



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Eletrônica

Monitoramento e controle de motores de combustão interna: Um Estudo de Caso do Motor VW EA211

Autor: Matheus Carvalho de Sousa Dias
Orientador: Prof.Dr.Fábio Cordeiro de Lisboa

Brasília, DF
2022



Matheus Carvalho de Sousa Dias

Monitoramento e controle de motores de combustão interna: Um Estudo de Caso do Motor VW EA211

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof.Dr.Fábio Cordeiro de Lisboa

Brasília, DF

2022

Matheus Carvalho de Sousa Dias

Monitoramento e controle de motores de combustão interna: Um Estudo de Caso do Motor VW EA211/ Matheus Carvalho de Sousa Dias. – Brasília, DF, 2022-

92 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof.Dr.Fábio Cordeiro de Lisboa

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2022.

1. Palavra-chave01. 2. Palavra-chave02. I. Prof.Dr.Fábio Cordeiro de Lisboa.
II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Monitoramento e controle de motores de combustão interna: Um Estudo de Caso do Motor VW EA211

CDU 02:141:005.6

Matheus Carvalho de Sousa Dias

Monitoramento e controle de motores de combustão interna: Um Estudo de Caso do Motor VW EA211

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 21/09/2022:

Prof.Dr.Fábio Cordeiro de Lisboa
Orientador

Prof. Dr.Rudi Henri Van Els
Convidado 1

Prof. Rafael Rodrigues Da Silva
Convidado 2

Brasília, DF
2022

Este trabalho é todo dedicado aos meus pais, Luciene Carvalho e Antônio Batista, pois graças ao seus esforços que hoje posso concluir este curso.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, Luciene Carvalho e Antônio Batista por ter me dado todo o suporte possível e por me ajudar a enfrentar todos os obstáculos encontrados ao longo do curso. Assim como todo o incentivo dado por eles e meus irmãos, além de compreenderem minha ausência em decorrência de toda a dedicação necessária a realização deste trabalho.

Agradeço aos amigos que encontrei dentro da universidade, por sempre estarem presentes e por tornarem toda a jornada da graduação mais leve, além do incentivo dado nos dias mais difíceis.

Agradeço ao professor Dr.Fábio Cordeiro pela oportunidade de conduzir esse trabalho, por dar todo o suporte dado, e por ainda acreditar nesse trabalho mesmo depois de várias adversidades.

Agradeço a todos o professores, por todos os ensinamentos e correções feitas que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional.

Resumo

Dada a importância do avanço tecnológico do controle eletrônico de motores de combustão interna (MCI), motivado por restrições de emissões atmosféricas cada vez mais desafiadoras, elaborou-se este estudo com o objetivo de aplicar experimentalmente a teoria pesquisada na literatura em um motor Volkswagen EA 211 instalado no laboratório de ensaio de motores (LEM) da FGA. Para tanto fez-se uma revisão bibliográfica nas características de funcionamento de motores de ignição por faísca (MIF) e seus principais parâmetros de funcionamento. Foi dada ênfase na parte de controle eletrônico dos MIF, incluindo os sensores usados no motor estudado e sua unidade de controle, neste caso uma central programável Fuel Tech FT 550. A instalação do chicote elétrico da ECU para o motor se mostrou correta, possibilitando assim o correto funcionamento e gerenciamento do motor. O mapa base de controle do motor conseguiu partir o motor e ainda possibilitou desenvolver testes a velocidade constante para todas as faixas de rotação, mantendo um comportamento linear se mostrando satisfatório, porém para testes de performance, será necessário habilitar integralmente os controles do freio eletrônico.

Palavras-chaves: Gerenciamento eletrônico de motores; Criação de mapas base de injeção eletrônica; Motores de ignição por faísca.

Abstract

Motivated by the importance of technological advancements on the field of electronic control of Internal Combustion Engines (ICE), and given the increasingly tough atmospheric emissions restrictions. This study was devised with the goal of experimentally applying the premise presented in the literature of a Volkswagen EA 211 engine, which was set up on a laboratory test bench at FGA. Therefore a bibliographic review was done upon the performance characteristics of spark ignition engines (SIE) and their main working parameters. Emphasizing the electronic control of the ICE, including the sensors used in the engine of this study and its engine control unit, in this case, a Fuel Tech FT 550 programmable central. The installation of the ECU electrical harness for the engine proved to be correct, thus enabling the correct operation and engine management. The engine control base map managed to start the engine and also made it possible to develop tests for all speed ranges, proving satisfactory, however, for performance tests, it will be necessary to fully enable the electronic brake controls.

Key-words: Electronic engine management; Foundation maps of the engine operation; Spark ignition engines.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Principais componentes de um motor de ciclo Otto	19
Figura 2 – Variação da pressão no cilindro de acordo com a mudança do avanço de ignição	23
Figura 3 – Variação do torque e do consumo específico em função ao avanço de ignição	23
Figura 4 – Ocorrência de ignição espontânea no interior do cilindro	24
Figura 5 – Esquemático de injeção multiponto	26
Figura 6 – Esquemático bobina de ignição	27
Figura 7 – Esquemático sistema de ignição com uso de ECU	28
Figura 8 – Unidade de controle eletrônico e circuito microcontrolado	29
Figura 9 – Sinais de entrada e saída em uma ECU	30
Figura 10 – Regiões do mapa de combustível	32
Figura 11 – Sistema de ignição eletrônica	34
Figura 12 – Sinais de entrada e saída em uma ECU	36
Figura 13 – Representação sensor de oxigênio de banda estreita	37
Figura 14 – Sensor de Oxigênio	37
Figura 15 – – Curvas características dos sensores de oxigênio EGO e UEGO e concentração de O ₂ na exaustão	38
Figura 16 – Sensor de temperatura do ar no coletor de admissão	39
Figura 17 – Sensor de temperatura do líquido de arrefecimento	39
Figura 18 – Variação da resistência em função da temperatura de um elemento NTC	40
Figura 19 – Representação sensor de relutância e Roda dentada	41
Figura 20 – Representação do sinal de saída sensor de relutância	41
Figura 21 – Representação do sensor Hall e seu respectivo sinal de saída	42
Figura 22 – Corpo de borboleta eletrônico	43
Figura 23 – Representação sensor Knock e seu respectivo sinal de saída em caso de ocorrência de detonação	44
Figura 24 – Representação da Válvula Injetora de Combustível Fechada(a) e Aberto(b)	45
Figura 25 – Representação de uma Vela de Ignição	46
Figura 26 – Representação bobina de Ignição com transformador integrado	46
Figura 27 – Curvas características de torque, potência e consumo específico	48
Figura 28 – MIT- Motor de indução trifásico	49
Figura 29 – Representação do circuito de um inversor	50
Figura 30 – Sinal PWM de controle para o motor	51
Figura 31 – Diagrama Laboratório LEM	53
Figura 32 – Motor EA211 Instalado no Laboratório LEM	54

Figura 33 – Dinamômetro Modelo 200Hp AC Dynamometer	55
Figura 34 – VFD- Drive de frequência variável	57
Figura 35 – Interface Humano Máquina- VFD	57
Figura 36 – ECU Fueltech ft 550	58
Figura 37 – Informações iniciais mapa padrão	59
Figura 38 – Informações iniciais mapa padrão	60
Figura 39 – Medidor de vazão	60
Figura 40 – Mapa principal de injeção MAP x RPM	63
Figura 41 – Tabela de correção por temperatura	64
Figura 42 – Mapa principal de ignição	64
Figura 43 – Tabela de correção de ponto de ignição por temperatura	64
Figura 44 – Log completo	65
Figura 45 – Log marcha lenta (1000RPM)	65
Figura 46 – Log para 2000 RPM	66
Figura 47 – Log para 3000 RPM	66
Figura 48 – Log para 4000 RPM	67
Figura 49 – Log para 5000 RPM	67
Figura 50 – Curvas de torque e potência VW Up MPI	68
Figura 51 – Chicote A	69
Figura 52 – Chicote B	70
Figura 53 – Conector AMP de 37 vias	70
Figura 54 – Sensor Knock do motor EA211	91
Figura 55 – Sensor MAP do motor EA211	91
Figura 56 – Sensor de oxigênio do motor EA211	91
Figura 57 – Sensor de temperatura da água	91
Figura 58 – Sensor de temperatura do motor EA211	92
Figura 59 – Sensor de fase do motor EA211	92
Figura 60 – Sensor de rotação do motor EA211	92
Figura 61 – Bobinas motor EA211	92

Lista de tabelas

Tabela 1 – Características do motor EA211 1.0 MPI.	54
Tabela 2 – Informações do motor.	55
Tabela 3 – Entradas de sinal do sistema de aquisição de dados do dinamômetro.	56
Tabela 4 – Entradas de sinal do sistema de aquisição de dados do dinamômetro.	57
Tabela 5 – Pinagem conector AMP 37 vias	71
Tabela 6 – Consumo de combustível	72

Lista de abreviaturas e siglas

BSFC	Consumo específico ao freio (<i>Brake Specific Fuel Consumption</i>)
MBT	Torque máximo ao freio (<i>Maximum Brake Torque</i>)
MCI	Motor de combustão interna
SI	Ignição por centelha (<i>Spark Ignition</i>)
ECU	Unidade de controle do motor (<i>Engine Control Unit</i>)
PMS	Ponto Morto Superior
PMI	Ponto Morto Inferior
MAP	Pressão absoluta no coletor de admissão (<i>Manifold Absolut Pressure</i>)
MAF	Fluxo mássico de ar (<i>Mass Air Flow</i>)
ETC	Controle eletrônico da válvula borboleta (<i>Eletronic Thorttle Control</i>)
λ	Relação Ar-Combustível

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativas	16
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Motor de combustão interna	19
2.2	Combustão nos motores alternativos	20
2.2.1	Admissão de ar	20
2.2.2	Mistura ar e combustível	21
2.2.3	Avanço de ignição	22
2.2.4	Detonação	24
2.3	Sistema de alimentação de combustível	25
2.4	Sistema de Ignição	26
2.5	Controle eletrônico de motores de combustão interna	29
2.5.1	Estratégia de Controle	31
2.6	Injeção eletrônica de combustível	33
2.7	Controle eletrônico da ignição	34
2.8	Sensores e Atuadores	35
2.8.1	Sensor de Oxigênio	36
2.8.2	Sensores de Temperatura	38
2.8.3	Sensor de fluxo de massa de ar	39
2.8.4	Sensor de rotação e fase do motor	40
2.8.5	Sensor de posição de borboleta (TPS)	42
2.8.6	Acelerador eletrônico (ETC)	43
2.8.7	Sensor Knock	44
2.8.8	Válvula Injetora de Combustível	44
2.8.9	Vela de Ignição	45
2.8.10	Bobina de Ignição	45
2.9	Parâmetros de desempenho	46
2.9.1	Torque e potência	47
2.9.2	Consumo específico	47
2.10	Freios Dinamométricos	48
2.10.1	Inversores de frequência	50

3	METODOLOGIA	53
3.1	Metodologia	53
3.1.1	Montagem do Laboratório	53
3.1.2	Especificações do motor	54
3.2	Freio Dinamométrico	55
3.3	VFD - Drive de Frequência Variável	56
3.4	Mapas de injeção e Ignição	57
3.4.1	Mapa base	59
3.5	Consumo específico	60
3.6	Sensores e Atuadores Utilizados	61
3.7	O ensaio	61
4	RESULTADOS	63
4.1	O mapa base	63
4.2	O ensaio	65
4.3	Curvas características	68
4.4	O inversor	68
4.5	O chicote	69
4.6	Consumo de combustível	69
5	CONCLUSÃO	73
5.1	Proposta de trabalhos futuros	73
	REFERÊNCIAS	75
	ANEXO A – PARAMETROS DO INVERSOR	79
	ANEXO B – SEGUNDO ANEXO	91

1 Introdução

Os desafios impostos por rígidas legislações ambientais impulsionam o desenvolvimento de propulsores com menores níveis de emissões atmosféricas. Neste contexto, dispositivos antigos mecânicos de preparação de mistura entre ar e combustível, em motores de combustão interna, vêm perdendo espaço para métodos de mistura de combustível mais eficientes e eletronicamente controlados. Assim, sensores dedicados e centrais de controle tomam lugar dos antigos sistemas analógicos tornando o entendimento da eletrônica embarcada fundamental para o desenvolvimento de motores automotivos.

A evolução da eletrônica possibilitou o desenvolvimento de sistemas de controle de combustível e controle de ignição que antes eram puramente mecânicos e analógicos para sistemas digitais com memória e grande capacidade de processamento denominados de injeção eletrônica. A injeção eletrônica de combustível é um exemplo de solução eletrônica adotada e compreende um conjunto de subsistemas, sendo eles, sistema de injeção, ignição e o sistema de controle do motor.

De acordo com [Ashok e Kumar \(2015\)](#) o controle do motor, é feito por uma Unidade de Controle do Motor (UCE) responsável por receber e processar as informações dos diversos sensores do motor além de controlar os atuadores de injeção e ignição. O uso dessa tecnologia permitiu que os parâmetros ideais de funcionamento fossem introduzidos na memória do controlador na forma de mapas, a partir de testes realizados em bancos de prova, sendo possível respeitar a regulação de emissões, e ao mesmo tempo diminuir o consumo de combustível.

Os bancos de prova são equipamentos de extrema importância para o desenvolvimento e aprimoramento dos motores de combustão interna, estes são capazes de medir a potência e o torque produzido a partir de testes explorando todas as condições de funcionamento. Esses equipamentos permitem encontrar os parâmetros ideais de funcionamento, a partir de seus diversos tipos de ensaios, ou seja, os bancos de provas são essenciais para a parametrização das injeções eletrônicas.

A unidade eletrônica faz o controle do motor a partir das informações armazenadas nos mapas de injeção e ignição, um amplo conjunto de tabelas de parâmetros de uma, duas ou três dimensões carregadas na UCE. As tabelas são compostas por matrizes de dimensão $M \times N$ que fornecem valores pré-estabelecidos para o controle de uma variável, visando otimizar seu funcionamento em função das diferentes condições de operação do motor, a exemplo da tabela de tempo de injeção que representa o tempo de abertura das válvulas injetoras em função da rotação do motor (RPM) e posição do acelerador (TPS). O mapa pode ser melhor visualizado quando comparado ao primeiro quadrante de um

plano cartesiano, onde cada coordenada $a_{i,j}$ corresponde a uma condição específica de operação do motor e o conteúdo de cada célula representa a operação a ser realizada.

Os mapas são desenvolvidos a partir de um processo denominado calibração que envolve uma serie de testes, nas montadoras esse processo se inicia em simulações computacionais e são validados em testes realizados em dinamômetros. Os testes não seguem um padrão podendo variar de montadora para montadora desde que respeitem a norma [ABNT \(1996\) NBRISO1585](#). [Portela Keyll Martins e Cela \(2012\)](#) diz que as UCE programadas pelas montadoras são de difícil acesso e interpretação, pois em sua maioria são desenvolvidas em sigilo industrial. Como os modelos convencionais de UCE dificultam o acesso a estes mapas, foram desenvolvidos diversos módulos de injeção eletrônica programáveis ao redor do mundo, que possibilitam a alteração destes mapas em tempo real.

1.1 Justificativas

O gerenciamento eletrônico dos motores possibilitou que estes ficassem menos poluentes, mais econômicos e mais potentes, devido a um maior controle sobre os sistemas de injeção de combustível e de ignição. Entender como essas variáveis influenciam no funcionamento do motor é importante uma vez que ditam o comportamento do mesmo. Com o objetivo de realizar estudos nos MCI, sistemas capazes de realizar os mais diversos tipos de teste em motores se fazem necessários. Estes sistemas são conhecidos como Bancos de prova ou Banco de ensaios.

O presente trabalho justifica-se na necessidade da FGA em conhecer e estudar sistemas de ensaios dinamométricos, motores, gerenciamento eletrônico bem como os principais parâmetros que influenciam em seu funcionamento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho será mapear os sensores do motor EA211 descrevendo seu funcionamento, bem como suas ligações com a injeção eletrônica programável, além de estudar o sistemas de dinamômetro de bancada do laboratório LEM.

1.2.2 Objetivos específicos

- Entender sobre o funcionamento de uma injeção eletrônica programável;
- Entender o funcionamento dos sensores em um motor de ciclo Otto;

- Criar um mapa inicial a partir das informações do motor;
- Parametrizar o inversor de frequência modelo PowerFlex 700, controlador do sistema de medição de potência;
- Apresentar os diagramas de funcionamento eletrônico do motor e do sistema de medição.

2 Revisão bibliografica

2.1 Motor de combustão interna

Segundo [Brunetti \(2012\)](#) as máquinas térmicas são dispositivos desenvolvidos para transformar calor em trabalho. O motor de combustão interna (MCI) é amplamente usado em veículos automotores, e obtêm trabalho através da conversão de energia química contida no combustível, a exemplo da gasolina do etanol, transformando-a em calor, e assim transformando calor em trabalho mecânico. A conversão de energia química em calor é realizada através da combustão de uma mistura de ar e combustível, enquanto a conversão em trabalho é realizada a partir de um aumento de pressão dentro de um meio, que irá realizar trabalho a partir de um sistema biela manivela.

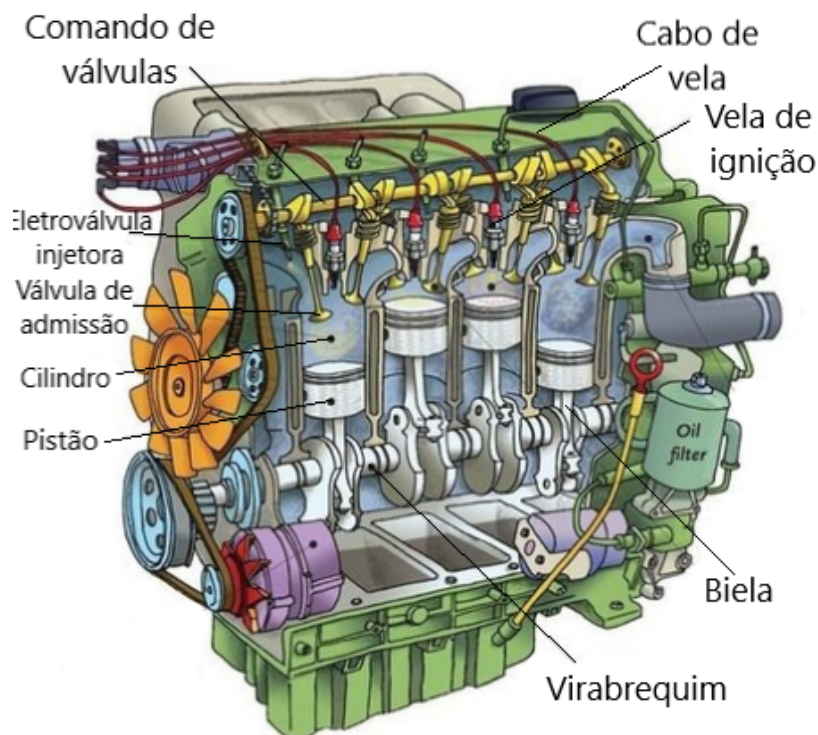


Figura 1 – Principais componentes de um motor de ciclo Otto

[Extraído e adaptado de [Enterprises \(2021\)](#)]

O conjunto mecânico pistão, biela e virabrequim é responsável por transformar a energia liberada na queima do combustível em torque. O pistão realiza movimento alternativo dentro dos cilindros e transmite o deslocamento proveniente da expansão dos gases para a biela, que ao receber este esforço transmite o movimento do pistão para o virabrequim, o virabrequim transforma o movimento linear dos pistões em torque, ou seja,

movimento rotacional [Heywood \(1988\)](#).

É importante ressaltar que o correto funcionamento do motor requer um cuidadoso gerenciamento dos sistemas de admissão, de alimentação de combustível e de ignição.

2.2 Combustão nos motores alternativos

A combustão é um processo químico exotérmico composto de dois elementos distintos, o combustível e o comburente. O processo de combustão da mistura de ar e combustível, se dá a partir do momento em que a mistura atinge uma temperatura mínima para dar início as reações de combustão.

Segundo [Martins \(2006\)](#), a combustão pode ser classificada como completa, incompleta e estequiométrica, dependendo de como se dá as reações de combustão. Na combustão completa, foi admitido oxigênio suficiente para consumir todo o combustível, gerando como produto dióxido de carbono e água. Na combustão incompleta não existe oxigênio suficiente para consumir todo o combustível, gerando uma quantidade menor de energia quando comparada com combustão completa. A combustão estequiométrica é um caso particular da combustão completa, onde a quantidade de ar admitido é exatamente a necessária para a reação total do carbono com o oxigênio.

De acordo com [Brunetti \(2012\)](#), as reações de combustão se iniciam com um volume muito pequeno em volta da vela de ignição, que se propaga de maneira lenta até que a propagação da reação libere calor suficiente para iniciar as reações em cadeia de combustão. Conforme [Denton \(2004\)](#) a combustão dentro do cilindro pode ser dividida em duas etapas, uma fase preliminar, onde não se registra aumento na pressão, caracterizada pela queima de 1% a 10% da massa contida no interior do cilindro, e uma segunda fase que é representada pela propagação da frente de chama a partir da região da vela de ignição.

2.2.1 Admissão de ar

De acordo com [Heywood \(1988\)](#) a quantidade de ar admitida e retida no interior dos cilindros está fortemente associado ao desempenho de um motor de combustão interna. Em motores naturalmente aspirados o fluxo de ar para o interior dos cilindros se dá por uma diferença de pressão entre o coletor de admissão e o cilindro, gerado unicamente pelo deslocamento do pistão do PMS ao PMI, o que gera uma depressão no interior do cilindro.

O controle da passagem de ar de admissão para o motor é feita por uma válvula "borboleta" mecânica ou eletrônica, que regula a passagem de ar através da rotação em torno do seu eixo axial. Quanto maior a abertura da válvula borboleta, maior é a passagem de ar de admissão para o interior dos cilindros. No presente trabalho, será utilizado um

corpo de borboleta eletrônico que controla a partir de um motor de passo a abertura da válvula de acordo com o comandado no acelerador eletrônico

2.2.2 Mistura ar e combustível

O início e progressão da mistura ar e combustível implicam na existência de uma mistura de ar e combustível bem definida, controlada pelo sistema de alimentação de combustível, independente de qual seja. Segundo [Heywood \(1988\)](#), em motores de ciclo Otto tanto a vazão mássica de ar quanto a vazão mássica de combustível são medidas e a relação entre elas representa a razão ar/combustível.

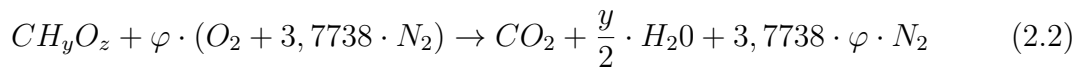
A relação ar e combustível é representada por $\frac{A}{F}$, e a massa de ar e de combustível são representadas respectivamente por m_a e m_f ; A relação estequiométrica de ar e combustível é a relação teoricamente ideal para a queima total do combustível, ou seja, existe uma quantidade ideal de combustível para a quantidade de ar admitido pelo sistema em dado instante.

[Brunetti \(2012\)](#) afirma que a determinação teórica da relação ar combustível chega muito próximo da composição real. Levando-se em considerando que a combustão seja completa (teórica), o ar atmosférico composto por 20,9476% O_2 e reduzindo o carbono a 1 temos:

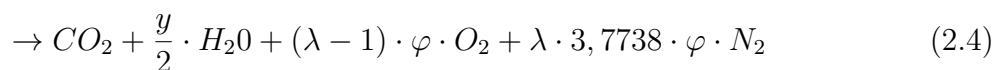
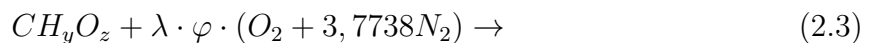
$$\varphi = \left(1 + \frac{y}{4} - \frac{z}{2}\right) \quad (2.1)$$

Onde y representa o índice para H (hidrogênio) e z representa o índice de O (oxigênio).

