



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Faculdade de Engenharia

# **Implementação de um sistema de injeção e ignição eletrónicas a um motor de pistão**

(Versão final após defesa)

**Eduardo Boaventura Camuele**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Eletromecânica**

(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Francisco Miguel Ribeiro Proença Brójo

**Covilhã, dezembro de 2018**

## Dedicatória

Aos meus filhos:

Lucas Manuel Tchicomu Camuele

Juliana Domingas Tchicomu Camuele

Avelina Dongua Tchicomu Camuele

Josefina Jamba Tchicomu Camuele

Joana Botão Tchicomu Camuele

Covilhã, dezembro de 2018.

## Agradecimentos

A Deus pai celestial, por ter permitido que isto acontecesse.

Ao Professor Doutor Francisco Miguel Ribeiro Proença Brójo, pela orientação e disponibilidade imediata em todos momentos que solicitei a sua ajuda.

A minha querida Mãe, Natália Tchalunguila, por tudo que fez e faz por mim.

A minha querida irmã Juliana Domingas Camuele, a minha verdadeira companheira, pelo apoio incansável que me dá.

Ao sr. João Ferreira, técnico de laboratório de Máquinas térmicas, pela ajuda na fabricação de peças e empréstimos de ferramentas durante os trabalhos laboratoriais, e ao sr. Nuno pelo apoio ao desenho para corte do suporte All.

Ao sr. Paulo Guerra, técnico de laboratório de Robótica Industrial, pelo apoio aos softwares de desenho usados nas representações gráficas das peças fabricadas.

Ao meu ex-patrão, Mário Inácio de Abreu, por ter me aceitado e incentivado a trabalhar e estudar desde o primeiro ano de ensino médio até a licenciatura. Cheguei aqui passando por aí.

A minha mãe Josefina Jamba, por tudo que fez para mim, ajudou-me a chegar aqui hoje.

Ao meu colega Jesus Rodrigues Monteiro, por todo apoio durante o trajeto formativo.

Ao meu amigo João Sivi e ao Professor Doutor Luís Carrilho pelo apoio à sintaxe.

## Resumo

No presente trabalho foi implementado um sistema de injeção e ignição eletrônicas a um motor Honda GX120, originalmente equipado com o sistema de alimentação a carburador e ignição por magneto transistorizado. Após as notas introdutórias, é apresentada de seguida uma revisão bibliográfica, que começa com a pesquisa de obras de adaptação de sistemas eletrônicos digitais a motores de combustão interna. Estes motores estão originalmente equipados com sistemas de alimentação e ignição comandados mecanicamente ou por eletrônica analógica. É feita uma caracterização genérica ao motor de combustão interna alternativo. São abordados o funcionamento do motor de ciclo Otto e alguns sistemas de injeção e ignição que podem equipar este motor. É feita também uma abordagem generalizada ao princípio de funcionamento da unidade de controlo eletrónico (UCE) de injeção e ignição, no motor de combustão interna de ciclo Otto.

A componente experimental é composta por descrições das funcionalidades do software usado para reprogramação da UCE, e por testes dos mapas de avanço de ignição e de rendimento volumétrico.

Após os testes, analisaram-se os resultados cujos valores estão representados em gráficos, ilustrando o comportamento do binário, da potência e dos consumos do motor em função de três modos de ignição e da velocidade de rotação testados no motor.

### Palavras-chave

Motor de combustão interna, injeção e ignição eletrônicas, eletrônica digital, binário, potência, consumo.

# Abstract

In the present work is adapted an electronic injection and ignition system to the Honda GX120 engine, originally equipped with the carburetor and transistor magnet ignition system. After introductory notes, is presented a literary review that begins with the research of works of adaptation of electronic systems in internal combustion engines, which originally were equipped with mechanical systems. A generic characterization to the internal combustion engine is also made addressing the operation of the Otto cycle engine and some injection and ignition systems that can equip this type of engine. A generalized approach is also given to the principle of operation of the electronic control unit (ECU) of injection and ignition in the engine the Otto cycle.

The experimental component consists of descriptions of the functionalities of the software used to reprogram the UCE and by tests of the ignition advance map and volumetric efficiency map.

After the tests, the results were analyzed from values are represented in graphs, showing the behavior of the torque, power and consumptions of the engine as a function of three modes of ignition that were experienced in the engine and the rotational speed.

## Keywords

Internal combustion engine, electronic injection and ignition, digital electronics, torque, power, consumption.

# Índice geral

Lista de símbolos	viii
Lista de figuras	x
Lista de tabelas	xii
<b>Capítulo 1</b>	<b>1</b>
<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Justificação	1
1.2 Objetivo	2
<b>Capítulo 2</b>	<b>3</b>
<b>Revisão bibliográfica</b>	<b>3</b>
2.1 Motor de combustão interna	4
2.1.1 Componentes do MCI	5
2.1.2 Ciclo Otto	6
2.1.3 Ciclo de trabalho	7
2.1.3.1 Combustão	8
2.1.4 Parâmetros de desempenho do motor	9
2.2 Sistemas do motor IF	10
2.2.1 Sistema de alimentação a carburador (Honda GX120)	11
2.2.2 Injeção eletrónica	12
2.2.3 Ignição	13
2.2.3.1 Ignição por magneto com platinado	12
2.2.3.2 Ignição por bateria ou convencional	15
2.2.3.3 Ignição eletrónica	16
2.2.3.4 Ignição por magneto transistorizado (Honda GX120)	18
2.2.3.5 Ignição eletrónica digital ou mapeada	18
2.2.3.5.1 Auto-detonação ( <i>knock</i> )	20
2.3 Sensores necessários ao funcionamento do MCI	22
2.3.1 Sensor de pressão do ar MAP (Manifold Air Pressure)	22
2.3.2 Sensor de temperatura do ar MAT (Manifold Air Temperature) e IAT (Intake Air Temperature)	22
2.3.3 Sensor MAF (Mass Air Flow)	23
2.3.4 Sensores de fase e velocidade do motor	23
2.3.5 Sensor TPS (Throttle Position Sensor)	23
2.3.6 Sensor de temperatura do motor CLT (Coolant Temperature)	24
2.3.7 Sensor de Oxigénio (Sonda Lambda, $\lambda$ )	24
2.3.8 Sensor de Auto-Detonação (Knock)	24

2.4 Centralina (UCE)	25
2.4.1 Funcionamento da UCE	25
2.4.1.1 Mapas	27
<b>Capítulo 3</b>	<b>28</b>
<b>Componente experimental</b>	<b>28</b>
3.1 Motor HONDA GX120	28
3.2 Cálculo de binário e potência de travagem	29
3.3 Cálculo de consumo de combustível	32
3.4. Componentes da injeção e ignição implementada	33
3.4.1 UCE MS-II	35
3.4.1.1 Controlo de combustível	36
3.4.1.1.1 Determinação da massa de ar	37
3.4.1.1.2 Equação da mistura estequiométrica	39
3.4.1.2 Controlo de ignição	40
3.4.1.2.1 Equação do ponto de ignição	40
3.5 Software de configuração e ajuste	41
3.5.1 Configuração e ajustes	42
3.5.1.1 Critérios	42
3.6 Testes experimentais preliminares	49
3.6.1 Procedimentos	50
3.7 Alterações ao motor de base	50
3.8 Desenhos	51
3.9 Fabricação de peças	52
3.10 Construção do mapa base de avanço de ignição	53
<b>Capítulo 4</b>	<b>55</b>
<b>Resultados</b>	<b>55</b>
4.1 Teste do mapa base de avanço de ignição	55
4.1.1 Afição do mapa base de avanço de ignição	56
4.2 Testes de novos mapas	57
4.3 Curvas de desempenho	58
<b>Capítulo 5</b>	<b>62</b>
<b>Conclusões e trabalhos futuros</b>	<b>62</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>63</b>
<b>Lista de websites consultados</b>	<b>66</b>

# Lista de símbolos

$A$	Área
$A_f$	Avanço por temperatura do motor
$AFR$	Razão ar - combustível
$A_i$	Avanço inicial
$Arpm$	Avanço por rpm
$A_t$	Avanço total
$A_v$	Avanço por vácuo
$B$	Binário útil
$B_T$	Binário de travagem
$c$	Comprimento da pastilha
$C_s$	Consumo específico
$CAN$	Controller Area Network
$CDI$	Ignição por descarga capacitiva
$CLT$	Sensor de temperatura do motor
$CPU$	Unidade central de processamento
$DT$	Dead time
$f$	Coefficiente de atrito
$F$	Força
$F_c$	Força com que gira a cambota
$FLASH (EPROM)$	Memória somente leitura apagável e programável
$IAT$	Sensor de temperatura do ar admitido
$IC$	Ignição por compressão
$IF$	Ignição por faísca
$\dot{m}_f$	Caudal mássico de combustível
$M_a$	Massa do ar
$M_M$	Memória de manutenção
$M_r$	Massa real
$M_t$	Massa teórica
$MAF$	Sensor de caudal mássico de ar
$MAP$	Sensor de pressão absoluta do coletor de admissão
$MAPdot$	Enriquecimento baseado em MAP

<i>MAT</i>	Sensor da temperatura do ar entrando no coletor de admissão
<i>MCI</i>	Motor de combustão interna
<i>MM</i>	Massa molar
<i>n</i>	Quantidade de partículas
<i>N</i>	Velocidade do motor
<i>NTC</i>	Coeficiente de temperatura negativa
$\dot{P}_{util}$	Potência útil
<i>p</i>	Pressão
<i>p<sub>g</sub></i>	Pressão de gás
<i>p<sub>m</sub></i>	Pressão no manómetro
<i>PMI</i>	Ponto morto inferior
<i>PMS</i>	Ponto morto superior
<i>PTC</i>	Coeficiente de temperatura positiva
<i>PW</i>	Largura do pulso
<i>PWM</i>	Largura de pulso modulado
<i>Q<sub>pi</sub></i>	Poder calórico de combustível
<i>R</i>	Constante dos gases
<i>R<sub>cc</sub></i>	Raio do volante do motor
<i>R<sub>e</sub></i>	Raio equivalente
<i>R<sub>i</sub></i>	Raio interior
<i>R<sub>m</sub></i>	Raio medio
<i>RAM</i>	Memória de acesso aleatório
<i>REQ_FUEL</i>	Combustível requerido
<i>SCRs</i>	Retificador controlado de silício
<i>T</i>	Temperatura
<i>TI</i>	Valor da tabela de ignição
<i>TPS</i>	Sensor de posição da borboleta
<i>TPSdot</i>	Enriquecimento baseado em TPS
<i>UCE</i>	Unidade de controlo eletrónico
<i>V<sub>d</sub></i>	Volume deslocado
<i>V<sub>g</sub></i>	Volume do gás
<i>VE</i>	Eficiência volumétrica
<i>VR</i>	Relutância variável
$\eta_T$	Rendimento total
$\lambda$	Sonda lambda

# Lista de figuras

Figura 2.1 - Componentes do MCI alternado de IF (Rogers and Mayhew, 1980a, citado por Stone, 1999).	5
Figura 2.2 - Ciclo Otto teórico (Gill, et al 1959).	6
Figura 2.3 - Os quatro processos do motor IF de 4 tempos (Ferguson & Kirkpatrick, 2001).	8
Figura 2.4 - a) Princípio de funcionamento do carburador (Contesini, 2014); b) Carburador GX120 (Honda, 2018).	11
Figura 2.5 - Pressão máxima de combustão em função do ponto de ignição (Tillmann, 2013).	13
Figura 2.6 - Exemplo de Ignição por magneto (Oliveira, 2015). a) Magneto de alta tensão; b) Magneto de baixa tensão.	14
Figura 2.7 - Sistema de ignição convencional (Arcoumanis, 1988).	15
Figura 2.8 - Circuito básico de ignição assistida (Braga, 2016).	16
Figura 2.9 - Ignição eletrônica com gerador de pulsos (SENAI, 2001).	17
Figura 2.10 - Sistema básico de ignição por descarga capacitiva (Braga, 2016).	17
Figura 2.11 - Esquema de ignição Honda GX120 (Honda, 1998).	18
Figura 2.12 - Ignição digital (Martins, 2016).	19
Figura 2.13 - Arquitetura de um dos sistemas de ignição eletrônica VOLVO, com retardamento de combustão (retratado por Anderson <i>et al</i> , 1984; citado por Arcoumanis, 1988).	20
Figura 2.14 - Exemplo de uma Ignição estática (SENAI, 2001).	20
Figura 2.15 - Exemplo do sinal de sensor de knock e como é controlado pela ignição (Petronilho, 2011).	21
Figura 2.16 - Exemplo esquemático da estrutura de um processador (Moreira, 2018).	27
Figura 3.1 - Motor GX120 (Honda, 2012).	28
Figura 3.2 - Mecanismo usado para determinar a pressão de travagem do motor	29
Figura 3.3 - Esquema do mecanismo de travagem disco pastilha.	30
Figura 3.4 - Visualização de PW e outros parâmetros no <i>data logging</i> .	33
Figura 3.5 - Esquema de injeção digital implementada ao motor Honda GX120 (MegaSquirt, 2015).	34
Figura 3.6 - A: Diagramas de saída do sensor All. B: Esboço do sistema de ignição adaptado ao motor Honda GX120.	34
Figura 3.7 - UCE MS-II <sup>TM</sup> .	35

Figura 3.8 - Placa principal V3.0 usado no controlador MS-II (MegaSquirt, 2015).	35
Figura 3.9 - Processador MC9S12C64 (MegaSquirt, 2015).	36
Figura 3.10 - Janela de configuração dos parâmetros iniciais.	43
Figura 3.11 - Janela de configurações gerais.	43
Figura 3.12 - Janela de ajuste de PWM.	44
Figura 3.13 - Janela de parâmetros de inicialização.	45
Figura 3.14 - Janela de enriquecimento, percentagem de PW (largura do pulso) após a partida.	45
Figura 3.15 - Janela de enriquecimento por ciclo após a partida.	45
Figura 3.16 - Janela de ajuste de enriquecimento de aquecimento.	46
Figura 3.17 - Tabela VE de base.	46
Figura 3.18 - Mapa AFR de base.	47
Figura 3.19 - Janela de configuração de parâmetros de ignição.	47
Figura 3.20 - Definição do ângulo inicial de ignição.	48
Figura 3.21 - Gerador de mapas de avanço de ignição (microSquirt3, 2018).	48
Figura 3.22 - Janela de configuração de enriquecimento de aceleração.	49
Figura 3.23 - Mudanças de componentes no sistema de ignição.	51
Figura 3.24 - Retificação da montagem do TPS.	51
Figura 3.25 - Suporte do sensor All.	52
Figura 3.26 - Suporte do TPS.	52
Figura 3.27 - Mapa base de ignição não gerado online.	54
Figura 3.28 - Mapa base de ignição gerado online.	54
Figura 4.1 - Mapa base de avanço de ignição afinado para maior binário.	56
Figura 4.2 - Mapa VE otimizado para maior binário (D'Amil, 2016).	57
Figura 4.3 - Mapa VE otimizado para binário médio.	57
Figura 4.4 - Mapa de avanço de ignição otimizado para binário médio.	58
Figura 4.5 - Curvas de binário e potência do motor HONDA GX120 (Honda, 2012).	58
Figura 4.6 - Binário equivalente adimensional na travagem.	59
Figura 4.7 - Potência equivalente adimensional na travagem.	60
Figura 4.8 - Consumo adimensional por período de trabalho.	61
Figura 4.9 - Consumo específico adimensional dos três modos de ignição realizados nos ensaios.	61

# Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Características técnicas de origem do motor Honda GX120 (Honda, 2012).	29
Tabela 3.2 - Dimensões da pastilha de travagem.	31
Tabela 3.3 - Dados técnicos do processador MS-II (MegaSquirt, 2015).	36
Tabela 3.4 - Dados do teste preliminar.	50
Tabela 4.1 - Dados do desempenho do motor usando o mapa base.	55
Tabela 4.2 - Dados do desempenho do motor usando ignição digital com ângulo fixado de 8 a 10° .	56
Tabela 4.3 - Desempenho do motor usando Ignição eletrónica digital - ângulo variável.	57

# Capítulo 1

## Introdução

Algumas das fontes que poluem a atmosfera do nosso planeta, resultam das soluções encontradas pelo ser humano para produzir energia de forma a melhorar a sua forma de viver.

Atualmente, a preocupação com a melhoria do desempenho energético e ecológico dos motores de combustão interna, é um assunto de capital importância. Estes motores têm contribuído de forma significativa para aumentar a poluição do ambiente atmosférico devido aos produtos resultantes do seu funcionamento. Fatores como, o aumento de desempenho e conforto nas máquinas que equipam, tais como em automóveis, têm sido impulsores do aumento das vendas e na utilização destes equipamentos.

Nas sociedades atuais, o aumento do consumo energético parece ser inevitável, uma vez que ninguém está disposto a recuar nos padrões de vida. Daí que a solução passe pela racionalização da energia. Uma das formas de racionalizar a energia num motor de combustão interna, é torná-lo mais eficiente, e isto para um motor já concebido implica a alteração e adaptação de certos sistemas. Daí que este trabalho trate de substituir o sistema de alimentação a carburador e o de ignição por magneto do motor Honda GX120, pelos sistemas de injeção e ignição eletrónicas digitais.

Este trabalho procura encontrar soluções que visam minimizar a quantidade de poluentes emitidos por estes motores e ao mesmo tempo melhorar a sua eficiência. Assim pretende-se encontrar zonas de funcionamento do motor que permitam obter um maior binário, mas com um consumo de combustível inferior ao inicial. Isto constitui uma tarefa que consideramos de capital importância e este trabalho é um contributo para as soluções de melhoria da eficiência energética.

### 1.1 Justificação

A redução do consumo de combustíveis e o aumento de potência dos motores de combustão interna, são um desafio que atualmente a situação ambiental exige. A redução no

consumo pode ser entendida como uma exigência legal, motivada pela preservação do meio ambiente e pelo aumento do custo dos combustíveis. Enquanto o aumento de potência dos motores é um requisito de concorrência no mercado.

Atualmente, os motores de combustão interna que equipam os automóveis, a sua capacidade energética não deve resumir-se apenas à energia necessária para locomover o automóvel, é preciso que esta capacidade energética esteja para além da locomoção. Isto é devido ao número de sistemas complementares presentes nestas máquinas, os quais tem que funcionar ao mesmo tempo e também fornecer comodidade ao ocupante. Como exemplo destes sistemas referem-se: o sistema de iluminação, o sistema de aquecimento e ventilação, os elevadores elétricos de vidros, o sistema de suspensão e outros. São sistemas que consomem energia produzida pelo motor e que são indispensáveis à sua utilização. Porém, já existem no mercado algumas tecnologias de energias renováveis aplicadas em automóveis, tais como energia solar fotovoltaica para abastecer alguns sistemas, com o propósito de minimizar a energia produzida pelo motor. Contudo estas tecnologias ainda apresentam um custo elevado. Daí que, o aperfeiçoamento e a adaptação de sistemas que visam tornar o motor mais eficiente energeticamente, continuam a ser um dos caminhos mais seguidos. E assim, a adaptação de sistemas de injeção e ignição eletrônicas aos motores de pistão, é uma das medidas que visam a tornar estes motores mais eficientes energeticamente.

## 1.2 Objetivo

O tema deste trabalho não é novidade, já foi abordado por vários autores e destes, três usaram o mesmo motor que aqui está a ser usado. Estes, trabalharam na adaptação dos sistemas acima referenciados. Cada um deles deu o seu contributo completando uma parte até onde foi possível. Nesta senda, o nosso objetivo na temática, será aprofundar o conhecimento acerca dos sistemas de injeção e ignição eletrônicas digitais e, ao mesmo tempo, também aperfeiçoar algumas questões que por alguma razão ficaram por completar. Entre estas questões está a otimização do mapa de ignição. Assim sendo, nos centraremos mais no sistema de ignição, sobretudo na componente experimental. E como indicador do êxito do nosso trabalho pretende-se ter o binário e a potência útil do motor aumentada e, o consumo de combustível reduzido.

Pretende-se também que após a adaptação, o motor sirva não só para aplicações em máquinas estacionárias mas também em veículos de transporte de pessoas e bens.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

A troca de sistemas de injeção e ignição não programáveis por outros de eletrónica programável, é comum nos dias de hoje. As motivações prendem-se com o grau elevado de eficiência destes sistemas, em relação aos primeiros, conferindo assim melhor desempenho ao motor.

A injeção eletrónica existe propriamente em automóveis de produção desde 1957, já a ignição eletrónica data aproximadamente de 1968 a sua aplicação em automóveis. Ao longo dos anos estes sistemas foram desenvolvidos e diversificados.

Já ciente dos benefícios da gestão de ignição e injeção de combustível eletronicamente, Pujatti (2007), projectou e construiu um sistema de gestão eletrónica de ignição e injeção de combustível mapeável, com o objetivo de que o utilizador tivesse acesso às matrizes de ajuste e ao software de gestão, afim do sistema ser adaptável a qualquer motor de ignição por faísca (IF). Pujatti (2007), testou o desempenho do sistema em três motores diferentes e todos equipados originalmente com sistemas de gestão eletrónica comercial de fabricantes diferentes, e os resultados dos testes, revelaram um desempenho muito semelhante aos dos sistemas comerciais.

Teixeira (2014), trocou o sistema de alimentação a carburador que equipava um motor Honda GX120, pelo sistema de injeção eletrónica mapeável e o seu propósito era diminuir o consumo específico deste motor e, segundo o autor, no final conseguiu obter os resultados antes almejados.

Oliveira (2015), implementou um sistema de injeção eletrónica a um motor Honda GX25 com o propósito de diminuir o consumo de combustível e emissões de poluentes, tendo conseguido alterar o valor de lambda de 0,8 com o carburador para 1,0 com a injeção eletrónica, ou seja, conseguiu obter a potência antes conseguida a 0,8 com 1,0 usando injeção eletrónica. Também reduziu a marcha lenta de 4000 rpm para 2500 rpm e o tempo de arranque a frio.

Com o objetivo de melhorar o desempenho e a fiabilidade do motor Honda GX120, D'Amil (2016), otimizou o mapa VE da injeção eletrónica digital adaptada ao motor, cujos resultados se refletiram não só num aumento de binário e potência, mas também na diminuição do consumo específico em relação ao desempenho do motor com o sistema de alimentação de

origem. Ainda segundo D'Amil (2016), os resultados alcançados seriam muito melhores se tivesse conseguido otimizar também o mapa de avanço de ignição.

## 2.1 Motor de combustão interna

Como foi referido anteriormente, este trabalho trata de um MCI (motor de combustão interna). Neste capítulo vamos fazer uma curta abordagem, apoiando-nos em alguns manuais que abordaram o funcionamento destas máquinas que tanto mudaram o modo de vida do ser humano.

Atualmente os MCI representam as máquinas de produção de energia mecânica mais utilizadas, incluindo aplicações rodoviárias como automóveis de passageiros, motocicletas e camiões, e outras aplicações não rodoviárias como máquinas de construção, geradores elétricos, veículos agrícolas, locomotivas e navios, etc. (Baumgarten, 2006).

De acordo com Martins (2016), os MCI classificam-se em: MCI Volumétricos e Dinâmicos. Os volumétricos dividem-se em alternativos (motor a pistão) e rotativos (motor Wankel). Sendo os Dinâmicos divididos em rotativos que é caso de turbinas a gás, e a reação ou a jato.

Segundo Stone (1999) e Heywood (1988), atendendo à forma como a combustão é iniciada, existem dois principais tipos de MCI, que são: os de ignição por faísca (IF) e os de ignição por compressão (IC). No MCI de IF, a mistura ar combustível é inflamado pela faísca, já para o de IC a inflamação do combustível acontece quando este é injetado na câmara de combustão contendo ar a alta pressão e temperatura. Os MCI alternativos, classificam-se de muitas formas e de entre estas, estão também a forma construtiva, o tipo de combustível que utiliza, a disposição dos pistões, etc.

Atualmente os motores alternativos têm a maior e a mais generalizada aplicação, sobretudo em veículos automóveis. Nestes motores, um êmbolo (pistão) com movimento alternativo, num instante realiza o trabalho sobre os gases (comprime), e noutro os gases realizam trabalho sobre ele (expansão) (Lima, *et al.*, 2009).

O processo de transformação de energia química contida no combustível em energia mecânica nos MCI, é baseado em princípios termodinâmicos e na análise teórica a operação é considerada cíclica. Para os motores alternativos, existem dois ciclos principais, que compreendem o ciclo Otto e Diesel. O ciclo Otto, é o ciclo de operação dos motores IF e o Diesel é o ciclo de operação dos motores IC (Ferguson & Kirkpatrick, 2001). O ciclo Otto, é o ciclo o qual trabalha o motor

Honda GX120, sendo assim, é este ciclo que vamos descrever com mais pormenor, mas antes é imprescindível caracterizar a estrutura do MCI alternativo sobre o qual incide este trabalho, para melhor compressão do seu princípio de funcionamento.

