



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Faculdade de Engenharia

# **Controlo Electrónico de um Motor de Pistões Opostos**

**Pedro António Dias Fernandes**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletromecânica**  
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Francisco Miguel Ribeiro Proença Brójo

**Covilhã, junho de 2019**



# Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos aqueles que se mantiveram ao meu lado durante estes anos todos e que me apoiaram no desenrolar deste trabalho. Gostava de agradecer especialmente aos meus amigos e família por me terem aturado nos meus piores momentos, pois sem o seu apoio não estaria a apresentar este trabalho.

Um grande agradecimento ao Prof. Doutor Francisco Brójo, por todos os conhecimentos transmitidos e por toda a ajuda que me forneceu durante a realização deste trabalho.



# Resumo

Os motores de combustão interna já existem desde o século XIX, e o seu desenvolvimento ao longo deste tempo tem sido impressionante e incrível de se ver. Mudou por completo a maneira como o Homem se deslocava e desenvolvia tarefas até então. Já desde os inícios do motor de combustão interna, que se tenta incluir algum sistema de injeção que permitisse retirar um maior rendimento, mas só durante a metade do século XX é que começaram a surgir sistemas viáveis.

O trabalho aqui desenvolvido pretende demonstrar que é possível obter um maior rendimento, por pouco que seja, de um motor de combustão interna operado por tecnologia mecânica, ao fazer a sua conversão para controlo eletrónico via uma centralina programável. Pretende-se replicar o seu elogiado trabalhar suave, ao mesmo tempo que extraíndo um pouco mais de potência, e utilizando menos combustível.

O motor utilizado em questão, trata-se de um motor desenvolvido pelo Prof. Doutor Jorge Gregório, como resultado de uma tese de doutoramento em 2017.

## Palavras-chave

Motores de Combustão Interna, Controlo Eletrónico, Injeção de Combustível, *Tuning Software*.



# Abstract

Internal combustion engines have been around since the 19th century, and their development over this time has been impressive and incredible to look at. It completely changed the way Man moved and did tasks until then. Since the beginning of internal combustion engines, people have tried to include some injection system, that would allow a higher output, but only during the middle of the XX century it was possible to see viable systems.

The work developed here intends to demonstrate that it is possible to obtain a higher output, even if by a small difference, from an internal combustion engine operated by mechanical technology, when converting it to electronic control via a programmable control unit. It is intended to replicate the commended smooth working, while drawing a little more power, and using less fuel.

The engine used, was developed by Prof. Doctor Jorge Gregório, as a result from his doctorate thesis in 2017.

# Keywords

Internal Combustion Engines, Eletronic Control, Fuel Injection, Tuning Software.



# Índice

1. Introdução	1
1.1 Objetivos	1
2. Estado da Arte	3
2.1. Ciclo de Otto	3
2.1.1. Breve história	3
2.1.2. Ciclo Termodinâmico	4
2.1.3. Funcionamento de um Motor a 4 Tempos	5
2.2. Componentes de um Motor	7
2.3. Sistema de Mistura	11
2.3.1. Carburadores	11
2.3.2. Injeção de Combustível	14
2.4. Sistema de Ignição	17
2.4.1. Vela de Ignição	17
2.4.2. Sistemas de Ignição Mecânicos	19
2.4.3. Sistemas de Ignição Eletrônicos	20
2.5. Parâmetros dos Motores de Combustão Interna	23
2.5.1. Geometria de um Motor	23
2.5.2. Trabalho por Ciclo	24
2.5.3. Eficiência Volumétrica	25
2.5.4. Binário	26
2.5.5. Potência Efetiva	26
2.5.6. Consumo Específico de Combustível	27
2.5.7. Rendimento Global	27
3. Motor e Controlador Eletrônico	29
3.1. Motor Utilizado	29
3.2. MegaSquirt II	33
4. Trabalho Experimental	43
4.1. Alterações Preliminares	43
4.2. Programação da Centralina	52
4.2.1. Calibração de Sensores	53
4.2.2. Configuração de Tabelas de Combustível e Ignição	56
4.3. Equipamento para Extração de Dados	59
4.3.1. Equipamento e Método para Extração de Dados	59
4.3.2. Extração e Tratamento de Dados	60
5. Discussão de Resultados	65
6. Conclusões	69

6.1. Sugestões para Trabalhos Futuros	70
Bibliografia	71
Anexos	73

# Lista de Figuras

Figura 1, Motor de Otto para uso estacionário de 1880. [Extraído de <a href="https://archive.org/details/popularsciencemo18newy">https://archive.org/details/popularsciencemo18newy</a> ] .....	3
Figura 2, Ciclo de Otto (Diagrama a) - Pressão segundo volume, Diagrama b) - Temperatura segundo o curso) [GANESAN, 2007] .....	4
Figura 3, Ilustração do movimento de um motor de 4 tempos. [ <a href="https://shaikmoin.wordpress.com/2013/02/18/petrol-engine/">https://shaikmoin.wordpress.com/2013/02/18/petrol-engine/</a> ].....	5
Figura 4, Ilustração dos componentes principais de um motor a 4 tempos. [Extraído de <a href="https://www.thinglink.com/scene/578150559366774784">https://www.thinglink.com/scene/578150559366774784</a> ] .....	8
Figura 5, Imagem explodida de um Motor de Combustão Interna. [Extraído de <a href="https://tailoutsx.files.wordpress.com/2010/02/exploded20l28.gif">https://tailoutsx.files.wordpress.com/2010/02/exploded20l28.gif</a> ] .....	8
Figura 6, Disposição das válvulas e came numa cabeça de motor [Antal, 1995]. .....	10
Figura 7, Ilustração do funcionamento de um carburador [Taylor,1985]. .....	11
Figura 8, Exemplo de um carburador de injetor fixo [Extraída de <a href="https://img.staticbg.com/thumb/large/oaupload/banggood/images/F4/A9/517e4974-349e-4a93-b331-08385e73cf67.jpg">https://img.staticbg.com/thumb/large/oaupload/banggood/images/F4/A9/517e4974-349e-4a93-b331-08385e73cf67.jpg</a> ]. .....	12
Figura 9, Imagem de um carburador com injetor variável [Extraído de <a href="https://i208.photobucket.com/albums/bb26/caschnd1/DCP_2129.jpg">https://i208.photobucket.com/albums/bb26/caschnd1/DCP_2129.jpg</a> ]. .....	12
Figura 10, Tipos de injeção ( a)- Monoponto, b)- Multiponto, c)- Direta) [Extraída de <a href="https://qph.fs.quoracdn.net/main-qimg-5a39fbc88124719a49fcc623ec4eebdd">https://qph.fs.quoracdn.net/main-qimg-5a39fbc88124719a49fcc623ec4eebdd</a> ].....	15
Figura 11, Esquema de um sistema de Injeção Eletrónica [Extraído de <a href="https://12v.org/urs/FuelSystemSchematic.jpg">https://12v.org/urs/FuelSystemSchematic.jpg</a> ]. .....	16
Figura 12, Ilustração de Velas “quentes” e Velas “frias” [Extraído de BassHuysen 2004].....	18
Figura 13, Sistema de Ignição por Magneto utilizado anteriormente no motor [Foto do autor]. .....	19
Figura 14, Esquema de um Sistema de Ignição com Distribuidor [ <a href="https://www.howacarworks.com/illustration/110/the-ignition-system.base@1x.jpg">https://www.howacarworks.com/illustration/110/the-ignition-system.base@1x.jpg</a> ]. .....	20
Figura 15, Estrutura de um circuito de Bobine Transistorizada. [Extraído de <a href="https://www.shindengen.com/products/electro/motorcycle/dccdi/">https://www.shindengen.com/products/electro/motorcycle/dccdi/</a> ]. .....	21
Figura 16, Estrutura de um circuito de descarga Capacitiva [Extraído de <a href="https://www.shindengen.com/products/electro/motorcycle/dccdi/">https://www.shindengen.com/products/electro/motorcycle/dccdi/</a> ]. .....	22
Figura 17, Parâmetros da Geometria de um Motor [Antal, 1995]. .....	23
Figura 18, Diagrama p - V de um ciclo 4 tempos. [Richard Stones].....	24
Figura 19, Domínio do modelo do motor, corpos das válvulas e respetivas portas [Extraído de Gregório, 2017].....	29
Figura 20, Configuração do motor antes dos testes [Foto de Gregório, 2017]. .....	30
Figura 21, Foto do motor em funcionamento pela primeira vez [Foto de Gregório, 2017]. ....	30