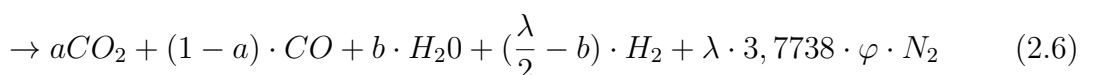
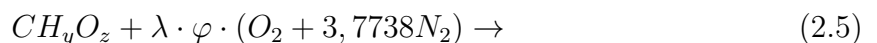
Nas reações estequiométricas teóricas ($\lambda = 1$) temos:



Nas reações de mistura pobre ($\lambda > 1$) temos:



Enquanto nas misturas ricas ($\lambda < 1$) formam-se além de CO_2 e H_2), CO e H_2 :



De forma que a combustão estequiométrica de um combustível de hidrocarbonetos pode ser completamente oxidado gerando assim como produto da reação dióxido de carbono (CO₂) e água (H₂O). Segundo [T.K.Garrett \(2001\)](#) a mistura estequiométrica não queima completamente como o esperado, pois, devido as condições dos cilindros, não é formada uma mistura perfeitamente homogeneizada. Como consequência desse efeito, os gases resultantes tendem a conter traços de oxigênio, monóxido de carbono e hidrocarbonetos parcialmente queimados, como produtos da reação de combustão incompleta. Segundo [Heywood \(1988\)](#), para determinar o quanto a mistura efetivamente disponível (real) desvia da teoricamente necessária (estequiométrica), é utilizado o fator λ (Lambda) representado por:

$$\lambda = \frac{\frac{A}{F}real}{\frac{A}{F}estequiométrico} \quad (2.7)$$

O Fator Lambda (λ) representa uma relação Ar-Combustível e seus valores implicam diretamente no comportamento e funcionamento do motor.

- $\lambda = 1$: Mistura estequiométrica:
- $\lambda > 1$: Mistura rica, excesso de combustível ou falta de ar:
- $\lambda < 1$: Mistura pobre, excesso de ar ou falta de combustível:

Segundo [Brunetti \(2012\)](#) é importante entender o comportamento da mistura do ponto de vista da combustão e não simplesmente do quociente entre a massa de ar e combustível. Um dos fatores que mais influenciam na combustão é a homogeneização do vapor de combustível no ar, ou seja, o quão vaporizado está o combustível no ar dentro da câmara de combustão, onde em certas condições uma mistura rica ($\lambda < 1$) pode apresentar comportamento de uma mistura pobre ($\lambda > 1$), por falta de homogeneização do combustível. Podemos citar como exemplo a condição do motor frio, onde a falta de vaporização por conta da baixa temperatura causa sinais de pobreza mesmo em misturas extremamente ricas. Esse tipo de comportamento torna necessário uma mudança no tempo de injeção de combustível, para que seja mantido o fator λ adequado.

2.2.3 Avanço de ignição

O avanço de ignição é um artifício usado para se obter um melhor aproveitamento da energia contida na mistura ar combustível, e corresponde ao ângulo em que a ignição (centelha) é adiantada em relação ao PMS. Para minimizar o trabalho negativo [Denton \(2004\)](#) diz que o avanço de ignição ideal deve causar pressão máxima da combustão cerca de 10° após o ponto morto superior (PMS), e depende de dois fatores principais, a rotação

e a carga no motor. A carga do motor é a força que age contra a potência que um motor produz.

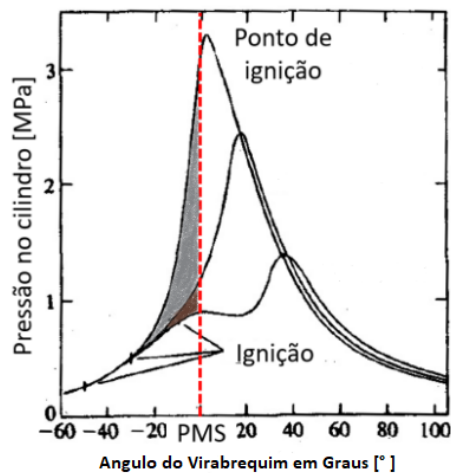


Figura 2 – Variação da pressão no cilindro de acordo com a mudança do avanço de ignição
[Extraído e adaptado de Bosch (2005)]

Como a combustão da mistura não acontece de maneira instantânea é essencial segundo Hellstrom Donghoon Lee (2012) que o início da reação de combustão dentro do cilindro aconteça suficientemente cedo, minimizando assim os efeitos do retardamento químico das reações de combustão, a figura 2 mostra a pressão gerada no cilindro para diferentes avanços de ignição.

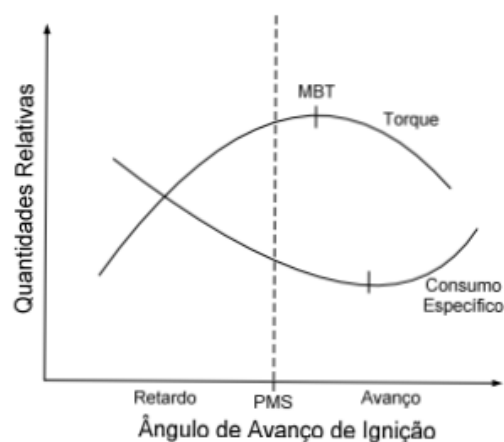


Figura 3 – Variação do torque e do consumo específico em função ao avanço de ignição
[Extraído e adaptado de Bosch (2005)]

O avanço de ignição que traz o melhor compromisso entre o trabalho negativo na compressão e o trabalho positivo na expansão é denominado MBT do inglês, "*Minimum advance for best torque*", e representa o mínimo avanço de ignição para o máximo torque [Dalpra \(2020\)](#). A variação do torque e do consumo específico em relação a variação do avanço de ignição, pode ser visto na figura 3. Contudo, aumentar o avanço de ignição em busca do ponto de torque máximo (MBT) provoca o aumento da pressão e temperatura da mistura ainda não queimada, e é limitado pelo fenômeno da detonação ou *Knock*. Em sistemas de injeção eletrônica são utilizadas tabelas contendo o ponto de ignição para todo o regime de operação do motor.

2.2.4 Detonação

O aumento da pressão e temperatura dentro do cilindro por conta da propagação da frente de chama, pode desencadear em alguns pontos a auto ignição da mistura, antes da chegada da chama principal. Esse efeito quando de baixa intensidade pode reduzir o tempo de combustão da mistura, auxiliando assim na combustão normal. Quando a auto ignição atinge uma intensidade muito elevada é denominada Detonação (do inglês *Knock*) e seus efeitos maléficos faz com que seja evitada.

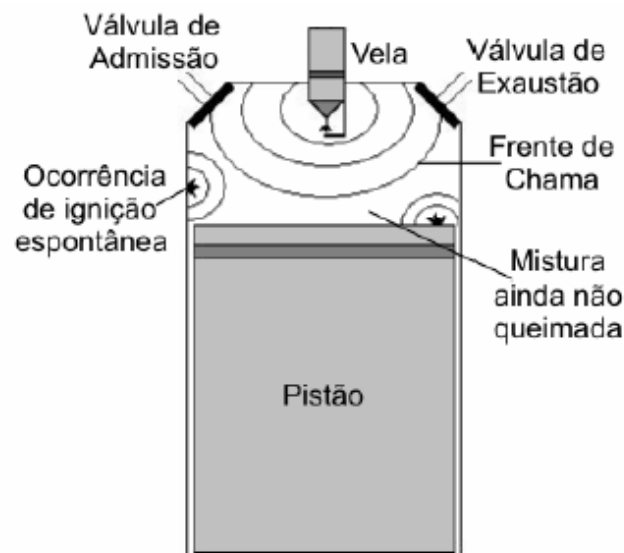


Figura 4 – Ocorrência de ignição espontânea no interior do cilindro

[Retirado de [B.Ribbens \(1998\)](#)]

A Detonação conhecida popularmente como batida de pino é a auto ignição brusca de uma grande massa da mistura de ar e combustível ainda não queimada pela chama principal. Segundo [Heywood \(1988\)](#) essa porção da mistura irá entrar em combustão repentinamente a volume constante, provocando assim um aumento brusco da pressão, causando a propagação de ondas de choque devido a interferência entre as ondas de

combustão normal e de autoignição. A ocorrência desse fenômeno pode ser detectada através da oscilação da pressão no cilindro a partir do sensor knock, um acelerômetro piezoelétrico que consegue identificar as ondas de choque causadas pela detonação dentro do cilindro.

Brunetti (2012) diz que a ocorrência de detonação no motor pode ser provocada por combustível de baixa octanagem (combustível adulterado), mistura pobre ou não homogeneizada, avanço de ignição muito adiantado e superaquecimento do motor. Os efeitos da detonação dependem diretamente da sua duração e intensidade. Quando intensa e/ou por períodos prolongados pode danificar severamente a cabeça do pistão e as paredes do cilindro, causando assim a erosão desses componentes, podendo levar o motor a inoperância.

2.3 Sistema de alimentação de combustível

O sistema de injeção de combustível surgiu na década de 50 e com o avanço da eletrônica sofreu diversas modernizações, até que foi implementado mundialmente a partir da década de 90, sendo incluído como item de série em praticamente todos os veículos fabricados no mundo.

A composição da mistura ar e combustível é um fator essencial para o funcionamento e rendimento do motor. O sistema de alimentação de combustível é responsável por predefinir e preparar a mistura de ar e combustível necessária para o funcionamento do motor, além de satisfazer os requisitos de funcionamento do motor para qualquer que seja a sua condição Milhor (2002). Esse sistema deve ser capaz de desempenhar três principais funções, sendo elas:

- Controle da quantidade de ar e combustível admitida;
- Atomização do combustível: Atomizar o combustível em pequenas gotas, garantindo assim a vaporização da mistura ar e combustível.
- Distribuir homogeneamente a mistura pelos cilindros.

Segundo Denton (2004) a maior vantagem de um sistema de injeção de combustível controlado eletronicamente, qualquer que seja ele, é o controle preciso da quantidade de combustível injetada no motor, seu princípio de funcionamento é baseado na linha de combustível pressurizada por meio da bomba de combustível, combustível esse que é fornecido a uma válvula injetora (válvula eletricamente controlada) a uma pressão diferencial constante. Portanto a quantidade de combustível injetada será proporcional ao tempo de abertura dos bicos injetores e sua respectiva vazão. Outra vantagem desse tipo de sistema

é a facilidade de se implementar o *cut off* (corte de combustível), que é utilizado no limite de rpm assim como em estratégias de consumo de combustível.

- Multiponto, quando a um bico injetor para cada cilindro. Representado na figura 5.

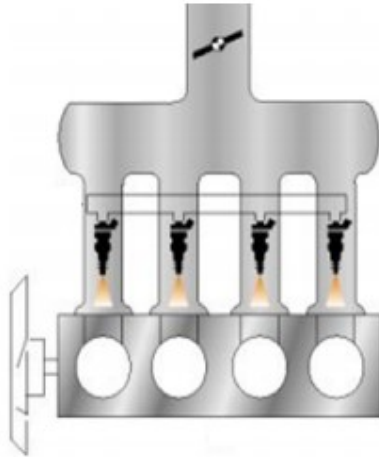


Figura 5 – Esquemático de injeção multiponto

[Adaptado de Brunetti (2012)]

O sistema de alimentação de combustível multiponto é um sistema de injeção indireta, pois executam a injeção do combustível no coletor de admissão, porém atualmente existem sistemas que fazem essa injeção de maneira direta, ou seja, a injeção de combustível é feita diretamente no interior do cilindro.

Os sistemas de injeção direta de combustível não serão abordados nesse trabalho, pois o objetivo do mesmo é implementar um mapa de injeção e ignição em um motor com injeção indireta de combustível.

2.4 Sistema de Ignição

Nos motores onde a ignição não acontece de maneira espontânea é necessário que ela seja feita de maneira comandada, ou seja, a ignição é provocada por um agente externo. Nos MIF, o sistema que controla a centelha elétrica é denominado Sistema de Ignição, e é responsável pelo fornecimento da centelha elétrica que dá início a reação de combustão dentro dos cilindros. Esse sistema deve ser capaz de desempenhar 3 funções importantes, função transformadora, distribuidora e de avanço e atraso de ignição.

- Função Transformadora, onde o sistema deverá ser capaz de elevar a tensão disponível na bateria, para valores de tensão necessário para a geração da centelha elétrica.

- Função Distribuidora, onde o sistema de ignição deverá ser capaz de distribuir a centelha para cada um dos cilindros e na ordem de funcionamento do motor.
- Função Avanço e Atraso de Ignição, onde o sistema precisará ajustar automaticamente o momento em que a centelha será iniciada, de acordo com o regime de operação do motor.

Segundo Brunetti (2012), um dos primeiros sistemas de ignição desenvolvidos faziam uso de uma bobina de ignição centralizada, platinado, distribuidor, cabo de ignição ou cabo de velas, além das velas de ignição para cumprir todas as funções citadas anteriormente. A bobina de ignição é o componente que eleva a tensão disponibilizada pela bateria de 12v do veículo(baixa tensão) para os níveis de tensão entre 5KV e 30KV, que garantem a tensão de ruptura da rigidez dielétrica do ar pela vela de ignição, garantindo assim uma combustão eficiente.

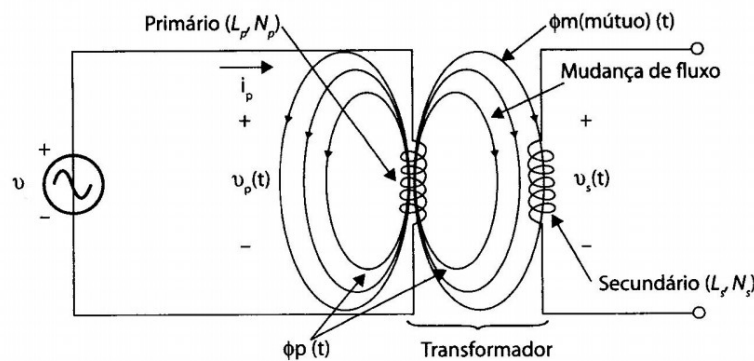


Figura 6 – Esquemático bobina de ignição

[Adaptado de Brunetti (2012)]

O princípio de funcionamento da bobina de ignição é similar ao funcionamento de um transformador de tensão do tipo elevador de tensão, cujo o funcionamento é baseado no efeito de indução eletromagnética. A bobina de ignição é construída a partir de dois indutores (bobinas) posicionados de maneira que o fluxo magnético de um tenha influencia sobre o outro, denominados de enrolamentos primário e secundário, onde o primário recebe a energia de baixa tensão, e induz eletromagneticamente o secundário, cuja a carga será conectada, e a relação entre os sinais de entrada e saída é função do número de espiras de cada um dos enrolamentos.

$$\frac{V_p(t)}{V_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (2.8)$$

Onde V_p e V_s representam respectivamente a tensão no primário e a tensão no secundário e N_p e N_s representam o numero de espiras nos enrolamentos primário e secundário. No caso da bobina de ignição por se tratar de um transformador elevador de

tensão o valor de "a" será menor que 1. Sob aspectos construtivos o enrolamento primário é formado por um fio de bitola maior com um número relativamente pequeno quando comparado ao enrolamento Secundário que possui fio de bitola menor e número elevado de espiras.

A bobina de ignição atua de acordo com os comandos dados pela ECU, que é responsável pelo controle do tempo de ignição. A ECU comanda a ignição de acordo com suas tabelas de tempo de ignição, essas muitas vezes são parametrizadas a partir de testes em dinamômetro, ajustando assim o momento em que a centelha será liberada. Quando energizada, a bobina de ignição funciona como um circuito RL série, operando em corrente contínua, onde o indutor fará o armazenamento de energia na forma de campo magnético. Quando desenergizado, o circuito RL série sofre uma brusca variação de corrente de seu valor máximo para zero muito rapidamente, nessa condição o circuito equivalente passa a operar em modo de descarga de energia, induzindo assim uma alta tensão nos terminais do enrolamento primário, fazendo assim com que os níveis de tensão induzida no secundário sejam ainda maiores. Esse efeito faz com que o sistema de ignição alcance os níveis de tensão desejados.

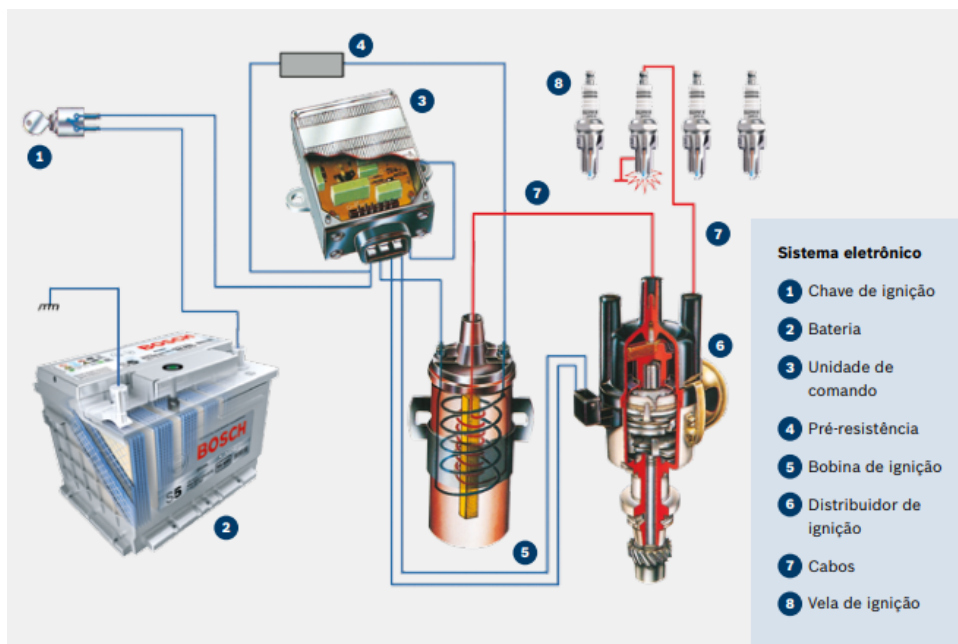


Figura 7 – Esquemático sistema de ignição com uso de ECU

[BOSCH (2018)]

O sistema de ignição ainda conta com a vela de ignição que é o componente utilizado para que seja gerada a centelha dentro dos cilindros. Na figura 9 podemos ver a representação do sistema de ignição com todos os seus componentes.

2.5 Controle eletrônico de motores de combustão interna

A eletrônica permitiu a modernização de diversos sistemas, para sistemas mais confiáveis e com maior vida útil, como a substituição do platinado por um sistema de chaveamento transistorizado (com o uso de transistores). Permitiu ainda o desenvolvimento do controle digital a partir de sistemas micro controlados e micro processados, no caso da indústria automotiva foi desenvolvido as denominadas ECU (*Engine Control Unit- Unidade de Controle Eletrônico*) para realizarem o controle digital do motor.

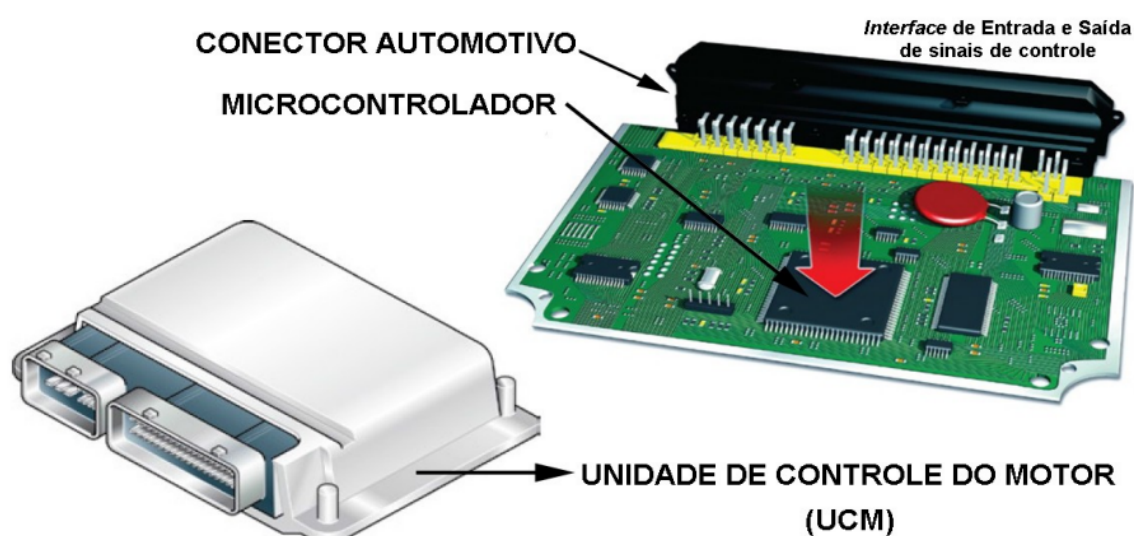


Figura 8 – Unidade de controle eletrônico e circuito microcontrolado

[Adaptado de [Volkswagen\(Brasil\) \(2009\)](#)]

O sistema de controle dos motores de combustão interna é composto por diversos subsistemas normalmente integrados com o módulo da ECU a depender do fabricante, entretanto é comum sistemas de injeção de combustível e de ignição funcionando de maneira integrada uma vez que compartilham sensores e por possuírem uma relação de interdependência. Segundo [Bosch \(2005\)](#) a principal função da ECU é converter o desejo do motorista em determinada potência de acordo com o requisitado no pedal de acelerador, bem como promover um maior controle das emissões de poluentes, dosando desempenho e economia de combustível de acordo com as necessidades imediatas do motor.

O microcontrolador possui memórias dedicadas normalmente do tipo EEPROM com a finalidade de armazenar o *firmware*, podendo ainda possuir memórias voláteis do tipo RAM para auxiliar na execução do *firmware* [KIANIFAR \(2014\)](#). De acordo com [Alcantara \(2015\)](#) as principais saídas da unidade de controle eletrônico são responsáveis pelo controle do tempo de injeção de combustível, tempo de carga da bobina, avanço de ignição além da abertura da válvula do tipo borboleta.

O gerenciamento eletrônico é feito pela ECU que recebe e processa o sinal dos sensores que informam a condição imediata do motor. Após o processamento dos dados são gerados sinais de comando para os atuadores a partir das informações gravadas na memória do controlador, garantindo de maneira controlada o fornecimento de combustível nas proporções ideais [Tan \(2018\)](#). A figura 9 tem como objetivo de exemplificar o processo de operação de uma ECU, com seus sinais de entrada e saída.