### 2.1.1 Componentes do MCI

Tillmann (2013), e Martins (2016) na menção que fazem aos componentes do MCI dizem que, os principais componentes destas máquinas dividem-se em fixos e móveis, e salientam que os fixos são:

- Bloco
- Cabeçote
- Carter

E são considerados móveis os seguintes:

- Pistão
- Biela
- Cambota
- Válvulas de admissão e escape
- Volante do motor
- Eixo de comando das válvulas (árvore de cames)
- Sistema de distribuição

Varella e Santos (2010) caracterizam estes componentes, como sendo partes que trabalham complementando-se umas às outras num conjunto para o funcionamento do motor. E são os principais responsáveis pelo fornecimento de condições necessárias para que o processo de transformação de energia química do combustível se realize com eficácia e de forma contínua. A Figura 2.1, ilustra um exemplo dos componentes de um MCI alternativo monocilíndrico IF.

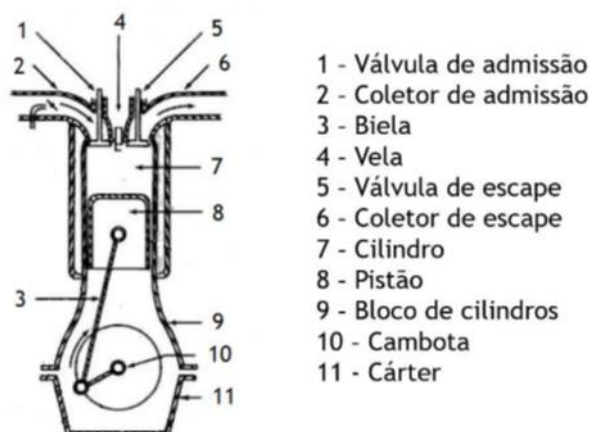


Figura 2.1 - Componentes do MCI alternado de IF (Rogers and Mayhew, 1980a, citado por Stone, 1999).

De salientar que existe outro componente parte fundamental da estrutura do motor, este é designado por cabeçote. É o componente que nele estão alojadas: as válvulas tanto de admissão assim como de escape, a vela de ignição. É também o componente que serve de tampa ao cilindro.

### 2.1.2 Ciclo Otto

A análise do funcionamento do motor, é feita teoricamente com recurso à termodinâmica, isto é, dividindo o seu ciclo de operação em quatro processos que compreendem a admissão, a compressão, expansão (adição de calor/explosão) e escape (liberação de calor). O processo físico é bastante complexo, daí que, cada processo teórico equivale a vários níveis de aproximação de um processo físico (Martins, 2016). A figura 2.2, ilustra em a) o ciclo Otto P-V (Pressão - Volume) ideal, e em b) o ciclo típico P-V real.

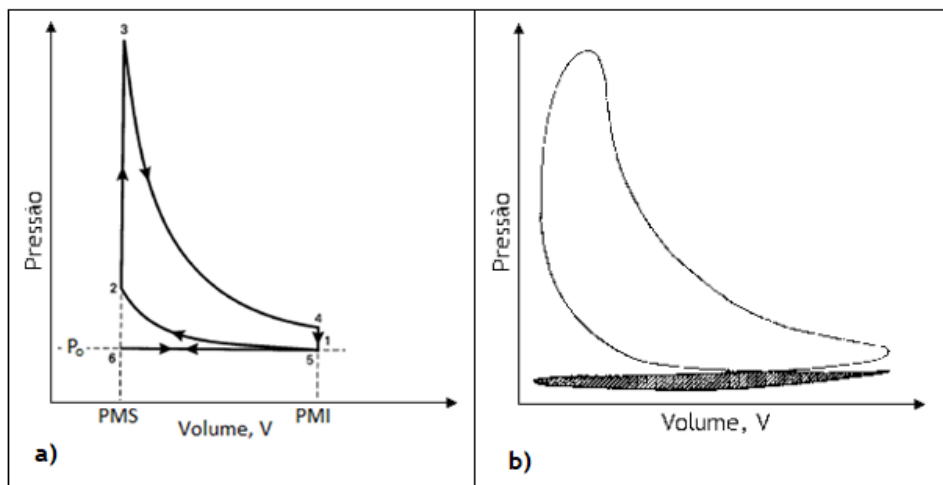


Figura 2.2 - a) Ciclo Otto teórico (Gill, et al 1959); b) ciclo Otto real (Martins, 2016).

A Figura 2.2a, mostra graficamente o ciclo Otto ideal e os processos termodinâmicos que o compõem. Segundo Gill, *et al* (1959), termodinamicamente, as condições a que está sujeito o fluido de trabalho são:

Processo 1-2 - Compressão isentrópica. O pistão reduz o volume ocupado pelo fluido de trabalho (ar/combustível), ao realizar trabalho definido pela área delimitada pelos pontos 1-2-6-5-1, (ver figura 2.2a);

Processo 2-3 - Aquecimento isocórico. A volume constante do fluido de trabalho, é-lhe adicionado calor ao ocorrer a combustão, com o pistão no PMS (ponto morto superior);

Processo 3-4 - Expansão isentrópica. O fluido expande-se e realiza trabalho sobre o pistão, processo definido pelos pontos 4-3-6-5-4, (ver figura 2.2a);

Processo 4-1 - Arrefecimento isocórico. A volume constante, o fluido de trabalho liberta calor.

Processo 5-6 - É a saída no cilindro dos gases resultantes do processo de combustão;

Processo 6-5 - Entrada no cilindro da mistura ar combustível.

É de salientar que nesta análise se assume a hipótese de que o fluido de trabalho se comporta como um gás perfeito, que o processo de combustão é substituído pela adição de calor a partir de uma fonte externa e que ao rejeitar este calor o gás passa às propriedades iniciais. Esta análise é importante, pois constitui uma medida de comparação da eficiência do motor ao funcionamento real. No ponto de vista mecânico o funcionamento do MCI alternado é caracterizado a seguir através do ciclo de trabalho.

### 2.1.3 Ciclo de trabalho

Na reação do combustível com o oxigênio num MCI alternativo, a transformação de energia manifesta-se através da expansão altamente enérgica dos gases que empurram o pistão que se encontra no interior do cilindro. O movimento do pistão é comunicado à biela com a qual está unido o pistão através de um pino, e a biela por sua vez, transmite o movimento à cambota (árvore de manivelas) mas transformando o movimento, antes retilíneo, para rotativo (Romanelli, 2014). Após a receção da energia transmitida pela biela, a cambota distribui parte aos mecanismos que asseguram o funcionamento do próprio motor e outra é utilizada para produção de trabalho fora do motor (Tillmann, 2013).

De acordo com Stone (1999) e Gupta (2009), os MCI alternativos, para cada revolução da cambota o pistão efetua dois cursos, tanto o de IF como o de IC, e qualquer um pode ser projetado para trabalhar a dois ou quatro cursos do pistão por ciclo. Os cursos também são designados por tempos do motor. Para os motores de dois tempos um ciclo de trabalho corresponde a  $360^\circ$  do giro da cambota, enquanto para os de quatro tempos, um ciclo é igual a  $720^\circ$  de giro da cambota.

Segundo Heywood (1988), cada ciclo é composto por quatro processos e cada um deles corresponde e decorre num determinado curso do pistão. Estes processos são: *admissão*, *compressão*, *combustão* e *escape*. A Figura 2.3, ilustra a sequência de cursos do pistão em que estes processos ocorrem num motor de quatro tempos.

Os quatro processos ilustrados na Figura 2.3, são descritos por Gill *et al* (1959) e Benson e Whitehouse (1979), como sendo: A *admissão* corresponde a fase em que a válvula de admissão está aberta e a de escape fechada, e o motor recebe no cilindro a mistura ar/combustível aspirada pelo pistão durante a sua ida do PMS (ponto morto superior) para o PMI (ponto morto inferior). A *compressão*, é a etapa em que a válvula de admissão e de escape se encontram fechadas e o pistão se desloca do PMI para o PMS, comprimindo a mistura ar/combustível até ao volume da câmara de combustão. A *combustão*, é a fase em que a mistura ar/combustível

queima, causando um aumento significativo da pressão e temperatura no interior do cilindro. No decurso deste processo, a válvula de admissão e escape ficam fechadas. O processo de *escape*, consiste em expulsar no interior do cilindro, os gases resultantes da combustão. Nesta fase a válvula de escape encontra-se aberta e de admissão fechada.

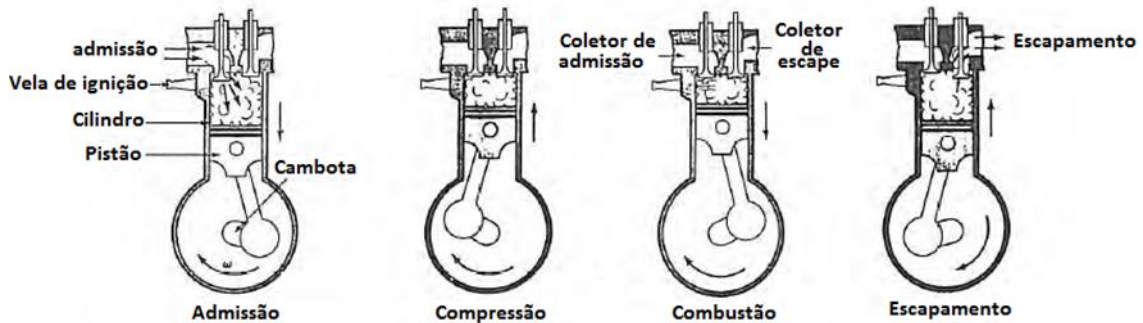


Figura 2.3 - Os quatro processos do motor IF de quatro tempos (Ferguson & Kirkpatrick, 2001).

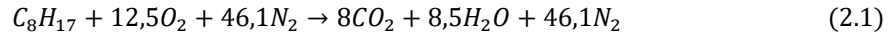
Numa comparação que Gupta (2009) faz entre o motor de dois tempos e de quatro tempos, mostra-se que nos motores de quatro tempos, os quatro processos do ciclo mecânico, ocorrem em quatro cursos do pistão. Ou seja, a admissão ocorre quando o pistão executa o primeiro curso, onde este desloca-se do PMS para o PMI e a cambota executa um ângulo de  $180^\circ$ . A compressão ocorre no segundo curso, o pistão desloca-se no sentido inverso ao primeiro e a cambota gira mais  $180^\circ$  indo para  $360^\circ$  com respeito ao ponto inicial. A combustão acontece no terceiro curso em que o sentido do movimento é igual ao do primeiro e a cambota nesta altura gira até  $540^\circ$ . O escape ocorre no último curso do pistão e neste, o pistão desloca-se do PMI para o PMS ao fim do qual a cambota completa  $720^\circ$  em torno do seu próprio eixo. Já nos motores a dois tempos, os quatro processos ocorrem em dois cursos do pistão. O processo de *admissão* e *compressão* ocorrem quase em simultâneo assim como o da combustão e escape. Durante a admissão e compressão a cambota gira  $180^\circ$ , e da combustão e escape gira mais  $180^\circ$ , totalizando  $360^\circ$  que correspondem a um ciclo de trabalho (Peça, 2012).

### 2.1.3.1 Combustão

A fase da combustão é também denominada de tempo motor. Esta etapa corresponde ao momento de transformação de energia e produção de trabalho. É o único processo que produz trabalho, os restantes apenas consomem. A maioria das transformações que os MCI sofreram desde a sua invenção até aos dias de hoje, foram com vista a aumentar as taxas de compressão e melhoria do processo de combustão. A informação a seguir, refere-se a um motor de ciclo Otto convencional.

É na fase de combustão que o pistão é empurrado violentamente pela pressão dos gases em expansão devido à alta temperatura e pressão gerada pela reação química, (Isermann, 2014).

Segundo Milhor (2002), durante o processo de combustão o carbono e o hidrogênio da gasolina reagem com o oxigênio do ar. Admitindo uma composição média de  $C_8H_{17}$  para o hidrocarboneto correspondente à gasolina e, supondo em volume 21 % de  $O_2$  e 79 % de  $N_2$  para a composição do ar, tem-se antes da combustão e depois o seguinte:



A equação 2.1, ilustra o que aconteceria se combustão fosse perfeita, onde após a combustão ter-se-ia um gás composto por água,  $H_2O$ , dióxido de carbono,  $CO_2$  e azoto livre,  $N_2$ . Trata-se de uma mistura estequiométrica. Estes componentes não são considerados diretamente prejudiciais ao ambiente, com exceção do  $CO_2$  no seu efeito de estufa a camada de ozono. Mas como a combustão não é perfeita, a composição dos gases após a combustão contém além de  $H_2O$ ,  $CO_2$  e  $N_2$  outros componentes, tais como: hidrocarbonetos não queimados,  $HC$ , monóxido de carbono,  $CO$  e óxidos de azoto,  $NO_x$  e, outros, (Milhor, 2002).

Baumgarten (2006), na abordagem que faz sobre o comportamento dos componentes do gás resultante da combustão, afirma que numa experiência com um motor de ciclo Otto de câmara variável, realizada por Ayoma *et al* (1996) e Stockinger *et al* (1999) (ambos citados no seu trabalho), notaram que as emissões de  $NO_x$  aumentavam a altas temperaturas de combustão, enquanto que  $HC$  e  $CO$  as suas emissões aumentavam em baixas temperaturas de combustão.

Nos MCI de ciclo Otto, os poluentes,  $HC$  e  $CO$ , são formados pela combustão incompleta e o  $NO_x$  é formado pela reação química do azoto e oxigênio do ar, quando este se encontra em temperaturas elevadas (Barbosa, 2013).

A combustão incompleta é originada por muitos fatores, tais como a velocidade do motor, a qualidade do combustível, a razão ar/combustível, o ponto de ignição, entre outros. Segundo Albaladejo (2013), para um motor trabalhando a 3000 rpm, o tempo aproximado em que o processo de combustão ocorre em cada ciclo é de 10 ms. Este fato, é uma das razões que contribuem para a combustão incompleta, pois em certas rotações do motor, torna-se difícil garantir a queima completa do combustível. Nestes casos, isolando outros fatores, a qualidade de combustão depende do sistema de ignição, pois este é que determina o início da combustão. o sistema de ignição também funciona em sincronia com o sistema de distribuição de válvulas que controlam o caudal da mistura ar combustível no cilindro, (Stone, 1999).

#### 2.1.4 Parâmetros de desempenho do motor

Usualmente os parâmetros de caracterização do desempenho do motor, são: a potência, o binário, o rendimento e o consumo específico de combustível (Martins, 2016). Num MCI, a potência característica fomentada, é aquela que a cambota consegue disponibilizar como

máxima, e esta depende diretamente do binário  $B$  (ver equação 2.3) e da velocidade de rotação  $N$ , da mesma, assim como mostra a equação 2.2.

$$\dot{P}_{util} = 2\pi NB \quad (2.2)$$

$$B = F_c R_{cc} \quad (2.3)$$

Sendo o binário  $B$ , traduzido pelo momento da cambota que contém a força  $F_c$  e pelo raio  $R_{cc}$  medido do centro da cambota ao ponto que gira solidariamente com a cambota. Uma vez que a velocidade  $N$ , expressa as rotações por segundo (rps) da cambota e o binário  $B$  a força disponível ao longo do raio com respeito ao eixo da cambota em (Nm), a potência é uma medida do trabalho que efetua a cambota por unidade de tempo (Martins, 2016). O binário na cambota é determinado através de um freio dinamométrico que trava o motor à medida que este gira com uma dada velocidade. Já o rendimento total,  $\eta_T$ , é dado pelo quociente entre a potência,  $\dot{P}_{util}$ , e o produto do caudal mássico de combustível,  $\dot{m}_f$ , e o poder calórico do combustível,  $Q_{pi}$ , a equação 2.4, mostra o presente enunciado.

$$\eta_T = \frac{\dot{P}_{util}}{\dot{m}_f \times Q_{pi}} \quad (2.4)$$

O consumo específico,  $C_s$ , é determinado pela equação 2.5, sendo este o quociente entre o caudal mássico de combustível e a potência útil.

$$C_s = \frac{\dot{m}_f}{\dot{P}_{util}} \quad (2.5)$$

As equações 2.3 e 2.4, traduzem a eficiência de conversão da energia química do combustível em trabalho que um motor é capaz de efetuar, ou seja, traduzem a capacidade de um motor de converter o calor liberado durante a reação de combustão em trabalho mecânico.

## 2.2 Sistemas do motor IF

O princípio geral de funcionamento dos motores IF, no ponto de vista convencional consiste em introduzir no cilindro a mistura ar/combustível, elevar a pressão da mistura através da diminuição do volume desta, antes de alcançar o volume final acrescentar calor num ponto da mistura por intermédio da vela de ignição e o processo a seguir a este é igual em todos os MCI. Em todos os motores IF, o combustível é sempre misturado com o ar antes do processo de combustão. Nos primeiros motores IF, a mistura ar/combustível era feita por carburador

mecânico. Este, tinha a função de dosear a quantidade de mistura necessitada pelo motor. Neste componente, o controle é feito de forma linear em função de duas variáveis, que são, a velocidade do motor e o vácuo e, estas variáveis são extensivas ao controle do sistema de ignição.

A linearidade no controle da mistura ar/combustível e a posterior ignição em função de duas variáveis, traduziu-se no método de baixo rendimento, pois o bom funcionamento do motor depende do controle de mais variáveis e que nestes sistemas não eram incorporadas. E desta forma, os motores operavam com graus de eficiência muito baixa. Mas, a necessidade de melhorar a eficiência destes motores foi-se tornando cada vez maior, uma vez provada a sua permanência na vida do homem, apenas caberia ao homem melhorar a eficiência destas máquinas aprimorando os vários sistemas que o compõem. A necessidade de melhorar a eficiência dos MCI, ficou ainda mais agravada quando o mundo passou a preocupar-se com a qualidade do ar atmosférico, as emissões de gases com efeito de estufa e a crise energética de 1973, (CONCAWE, 2018; BOSCH, 2014). Estes fatores fizeram com que surgissem novos métodos de misturar ar/combustível e de iniciar a combustão da mistura. Estes métodos, são os diversos sistemas de injeção e ignição eletrônicas que atualmente funcionam em MCI de IF e que aumentaram bastante a eficiência na mistura ar/combustível e a sua combustão.

### 2.2.1 Sistema de alimentação a carburador (Honda GX120)

O sistema de alimentação do motor IF, Honda GX120, pode ser composto por muitos elementos, mas para a presente análise vamos-nos restringir apenas ao carburador. Originalmente o motor Honda GX120 era alimentado por um carburador (ver Figura 2.4b). A função do carburador no sistema de alimentação é formar a mistura ar/combustível que alimenta o cilindro. O processo de mistura consiste na passagem de ar que vai para o cilindro,

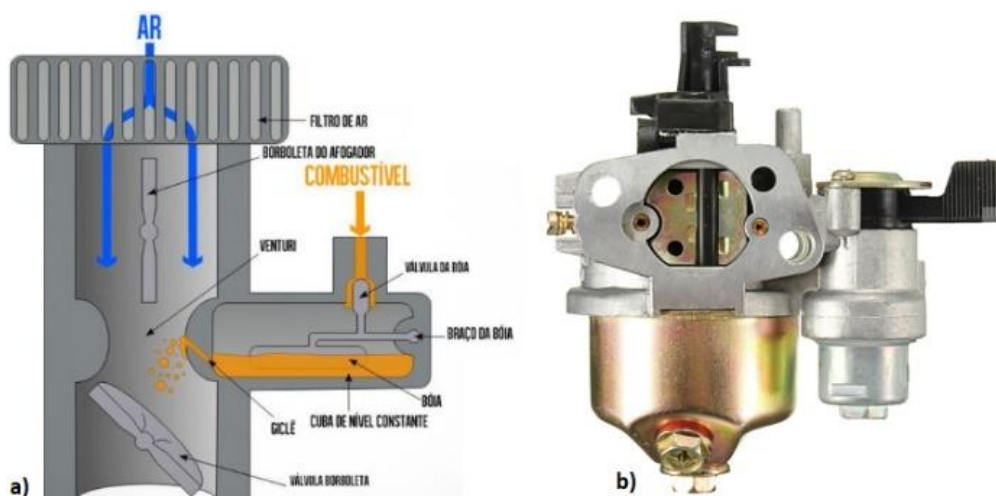


Figura 2.4 - a) Princípio de funcionamento do carburador (Contesini, 2014); b) Carburador GX120 (Honda, 2018).

numa conduta que passa num *venturi*, que aspira e mistura a gasolina que parte de um pequeno reservatório (cuba) presente no corpo do carburador. O movimento do ar é causado pelo pistão que cria depressão ao movimentar-se do PMS para PMI. É neste instante em que o pistão cria um espaço livre no cilindro e, com a válvula de admissão aberta, faz com que os fluidos com acesso ao coletor de admissão se dirijam para o cilindro para ocupar o espaço deixado pelo pistão. Durante o deslocamento, as partículas de ar e gasolina misturam-se fruto da desordem durante o trajeto e volatilidade da gasolina. Esta mistura continua até ao cilindro e finda com a reação de combustão. A Figura 2.4a, mostra o princípio de funcionamento do carburador.

Atualmente, nos motores destinados a equipar automóveis quase já não se usa o carburador, mas ainda é notória nos motores de motociclos e máquinas de pequeno porte, como é o caso de geradores de eletricidade, cortadores de relva, compressores e outras. Quando comparado aos sistemas que o substituem nas suas funções (injeção eletrónica) na atualidade, apresenta algumas vantagens tais como: custo barato, fácil manutenção, menor peso e volume, fiabilidade etc. Quanto às desvantagens, salienta-se a pouca eficiência, isto é: maior consumo de combustível, pouca adaptação às alterações das condições de funcionamento (baixas temperaturas, altas rotações do motor, aceleração), índice de formação de mistura estequiométrica muito baixo, e outras.

### 2.2.2 Injeção eletrónica

Segundo o Moreira (2018), a injeção eletrónica é classificada em diversas formas, dentre estas tem-se:

- De acordo ao tipo de comando: nesta classe a característica é pelo tipo de UCE, se é analógica ou digital, de salientar que atualmente usa-se apenas a digital;
- Segundo o número de injetores: quando há vários cilindros e a injeção é feita por um injetor ou num único ponto é denominada monoponto e, é multiponto quando cada cilindro tem um injetor;
- A forma de abertura dos injetores: *simultâneo* - todos os injetores abrem ao mesmo tempo. *Alternada ou de banco* - os injetores não abrem todos ao mesmo tempo, metade abre e depois outra metade. *Sequencial* - o injetor abre apenas em uma determinada fase do motor;
- Local de injeção: no coletor - injeção indireta. Na camara de combustão - injeção direta;
- A forma de controlo da massa de ar: por TPS x rpm (ângulo x rotação) ou leitura direta da massa do ar, MAP x rpm (densidade x velocidade);
- Como controla a razão ar/combustível: com malha aberta ou fechada;
- Segundo fabricante: Bosch, Siemens, Delphi e outros.

### 2.2.3 Ignição

O sistema de ignição num MCI, tem a função de produzir o calor necessário para a mistura ar/combustível entrar em combustão. De acordo com o Ferreira (2002), os requisitos básicos dos sistemas de ignição, não variam, independentemente do motor em questão ou do formato do componente do sistema, estes devem: produzir uma faísca de alta energia no cilindro, ela deve ser produzida com um certo ângulo de avanço do giro da cambota com respeito ao PMS (TDC) do pistão. Só assim a combustão se realiza de forma adequada. A potência da faísca e o momento em que ela é produzida dita a eficiência da combustão de uma mistura ar/combustível adequada a necessidade do motor. É desta forma que a ignição se torna um dos parâmetros de dependência do motor para funcionar e alcançar a eficiência energética. Segundo Braga (2007) a eficiência do motor também está relacionada com a produção de alta pressão durante a combustão, mas esta, o seu alcance está condicionado ao ponto de ignição. A Figura 2.5, mostra a pressão de trabalho em relação ao ponto de ignição.

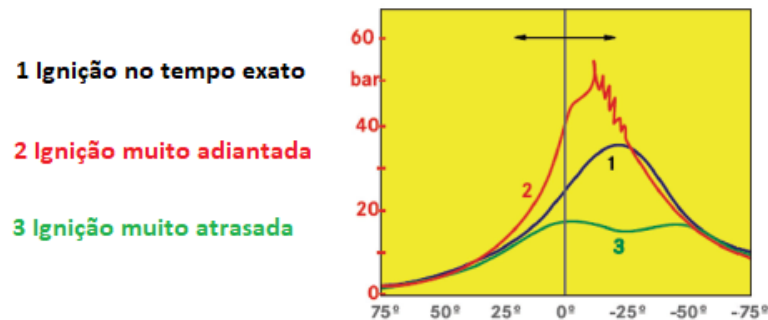


Figura 2.5 - Pressão máxima de combustão em função do ponto de ignição (Tillmann, 2013).