Figura 22, Centralina MegaSquirt MS II distribuída por ExtraEFI [Foto do autor].....	33
Figura 23, Centralina MegaSquirt MS-II sem a caixa [Foto do autor]. .....	34
Figura 24, Esquema de funcionamento de um injetor controlado por uma centralina MegaSquirt [Extraída de MS2]. .....	37
Figura 25, Esquema ilustrativo do método de controlo do injetor [Extraída de MS2]. .....	37
Figura 26, Tubo com conector ligado ao sensor MPX4250 MAP [Foto do autor]. .....	40
Figura 27, Exemplo de um sensor TPS [ <a href="https://www.summitracing.com/int/parts/wsn-481003-gm/overview/">https://www.summitracing.com/int/parts/wsn-481003-gm/overview/</a> ]. .....	42
Figura 28, Sensor de oxigénio disponível comercialmente [ <a href="https://www.race.fi/en/product/44978a/plx-wideband">https://www.race.fi/en/product/44978a/plx-wideband</a> ]. .....	42
Figura 29, Carburador Mikuni original ao motor [Foto do autor]. .....	43
Figura 30, Corpo de borboleta utilizado para este trabalho [Foto do autor]. .....	44
Figura 31, Vista lateral e vista de topo, respetivamente, do coletor desenvolvido em Solidworks [Desenho do autor]. .....	44
Figura 32, Vista de perfil e vista do interior, respetivamente, da peça desenvolvida em Solidworks, para suportar o injetor [Desenho do autor]. .....	45
Figura 33, Coletor terminado com as peças para os injetores soldadas e perfurações para acoplamento de sensores [Foto do autor]. .....	45
Figura 34, Coletor de Admissão com o sensor IAT aplicado, e um conector para o sensor MAP [Foto do autor]. .....	46
Figura 35, Sensor de temperatura de ar de admissão utilizado [Foto do autor]. .....	46
Figura 36, Sensor de Hall montado no sítio do magneto [Foto do autor]. .....	47
Figura 37, Sensor de Temperatura aplicado no Motor [Foto do autor]. .....	48
Figura 38, Conjunto de rodas anteriores [Foto do autor]. .....	48
Figura 39, Engrenagens encomendadas antes de serem maquinadas [Foto do autor]. .....	49
Figura 40, Engrenagens após processo de maquinação [Fotos do autor]. .....	49
Figura 41, Sensor de oxigénio com o respetivo controlador e ecrã [Extraído de <a href="https://i2.wp.com/ldperformance.co.uk/wp-content/uploads/2016/01/7M7A6017.jpg?fit=2048%2C1365&amp;ssl=1">https://i2.wp.com/ldperformance.co.uk/wp-content/uploads/2016/01/7M7A6017.jpg?fit=2048%2C1365&amp;ssl=1</a> ]. .....	50
Figura 42, Cablagem depois de ter sido organizada e modificada [Foto do autor]. .....	51
Figura 43, Introdução de alguns parâmetros no programa <i>TunerStudio</i> [Foto do autor]. .....	52
Figura 44, Calculadora de combustível necessário [Foto do autor]. .....	52
Figura 45, Caixa do injetor com o número identificativo da peça [Foto do autor]. .....	53
Figura 46, Janela do Software para calibrar os termistores [Fotos do autor]. .....	54
Figura 47, Janela do software para calibrar o sensor TPS [Foto do autor]. .....	55
Figura 48, Janela para configuração do sensor de oxigénio [Foto do autor]. .....	56
Figura 49, Ferramenta do <i>TunerStudio</i> para gerar tabelas de combustível [Foto do autor]. ..	56
Figura 50, Parâmetros inseridos para gerar a tabela de ignição [Foto do autor]. .....	57
Figura 51, Tabela de Ignição base [Foto do autor]. .....	58
Figura 52, Janela de configuração do método de faísca [Foto do autor]. .....	58

Figura 53, Banco de Ensaio usado nos testes [Foto do autor]. .....	59
Figura 54, Picos de valores AFR durante a fase de testes [Foto do autor]. .....	60
Figura 55, Binário segundo as Rotações de 4 teste diferentes.....	61
Figura 56, Variação da rotação do motor ao longo do tempo.....	63
Figura 57, Tabela de Combustível Final [Foto do autor].....	64
Figura 58, Comparação entre o Binário produzido por controlo mecânico e controlo eletrónico. .....	65
Figura 59, Comparação entre a Potência produzida por controlo mecânico e controlo eletrónico. .....	66
Figura 60, Comparação entre o Caudal Mássico para controlo mecânico e controlo eletrónico. .....	66
Figura 61, Comparação entre o Consumo Específico para o controlo mecânico e controlo eletrónico. ....	67
Figura 62, Comparação entre o Rendimento Global para controlo mecânico e controlo eletrónico. ....	67
Figura 63, Comparação entre a Eficiência Volumétrica para o controlo mecânico e controlo eletrónico. ....	68



# Lista de Tabelas

Tabela 1, Características do motor de pistões opostos antes da conversão eletrônica [Extraída de Gregório, 2017].	31
Tabela 2, Resultados obtidos do tratamento dos dados experimentais [Gregório, 2017].	32
Tabela 3, Características das Engrenagens Seleccionadas [Catálogo HPC Gears].	49
Tabela 4, Especificações dos valores de fluxo do Injetor utilizado [Extraído de <a href="http://www.robitherobot.com/storm/fuelinjectorguide2.htm">www.robitherobot.com/storm/fuelinjectorguide2.htm</a> ].	53
Tabela 5, Valores de resistência registados para diferentes temperaturas.	54
Tabela 6, Características extraídas do melhor ensaio do motor.	62
Tabela 7, Parâmetros extraídos dos ensaios do motor.	64



# Lista de Acrónimos e Terminologia

PMS / TDC	Ponto Morto Superior
PMI / BDC	Ponto Morto Inferior
Tuning Software	Programa de Ajustagem
WOT	“ <i>Wide Open Throttle</i> ” (Acelerador ao máximo)
MAT	“ <i>Mass Air Temperature</i> ” (Temperatura massa de ar)



# 1. INTRODUÇÃO

O controlo eletrónico de um motor é um assunto normal nos tempos correntes, em termos automobilísticos, mas em termos de motores de combustão de baixa cilindrada como cortavelvas ou bombas de água, ainda se recorre a métodos antiquados como carburadores, e magnetos.

O hábito de entrar num automóvel, e de iniciar o movimento do motor só com o pressionar de um botão é hoje em dia banal, no entanto, em automóveis com certa idade é preciso mais cuidados como pressionar o acelerador ligeiramente, fechar o “ar”, entre outros. Esta simplificação nos tempos atuais deve-se ao aparecimento de unidades de controlo eletrónico, que conseguem controlar vários parâmetros do motor, recorrendo a sensores para monitorizar o comportamento deste. Através do processamento de dados, o computador determina que variáveis tem de alterar de modo a obter um determinado comportamento do motor.

O controlo eletrónico permite ainda economizar combustível ao mesmo tempo que reduz as emissões poluentes e mantém uma potência aceitável, exigência necessária derivada de normas europeias.

## 1.1. Objetivos

O objetivo deste trabalho é observar como o controlo eletrónico pode influenciar o comportamento de um motor, em comparação com o sistema puramente mecânico mais antiquado.

Recorrendo ao controlo eletrónico, é possível monitorizar e controlar vários parâmetros cruciais que afetam o desempenho do motor, possibilitando uma calibração precisa e focada em uma ou várias das referidas características do motor, como por exemplo o seu consumo e potência.

O trabalho torna-se mais apelativo por o objeto de estudo ser um motor alternativo de pistões opostos, fruto de uma tese de doutoramento de Engenharia Aeronáutica, permitindo ver que tipo de desempenho se pode extrair de um motor de pouca cilindrada, de tal configuração, ao ter associado o controlo eletrónico.

Existe ainda o interesse por observar se existe uma grande diferença de potências extraídas entre dois métodos de mistura diferentes.

Para a realização deste trabalho foram determinadas, preliminarmente, certas tarefas essenciais para o estudo em questão:

- Introdução/Estado da arte.
- Dimensionamento conjunto distribuição (rodas dentadas que ligam as cambotas e fazem o sincronismo).
- Desenho alteração coletor admissão para colocar: injetor, MAP e termistor.
- Desenho alteração para colocação sensor de Hall e Potenciômetro da Borboleta,
- Colocação de sensor de oxigênio.
- Mapear injeção e ignição

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1. Ciclo de Otto

#### 2.1.1. Breve história

O engenheiro e inventor alemão Nikolaus Otto, nascido em Holzhausen an der Haide perto de Schlangenbad, Alemanha, construiu e desenvolveu o primeiro motor de combustão interna de quatro tempos em 1876 e determinou as bases para o ciclo teórico que se tornou referência para o funcionamento dos motores por ignição de faísca de hoje em dia.

Otto era um vendedor ambulante e durante uma das suas viagens, encontrou o motor construído por Joseph Lenoir. Construído em 1860, um motor de 18 litros capaz de produzir apenas 2 cv funcionava a gás com uma eficiência de apenas 4%. Ao testar uma réplica do motor de Lenoir, Otto apercebeu-se dos efeitos da compressão de combustível. Durante alguns anos, tentou desenvolver um motor que pudesse comprimir a mistura de combustível antes de a queimar, revolucionário para a época, visto todos os motores da altura explodirem ao tentarem comprimir a mistura de combustível.

Em 1864, Otto em conjunto com Eugen Langen criaram a primeira companhia de produção de motores de combustão interna, N.A. Otto & Cie. Em 1869 a fábrica original ficou sem espaço e mudaram-se para a cidade de Deutz, Alemanha onde a empresa foi renomeada para Gasmotoren-Fabrik Deutz. Na Figura 1 pode ver-se o motor de Otto de 1880.

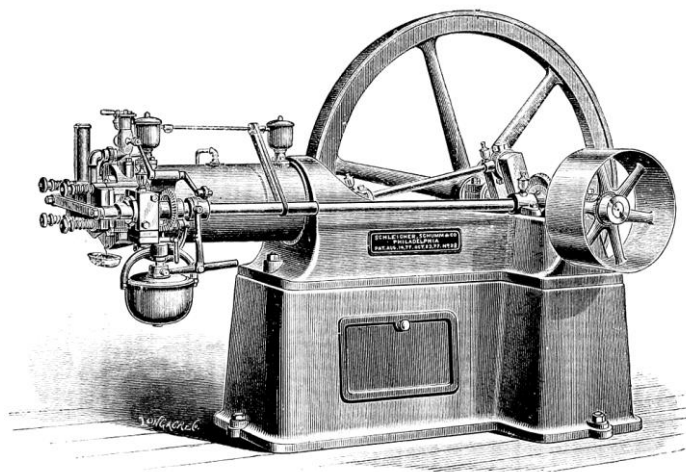


Figura 1, Motor de Otto para uso estacionário de 1880. [Extraído de <https://archive.org/details/popularsciencemo18newy>]

Em 1886 viu a sua patente, que duraria até 1891, ser anulada por já existir um trabalho similar registado em 1861 por um francês chamado de Sr. Alphonse Beau de Rochas, embora Otto não tivesse conhecimento de que tal trabalho existisse. Otto não conseguiu provar que o seu sistema

de carga estratificada era diferente do que aquele descrito no trabalho do Sr. Rochas, o que levou á perda do monopólio e de 1 das 25 patentes que possuía. Em 1889 havia mais de 50 empresas a produzir motores com a configuração de Otto. [Otto archive]

Tal situação não o impediu de expandir o seu negócio e chegou a ter duas fábricas, onde produzia os seus motores. Uma fábrica em Koln, Alemanha e mais tarde, expandiu o seu negócio ao construir outra fábrica em Filadélfia, EUA [Otto motor]. Atualmente a empresa original de Otto ainda opera sob o nome de Deutz-fahr.