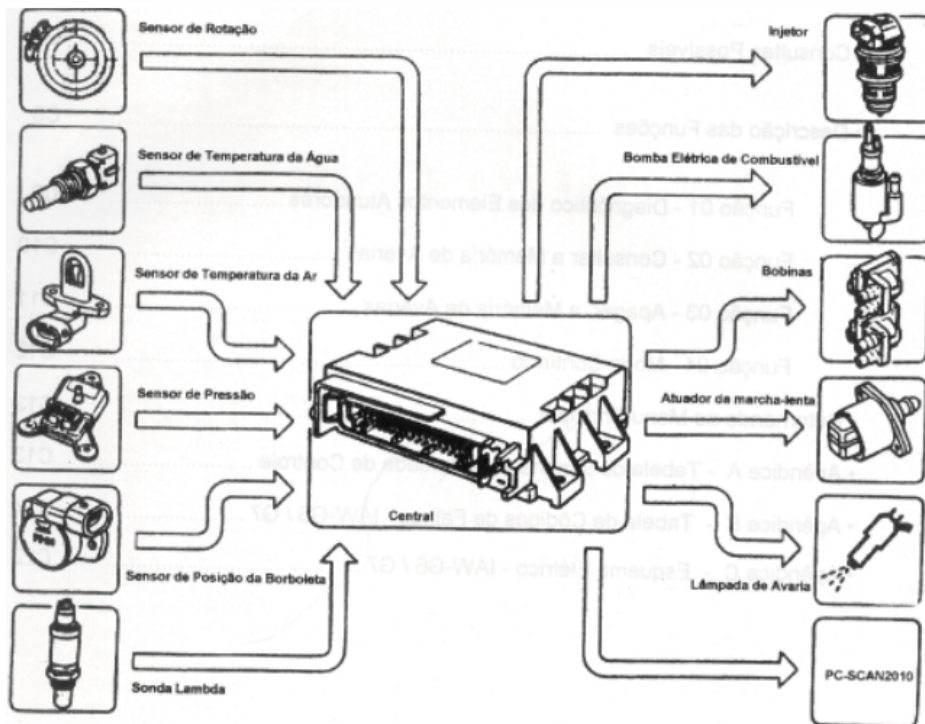


Figura 9 – Sinais de entrada e saída em uma ECU

[Adaptado de [Gtshina \(2019\)](#)]

A UCE faz o controle do motor a partir das informações armazenadas nos mapas de controle do motor, um amplo conjunto de tabelas de parâmetros de uma ou duas dimensões carregadas na memória da UCE. As tabelas são compostas por matrizes de dimensão $M \times N$, cujas entradas são as condições de operação do MCI e o valor resultante é um elemento $a_{i,j}$ da matriz. Os elementos da matriz são obtidos a partir de ensaios para o levantamento de dados que traduzem aspectos funcionais de cada MCI. Segundo [Tomasi \(2015\)](#) nesse processo de mapeamento, se obtém as principais curvas de performance, como torque, potência, consumo e emissões, dadas em função das entradas do sistema. As tabelas contém todas as informações para o adequado funcionamento do motor e são armazenadas na memória do microcontrolador da ECU. As informações contidas nas tabelas são recuperadas ponto a ponto de acordo com o regime de operação do motor. As tabelas principais são as que regem o funcionamento em toda a faixa de operação, a exemplo da tabela de tempo de injeção que representa o tempo de abertura das válvulas injetoras em função da rotação do motor (RPM) e Pressão Absoluta do Coletor de Ad-

missão (MAP). Tabelas auxiliares fazem as correções específicas, para condições atípicas, como por exemplo a alteração do tempo de injeção e ponto de ignição de acordo com a temperatura.

2.5.1 Estratégia de Controle

O gerenciamento eletrônico do motor, através da unidade de controle eletrônico, monitora, processa e atua no motor visando otimizar seu rendimento. Entretanto é de extrema importância considerar os diversos regimes de operação do motor, uma vez que para cada regime é necessária uma estratégia de controle diferente. Os principais regimes de operação que uma ECU deve identificar e atuar são:

- Partida do motor;
- Aquecimento
- Marcha lenta;
- Aceleração;
- Desaceleração;
- Velocidade de cruzeiro;

Para [Denton \(2004\)](#) no regime de partida do motor, após o acionamento da chave de ignição a ECU identifica através do sensor de temperatura a temperatura do líquido de arrefecimento que irá indicar se o motor está quente ou frio. A baixa temperatura afeta a capacidade de atomização do combustível e formação de uma mistura ar e combustível uniforme. Faz ainda de acordo com [B.Ribbens \(1998\)](#) que parte do combustível injetado se condense nas paredes do coletor de admissão e nem mesmo entre no cilindro. Esses efeitos se agravam para temperaturas mais baixas.

Nessa condição é necessário que a ECU garanta uma mistura de combustível rica o suficiente para que o motor entre em operação, ou seja, quanto menor a temperatura do motor maior será a massa de combustível injetada. Os sistemas em geral utilizam a temperatura do motor como entrada em uma tabela de correção que fornece a massa de combustível adequada independente da condição. O principal objetivo desse modo de operação é que o sistema de controle garanta uma partida rápida e confiável, sendo que o consumo e as emissões ficam prejudicados.

Após a partida, caso o motor esteja frio a ECU entra em modo de aquecimento do motor, condição onde se faz necessário se adotar uma mistura de combustível rica para compensar os efeitos de baixa temperatura. A medida que o motor aquece a massa de combustível adicional vai sendo reduzida até que o motor esteja em sua temperatura ideal

de trabalho Braga (2007). Esse regime de operação é crítico para as emissões de poluentes e por isso deve durar o mínimo possível, ficando o consumo de combustível e a redução das emissões em segundo plano.

Na condição de marcha lenta o motor se encontra ligado em baixa rotação com a válvula borboleta fechada. Segundo Bosch (2005), essa condição é responsável por até 30% do consumo total de combustível em um veículo operando em tráfego urbano. De modo a reduzir o consumo de combustível é necessário que o controle de marcha lenta mantenha um funcionamento suave do motor na menor rotação possível, nessa condição a ECU prioriza uma mistura estequiométrica ou levemente pobre para que o consumo de combustível seja reduzido. Segundo Alcantara (2015) o controle de marcha lenta se torna complexo uma vez que em baixas rotações o torque disponível nessa rotação é baixo, tornando o sistema mais sensível a perturbações. O desafio se torna maior uma vez que se espera uma grande variação nos parâmetros existentes de um veículo para outro.

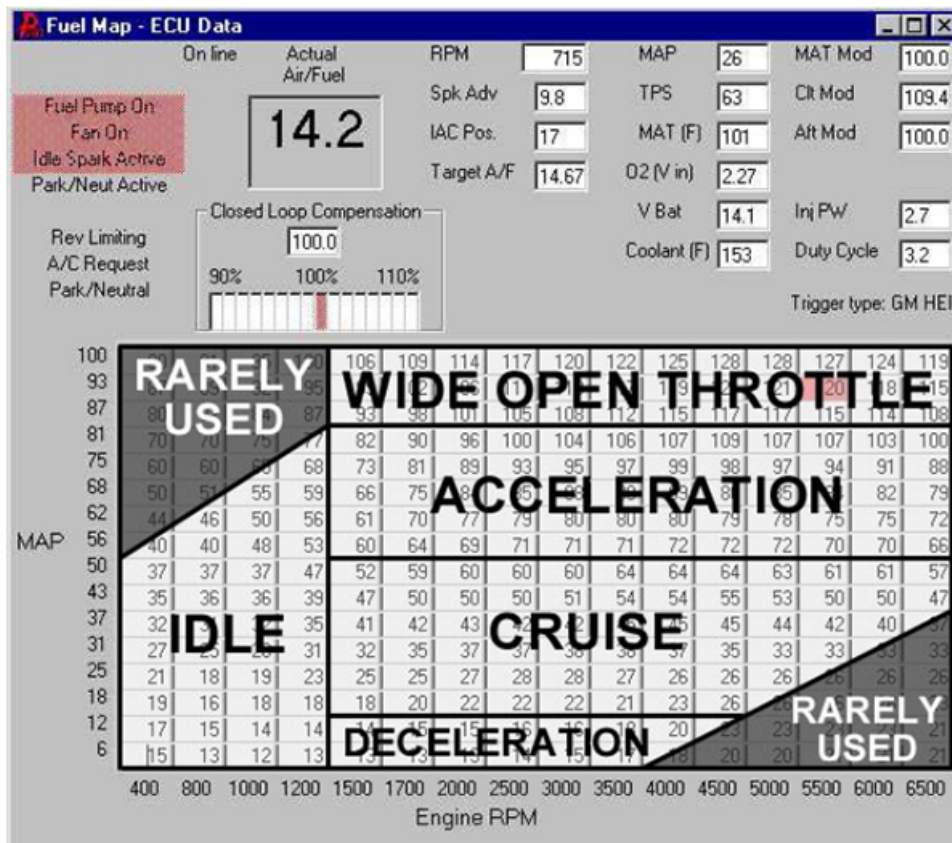


Figura 10 – Regiões do mapa de combustível

[Retirado de https://help.summitracing.com/app/answers/detail/a_id/5229/what-is-a-fuel-map%3F]

O regime de aceleração, caracterizado pelo acionamento do acelerador, pode ser dividido em condição de plena carga e média carga. Na condição de média carga o acelerador está parcialmente pressionado e consequentemente a demanda de torque não é máxima. Nessa fase é necessário que a ECU enriqueça parcialmente a mistura de combustível, para

suprir a demanda de torque solicitado. A condição de plena carga ou WOT (*Wide open throttle*) se caracteriza pela total abertura da válvula borboleta, que acontece quando o acelerador é totalmente pressionado, ou seja, máxima solicitação de torque. Para que o motor forneça máxima potência, a ECU incrementa de maneira adequada a massa de combustível fornecida ao motor, para que o torque solicitado seja obtido. D.Amil (2016) diz ainda que esse efeito faz com que o motor trabalhe fora da relação estequiométrica.

O regime de desaceleração é caracterizado pelo motor em altas e médias rotações sem que o pedal do acelerador esteja pressionado. Esse regime tem como principal função reduzir as emissões de HC, CO e consumo de combustível além de promover um funcionamento suave do motor evitando solavancos. Nessa condição segundo Braga (2007) é necessário adotar o uso de uma mistura pobre para que as emissões sejam reduzidas. A ECU ainda é responsável por promover o fechamento gradual da válvula borboleta para que sejam evitados solavancos no motor. Em alguns sistemas na condição de desaceleração adota-se o corte total de combustível, situação conhecida como *cut-off*.

O regime de velocidade de cruzeiro acontece quando o motor está em regime de rotação constante com o pedal do acelerador parcialmente pressionado, quando o veículo está com velocidade aproximadamente constante. Nessa condição a ECU opera buscando sempre a relação estequiométricas.

2.6 Injeção eletrônica de combustível

Segundo Heywood (1988) o sistema de controle eletrônico do motor possui a função de calcular e dosar a quantidade de combustível a ser injetado nos cilindros por meio das válvulas injetoras de combustível, onde a quantidade de combustível injetada será determinada pelo tempo de abertura dos injetores que são válvulas eletromecânicas de duas posições (Aberto/Fechado).

O sistema de controle ainda precisa controlar a sequência de injeção de combustível, ou seja, em quais cilindros vão ser injetado combustível, sendo que essa pode acontecer de 3 formas diferentes, dependendo da complexidade do sistema.

- **Injeção simultânea:** Nessa configuração os bicos injetores são conectados em série e injetam combustível simultaneamente independente da fase em que o cilindro se encontra, esse modo de injeção não é tão eficiente, e funciona de maneira similar a um carburador.
- **Injeção Semi-Sequencial:** A injeção de combustível nessa configuração é feita em blocos, ou seja, metade dos injetores se abrem simultaneamente, enquanto o outro grupo de bicos injetores se mantém fechados.

Cada grupo de injetor funciona de maneira alternada, injetando combustível nos cilindros gêmeos, ou seja, nos cilindros que estão admitindo a mistura e no cilindro que está queimando a mistura.

- **Injeção Sequencial:** Esse modo de injeção segundo [Bosch \(2005\)](#) é o mais eficiente e permite o maior grau de liberdade para ser configurada. Esse modo de injeção precisa necessariamente da informação do sensor de fase para identificar assim a posição dos pistões. Com essa informação a ECU consegue controlar individualmente cada bico injetor, controlando assim de maneira livre o momento de injeção de combustível, fazendo com que esta seja feita somente no momento da admissão.

2.7 Controle eletrônico da ignição

Assim como no sistema de injeção eletrônica a ECU é a responsável por fazer o controle eletrônico da ignição, tendo como base os diversos sensores presentes no veículo. Segundo [Heywood \(1988\)](#) a ECU processa os sinais recebidos pelos sensores e determina o regime de funcionamento do motor, define então a melhor estratégia de controle de ponto de ignição a ser adotada, tendo como referencia os mapas de injeção e ignição obtidos por meio de calibração do motor.

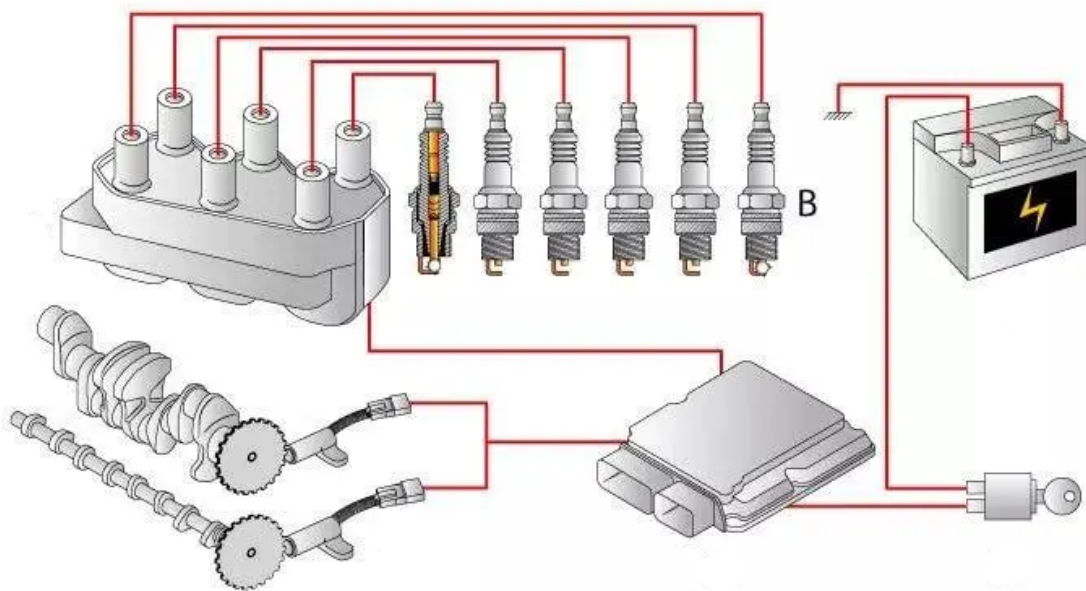


Figura 11 – Sistema de ignição eletrônica

[[fahadhvassan \(2020\)](#)]

O controle eletrônico da ignição permitiu que se desenvolvesse soluções de controle e de hardware mais elaboradas, como o uso do sensor de detonação ou (*Knock sensor*) para identificação do acontecimento desse efeito. A adoção desse sensor permite que seja

elaborada uma estratégia de retirada de ponto de ignição pela ECU, a fim de minimizar os efeitos danosos ao motor que a detonação pode causar.

As mudanças de hardware foram concentradas na eliminação da bobina centralizada de ignição e distribuidor, que perderam espaço para sistemas multibobinas com a adoção de bobinas individuais por cilindro. As bobinas individuais são conectadas diretamente nas velas de ignição dispensando assim o uso de cabos de vela, a adoção desse sistema minimiza as perdas de energia além de melhorar a queima do combustível dentro do cilindro, aumentar a potência do motor e reduzir a emissão de poluentes por proporcionar maior energia para as velas de ignição.

Assim como controle da injeção, o controle da ignição é feito através dos mapas de ignição, que contem o ponto de ignição para todas as faixas de operação do motor. Normalmente o mapa principal de ignição relaciona os valores de pressão absoluta obtidas através do sensor MAP com a rotação do motor (RPM), e seu conteúdo correspondem a ações diretas de controle nesse caso representa o avanço de ignição a ser aplicado.

2.8 Sensores e Atuadores

A implementação do gerenciamento eletrônico em diversas áreas gerou uma demanda e um uso cada vez mais abrangentes dos sensores, transdutores e atuadores. Os sensores são dispositivos responsáveis por perceber (sentir) alguma variável do ambiente. Segundo [B.Ribbens \(1998\)](#), são capazes de mensurar uma grandeza física/química e transmitir essa informação de forma que seja inteligível para o operador ou para o sistema de controle. Os sensores em sua totalidade são compostos por transdutores, que se caracterizam por transformar um tipo de energia em outra, em sua maioria transformando a grandeza de entrada (sinal do rotação por exemplo) em uma grandeza elétrica, reproduzindo as características do sinal de entrada a partir de uma relação bem definida e conhecida, de forma que o sinal possa ser processado pelo sistema de gerenciamento.

Os atuadores assim como os sensores são de extrema importância para o controle eletrônico do motor. Segundo [B.Ribbens \(1998\)](#), um atuador possui função inversa a um sensor, uma vez que são dispositivos de saída. Esse tipo de dispositivo responderá aos estímulos dos sistema de controle de forma a corresponder de maneira precisa o que se deseja. Normalmente o sistema de controle processa os dados recebidos pelos sensores para então enviar comandos de controle para os atuadores.

Nessa seção serão abordados os principais sensores e atuadores utilizados no gerenciamento de um motor de combustão interna, e suas respectivas funções.

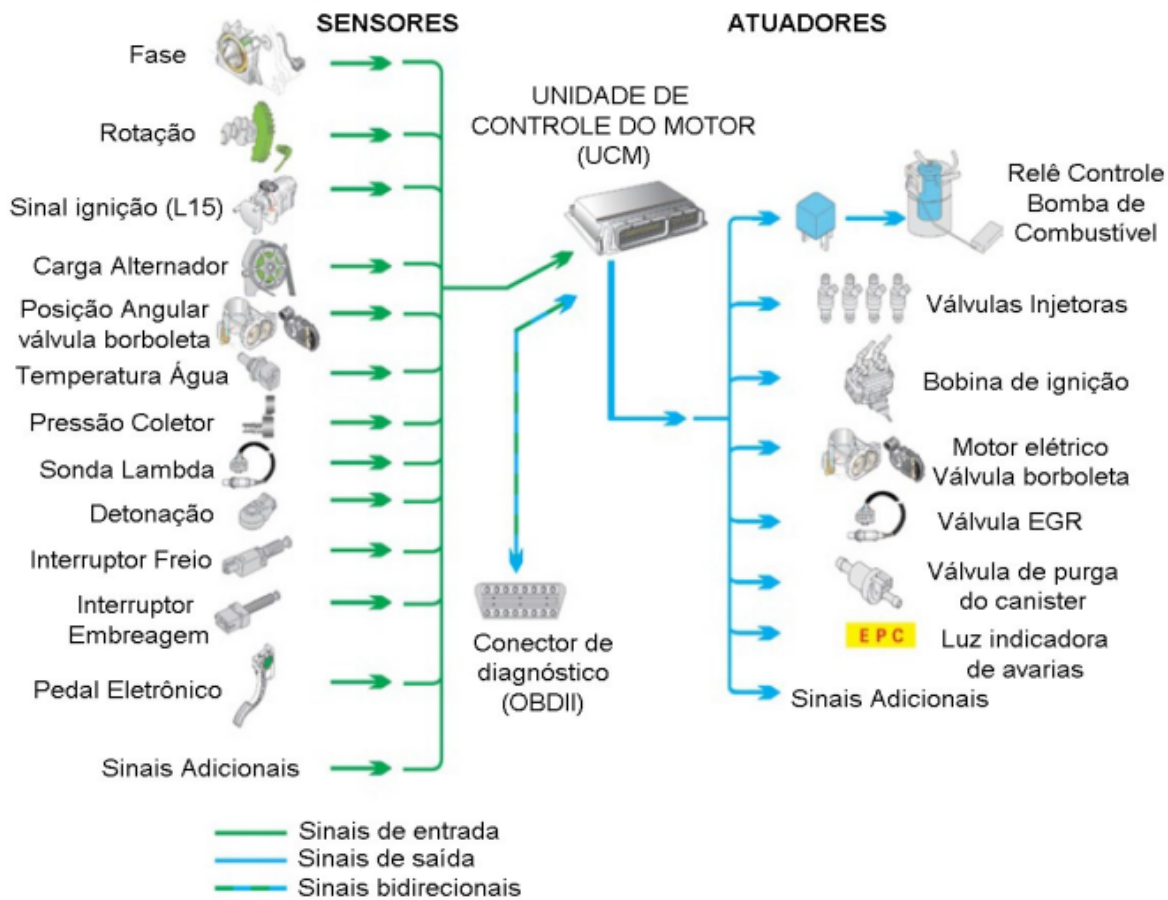


Figura 12 – Sinais de entrada e saída em uma ECU

[Adaptado de Volkswagen(Brasil) (2009)]

2.8.1 Sensor de Oxigênio

O sensor de oxigênio ou Sonda lambda foi construído de forma que consiga mensurar a concentração de oxigênio nos gases de escape. Esse sensor é o responsável por informar o fator λ para a ECU. Segundo Denton (2004), os aspectos construtivos da sonda lambda faz com que esse sensor opere com temperatura acima de 300°C, e por esse fator atualmente algumas sondas são aquecidas eletricamente para que entre em sua faixa de operação mais rapidamente.

Denton (2004) ainda fala que o sensor mais utilizado atualmente são as chamadas EGO (Exhaust Gas Oxygen), conhecidas como sonda lambda de banda estreita ou sonda lambda on-off, este sensor faz uma média indireta da mistura ar combustível admitida, possui uma baixa resolução e ocasionando assim em uma grande janela entre os parâmetros, porém cumpre bem a função de indicar se nos gases de escape se possui uma mistura rica ou pobre. O sinal gerado pelo EGO é útil apenas para o controle em torno da região estequiométrica o que já atende sistemas convencionais, Braga (2007).

Outro sensor de oxigênio é o UEGO (Universal Exhaust Gas Oxygen) chamado

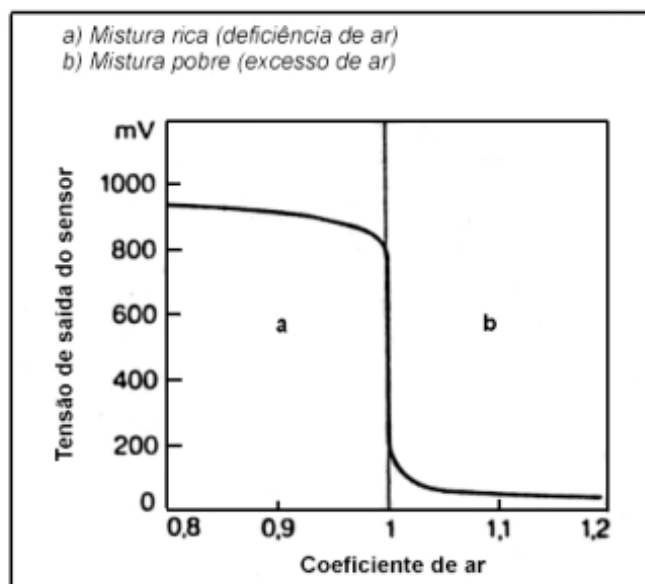


Figura 13 – Representação sensor de oxigênio de banda estreita

[Retirado de (BOSCH, 2005)]

muitas vezes de Wideband ou sonda lambda de banda larga (Wideband Lambda Sensor), este tipo de sensor funciona em malha fechada e por isso requer um controlador eletrônico. A grande diferença entre esse sensor e as sondas convencionais está no fato de sua faixa de operação de funcionamento ser muito ampla, com grande resolução e com uma ótima precisão, o que possibilita um controle da mistura de combustível muito mais refinado para o motor do que usando as sondas convencionais, uma vez que esse tipo de sensor de oxigênio opera também fora da região estequiométrica.