Segundo Oliveira (2015), os sistemas de ignição por faísca que equipam os motores dos automóveis, desde o seu surgimento à atualidade, podem ser classificados em três, que são: por magneto, por bateria (convencional) e a ignição eletrônica.

#### 2.2.3.1 Ignição por magneto com platinado

Foi o primeiro sistema de ignição por faísca usado nos motores dos automóveis. Este sistema consiste num gerador especial de corrente alternada acionado pelo motor e usa íman permanente para gerar a corrente. A corrente induzida pelo magneto, origina uma descarga elétrica entre os elétrodos da vela de ignição que se encontram na câmara de combustão. A sua operação está sincronizada com o motor, de maneira que a descarga elétrica ocorra somente quando o pistão estiver no curso apropriado, correspondente a um número de graus da cambota, antes do pistão atingir o PMS (Ferreira, 2002; Oliveira, 2015). A ignição por magneto difere da ignição por bateria no modo de produzir a eletricidade primária. Atualmente, este sistema é dividido em dois tipos, que são a ignição por magneto de alta e de baixa tensão. A ignição de alta tensão é caracterizada por possuir apenas uma bobina e nesta atua o campo magnético do íman permanente e na mesma é produzida a alta tensão para as

velas (ver Figura 2.6a). Já na ignição de baixa tensão (ver Figura 2.6b), a bobina atuada pelo íman permanente possui um enrolamento que gera uma baixa tensão e esta alimenta um autotransformador que a eleva para valores altos de produção de faísca na vela.

Atualmente, esta ignição encontra uma vasta aplicação em motores que equipam máquinas como. motosserras, pequenos motores estacionários, cortadores de relva, motos, aviões com motor a pistão e outras. Uma das principais valências deste sistema em relação ao convencional é: dispensa bateria, é leve e não apresenta perda de potência elétrica em altas rotações do motor.

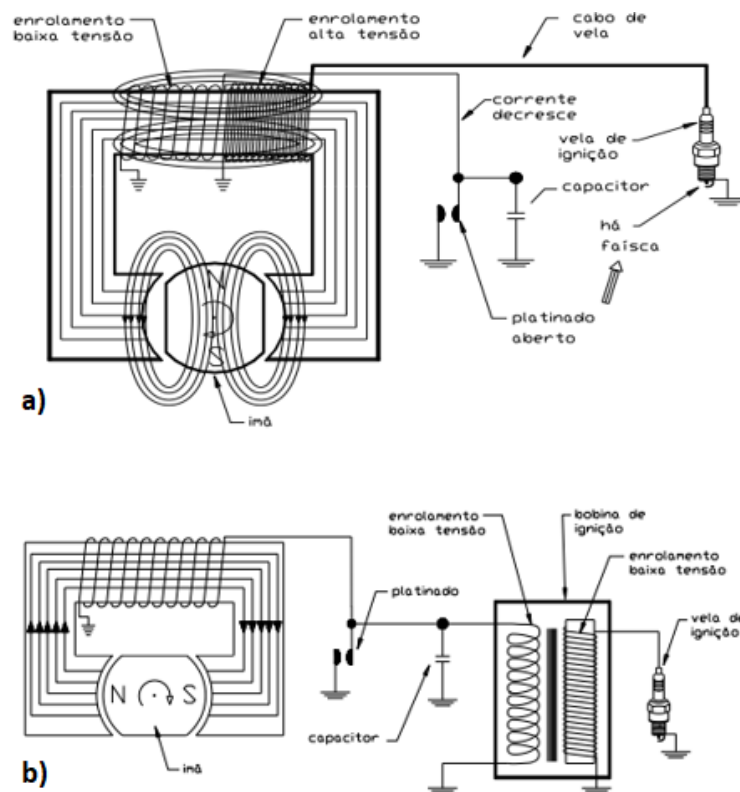


Figura 2.6 - Exemplo de Ignição por magneto (Oliveira, 2015). a) Magneto de alta tensão; b) Magneto de baixa tensão.

A base do funcionamento do sistema de ignição de alta tensão (ver Figura 2.6a), compreende, uma indução de corrente no enrolamento primário em volta do núcleo de ferro com sapatas entre as quais roda o íman que magnetiza o ferro, induzindo uma corrente no enrolamento primário, e esta corrente cria um campo magnético que induz uma tensão no enrolamento secundário quando o seu fluxo é interrompido pela abertura do contato do platinado. Noutro caso (ver Figura 2.6b), a corrente induzida pelo íman, é levado para um transformador que amplifica em milhares a diferença de potencial associada a esta corrente originada pelo íman permanente.

### 2.2.3.2 Ignição por bateria ou convencional

Surgiu depois do sistema de ignição por magneto. A sua principal particularidade com respeito a ignição por magneto, consiste no uso da bateria (ver figura 2.6) para a produção da corrente do sistema, no lugar do gerador de corrente elétrica com íman permanente.

O seu funcionamento consiste num excêntrico acionado pelo motor e, este comanda a abertura e o fecho do platinado, que tem a função de permitir e interromper o fluxo de corrente elétrica da bateria para o enrolamento primário da bobina de ignição. E esta corrente que circula no enrolamento primário, cria o campo magnético que ao colapsar, induz uma alta voltagem no enrolamento secundário, a qual é direcionada por um distribuidor para a vela do cilindro apropriado (Ferreira, 2002). Para o avanço ou atraso da ignição, existem dois mecanismos incorporados no distribuidor. Um deles é acionado pela pressão do ar (depressão) do coletor de admissão e o outro é acionado pela força centrífuga (centrifugação) de massas colocadas estrategicamente e arrastadas pela rotação do veio do distribuidor (Gill, *et al.*, 1959). Com este sistema consegue-se uma diferença de potencial secundária, capaz de produzir a faísca necessária para iniciar a combustão num motor de ciclo Otto convencional que necessita uma tensão mínima aproximada a 8 kV entre os elétrodos da vela (Bosch, 2011).

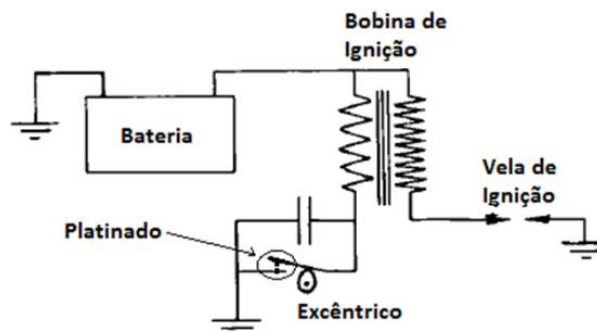


Figura 2.7 - Sistema de ignição convencional (Arcoumanis, 1988).

Este sistema é pouco usado atualmente, devido às limitações apresentadas por este. Dentre essas limitações está o fenómeno conhecido pelo nome de “*rebatimento*”. O rebatimento é caracterizado como um problema ligado às características mecânicas dos platinados, e este é observado para altas rotações do motor, onde o platinado não consegue fechar firmemente, ocasionando uma corrente permanente no enrolamento primário, que tem como consequência tornar o campo magnético quase estático. Outro problema é a corrente que deve circular no enrolamento primário que é aproximadamente de 4 Amperes, e este valor é muito próximo do limite da maioria dos platinados que é de 5 Ampere, daí que este passe a trabalhar no seu limite, acelerando deste modo a sua vida útil (Arcoumanis, 1988; Oliveira, 2015; Braga, 2016). Em termos didáticos, é fundamental a sua compreensão, pois constitui a base de muitos sistemas atuais, e alguns destes são tratados a seguir.



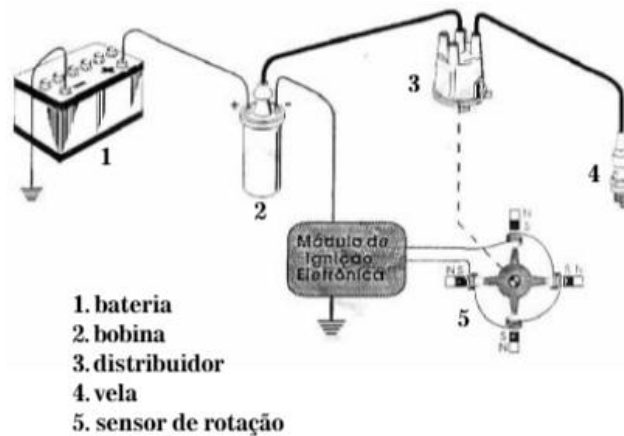


Figura 2.9 - Ignição eletrônica com gerador de pulsos (SENAI, 2001).

O segundo sistema é a *Ignição por descarga capacitiva* (CDI, do inglês *capacitive discharge ignition*). A ignição assistida melhorou o rendimento do motor em relação à convencional, mas o problema de deterioração da potência da faísca com o aumento de velocidade, ainda prevalecia, uma vez que à medida que a velocidade do motor aumentava, diminuía o tempo de carregamento do enrolamento primário com 12 V. No sistema CDI, os 12 V da bateria, são amplificados para um valor de 200 V a 600 V por um inversor transistorizado. E esta tensão amplificada, é usada para carregar um condensador que irá descarregar esta voltagem no enrolamento primário da bobina de ignição. A Figura 2.10, mostra o circuito base deste sistema, no qual a comutação da bobina é feita por um SCR que por sua vez é comandado por um circuito de disparo que determina o tempo da carga da bobina através do platinado. A principal vantagem deste sistema consiste na potência da faísca devido ao valor alto da tensão no enrolamento primário. A maioria das topologias deste sistema usam o sensor de efeito de Hall em substituição do platinado e estas, apresentam maior desempenho que as que usam o platinado (Braga, 2016).

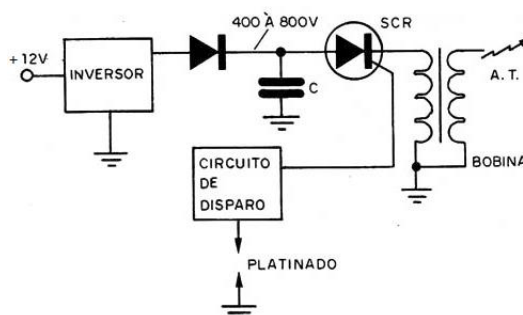


Figura 2.10 - Sistema básico de ignição por descarga capacitiva (Braga, 2016).

Para que houvesse desenvolvimento dos sistemas de ignição, foi necessário encontrar novos princípios de funcionamento destes sistemas. E de acordo com o princípio base de funcionamento, a ignição eletrônica ficou dividida em dois grupos. O primeiro grupo compreende a ignição assistida e a CDI (que passou a ser caracterizada como a ignição analógica) e o segundo grupo é o da ignição mapeada que também é chamado de digital (Martins, 2016).

#### 2.2.3.4 Ignição por magneto transistorizado (Honda GX120)

O motor Honda GX120 possui um sistema de Ignição denominado magneto transistorizado. A sua esquematização é apresentada na Figura 2.11. É um tipo de ignição eletrônica analógica e de avanço fixo.

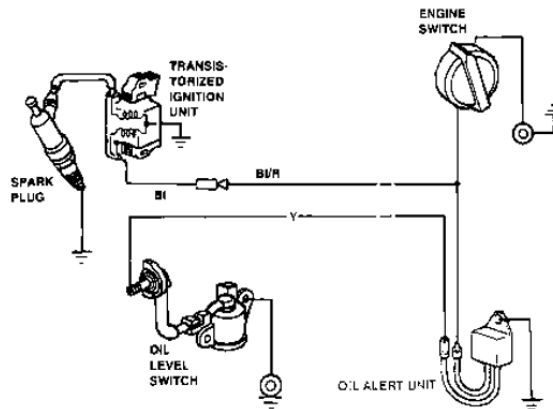


Figura 2.11 - Esquema de ignição Honda GX120 (Honda, 1998).

O modo de funcionamento desta ignição é semelhante ao descrito na subsecção 2.2.3.1 e representado pela Figura 2.6a, com exceção do platinado que na Figura 2.11 é substituído por um transistor.

#### 2.2.3.5 Ignição eletrônica digital ou mapeada

O aparecimento de vários sistemas de ignição depois dos convencionais, deveu-se às lacunas nas primeiras ignições, que se traduziram em limitações e incompatibilidades destas com os motores à medida que foram inovados. Daí que, embora os sistemas eletrônicos analógicos tenham eliminado alguns problemas dos sistemas convencionais, chegaram ao ponto de não corresponder adequadamente às novas exigências e, a ignição digital veio para dar suporte a essas novas exigências.

Para a produção e controlo da fâisca, os sistemas digitais utilizam várias variáveis de funcionamento do motor para controlar a ignição de forma a torná-la o mais eficiente possível, (Milhor, 2002). O controlo da bobina está a cargo de um controlador eletrônico (UCE) e os tempos de ignição já não são achados apenas em função da velocidade e carga do motor, como acontece na ignição convencional e analógica. O ponto de ignição é determinado por um microprocessador associado a uma memória que contém “*mapas*” com os valores do ângulo ideal para cada condição de funcionamento do motor e, estes mapas podem ter até 4000 pontos ideais de combinação velocidade/carga (SENAI, 2001).

Para achar o ponto certo, o valor mapeado é corrigido em função da temperatura do motor, carga exercida no pedal de aceleração, pressão e temperatura do ar atmosférico e outras variáveis (Braga, 2016).

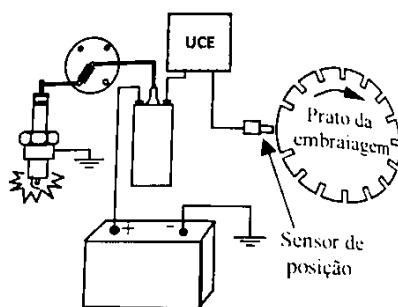


Figura 2.12 - Ignição digital (Martins, 2016).

Este sistema utiliza como base de partida, um sensor de posição para a UCE detetar o ângulo de referência e desta forma produzir o colapso de corrente no enrolamento primário da bobina. Alguns destes sistemas, possuem um sensor de detonação, e com este, a UCE monitora a ocorrência do *knock* caso este se manifeste a UCE reduz o ângulo de avanço de modo a retardar a ignição até que o *knock* desapareça. O *knock* é o fenómeno que limita o avanço de ignição nos motores de IF (Martins, 2016). A Figura 2.12, ilustra uma ignição digital, e neste é possível observar três componentes diferentes do sistema convencional, que é a UCE, o sensor de posição e o prato com ranhuras. O sensor de posição, deteta o movimento da cambota ou do eixo de comando das válvulas. Este sensor, é instalado estrategicamente em zona onde é possível captar pulsos pelo movimento da cambota ou do eixo de comando de válvula, através de uma roda com ranhura e que gira solidariamente com um destes componentes (Martins, 2016).

Nos sistemas em que o tempo de ignição é controlado apenas pela carga do motor (vácuo do carburador) e pela velocidade do motor (controlo centrífugo), o ângulo de avanço de ignição é previsto com uma larga margem de segurança de modo a garantir o não aparecimento do *knock* (Zinner, 1981). Isto reflete-se no rendimento da combustão, uma vez que um ângulo máximo de avanço de ignição para cada ponto de funcionamento propicia uma melhor combustão, o oposto reduz o rendimento. Os sistemas com avanço por vácuo e centrífugos, e a ignição por magneto transistorizado, usam uma margem de segurança do ângulo de avanço de ignição maior. Esta margem elevada, é feita pensando em outros fatores que influenciam o surgimento do funcionamento anormal do motor, mas que pode ser acautelado reduzindo o avanço de ignição.

Nos motores em que a ignição é controlada eletronicamente de forma digital, o mapa contém o ângulo de referência para a produção da faísca e este ângulo é achado em função da velocidade do motor e da pressão no coletor de admissão e é corrigido tendo em conta as outras informações enviadas pelos sensores que monitorizam o estado de funcionamento do motor. A Figura 2.13, exemplifica este controlo (Milhor, 2002). Uma das principais vantagens deste sistema em relação aos outros, consiste no ângulo máximo de avanço de ignição que se obtém para cada ponto de funcionamento do motor e a maneira como é controlado o *Knock* (Zinner, 1981).

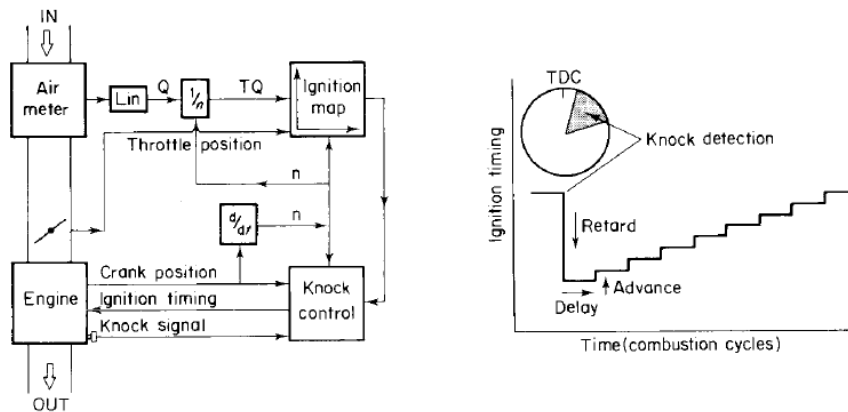


Figura 2.13 - Arquitetura de um dos sistemas de ignição eletrônica VOLVO, com atraso de combustão (retratado por Anderson *et al*, 1984; citado por Arcoumanis, 1988).

Segundo Arcoumanis (1988), o mapa de controlo do sistema de ignição, pode ser programado de modo a atrasar a ignição quando a combinação de parâmetros de controlo do motor (exemplo: velocidade, posição do acelerador, pressão de admissão e temperatura), concorrem para uma combustão com *knock*. No entanto, este sistema é menos fiável, uma vez que não leva em conta a variação da qualidade do combustível. Para solucionar este problema, muitos motores são equipados com um sistema *feedback* baseado na utilização de um sensor que mede as vibrações resultantes da combustão de forma a prevenir o *knock*.

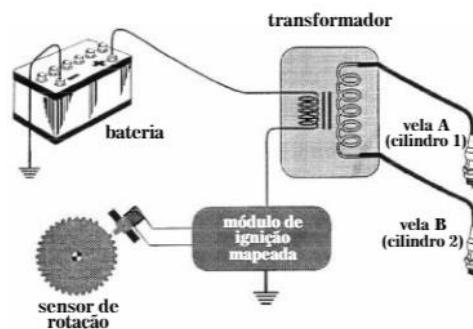


Figura 2.14 - Exemplo de uma ignição estática (SENAI, 2001).

De salientar que em algumas topologias dos sistemas de ignição eletrônica, o distribuidor não faz parte, e estes são designados por ignição estática ou direta. Na Figura 2.14, é ilustrada uma destas, e nela, observa-se que é usado um autotransformador para dois cilindros. Além desta, existe outras topologias em que cada vela possui o seu próprio autotransformador. Algumas das vantagens destes sistemas, consistem na eliminação das perdas no circuito de alta tensão e das avarias do sistema relacionadas com o distribuidor (SENAI, 2001).

### 2.2.3.5.1 Auto-detonção (*knock*)

Segundo Stone (1999), em 1913 Harry Ricardo conseguiu obter um diagrama indicativo de *knock* usando um indicador óptico e, este diagrama, mostrou que o *knock* era precedido de uma combustão normal iniciada por uma faísca e não por uma pré-ignição. O mesmo também

se apercebeu que os combustíveis mais pesados tais como o benzeno, eram mais resistentes a este fenómeno e que permitiam o aumento da taxa de compressão de 4:1 para mais de 5:1 revelando-se no ganho de aproximadamente 20 % de potência. Mas também se apercebeu de que não basta o combustível ser pesado para resistir ao *knock*, existem outras propriedades químicas que tornam os combustíveis resistentes. A partir dos resultados dos estudos de Ricardo sobre o *knock*, torna-se notável a necessidade de o controlar pela redução do ângulo de avanço da ignição quando este se manifesta e não só.

Segundo Gill (1959), todos os combustíveis têm um valor determinado de resistência ao *knock*. E para um dado combustível as variáveis que influenciam o aparecimento deste fenómeno são: a pressão, a temperatura, o tempo e a densidade da carga não queimada. Durante o funcionamento do motor a ocorrência do *knock* é uma função da carga do motor, velocidade, avanço de ignição, razão ar/combustível, temperatura no fim da combustão e tempo (Arcoumanis, 1988).

Arcoumanis (1988), afirma que o *knock* é o defeito de combustão mais relevante e frequente em MCI. E o mesmo é causado pela auto-ignição explosiva dos últimos gases a serem atingidos pela frente de chama iniciada pela vela. E como consequência, o *knock* provoca um desequilíbrio na pressão máxima a ser alcançada na fase e pode conduzir à falha ou mesmo à ruína completa de alguns componentes do motor (Zinner, 1981; Petronilho, 2011). Daí que é, de extrema importância, a eliminação deste fenómeno.

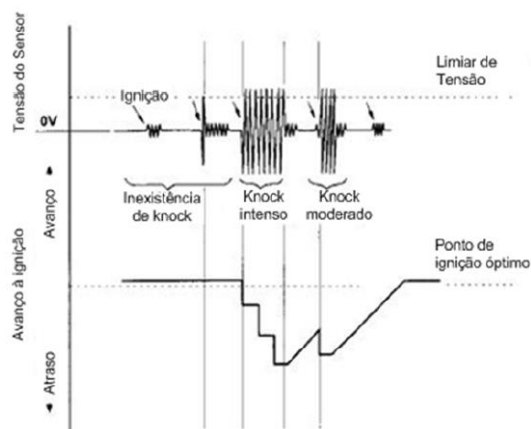


Figura 2.15 - Exemplo do sinal de sensor de *knock* e como é controlado pela ignição (Petronilho, 2011).

Para a detenção do *knock*, são usados em motores sensores que enviam sinais de frequência de vibração produzida pela combustão a um processador que as interpreta numa determinada escala. O sinal de saída do sensor varia em amplitude e frequência de acordo com o estímulo sofrido. Ainda segundo Petronilho (2011), o sensor envia os sinais a partir do momento que o motor entra em funcionamento e para não consumir muitos recursos do processador do comando do motor, existe uma unidade processadora dedicada somente ao tratamento do sinal do sensor de *knock* e esta unidade envia os dados a uma rede CAN para a unidade de comando do motor. Para controlar o fenómeno, a UCE através do sistema de ignição atrasa o tempo de

avanço da ignição. A Figura 2.15, mostra um exemplo do sinal do sensor de *knock* e o comportamento do ângulo de ignição.

## **2.3 Sensores necessários ao funcionamento do MCI**

Atualmente existe uma vasta gama de sensores usados em MCI, há sensores para medir parâmetros do motor, para medir o funcionamento dos atuadores e para medir o funcionamento de outros sensores (Martins, 2016).

Os motores de combustão interna com gestão eletrónica necessitam de vários sensores para o bom funcionamento. A função mais importante destes, é informar a UCE do estado do motor afim desta manter ou colocar o funcionamento do motor no ponto ótimo e de maior rendimento onde emite o mínimo de poluentes (Ferguson & Kirkpatrick, 2001).

A seguir descrevem-se alguns sensores comumente encontrados em motores com gestão eletrónica.

### **2.3.1 Sensor MAP (Manifold Absolute Pressure)**

O sensor MAP, informa a UCE da pressão absoluta do coletor de admissão. A UCE utiliza estes dados para calcular a massa de ar e para determinar a quantidade de combustível, no caso daqueles motores que possuem a injeção e a ignição controlada pela válvula da borboleta ou controlo da pressão de admissão para os motores sobrealimentados. O princípio de funcionamento deste sensor, baseia-se na alteração da tensão de saída de um elemento resistivo ou piezoelétrico incorporado, que pode ser acionado por uma membrana que se movimenta com a alteração da pressão do ar (Albaladejo, 2013).

### **2.3.2 Sensor de temperatura do ar MAT (Manifold Air Temperatura) e IAT (Intake Air Temperature)**

O sensor MAT é usado para medir a temperatura do ar vindo do ambiente e que passa pelo filtro em direção ao coletor de admissão e encontra-se localizado logo a seguir ao filtro de ar e pode estar junto ao MAP. Já o IAT, mede a temperatura do ar que sai do coletor de admissão para o cilindro e, na maior das vezes para certos sistemas, os fabricantes o integram no mesmo corpo com o MAF. O MAT e o IAT possuem o mesmo modo de funcionamento, baseiam-se em resistências elétricas que variam em função da temperatura. Estas podem ser do tipo

NTC (Negative Temperature Coefficient) ou PTC (Positive Temperature Coefficient) (CODIGOSDTC 2018; Patsko, 2008).

### **2.3.3 Sensor MAF (Mass Air Flow)**

Este sensor informa a UCE do caudal mássico de ar que está a ser admitido no motor. A informação é recebida pela unidade em forma de variação de tensão, cujo valor depende da massa de ar que atravessa o sensor. A grande vantagem do uso deste sensor consiste em eliminar problemas causados pela variação da densidade, altitude, pressão e outros (Albaladejo, 2013; Guedes, 2014).