### 2.1.2.Ciclo Termodinâmico

O ciclo de Otto divide-se nos seguintes processos termodinâmicos, que se representam na Figura 2, diagrama P-V, em condições de WOT:

- Processo 0-1, admissão adiabática, no qual ar é introduzido no cilindro a pressão constante.
- Processo 1-2, compressão isentrópica do ar que ocorre pelo movimento do pistão do ponto morto inferior para o ponto morto superior.
- Processo 2-3, transferência de calor a volume constante, para o ar de uma fonte externa, enquanto o pistão está no ponto morto superior. Este processo representa o momento em que ocorre a ignição e conseqüente combustão da mistura ar-combustível.
- Processo 3-4, expansão isentrópica (curso de potência).
- Processo 4-1, completa o ciclo por um processo a volume constante no qual é libertado calor do ar, enquanto o pistão está no ponto morto inferior.
- Processo 1-0, escape a pressão constante, que ocorre pelo movimento do pistão do ponto morto inferior para o ponto morto superior.

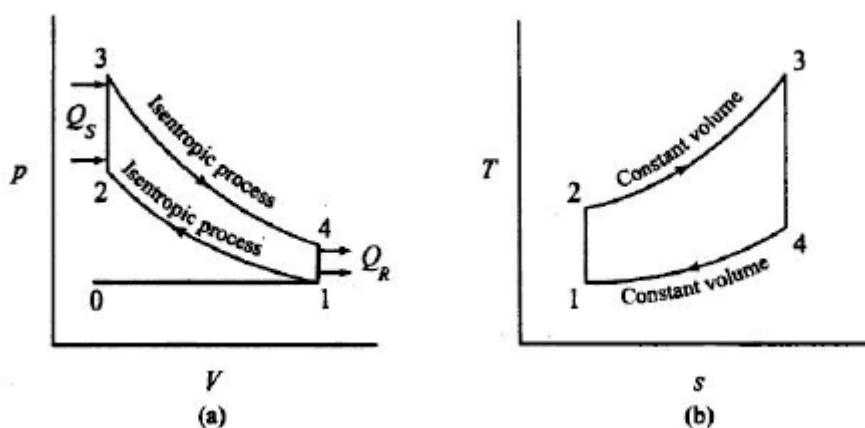


Figura 2, Ciclo de Otto (Diagrama a) - Pressão segundo volume, Diagrama b) - Temperatura segundo o curso) [GANESAN, 2007]

Quando o motor está a funcionar a WOT, os processos 0->1 e 1->0 no diagrama p-V, que representam processos de admissão e escape, têm o seu efeito anulado. [GANESAN, 2007] [Moran e Shapiro, 2006]

### 2.1.3. Funcionamento de um motor a 4 tempos

Os processos termodinâmicos falados anteriormente, aplicados a um motor, mantêm-no em funcionamento percorrendo os 4 tempos: admissão, compressão, combustão e escape; do ciclo de Otto.

Num primeiro tempo a válvula de admissão abre e a mistura de ar-combustível entra para dentro do cilindro devido à sucção provocada pelo movimento de descida do pistão (admissão). Quando o pistão chega ao Ponto Morto Inferior (PMI), a válvula de admissão fecha e o pistão começa a subir comprimindo a mistura dentro do cilindro (compressão); o pistão chega ao Ponto Morto Superior (PMS) onde a compressão é máxima; a vela liberta uma faísca e a mistura explode (combustão) empurrando o pistão até ao PMI (curso de potência). Abre-se a válvula de escape e os gases de escape ainda sob pressão saem para o exterior. A “limpeza” do cilindro faz-se pelo movimento ascendente do pistão que expulsa os gases residuais para fora do cilindro. A válvula de escape fecha quando o pistão chega ao PMS e é então reiniciado o ciclo. Este processo encontra-se representado na Figura 3.

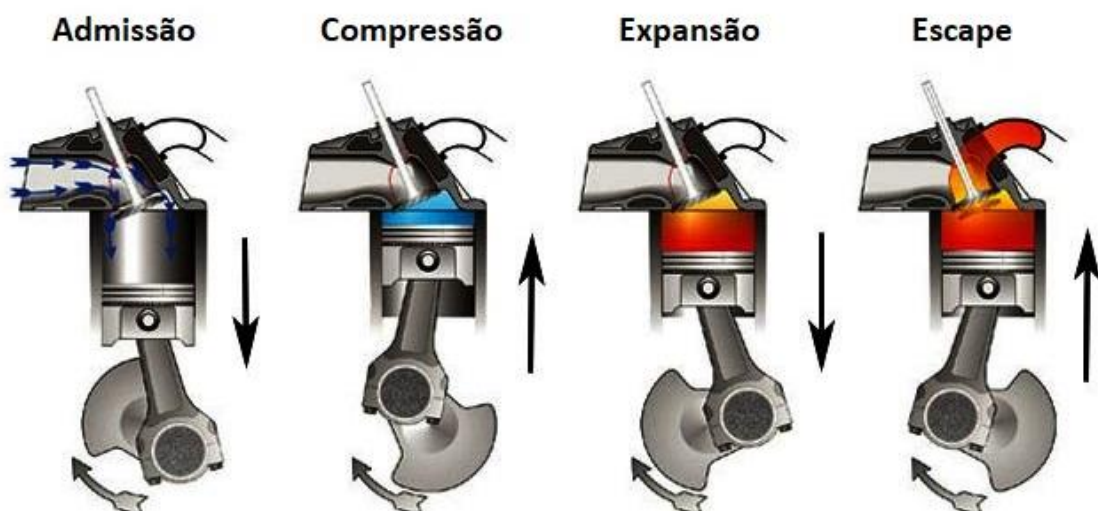


Figura 3, Ilustração do movimento de um motor de 4 tempos.

[<https://shaikmoin.wordpress.com/2013/02/18/petrol-engine/>]

A potência do motor, a eficiência e os níveis de emissões dependem da combustão da mistura ar-combustível no interior do cilindro.

Nos motores de ciclo de Otto convencionais, o combustível e o ar são misturados e comprimidos no cilindro. Em condições normais, a combustão inicia-se no momento em que se dá a faísca da vela, normalmente próximo do ponto final da fase de compressão. A chama propaga-se pela mistura até atingir as paredes interiores do cilindro, consumindo toda a mistura.

O início da combustão tem de ser cuidadosamente determinado de forma a obterem-se os maiores níveis de binário e potência. Qualquer redução do ângulo ótimo de faísca provocará redução no desempenho do motor e qualquer aumento poderá levar à sua autodestruição.

A duração do desenvolvimento da chama e propagação é aproximadamente entre 30° a 90° do eixo da cambota. Se o início da combustão for avançado progressivamente antes do PMS, o trabalho negativo da compressão aumenta, e pode ocorrer o fenómeno de detonação [Heywood, 1988].

## 2.2. Componentes de um Motor

O motor é um sistema mecânico constituído por vários elementos, que consegue transformar energia química em energia mecânica. Essa energia mecânica é criada sob a forma de uma força normal que é depois transformada para produzir um movimento circular, para assim poder mover as rodas de um carro ou um gerador, dependendo da aplicação que se desejar.

Os principais componentes de um motor de quatro tempos, serão listados a seguir com uma breve descrição da sua função (ver Figs. 4 e 5):

- **Cambota** - responsável por transformar o movimento axial do pistão, num movimento circular;
- **Biela** - peça que liga a cambota ao pistão;
- **Pistão** - localizado dentro de um cilindro, tem o objetivo de transmitir força á cambota, através da biela, devido á expansão de gases. Contém segmentos que permitem separar o interior do motor da expansão dos gases de combustão;
- **Bloco do Motor** - peça responsável por alojar e acoplar todos os componentes principais, sendo esta a parte responsável por aguentar a expansão dos gases de combustão e todas as forças produzidas;
- **Cárter** - responsável por tapar a parte inferior do motor, além de atuar como um reservatório de óleo;
- **Cabeça do Motor** - parte superior do motor, que aloja as válvulas, velas de ignição, árvore de cames (quando aplicável), á qual se irá ainda acoplar peças como o coletor de admissão e coletor de escape;
- **Válvulas** - permitem a entrada e saída de mistura ar-combustível e gases de escape, respetivamente, para o cilindro (em alguns motores podem existir válvulas de “descompressão”, que servem para desligar o motor).