Figura 14 – Sensor de Oxigênio

[Disponível em <https://fueltech.com.br/>]

Seu uso é essencial para o controle em malha fechada da mistura de ar e combustível, que é feito a partir de uma realimentação, com a finalidade de tornar o sistema mais preciso. O controle em malha fechada faz com que a ECU identifique o quanto a mistura

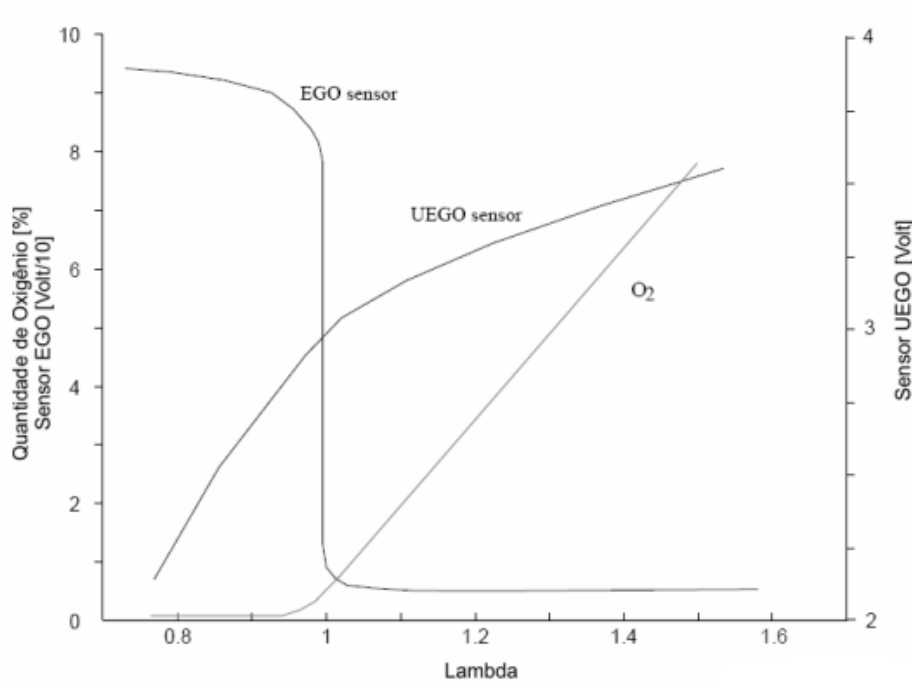


Figura 15 – Curvas características dos sensores de oxigênio EGO e UEGO e concentração de O₂ na exaustão

[Braga (2007)]

está se desviando do apresentado no mapa, possibilitando que a ECU faça as devidas correções de combustível.

2.8.2 Sensores de Temperatura

Quando falamos de motores de combustão interna, é interessante aferir a temperatura no coletor de admissão, e do óleo lubrificante do motor (utilizada para indicar a temperatura do motor), esses dados serão processados pela ECU e usados para o melhor funcionamento do sistema. Os sensores de temperatura (termistores), são os dispositivos mais utilizados para cumprir essa aplicação. De acordo com B.Ribbens (1998) seu princípio de funcionamento está relacionado com a liberação de elétrons em materiais semicondutores (óxidos de cobalto ou níquel) com a Acréscimo da temperatura. Esse efeito causa conseqüentemente uma variação na resistência do material.

A temperatura do motor é medida para que a ECU defina a melhor estratégia de controle para o motor, e de controle de temperatura do mesmo, para que ele funcione de maneira ótima, além de indicar casos de superaquecimento. A maioria dos termistores de uso comum são do tipo NTC (Negative Temperature Coefficient) e são caracterizados por sua sensibilidade a temperatura, ou seja, uma pequena mudança na temperatura causa uma grande variação na resistência do componente. Os valores típicos ainda segundo Bosch (2005) desse tipo de sensor é de -40 a 170 graus Celsius, tornando esse sensor ideal

para a maioria das medições necessárias no veículo sendo necessário alguma adaptação no sensor para a aplicação.



Figura 16 – Sensor de temperatura do ar no coletor de admissão

[Disponível em <https://fueltech.com.br/>]



Figura 17 – Sensor de temperatura do líquido de arrefecimento

[Disponível em <https://fueltech.com.br/>]

A temperatura é encontrada a partir da tensão de saída do sensor, onde, com a tensão de saída é possível encontrarmos o valor da resistência e posteriormente encontrar a temperatura de acordo com os valores do datasheet.

O sensor de temperatura do ar de admissão geralmente é acoplado ao sensor de pressão absoluta (MAP), diferentemente do sensor de temperatura de óleo, que é um único sensor. Esses sensores também são utilizados em vários itens de segurança do motor, como o controle da eletro ventilador de arrefecimento e identificação de mal funcionamento, ou até mesmo em itens de conforto como, medição da temperatura do compartimento de passageiros, temperatura externa.

2.8.3 Sensor de fluxo de massa de ar

Segundo [B.Ribbens \(1998\)](#) a partir da década de 90 a maioria dos carros produzidos começaram a utilizar o sensor MAF (*Mass Air Flow Rate Sensor*), sensor mássico de ar,

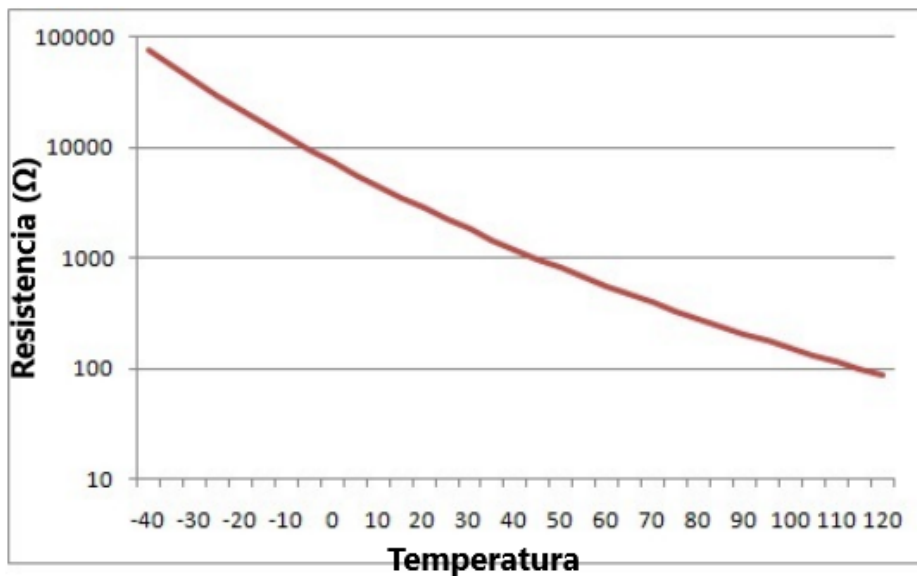


Figura 18 – Variação da resistência em função da temperatura de um elemento NTC

[Disponível em [Laganá \(2007\)](#)]

utilizado para fazer a medição do fluxo de ar admitido pelo motor. Em operação esse sensor varia sua resistência quase que linearmente com o fluxo de ar real. Para o correto funcionamento desse sensor é necessário a utilização de uma tela colmeia para suavizar o fluxo de ar.

Uma outra maneira de se fazer a medição do fluxo de massa de ar é de maneira indireta, utilizando o sensor TMAP (Temperature and Manifold Air Flow Sensor), a partir da pressão absoluta e temperatura. O fluxo de ar atua sobre um diafragma piezo resistivo com referência ao vácuo, e faz a medição de pressão absoluta. A deformação do diafragma presente no sensor resulta em uma mudança de resistência, que conseqüentemente resulta em uma variação de tensão, que é usada como base para se identificar a pressão no coletor de admissão. É importante ressaltar que o sensor TMAP possui sensor de temperatura funcionando em conjunto e a partir da década de 90 veio sendo substituído por sistemas de medição direta.

2.8.4 Sensor de rotação e fase do motor

Segundo [Brunetti \(2012\)](#) o sensor de rotação é responsável por determinar a rotação do motor e a posição da árvore de manivelas, ou seja, a posição em que os pistões se encontram a cada instante. O sensor de fase identifica o momento correto de início da ordem de ignição. Os tipos de sensores mais utilizados para fazer a medição dessas grandezas são os sensores de relutância (indutivo) e de efeito Hall.

- Sensor de Relutância ou Indutivo

O sensor de relutância de acordo com [B.Ribbens \(1998\)](#) é capaz de identificar a passagem dos dentes existentes na roda dentada (roda fônica) e por sua vez identificar os dentes faltantes na mesma, com o objetivo de ser a referência do início/término de sua revolução por meio do sinal elétrico de saída. A roda fônica mais utilizada atualmente é a de configuração 60 - 2 (Sessenta menos Dois), ou seja, a roda dentada possui 60 dentes e 2 deles são faltantes, como podemos ver na figura 19:

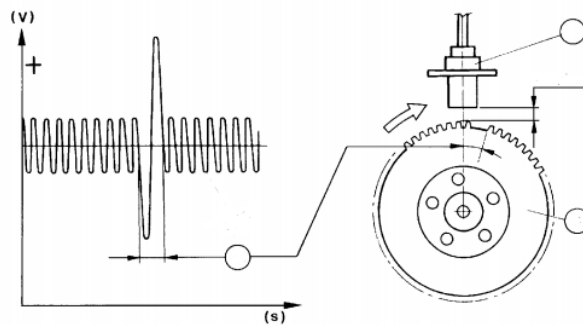


Figura 19 – Representação sensor de relutância e Roda dentada

[Retirado de [B.Ribbens \(1998\)](#)]

O sensor é basicamente um ímã permanente e uma bobina que fica localizado próximo a roda dentada magnetizada. A proximidade desses dois componentes causa uma perturbação no campo magnético, que acaba gerando na bobina tensão induzida. O sinal de saída do sensor é uma senoide que será proporcional a rotação do motor, para isso é necessário que esse sinal seja tratado por sistemas de tratamentos de sinais mais complexos.

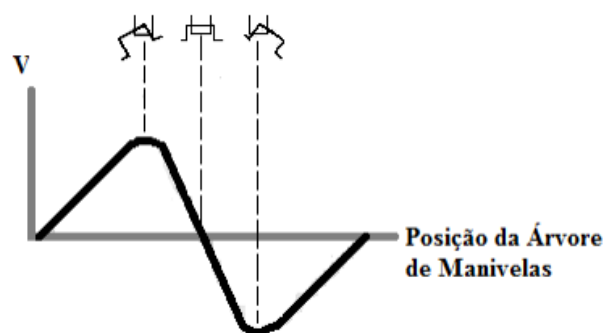


Figura 20 – Representação do sinal de saída sensor de relutância

[Retirado de [Laganá \(2007\)](#)]

Quando o sinal da cossecante passa por zero de positivo para negativo indica o alinhamento do sensor com o centro do dente da roda dentada, e assim é possível ajustar o posicionamento da mesma com a árvore de manivelas, onde o primeiro alinhamento de dente após a falha coincida com o momento em que os cilindros 1 e 4 estejam na posição de ponto morto superior (PMS), como mostra a figura abaixo:

- Sensor de efeito Hall

O princípio de funcionamento desse sensor é baseado no efeito descoberto por Edwin Hall em 1889. Esse efeito é uma propriedade que se manifesta em um elemento Hall (pequeno material semiconductor), que quando submetido a um campo magnético perpendicular ao fluxo de corrente gera uma diferença de potencial denominada tensão de Hall, quando não excitado por um campo magnético, possui tensão de saída igual a zero.

O sensor Hall produz uma onda quadrada, que será importante para que a UCE possa controlar o sistema de ignição eletrônica. Cada onda quadrada será interpretada pela UCE como um dente de uma roda dentada. Esse sensor, pode ser utilizado na árvore de manivelas (virabrequim) ou no eixo do comando de válvulas, em alguns projetos o uso deste sensor não é vital para o funcionamento do sistema.

O sensor Hall irá mudar de estado a cada vez que um novo ímã passar, fazendo assim transições de alto para baixo ou de baixo para alto. No momento em que passa o local onde estaria instalado um quarto ímã, a UCE percebe que o virabrequim já deu uma volta completa, sendo assim possível a contagem de rotações e o conhecimento da posição do motor, [D.Amil \(2016\)](#). Seu funcionamento pode ser visto na figura 21.

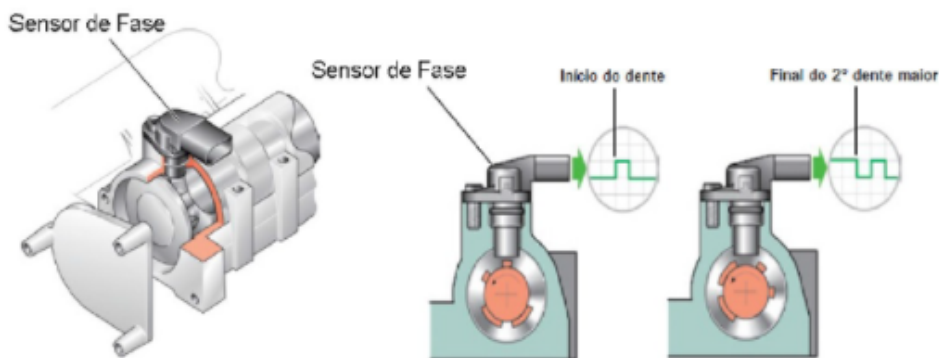


Figura 21 – Representação do sensor Hall e seu respectivo sinal de saída

[[Laganá \(2007\)](#)]

2.8.5 Sensor de posição de borboleta (TPS)

O sensor de posição da borboleta TPS (Throttle Position Sensor) foi desenvolvido de forma a mensurar o ângulo de abertura da válvula borboleta de admissão, que é controlada pelo operador. A sua função é medir a rotação da borboleta, de modo a que a UCE possa determinar a sua posição.

Segundo [B.Ribbens \(1998\)](#) os sensores de posição da borboleta podem ser do tipo indutivo entretanto em sua grande maioria são sensores resistivos. Esses são basicamente

potenciômetros fixados no eixo da válvula de admissão, que variam sua resistência elétrica proporcionalmente a variação angular da borboleta de admissão. Para aumentar a confiabilidade do sistema são utilizados dois potenciômetros que enviam curvas de respostas opostas, ou seja, enquanto um sinal aumenta o outro diminui, proporcionalmente a rotação da borboleta. Essa configuração habilita a capacidade de diagnose do sistema (em casos de falha de algum dos sensores) pela ECU. O sinal do sensor TPS é determinante para o funcionamento do motor, pois a partir desse sinal é feito todo o cálculo de injeção de combustível assim como estratégia de operação abordada pela ECU.

2.8.6 Acelerador eletrônico (ETC)

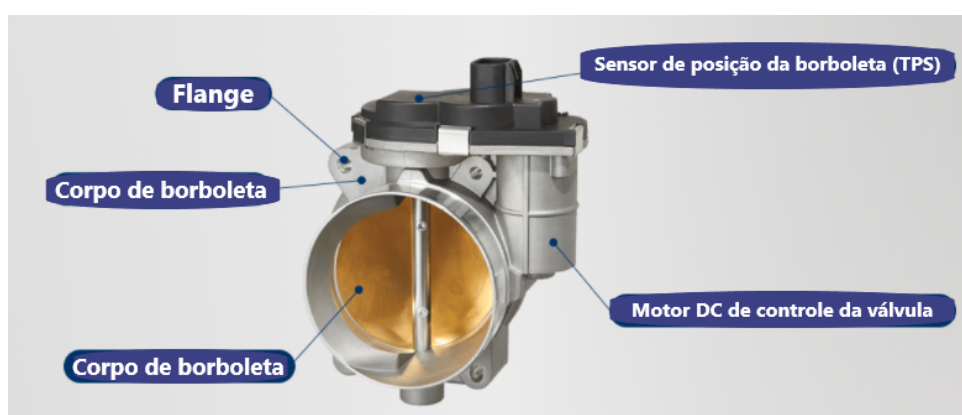


Figura 22 – Corpo de borboleta eletrônico

[Retirado e adaptado de <https://www.spectrapremium.com/en/aftermarket/north-america/electronic-throttle-body>]

A borboleta eletrônica, que é um dos maiores avanços dos sistemas embarcados dentro do conceito *drive-by-wire*, que consiste no uso de sistemas elétricos ou eletromecânicos para desempenhar funções do veículo tradicionalmente realizadas por meios mecânicos. O controle eletrônico do acelerador (ETC - *Electronic Throttle Control*) é uma tecnologia automotiva que "conecta" eletronicamente o pedal do acelerador a válvula borboleta , substituindo assim a ligação mecânica que antes era feita por um cabo de aço. No sistema ETC no lugar do motorista controlando diretamente o pedal, teremos o motor DC que movimenta a borboleta do coletor de admissão. Um sistema ETC típico possui três componentes principais, sendo eles, um módulo de pedal do acelerador (de preferência com dois ou mais sensores independentes), uma válvula borboleta que pode ser aberta e fechada por um motor elétrico (também conhecido como corpo de borboleta eletrônico (ETB), e um módulo de controle do motor (ECU). A borboleta eletrônica concedeu à ECU total controle da mistura ar-combustível, independente da condição na qual o motor é submetido, controlando a quantidade de ar a ser admitida pelo motor em cada condição. O controle eletrônico da válvula de admissão tem como objetivo é tornar as características do motor perfeitamente consistentes, independentemente das condições

atuais, como temperatura do motor, altitude e cargas de acessórios. O ETC oferece alguns benefícios em áreas como controle da relação ar-combustível, emissões de escapamento e redução do consumo de combustível, além de facilitar a integração de recursos como controle de cruzeiro, controle de tração, controle de estabilidade e outros que requerem uma gestão torque, uma vez que o acelerador pode ser movido independentemente da posição do pedal do acelerador do condutor.

2.8.7 Sensor Knock

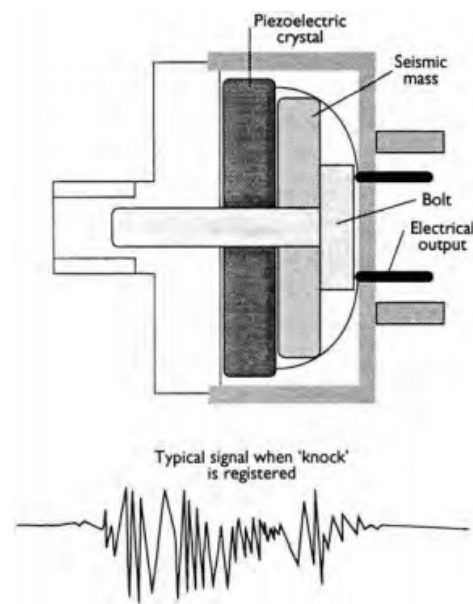


Figura 23 – Representação sensor Knock e seu respectivo sinal de saída em caso de ocorrência de detonação

[Brunetti (2012)]

O sensor Knock ou sensor de detonação foi desenvolvido com a finalidade de identificar a ocorrência de detonações nos cilindros. Segundo B.Ribbens (1998) esse sensor é um acelerômetro piezoelétrico que consegue identificar as ondas de choque causadas pela detonação dentro do cilindro, dando como resposta para a ECU um sinal elétrico.

Com a identificação de Knock a ECU define alguma estratégia de redução de ponto de ignição para todos os cilindros ou individualmente a depender do sistema, com a finalidade de evitar a ocorrência desse efeito tão danoso para os motores de combustão interna.

2.8.8 Válvula Injetora de Combustível

As VEIC (Válvulas Injetores de Combustível) ou bico injetores, como são popularmente conhecidos, são os atuadores responsáveis por pulverizar o combustível proveniente da linha (pressurizada) de acordo com o comando da ECU.

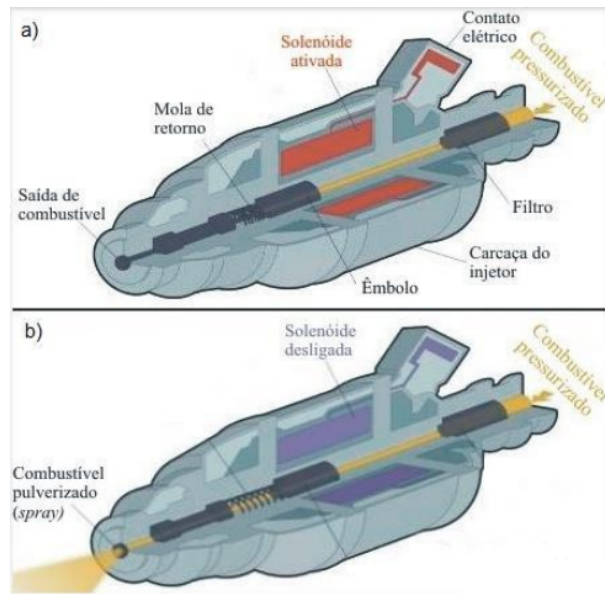


Figura 24 – Representação da Válvula Injetora de Combustível Fechada(a) e Aberto(b)
[Tomasi (2015)]

Segundo B.Ribbens (1998) os bicos injetores funcionam de maneira similar a um relé normalmente fechado, ou seja, a válvula injetora irá abrir, liberando assim combustível para o cilindro de acordo com os pulsos enviados pela unidade de comando. O controle das VEIC's é feita por largura de pulso, que conseqüentemente determinará o tempo que a VEIC fornece combustível. É importante mencionar que os bicos injetores possuem um tempo inerente de abertura denominado *Dead Time*, seu valor característico fica entre 1,0 e 1,5 milissegundos, e precisa ser considerado pela ECU.

2.8.9 Vela de Ignição

Segundo B.Ribbens (1998) a vela de ignição é o elemento final do sistema de ignição e é responsável por converter a energia armazenada pela bobina de ignição em um arco elétrico (Faísca) que vai iniciar as reações de combustão. A vela de ignição é considerada um elemento interno da câmara de combustão, pois sua ponta ignífera (eletrodo) se encontra dentro da mesma. Por esse motivo a vela de ignição precisa atender diversos requisitos de operação por ficar exposta a um ambiente extremo com altos índices de temperatura e pressão.

2.8.10 Bobina de Ignição

Segundo Bosch (2005) a bobina de ignição é o principal componente do sistema de ignição e tem como função elevar a baixa tensão disponibilizada pela rede automotiva (12 Volts) em níveis de alta tensão (15KV - 30KV), seu funcionamento foi melhor explicado

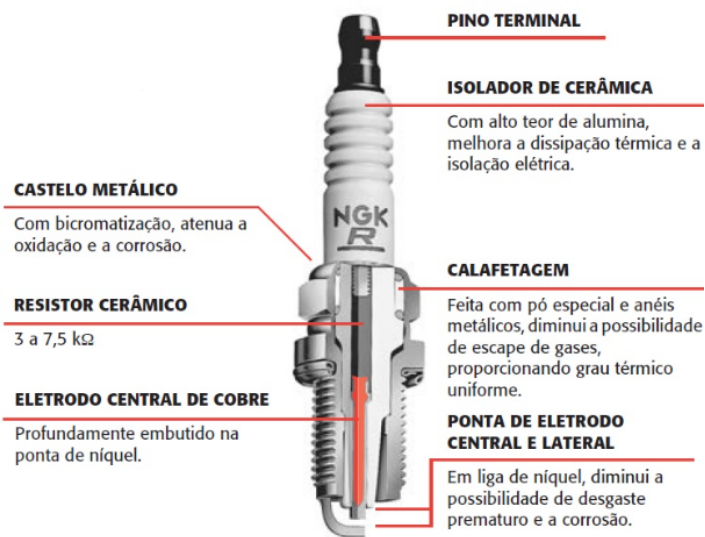


Figura 25 – Representação de uma Vela de Ignição

[Peça (2019)]

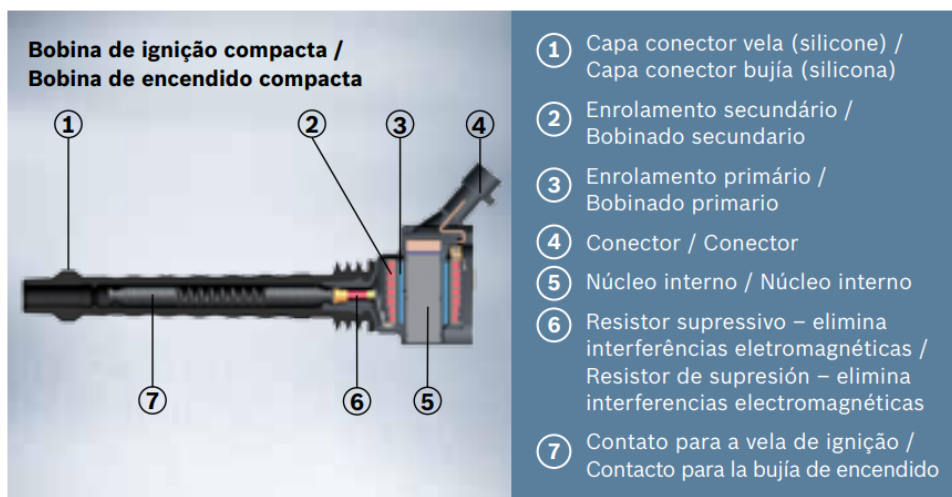


Figura 26 – Representação bobina de Ignição com transformador integrado

[Retirado de Bosch (2011/2012)]

na seção(2.4). O controle desse atuador nos sistemas gerenciados eletronicamente, são baseados em mapas de ignição gravados na memória da unidade de comando. A ECU basicamente faz o cálculo do tempo necessário de energização do primário, para que seja induzida uma tensão suficientemente alta para romper a resistência do dielétrico da vela de ignição.