### **2.3.4. Sensores de fase e velocidade do motor**

A posição do pistão em cada instante é fornecida a UCE através do sensor de fase. O sinal deste sensor é fundamental para a UCE achar o ponto de ignição. O sensor de rotação do motor, gera um sinal que a UCE utiliza para saber a velocidade e a posição da cambota (Fernandez, 2006). Para o controle de fase e da velocidade do motor, geralmente são usados dois tipos de sensores, sensor indutivo ou de relutância magnética e sensor de efeito de Hall. O princípio de funcionamento do sensor indutivo baseia-se num eletromagneto que sente a passagem de dentes de uma roda acoplada à cambota ou à árvore de cames. À medida que os dentes passam pelo sensor, este gera uma tensão elétrica e a frequência com que passam, mede a velocidade do motor (Milhor, 2002; Martins, 2016). Já o funcionamento do sensor de efeito de Hall é baseado no nome do fenómeno que o caracteriza, que consiste em fazer passar uma corrente elétrica num material e desviá-la para um dos lados do material através de um campo magnético e, este campo magnético gera no material uma diferença de potencial perpendicular ao campo magnético que a produz e ao sentido da corrente fornecida (Milhor, 2002). No caso dos sensores com o princípio de funcionamento de Hall, são usados materiais semicondutores e nestes a tensão de Hall, é amplificada antes de ser usada.

### **2.3.5 Sensor TPS (Throttle Position Sensor)**

O sensor TPS mede o ângulo de abertura da borboleta da válvula de aceleração e informa a UCE. Geralmente são usados dois tipos de sensor TPS, tipo potenciômetro e interruptor. São alimentados pela UCE com uma tensão de 5 V na sua maioria. Para o tipo potenciômetro, a tensão de saída varia de forma proporcional em relação à resistência. A tensão de saída tem uma relação linear com o ângulo de abertura da borboleta e o valor desta tensão pode ser usado pela UCE para calcular a carga do motor. Para os do tipo interruptor, alguns possuem duas ou três posições e estas servem para indicar se o motor está sem carga ou com carga máxima ou ainda em marcha lenta. Nos casos em que não há ligação mecânica entre o pedal de aceleração e a válvula de aceleração, o sensor TPS é colocado no pedal de aceleração (Milhor, 2002; Guedes, 2014; Martins, 2016).

### **2.3.6 Sensor de temperatura do motor CLT (Coolant Temperature)**

Este sensor tem a função de informar a UCE acerca da temperatura com que o motor está operando em cada instante. O seu uso é indispensável em MCI, pois os diversos materiais que compõe o motor, têm limites de temperatura diferentes e para mantê-los no intervalo de temperatura adequado para um bom desempenho, os MCI possuem o sensor de temperatura para a monitorização desta. A localização deste sensor é bastante variável, mas na maioria dos motores encontrados em automóveis e refrigerados a água, o sensor é localizado na conduta de saída do líquido refrigerante do bloco do motor para o radiador. São sensores resistivos, na sua maioria do tipo NTC (Negative Temperature Coeficient) ou PTC (Positive Temperature Coeficient). Os sensores de temperatura, também são usados em motores para medir a temperatura do ar na admissão e dos gases de escape. Os dados da temperatura do ar na admissão é um dos elementos que servem para o cálculo do avanço da ignição e da injeção (Milhor, 2002).

### **2.3.7 Sensor de Oxigénio (Sonda Lambda, $\lambda$ )**

Sensor utilizado para medir a concentração de oxigénio nos gases de escape. É constituído por um eletrólito cerâmico de zircónio estabilizado por óxido de ítrio e possui duas superfícies, interior e exterior cobertas de platina (Martins, 2016). A superfície interior encontra-se em contacto com o ar ambiente que contém aproximadamente 18 % de oxigénio e, a superfície exterior está em contacto com os gases de escape (Arcoumanis, 1988). A uma temperatura igual ou maior a 300 °C, o eletrólito torna-se condutor e a diferença de concentração de oxigénio entre as duas superfícies causa a imigração de iões de oxigénio de carga negativa de uma superfície para a outra gerando uma diferença de potencial entre as superfícies. Esta diferença de potencial caracteriza a concentração de oxigénio nos gases de escape. A camada de platina em contacto com os gases de escape, é ligada ao pólo negativo da fonte da corrente e na camada em contacto com o ar ambiente, é retirado o sinal da sonda lambda. E este sinal pode ser usado para regular o fluxo de combustível (Balland, *et al.*, 2013). Como o eletrólito cerâmico de zircónio se converte em condutor a partir de temperaturas iguais ou superiores a 300 °C, muitas sonda lambda para atingirem a temperatura de funcionamento, são aquecidas por uma resistência alimentada com 12 V quando o motor está frio, daí que, muitos destes sensores possuam 3 ou 4 terminais de ligação.

### **2.3.8 Sensor de Auto-Detonação (*Knock*)**

O *Knock* termo inglês, traduz um fenómeno destrutivo comum em motores de ignição comandada e que os limita. É caracterizado pela ocorrência de vibrações do motor causadas pela combustão indesejável. Para detetar este fenómeno, os motores geridos eletronicamente possuem sensores piezoelétrico especiais colocado na parede exterior ao cilindro e que mede

as vibrações aproximadamente de 5 – 20 kHz, induzidas pela combustão anormal (Arcoumanis, 1988). Segundo Martins (2016), quando a UCE deteta a presença deste fenómeno, reduz o avanço da ignição no cilindro em que está a ocorrer ou a todos cilindros no caso de haver apenas um sensor para todos os cilindros.

## 2.4 Centralina (UCE)

A UCE de um MCI, é o dispositivo que controla o funcionamento deste equipamento. Este dispositivo, encontra-se conectado a dois grupos externos integrantes do sistema, que são os sensores e os atuadores. Atualmente existe um número considerável de entidades que fabricam UCEs de injeção e ignição de combustível. São exemplo destas entidades, a Bosch, a Siemens, a Bowling & Grippo (fabricante da MegaSquirt®), a Motec, a Delphi, a Denso, a Visteon e outras. E todos os sistemas de injeção e ignição eletrónicas são constituídos por: sensores (também designados por transdutores de entrada), atuadores (transdutores de saída), UCE e linhas de condutores elétricos que estabelecem a comunicação entre dispositivos da rede, sendo a UCE o componente encarregue na gestão do sistema. Este componente pode ser analógico ou digital, mas atualmente quase todos os sistemas utilizam o digital, sobre o qual se descreverá em seguida o seu funcionamento.

### 2.4.1 Funcionamento da UCE

Apesar das particularidades entre UCEs de fabricantes diferentes, há alguns princípios lógicos de funcionamento iguais a todos, tais como o princípio básico de funcionamento do sistema em que trabalham, isto é: sensores captam valores de parâmetros do processo, UCE - recebe sinais dos sensores e processa-os, UCE - controla os atuadores. Dito de outra forma; quando se ativa o sistema, a UCE recebe sinais vindos dos sensores de funcionamento do motor, analisa estes sinais através de operações matemáticas e lógicas e o resultado desta operação é convertido noutra sinal que é enviado para o atuador responsável pelo processo que se deseja modificar, ou ainda, um sinal é nulo quando não satisfaz as condições necessárias para ativar um atuador.

Internamente, a UCE apresenta uma estrutura funcional composta por uma unidade central de processamento (CPU), memórias e circuitos periféricos (Figueiredo, 2018; WEG AUTOMAÇÃO, 2018). Os circuitos periféricos a CPU têm a função de traduzir as mensagens que entram na UCE para a linguagem da CPU e as que dela saem para os atuadores. Nesta classe estão os conversores A/D (analógicos/digitais) e D/A (digitais/analógicos) encarregues da passagem de

sinais elétricos (tensão ou corrente) analógicos vindo dos sensores para digitais e de digitais para analógicos a enviar para alguns atuadores.

Após o sinal ser convertido de analógico para digital, vai para a memória de entrada e esta por sua vez através dos valores nela gravados de forma fixa, escolhe dentre estes o equivalente ao sinal recebido do conversor. Este valor que sai da memória de entrada para a CPU é um número binário, assim como é exemplificado na Figura 4.16, o mesmo acontece após o processamento, sai valor binário da CPU para a memória de saída e desta sai igualmente um sinal digital.

Devido ao elevado grau de exigência a que estão sujeitos os componentes internos da UCE, torna-se indispensável a existência de um sistema de alimentação de energia estável, para tal, a UCE usa o seu próprio regulador e estabilizador de tensão que é um circuito integrado, mas periférico à CPU. Ainda nesta classe estão também os condicionadores que dentre as várias funções que desempenham está a filtragem dos sinais que entram e que saem na UCE.

No concernente especificamente à CPU, esta é considerada como o componente que possui uma estrutura de trabalho que dita a capacidade operativa da UCE. Segundo Figueiredo, (2018) e WEG AUTOMAÇÃO (2018), a CPU é o centro de gestão do sistema de injeção e ignição eletrónica; é o componente que decide em cada instante o estado do sistema. Através de sinais enviados pelos sensores determina quanto tempo um atuador deve trabalhar. Mas para tal, além de outros componentes, a CPU serve-se de duas memórias, a RAM (Random Access Memory) e a FLASH - EPROM (Erasable and Programmable Read Only Memory). Assim como dito anteriormente que os sensores enviam informações para os componentes de entrada e estes para a CPU, na verdade esta informação não se acomoda na CPU, ela é armazenada na memória RAM onde permanece pelo tempo necessário. Durante a sua estadia na RAM, a CPU examina esta informação de acordo com o modelo de instruções (programa) existente na memória FLASH, e nesta análise, está incluso o estabelecimento de relações entre o dado recebido e os existentes na memória FLASH. Caso não encontre nenhuma relação, este dado é armazenado na memória de manutenção (M\_M) com a referência do sensor que o enviou e a CPU considera este dado como falha do sensor emissor. Isto acontece porque cada sensor possui um valor mínimo e máximo de sinal a enviar para a UCE, e para cada valor deste intervalo, existe um outro correspondente gravado na FLASH. Todo o sinal com valor fora deste intervalo não encontra correspondência e a CPU regista-a na M\_M. Para se ter acesso à informação gravada nesta memória, precisa-se de um computador com um programa específico ou de um *scanner*, ou ainda do código de luzes que alguns sistemas possuem.

A FLASH, é o tipo de memória onde é carregada toda informação do motor. É nela que reside o programa que contém as características e os parâmetros de funcionamento do motor. A exemplo tem-se as tabelas (mapas) de rendimento volumétrico (VE) e avanço de ignição. Nestes mapas são colocados os valores adequados a cada estado de funcionamento do motor. Uma vez que o rendimento volumétrico é obtido através da velocidade de rotação do motor e da densidade do

ar, a CPU ao receber os dados dos sensores de pressão, temperatura do ar no coletor de admissão e velocidade de rotação, procura na memória fixa o VE correspondente, corrige o valor em função dos dados dos sensores de temperatura e altitude (pressão) em que se encontra o motor, e através dos sensores de velocidade do motor e TPS, a CPU fornece o número binário que corresponde à ativação do solenóide do injetor num determinado intervalo de tempo regulando assim, a quantidade de combustível por ciclo. A Figura 2.16, ilustra um exemplo esquemático da estrutura interna da UCE, e neste, é possível ver o número binário liberado pela CPU. Num caso da ignição, a CPU efetua o mesmo procedimento, mas tendo como referência o sensor de velocidade do motor. A partir deste determina-se o tempo e o ângulo de ignição, que por sua vez é corrigido em função da temperatura e carga do motor.

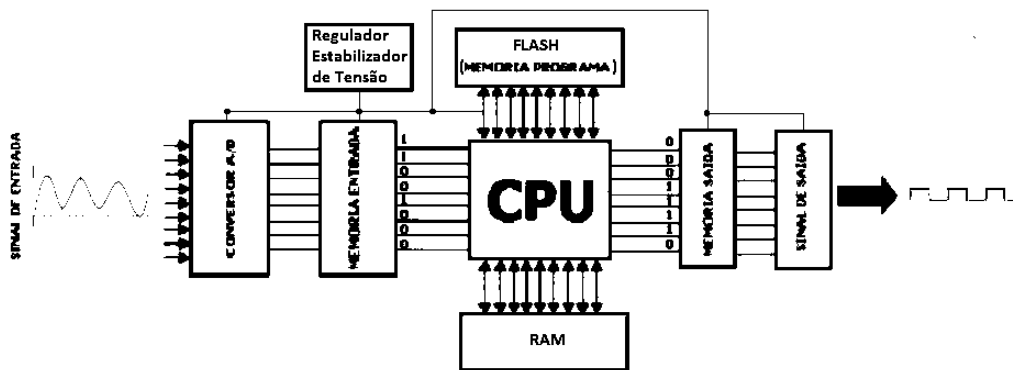


Figura 2.16 - Exemplo esquemático da estrutura de um processador (Moreira, 2018).

#### 2.4.1.1 Mapas

Quando um motor é testado numa bancada de testes, a potência de saída, as emissões, a depressão na admissão, ângulo ideal de ignição e mistura ar/combustível são todos gravados numa ROM (Read Only Memory ou FLASH) da UCE, para cada valor de pressão na admissão e velocidade motor (Stone, 1999).

Os mapas são tabelas onde vêm discriminados os valores ideais dos parâmetros de funcionamento do motor adequados a cada condição de operação. E estas, encontram-se gravadas numa memória fixa da UCE, e que o CPU consulta em cada instante do funcionamento do motor para achar os valores de reação adequados aos valores vindos das variáveis que resultam dos sensores que informam as condições do estado de funcionamento do motor.

Os mapas são definidos por colunas e linhas, de tal modo que num sistema de coordenadas cartesianas, os eixos de origem, representem os valores dos parâmetros de referência principais. No software TunerStudio, na primeira coluna e na última linha, estão colocados os valores dos parâmetros de referência principais e que, no presente trabalho correspondem à pressão no coletor de admissão MAP em kPa e à velocidade do motor em rpm. O valor do parâmetro a obter em função dos dois anteriormente citados, é localizado na célula de interseção entre o valor MAP de admissão e a velocidade do motor.

# Capítulo 3

## Componente experimental

É de lembrar que o motor usado nesta dissertação, já foi objeto de estudo nos trabalhos de Teixeira (2014), Fernandes (2015) e D’Amil (2016). Estes chegaram a fazer algumas alterações no motor para pô-lo a funcionar com os sistemas de injeção e ignição eletrónica digital. Mas estes, tiveram apenas êxito no sistema de injeção, assim sendo, nós, e também devido ao tempo muito reduzido que temos para finalizar esta dissertação, vamos trabalhar com mais afinco na implementação da ignição digital e, quanto a injeção digital, iremos implementá-la, mas com o mapa principal de VE (rendimento volumétrico), obtido por D’Amil (2016). É por esta razão que não apresentamos os testes relativos aos ensaios necessários até a otimização dos parâmetros de injeção eletrónica digital.

### 3.1 Motor HONDA GX120

Com a inovação dos sistemas de alimentação e ignição, o modo de formar a mistura e as formas de inflamá-la, passou a ser diversificada, daí que, hoje em dia, no ponto de vista da formação da mistura e da sua combustão, os motores IF passaram a comportar um maior número de sistemas, mas continuam a obedecer ao mesmo princípio geral de funcionamento. Assim, atualmente os motores IF no ponto de vista funcional, também podem ser classificados de acordo com os sistemas de alimentação (ar e combustível no cilindro) e ignição. A Figura 3.1,

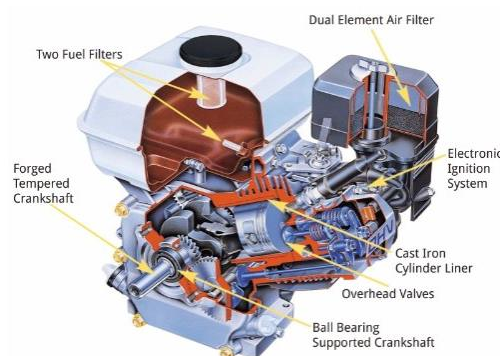


Figura 3.1 - Motor GX120 (Honda, 2012).

ilustra o motor Honda GX120 que é usado nesta dissertação. Tem um ciclo de trabalho Otto de quatro tempos (ver figura 2.3) e a Tabela 3.1, descreve as suas características técnicas. Originalmente, o funcionamento do GX120 utilizava um sistema de alimentação em que a mistura ar/combustível era feita através de um carburador e uma ignição por magneto transistorizado de ângulo de avanço fixo.

Nesta secção, vamos falar do funcionamento do sistema de alimentação e ignição original deste motor.

Tabela 3.1: Características técnicas de origem do motor Honda GX120 (Honda, 2012).

Tipo de motor	Arrefecido a ar, 4 tempos, OHV, monocilíndrico
Diâmetro x curso	60 x 42 mm
Cilindrada	118 cm <sup>3</sup>
Potência útil/rotação	3,5 HP (2.6kW) @ 3600 rpm
Binário útil	5,4 lb.ft (7.7N.m) @ 2500 rpm
Rotação do eixo de transmissão	Sentido anti-horário (do lado do eixo de transmissão)
Taxa de compressão	8,5:1 (alterada para 10,0:1)
Carburador	Borboleta
Sistema de ignição	Magneto transistorizado
Sistema de arranque	Manual (retráctil)
Sistema de lubrificação	Por salpico
Regulador de velocidade	Mecânico
Capacidade de óleo do cárter	0,56 L
Combustível recomendado	Gasolina sem chumbo 86 ou superior
Peso seco	13 kg
Dimensões (CxLxA)	297x346x329 [mm]

### 3.2 Cálculo de binário e potência de travagem

A Figura 3.2, ilustra o mecanismo usado para se poder achar de forma indireta o binário útil no veio da cambota. Trata-se de um sistema de travagem a disco. Neste mecanismo, o

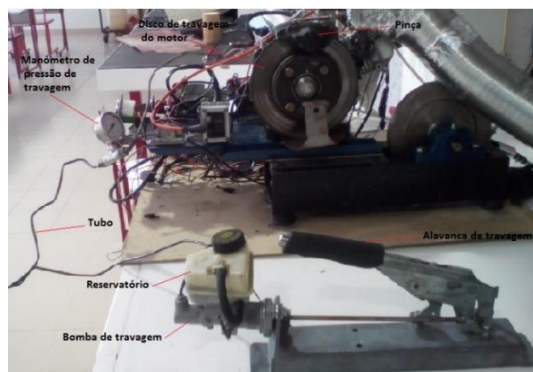


Figura 3.2 - Mecanismo usado para determinar a pressão de travagem do motor.

binário máximo presente na cambota é igual ao binário produzido pela força de atrito entre as pastilhas de travagem e o disco, sendo esta a força que imobiliza o motor. Assim, a expressão matemática que traduz a equivalência dos binários é representada pela equação 3.2, sendo a equação geral de binário usado em sistemas de travões com recurso a pastilhas de atrito representada pela equação 3.1.

$$B_T = fFR_e \quad (3.1)$$

A equação 3.1, representa o binário de travagem,  $B_T$ , produzido pela força  $F$  que pressiona a pastilha no disco em movimento cujo coeficiente de atrito entre os dois materiais é caracterizado por  $f$ , e raio equivalente  $R_e$ , medido entre o centro da pastilha e o centro do disco. Igualando as expressões do binário, obtemos,

$$B_T = B \quad (3.2)$$

A partir desta igualdade podemos obter o valor máximo da carga que o motor pode suportar. No caso presente, de acordo com o mecanismo e conforme a equação 3.1, a força  $F$  é gerada pelo fluido de travagem através da sua pressão  $p$ , sobre as pastilhas sendo a pressão registada pelo manómetro. Desta forma, pela equação 3.3a, obtém-se a força gerada pelo fluido de travagem,

$$p = \frac{F}{A} \quad (3.3)$$

$$F = pA \quad (3.3a)$$

As equações 3.1 e 3.3, referem-se a casos gerais. De forma a facilitar a nossa análise, apresenta-se um esquema do mecanismo de travagem (ver Figura 3.3), que mostra como é interação entre o disco e as pastilhas de travagem.

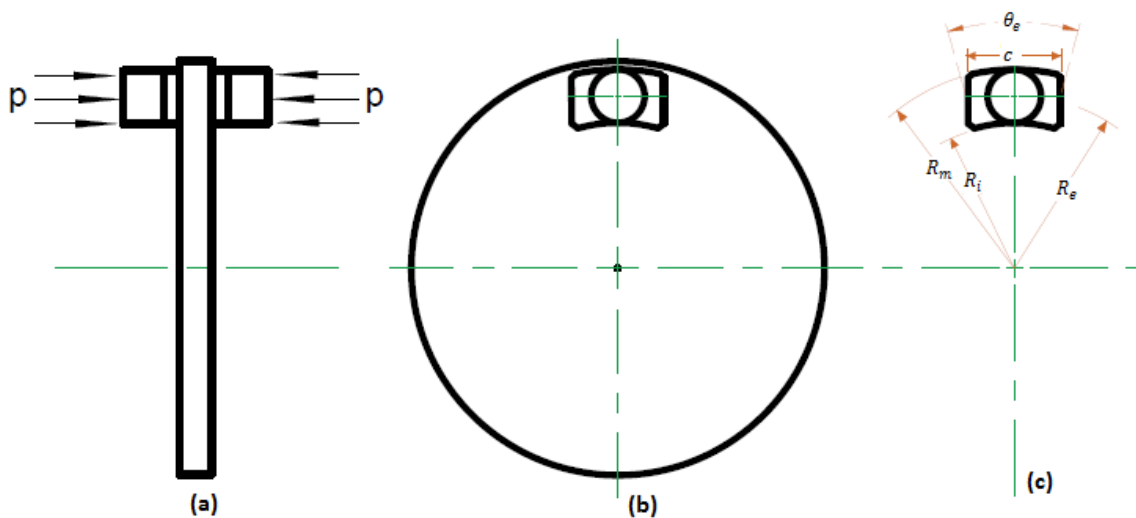


Figura 3.3 - Esquema do mecanismo de travagem disco pastilha.

Tabela 3.2: Dimensões da pastilha de travagem.

$R_m$ [m]	$R_i$ [m]	$R_e$ [m]	$c$ [m]
0,3204	0,2344	0,2774	0,086

Na Figura 3.3a, observa-se a pressão exercida pelo fluido sobre o copo de formato cilíndrico. A pressão é exercida sobre a área  $A_1$  do cilindro e o cilindro exerce a mesma pressão através da área  $A'_1$  sobre a pastilha de área  $A_2$ , de formato aproximadamente retangular. Assim, a força  $F_1$  em cada ponto da superfície  $A_1$  é dada pela equação 3.3b, sendo a mesma exercida na superfície  $A'_1 = A_1$ .

$$F_1 = p A_1 \quad (3.3b)$$

O cilindro move-se na horizontal e considera-se que o atrito na superfície de apoio é nulo devido à forte presença de lubrificante, o que garante a transmissão da pressão sem perdas. Devido à diferença nos valores das áreas, a força por unidade de área  $A_1$  é diferente da força por unidade de área  $A_2$ . Deste modo, a força exercida pelo fluido sobre a superfície  $A_1$ , do cilindro é dada pela equação 3.4.

$$F_1 = \pi p R_c^2 \quad (3.4)$$

Em que  $R_c$  é o raio do cilindro de tração.

A força exercida pelo cilindro na pastilha,  $F_2$ , é o produto da pressão de contacto entre a pastilha e o disco de travagem.

Existem casos em que a pressão de contacto na superfície da pastilha varia de ponto para ponto. Mas no caso presente, analisou-se a pastilha e verificou-se que ao longo da sua superfície apresenta um desgaste uniforme, e isto significa que a pressão mínima  $p_{mn}$ , é igual a pressão máxima  $p_{mx}$ , obtendo-se a seguinte expressão:

$$F_2 = p_{mx} A \quad (3.5)$$

Uma vez que a travagem é originada pela ação da força  $F_1$  sobre a área da superfície  $A_2$  da pastilha, obtendo-se a equação

$$p_{mx} = \frac{F_1}{A_2} \quad (3.6)$$

Considerando que área da superfície de contacto entre a pastilha e o cilindro,  $A_2$  e, a área da superfície de atrito da pastilha com o disco,  $A_p$  são iguais para o presente caso, obtemos a relação,

$$A_2 = A_1 = A'_1 \neq A_p \quad (3.7)$$

A equação 3.7, traduz a igualdade de pressões, isto é:

$$p_{mx} = p \quad (3.8)$$

E de acordo com a geometria da pastilha, a força  $F_2$  é dada por

$$F_2 = pA_p \quad (3.9)$$

$$F_2 = p[\theta_e R_i (R_m - R_i)] \quad (3.10)$$

Atendendo à geometria e às dimensões mínimas da pastilha, é razoável considerá-la retangular e, assim a equação 3.9, transforma-se em:

$$F_2 = p [c(R_m - R_i)] \quad (3.11)$$

$$F_2 = F \quad (3.12)$$

Com a equação 3.12 chegamos a força de travagem num calço. Das equações (3.1; 3.10 e 3.11) chegamos ao binário de travagem que é caracterizado pela equação 3.13.

$$B_T = f[2pc(R_m - R_i)]R_e \quad (3.13)$$

E assim, uma vez que a equação 3.2, diz que o binário de travagem é igual ao binário que o motor produz na saída da cambota e, de acordo com a equação 3.1, tem-se a potência produzida pelo motor na unidade de tempo e que está disponível na saída da cambota, na forma

$$\dot{P}_{util} = 2\pi N \{f R_e [2pc(R_m - R_i)]\} \quad (3.14)$$

A equação 3.14, dá-nos a potência que se opõe à potência útil até à imobilização do motor. E com esta equação, traça-se as curvas aproximadas aquelas que se deveria obter numa bancada dinamométrica.