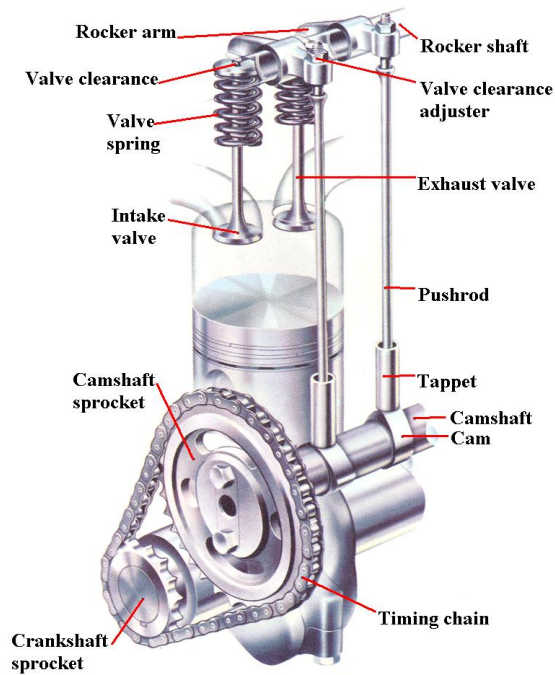


Figura 4, Ilustração dos componentes principais de um motor a 4 tempos. [Extraído de <https://www.thinglink.com/scene/578150559366774784>]

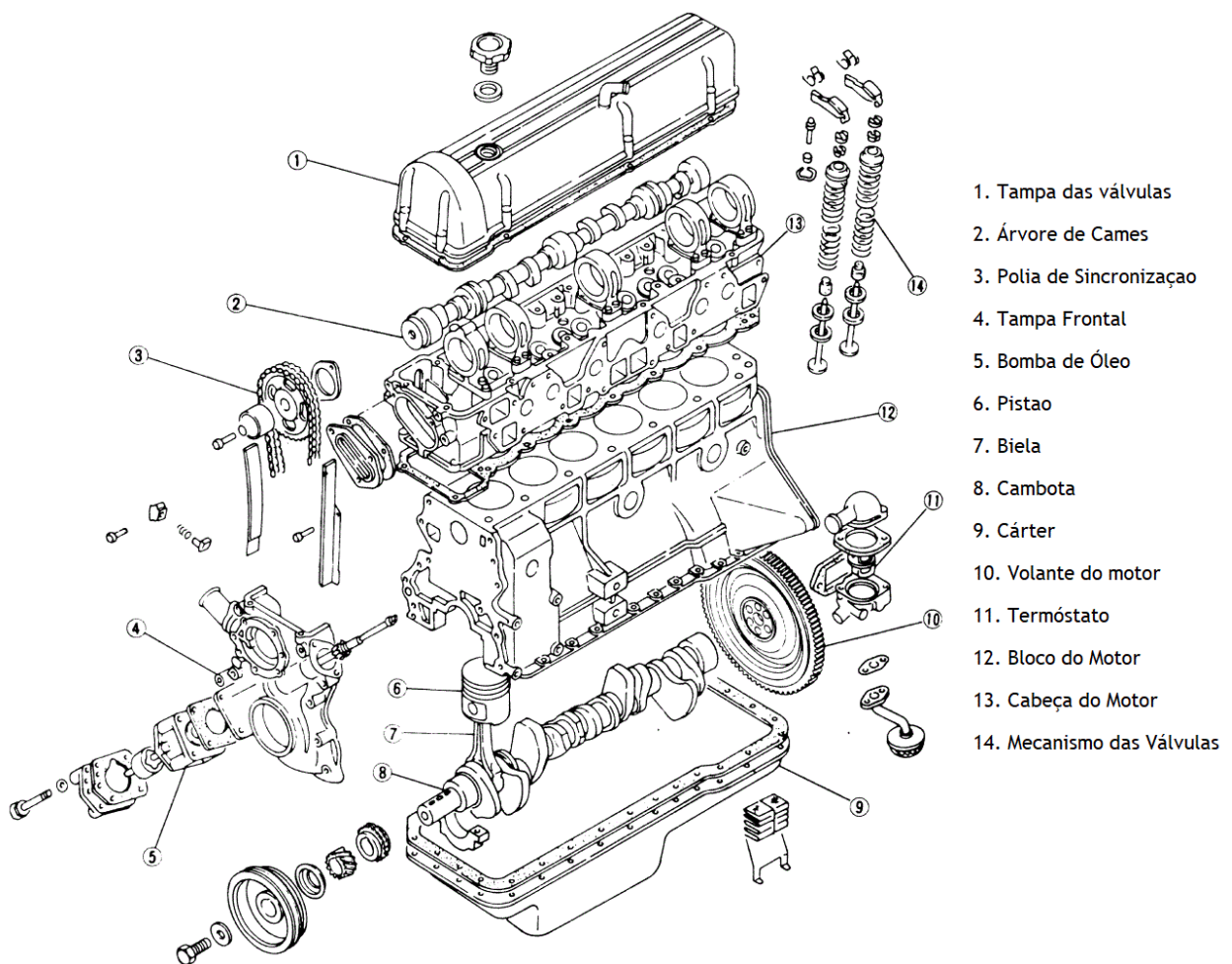


Figura 5, Imagem explodida de um Motor de Combustão Interna. [Extraído de <https://tailoutsx.files.wordpress.com/2010/02/exploded20l28.gif>]

Os cilindros do motor estão contidos no Bloco do Motor. O Bloco do Motor era tradicionalmente feito de ferro fundido por ser um material resistente a desgaste e de baixo custo. Hoje em dia é maioritariamente feito em alumínio com passagens de água para arrefecimento. Os motores com blocos feitos de alumínio possuem “camisas” nos cilindros, que podem ser substituídas quando necessário (em caso de rutura). As camisas são cilindros de metal que se introduzem nos blocos, onde estarão em contacto com os pistões, sofrendo o desgaste por atrito do pistão ou pelo ciclo de combustão em vez do próprio bloco, e podem ainda estar em contacto ou não com um fluido de arrefecimento sendo então denominadas por camisas molhadas ou camisas secas, respetivamente. O uso de camisas permite criar motores mais leves, assim como diminui o custo de manutenção (no caso do cilindro de um motor ter uma fratura), por ser facilmente substituível.

A cambota é tipicamente feita de aço e encontra-se no fundo do bloco acoplada por chumaceiras. A cambota tem um número de chumaceiras maior do que número de cilindros, e possui excêntricos que permitem transformar o movimento axial do pistão, através de bielas, num movimento circular, que depois é transmitido a algum tipo de transmissão.

As bielas estabelecem a ligação entre o pistão e a cambota. Tanto a cambota como as bielas possuem chumaceiras de alumínio ou bronze. A última parte fundamental no fundo do bloco é o cárter que, atua como proteção para o motor (sela a parte inferior do bloco, impede a entrada de impurezas), como ainda serve como um reservatório de óleo para o sistema de lubrificação do motor [Antal, 1995].

Os pistões são geralmente feitos de alumínio embora haja casos em que é usado ferro fundido. Os pistões selam a câmara de combustão e são responsáveis por transmitir a força exercida pela combustão da mistura ar-combustível, à biela que por sua vez transmite à cambota. As bielas podem ser de vários materiais como alumínio, aço ou ferro forjado, e estão acopladas ao pistão por meio de uma cavilha de aço, que é oca de modo a reduzir a massa.

Os pistões em si contêm segmentos, localizados em ranhuras feitas nos pistões, que selam a câmara de combustão, ao prevenir a fuga da expansão de gases, além de impedir a entrada de óleo para a câmara de combustão. Os segmentos superiores são de compressão, e exercem força contra as paredes do cilindro, para prevenir fugas devido à folga entre o pistão e o cilindro. Os segmentos inferiores são, normalmente, para “raspar” o excesso de óleo dos cilindros e devolvê-lo ao cárter.

A cabeça do motor, de alumínio ou ferro fundido, sela o topo do motor/ câmara de combustão e, no caso dos motores de 4 tempos, contêm válvulas com as respetivas passagens embutidas, velas de ignição e poderá ainda conter a árvore de cames na maioria dos casos, e ou injetores de combustível.

Na atualidade usa-se a geometria de válvula na cabeça (ver Fig. 6), por permitir uma câmara de combustão mais compacta, com perdas por calor e tempo de queima menores e ainda melhorar a capacidade de “respiração” (entrada e saída de gases).

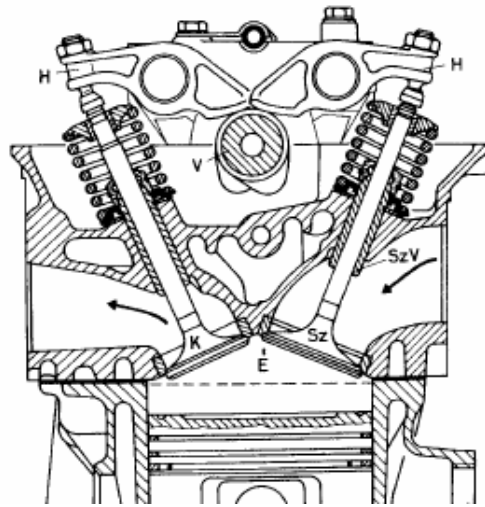


Figura 6, Disposição das válvulas e came numa cabeça de motor [Antal, 1995].

As válvulas são fabricadas com uma liga de aço, porque têm de suportar temperaturas de operação de 700°C ou mais sem colapsarem. Movimentam-se em guias que impedem a entrada de óleo para o escape/admissão, e são acionadas indiretamente por comes, através de “touches” hidráulicas ou através de braços mecânicos “balancins”, ou da combinação dos dois interligados por hastes (depende da geometria de motor, e do fabricante do motor em si) [Antal 1995].

O coletor de admissão e escape, e o distribuidor (em alguns casos) completam o motor.

## 2.3. Sistema de Mistura

O sistema de mistura é constituído por elementos que regulam a quantidade de ar e combustível que entra para dentro do motor, consoante a necessidade do utilizador.

Com o passar dos anos os componentes foram sendo substituídos passando de componentes mecânicos menos reguláveis, a componentes mecânicos mais eficientes, até aos tempos de hoje em dia em que o controlo é inteiramente eletrónico, permitindo ter sempre uma eficiência e comportamento próximo do desejado.