2.9 Parâmetros de desempenho

Para melhor entender e conseguir analisar o comportamento dos mapas, é necessário definir os parâmetros de desempenho tipicamente utilizados. Esses indicadores

permitem conhecer os regimes de operação do motor e otimizá-los para se obter melhores resultados quanto à geração de energia e consumo de combustível dos MCI.

Segundo Heywood (1988), o desempenho do MCI pode ser definido como a máxima potência (ou torque) disponível para cada rotação, dentro da faixa útil de operação do motor. Heywood (1988) ainda diz que os parâmetros de interesse para desempenho são a potência, o torque e o consumo específico de combustível que são utilizados para se comparar o desempenho dos motores. Esses indicadores expressam a geração de trabalho e consumo, e serão utilizadas para o "levantamento" das curvas características de um motor de combustão interna, sendo que todas elas são obtidas em função da rotação.

2.9.1 Torque e potência

O torque (N.m) é a medida que expressa a capacidade do MCI em produzir trabalho, já a potência (W) é a razão em que o trabalho é realizado, ou seja, a energia produzida por unidade de tempo ($1W=1J/s$) Tomasi (2015). Segundo Heywood (1988), o torque é medido através de um dinamômetro ou, indiretamente, através da potência gerada pelo motor, com a seguinte relação

$$P = nT_l$$

onde T_l é o torque aplicado, P é a potência e n é a velocidade angular do eixo, em rad/s.

2.9.2 Consumo específico

Embora os parâmetros de desempenho de um motor de combustão interna sejam normalmente restritos a potência e torque, o consumo e eficiência energética são parâmetros igualmente relevantes para o desenvolvimento de qualquer veículo ou aplicação de motores. O consumo é medido em razão da vazão mássica de combustível durante certo período (g/s) Tomasi (2015).

O consumo específico de combustível (sfc) é o parâmetro que estabelece a razão entre a vazão mássica do combustível consumida $\dot{m}f$ e a potência gerada pelo MCI, e permite que motores de todos os tamanhos sejam comparados para ver qual é o mais eficiente em termos de combustível. O consumo específico representa o consumo indicado em função do trabalho produzido e é expresso por:

$$sfc = \frac{\dot{m}f}{P}$$

Onde:

sfc - Consumo específico de combustível;

\dot{m}_f - Caudal mássico de combustível introduzido no cilindro por ciclo [g/s];

P - Potência [kW].

As curvas de potência, torque e sfc de um MCI operando com a borboleta totalmente aberta (WOT, do inglês wide-open throttle), pode ser vistas na figura 27.

Segundo Heywood (1988) as curvas características de torque, potência e consumo específico são genéricas e assumem o mesmo formato, podendo apresentar deslocamento nos pontos de máximo ou mesmo suas inclinações, de acordo com os aspectos construtivos de cada motor. Para aberturas parciais da borboleta há redução na amplitude das curvas, sendo que a condição de WOT é a que apresenta a máxima potência e torque possíveis para o MCI, Tomasi (2015).

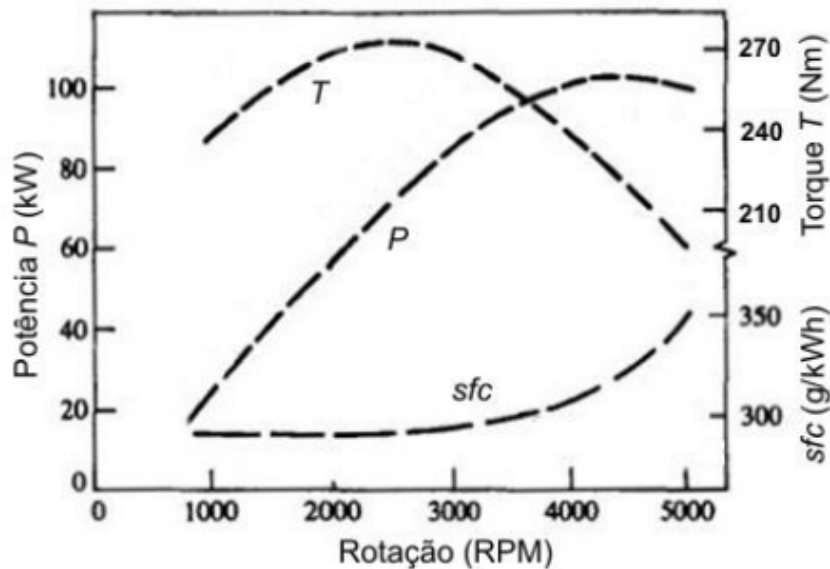


Figura 27 – Curvas características de torque, potência e consumo específico

[Tomasi (2015)]

2.10 Freios Dinamométricos

O estudo de novas tecnologias e das inúmeras variáveis que influenciam no funcionamento do motor, tornou-se essenciais para o desenvolvimento dos motores e na busca por motores mais eficientes.

Os dinamômetros ou banco de provas são segundo Martyr (2007), instrumentos utilizados para a realização de diversos testes (*desempenho, amaciamento, durabilidade e emissões*), uma vez que são capazes de medir a potência e o torque produzido pelo motor

em teste, em todas as suas condições de funcionamento. Para a realização de testes em motores são utilizados basicamente três tipos de dinamômetros, sendo eles, hidráulicos, corrente de Foucault e elétricos de corrente contínua e corrente alternada. Nesse trabalho será abordado sobre os dinamômetros elétricos de corrente alternada, uma vez que é o tipo de dinamômetro que equipa o laboratório de motores LEM.

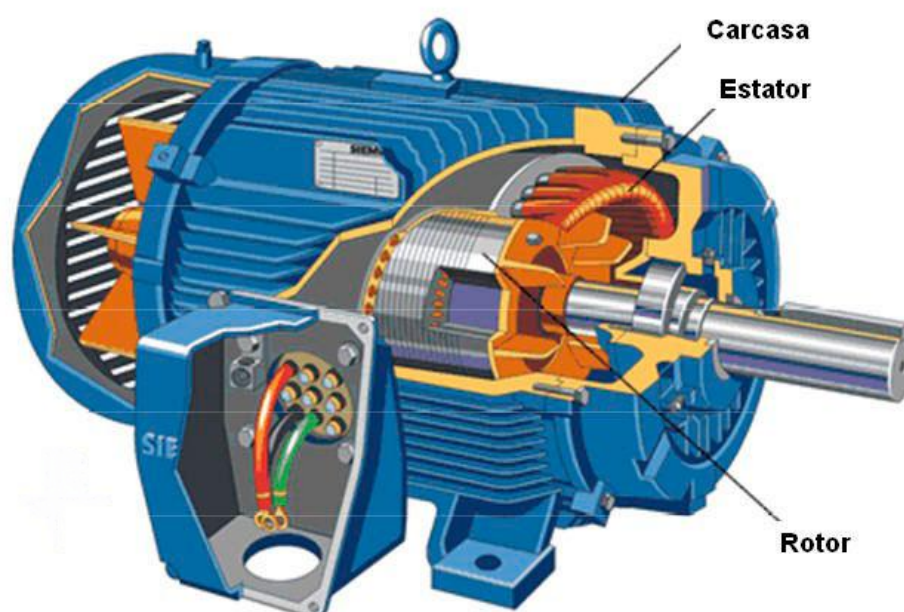


Figura 28 – MIT- Motor de indução trifásico

[Retirado de <https://www.eletrvalmotores.com.br/motores-eletricos-inducao-trifasico>]

Este tipo de dinamômetro nada mais é do que um motor elétrico de corrente alternada, nesse caso, o motor de indução trifásico ou "*gaiola de esquilo*". O motor de indução é segundo Cezar (2012) o tipo de motor de corrente alternada mais utilizado, por conta de sua simplicidade, construção robusta e boas características de funcionamento. Sua construção é constituída basicamente de duas partes, o estator e o rotor, e suas principais características são resultado do rotor ser uma unidade auto suficiente que não precisa de ligações externas.

O princípio de funcionamento do motor de indução se baseia no princípio do campo girante, segundo Ifrn (2009) quando o enrolamento do estator é alimentado, surge um campo magnético girante, que ao percorrer os condutores do rotor induz uma *fem*, que ocasiona o aparecimento de uma corrente elétrica nos condutores, que interagem com o campo magnético girante do estator produzindo então um torque eletromagnético que atua sobre os condutores do rotor fazendo-o girar.

Os motores assíncronos de indução são utilizados em larga escala no setor industrial, seu sucesso segundo Martyr (2007) se deve ao advento dos inversores de frequência, que permite controlar com bastante precisão os motores de indução.

2.10.1 Inversores de frequência

Os inversores de frequência são dispositivos capaz de gerar tensão e frequência trifásica ajustáveis, com a finalidade de controlar a velocidade mantendo o torque (conjugado), de um motor de indução trifásico. Segundo [Cezar \(2012\)](#) as únicas formas de se controlar a rotação sem a utilização de componentes externos é atuando no número de polos, no valor do escorregamento e alterando a frequência. Fazer a mudança do número de polos e ou no valor do escorregamento requer mudança no projeto do motor, em contrapartida a variação por meio da frequência não, por isso é usada como variável de controle para os motores.

O funcionamento dos inversores ou VFD (*Variable Frequency Drive*) é dividida em basicamente duas partes principais, sendo elas, seção retificadora e seção inversora.

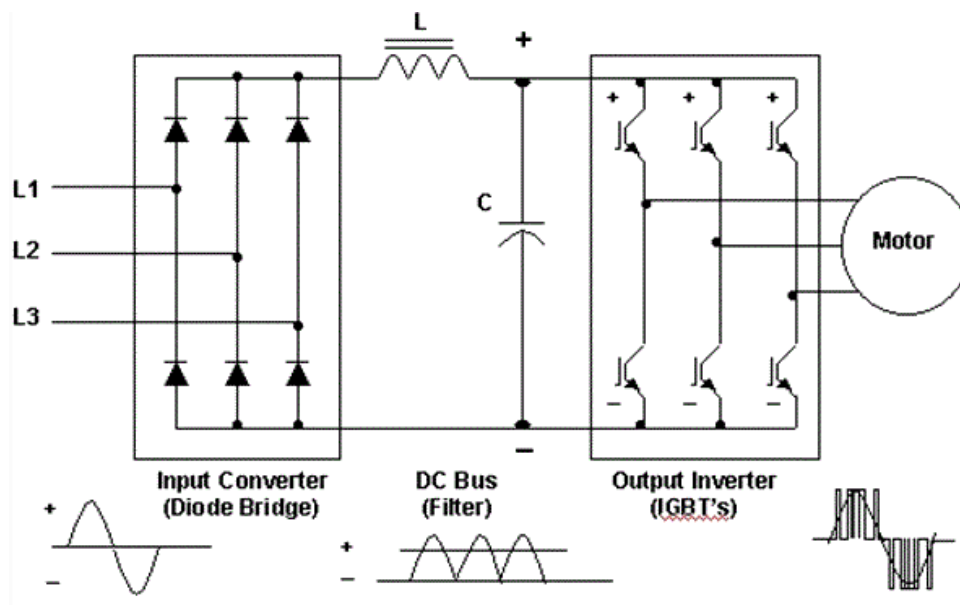


Figura 29 – Representação do circuito de um inversor

[Retirado e adaptado de [Godoi \(2018\)](#)]

Na seção retificadora o inversor transforma corrente alternada da rede em corrente contínua, a partir dos diodos retificadores situados no circuito de entrada do inversor, que retifica a tensão trifásica da rede (L1, L2, L3) em tensão DC.

Posteriormente temos a seção inversora, onde a tensão DC é novamente convertida em trifásico AC, pro meio dos Transistores (IGBT) que chaveiam várias vezes por ciclo, gerando então um sinal PWM variável senoidalmente que irá gerar uma forma de onda bem próxima do senoidal.

O inversor de frequência pode ser separado normalmente em três blocos principais, CPU, IHM e o bloco de potência.

A CPU, unidade central de processamento, pode ser formada por um micropro-

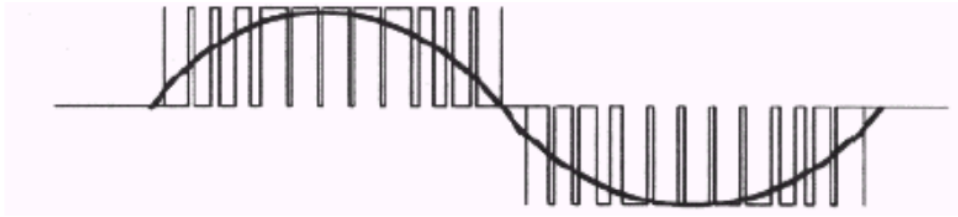


Figura 30 – Sinal PWM de controle para o motor

[Retirado de [Cezar \(2012\)](#)]

cessador ou por um microcontrolador (PLC), é nesse bloco que todas os parâmetros do sistema estão armazenados. É a CPU que executa a partir de uma lógica de controle a geração dos pulsos para os IGBT's.

O segundo bloco é a IHM (*Interface Homem Máquina*), que permite a parametrização e visualização do que acontece no inversor.

O terceiro bloco são as interfaces, responsáveis por comandar o inversor. Os inversores normalmente são comandados segundo [Martyr \(2007\)](#) a partir de sinais analógico ou digitais, onde para alterar a velocidade do motor AC é utilizado um sinal analógico de comando 0V - 5V, por exemplo, onde o 0V representa o motor desligado e o 5V a rotação máxima do motor. Para fazer a inversão do sentido de rotação do motor, basta fazer a inversão da polaridade do sinal de comando -5V - 0V.

A etapa de potência é constituída por um circuito retificador que alimenta o circuito de saída inversor, composto pelos IGBT's, como podemos ver na Figura 29.

3 Materiais e Métodos

3.1 Metodologia

Esse capítulo tem como finalidade apresentar como decorrerá a realização do trabalho em questão. O estudo consiste em criar e testar diferentes mapas de injeção e ignição para um motor VW(Volkswagen) naturalmente aspirado equipado com uma injeção eletrônica programável Fueltech Ft 550, com os sensores necessários para seu funcionamento.

O desenvolvimento dos mapas levarão em conta todos os conhecimentos explicados até agora, além do manual de uso da própria injeção programável. O desempenho do motor será medido no laboratório de ensaio de motores da FGA, bem como a aquisição dos dados dos parâmetros de funcionamento do motor, que fornecem os dados necessários para a análise dos parâmetros de desempenho. É esperado que a análise dos resultados dos ensaios, permitam o desenvolvimento de mapas de controle otimizados.

3.1.1 Montagem do Laboratório

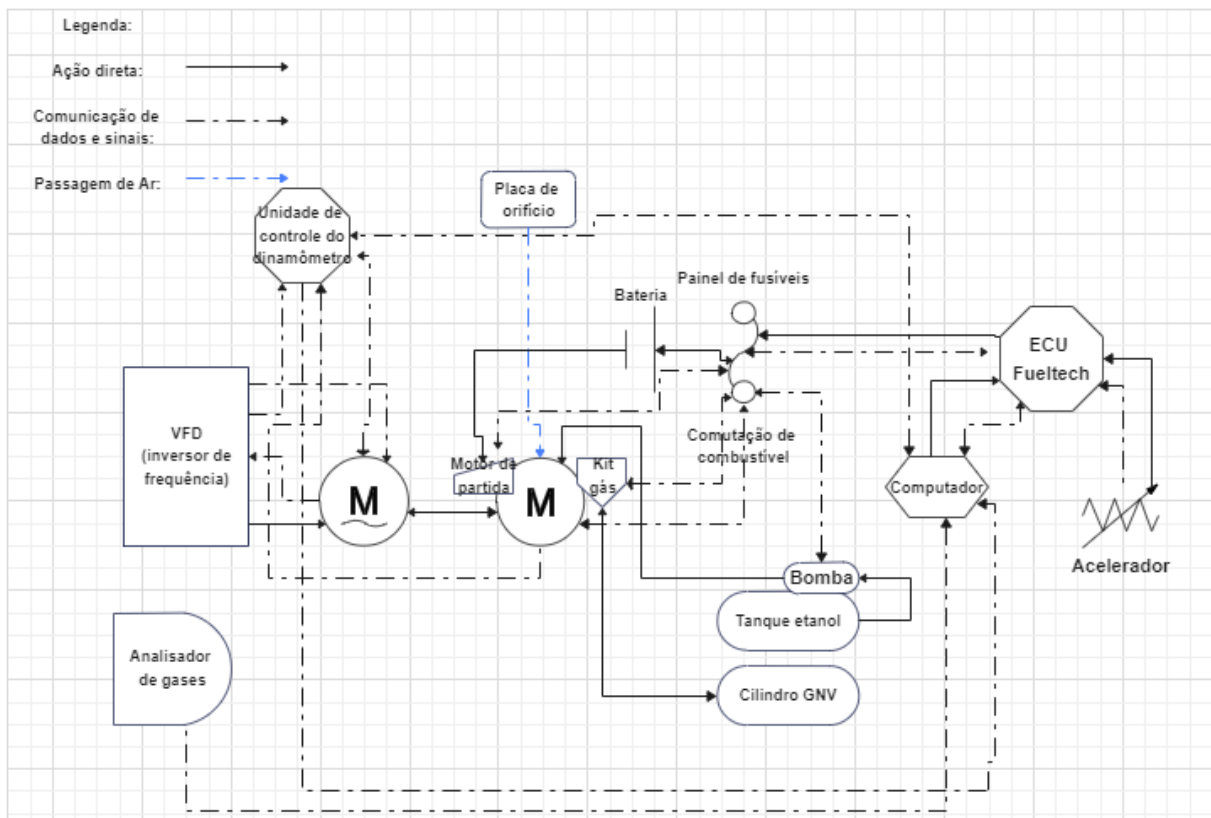


Figura 31 – Diagrama Laboratório LEM

Os principais componentes do sistema estudado pode ser visualizado no diagrama da Figura 31.

O sistema é constituído pelos seguintes componentes: Um dinamômetro e seus sistema de controle VFD, possui um analisador de dados e um computador para controle e processamento de dados. O motor é um motor Volkswagen EA211 1.0 MPI equipado com uma injeção eletrônica Fueltech Ft 550 bem como todo o sistema de potência do motor. O controle da velocidade do motor é feito a partir de um pedal do acelerador eletrônico de fácil acesso.

3.1.2 Especificações do motor

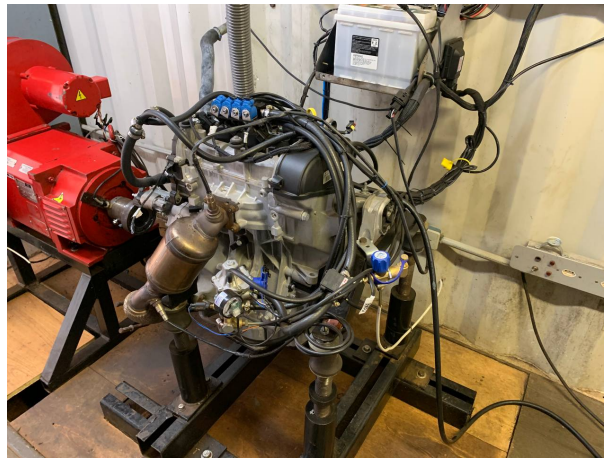


Figura 32 – Motor EA211 Instalado no Laboratório LEM

O motor utilizado para o desenvolvimento do projeto é um motor VW(Volkswagen) denominado EA211 MPI, que será utilizado no laboratório de motores de combustão interna. Este é um motor naturalmente aspirados de baixa cilindrada e suas principais características estarão dispostas na tabela a baixo.

Modelo	VW EA211 MPI
Cilindrada	999cc
Potência (G)	75cv @ 6250 rpm
Torque (G)	9.7 kgfm @ 3000 - 4250 rpm
N. de Cilindros	3
Taxa de Compressão	10,5:1
Tipo de injeção	Indireta Multiponto
Diâmetro do Pistão	74,5mm
Curso do Pistão	76,4mm

Tabela 1 – Características do motor EA211 1.0 MPI.

3.2 Freio Dinamométrico

Para a aquisição de dados desse trabalho será utilizado um kit dinamométrico da marca Dynamite Dynamometer modelo 200Hp AC Dynamometer kit. Este vem equipado com freio dinamométrico AC de 460volts (200Hp @3600 Rpm) com relação de torque 10:1, além de um sistema de aquisição de dados.



Figura 33 – Dinamômetro Modelo 200Hp AC Dynamometer

Informação	valor
HP	200
RPM	7500
Amps	226
Volts	460
Hz	251.5

Tabela 2 – Informações do motor.

É esperado que no laboratório de motores (*LEM*), seja possível ensaiar testes de desempenho com medição de potencia e torque máximas e suas respectivas curvas em função da velocidade angular do motor, bem como medição do consumo específico. Essas análises servirão de para comparação dos diferentes mapas, bem como avaliar possíveis ganhos de potencia, torque e ou consumo.

O dinamômetro Dynamite Dynamometer modelo 200Hp AC possui suporte para coleta de dados de informações do motor, a partir de um chicote elétrico que pode receber os dados da Tabela 3.

Leitura	Quantidade de entradas
Sinal de RPM	1
Temperatura do Motor	1
Servo controle	1
Fluxo de Combustível	1
Fluxo de Ar	1
AFR	1
Sensor Knock	1
Torque	1
EGT (temperatura de gases de escapamento)	8
Pressão	1
Digital/Analógico	4
Célula de Carga	1
Weather Station	1

Tabela 3 – Entradas de sinal do sistema de aquisição de dados do dinamômetro.

Segundo [Pereira \(1999\)](#), pode-se destacar 3 tipos de testes de motores realizados em dinamômetro, sendo eles, teste de velocidade variável, teste de velocidade constante e o teste de torque e avanço.

O teste de velocidade variável é frequentemente apresentado para motores automotivos, segundo [Bezerra \(2000\)](#), esses são realizados normalmente a plena carga, ou seja, com o acelerador em sua posição máxima. O teste de plena carga determina a potência máxima do motor em cada rotação de funcionamento, e não engloba o escopo do projeto. Tem como finalidade determinar a curva de avanço ideal em motores do ciclo Otto, com o motor funcionando tanto em plena carga quanto em cargas parciais. É nesse tipo de teste que se faz a pesquisa do ponto de ignição ideal para toda a faixa de operação do motor.

3.3 VFD - Drive de Frequência Variável

O VFD presente no laboratório de motores LEM é da marca Allen Bradley modelo PowerFlex 700 Adjustable Frequency AC Drive, que pode ser operado de maneira monofásica ou trifásica de até 600V. O kit do VFD engloba além da parte de potência um banco de resistores, utilizado quando o motor opera como gerador, que produz energia e a devolve para o inversor de frequência através da ponte inversora, a energia pode então ser devolvida para a rede elétrica ou dissipadas na forma de calor em um banco de resistores.