### 3.3 Cálculo de consumo de combustível

A determinação do combustível que o motor gasta por ciclo de trabalho é feita a partir da equação 3.15 e a posterior o resultado desta é usado para achar o consumo específico que representa o índice de combustível que se gaste por cada unidade de potência produzida.

$$\text{consumo} = \text{caudal mássico} \times \text{duty cycle} \times \frac{PW - DT}{PW} \quad (3.15)$$

Com esta equação é possível analisar-se a quantidade de combustível que está a ser consumido nos ciclos de trabalho, apoiando-se ao “*data logging*”, que é uma ferramenta da *TunerStudio MS*. Esta ferramenta faz o registo dos valores de parâmetros calculados pela CPU para cada evento de funcionamento do motor incluindo os valores de pulso, PW, do injetor, a Figura 3.4, ilustra a *interface* desta ferramenta contendo os valores máximos e mínimos do pulso, PW, rpm, avanço de ignição e MAP, num dos eventos dos ensaios realizados e que se alcançou a pressão de travagem máxima para a velocidade correspondente.

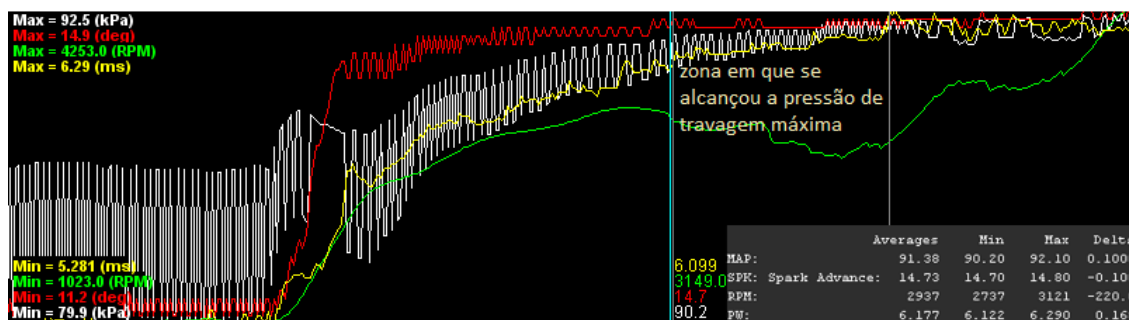


Figura 3.4 - Visualização de PW e outros parâmetros no *data logging*.

Na Figura 3.4, observa-se que o pulso máximo do injetor foi de 6,290 ms, este valor foi alcançado após 4000 rpm. O *data logging* executou-se numa altura que o motor funcionava com a borboleta completamente aberta, o que é ilustrado pela curva da pressão lida pelo MAP na presente ilustração. Isto aconteceu, no momento em que se procurava a pressão máxima de travagem, tendo essa sido alcançada no intervalo entre 2700 a 2900 rpm e o seu valor foi de aproximadamente 2,5 bares, e de acordo com o registo o PW esteve entre 6,000 a 6,300 ms, e *duty cycle* de 12,7 - 16,5 %, isto é, nas rotações equivalentes. É um valor bastante plausível tendo em conta a força produzida.

### 3.4. Componentes da injeção e ignição implementada

Os principais componentes do sistema de injeção eletrónica digital implementada neste trabalho são ilustrados na Figura 3.5.

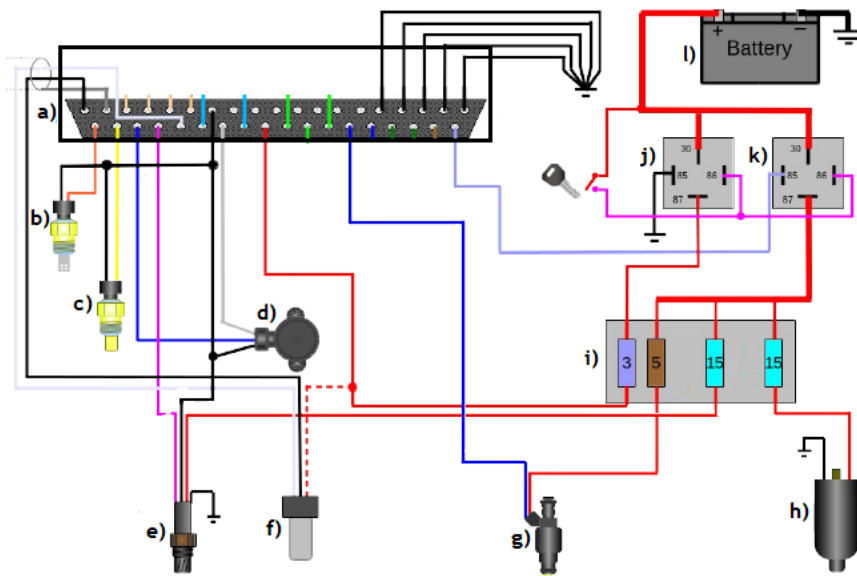


Figura 3.5 - Esquema de injeção digital implementada ao motor Honda GX120 (MegaSquirt, 2015). a) representa a UCE MS-II; b) sensor IAT; c) sensor CLT; d) sensor TPS; e) sensor sonda lambda (do tipo narrowband); f) sensor de velocidade do motor (sensor All); g) injetor; h) bomba de combustível; i) caixa de fusíveis; j) relé; k) relé; l) bateria.

Para a ignição, o esquema do sistema implementado é apresentado na Figura 3.6. De lembrar

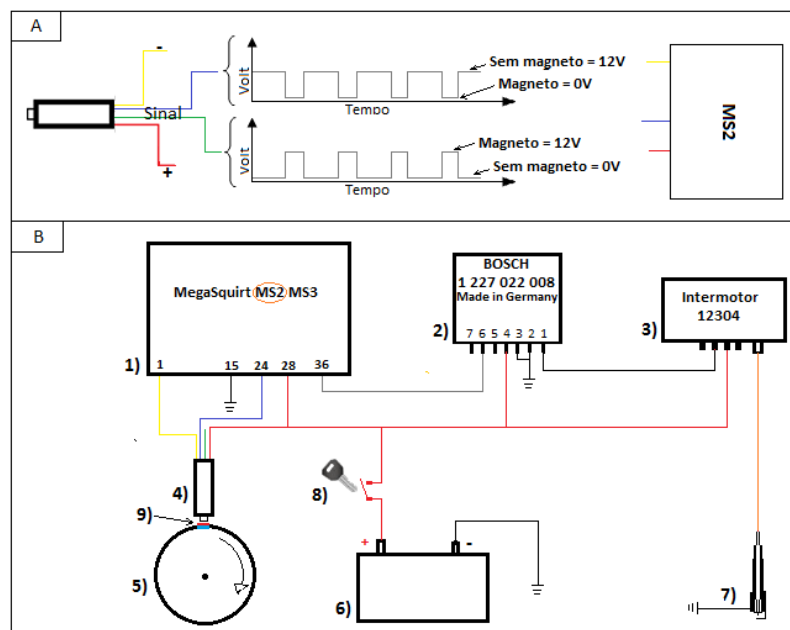


Figura 3.6 - A) Diagramas de saída do sensor Hall. B): Esboço do sistema de ignição adaptado ao motor Honda GX120. 1) UCE; 2) Módulo de ignição; 3) Bobina de Ignição; 4) Sensor All; 5) Volante de inércia; 6) Bateria; 7) Vela de ignição; 8) Interruptor de ignição; 9) Ímã permanente.

que os sistemas de injeção e o de ignição partilham muitos componentes, sobretudo os sensores. De forma resumida deveríamos representar os dois sistemas num mesmo esquema, mas para melhor clarear as alterações que efetuamos em comparação com o esquema do kit padrão, optamos em apresentar de forma separada os referidos sistemas. Na Figura 3.6, aparece só o sensor de velocidade do motor, mas não é o único deste sistema, este é apenas o sensor de referência do sistema (é o indicador do ângulo de giro da cambota e velocidade do

motor), além deste sensor são também usados pelo sistema os sensores: MAP (nos dois esquemas não está visível porque no presente trabalho usamos o sensor BARO que está integrado na placa V3.0 da UCE MS-II para fazer a leitura que faria o sensor MAP), CLT e TPS.

### 3.4.1 UCE MS-II

Na presente dissertação utiliza-se a UCE *MegaSquirt-II* (MS-II<sup>™</sup> ou MS2). Falar do funcionamento desta UCE, é relatar como neste dispositivo é feito o controlo de injeção de combustível e da ignição. Mas antes destes detalhes, apresentam-se alguns aspetos que se considera importante relatar para melhor compreender o dispositivo sobre o qual incide o presente trabalho. A Figura 3.7, espelha a estrutura externa do referido dispositivo e as Figuras 3.8 e 3.9, ilustram os principais componentes internos, isto é, a placa principal e o processador. É um controlador reprogramável cuja essência recai na aprendizagem do sistema de injeção/ignição eletrónica digital.



Figura 3.7 - UCE MS-II<sup>™</sup>.

A placa principal da MS-II<sup>™</sup> (ver Figura 3.8), é do tipo *circuito impresso* e referenciado dentro da família MegaSquirt® por V3.0, nela estão inseridos os componentes e circuitos responsáveis pela comunicação entre transdutores/processador e interação do sistema com outros. É ela que contém as portas de entrada e saída, por onde flui a informação inerente aos sistemas geridos

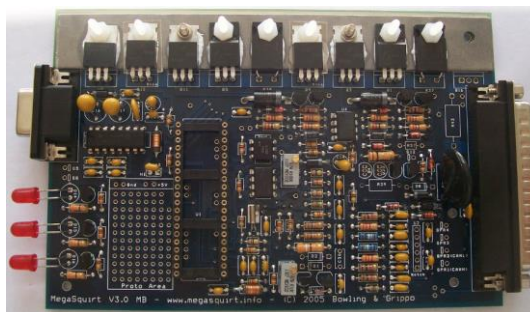


Figura 3.8 - Placa principal V3.0 usado no controlador MS-II (MegaSquirt, 2015)

pela UCE e que com ela interagem. A V3.0, possui uma porta externa de entrada/saída (conector DB9 a esquerda, ver Figura 3.8) que permite a conexão UCE - laptop ou de outros dispositivos que podem acessar informações da UCE de modo a permitir a monitoração e modificação dos parâmetros de funcionamento do motor gravados na memória. Já a porta com o conector DB37 (ver Figura 3.7) é da gestão do sistema. O controlador MS-II usa o processador

MC9S12C64 ilustrado na Figura 3.9, cujas as especificações técnicas se encontram descritas na Tabela 3.3.

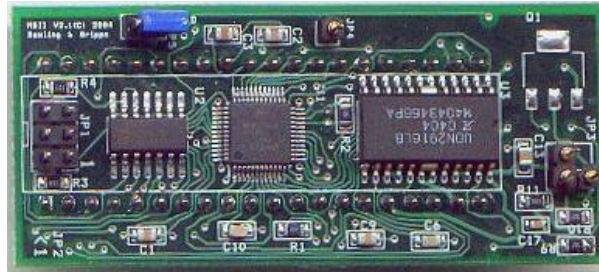


Figura 3.9 - Processador MC9S12C64 (MegaSquirt, 2015).

Tabela 3.3: Dados técnicos do processador MS-II (MegaSquirt, 2015).

Processador MC9S12C64			
CPU	FLASH	RAM	Velocidade
16 bit	64 Kbytes	2048 bytes	24 MHz

As Figuras 3.7, 3.8 e 3.9, ora apresentadas, formam a estrutura macroscópica do controlador MS-II. Agora a questão é saber como esta estrutura controla o injetor e a bobina de ignição.

Segundo a MegaSquirt-II (2018), a MS-II opera em vários estágios para quantificar a dose certa de combustível a injetar no motor e, neste processo, o elemento mais tangível é o hardware, que possui como componentes e as suas principais funções a citar:

- A CPU - responsável pela execução de todos os cálculos e outras atividades;
- Secção de comunicação série - permite ao software de ajuste ler e alterar parâmetros na MS-II;
- Secção de potência - nesta, encontra-se o regulador de tensão responsável por fornecer 5 V de tensão estável aos sensores de temperatura do motor e do ar na admissão, ao TPS, MAP, processador e outros componentes que precisam de estabilidade na alimentação;
- Circuitos de condicionamento de sinal - de entre as várias funções destes componentes está a filtragem e amplificação de sinais que entram e que saem na UCE.

#### 3.4.1.1 Controlo de combustível

A dose de combustível injetada no motor pela MS-II depende de vários fatores, e estes podem ser resumidos em três.

- a) Lei dos gases perfeitos;
- b) Valores medidos;
- c) Parâmetros de ajuste.

Aqui, são designados de valores medidos, os sinais provenientes dos sensores de pressão de admissão, temperatura do ar no coletor de admissão, temperatura do motor, velocidade do motor, sonda lambda, sinal do TPS e outros. Ao passo que, são chamados de parâmetros de ajuste os valores de eficiência volumétrica (VE), combustível requerido (REQ\_FUEL), tempo de abertura do injetor, ângulo de ignição, razão ar/combustível (AFR) e outros. São estes parâmetros que o utilizador altera para ajustar o funcionamento do motor através da MS-II usando o software TunerStudio MS.

A lei dos gases ideais constitui a base do programa embutido na MS-II. Sabe-se que para se ter uma combustão completa (estequiométrica), isto é, combustão da mistura de ar/gasolina cujo produto seja o descrito na equação 2.1, é necessário juntar a 14,7:1 partes de massa de ar uma de gasolina. E na MS-II as partes de ar são determinadas com base na lei dos gases ideais (perfeitos), cuja expressão matemática se apresenta na equação 3.16. Esta lei, relaciona a pressão,  $p_g$ , de um gás com a sua temperatura,  $T$ , o número de moles,  $n$ , que a compõe e o volume total,  $V_g$ , ocupado por estas moles.

$$p_g V_g = n R T \quad (3.16)$$

Da equação 3.16, observa-se também uma proporcionalidade entre o produto do membro direito e do esquerdo, onde  $R$  é designado constante dos gases perfeitos para o gás em questão, é a constante desta proporcionalidade. É de salientar que nesta equação, a pressão  $p_g$  é medida na escala absoluta assim como a temperatura  $T$ , cuja a unidade é o kelvin (K). Nesta (ver equação 3.16), os valores de  $p_g$  e  $T$ , referem-se à pressão e temperatura do ar que chega ao cilindro durante o processo de admissão. E com os dados fornecidos pelos sensores de pressão e temperatura colocados no coletor de admissão, a UCE efetua cálculos para chegar até aos valores destes.

#### 3.4.1.1.1 Determinação da massa de ar

Pela lei dos gases perfeitos, expressa na equação 3.16, resulta:

$$n = \frac{p_g V_g}{R T} \quad (3.16a)$$

E como

$$M_a = n M M \quad (3.17)$$

Onde  $M_a$  é massa do gás e  $MM$  a sua massa molar e, escrita doutra forma fica,

$$n = \frac{M_a}{MM} \quad (3.17a)$$

E relacionando a equação 3.16a com a 3.17a, obtém-se a equação 3.18, que é

$$M_a = p_g V_g \frac{MM}{R T} \quad (3.18)$$

Esta equação 3.18, dá a massa  $M_a$  em quilogramas (kg), de ar no coletor de admissão e que vai para o cilindro. E com a eficiência volumétrica (VE) equação 3.19, definida pelo produto da razão da massa real ( $M_r$ ) admitida com a massa que encheria o cilindro numa situação estática ( $M_t$ ) e da razão entre ar/combustível estequiométrico ( $AFR_{stoich}$ ) com ar/combustível atual ( $AFR_{atual}$ ).

$$VE = \frac{M_r}{M_t} \frac{AFR_{stoich}}{AFR_{atual}} \quad (3.19)$$

Com o VE e a leitura do sensor MAP determina-se a pressão  $p_g$  em kPa no cilindro, isto é

$$p_g = VE \text{ MAP} \quad (3.20)$$

Para o volume varrido tem-se,

$$V_d = \text{curso do pistão} \times \text{diâmetro do cilindro} \quad (3.21)$$

a sua unidade é litros. No código

$$V_d = \text{CYL\_DISP} \quad (3.21a)$$

e

$$T = \frac{5}{9}(IAT - 32) + 273 \quad (3.22)$$

$$T = \frac{IAT - 32}{1,8} \quad (3.23)$$

A equação 3.22, traduz a temperatura  $T$ , de graus Fahrenheit (°F) para kelvin, o que significa que o sensor  $IAT$  fornece os dados nesta unidade. Para temperatura em graus Celsius é usada a equação 3.23.

Por fim, a equação 3.18, transforma-se em

$$M_a = (VE \text{ MAP } CYL\_DISP) / \left[ R (IAT - 32) \frac{5}{9} + 273 \right] MM \quad (3.24)$$

Esta é a equação que faz parte da base do código da MS-II, é usada pela CPU para determinar a massa de ar presente no cilindro, e em função do resultado desta, é determinada a quantidade de combustível a injetar no cilindro para uma mistura estequiométrica, ou seja, AFR igual a 14,7.

#### 3.4.1.1.2 Equação da mistura estequiométrica

A MS-II usa o *REQ\_FUEL* um parâmetro que, através do tamanho do injetor e do cilindro, determina a massa de combustível que se deve juntar à massa de ar calculada na equação 3.24, para se obter uma mistura estequiométrica, isto é, AFR igual 14,7. O seu valor é expresso pela equação 3.25, e a sua unidade é milissegundos (*ms*).

$$REQ\_FUEL * 10 = 36000000 * CID * AIRDEN(100 \text{ kPa}, 70 \text{ }^\circ\text{F}) / (NCYL * AFR * INJFLOW) * 1 / DIVIDE\_PULSE \quad (3.25)$$

Na equação 3.25, 36000000 indica o número de décimos de um milissegundo em uma hora, com ele obtém-se quilos por milésimos de segundos da classificação de libras por hora (*lb/h*) do caudal do injetor. O *CID* representa o volume varrido pelo pistão em polegadas cúbicas (*plgs*<sup>3</sup>). A função *AIRDEN(100 kPa, 70 °F)* representa o valor da densidade do ar na admissão a pressão de 100 *kPa* e a temperatura de 70 °F. *NCYL* é o número de cilindros, *INJFLOW* caudal dos injetores em *lbs/h*. A expressão *1/DIVIDE\_PULSE* indica o número de vezes que injetor abre num ciclo. E assim, declara-se o *REQ\_FUEL* como sendo o parâmetro referência que expressa o tempo necessário em milissegundos que o injetor deve estar aberto a fornecer combustível, tendo em conta ao seu tamanho e do cilindro, nas condições ideais em que o ar no coletor de admissão estaria a uma pressão de 100 *kPa*, temperatura de 21,111 °C e um *VE* 100 % com 101,591 *kPa* de pressão atmosférica.

#### 3.4.1.1.3 Combustível necessário

O funcionamento do motor com AFR igual a 14,7 é indispensável, pois este é uma garantia de que se a combustão pode ser completa não havendo formação desnecessária de poluentes tão prejudiciais. Mas acontece que este AFR não pode ser mantido para qualquer binário solicitado ao motor. Daí que o *REQ\_FUEL* não define a quantidade de combustível em todos estados de funcionamento do motor. Para resolver esta questão surge o parâmetro *PW* (largura do pulso), (equação 3.26). Esta determina o tempo em que o injetor deve permanecer aberto, tendo em conta o estado do motor.

$$PW = REQ\_FUEL * VE * MAP * E + Accel + injector\_open\_time \quad (3.26)$$

Nesta equação 3.26, o  $E$ , é o produto de enriquecimento durante o aquecimento para se alcançar a temperatura certa de funcionamento; pela correção barométrica; sonda lambda; correção da temperatura do ar na admissão etc., sendo aplicado ao valor de  $REQ\_FUEL$  e  $VE(rpm, MAP)$ . A equação 3.27, mostra como é calculado.  $Accel$  é o enriquecimento durante aceleração, e  $injector\_open\_time$  é o tempo de compensação que demora até à abertura do injetor. A equação 3.26, mostra que na eventualidade do  $MAP$  falhar ainda há possibilidade da CPU determinar a abertura do injetor através do Sinal TPS do qual depende VE, se os dois falharem o  $PW$  é feito através de  $injector\_open\_time$ , e as falhas são registadas na M\_M e ao mesmo tempo, o processador emite alguns sinais de aviso de forma a informar a anomalia no sistema.

$$E = gamma\_Enrich = \left(\frac{Warmup}{100}\right) \left(\frac{O2\_Closed\_loop}{100}\right) \left(\frac{AirCorr}{100}\right) \left(\frac{BaroCorr}{100}\right) \quad (3.27)$$

Aqui (ver equação 3.27), 100 é usado para se obter números fracionários. De salientar que,  $Warmup$  é o valor de enriquecimento após o arranque a frio e este pode ser alterado pelo utilizador no software de ajuste. O  $O2\_Closed\_loop$ , enriquecimento através da sonda lambda também pode ser alterado pelo utilizador. O  $AirCorr$ , ajuste em função da temperatura do ar na admissão. Por fim, o  $BaroCorr$ , ajuste em função da pressão ambiente.

### 3.4.1.2 Controlo de ignição

Para a gestão da ignição, o MS-II pode controlar os ângulos de avanço de ignição com base na velocidade do motor (rpm), carga do motor (MAP) e a temperatura do motor (CLT). Nesta base de controlo, é tido como chave o sensor de velocidade do motor. A MS-II detém a referência do ponto de início da ignição e da injeção de combustível através deste sensor. Há três tipos de sensores de velocidade que a MS-II pode usar: o sensor de relutância variável (VR), sensor óptico e o de efeito de Hall. No presente trabalho optou-se ao sensor de Hall. De acordo com o sinal deste, a MS-II permite que o utilizador o configure para ativar a bobina de ignição com a subida de borda da onda ou a descida, isto é, quando o sinal do sensor sobe ou no momento em que desce. Esta funcionalidade, alarga a facilidade da escolha do captor de velocidade a usar no motor, pois permite-nos usar o sensor que já dispúnhamos. Na Figura 3.6A), apresenta-se o diagrama do sinal de saída deste sensor e a Figura 3.6B), ilustra o esboço do esquema do sistema de ignição adaptada ao GX120. A descrição abaixo (subsecção 3.4.1.2.1), é do princípio de controlo de ignição que a UCE MS-II se baseia para a gestão da ignição.

#### 3.4.1.2.1 Equação do ponto de ignição

Há três condições básicas para achar o ponto de ignição que a maioria dos sistemas usam, que são:

- Adiantamento inicial ( $A_i$ ) - é necessário devido ao tempo finito da combustão;

- Avanço baseado em rpm (**Arpm**) - necessário para compensar graus de duração no ciclo de combustão a velocidades diferentes;
- Avanço pelo vácuo (**Av**) - pressões e misturas diferentes têm graus de duração no ciclo de combustão diferentes.

Em termos matemáticos, estas condições são representadas pela equação 3.28, abaixo. Nesta, é possível observar que o ponto em que a ignição é iniciada (**At** = avanço total), deve ser o resultado da soma de três fatores.

$$At = Ai + Arpm + Av \quad (3.28)$$

A MS-II tem a equação 3.28, como base de partida, mas, porém, há um termo novo na equação 3.29, presente no código da MS-II. Este termo é designado por “*cold\_adv\_deg*” (**Af**), e este, representa o avanço de acordo com a temperatura do motor, é uma tabela de  $1 \times 10$  na memória da MS-II.

$$adv\_deg = adv\_offset + ign\_table(rpm, kpa) + cold\_adv\_deg \quad (3.29)$$

E assim tem-se o *adv\_deg* (**At**), *adv\_offset* (**Ai**), *ign\_table* (*rpm, kpa*) (**TI** = tabela de ignição) avanço em função da velocidade e vácuo [*f*(**Arpm**, **Av**)], *cold\_adv\_deg* (**Af**), logo, para a MS-II o ponto de ignição é:

$$At = Ai + TI + Af \quad (3.30)$$

No TunerStudio MS, o *adv\_offset* do código equivale a *trigger Offset*, o *ign\_table* (*rpm, kpa*) é a *ignition table* enquanto que *cold\_adv\_deg* é a tabela *cold advance* (MegaSquirt-II, 2018).