Os dois métodos mais utilizados para controlar a quantidade de ar e combustível, são o carburador e o sistema de injeção eletrónica. A principal diferença entre os dois sistemas é, que o carburador efetua a mistura de maneira mecânica, sendo esta controlada pela “aspiração” do motor, enquanto que um sistema de injeção pulveriza a quantidade específica de combustível, num momento indicado/predefinido, de modo a alcançar uma maior eficiência.

### 2.3.1. Carburadores

O elemento básico ou principal dos carburadores consiste numa passagem de ar de geometria fixa, contendo uma restrição com forma de um tubo de Venturi (ver Fig. 7).

O fluxo de ar é criado pelo tempo de admissão do motor, em que o deslocamento descendente do pistão cria uma pressão relativa negativa à entrada, sendo esta responsável pela entrada da mistura para dentro do motor.

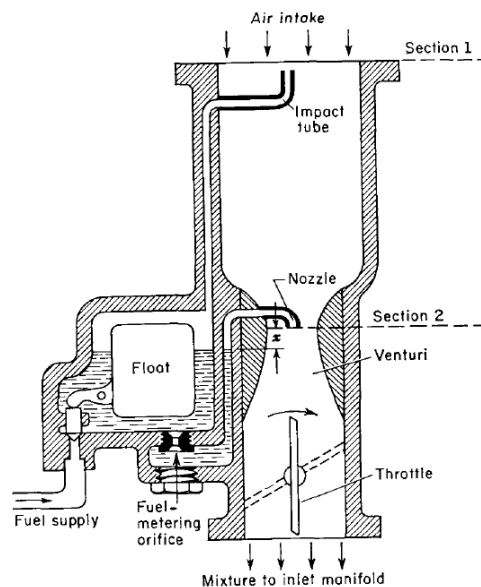


Figura 7, Ilustração do funcionamento de um carburador [Taylor,1985].

O ar passa da entrada do carburador (“intake”) através da passagem tipo tubo de Venturi, cujo propósito é minimizar as perdas de pressão ao longo do sistema. A diferença de pressão do ar entre a entrada e no Venturi é usada para criar e regular o fluxo de combustível [Antal, 1995].

A seguir ao Venturi encontra-se a válvula de borboleta (o acelerador) que, nos motores de ignição por faísca é o controlo principal de potência do motor. O combustível é introduzido e misturado com ar, na garganta do Venturi por meio de uma câmara a nível constante ou câmara flutuante, através de um orifício calibrado conhecido por “gliceur”. O nível constante na câmara flutuante é mantido por meio de uma válvula flutuante. A pressão do combustível é mantida por um tubo que liga a entrada do carburador à cuba, e que utiliza a pressão total à entrada para controlar a pressão de combustível na cuba, de modo a manter a razão próxima da estequiométrica [Taylor, 1985]. Esta descrição é para o caso de um carburador básico com injetor fixo (ver Fig. 8).



Figura 8, Exemplo de um carburador de injetor fixo [Extraída de <https://img.staticbg.com/thumb/large/oaupload/banggood/images/F4/A9/517e4974-349e-4a93-b331-08385e73cf67.jpg>].

Outro tipo de carburador muito usado, utiliza uma configuração com injetor variável, que é “modificado” consoante a posição da válvula do acelerador. O funcionamento é semelhante ao carburador básico com a diferença de que, a passagem no injetor aumenta ou diminui consoante a posição do acelerador através de uma agulha que se movimenta numa secção cónica. Este tipo de carburadores permite uma afinação mais precisa ao contrário do carburador básico, através de parafusos de ajustamento ou através da regulação da agulha (ver Fig. 9) [Stone, 1999].

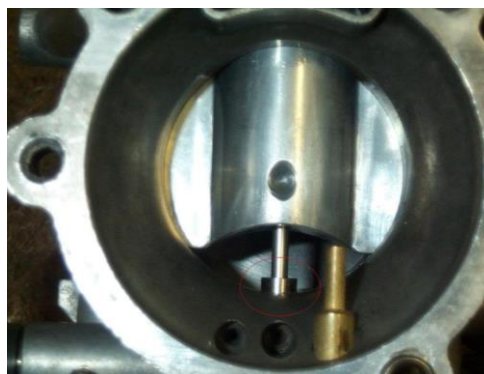


Figura 9, Imagem de um carburador com injetor variável [Extraído de [https://i208.photobucket.com/albums/bb26/caschnd1/DCP\\_2129.jpg](https://i208.photobucket.com/albums/bb26/caschnd1/DCP_2129.jpg)].

Outros modelos de carburador poderão incluir sistemas mais complexos, para compensações de altitude ou arranques a 'frio', onde é necessário mais combustível para iniciar o ciclo de combustão. Poderão ainda incluir o que se denomina por "bombas de aceleração", que previnem hesitação do motor em variações repentinas da posição da borboleta.

Os carburadores são sistemas funcionais o que não leva a dizer que são dos mais eficientes, devido às suas limitações mecânicas. Por ser um sistema com muitos componentes, leva a que haja maior probabilidade de falhas, além de que o sistema de abastecimento e controlo de combustível pode ser facilmente influenciado por impurezas que atravessem os filtros, tornando a mistura de ar-combustível desproporcionada, levando à eventual destruição do motor.

Na década de 1970, os eventuais problemas dos carburadores e uma nova legislação associada às preferências dos consumidores, levaram os fabricantes a construir sistemas mais eficientes de modo a reduzir consumos de combustível e a reduzir contaminação por poluentes.

Os sistemas de injeção acabaram por substituir os antiquados carburadores na maioria dos motores, exceto em casos como motores a 2 tempos e 4 tempos de baixa cilindrada em que a aplicação e o custo não justificava tal conversão [Carb tech].

### **2.3.2. Injeção de Combustível**

O propósito original da injeção de combustível era obter a potência máxima de um motor, mas a exigência para motores de baixos consumos e emissões, tornaram-se as principais influências para o desenvolvimento de sistemas de injeção eletrónicos.

A queda de pressão num carburador, prejudica a eficiência volumétrica de um motor e reduz a potência útil. Problemas de sincronização em aplicações com vários carburadores e distribuição desigualada no coletor podem ser evitados com injeção. Os primeiros sistemas de injeção de combustível eram mecânicos e complexos, mas tornaram-se simples com a introdução da eletrónica.

#### **Breve História dos Sistemas de Injeção**

A empresa Gastmotorenfabrik Deutz começou a produzir as primeiras bombas de pistão para injeção de combustível em 1898. Mas pouco tempo depois, o uso do efeito de Venturi em carburadores, levou a que os sistemas de injeção fossem menos competitivos. Bosch começou o desenvolvimento de sistemas de injeção em 1912, e em 1937 entraram em produção para fins aeronáuticos, onde os carburadores falhavam devido a problemas de congelação do vapor de água existente no ar e alto risco de incêndio. Em 1951 lançou-se o primeiro sistema de injeção para automóveis como opção de origem. Continuaram-se a desenvolver as bombas mecânicas até que, em 1967 apareceu o primeiro sistema de injeção eletrónico. Com o passar do tempo, a tecnologia foi-se desenvolvendo mais, e com a incorporação de sistemas de processamento de dados e sensores que permitiam monitorizar vários parâmetros do motor de maneira eletrónica, alcançou-se os sistemas de injeção que conhecemos hoje em dia [Bosch, 1999].

#### **Geometria de Sistemas de Injeção**

Os sistemas de injeção, geralmente, podem ser usados nas seguintes geometrias (ver Fig. 10) [Stone, 1999]:

- **Injeção Monoponto**

A Injeção de Monoponto usa um só injetor, colocado no corpo da borboleta do acelerador, ou seja, numa estrutura semelhante a um carburador. O facto de se encontrar na mesma posição que um carburador, permitia poupar gastos em coletores de admissão, filtros de ar, entre outros; que em geral permitia que o custo total fosse menor, sendo mais acessível que um sistema multiponto. Foi um sistema usado extensivamente em veículos desde a década de 1980 até meados dos anos 90 [Basshuysen, 2004][Bosch, 1999].

- **Injeção Multiponto**

Em sistemas de injeção multiponto, existe um injetor para cada cilindro sendo mais complexo que um sistema monoponto. Possui a vantagem de permitir sincronizar cada injetor com o tempo de admissão de cada cilindro, ou como o fabricante desejar, permitindo extrair maior potência (até 10%) e eficiência do que o sistema monoponto [Bosch, 1999].

- **Injeção Direta**

Num sistema de injeção direta, o combustível é injetado diretamente na câmara de combustão, ao contrário dos outros sistemas, que injetam o combustível no coletor de admissão. O sistema mais comum é o sistema “Common Rail”. Este tipo de sistema é mais custoso que os sistema de injeção indireta, porque as bombas têm de fornecer maior pressão e os injetores têm de ser mais robustos por estarem expostos a temperaturas e pressões altas, requerendo materiais e componentes eletrônicos mais sofisticados [Basshuysen, 2004].

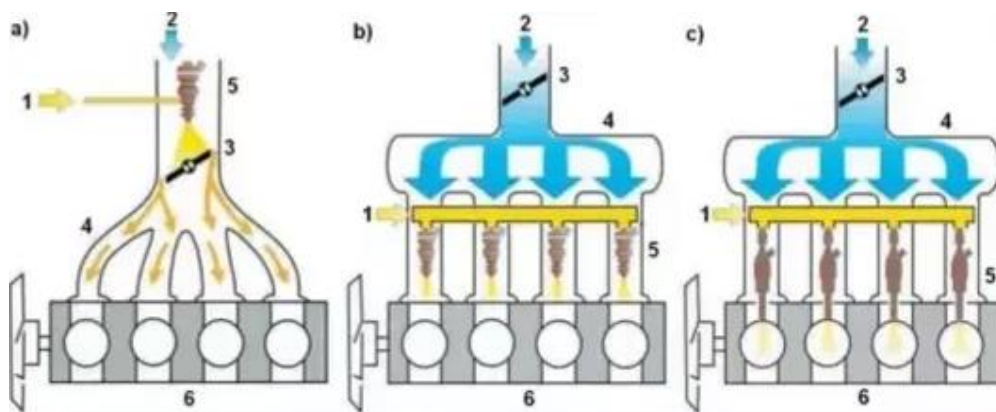


Figura 10, Tipos de injeção ( a)- Monoponto, b)- Multiponto, c)- Direta) [Extraída de <https://qph.fs.quoracdn.net/main-qimg-5a39fbc88124719a49fcc623ec4eebdd>].

