publindústria, 2013.
- MAXIM INTEGRATED. **MAX9924–MAX9927 variable reluctance sensor interfaces with differential input and adaptive peak threshold**. Rev. 5 ago. 2018. Disponível em: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX9924-MAX9927.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2022.

RIBBENS, William B. **Understanding automotive electronics**: An engineering perspective. 8 ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.

APÊNDICE A – DIAGRAMA DO CONECTOR PRINCIPAL



APÊNDICE B – DIAGRAMA DE UMA INSTALAÇÃO GENÉRICA COMUM

DIAGRAMA DE INSTALAÇÃO

**Kumagai K-400 Motor 4 cilindros com Bobina de Corsa
4 Fios com módulo integrado**

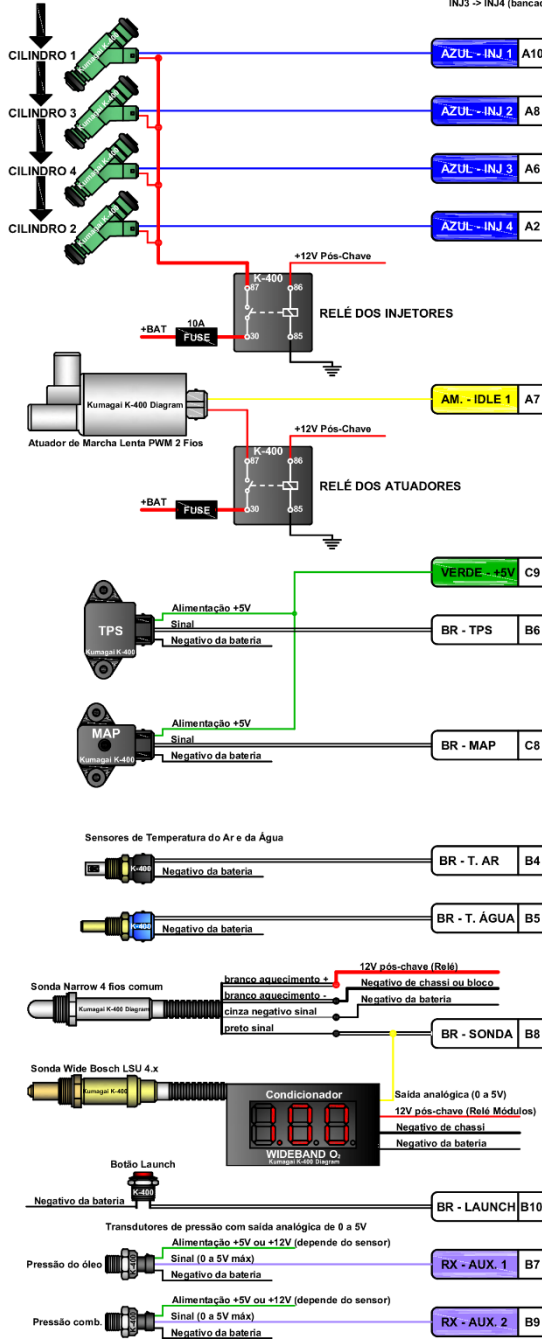
Na instalação dos injetores seguir a ordem de ignição do motor e fazer a ligação conforme o diagrama abaixo.

Ordem de ignição do motor (1 - 3 - 4 - 2)

Saída INJ1 no Cilindro 1, Saída INJ2 no cilindro 3

Saída INJ3 no Cilindro 4, Saída INJ4 no cilindro 2

As saídas dos injetos sempre pulsam em ordem numérica
Sequencial: INJ1 -> INJ2 -> INJ3 -> INJ4 (necessita sensor de fase)
Semi-Sequencial: INJ1 & INJ4 -> INJ2 & INJ3 (espelhados)
Paired: INJ1 -> INJ2 alternado ou INJ1 & INJ2 simultâneo (monoponto)
Paired + Staged injection: INJ1 -> INJ2 (bancada A semi) &
INJ3 -> INJ4 (bancada B semi) somando no modo automático



A instalação desse produto requer mão de obra qualificada com conhecimentos em elétrica automotiva, sensores e atuadores, calibrações, configuração e acerto de motores à combustão.

O presente diagrama serve como exemplo para ajudar no entendimento do funcionamento da injeção e para auxiliar na execução do projeto.

A execução da instalação, configuração e acerto é de inteira responsabilidade do usuário.

A Kumagai Parts se isenta de quaisquer danos e erros ocorridos na instalação, no hardware como sensores e atuadores e no motor do veículo.

AO UTILIZAR ESSE DIAGRAMA DECLARO QUE LI E ESTOU CIENTE DE QUE SOU RESPONSÁVEL PELA INSTALAÇÃO, CONFIGURAÇÃO E ACERTO, ISENTANDO A KUMAGAI PARTS DE QUALQUER DANO QUE VENHA A OCORRER COM A UTILIZAÇÃO DESSE PRODUTO E DE SEU DIAGRAMA.



As saídas de ignição sempre pulsam em ordem numérica
Sequencial: IGN1 -> IGN2 -> IGN3 -> IGN4 (necessita sensor de fase)
Wasted spark: IGN1 -> IGN2 (centelha perdida)
Wasted COP: IGN1 & IGN3 -> IGN2 & IGN4 (espelhados)

Bobina de corsa 4 fios:
Modo Wasted spark, IGN1 no pino B e IGN2 no
Tipo de sinal: GOING LOW, DWELL: 2,8 ~ 3ms