### 3.5 Software de configuração e ajuste

Nesta secção é feita uma pequena síntese descritiva de algumas funcionalidades do programa utilizado para a reprogramação da UCE e, é também neste capítulo que começamos a descrever a execução da componente prática realizada no laboratório.

A interação do utilizador com a unidade de controlo eletrónico, é efetuada por intermédio do software TunerStudio MS. É o programa recomendado pelos fabricantes dos controladores MegaSquirt® ou MicroSquirt®. A comunicação entre a UCE, e o computador de ajuste é estabelecida por intermédio de um cabo série DB9 e um adaptador série para USB, se o computador utilizado não tiver porto RS-232.

O TunerStudio MS, é um programa rico no que diz respeito à gama de ferramentas que abarca para que o utilizador interaja com a UCE. Por constituir a face da UCE, exige do utilizador o domínio das suas ferramentas para que haja êxito na configuração do controlador e no ajuste dos parâmetros de funcionamento.

### 3.5.1 Configuração e ajustes

Na presente seção exibimos ilustrações de algumas janelas do software TunerStudio MS nas quais é possível configurar e noutras ajustar parâmetros no controlador MS-II; mas antes apresentamos os critérios a que o utilizador se deve submeter (atender) para adaptar de forma correta a MS-II ao motor.

#### 3.5.1.1 Critérios

Segundo instruções da MegaSquirtMS-II (2018), para que o motor funcione da melhor maneira possível com o controlador MS-II, devem ser cumpridos os seguintes passos:

- Definição das constantes;
- Pôr o motor a trabalhar em marcha lenta;
- Ajustar os critérios PWM (Pulse Width Modulation);
- Ajustar os enriquecimentos da mistura combustível de partida, a frio e no aquecimento;
- Ajuste das tabelas VE, AFR e do avanço de ignição;
- Definição dos enriquecimentos da mistura de combustível, na aceleração.

Do anteriormente exposto, explica-se de seguida, as janelas usadas para definir e ajustar os parâmetros necessários à configuração e funcionamento do sistema. Nesta janela (ver Figura 3.10) definimos o seguinte: o tempo em *ms* que constitui a duração máxima de abertura do injetor em cada pulso quando o VE é igual a 100%; o algoritmo de controlo; a quantidade de pulsos por ciclo; o tipo de injeção; o tipo de motor quanto ao número de tempos; o número de cilindros; o número de injetores; a cilindrada do motor; o caudal volúmico do injetor e outros. Nesse sentido, as opções do algoritmo de controlo são definidas de acordo com a forma como se pretende calcular a carga do motor e o avanço de ignição. Entretanto, considerando a relação “*velocidade-densidade (do inglês, speed-density)*,” tem-se a carga do motor a partir da leitura do sensor MAP, em função da velocidade do motor fornecida pelo sensor de Hall, e com os dados dos dois sensores, a UCE determina a quantidade de combustível e o ponto de ignição.

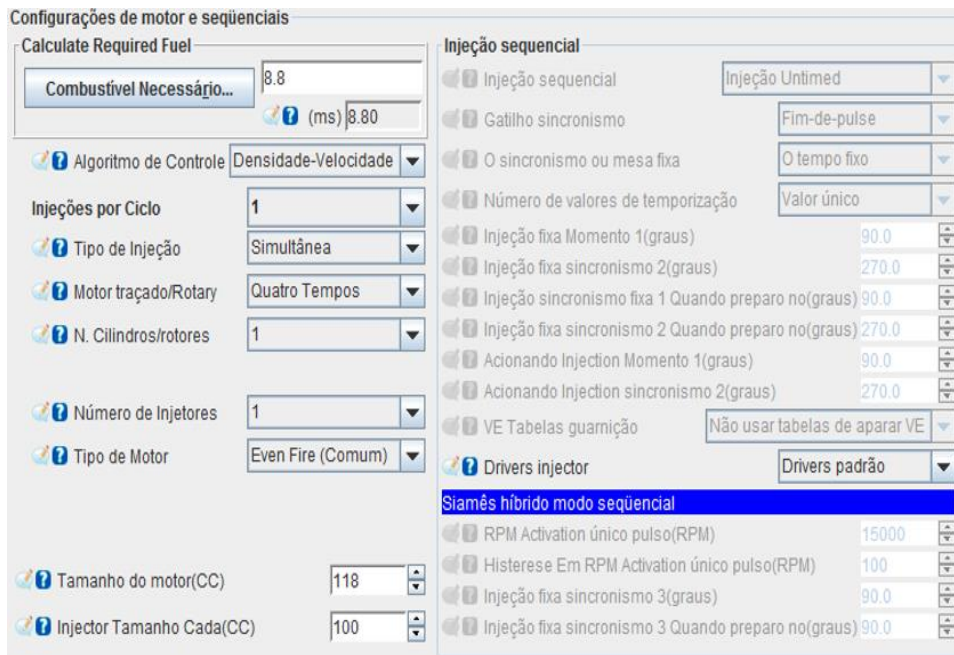


Figura 3.10 - Janela de configuração dos parâmetros iniciais.

Na Figura 3.11, é mostrada a janela das *configurações gerais*. Em primeiro lugar aparece o sensor barométrico. Nas situações em que se têm dois sensores a controlar a pressão, o sensor barométrico é usado principalmente para a corrigir a carga do motor em função da altitude.

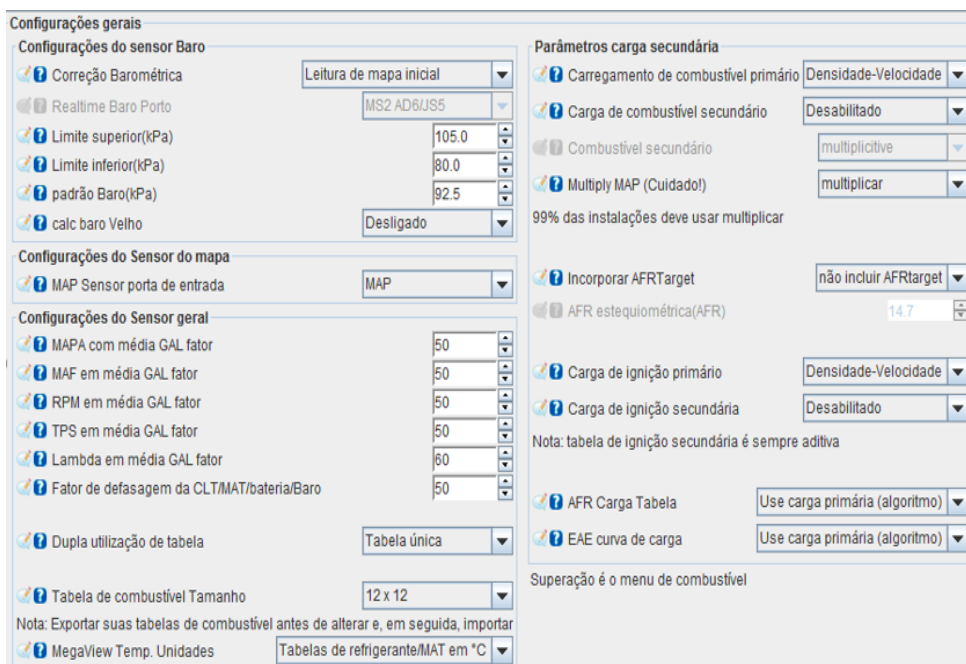


Figura 3.11 - Janela de configurações gerais.

Porém no presente trabalho é usado com a finalidade da leitura do mapa inicial, ou seja, visa ler a pressão no coletor de admissão. Nesta janela (ver Figura 3.11) é também definido o sensor de sinal de entrada nos seguintes mapas: VE (eficiência volumétrica), AFR (razão ar-combustível), avanço de ignição e os parâmetros ilustrados na respectiva figura.

Já na Figura 3.12, o PWM é um parâmetro de controlo do injetor. O seu ajuste depende da impedância do injetor. Nos injetores de baixa impedância, este parâmetro, também serve para variar a largura do

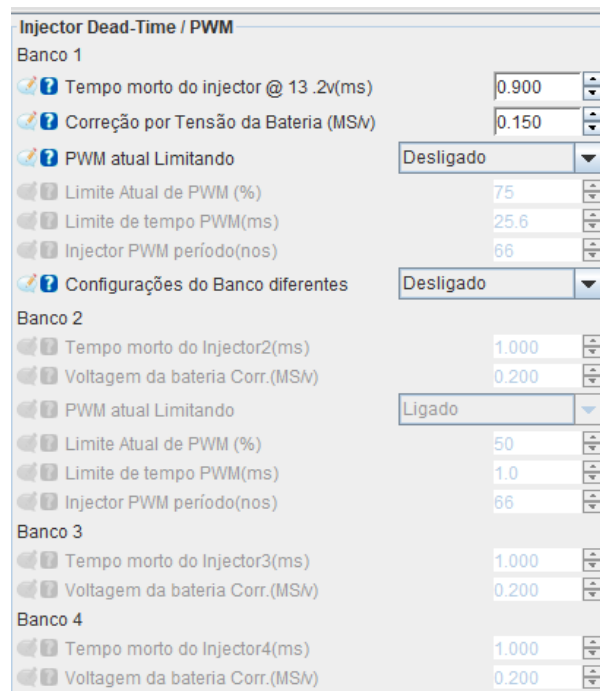


Figura 3.12 - Janela de ajuste de PWM.

pulso, afim de evitar o aquecimento do injetor. Na Figura 3.12, o parâmetro está definido apenas por dois fatores e, isto deve-se a uma impedância elevada do injetor (superior a 10 Ohms). Se a impedância do injetor for baixa (inferior a 3 ohms), o PWM seria definido por cinco fatores. Na janela colocada em evidência (ver Figura 3.12), o fator “*tempo morto do injetor @ 13,5 V*”, que corresponde ao inverso do “*tempo de abertura do injetor*”, compreendido entre os estados, totalmente fechado e completamente aberto, sendo o injetor alimentado com uma tensão de 13,5 V. A “*correção por tensão da bateria*”, corresponde ao tempo em milissegundos, que a UCE adiciona a cada pulso, para compensar a abertura mais lenta causada por uma tensão de alimentação inferior.

Na Figura 3.13, são definidos alguns valores mínimos dos parâmetros necessários para o arranque do motor, como por exemplo, a velocidade de arranque de 700 rpm com que foi configurada a UCE.

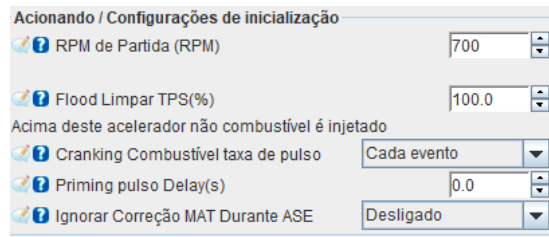


Figura 3.13 - Janela de parâmetros de inicialização.

Nos casos em que se dá partida ao motor e este arranca, mas o funcionamento se suspende quase no mesmo instante, neste caso é usada esta funcionalidade (ver Figura 3.14), para ajustar o enriquecimento. Na Figura 3.15, está representado o enriquecimento da mistura em função

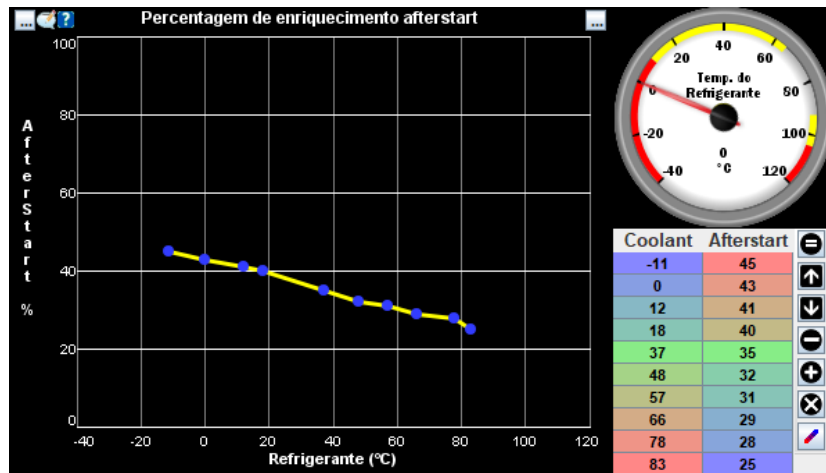


Figura 3.14 - Janela de enriquecimento, percentagem de PW (largura do pulso) após a partida.

do número de ciclos. Assim sendo, na primeira janela (ver Figura 3.14), está definida a percentagem de combustível a adicionar no pulso principal. O valor adicional pode estar entre 25 % a 45 % da PW principal (MegaSquirt-II, 2018). Na janela da Figura 3.15, é determinada a duração deste enriquecimento, que pode ser em segundos ou em ciclos do motor, variando entre 100 a 250 para a percentagem anteriormente considerada.

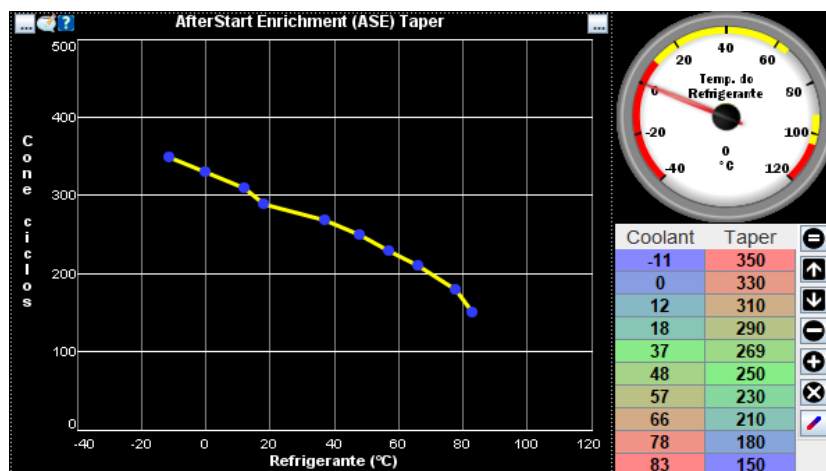


Figura 3.15 - Janela de enriquecimento por ciclo após a partida.

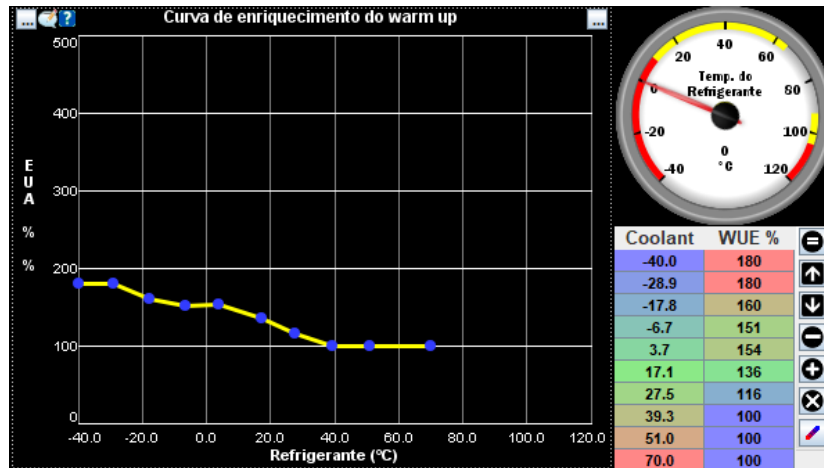


Figura 3.16 - Janela de ajuste de enriquecimento de aquecimento.

A Figura 3.16, à semelhança de outros enriquecimentos apresenta a particularidade de o enriquecimento se tornar constante a uma determinada temperatura, e o mesmo mantém-se ativo quando o motor estiver a trabalhar na zona de temperatura indicada, sendo o valor recomendado de 15 %. Para o enriquecimento após a partida, há um tempo determinado.

Segundo a MegaSquirt-II (2018), para configurar a alimentação de combustível do motor gerido pela UCE MS-II, existem vários parâmetros a ajustar, sendo os mais importantes os mapas VE e AFR. Para a obtenção das tabelas (mapas) de ajuste do motor, é usado um gerador de mapas, disponibilizado pelo software, no qual são inseridas algumas características do motor sendo em seguida gerado um mapa. A parte esquerda da Figura 3.17, mostra o gerador. A parte direita mostra o mapa de VE. O ajuste deste parâmetro deve ser feito de acordo com o que se deseja na equação 3.26, que determina a quantidade de combustível a misturar com a massa de ar. Um valor elevado de VE significa muito ar admitido e assim, é necessário injetar mais combustível. Por outro lado, um baixo valor de VE determina o inverso. Assim sendo, têm-se

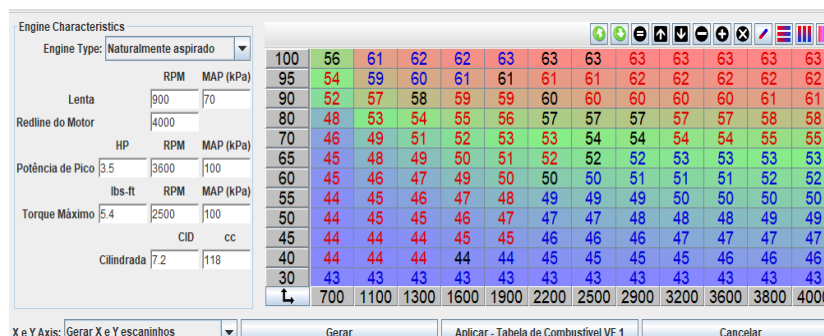


Figura 3.17 - Tabela VE de base.

misturas ricas para valores de VE maiores e misturas pobres para valores menores de VE. De acordo com o gerador de mapas, para o presente caso, os valores de VE variam de 43 a 63 %. Com estes valores a UCE calcula a quantidade de combustível necessária para a mistura pretendida. É sabido que a mistura estequiométrica mesmo em combustão completa não

significa melhor desempenho do motor; para tal, é preciso alterar estes valores afim de encontrarmos aqueles que garantem o desempenho desejado.

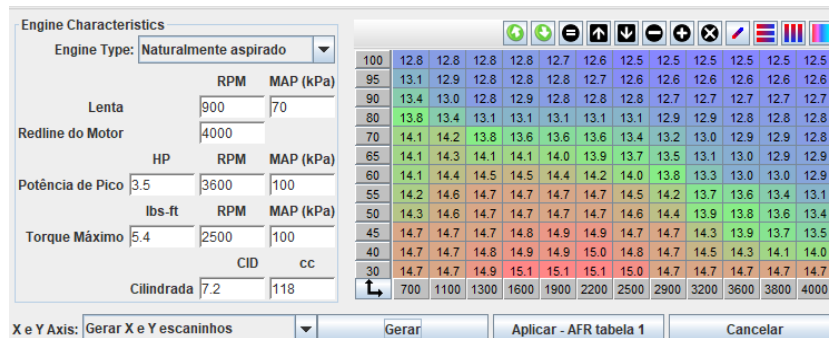


Figura 3.18 - Mapa AFR de base.

Relativamente ao mapa da razão ar/combustível (AFR), a sua principal função (ver Figura 3.18), está relacionado com a economia de combustível. Neste mapa os valores de ajuste, têm como referência o valor padrão de  $14,7 \text{ kg}_{ar}/\text{kg}_{combustivel}$  que representa a mistura estequiométrica. Ao contrário dos valores do mapa VE (ver Figura 3.17), em que ao maior valor corresponde uma maior quantidade de ar, para o mapa de AFR, os valores acima de 14,7 correspondem a misturas pobres, isto é, quanto maior for este valor, mais pobre é a mistura; para valores da razão ar/combustível a abaixo de 14,7, teremos misturas ricas. Entretanto, existem valores limites aos benefícios para cada situação. No caso de misturas pobres, estima-se que um valor de AFR de aproximadamente 16,5, proporciona uma melhor economia para cargas e velocidades do motor baixas. Para misturas ricas, um valor de AFR de aproximadamente 12,5 pode ser necessário para uma potência máxima para cargas e velocidades do motor elevadas.

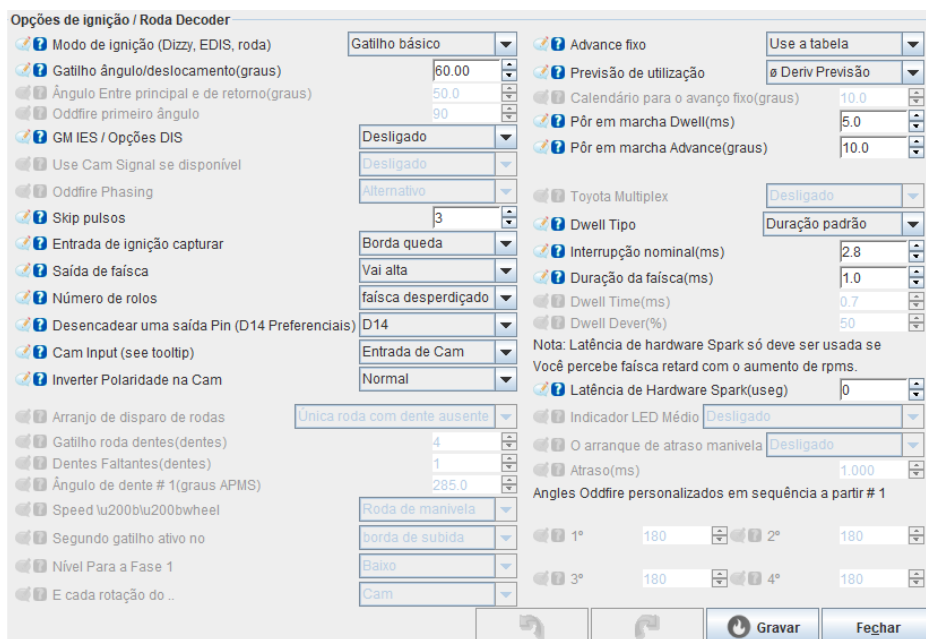


Figura 3.19 - Janela de configuração de parâmetros de ignição.

O ajuste do mapa de avanço de ignição é precedido das configurações das opções de ignição e estas estão definidas na janela da Figura 3.19. Daquilo que observamos nas configurações iniciais, a ignição é um processo de muitos requisitos, entretanto, apesar de se resumir na produção de uma faísca potente na câmara de combustão num determinado instante. A forma e o momento desta faísca, obedece critérios que se traduzem no controlo desta. Na janela da Figura 3.19, é definido o ângulo inicial, o número de pulsos no arranque, o número de faíscas por ciclo, o tipo de avanço, de entre outros.

Para o ajuste do avanço de ignição, o procedimento consiste em encontrar os termos certos da equação 3.29, que correspondam ao motor. O primeiro termo da equação citada, é o ângulo inicial “*adv\_offset*, no código”, mencionado anteriormente e é ajustado na janela da Figura 3.20. O segundo termo é o mapa de avanço de ignição “*ign\_table (rpm, kpa)*”, este pode ser



Figura 3.20 - Definição do ângulo inicial de ignição.

obtido de duas formas: uma semelhante a mapas VE e AFR, mas o ponto de partida não é no TunerStudio MS, como acontece com outros. É a partir de um gerador de mapas *online* ilustrado na Figura 3.21; e a outra é por meio de regras práticas que iremos debruçar mais adiante na “secção de testes” e “subsecção construção do mapa base”, é também lá, onde iremos mostrar o mapa gerado a partir do mecanismo da Figura 3.21.

Cylinder Bore:	60	millimeters ▼
Combustion Chamber Type:	2-valve closed chamber w/ optimized quench ▼	
Fuel:	mid-grade (91 or 92 octane) ▼	
Compression Ratio:	9.1:1 to 10.0:1 ▼	
Idle Vacuum:	11.81	in-Hg
Maximum boost level: (0 for naturally aspirated, max. boost (psi) for turbo/supercharged)	0	psi (21 psi maximum)
Maximum RPM:	4000	RPM
Idle RPM:	800	RPM
Spark advance table dimensions:	12x12 ▼ <ul style="list-style-type: none"> <li>MS-I uses 8x8 tables;</li> <li>MS-II, MicroSquirt, and the Sequencer use 12x12 tables.</li> </ul>	

Figura 3.21 - Gerador de mapas de avanço de ignição (microSquirt3, 2018).