Legenda: 1-Injetor de Combustível; 2-Alimentação de ar; 3-Borboleta; 4-Coletor de admissão; 5-Admissão; 6-Motor

- **Injeção Contínua**

A principal diferença entre um sistema de injeção normal (eletrônico e mecânico) e um sistema de injeção contínua (mecânico) é, que o combustível está constantemente a fluir do injetor, mas com taxas de fluxo variáveis, ao contrário dos sistemas de injeção normais em que o combustível é fornecido durante pulsos com intervalos de tempo de abertura reduzidos, a pressão constante.

Este tipo de sistema pode ser Multiponto ou Monoponto, mas não direto. O exemplo mais conhecido e utilizado é o sistema K-Jetronic da Bosch, introduzido em 1974 e utilizado por fabricantes de automóveis tais como BMW, Volkswagen, Mercedes-Benz, Ford, entre outros [Bosch, 1999].

## Funcionamento

A prática comum é usar sistemas eletrônicos monoponto ou multiponto de baixa pressão localizados no coletor de admissão, porque ao operarem diretamente no cilindro têm de suportar condições operativas mais severas, tais como temperaturas elevadas e acumulação de depósitos de combustão, embora a tendência futura seja o uso da injeção direta.

Um sistema de injeção eletrônica típico (multiponto) consiste (ver Fig. 11), normalmente, nos seguintes elementos principais:

- Bomba de combustível.
- Acumulador, Regulador de Pressão.
- Injetor/es.

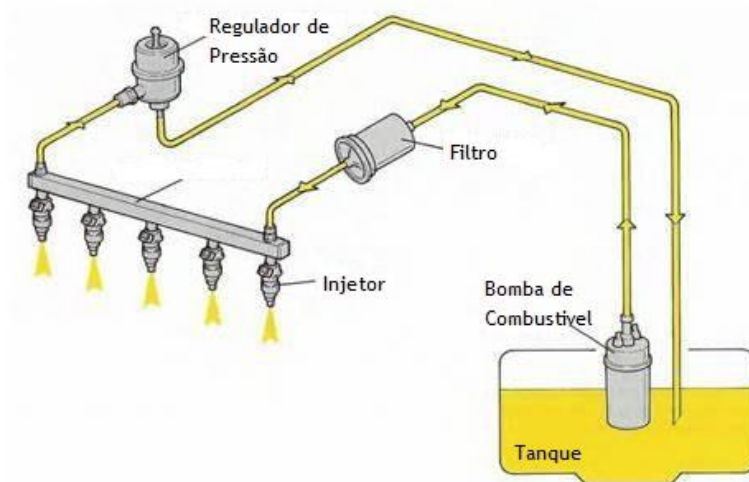


Figura 11, Esquema de um sistema de Injeção Eletrônica [Extraído de <https://12v.org/urs/FuelSystemSchematic.jpg>].

A bomba de combustível localizada junto ao depósito de combustível, ou dentro dele na maioria dos casos, envia combustível sob pressão através dos tubos e filtros que possam existir, até ao tubo de alimentação ou acumulador. O acumulador em si possui uma válvula de pressão que permite manter a pressão de combustível constante para qualquer situação, ao enviar o excesso de combustível de volta para o tanque de combustível.

O acumulador alimenta os injetores e estes, através de um controlo eletrónico, irão pulverizar o combustível no coletor/câmara de combustão (consoante a geometria de injeção) no momento adequado.

Os injetores possuem uma agulha na ponta que é responsável por garantir a pulverização do combustível, quando o solenoide é ativado, ou para impedir injeção/fugas de combustível, quando o solenoide está desativado, através do auxílio de uma mola. Quando o solenoide é ativado, a agulha movimenta-se permitindo a passagem de combustível sob pressão, por pequenos orifícios de modo a garantir a pulverização para o coletor de admissão [Basshuysen, 2004].

## **2.4. Sistema de Ignição**

O sistema de ignição tem um papel vital no funcionamento adequado de um motor. O tempo de ignição afeta o desenvolvimento de pressão no cilindro.

Se a combustão se iniciar demasiado cedo, o trabalho transferido do pistão para os gases no cilindro, ao fim do curso de compressão é demasiado pequeno (reduzindo a pressão máxima do ciclo). Se a combustão se iniciar tarde demais, a pressão máxima do cilindro é também reduzida e o trabalho transferido dos gases para o pistão é inferior.

Existe um tempo de ignição que pode fornecer o binário máximo para uma dada rotação, e fornece ainda potência máxima e consumo específico de combustível reduzido. O tempo de ignição depende da rotação do motor, porque tem de se avançar a ignição de modo a manter o tempo de ignição adequado, devido ao facto da duração do processo de combustão aumentar, em termos de ângulo da cambota.

O tempo de ignição depende ainda da carga porque, quando a carga e a pressão do coletor de admissão diminui, é necessário avançar o tempo de ignição de modo a manter o correto funcionamento do motor [Antal, 1995].

Os sistemas de ignição podem ser diferenciados pelos métodos que usam para gerar a tensão necessária para ocorrer faísca na vela de ignição. Mas por mais diferente que o sistema de ignição seja, existe sempre o mesmo elemento comum: a vela de ignição.

### **2.4.1. Vela de Ignição**

A função da vela de ignição é introduzir a energia necessária à ignição da mistura com combustível através da faísca elétrica entre os seus elétrodos. Em conjunto com outros componentes, a vela deve permitir arranques a frio e garantir funcionamento em contínuo sem falhas (“misfire”) durante aceleração, ao longo de várias horas, durante toda a sua vida útil.

A vela encontra-se localizada na posição mais adequada para a ignição da mistura comprimida de ar-combustível. Em sistemas eletrónicos, a vela pode operar com uma tensão até 30.000 V, tendo que suportar esta condição sem que ocorra o fenómeno denominado por “arco”, ou seja, grande quantidade de energia que se solta (arqueia) para outros componentes através do fio da vela, normalmente. Este fenómeno pode acontecer devido à acumulação de resíduos de carvão, cinza, certas temperaturas de operação, e pode levar a que não exista (uma correta) ignição da mistura.

Em resumo, a vela de ignição tem de suportar pressões elevadas (até 100 bar) sem que ocorram fugas, ser resistente a temperaturas altas (resistente até 1000 °C), e ser capaz de funcionar, mesmo com acumulação de impurezas, durante várias horas, sem que ocorram falhas.

Existem vários tipos de geometrias para velas como, velas “quentes” ou velas “frias” que dependem da temperatura de funcionamento do motor (ver Fig. 12).

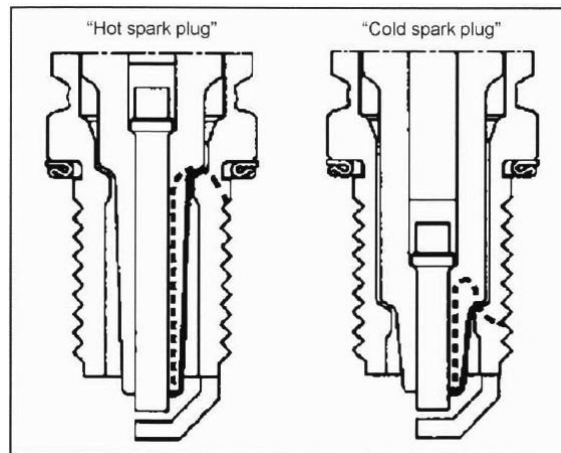


Figura 12, Ilustração de Velas “quentes” e Velas “frias” [Extraído de BassHuysen 2004]

Podem ainda existir velas em que o eletrodo é mais alto, para assim ser atingido pela mistura durante o tempo de admissão do motor.

Ao observar a figura 12, pode-se notar que as velas do tipo quente apresentam um eletrodo mais comprido, criando um caminho mais longo para a dissipação de calor, mantendo a ponta do eletrodo a uma temperatura mais alta. A temperatura elevada permite queimar depósitos de carvão, também conhecida por “self-cleaning temperature” (>400 °C), que se possam formar durante regimes de funcionamento baixos.

As velas de tipo frio, ao contrário das velas de tipo quente, irão apresentar uma zona de transferência mais curta, sendo conseqüentemente a dissipação de calor mais rápida. No entanto, a temperatura de funcionamento da vela chega a ser suficientemente alta para eliminar possíveis depósitos de carvão, em regimes baixos. As velas de tipo frio são mais indicadas para regimes altos [Basshuysen, 2004].

### 2.4.2. Sistemas de Ignição Mecânicos

O sistema de bobine (ver Fig.13) é antigo, mas bastante eficaz, tendo sido introduzido em 1910 e utilizado até ao final do século XX, altura em que se começou a dar preferência a sistemas eletrónicos.

Uma bobine consiste essencialmente num núcleo ferromagnético sobreposto por dois enrolamentos. O enrolamento do secundário é maior que o do primário, chegando a ter 60 vezes mais enrolamentos que o primário. No volante de inércia do motor estão acoplados um ou mais magnetos, que devido à rotação do motor induzem no núcleo da bobine, um fluxo magnético variável. O fluxo magnético variável ao passar pela armadura, irá induzir uma corrente no primário da bobine. A tensão gerada no primário não é suficiente para gerar a faísca entre os eletrodos da vela de ignição. Para atingir uma tensão suficientemente grande, o circuito de carregamento da bobine no primário é interrompido periodicamente, através do movimento do magneto, de modo a que a tensão no primário passe para o enrolamento secundário da bobine.