A parametrização do inversor pode ser feita a partir da IHM (Interface Humano Máquina) localizada na porta do VFD. O fabricante disponibilizou uma tabela de parâmetros para configuração do VFD, os parâmetros foram adicionados 1 a 1 pela IHM. O sistema oferece comunicações CIP (Protocolo Comum Industrial) incluindo DeviceNet, ControlNet e EtherNet/IP.

Informação	400V	480V
Input: 3 Fases, 47-63Hz		
Normal Duty Power	132kW	200HP
Heavy Duty Power	110kW	150HP
Amps	255/199	233/169
Output: 3 Fases 0-400Hz		
AC voltage Range	0-400	0-460
Default	50Hz	60Hz
Continuous Amps	260/205	248/180

Tabela 4 – Entradas de sinal do sistema de aquisição de dados do dinamômetro.



Figura 34 – VFD- Drive de frequência variável

[O Autor]



Figura 35 – Interface Humano Máquina- VFD

[O Autor]

3.4 Mapas de injeção e Ignição

Para o desenvolvimento dos mapas de injeção e ignição será utilizado um módulo de injeção eletrônica da marca Fueltech, modelo Ft550 que já utilizado no laboratório de motores (LEM). Segundo o fabricante a Ft 550 é uma injeção eletrônica totalmente programável em tempo real desenvolvida para controle de motores de combustão interna, 2 e 4 tempos, que permite a alteração de todos os mapas de injeção e ignição conforme a necessidade do motor.

Esse modulo de injeção eletrônica possui suporte para o controle de motores ciclo

Otto de até 12 cilindros, controle de injeção em modo sequencial, semissequencial e multi-ponto, controle de ignição por roda fônica ou distribuidor em modo sequencial ou centelha perdida, controle de borboleta eletrônica (*Drive-By-Wire*), controle de marcha-lenta por ponto de ignição (*válvula PWM*) e controle de marcha-lenta por ponto de ignição e atuadores (*borboleta eletrônica, motor de passo*), além de contar com mapas programáveis em tempo real diretamente na tela ou através do software FTManager.



Figura 36 – ECU Fueltech ft 550

Retirado de <https://fueltech.com.br/>

O módulo de injeção recebe os dados dos sensores interpretando-os para então enviar sinais de comandos para os atuadores de acordo com a programação. A programação da Ft 550 é feita diretamente pelo próprio software FTManager específico para computadores, esse software permite a completa programação do módulo de injeção e facilita a visualização dos mapas 2D e 3D de injeção e ignição.

Outro dispositivo utilizado para o ajuste do motor é o condicionador de sonda Wideband O2 da marca Fueltech em conjunto com um sensor de oxigênio de banda larga (Wideband), que será utilizado para monitorar a mistura de ar e combustível nos gases de escape.

A FuelTech WB-O2 Nano é uma ferramenta utilizada para monitoramento da mistura nos motores à combustão. Este equipamento faz o condicionamento e a leitura da sonda lambda de banda larga bosch LSU 4.2 com rapidez e precisão, mostrando as informações da mistura de ar e combustível no display. Sua faixa de operação é de 0 a 5volts (0,59 λ a 1,10 λ).

3.4.1 Mapa base

Para o desenvolvimento de um novo mapa ou na primeira inicialização do módulo de injeção, será requisitado pelo sistema algumas informações básicas sobre o motor, para que a partir desses seja criado o denominado mapa padrão *Fueltech*. O mapa padrão *Fueltech* será o ponto de partida para desenvolvimento da calibração do motor VW EA211 MPI. A partir desse mapa será feita toda a análise dinamométrica e avaliação de parâmetros até que o mesmo opere de da melhor forma possível.

A primeira tela de informações para o desenvolvimento de um novo mapa é referente a opções do mapa e funções da própria injeção, dando a liberdade de se ativar e desativar funções da injeção e pode ser vista na figura 37.

Figura 37 – Informações iniciais mapa padrão

[O Autor]

A segunda tela de configuração é referente as características do motor, onde é necessário preencher itens como tipo de motor e ordem de ignição e pode ser vista na figura 38.

As telas seguintes são referentes respectivamente ao sensor de rotação, onde é necessário informar o tipo de sensor de rotação e fase que no caso do motor EA211 ambos são do tipo Hall; Características do sistema de ignição, onde é necessário configurar o modo de ignição (sequencial, centelha perdida, etc); Características do sistema de injeção (multiponto, semi sequencial, sequencial), o tipo de pedal de acelerador e atuador de marcha lenta, além de se fazer necessário configurar o tipo de combustível e o tipo de taxa de compressão.

Características do motor

Selecione as opções conforme as características do motor, estas informações serão importantes para gerar o mapa padrão.



Tipo de motor Pistão	Tabela de lenta por TPS Desabilitado	Número de cilindros 3						
Mapa principal injeção MAP	Injeção rápida TPS							
Pressão de turbo máx. 1,00 bar	Rotação máxima 6200 RPM							
Ordem de ignição <input checked="" type="radio"/> Predefinida 1-2-3 (Padrão FT250, FT300, FT350 e FT400) 1-3-2 (BMW K75, Subaru Justy) <input type="radio"/> Customizada <table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr></table>			1	2	3	1	2	3
1	2	3						
1	2	3						

Figura 38 – Informações iniciais mapa padrão

[O Autor]

O mapa padrão segundo a Fueltech, é um mapa para partida do motor, com valores estimados a partir das informações iniciais. Esse mapa serve como base para o início da calibração facilitando assim o processo inicial do desenvolvimento do mapa.

3.5 Consumo específico

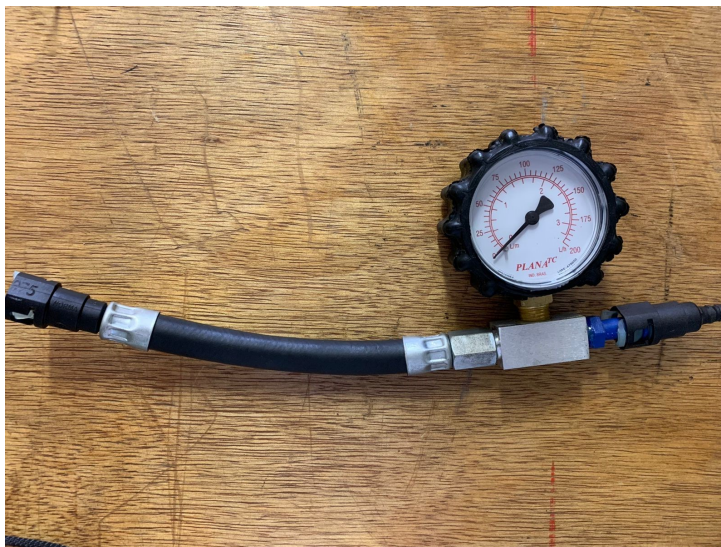


Figura 39 – Medidor de vazão

[O Autor]

A análise do consumo específico de combustível pelo motor é de extrema importância uma vez que é um dos principais indicadores de performance do motor. O consumo específico é definido como a quantidade de combustível necessária para produzir uma unidade de potência. É uma medida da eficiência do motor. Quanto menor for o consumo específico maior será a eficiência da máquina. Nesse trabalho o consumo específico será medido a partir de um vazômetro (*Medidor de vazão*) analógico além dos dados obtidos em dinamômetro. O vazômetro que será utilizado nesse projeto está representado na figura 39.

3.6 Sensores e Atuadores Utilizados

Os sensores e atuadores utilizados no motor EA211 1.0 de 12 válvulas estão listados abaixo juntamente com seus respectivos números de série.

Componente	Número de Série
Sensor Knock	0309053377C
Sensor MAP	508847
Sensor de Oxigênio	OZA755EE6
Sensor de Temperatura da Água	03F9195018
Sensor MAF	17780600AAA28
Sensor de Temperatura do Motor	06R0919501
Sensor de Fase	04C907601A
Sensor de Rotação	04L906433A
Bobina de Ignição	04E905110M
Corpo de Borboletas	04C133062F
Válvula injetora de Combustível	0280157158

3.7 O ensaio

O ensaio desenvolvido consiste em um teste a velocidades constantes, para diferentes rotações, sem aplicação de carga no motor. Primeiramente se faz necessário que seja preparado o ambiente de ensaio, verificando a quantidade de combustível no tanque e ligando a bateria para energizar todo o sistema, tornando o motor apto a ligar.

O motor é ligado a partir de um comando diretamente na tela da injeção eletrônica, após o aquecimento do motor inicia-se o Datalogger interno da injeção para obtenção de dados referentes aos ensaios. Além dos dados coletado pela ECU, foi conectado um manômetro em uma conexão à mangueira de admissão de ar ao motor, a fim de medir a pressão absoluta de ar durante os ensaios. A medição da variação de combustível foi feita em valores mássicos, onde o tanque de combustível contendo etanol foi posicionado sobre uma balança.

Como objetivo de ensaio foram estipulados 5 regimes de rotações por minuto a serem alcançados no motor, cada um deles mantendo o motor em torno desse regime por aproximadamente 1 minuto. Os regimes estipulados foram, 1000RPM (marcha lenta), 2000RPM, 3000RPM, 4000RPM e 5000RPM.

Ainda em marcha lenta (rotação aproximadamente em 1000 RPM) se inicia o teste. Para o teste foi cronometrado 1 minuto mantendo a mesma rotação. Para dar sequencia ao ensaio, ajusta-se o acelerador eletrônico para 2000 RPM, 3000 RPM, 4000 RPM e 5000 RPM respectivamente, mantendo a rotação aproximadamente fixa durante 1 minuto. Após o termino do ensaio tem-se como resultados o datalogger da própria injeção eletrônica, a massa inicial e final de combustível, além dos valores de MAP durante o ensaio.

Para medir o consumo de combustível, o tanque contendo álcool foi posicionado sobre uma balança, onde para cada rotação foi anotado a massa inicial e final do tanque, possibilitando assim medir a variação de combustível no ensaio.

4 Resultados e discussão

Nessa seção será apresentado os resultados experimentais da atuação do controlador eletrônico no funcionamento do motor EA211, bem como sobre a parametrização do inversor de frequência PowerFlex 700. Para melhor visualização dos resultados obtidos, segue um compilado das informações obtidas experimentalmente.

4.1 O mapa base

O mapa base criado a partir das informações do motor, tem como objetivo auxiliar o usuário a iniciar as parametrizações do motor, tendo o mapa base como um ponto de partida. O mapa principal de injeção representa o tempo de injeção para todas as faixas de RPM e para todas as condições de MAP, podemos ver seu comportamento na Figura 40.

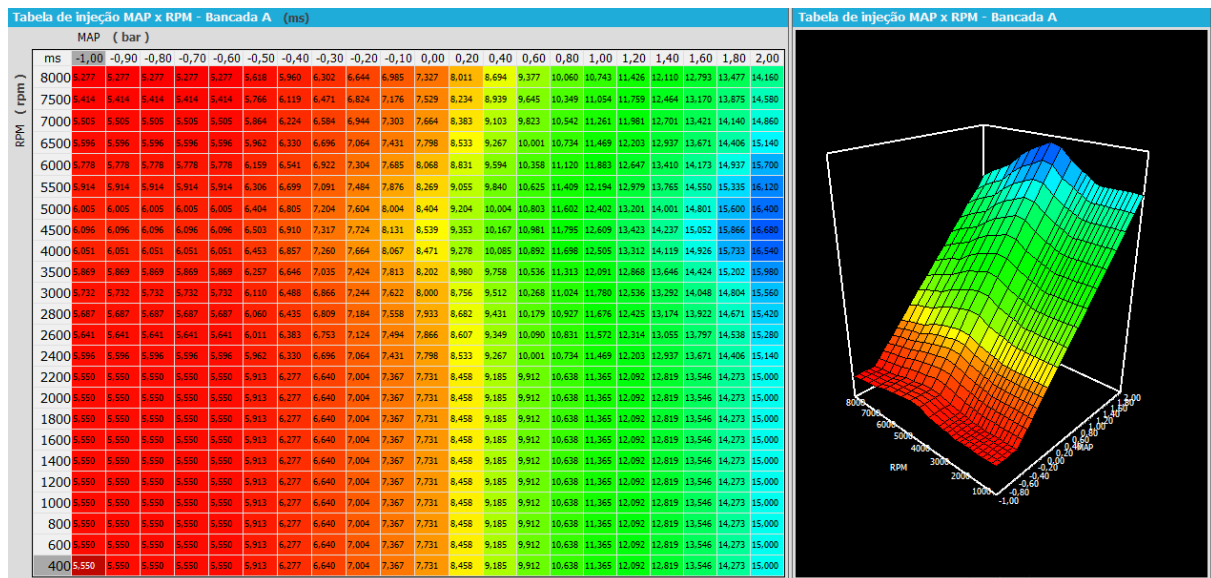


Figura 40 – Mapa principal de injeção MAP x RPM

[O Autor]

O mapa principal de injeção rege o comportamento do sistema de injeção de combustível, entretanto não faz o controle individualmente, ou seja, se faz necessário tabelas de correção de acordo com o regime de funcionamento do motor, a exemplo da tabela de correção por temperatura, que incrementa ou decrementa a quantidade de combustível de acordo com a temperatura do motor.

O mapa principal de ignição assim como o de injeção rege o comportamento do sistema de ignição, é nessa tabela que consta os principais parâmetros de ponto de ignição.

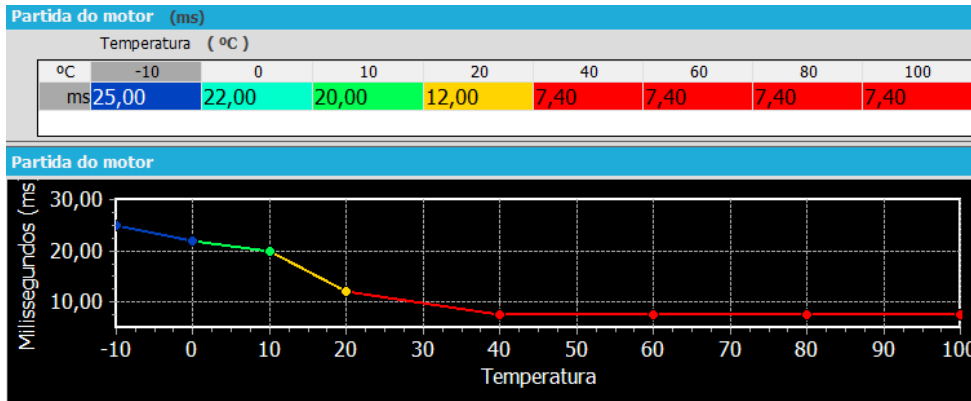


Figura 41 – Tabela de correção por temperatura

[O Autor]

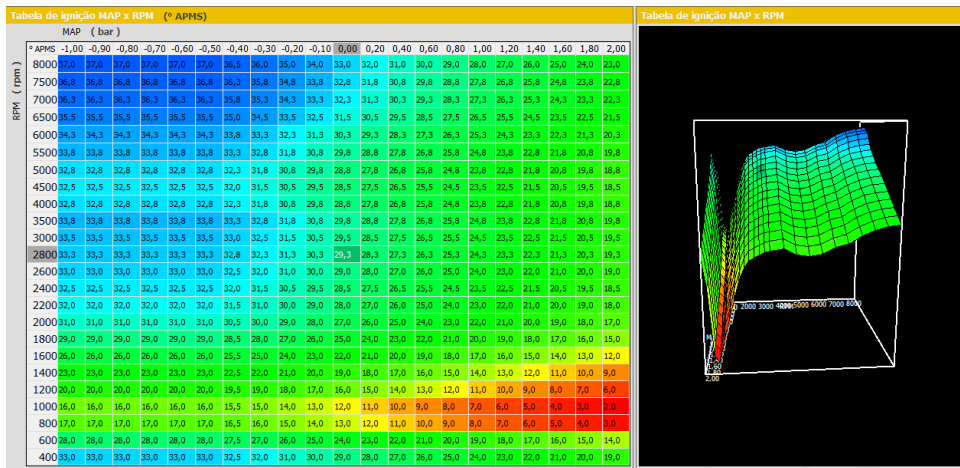


Figura 42 – Mapa principal de ignição

[O Autor]

O mapa principal de ignição possui também tabelas de correção que atuam de acordo com o regime de funcionamento do motor, a principal tabela de correção de ignição é a de correção por temperatura.

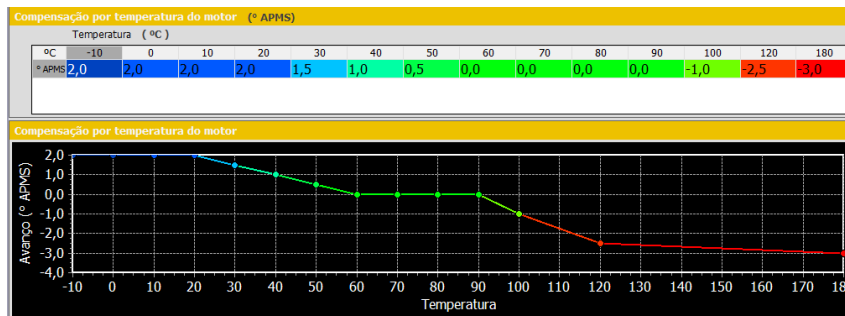


Figura 43 – Tabela de correção de ponto de ignição por temperatura

[O Autor]

4.2 O ensaio

A partir dos testes feitos em bancada é possível verificar o funcionamento do motor, essa análise é feita a partir dos logs adquiridos durante o teste. Os Logs são a melhor forma de verificar os parâmetros de funcionamento do motor durante o funcionamento do motor. A função de datalogger é nativa da injeção eletrônica e a análise desses arquivos podem ser feitas no próprio software.

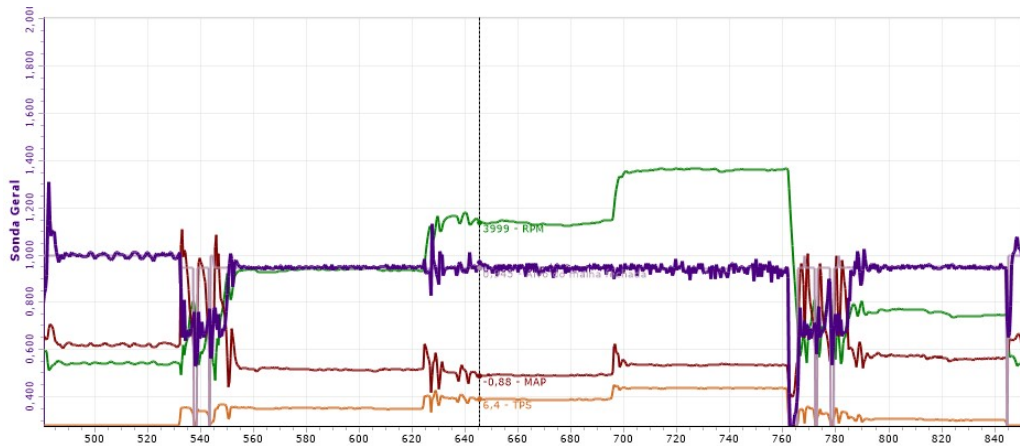


Figura 44 – Log completo

[O Autor]

No log podemos visualizar o gráfico de funcionamento do motor durante todo o teste, em verde está sendo representado a rotação do motor, em roxo o fator λ , em marrom o valor do Map e em laranja o TPS. Para a análise o log foi dividido para as 5 regiões de rotação, e o comportamento do λ pode ser visualizado para toda a faixa de rotação.

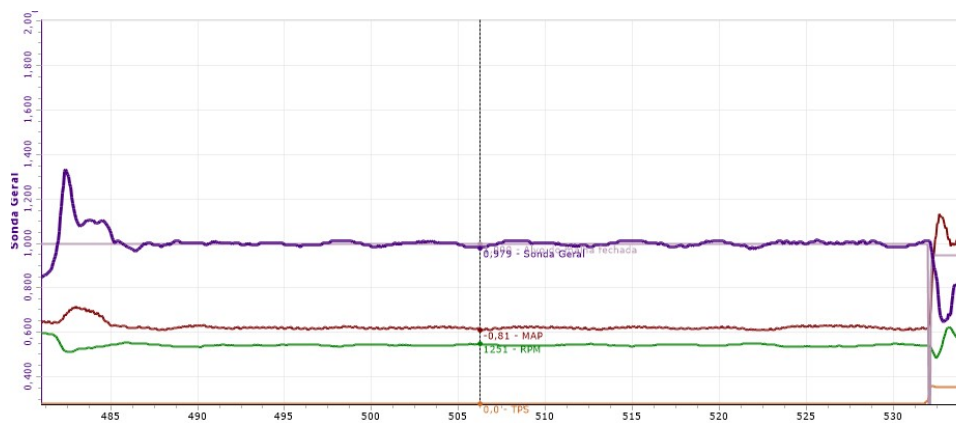


Figura 45 – Log marcha lenta (1000RPM)

[O Autor]

Em marcha lenta o fator λ ficou próximo a 1, ou seja, estequiométrico podendo variar levemente até λ 0.980 (levemente rico). Nessa condição o motor se matem com um

funcionamento estável, sem muitas variações no seu comportamento. Para essa faixa de rotação o alvo de sonda λ é 1.

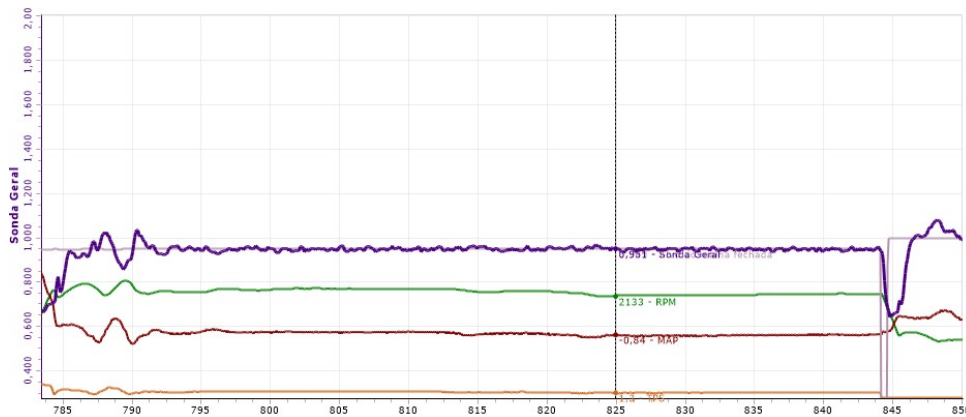


Figura 46 – Log para 2000 RPM

[O Autor]

O log para 2000 RPM se demonstrou levemente rico com λ médio de 0,958, esse tipo de mistura de ar combustível preserva a temperatura dentro do cilindro e podendo trazer um melhor compromisso quanto a potência. Para manter essa faixa de RPM foi necessário manter o TPS (acelerador) pressionado em 1,5%. Para essa faixa de rotação o alvo de sonda λ é 0,950.