A Figura 3.22 abaixo, ilustra a forma como é configurado o enriquecimento da aceleração. Na ilustração aparece um cursor deslizante, e este quando indica o zero, isto representa o enriquecimento baseado somente no MAP (MAPdot), e quando apontar para 100, o

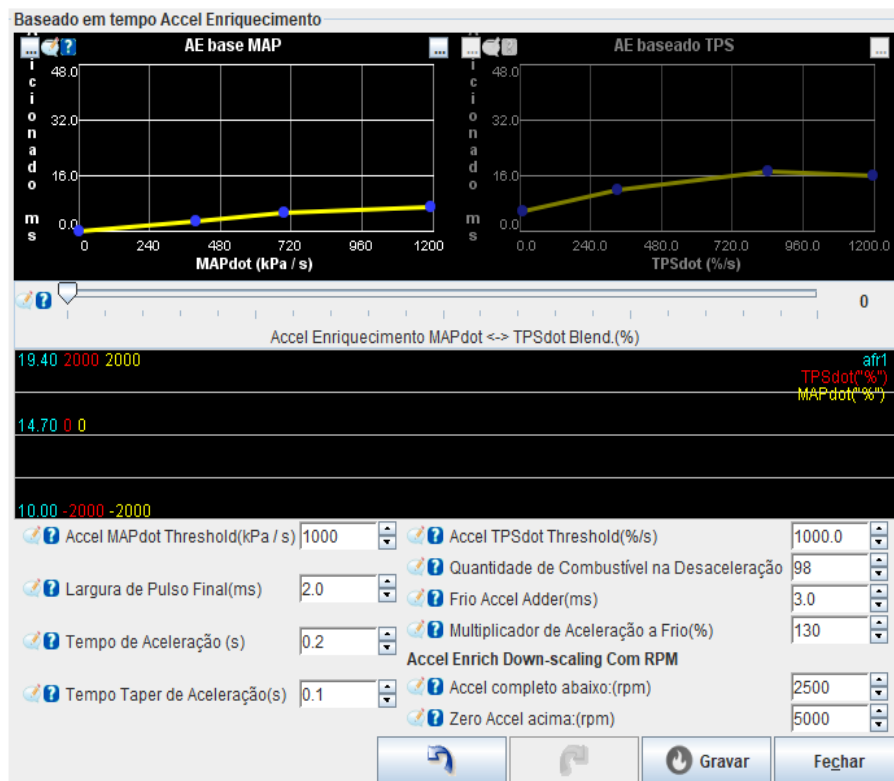


Figura 3.22 - Janela de configuração de enriquecimento de aceleração.

enriquecimento é somente por TPS (TPSdot), mas quando estiver num valor diferente de 0 e 100, o enriquecimento é feito com base ao sinal dos dois sensores. A MegaSquirt-II (2018), aconselha valores entre 30 a 60, dizendo que a maioria dos resultados bons relatados por utilizadores que usaram os dois sensores, estiveram neste intervalo. Usando o TPS, exige-se que o mapa AFR esteja otimizado, quando assim não for, o correto é somente o MAP. Em enriquecimentos anteriormente falados, o valor a adicionar ao PW principal era medido em *milissegundos*, mas para o de aceleração, é o segundo (s).

### 3.6 Testes experimentais preliminares

Os testes preliminares consistem na avaliação do estado de funcionamento do motor, e nestes, constatou-se a operacionalidade do motor, mas registou-se a inoperância dos sensores TPS e Sonda lambda.

### 3.6.1 Procedimentos

- a) Verificação do estado do motor. Neste passo, analisou-se o estado operacional de todos componentes necessários ao funcionamento do motor e a colocação dos que estavam em falta;
- b) Deu-se partida ao motor com uma abertura aproximadamente de 10° do ângulo da borboleta do acelerador;
- c) Predefiniu-se uma velocidade, abriu-se a borboleta ao máximo e registou-se a pressão de travagem necessária para manter o motor nesta velocidade;
- d) Controlou-se a temperatura do motor e os valores ficaram num intervalo de 55 °C a 90 °C.

Com os procedimentos acima descritos, procedeu-se o teste preliminar e efetuou-se medições indiretas de binário através de registos de pressão de travagem do motor, cujo valores são apresentados na Tabela 3.4, e na Figura 3.2, mostramos o mecanismo usado para o teste e colheita de dados.

Tabela 3.4: Dados do teste preliminar.

N [rpm]	$p_m$ [Bar]	T [°C]
1900	1,40	79,50
2200	1,60	79,90
2500	1,65	90,00
2800	1,66	84,75
3100	1,50	82,00
3400	1,40	88,60
3700	1,20	74,00
4000	1,00	63,00

### 3.7 Alterações ao motor de base

As alterações relevantes feitas ao motor neste trabalho, consistem na substituição do circuito de ignição por magneto transistorizado (exceto a vela de ignição), pelo circuito da ignição mapeada (digital) composta por sensor de Hall, UCE, módulo de ignição, autotransformador e os cabos de baixa e alta tensão. Nesse sentido, ainda se efetuou uma melhoria numa alteração feita nos trabalhos anteriores a este, referência que é a posição do TPS montado no corpo da válvula da borboleta. A melhoria constou na alteração da montagem do TPS, pois este não funcionava porque estava invertida a sua posição normal de trabalho. A Figura 3.23, representa a alteração do circuito de ignição e a Figura 3.24, o TPS.

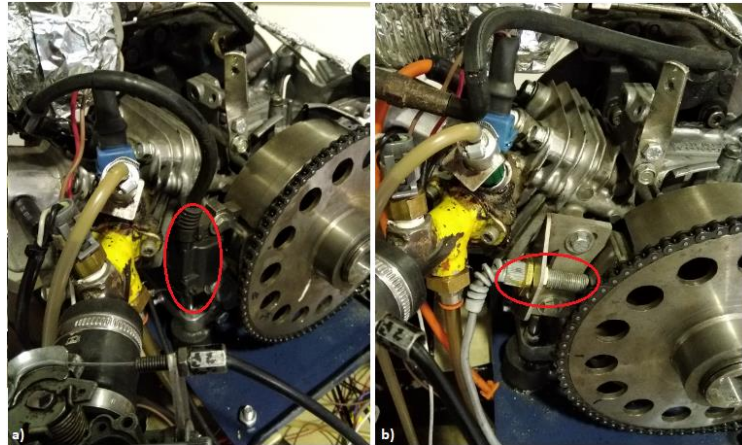


Figura 3.23 - Mudanças de componentes no sistema de ignição.

Na Figura 3.23a, tem-se a ignição original cujo componente mais visível é o cabo que leva tensão na vela e a bobina, ainda olhando para esta figura, especificamente em 3.23b, observa-se que no lugar da bobina se colocou o sensor de Hall e esta alteração constituiu a chave do sucesso deste trabalho.

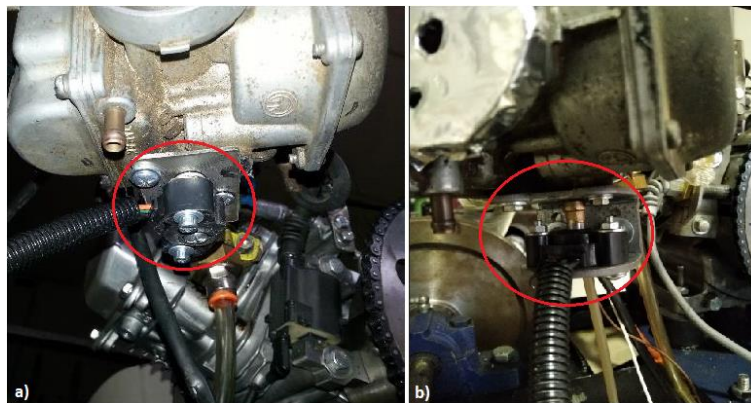


Figura 3.24 - Retificação da montagem do TPS.

Quanto à Figura 3.24a, o TPS está aparafusado diretamente no corpo da válvula, mas em 3.24b o TPS está sobre um suporte preso no corpo da válvula da borboleta.

### 3.8 Desenhos

Após revisão do estado do motor, identificou-se algumas das possíveis formas para os componentes necessários, à implementação dos sistemas anunciados. Estes componentes são o corpo da válvula da borboleta com o sensor TPS, coletor de admissão com sensores MAP e IAT, injetor de combustível no motor, sensor de Hall e sonda lambda no motor e outros componentes. Realçamos os mencionados, porque o seu correto funcionamento também

depende do local em que forem instalados, o que não acontece a exemplo com a bomba de combustível e a bobina de ignição. Assim sendo, e de acordo com a análise realizada ao estado do motor, notou-se que se necessitava de novos suportes de sensores de Hall e TPS para alterar as posições e lugares onde foram instalados anteriormente; e abaixo mostra-se (ver Figura 3.25 e 3.26) as formas destes suportes e as Figuras 3.23b e 3.24b ilustram a sua aplicação.

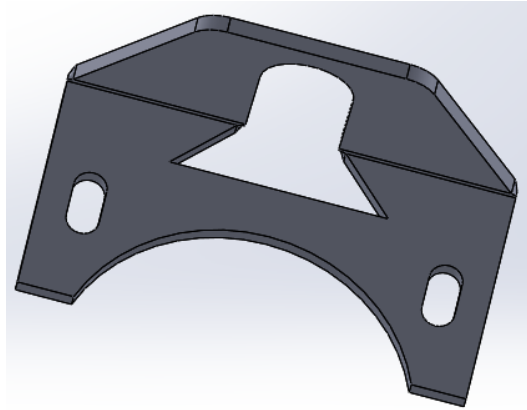


Figura 3.25 - Suporte do sensor All.

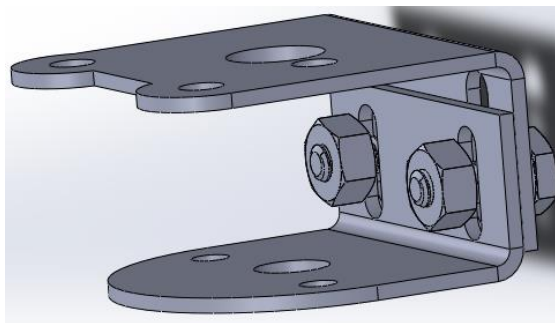


Figura 3.26 - Suporte do TPS.

### 3.9 Fabricação de peças

Para as peças mostradas nas Figuras 3.25 e 3.26, usou-se aço-inoxidável como material para a fabricação das mesmas e pelo processo de corte com o jato de água e soldadura MIG (Metal Inert Gas) obtiveram-se as formas pretendidas para as peças.

### 3.10 Construção do mapa base de avanço de ignição

Existem duas maneiras de se construir o mapa base de avanço de ignição, uma através do gerador *online* (ver Figura 3.21) e a outra é por meio de alguns critérios descritos pela MegaSquirt-II (2018) e que passamos a descrever a seguir.

#### Motor:

- Fabricado entre 1960 a 1990 e que tenha duas válvulas - avanço máximo = 36 °;
- De 1991 a atualidade que têm duas válvulas - avanço máximo = 30 °;
- De três ou quatro válvulas - avanço máximo = 26 °;

Ajustar para o diâmetro do cilindro:

- Menor de 3,5 "(89 mm) - subtrair 3 °;
- Entre 3,5 "e 4.000" (101,6 mm) - sem ajuste;
- Maior de 4.001 "(101,6 mm) - adicionar 3 °;

Ajustar para o tipo de gasolina:

- Regular - subtrair 2 °;
- Mid-grade - subtrair 1°;
- Premium - sem ajuste.

Aperfeiçoando e seguindo estes passos, chega-se ao ângulo máximo de ignição a uma pressão média efetiva de 100 kPa na velocidade máxima do motor. Ainda de acordo com MegaSquirt -II (2018), no caso do ângulo mínimo, este é uma questão de ajuste, mas na maioria dos casos situa-se entre 8 ° a 16 °. Para completar o mapa, é usado a expressão 3.31.

$$x + 0,3 (100 - y) = z \quad (3.31)$$

Na equação 3.31,  $x$ , é o ângulo máximo, 0.3 é o valor angular a adicionar a cada 1 kPa abaixo de 100 kPa (é o 100 que aparece na equação),  $y$ , é a pressão em que se deseja achar o ângulo e  $z$  é o ângulo de avanço procurado.

Assim sendo, para o presente caso em que se tem 4000 rpm, 24° e 100 kPa como valores máximos, e assumindo um ângulo de 10 ° para a menor velocidade, num funcionamento em que se deseja uma variação de avanço linear, a tabela base (ver Figura 3.27) é apresentada com o seguinte formato.

i	100.0	10.0	11.3	12.5	13.8	15.1	16.5	17.8	19.0	20.4	21.7	23.0	24.0
g	94.0	11.8	13.1	14.4	15.7	17.0	18.3	19.6	20.9	22.2	23.5	24.8	25.8
n	88.0	13.6	14.9	16.2	17.5	18.8	20.1	21.4	22.7	24.0	25.3	26.6	27.6
l	82.0	15.4	16.7	18.0	19.3	20.6	21.9	23.2	24.5	25.8	26.8	28.1	29.4
o	76.0	17.2	18.5	19.8	21.1	22.4	23.7	25.0	26.3	27.6	28.9	30.2	31.2
a	70.0	19.0	20.3	21.6	22.9	24.2	25.5	26.8	28.1	29.4	30.7	32.0	33.0
d	64.0	20.8	22.1	23.4	24.7	26.0	27.3	28.6	29.9	31.2	32.5	33.8	34.8
k	58.0	22.6	23.9	25.2	26.5	27.8	29.1	30.4	31.7	33.0	34.3	35.6	36.6
p	52.0	24.4	25.7	27.0	28.3	29.6	30.9	32.2	33.5	34.8	36.1	37.4	38.4
a	46.0	26.2	27.5	28.8	30.1	31.4	32.7	34.0	35.3	36.6	37.9	39.2	40.2
	40.0	28.0	29.3	30.6	31.9	33.2	34.5	35.8	37.1	38.4	39.7	41.0	42.0
	34.0	29.8	31.1	32.4	33.7	35.0	36.3	37.6	38.9	40.2	41.5	42.8	43.8
	↙	700	1000	1300	1600	1900	2200	2500	2800	3100	3400	3700	4000
		rpm											

Figura 3.27 - Mapa base de ignição não gerado online.

O método de construção do mapa a partir da ferramenta mostrada na Figura 3.21, é mais simples. Este consiste na introdução de alguns parâmetros do motor na caixa de diálogo, após isto, clicando na opção “*Generate Advance Table*” (disponível *online* junto a ferramenta) de forma automática é gerado o mapa. A Figura 3.28, mostra o mapa base do motor GX120, obtido a partir do gerador *online*.

i	101.0	5.0	10.0	10.9	12.9	13.9	15.8	16.8	17.8	19.7	20.7	22.7	31.4
g	95.0	5.0	10.0	11.1	13.1	14.1	16.1	17.1	18.1	20.1	21.1	23.1	32.0
n	89.0	13.0	10.0	11.3	13.4	14.4	16.4	17.4	18.4	20.4	21.5	23.5	32.6
l	83.0	13.0	10.0	11.5	13.6	14.6	16.7	17.7	18.8	20.8	21.8	23.9	33.2
o	77.0	13.0	10.0	11.7	13.8	14.9	17.0	18.0	19.1	21.2	22.2	24.3	33.7
a	71.0	13.0	10.0	11.9	14.1	15.1	17.3	18.3	19.4	21.5	22.6	24.7	34.3
d	65.0	13.0	10.0	12.1	14.3	15.4	17.5	18.6	19.7	21.9	23.0	25.1	34.9
k	59.0	13.0	10.0	12.3	14.5	15.6	17.8	18.9	20.0	22.2	23.3	25.5	35.4
p	53.0	13.0	10.0	12.5	14.8	15.9	18.1	19.2	20.3	22.6	23.7	25.9	36.0
a	47.0	13.0	10.0	12.7	15.0	16.1	18.4	19.6	20.6	22.9	24.1	26.3	36.6
	41.0	13.0	10.0	12.9	15.2	16.4	18.7	19.8	21.0	23.3	24.4	26.7	37.1
	35.0	13.0	10.0	13.1	15.5	16.6	19.0	20.1	21.3	23.7	24.8	27.1	37.7
	↙	700	800	900	1100	1200	1400	1500	1600	1800	1900	2100	4000
		rpm											

Figura 3.28 Mapa base de ignição gerado online.

Importa-nos salientar que no presente trabalho, foram gravados três mapas principais na UCE, que são: mapa de rendimento volumétrico (VE), mapa de razão ar/combustível (AFR) e o mapa de avanço de ignição. Destes, estão otimizados os mapas VE e de avanço de ignição. Deste modo, ficou por otimizar, o mapa AFR.

O mapa VE, a UCE usa para o controle do caudal mássico de combustível necessário para a massa de ar admitido e da condição de funcionamento do motor. É um mapa de controlo de injeção. O mapa AFR é usada para controlar a mistura ar/combustível e o mapa de avanço de ignição serve para determinar o ângulo de ignição em função da velocidade e pressão no coletor de admissão.

# Capítulo 4

## Resultados

Após a fundamentação teórica e testes preliminares, é realizado neste capítulo à análise de dados cujos resultados finais representamos em gráficos.

### 4.1 Teste do mapa base de avanço de ignição

Durante o funcionamento do motor com o mapa base construído pela ferramenta da Figura 3.21, observa-se que a rotações inferiores a 1600 rpm, o motor funciona com vibrações moderadas, quando se ultrapassa este valor (2000 a 2200 rpm), observa-se um abrandamento das vibrações, mas ultrapassando esta velocidade, as vibrações renascem à medida que aumenta a velocidade do motor e intensificam-se.

Com este mapa, também se observou que, fixando o ângulo de avanço de ignição a 10°, a pressão de travagem necessária para parar o motor é maior que com o ângulo de avanço de ignição a variar de 16° a 40°, a Tabela 4.1, mostra os dados registados durante o teste do mapa base.

Tabela 4.1: Dados do desempenho do motor usando o mapa base.

<b>N [rpm]</b>	<b><math>p_m</math> [bar]</b>	<b>T [°C]</b>
1900	1,00	69,0
2200	1,20	81,0
2500	1,40	80,5
2800	1,58	80,0
3100	1,58	81,0
3400	1,60	83,0
3700		
4000		

Parâmetros como a temperatura do motor e de alguns elementos do mecanismo usado para a travagem, tais como temperatura do disco e das pastilhas, foram tidas em conta, mas a princípio observa-se que não tiveram nenhuma influência no valor da pressão de travagem, uma

vez que as condições de ensaio foram as mesmas, ou seja, os ensaios ocorreram a temperaturas iguais.

#### 4.1.1 Afinação do mapa base de avanço de ignição

A afinação do mapa de avanço de ignição consiste satisfazer em geral os seguintes critérios:

- Baixa carga do motor - mais avanço de ignição;
- Alta carga - menor avanço;
- Menor velocidade do motor - menor avanço;
- Maior velocidade - mais avanço;
- Temperatura alta do motor - menor avanço;
- Temperatura baixa - maior avanço.

A seguir a estes critérios vem a razão ar/combustível. A mistura rica tem maior velocidade de propagação da frente de chama, e assim, nestas misturas, o tempo de combustão é menor que nas misturas pobres que se encontram a mesma pressão. Dai que, valores de VE maiores e AFR menor exigem menos avanço de ignição. Tendo em conta estas situações expostas, chegou-se ao mapa (ver Figura 4.1), acima ilustrado.

i g n i t a d o k p a	101.0	10.1	9.0	9.1	9.9	11.0	12.7	13.8	15.0	17.4	18.5	20.8	29.1
	95.0	10.1	9.9	10.0	10.8	12.0	13.6	14.7	15.9	18.2	19.3	21.6	29.7
	89.0	10.1	10.3	10.3	11.7	12.8	14.4	15.6	16.6	18.9	20.1	22.3	30.3
	83.0	10.2	11.0	10.8	12.7	13.8	15.3	16.4	17.5	19.8	20.9	23.1	30.9
	77.0	11.3	11.3	10.9	12.8	13.9	16.1	17.2	18.3	20.5	21.6	23.8	31.4
	71.0	12.4	11.4	11.5	13.7	14.8	16.9	18.0	19.1	21.3	22.4	24.5	32.0
	65.0	13.6	11.8	12.5	14.7	15.7	17.9	18.9	20.0	22.1	23.2	25.3	32.6
	59.0	14.7	12.2	13.4	15.5	16.6	18.7	19.7	20.8	22.9	23.9	26.0	33.1
	53.0	15.8	12.8	14.3	16.4	17.4	19.5	20.5	21.6	23.6	24.6	26.7	33.7
	47.0	17.0	14.0	15.3	17.4	18.4	20.4	21.4	22.4	24.4	25.5	27.5	34.3
	41.0	17.1	15.1	16.2	18.2	19.2	21.2	22.2	23.2	25.2	26.2	28.2	34.8
	35.0	17.1	16.3	17.2	19.2	20.2	22.1	23.1	24.1	26.0	27.0	29.0	35.4
	↙	700	800	900	1100	1200	1400	1500	1600	1800	1900	2100	4000
		rpm											

Figura 4.1 - Mapa base de avanço de ignição afinado para maior binário.

O modo da eleição do mapa como o adequado para o funcionamento do motor, consiste no teste do binário do motor a funcionar com o referido mapa. E os resultados apurados com este mapa estão descritos na Tabela 4.2 e 4.3. Estes foram obtidos em sessões com vários testes.

Tabela 4.2: Dados do desempenho do motor usando ignição digital com ângulo fixado de 8 a 10 °.

N [rpm]	$p_m$ [bar]	T [°C]
1900	1,6	82,0
2200	1,8	71,0
2500	1,9	85,0
2800	2,0	60,0
3100	2,0	89,0
3400	1,8	55,0
3700	1,4	71,0
4000	1,2	82,7

Tabela 4.3: Desempenho do motor usando Ignição eletrônica digital - ângulo variável.

N [rpm]	p <sub>m</sub> [bar]	T [°C]
1900	2,0	89,0
2200	2,1	82,0
2500	2,2	76,0
2800	2,3	86,0
3100	2,2	70,5
3400	2,0	92,7
3700	2,0	58,9
4000	1,9	80,0

Os resultados apresentados nas Tabelas 3.4, 4.1, 4.2 e 4.3, foram obtidos com o mapa VE da Figura 4.2, pelo qual se otimizou o mapa de avanço de ignição da Figura 4.1.

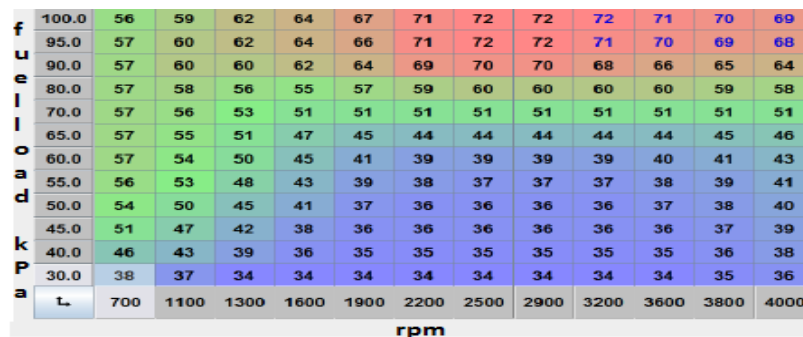


Figura 4.2 - Mapa VE otimizado para maior binário (D'Amil, 2016).

## 4.2 Testes de novos mapas

De acordo com os critérios de ajuste do mapa de avanço de ignição, entende-se que diferentes mapas VE e AFR, têm mapas de ignição diferentes. Assim sendo, para um mapa VE (ver Figura 4.3) otimizado para garantir um binário médio, precisa-se de mapa de avanço de ignição que seja compatível com cada valor VE deste.

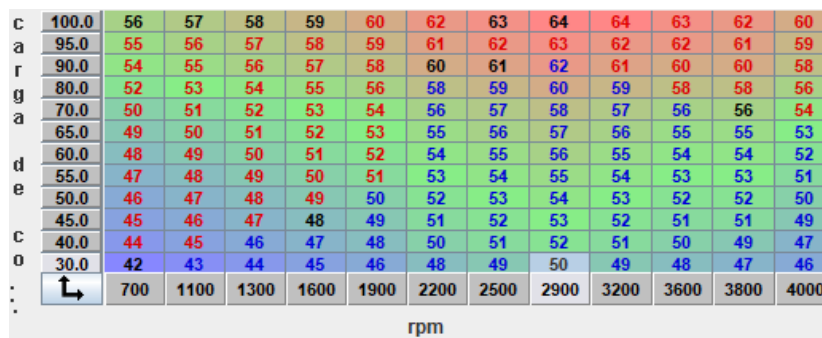


Figura 4.3 - Mapa VE otimizado para binário médio.