Dado que este segundo enrolamento possui um número de voltas muito superior ao primário, a tensão gerada no secundário alcança valores de 20 kV, valor este que permite a geração da faísca na vela de ignição. A tensão acumulada é libertada quando o interruptor denominado por platinado (acionado por uma came) abre o circuito [Eduardo, 2017].



Figura 13, Sistema de Ignição por Magneto utilizado anteriormente no motor [Foto do autor].

Os sistemas com distribuidor (ver Fig. 14) são diferentes do magneto no sentido em que a bobine é alimentada por uma bateria em vez de um campo magnético induzido por um íman. A bobine alimenta o distribuidor, que depois alimenta as velas de ignição pela ordem e tempo de ignição corretos. Muitos distribuidores possuem sistemas de avanço de ignição operados a vácuo, isto é, à medida que a velocidade de rotação do motor aumenta, varia a pressão no coletor, sendo esta utilizada como referência para atrasar o tempo de ignição, de modo a manter o tempo de ignição ótimo [Bosch, 1999].

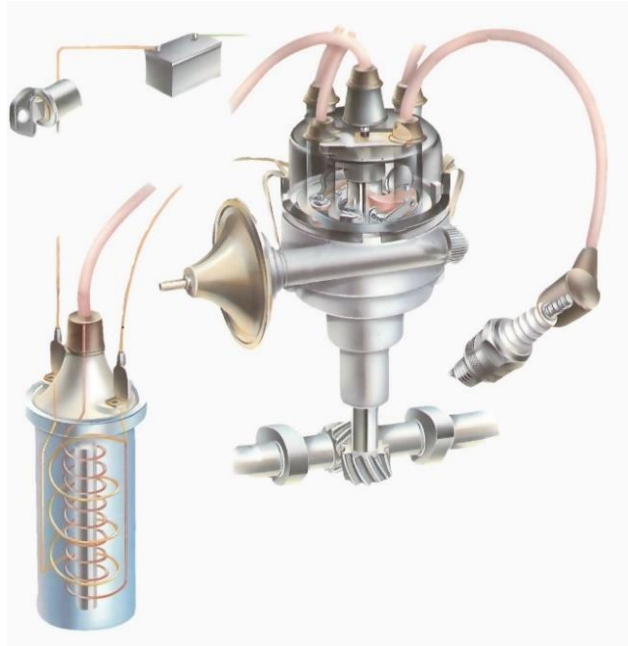


Figura 14, Esquema de um Sistema de Ignição com Distribuidor

[<https://www.howacarworks.com/illustration/110/the-ignition-system.base@1x.jpg>].

No entanto, como qualquer sistema mecânico, estes sistemas sofrem de problemas de desgaste e de limitações mecânicas; problemas estes eliminados pelos sistemas de ignição eletrônicos.

### 2.4.3. Sistemas de Ignição Eletrônicos

Nos tempos atuais utiliza-se um sistema mais avançado, facilmente regulável, e mais compacto conhecido por sistema de ignição eletrônico. Dentro destes podemos encontrar dois tipos:

- Ignição por Bobine Transistorizada ('TCI' Transistorized Coil Ignition)
- Ignição por Descarga Capacitiva ('CDI' Capacitive discharge Ignition)

#### **Ignição por Bobine Transistorizada ('TCI' Transistorized Coil Ignition)**

“Em aplicações automóveis, a necessidade para custos de manutenção de ignição mais baixos, maior vida útil das velas, ignição melhorada para misturas pobres ou diluídas, e maior fiabilidade e vida útil, levou ao uso de sistemas de ignição de bobines que fornecem maior tensão de saída e usam acionamento eletrônico para manter a precisão requerida sem desgaste físico.” (ver Fig. 15) [Antal 1995].

Quando o transistor está ligado, a corrente da bateria passa através do enrolamento primário da bobine de ignição para armazenar energia. Quando o transistor é desligado, a corrente é cortada levando a que haja uma grande variação de correntes, produzindo alta tensão no enrolamento secundário da bobine, levando à produção de faísca na vela.

A diferença entre este sistema e o sistema mais antigo de distribuidor, é a colocação de um sensor de pulsos magnéticos no distribuidor, ligado a um módulo de controlo/ignição, que irá atuar como um platinado eletrónico permitindo a passagem de energia do enrolamento primário para o secundário, produzindo então uma tensão de 35kV que irá alimentar as velas.

A utilização destes sistemas é vantajosa porque, a tensão alta de operação permite o uso de velas com aberturas maiores (cerca de 1mm), levando à possibilidade de a vela operar com uma vasta gama de misturas durante um ciclo de vida maior [Bosch, 1999][Antal, 1995].

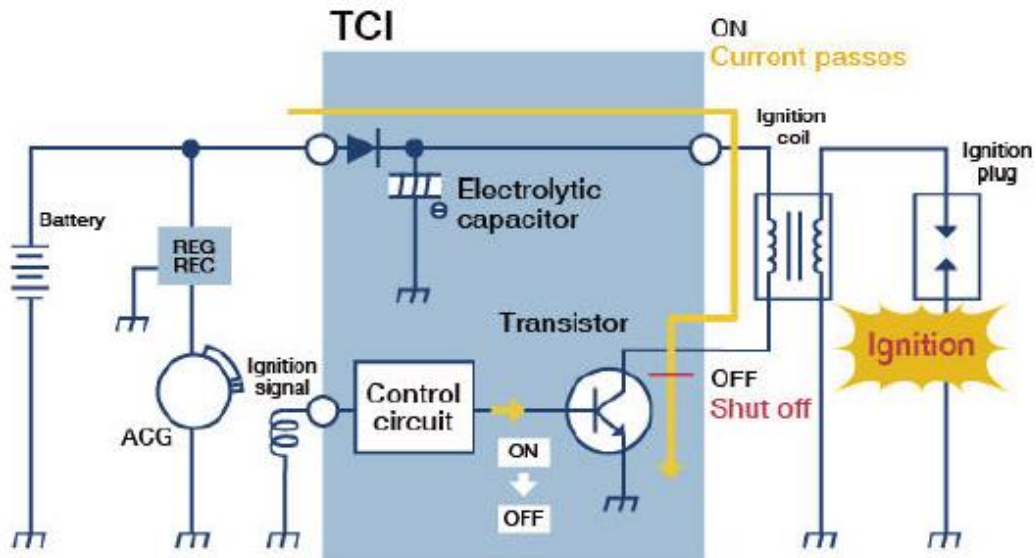


Figura 15, Estrutura de um circuito de Bobine Transistorizada. [Extraído de <https://www.shindengen.com/products/electro/motorcycle/dccdi/>].

### Ignição por Descarga Capacitiva ('CDI' Capacitive Discharge Ignition)

Este sistema usa um condensador, em vez de usar uma bobine de indução, para armazenar a energia de ignição (ver Fig. 16). A impedância e a tensão de carga do condensador determinam a quantidade de energia armazenada. O transformador de ignição eleva a tensão primária, através da descarga do condensador por um tiristor, para as tensões requeridas pela vela.

Consegue ser um sistema compacto pois contém o condensador, tiristor, aparelho de carga (converte a tensão da bateria em 300-500V por meio de pulsos via transformador), gerador de pulsos e unidade de controlo, dentro de uma só caixa.

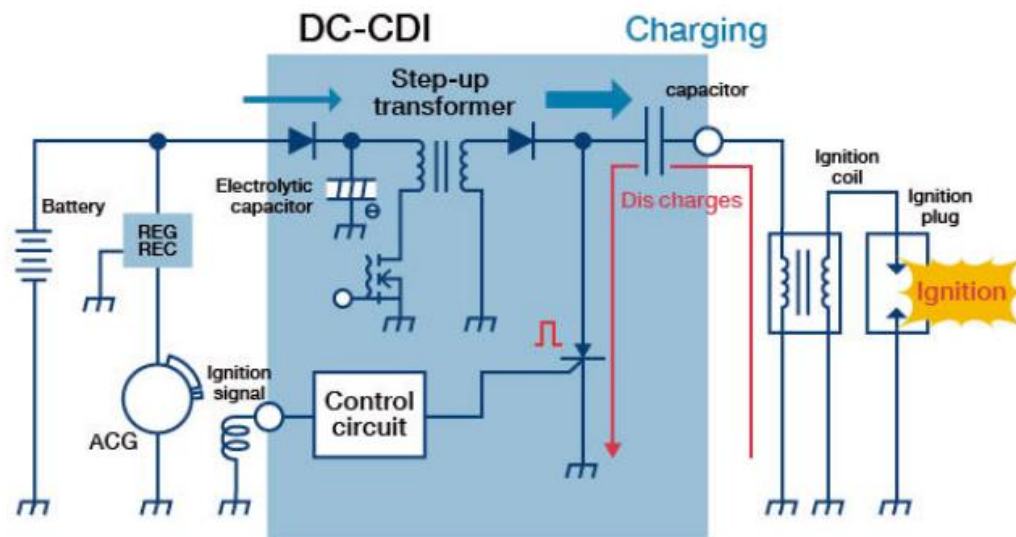


Figura 16, Estrutura de um circuito de descarga Capacitiva [Extraído de <https://www.shindengen.com/products/electro/motorcycle/dccdi/>].

Este método permitiu melhorias significativas, em termos de fiabilidade, ao eliminar o desgaste associado ao contacto entre o excêntrico e os platinados, facilitar o ajuste do avanço e melhorar a segurança da ignição a rotações mais elevadas [Antal 1995].

## 2.5. Parâmetros dos Motores de Combustão Interna

### 2.5.1. Geometria de um Motor

A geometria básica de um motor é apresentada na Figura 17.