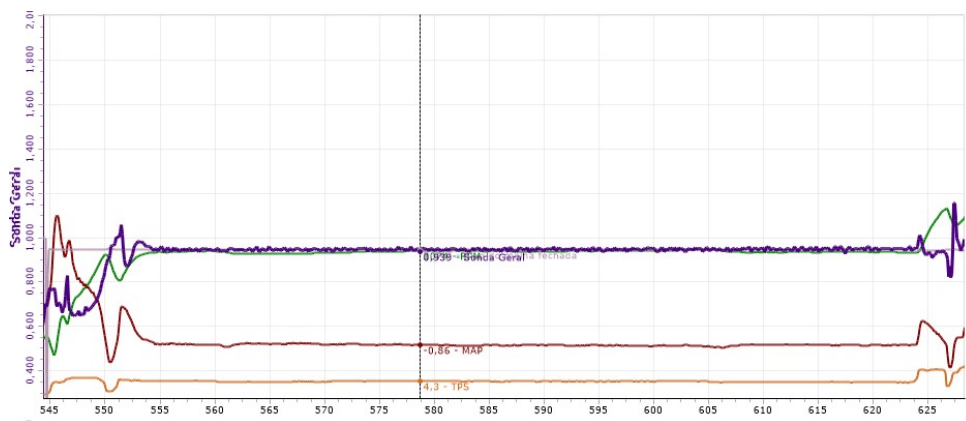


Figura 47 – Log para 3000 RPM

[O Autor]

Para manter a rotação do motor em 3000 RPM foi necessário manter o acelerador pressionado em 4,5%, o valor médio de λ para essa faixa de rotação foi de 0,945. Podemos perceber também que, o comportamento do λ estável. Para essa faixa de rotação o alvo de sonda λ é 0,947.

Para o log de 4000 RPM percebemos uma maior variação do λ , que em média ficou entre 0,935, um pouco mais rico que as rotações anteriores. Para manter o motor em uma

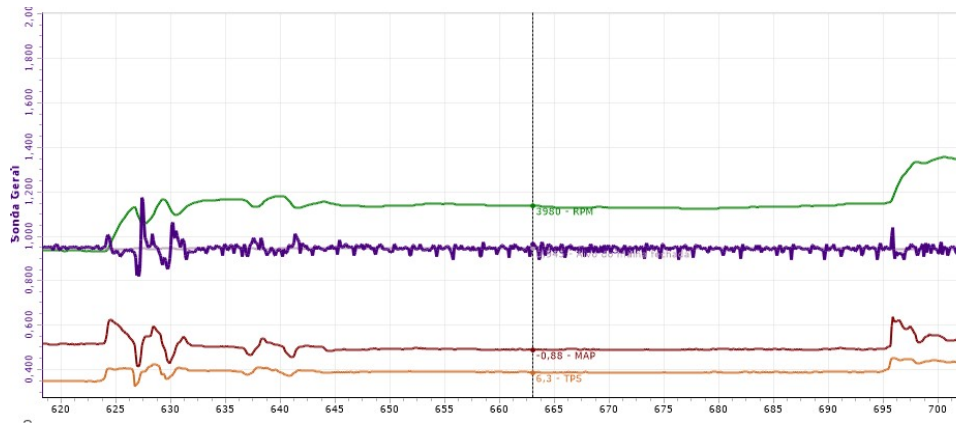


Figura 48 – Log para 4000 RPM

[O Autor]

rotação praticamente fixa foi necessário manter o acelerador pressionado em 6,5%. Para essa faixa de rotação o alvo de sonda λ é 0,945.

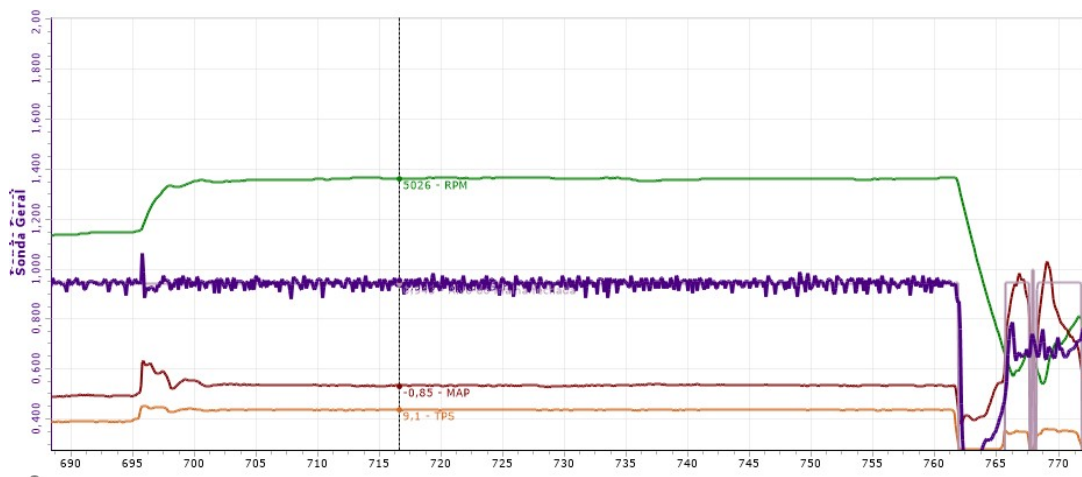


Figura 49 – Log para 5000 RPM

[O Autor]

O log para 5000 RPM mostra o fator λ menos estável que as demais rotações, tendo uma média de fator λ mais ricas que as demais, em aproximadamente 0,920, para manter a rotação de 5000 RPM foi necessário manter o acelerador pressionado em 9,2%. Para essa faixa de rotação o alvo de sonda λ é 0,930.

O mapa base para as condições de teste se mostrou com um bom funcionamento em marcha lenta, onde conseguiu manter o λ praticamente estável em 1. Para as demais rotações demonstrou ser um mapa seguro, mantendo uma mistura de ar combustível mais rica, o que ajuda na refrigeração da câmara de combustível. Mesmo demonstrando um bom funcionamento o mapa base precisa ser refinado, principalmente quanto a parte de ignição.

4.3 Curvas características

A curva característica do motor EA211 foi extraída a partir de testes em um dinamômetro de rolo, que afere a potência do carro a partir da rotação das rodas. O teste entrega como resultado as curvas de torque e potência do motor EA211 equipado em um VW Up MPI.

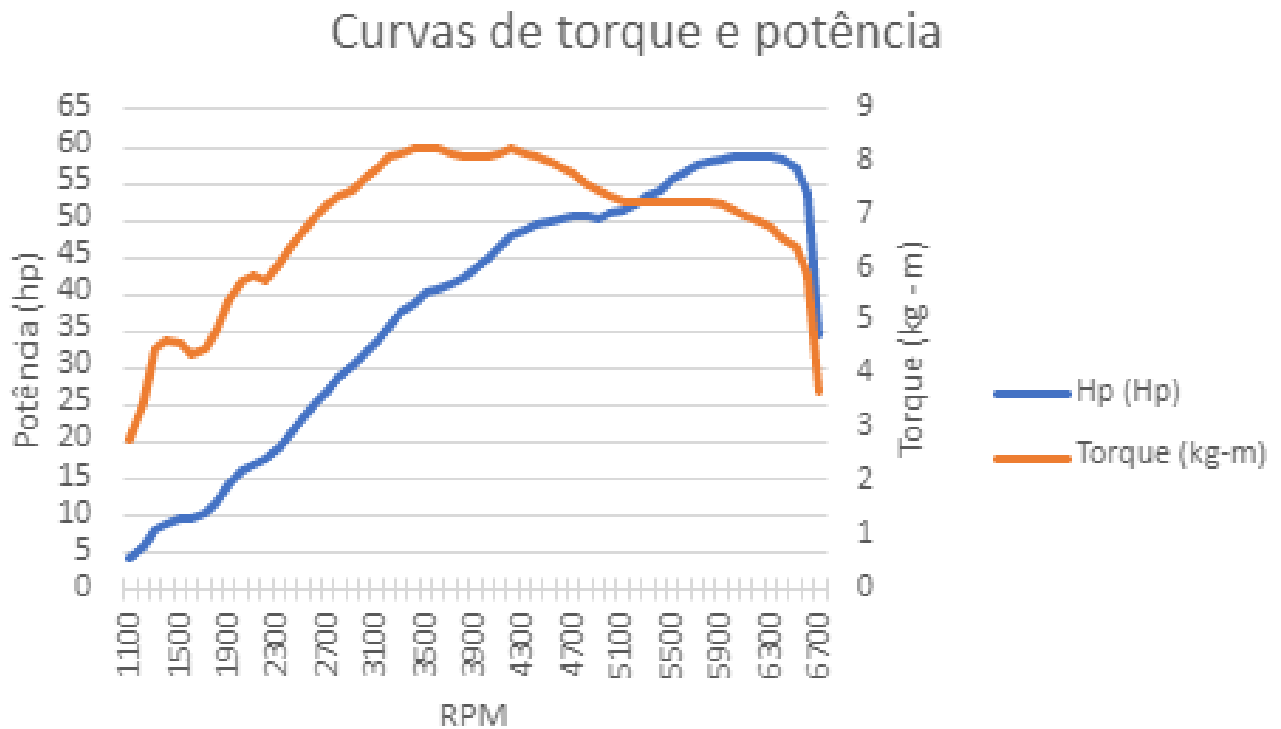


Figura 50 – Curvas de torque e potência VW Up MPI

[O Autor]

4.4 O inversor

Para o correto funcionamento do inversor foi necessário fazer a verificação das ligações de potencia do sistema, foi verificado que a ligação da parte de potência do sistema está correta.

A configuração e a parametrização do inversor pode ser feita a partir de um computador (necessita um cabo especial) e diretamente pela IHM, modo o qual foi feita a parametrização. O fabricante enviou os parâmetros de configuração do inversor que foram inseridos um a um pela IHM, a tabela com todos os parâmetros estão no Anexo A.

Mesmo após a configuração não foi possível fazer a inicialização do motor tanto pela IHM quanto pelo computador, ou seja, o sistema de freio elétrico do motor ainda não está operando.

4.5 O chicote

Os diagramas de ligação do chicote são de extrema importância para manutenção e atualização do sistema, a ligação da fueltech 550 é feita a partir de dois chicotes diferentes tendo o conector A e o conector B. O sistema possui um conector de engate rápido AMP de 37 vias responsável por unir o chicote do motor com a injeção eletrônica. O diagrama de ligação desses conectores pode ser vista abaixo.

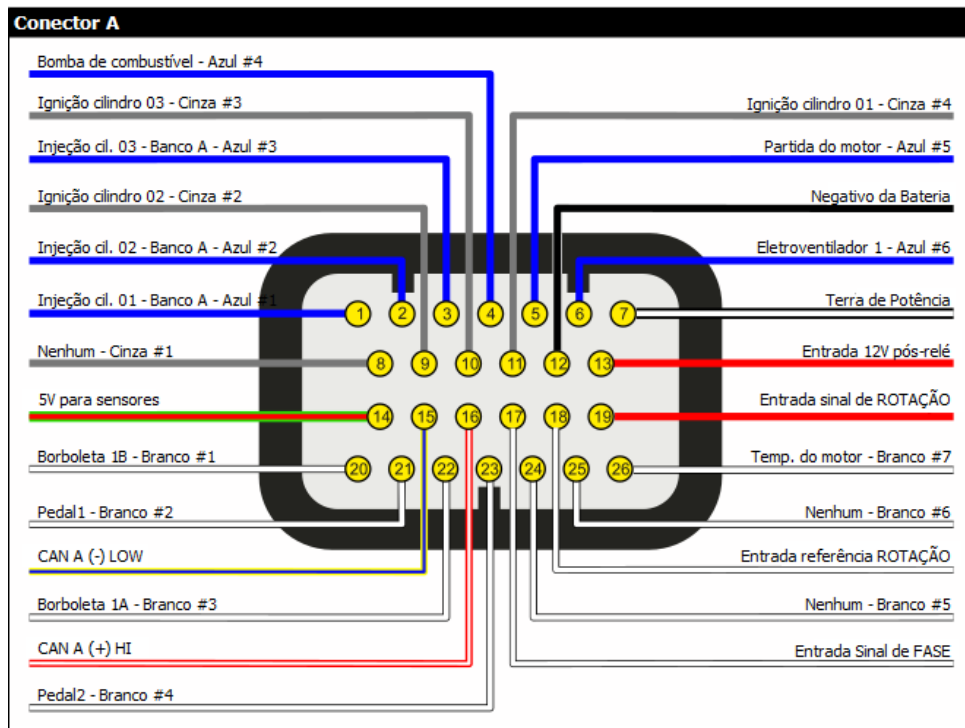


Figura 51 – Chicote A

[O Autor]

A montagem das ligações elétricas não utilizou todas as entradas disponíveis na ECU, essas entradas podem ser usadas para a adicionar outros sensores a depender da necessidade.

4.6 Consumo de combustível

O consumo de combustível foi medido durante o ensaio e os dados das massas iniciais e finais podem ser vistos na tabela 6.

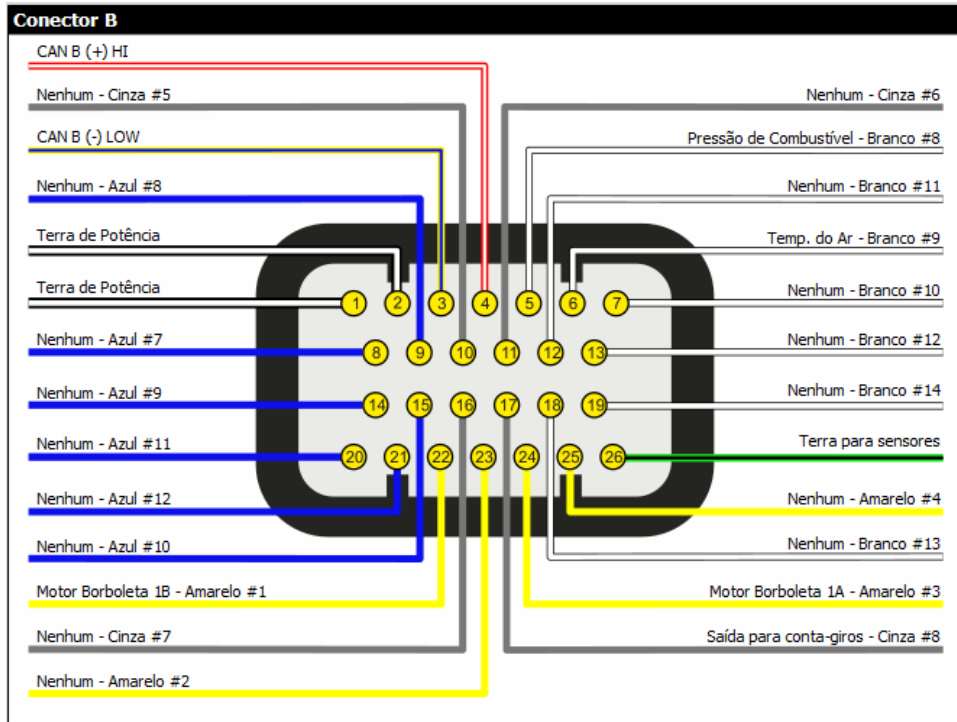


Figura 52 – Chicote B

[O Autor]

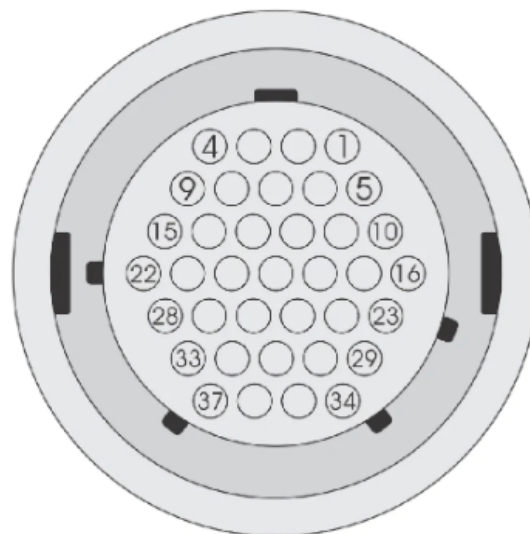


Figura 53 – Conector AMP de 37 vias

[Fueltech (2022)]

Podemos notar que assim como o esperado o consumo de combustível aumenta a medida que vamos para rotações mais elevadas, esse resultado é condizente com o mapa de injeção

Pinagem	Ligação elétrica
1	Chicote A, Pino 1
2	Chicote A, Pino 2
3	Chicote A, Pino 3
4	Chicote A, Pino 4
5	Chicote A, Pino 5
6	Chicote A, Pino 6
7	Chicote A, Pino 11
8	Chicote A, Pino 9
9	Chicote A, Pino 10
10	Chicote A, Pino 14
11	Chicote A, Pino 26
12	Chicote B, Pino 2
13	Chicote A, Pino 7
14	Chicote B, Pino 1
15	Chicote A, Pino 13
16	Chicote A, Pino 12
17	Chicote A, Pino 22
18	_____
19	Chicote A, Pino 20
20	Chicote A, Pino 26
21	Chicote B, Pino 5
22	Chicote B, Pino 6
23	Chicote B, Pino 22
24	Chicote B, Pino 24
25	Chicote B, Pino 25
26	_____
27	Chicote A, Pino 14
28	Chicote A, Pino 17
29	_____
30	_____
31	_____
32	_____
33	_____
34	_____
35	_____
36	_____
37	_____

Tabela 5 – Pinagem conector AMP 37 vias

Rotação (RPM)	Massa inicial	Massa final	Variação
1000	7,700 kg	7,690	0,01kg
2000	7,720 kg	7,705	0,015kg
3000	7,760 kg	7,735	0,025kg
4000	7,810 kg	7,770	0,04kg
5000	7,875 kg	7,820	0,055kg

Tabela 6 – Consumo de combustível

5 Conclusão

Este trabalho partiu da necessidade apresentada pelo Laboratório de motores (LEM) e tinha como objetivo mapear o sistema de sensoriamento do motor EA211 apresentando os diagramas de funcionamento eletrônico do motor, criar um mapa base para o motor avaliando seu funcionamento e a parametrização do inversor de frequência Power-Flex 700 da Allen Bradley. A revisão bibliográfica parte do entendimento dos motores de combustão interna e elementos que influenciam em seu funcionamento, mais especificamente, do gerenciamento eletrônico mostrando os elementos que compõem o sistema de controle do motor e como cada um influencia no processo. Em seguida é estudado o sistema de dinamômetro, utilizado para aferir a rotação (RPM) e o binário (torque) para todas as condições de funcionamento do motor, e todos os demais elementos que compõem o sistema, como o sistema de VFD (*variable-frequency drive*).

Com isso foi possível elaborar uma análise do funcionamento esperado do ponto de vista dos sensores e como essas informações são utilizadas para o gerenciamento eletrônico do motor. A partir destas é feito o levantamento de dados e configuração do módulo de injeção eletrônica, com as principais informações do motor e seus sensores. Foi feita a verificação das ligações elétricas do VFD e posteriormente a configuração do sistema de acordo com o informado pelo fabricante.

O mapa criado foi submetido a teste a velocidade constante e sem carga, de forma a verificar que este possui um comportamento satisfatório no funcionamento do motor.

5.1 Proposta de trabalhos futuros

Do ponto de vista de revisão bibliográfica, uma importante adição ao trabalho seria uma análise mais detalhada quanto aos aspectos construtivos dos sensores encontrados no motor EA211, de forma a ser possível demonstrar sua construção e os diagramas de montagem dos condicionadores de sinais destes sensores.

Já do ponto de vista experimental é possível trabalhar no sentido de realizar a otimização dos mapas de injeção e ignição em dinamômetro, fazendo a pesquisa do λ ideal trazendo o melhor compromisso de consumo específico e potência para o mapa de injeção de combustível e a pesquisa de avanço de ignição com a finalidade de encontrar o MBT (*maximum brake torque*) para toda a faixa de funcionamento do motor.

Referências

- ALCANTARA, B. M. Unidade microcontroladora para gerenciamento eletrônico de um motor de combustão interna ciclo otto. USP, p. 283, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 32.
- ASHOK, S. D. A. B.; KUMAR, C. R. A review on control system architecture of a si engine management system. Elsevier, p. 25, 2015. Citado na página 15.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 1585: Veículos rodoviários - código de ensaio de motores - potência líquida efetiva*. Rio de Janeiro, 1996. Citado na página 16.
- BEZERRA, A. C. N. Proposta para implementação de uma bancada dinanométrica automatizada para ensaios em tempo real de motores de combustão interna tipo otto. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, p. 103, 2000. Citado na página 56.
- BOSCH. *Catalogo de bobinas*: Catalogo de bobinas bosch. Brasil, 2011/2012. 59 p. Citado na página 46.
- BOSCH. *Sistemas de Ignição*. 2018. Disponível em: <<https://fdocumentos.tips/document/bosch-sistemas-de-ignicao.html?page=1>>. Citado na página 28.
- BOSCH, R. *Manual de Tecnologia Automotiva*. São Paulo: Blucher, 2005. Citado 7 vezes nas páginas 23, 29, 32, 34, 37, 38 e 45.
- BRAGA, G. T. Uma contribuição ao controle de motores de combustão interna de ignição por centelha na condição de marcha lenta. UFMG, p. 144, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 32, 33, 36 e 38.
- B.RIBBENS, W. *Understanding Automotive Electronics*. [S.l.]: Newnes, 1998. v. 5. Citado 9 vezes nas páginas 24, 31, 35, 38, 39, 41, 42, 44 e 45.
- BRUNETTI, F. *Motores de Combustão interna*. [S.l.]: Blucher, 2012. v. 1. Citado 9 vezes nas páginas 19, 20, 21, 22, 25, 26, 27, 40 e 44.
- CEZAR, G. V. Desenvolvimento de uma bancada de testes para motores a combustão interna. PUC-Rio, p. 143, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 49, 50 e 51.
- DALPRA, A. J. Experimentação planejada para análise dos fatores que influenciam os pontos Ótimos de funcionamento de um motor de combustão interna. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, p. 63, 2020. Citado na página 24.
- D.AMIL, A. A. Otimização dos mapas de injeção e ignição eletrônica de um motor. Universidade da Beira Interior, p. 76, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 42.
- DENTON, T. *Automobile Eletrical and Eletronic Systems*. Londres: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. v. 3. 476 p. Citado 5 vezes nas páginas 20, 22, 25, 31 e 36.

- ENTERPRISES, C. *Wheeler Engine Part*. 2021. Disponível em: <<https://www.indiamart.com/proddetail/engine-part-22239683873.html>>. Citado na página 19.
- FAHADHVHASSAN. *DISTRIBUTORLESS IGNITION SYSTEM: COMPONENTS, WORKING PRINCIPLES, AND TYPES*. 2020. Disponível em: <<https://www.fahadhvhasan.com/distributorless-ignition-system-dis-components-working-principles-and-types/>>. Citado na página 34.
- FUELTECH. *KIT CONECTOR CIRCULAR 37 VIAS*. 2022. Disponível em: <<https://fueltech.com.br/products/kit-conector-circular-37-vias>>. Citado na página 70.
- GODOI, K. S. G. R. D. de Souza; Lucas Antônio Alves de. Inversor de frequência com acionamento de motor. UNIFAFIBE, p. 22, 2018. Citado na página 50.
- GTSHINA. *As principais funções da unidade de controle eletrônico do motor no carro. ECU: o que é e onde está localizado? Como funciona?*. 2019. Disponível em: <<https://gtshina.ru/pt/uhod-za-avto/osnovnye-funkcii-elektronnogo-bloka-upravleniya-dvigatelem-v/>>. Citado na página 30.
- HELLSTROM DONGHOON LEE, L. J. A. G. S. e. H. Y. E. On-board calibration of spark timing by extremum seeking for flex-fuel engines. IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, p. 7, 2012. Citado na página 23.
- HEYWOOD, J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. [S.l.: s.n.], 1988. v. 1. Citado 8 vezes nas páginas 20, 21, 22, 24, 33, 34, 47 e 48.
- INSTITUTO FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE. *Máquinas e Acionamentos Elétricos: Motores trifásicos de corrente alternada*. [S.l.], 2009. Citado na página 49.
- KIANIFAR, M. Application of multidisciplinary design optimisation frameworks for engine mapping and calibration. UNIVERSITY OF BRADFORD, p. 318, 2014. Citado na página 29.
- LAGANÁ, A. A. M. Apostila de sensores. In: USP, E. P. da (Ed.). [S.l.]: USP, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 40, 41 e 42.
- MARTINS, A. R. S. Caldeiras e fornos. In: ITAJUBA, U. F. de (Ed.). *Conservação de energia: Eficiência energética de equipamentos e instalações*. [S.l.]: FUPAI, 2006. Citado na página 20.
- MARTYR, M. P. A. *Engine Testing Theory and Practice*. [S.l.]: Elsevier, 2007. v. 3. Citado 3 vezes nas páginas 48, 49 e 51.
- MILHOR, C. E. Sistema de desenvolvimento para o controle eletrônico dos motores de combustão interna ciclo otto. Universidade de São Paulo, p. 101, 2002. Citado na página 25.
- PEREIRA, J. C. Dinamômetros. Rio de Janeiro, p. 55, 1999. Citado na página 56.