Assim sendo, de acordo com os testes feitos, chegou-se ao mapa de avanço de ignição ilustrado na Figura 4.4, como sendo um dos capazes de garantir o desempenho do motor nas condições de binário médio.

i g n i l o d a k p a	100.0	10.1	11.4	12.7	13.9	15.2	16.4	17.7	19.0	20.2	21.5	22.7	24.0
	95.0	10.2	11.7	13.1	14.3	15.6	16.8	18.2	19.5	20.7	22.0	23.3	24.5
	90.0	10.3	12.1	13.4	14.7	16.0	17.3	18.6	19.9	21.2	22.5	23.8	24.8
	80.0	11.0	12.4	13.8	15.1	16.4	17.7	19.1	20.4	21.7	23.0	24.4	25.7
	70.0	11.2	12.7	14.1	15.5	16.8	18.1	19.5	20.9	22.2	23.6	24.9	26.3
	65.0	11.3	13.1	14.5	15.9	17.3	18.6	20.0	21.4	22.7	24.1	25.5	26.7
	60.0	11.5	13.4	14.8	16.2	17.7	19.0	20.4	21.8	23.2	24.7	26.0	27.4
	55.0	12.0	13.7	15.2	16.6	18.1	19.4	20.9	22.3	23.7	25.1	26.6	27.9
	50.0	12.3	14.1	15.5	17.1	18.5	19.8	21.3	22.8	24.2	25.7	27.1	28.0
	45.0	12.4	14.4	15.9	17.4	18.9	20.3	21.8	23.2	24.7	26.2	27.7	28.5
	40.0	12.7	14.7	16.2	17.8	19.3	20.7	22.2	23.7	25.2	26.7	28.2	29.7
	30.0	13.5	14.9	16.6	18.1	19.7	21.2	22.7	24.2	25.7	27.3	28.8	30.3
		↙	700	1100	1300	1600	1900	2200	2500	2900	3200	3600	3800
		rpm											

Figura 4.4 - Mapa de avanço de ignição otimizado para binário médio.

Por razões de tempo, testou-se o mapa (ver Figura 4.4), mas não se chegou ao registo de dados de desempenho como se fez no mapa de avanço de ignição de maior binário, ficamos sem tempo suficiente para o registo de dados inerentes a este mapa, mas é de salientar que o presente mapa funciona.

### 4.3 Curvas de desempenho

A seguir apresentamos em primeiro lugar as curvas originais do GX120, Figura 4.5, que mostram a capacidade deste motor no seu estado original.

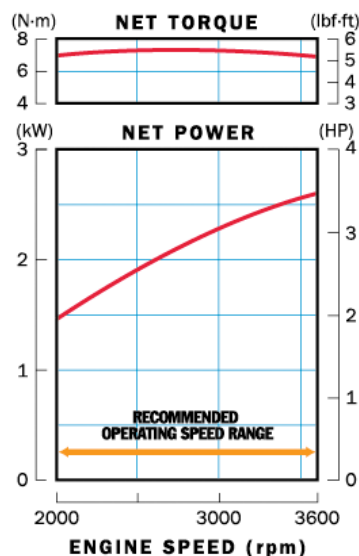


Figura 4.5 - Curvas de binário e potência do motor HONDA GX120 (Honda, 2012).

Estas curvas são um ponto de referência em relação ao desempenho do motor depois dos trabalhos de adaptação efetuados. Mas para este trabalho, representam uma referência muito distante, porque as alterações feitas ao motor nos trabalhos anterior a este, alteraram-nas, daí que, neste trabalho optamos por usar as curvas obtidas nos ensaios efetuados com o motor no estado em que foi deixado no último trabalho. Trabalho este que foi feito por D'Amil (2016). A Figura 4.6, descreve as curvas de binário com o motor usando o mapa VE otimizado para maior binário.

As curvas a seguir mostradas (ver Figura 4.6 e 4.7), obtiveram-se a partir das equações 3.13; 3.14 e valores das Tabelas 3.2; 3.4; 4.2 e 4.3, usando um coeficiente de atrito ( $f$ ) adimensional de 0,3, chegou-se aos pontos que formam as curvas de desempenho aproximado. Entretanto, devido a incerteza com precisão em relação aos instrumentos usados na colheita de dados para a análise dos parâmetros anteriormente anunciados (binário, potência e consumo), achou-se prudente representar estes parâmetros por valores adimensionais em gráficos. Os valores adimensionais resultaram da divisão de cada parâmetro pelo valor máximo alcançado no parâmetro. E quanto ao valor atribuído ao  $f$ , justificamo-la de acordo com o trabalho de Blau Peter 2001 citado por Marques (2015), no seu estudo sobre as características físicas e tribológicas dos materiais de travagem e, segundo este, o valor de coeficiente de atrito de materiais usado para pastilhas de travagem, varia entre 0,3 a 0,6, estes valores também estão de acordo com os anunciados pelo fabricante de pastilhas de travagem MOTORARTE (2018) e outros fabricantes.

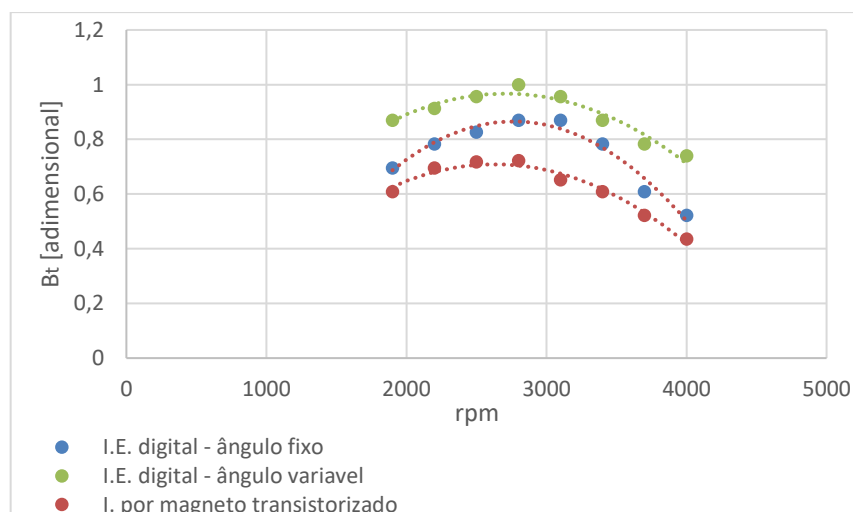


Figura 4.6 - Binário equivalente adimensional na travagem.

Equiparando o binário máximo alcançado com a ignição por magneto situado aproximadamente em 0,1Nm, em relação a ignição digital que ronda a volta de 0,12Nm para ângulo fixo e, 0,14Nm para ângulo variável, isto equivale a um aumento em termos percentuais de 20 a 40 % de ganho.

As curvas da Figura 4.7, mostram a potência limite conseguido com a ignição por magneto transistorizado e mapeada. De lembrar que estas curvas apenas nos dão a certeza de que houve

melhoria, mas os números com que foram traçadas, acreditamos que serão diferentes se o motor for testado numa bancada de teste mais apropriada.

Quanto ao consumo específico, apegando-se a equação 2.5, com o caudal volúmico do injetor de  $100 \text{ cm}^3/\text{min}$  (definido na janela da Figura 3.10), convertendo este valor para quilogramas/segundo obter-se-ia as curvas que ilustram a massa de combustível consumida por cada unidade de potência produzida, mas acontece que trata-se de uma injeção que varia em milissegundos e isto torna difícil obter o caudal de cada evento, para resolver tal questão, acorremos a *data logging* (ver Figura 3.4), para obter o tempo de vazão *PW* e o *duty cycle* afim de calcular-se o consumo em determinados pontos durante o funcionamento do motor mas sem considerar a potência disponível na cambota

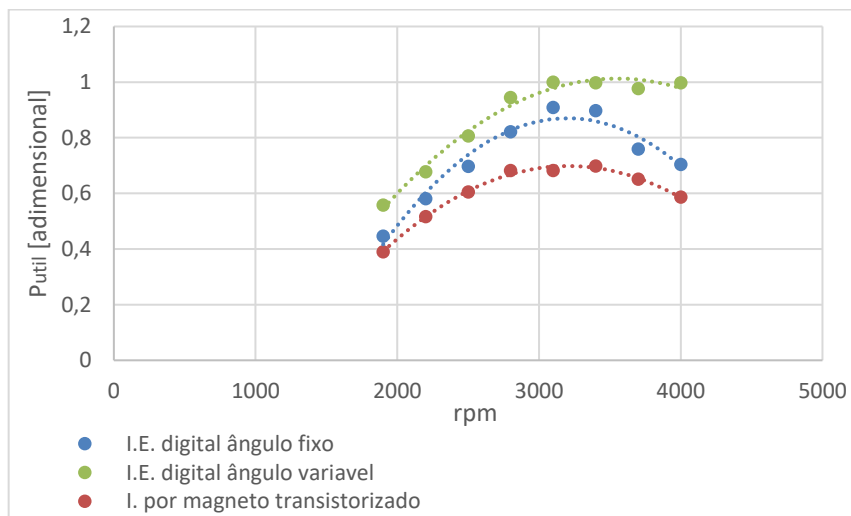


Figura 4.7 - Potência equivalente adimensional na travagem.

Para tal, usou-se a equação 3.15, e com ela, chegou-se ao formato do perfil do consumo (ver Figura 4.8), para cada forma de ignição experimentada nos ensaios. Observando as linhas de tendência (ver Figura 4.8), nota-se que o motor quando funciona com a ignição por magneto transistorizado, o consumo é maior no intervalo de velocidades entre 1900 rpm a 2500 rpm aproximadamente, isto em comparação com a ignição eletrónica digital à ângulo fixo ou variável. No intervalo entre 2800 rpm a 4000 rpm, o consumo de combustível com o motor a trabalhar com a ignição por magneto transistorizado, em comparação com o funcionamento do motor utilizando a ignição eletrónica digital à ângulo fixo ou variável, passa a valores quase intermédios em relação ao consumo com ignição digital a ângulo fixo e variável, estando mais próximo de valores da digital à ângulo fixo. Olhando para as curvas (ver Figura 4.8) do consumo do motor a funcionar com a ignição eletrónica digital, nota-se que o motor consome menos combustível utilizando a ignição digital a ângulo fixo, em velocidades menores, compreendidos entre 1900 a 2500 rpm e muito menos ainda com o ângulo variável em relação a ignição por magneto. Contudo, de acordo com as curvas de tendência do consumo de combustível, o motor gasta mais combustível por unidade de tempo se estiver a trabalhar com a ignição por magneto a velocidades inferiores a 2500 rpm e, gasta menos combustível a trabalhar com a ignição digital

variável, enquanto que a velocidades superiores a 2500 rpm, o gasto menor é proporcionado pela ignição eletrônica digital a ângulo fixo, sendo a ignição digital variável com mais consumo de combustível. Ao valor do consumo calculado a partir da equação 3.15 e representado na Figura 4.8, associa-se a potência produzida, isto é, dividindo-o pela potência de travagem

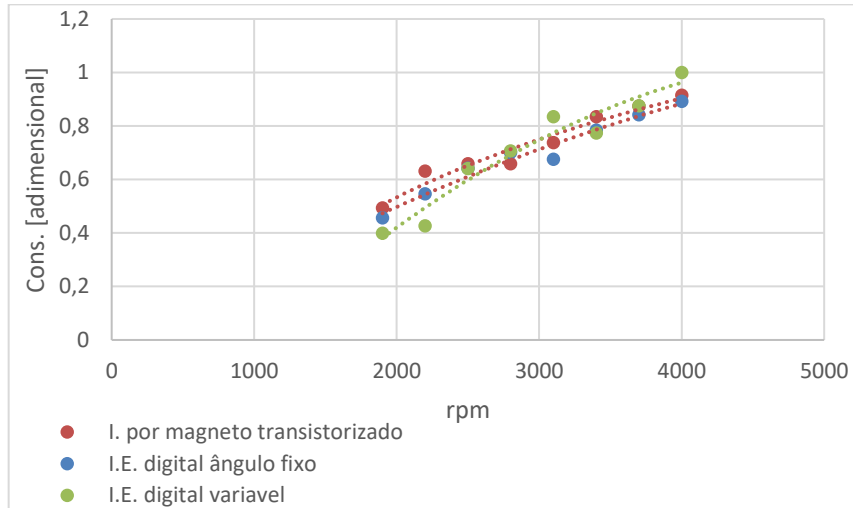


Figura 4.8 - Consumo adimensional por período de trabalho.

equivalente quando o referido consumo se processou e, o quociente desta relação dá-nos o consumo específico, que ilustrado graficamente em função da velocidade, obteve-se os seguintes perfis (ver Figura 4.9).

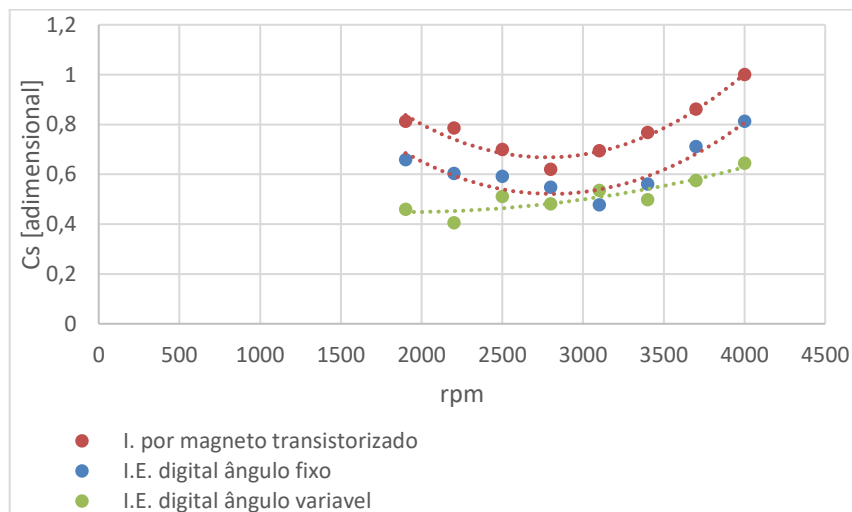


Figura 4.9 - Consumo específico adimensional dos três modos de ignição realizados nos ensaios.

Da Figura 4.9, observa-se que o maior consumo específico é registado na ignição com o magneto transistorizado, seguido pela ignição digital a ângulo fixo e o menor consumo específico obteve-se com a ignição digital variável, isto de forma geral, porque se se considerar o intervalo aproximadamente compreendido entre 3100 rpm a 3200 rpm, o mínimo obteve-se para digital a ângulo fixo.

# Capítulo 5

## Conclusões e trabalhos futuros

Na consolidação do nosso conhecimento acerca dos sistemas de injeção e ignição eletrônica digital, por intermédio da implantação destes sistemas ao motor Honda GX120, chegamos aos seguintes fatos em comparação com a ignição por magneto transistorizado:

Com a ignição eletrônica digital, mas fixando o ângulo de avanço a  $10^\circ$  e um ângulo inicial de  $60^\circ$ , a potência útil média equivalente aumentou aproximadamente 20 % e, usando a mesma ignição e ângulo inicial, mas utilizando o mapa, a potência útil média equivalente aumentou aproximadamente 44 % em relação a ignição por magneto transistorizado.

O consumo médio por período de funcionamento, diminuiu cerca de 4,5 % com a ignição digital fixa e 2,5 % com a ignição digital variável. Já o consumo específico médio diminuiu aproximadamente 20 % com a ignição digital a ângulo fixo e 34 % a ângulo variável.

No futuro, gostaríamos que fosse feito um estudo acerca da influência da implementação dos sistemas de injeção e ignição eletrônicas na vida útil da estrutura original do motor, uma vez que este foi projetado para trabalhar com os sistemas de alimentação a carburador e ignição por magneto transistorizado.

Gostaríamos também que se analisassem as quantidades das frações dos produtos do escapamento sobre tudo o nível de emissão de poluentes do motor funcionando com a ignição eletrônica digital implementada e, para tal, será necessário otimizar o mapa AFR que no presente trabalho não foi possível por falta do sensor sonda  $\lambda$  adequado. Após a afinação, que se explorasse também a função de cálculo da carga do motor a partir do TPS, afim de alargar as opções de aplicação do motor.

No entanto, além das sugestões de trabalhos futuros descritas acima, acreditamos que no que toca aos mapas VE e de avanço de ignição podem existir mais mapas com desempenho igual ou superior aos apresentados neste trabalho.

# Bibliografia

1. D'Amil, A. A. (2016): *Otimização dos Mapas de Injeção e Ignição Eletrónica de um Motor*. Dissertação de mestrado, Universidade da Beira Interior, Covilhã - Portugal.
2. Fernandes, M. L. (2015): *Otimização do Sistema de Injeção Eletrónica de um Motor de Combustão Interna*. Dissertação de mestrado, Universidade da Beira Interior, Covilhã - Portugal.
3. Teixeira, P. F. (2014): *Adaptação de injeção eletrónica em motor alternativo de carburador - Cálculo do consumo específico, binário e potência*. Dissertação de mestrado, Universidade da Beira Interior, Covilhã - Portugal.
4. Martins, J. (2016): *Motores de combustão interna*. 5ª ed. Publindústria Edições Técnicas, Porto - Portugal.
5. Peça, O. J. (2012): *Motor Diesel: Sua aplicação em equipamentos agrícolas*. Universidade de Évora, Portugal.
6. Tillmann, C. A. (2013): *Motores de Combustão Interna e seus Sistemas*. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense, Brasil.
7. Braga, T. G. (2007): *Uma Contribuição ao Controle de Motores de Combustão Interna de Ignição por Centelha na Condição de Marcha Lenta*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.
8. Zinner, K. (1981): *Supercharging of Internal Combustion Engines: Additional Chapter 12*. Springer Berlin Heidelberg, Germany.
9. Petronilho, F. N. (2011): *Projecto de Um Sistema de Gestão Electrónica para Um Motor de Ciclo de 4 Tempos de Ignição por Faisca de Um Veículo Automóvel Utilitário*. Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra, Portugal.
10. Braga, C. N. (2016): *Curso de Eletrónica - Eletrónica Automotiva*. 1ª ed. Instituto NCB, SP - Brasil.
11. SENAI, (2001): *Eletromecânica automotiva - Eletricidade, Sistemas de alimentação em veículos injetados, Ignição convencional e eletrónica*. SENAI, RJ - Brasil.
12. Marques, D. J. (2015): *Caracterização físico-tribológica de materiais de travagem*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Portugal.
13. Oliveira, M. R. (2015): *Implementação de um sistema de gerenciamento eletrônico em um motor Ciclo Otto de baixa cilindrada*. Trabalho de conclusão de Curso, Fatec Santo André, SP - Brasil.

14. Pujatti, P. F. (2007): “*Desenvolvimento de um sistema de gerenciamento eletrônico para motores de ignição por centelha*”. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.
15. Oliveira, L. R. (2015): *Pesquisa, Projeto e Construção de um Sistema de Ignição Sem Distribuidor*. Trabalho de graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá - SP, Brasil.
16. Honda (1998): *Manual de serviços - GX120K1, GX160K1, GX200*. HONDA - Produtos de força, Brasil.
17. Baumgarten, C. (2006): *Mixture Formation in Internal Combustion Engines*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
18. Stone, R. (1999). *Introduction to Internal Combustion Engines*. 3 ed., MACMILLAN PRESS LTD Houndmills, Basingstoke, Hampshire RG21 6XS and London, UK.
19. Heywood, B. J. (1988): *internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill, New York, USA.
20. Lima, L. F., Soares, F. I., Costa, M. M., Silva, F. N., & Sousa, J. P. (2009): *Motores de combustão interna*. Relatório, Faculdade de engenharia, Universidade do Porto, Portugal.
21. Ferguson, R. C., Kirkpatrick, T. A. (2001): *Internal Combustion Engines Applied - Thermosciences*. 2 ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.
22. Varella, A. C., Santos, S. G. (2010). *Noções Básicas de Motores Diesel*. 1ª Ed., Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil.
23. Gill, V. P., Smith, H. J., JR., Ziurys, J. E. (1959): *Fundamentals of internal combustion engines - as applied to Reciprocating, Gas Turbine, and Jet Propulsion Power Plants*. 4 ed, OXFORD & IBH PUBLISHING CO, New Delhi, India.
24. Romanelli, T. (2014): *Motores de Combustão Interna*. Departamento de engenharia de biosistemas, Escola superior de agricultura “Luiz de Queiroz”, Brasil.
25. Benson, S. R., Whitehouse, D. N. (1979): *Internal Combustion Engines*. Vol. 1, Pergamon Press Ltd. Headington Hill Hall, Oxford OX3 OBW, England.
26. Gupta, N., H. (2009): *Fundamentals of Internal Combustion Engine*. 2 ed., PHI Learning Private Limited, New Delhi, India.
27. Isermann, R. (2014): *Engine Modeling and Control - Modeling and Electronic Management of Internal Combustion Engines*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
28. Milhor, E. C. (2002): *Sistema de desenvolvimento para controle eletrônico dos motores de combustão interna do ciclo Otto*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Brasil.
29. Barbosa, S. T. C. (2013): *Caracterização da composição elementar de PM2.5 emitidas por veículos*. Dissertação de mestrado, Universidade de Aveiro, Portugal.
30. Albaladejo, S. F. (2013): *Desenvolvimento de uma unidade de gerenciamento eletrônico para motores de combustão interna do ciclo Otto*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Brasil.

31. Guedes, A. M. (2014): *Estudo de compensadores para válvula borboleta eletrônica automotiva*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, Brasil.
32. Fernandez, O. B. (2006): *Considerações sobre outros empregos do sensor de detonação para o controle eletrônico de motores ciclo Otto utilizando análise espectral*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, Brasil.
33. Arcoumanis, C. (1988): *Internal Combustion Engines*. ACADEMIC PRESS LIMITED, San Diego, USA.
34. Balland, J., Schreurs, B., Peters, M., and Parmentier, M., Schmitt, J. (2013): *A Super Clean Diesel Vehicle for US LEV-III SULEV Category: Second Report; Advanced A/F Control for NOx Reduction and for SCR Heat Up*. Automotive Congress, Lecture Notes in Electrical Engineering 189, SAE-China and FISITA.
35. Ferreira, C. E. (2002): *Sistemas de ignição e elétricos do motor*. AeroTD, Escola de aviação civil, Florianópolis, Brasil.
36. Bosch, (2011): *Ignição - Sistemas convencionais*. Robert Bosch Ltda., Campinas - SP - Brasil.

# Lista de websites consultados

- A.1 Roberto Figueiredo (20/06/2018). *Injeção Eletrônica*. Obtido: <http://www.ebah.pt/content/ABAAABGocAI/injecao-eletronica?part=2>
- A.2 WEG AUTOMAÇÃO (20/06/2018). Obtido: [www.weg.com.br](http://www.weg.com.br)
- A.3 Artur Moreira (25/06/2018): *Curso de injeção eletrônica*. Obtido: <http://www.ebah.pt/content/ABAAABR7sAA/curso-injecao-eletronica?part=2>
- A.4 MegaSquirt, (2015): *MS2/V3.0 Hardware Manual - Megasquirt-2 Product Range*. Obtido: [www.msextra.com](http://www.msextra.com).
- A.5 CODIGOSDTC (31/07/2018). Obtido de: <https://codigosdtc.com/sensor-mat/>; <https://codigosdtc.com/mecanica-automotriz/>
- A.6 Honda (2012). Obtido de: <https://engines.honda.com/models/model-detail/gx120>. Consultado aos 05/08/2018.
- A.7 MegaSquirtMS-II (23/08/2018): *Configuring your MegaSquirt-II™ (or MicroSquirt®) controller*. Obtido: <http://www.megamanual.com/ms2/configure.htm>.
- A.8 MOTORARTE (19/08/2018): *Pastilhas de travão para competição Ferodo*. Obtido de: [http://www.motorarte.com/index.php?page=shop.product\\_details&product\\_id=149&flypage=flypage.tpl&pop=0&option=com\\_virtuemart&Itemid=1&vmcchk=1&Itemid=1](http://www.motorarte.com/index.php?page=shop.product_details&product_id=149&flypage=flypage.tpl&pop=0&option=com_virtuemart&Itemid=1&vmcchk=1&Itemid=1).
- A.9 Contesini, L. (2014): *“Como funciona um carburador?”*. Obtido de: <https://www.flatout.com.br/como-funciona-um-carburador/>.
- A.10 MegaSquirt-II (27/08/2018): *Tuning Your MegaSquirt-II™ (or MicroSquirt®) Controller*. Obtido de: <http://www.megamanual.com/ms2/tune.htm#setup>.
- A.11 BOSCH, (2014): *Catálogo de aplicações de sensores e atuadores para sistemas de injeção eletrônica*. Robert Bosch Ltda., Campinas - SP - Brasil. (também disponível em: [www.bosch.com.br](http://www.bosch.com.br); consultado aos 07/08/2018).
- A.12 Patsko, F. L. (2008): *Tutorial Eletrônica - Aplicações e funcionamento de sensores*. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABSeoAB/tutorial-eletronica-aplicacoes-funcionamento-sensores>. Consultado aos 31/07/2018.
- A.13 CONCAWE (20/03/2018): *Introdução às emissões de carros de passageiros e ciclos de testes*. Disponível em: <https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/2017/09/Portugese-Introducao-as-emissoes-de-carros-de-passageiros.pdf>.
- A.14 microSquirt3 (10/07/2018): *Creating an Initial Spark Table for Tuning*. Obtido de: <http://www.useasydocs.com/theory/spktable.htm>