- PEÇA, C. da. *Veja como é a fabricação da vela de ignição*. 2019. Disponível em: <<https://www.canaldapeca.com.br/blog/como-e-feita-a-vela-de-ignicao/>>. Citado na página 46.
- PORTELA KEYLL MARTINS, R. C. H. P. C.; CELA, I. Mapeamento do sistema de injeção e ignição eletrônica. CONEM 2012, p. 10, 2012. Citado na página 16.
- TAN, Q. Model-guided data-driven optimization and control for internal combustion engine systems. University of Windsor, p. 167, 2018. Citado na página 30.
- T.K.GARRETT. *The Motor Vehicle*. Oxford: K. Newton W. Steeds, 2001. Citado na página 22.
- TOMASI, R. Controle de motor a combustão interna para uso em powertrain de veículo híbrido elétrico. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, p. 145, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 30, 45, 47 e 48.
- VOLKSWAGEN(BRASIL). *Sistema de Gerenciamento de Motores Aspirados*: Apostila técnica para treinamento do produto. Brasil, 2009. 96 p. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 36.

ANEXO A – Parametros do inversor

A parametrização do inversor é necessário para colocar o mesmo em funcionamento, os parâmetros de configuração do inversor PowerFlex 700 Ad-justable Frequency AC Drive estão descritos neste anexo.

#	Parameter Name	Value	Units
1	Output Freq	0,0	Hz
2	Commanded Speed	0,0	
3	Output Current	0,0	Amps
4	Torque Current	0,0	Amps
5	Flux Current	0,0	Amps
6	Output Voltage	0,0	VAC
7	Output Power	0,0	kW
8	Output Powr Fctr	0,00	
9	Elapsed MWh	0,0	MWh
10	Elapsed Run Time	3,1	Hrs
11	MOP Reference	0,0	
12	DC Bus Voltage	664,2	VDC
13	DC Bus Memory	665,0	VDC
14	Elapsed kWh	0,2	KWh
16	Analog In1 Value	0,002	Volt
17	Analog In2 Value	0,002	Volt
18	PTC HW Value	5,00	Volt
21	Spd Fdbk No Filt	0,0	
22	Ramped Speed	0,0	
23	Speed Reference	0,0	
24	Commanded Torque	0,0	%
25	Speed Feedback	0,0	
26	Rated kW	158,00	kW
27	Rated Volts	480,0	VAC
28	Rated Amps	248,0	Amps
29	Control SW Ver	6,004	
40	Motor Type	Induction	
41	Motor NP Volts	460,0	VAC
42	Motor NP FLA	23,5	Amps
43	Motor NP Hertz	60,0	Hz
44	Motor NP RPM	3570,0	RPM
45	Motor NP Power	20,00	Hp
46	Mtr NP Pwr Units	Horsepower	
47	Motor OL Hertz	20,0	Hz
48	Motor OL Factor	1,00	
49	Motor Poles	2	
50	Motor OL Mode	00000000000000000000000000000000	
53	Motor Cntl Sel	FVC Vector	
54	Maximum Voltage	460,0	VAC
55	Maximum Freq	130,0	Hz
56	Compensation	0000000000000000000000000000011011	
57	Flux Up Mode	Automatic	
58	Flux Up Time	0,019	Secs
59	SV Boost Filter	500	
61	Autotune	Ready	
62	IR Voltage Drop	8,1	VAC
63	Flux Current Ref	9,00	Amps
64	IXo Voltage Drop	74,9	VAC
66	Autotune Torque	50,0	%
67	Inertia Autotune	Ready	
69	Start/Acc Boost	0,8	VAC
70	Run Boost	0,8	VAC
71	Break Voltage	115,0	VAC
72	Break Frequency	15,0	Hz
79	Speed Units	RPM	
80	Feedback Select	Encoder	
81	Minimum Speed	0,0	RPM
82	Maximum Speed	3570,0	RPM
83	Overspeed Limit	300,0	RPM
84	Skip Frequency 1	0,0	RPM
85	Skip Frequency 2	0,0	RPM
86	Skip Frequency 3	0,0	RPM

87	Skip Freq Band	0,0	RPM
88	Speed/Torque Mod	Min Torque Speed	
90	Speed Ref A Sel	Analog In 1	
91	Speed Ref A Hi	3570,0	RPM
92	Speed Ref A Lo	0,0	RPM
93	Speed Ref B Sel	Preset Spd1	
94	Speed Ref B Hi	1800,0	RPM
95	Speed Ref B Lo	0,0	RPM
96	TB Man Ref Sel	Analog In 2	
97	TB Man Ref Hi	60,0	RPM
98	TB Man Ref Lo	0,0	RPM
99	Pulse Input Ref	0,0	RPM
100	Jog Speed 1	300,0	RPM
101	Preset Speed 1	150,0	RPM
102	Preset Speed 2	300,0	RPM
103	Preset Speed 3	600,0	RPM
104	Preset Speed 4	900,0	RPM
105	Preset Speed 5	1200,0	RPM
106	Preset Speed 6	1500,0	RPM
107	Preset Speed 7	1800,0	RPM
108	Jog Speed 2	300,0	RPM
116	Trim % Setpoint	0,0	%
117	Trim In Select	Analog In 2	
118	Trim Out Select	00000000000000000000000000000000	
119	Trim Hi	1800,0	RPM
120	Trim Lo	0,0	RPM
121	Slip RPM @ FLA	21,8	RPM
122	Slip Comp Gain	40,0	
123	Slip RPM Meter	0,0	RPM
124	PI Configuration	00000000000000000000000000000000	
125	PI Control	00000000000000000000000000000000	
126	PI Reference Sel	Setpoint	
127	PI Setpoint	50,0	%
128	PI Feedback Sel	Analog In 2	
129	PI Integral Time	2,00	Secs
130	PI Prop Gain	1,00	
131	PI Lower Limit	-100,0	%
132	PI Upper Limit	100,0	%
133	PI Preload	0,0	%
134	PI Status	00000000000000000000000000000000	
135	PI Ref Meter	50,0	%
136	PI Fdback Meter	0,0	%
137	PI Error Meter	50,0	%
138	PI Output Meter	0,0	%
139	PI BW Filter	0,0	Rad
140	Accel Time 1	10,0	Secs
141	Accel Time 2	10,0	Secs
142	Decel Time 1	10,0	Secs
143	Decel Time 2	10,0	Secs
145	DB While Stopped	Disabled	
146	S Curve %	10,0	%
147	Current Lmt Sel	Cur Lim Val	
148	Current Lmt Val	372,0	Amps
149	Current Lmt Gain	250	
150	Drive OL Mode	Both-PWM 1st	
151	PWM Frequency	4	kHz
152	Droop RPM @ FLA	0,0	RPM
153	Regen Power Lim	-100,0	%
154	Current Rate Lim	400,0	%
155	Stop/Brk Mode A	Ramp	
156	Stop/Brk Mode B	Coast	
157	DC Brake Lvl Sel	DC Brake Lvl	
158	DC Brake Level	23,5	Amps

298	DPI Ref Select	Max Freq	
299	DPI Fdbk Select	Speed Fdbk	
300	Data In A1	0	
301	Data In A2	0	
302	Data In B1	0	
303	Data In B2	0	
304	Data In C1	0	
305	Data In C2	0	
306	Data In D1	0	
307	Data In D2	0	
308	HighRes Ref	0	
310	Data Out A1	0	
311	Data Out A2	0	
312	Data Out B1	0	
313	Data Out B2	0	
314	Data Out C1	0	
315	Data Out C2	0	
316	Data Out D1	0	
317	Data Out D2	0	
320	Anlg In Config	00000000000000000000000000000000	
321	Anlg In Sqr Root	00000000000000000000000000000000	
322	Analog In 1 Hi	5,000	Volt
323	Analog In 1 Lo	0,000	Volt
324	Analog In 1 Loss	Disabled	
325	Analog In 2 Hi	5,000	Volt
326	Analog In 2 Lo	0,000	Volt
327	Analog In 2 Loss	Disabled	
340	Anlg Out Config	00000000000000000000000000000000	
341	Anlg Out Absolut	0000000000000000000000000000000011	
342	Analog Out1 Sel	Output Freq	
343	Analog Out1 Hi	5,0	Volt
344	Analog Out1 Lo	0,0	Volt
345	Analog Out2 Sel	Torque Est	
346	Analog Out2 Hi	0,0	Volt
347	Analog Out2 Lo	5,0	Volt
354	Anlg Out1 Scale	0,0	Hz
355	Anlg Out2 Scale	100,0	
361	Digital In1 Sel	Stop - CF	
362	Digital In2 Sel	Start	
363	Digital In3 Sel	Jog 1	
364	Digital In4 Sel	Not Used	
365	Digital In5 Sel	Not Used	
366	Digital In6 Sel	Enable	
377	Anlg Out1 Setpt	0,000	Volt
378	Anlg Out2 Setpt	0,000	Volt
379	Dig Out Setpt	00000000000000000000000000000000	
380	Digital Out1 Sel	Fault	
381	Dig Out1 Level	0,0	
382	Dig Out1 OnTime	0,0	Secs
383	Dig Out1 OffTime	0,0	Secs
384	Digital Out2 Sel	Run	
385	Dig Out2 Level	0,0	
386	Dig Out2 OnTime	0,0	Secs
387	Dig Out2 OffTime	0,0	Secs
388	Digital Out3 Sel	Run	
389	Dig Out3 Level	0,0	
390	Dig Out3 On Time	0,0	Secs
391	Dig Out3 OffTime	0,0	Secs
392	Dig Out Invert	00000000000000000000000000000000	
393	Dig Out Param	PI Config	
394	Dig Out Mask	00000000000000000000000000000000	
411	DigIn DataLogic	00000000000000000000000000000000111111	
412	Motor Fdbk Type	Quad Check	

413	Encoder PPR	1024	
414	Enc Pos Feedback	0	
415	Encoder Speed	0,0	RPM
416	Fdbk Filter Sel	None	
419	Notch FilterFreq	0,0	Hz
420	Notch Filter K	0,3	
421	Marker Pulse	1	
422	Pulse In Scale	64	
423	Encoder Z Chan	Pulse Input	
427	Torque Ref A Sel	Analog In 1	
428	Torque Ref A Hi	100,0	%
429	Torque Ref A Lo	0,0	%
430	Torq Ref A Div	1,0	
431	Torque Ref B Sel	Disabled	
432	Torque Ref B Hi	100,0	%
433	Torque Ref B Lo	0,0	%
434	Torq Ref B Mult	1,0	
435	Torque Setpoint1	0,0	%
436	Pos Torque Limit	200,0	%
437	Neg Torque Limit	-200,0	%
438	Torque Setpoint2	0,0	%
440	Control Status	00000000000000000000000000000000	
441	Torq Current Ref	0,0	Amps
445	Ki Speed Loop	7,8	
446	Kp Speed Loop	6,3	
447	Kf Speed Loop	0,0	
448	Spd Err Filt BW	200,0	R/s
449	Speed Desired BW	0,0	R/s
450	Total Inertia	0,97	Secs
451	Speed Loop Meter	0,0	%
452	Stop Dwell Time	0,00	Secs
454	Rev Speed Limit	0,0	RPM
459	PI Deriv Time	0,00	Secs
460	PI Reference Hi	100,0	%
461	PI Reference Lo	-100,0	%
462	PI Feedback Hi	100,0	%
463	PI Feedback Lo	0,0	%
464	PI Output Gain	1,000	
476	Scale1 In Value	0,0	
477	Scale1 In Hi	0,0	
478	Scale1 In Lo	0,0	
479	Scale1 Out Hi	0,0	
480	Scale1 Out Lo	0,0	
481	Scale1 Out Value	0,0	
482	Scale2 In Value	0,0	
483	Scale2 In Hi	0,0	Volt
484	Scale2 In Lo	0,0	Volt
485	Scale2 Out Hi	0,0	
486	Scale2 Out Lo	0,0	
487	Scale2 Out Value	0,0	
488	Scale3 In Value	0,000	
489	Scale3 In Hi	0,000	Volt
490	Scale3 In Lo	0,000	Volt
491	Scale3 Out Hi	0,000	
492	Scale3 Out Lo	0,000	
493	Scale3 Out Value	0,000	
494	Scale4 In Value	0,000	
495	Scale4 In Hi	0,000	
496	Scale4 In Lo	0,000	
497	Scale4 Out Hi	0,000	
498	Scale4 Out Lo	0,000	
499	Scale4 Out Value	0,000	
500	Ki Current Limit	1500	

600	TorqProve Cnfg	00000000000000000000000000000000	
601	TorqProve Setup	00000000000000000000000000000000	
602	Spd Dev Band	60,0	RPM
603	SpdBand Integrat	60	mSec
604	Brk Release Time	0,10	Secs
605	ZeroSpdFloatTime	5,0	Secs
606	Float Tolerance	6,1	RPM
607	Brk Set Time	0,10	Secs
608	TorqLim SlewRate	10,0	Secs
609	Brk Slip Count	250	
610	Brk Alarm Travel	1,0	Rev
611	MicroPos Scale%	10,0	%
612	TorqProve Status	0000000000000000000000000000000010000	
613	Brake Test Torq	50,0	%
629	Reserved	0,00	
630	Reserved	0,00	
631	Rod Load Torque	0,00	FtLb
632	TorqAlarm Level	0,00	FtLb
633	TorqAlarm Action	No Action	
634	TorqAlarm Dwell	0,0	Secs
635	TorqAlrm Timeout	0,0	Secs
636	TorqAlarm TO Act	Resume	
637	PCP Pump Sheave	20,00	Inch
638	Max Rod Torque	500,0	FtLb
639	Min Rod Speed	0,0	RPM
640	Max Rod Speed	300,0	RPM
641	OilWell Pump Sel	Disable	
642	Gearbox Rating	640,0	Kin#
643	Gearbox Sheave	50,00	Inch
644	Gearbox Ratio	1,00	
645	Motor Sheave	8,00	Inch
646	Total Gear Ratio	0,00	
647	DB Resistor	10,4	Ohms
648	Gearbox Limit	100,0	%
650	Adj Volt Phase	3 Phase	
651	Adj Volt Select	Analog In 2	
652	Adj Volt Ref Hi	100,0	%
653	Adj Volt Ref Lo	0,0	%
654	Adj Volt Preset1	0,0	VAC
655	Adj Volt Preset2	0,0	VAC
656	Adj Volt Preset3	0,0	VAC
657	Adj Volt Preset4	0,0	VAC
658	Adj Volt Preset5	0,0	VAC
659	Adj Volt Preset6	0,0	VAC
660	Adj Volt Preset7	0,0	VAC
661	Min Adj Voltage	0,0	VAC
662	Adj Volt Command	0,0	VAC
663	MOP Adj VoltRate	1,0	V/s
669	Adj Volt TrimSel	Analog In 2	
670	Adj Volt Trim Hi	100,0	%
671	Adj Volt Trim Lo	0,0	%
672	Adj Volt Trim %	0,0	%
675	Adj Volt AccTime	0,0	Secs
676	Adj Volt DecTime	0,0	Secs
677	Adj Volt S Curve	0,0	%
700	Pos/Spd Prof Sts	00000000000000000000000000000000	
701	Units Traveled	0,00	Unit
702	Home Position	0,00	Unit
705	Pos/Spd Prof Cmd	00000000000000000000000000000000	
707	Encoder Pos Tol	10	Cnts
708	Counts Per Unit	4096	Cnts
711	Vel Override	100,0	%
713	Find Home Speed	180,0	RPM

714	Find Home Ramp	10,0	Secs
718	Pos Reg Filter	25,0	R/s
719	Pos Reg Gain	4,0	
720	Step 1 Type	Time	
721	Step 1 Velocity	0,0	RPM
722	Step 1 AccelTime	10,00	Secs
723	Step 1 DecelTime	10,00	Secs
724	Step 1 Value	6,00	
725	Step 1 Dwell	0,00	
726	Step 1 Batch	1	
727	Step 1 Next	2	
730	Step 2 Type	Time	
731	Step 2 Velocity	0,0	RPM
732	Step 2 AccelTime	10,00	Secs
733	Step 2 DecelTime	10,00	Secs
734	Step 2 Value	6,00	Secs
735	Step 2 Dwell	0,00	Secs
736	Step 2 Batch	1	
737	Step 2 Next	3	
740	Step 3 Type	Time	
741	Step 3 Velocity	0,0	RPM
742	Step 3 AccelTime	10,00	Secs
743	Step 3 DecelTime	10,00	Secs
744	Step 3 Value	6,00	Secs
745	Step 3 Dwell	0,00	Secs
746	Step 3 Batch	1	
747	Step 3 Next	4	
750	Step 4 Type	Time	
751	Step 4 Velocity	0,0	RPM
752	Step 4 AccelTime	10,00	Secs
753	Step 4 DecelTime	10,00	Secs
754	Step 4 Value	6,00	Secs
755	Step 4 Dwell	0,00	Secs
756	Step 4 Batch	1	
757	Step 4 Next	5	
760	Step 5 Type	Time	
761	Step 5 Velocity	0,0	RPM
762	Step 5 AccelTime	10,00	Secs
763	Step 5 DecelTime	10,00	Secs
764	Step 5 Value	6,00	Secs
765	Step 5 Dwell	0,00	Secs
766	Step 5 Batch	1	
767	Step 5 Next	6	
770	Step 6 Type	Time	
771	Step 6 Velocity	0,0	RPM
772	Step 6 AccelTime	10,00	Secs
773	Step 6 DecelTime	10,00	Secs
774	Step 6 Value	6,00	Secs
775	Step 6 Dwell	0,00	Secs
776	Step 6 Batch	1	
777	Step 6 Next	7	
780	Step 7 Type	Time	
781	Step 7 Velocity	0,0	RPM
782	Step 7 AccelTime	10,00	Secs
783	Step 7 DecelTime	10,00	Secs
784	Step 7 Value	6,00	Secs
785	Step 7 Dwell	0,00	Secs
786	Step 7 Batch	1	
787	Step 7 Next	8	
790	Step 8 Type	Time	
791	Step 8 Velocity	0,0	RPM
792	Step 8 AccelTime	10,00	Secs
793	Step 8 DecelTime	10,00	Secs

794	Step 8 Value	6,00	Secs
795	Step 8 Dwell	0,00	Secs
796	Step 8 Batch	1	
797	Step 8 Next	9	
800	Step 9 Type	Time	
801	Step 9 Velocity	0,0	RPM
802	Step 9 AccelTime	10,00	Secs
803	Step 9 DecelTime	10,00	Secs
804	Step 9 Value	6,00	Secs
805	Step 9 Dwell	0,00	Secs
806	Step 9 Batch	1	
807	Step 9 Next	10	
810	Step 10 Type	Time	
811	Step 10 Velocity	0,0	
812	Step10 AccelTime	10,00	Secs
813	Step10 DecelTime	10,00	Secs
814	Step 10 Value	6,00	
815	Step 10 Dwell	0,00	
816	Step 10 Batch	1	
817	Step 10 Next	11	
820	Step 11 Type	Time	
821	Step 11 Velocity	0,0	
822	Step11 AccelTime	10,00	Secs
823	Step11 DecelTime	10,00	Secs
824	Step 11 Value	6,00	
825	Step 11 Dwell	0,00	
826	Step 11 Batch	1	
827	Step 11 Next	12	
830	Step 12 Type	Time	
831	Step 12 Velocity	0,0	
832	Step12 AccelTime	10,00	Secs
833	Step12 DecelTime	10,00	Secs
834	Step 12 Value	6,00	
835	Step 12 Dwell	0,00	
836	Step 12 Batch	1	
837	Step 12 Next	13	
840	Step 13 Type	Time	
841	Step 13 Velocity	0,0	
842	Step13 AccelTime	10,00	Secs
843	Step13 DecelTime	10,00	Secs
844	Step 13 Value	6,00	
845	Step 13 Dwell	0,00	
846	Step 13 Batch	1	
847	Step 13 Next	14	
850	Step 14 Type	Time	
851	Step 14 Velocity	0,0	
852	Step14 AccelTime	10,00	Secs
853	Step14 DecelTime	10,00	Secs
854	Step 14 Value	6,00	
855	Step 14 Dwell	0,00	
856	Step 14 Batch	1	
857	Step 14 Next	15	
860	Step 15 Type	Time	
861	Step 15 Velocity	0,0	
862	Step15 AccelTime	10,00	Secs
863	Step15 DecelTime	10,00	Secs
864	Step 15 Value	6,00	
865	Step 15 Dwell	0,00	
866	Step 15 Batch	1	
867	Step 15 Next	16	
870	Step 16 Type	End	
871	Step 16 Velocity	0,0	
872	Step16 AccelTime	10,00	Secs

873	Step16 DecelTime	10,00	Secs
874	Step 16 Value	6,00	
875	Step 16 Dwell	0,00	
876	Step 16 Batch	1	
877	Step 16 Next	16	

ANEXO B – Segundo Anexo

A localização no motor de cada sensor pode ser vista na figuras abaixo:



Figura 54 – Sensor Knock do motor EA211

[O Autor]

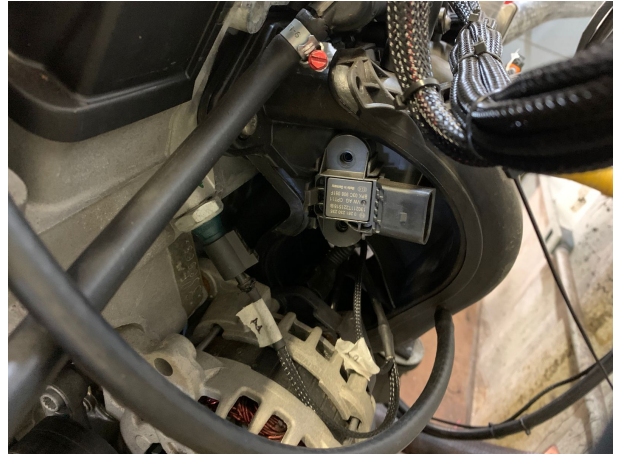


Figura 55 – Sensor MAP do motor EA211

[O Autor]



Figura 56 – Sensor de oxigênio do motor EA211

[O Autor]



Figura 57 – Sensor de temperatura da água

[O Autor]



Figura 58 – Sensor de temperatura do motor EA211

[O Autor]



Figura 59 – Sensor de fase do motor EA211

[O Autor]



Figura 60 – Sensor de rotação do motor EA211

[O Autor]

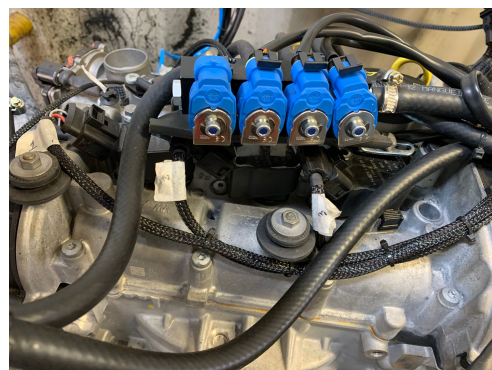


Figura 61 – Bobinas motor EA211

[O Autor]