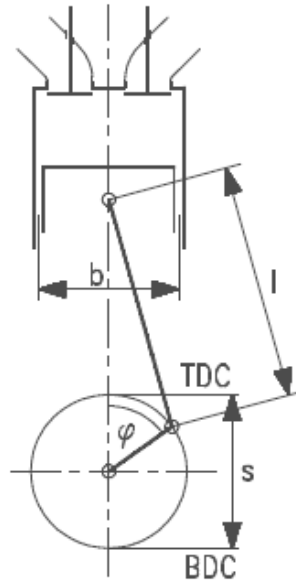


Figura 17, Parâmetros da Geometria de um Motor [Antal, 1995].

Legenda:

b - Diâmetro do cilindro ('bore') [mm]

l - Comprimento da Biela [mm]

S - Curso do Pistão ('Stroke') [mm]

$\varphi$  - Ângulo da cambota a partir do PMS ('TDC' ou *Top Dead Center*) [°]

A rotação do motor, N (rot/s), é definida como sendo a velocidade de rotação do eixo da cambota em rotações por segundo, e é, geralmente, medida diretamente no eixo do dinamômetro por métodos mecânicos ou eletrônicos

$$N = \text{Rotações / Segundos [Hz]} \quad (2.1)$$

Outra forma de expressar a rotação do motor é utilizar a frequência angular do motor:

$$\omega = 2\pi \times N \text{ [rad/s]} \quad (2.2)$$

### 2.5.2. Trabalho por Ciclo

A combustão promove um aumento de pressão e temperatura dentro do cilindro, causando uma expansão dos gases. Esta pressão desenvolvida no cilindro juntamente com o volume correspondente podem ser expressos no diagrama (P,V), que é usado para calcular o trabalho transferido dos gases para o êmbolo. No diagrama (P,V), pode-se calcular o trabalho expresso pela equação 2.3 [Heywood, 1988].

$$W_c = \int p \, dV \quad (2.3)$$

Onde:

$W_c$  - Trabalho [J]

$p$  - Pressão no interior do cilindro [Pa]

$dV$  - Variação do volume do cilindro [m<sup>3</sup>]

Analisando a figura 18, o trabalho por ciclo pode ser classificado como:

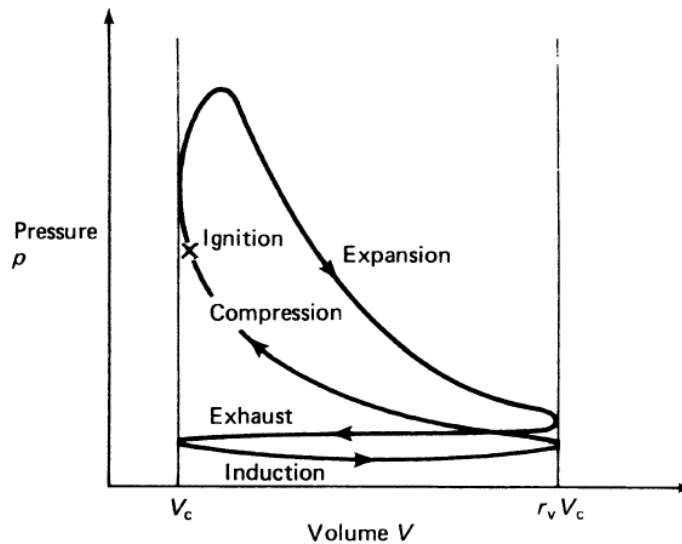


Figura 18, Diagrama p - V de um ciclo 4 tempos. [Richard Stones]

- Trabalho bruto por ciclo - definido pelo trabalho transferido para o êmbolo pelos gases nos cursos de compressão e expansão;
- Trabalho líquido por ciclo - definido pelo trabalho que é considerado no ciclo completo num motor de 4 tempos, que por sua vez é representado pela área ocupada pelo ciclo de escape e admissão.

### 2.5.3. Eficiência Volumétrica

O parâmetro utilizado para determinar a eficiência que o motor possui para sugar a massa de ar atmosférica é denominado de eficiência volumétrica ( $\eta_v$ ). A eficiência volumétrica é obtida a partir do caudal mássico de ar na conduta de admissão, dividida pela taxa a que o volume de ar é movimentado pelo pistão [Heywood, 1988].

$$\eta_v = (2 \cdot m_a) / (\rho_{ai} \times V_d \times N) \times 100 [\%] \quad (2.4)$$

Onde:

$V_d$  - Volume deslocado pelo pistão entre o PMI e PMS [ $286 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ ]

$N$  - Velocidade de rotação do motor [rot/s]

$\rho_{ai}$  - Massa específica do ar de admissão [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$m_a$  - Caudal mássico da admissão [ $\text{kg}/\text{s}$ ]

A potência do motor depende principalmente da quantidade de ar admitida, ou seja, quanto maior a quantidade de ar introduzida no motor, maior será a quantidade de combustível que poderá queimar, e como consequência maior será a energia e potência extraídas.

A eficiência volumétrica baseada neste método é designada de eficiência volumétrica global [Heywood, 2008]. De modo a facilitar o cálculo na fase de tratamento de dados, pode-se ainda escrever a equação para a eficiência volumétrica da seguinte forma:

$$\eta_v = (n_r \times 60 \times m_{fs} \times AFR) / (\rho_{ai} \times V_d \times N) \times 100 [\%] \quad (2.5)$$

Onde:

$n_r$  - Assume o valor de 2, por ser um motor 4 tempos.

$AFR$  - Relação ar-combustível.

$m_{fs}$  - Massa de combustível.

As variáveis que podem influenciar o rendimento volumétrico são:

- Tempos de abertura e fecho das válvulas;
- A geometria do sistema de admissão e escape;
- Os gases residuais presentes no cilindro depois do escape contribuem para diminuir a massa específica da mistura;
- Relação de compressão;
- Rotação do motor.

#### 2.5.4. Binário

É uma medida utilizada para avaliar a capacidade de um motor produzir trabalho. Medido normalmente por dinamômetros, pode ser calculado ao registrar, para uma certa carga, a força  $F$  [N] que exerce num braço de comprimento definido ligado ao dinamómetro [Heywood 1988].

$$T = F \times b \text{ [N.m]} \quad (2.6)$$

Onde:

$F$  - Força exercida pelo motor [N]

$b$  - Distância do centro do eixo do dinamómetro até ao ponto em que é exercida a força [m]

#### 2.5.5. Potência Efetiva

A potência pode ser calculada em qualquer estado do motor recorrendo ao binário e à rotação do motor:

$$P_e = T \cdot \omega = T \times 2 \times \pi \times (n / 60) \times 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (2.7)$$

Onde:

$n$  - Rotações por minuto

Segundo esta equação, um aumento de potência pode ser alcançado ao aumentar o binário ou a velocidade de rotação. Se a potência efetiva,  $P_e$  estiver relacionada com o volume varrido,  $V_h$ , quer dizer que se trata de potência específica extraída  $P_l$ , ou potência por litro de deslocamento [Basshuysen ].

$$P_l = P_e / V_h \quad (2.8)$$

### 2.5.6. Consumo Específico de Combustível

O consumo de combustível pode ser medido em fluxo de massa por unidade de tempo, mas o parâmetro mais utilizado para determinar o consumo é o consumo específico de combustível que é a massa de combustível por unidade de potência útil produzida. Este parâmetro representa a eficiência com que o motor converte a energia do combustível em trabalho mecânico, ou seja, é a taxa de consumo de combustível pelo motor, dividido pela potência efetiva [Heywood, 1988].

Mas para ser calculado é preciso primeiro saber a equação para o caudal mássico de combustível, apresentado na equação 2.9:

$$mfh = ( mf \times 10^3 ) / \Delta t \times 3600 \text{ [g/h]} \quad (2.9)$$

Através dos resultados obtidos da equação 2.9, podemos então calcular o consumo específico de combustível, dado pela equação 2.10:

$$sfc = mfh / P \text{ [g/kW.h]} \quad (2.10)$$

Onde:

mf - Caudal de combustível.

P - Potência.

### 2.5.7. Rendimento Global

O rendimento global é definido pela relação entre a potência efetiva ao freio e a potência térmica fornecida ao motor. A potência térmica é dada pelo produto do caudal mássico de combustível, pelo poder calorífico inferior, PCI, do combustível.

$$\eta_g = Pe / ( mf \times PCI ) \times 100 \text{ [%]} \quad (2.11)$$

Para este trabalho, o poder calorífico do combustível será considerado 44 MJ/kg [Heywood, 1988]. A equação (2.11) pode ainda ser expressa segundo o consumo específico de combustível.

$$\eta_g = 1 / ( Csf \times PCI ) \times 100 \text{ [%]} \quad (2.12)$$



## 3. Motor e Controlador Eletrónico

### 3.1. Motor Utilizado

O motor alternativo de combustão interna de pistões opostos utilizado para este trabalho funciona a 4 tempos com ignição por faísca, com 286 cm<sup>3</sup> de cilindrada e desenvolve 7,2 cv de potência máxima às 4000 rpm.

O motor tem uma configuração de dupla cambota à semelhança do motor Junkers Jumo 205, mas a funcionar numa posição horizontal com sincronização de distribuição e transmissão de potência através de um conjunto de engrenagens composto por quatro rodas dentadas de dentes direitos.

O motor foi construído com dois motores da marca Robin America, Inc. Modelo EY15, que eram de origem alimentados a gasolina por dois carburadores Mikuni. O motor convertido manteve os carburadores de origem colocados de ambos os lados do motor. Possui um sistema de ignição por magneto transistorizado. A zona central do cilindro tem uma câmara de combustão com volume de 51 cm<sup>3</sup>, constituída pelo espaço entre os pontos mortos superiores de ambos os pistões e a câmara lateral onde se encontram as válvulas de admissão, válvulas de escape e a vela de ignição (ver Fig. 19).

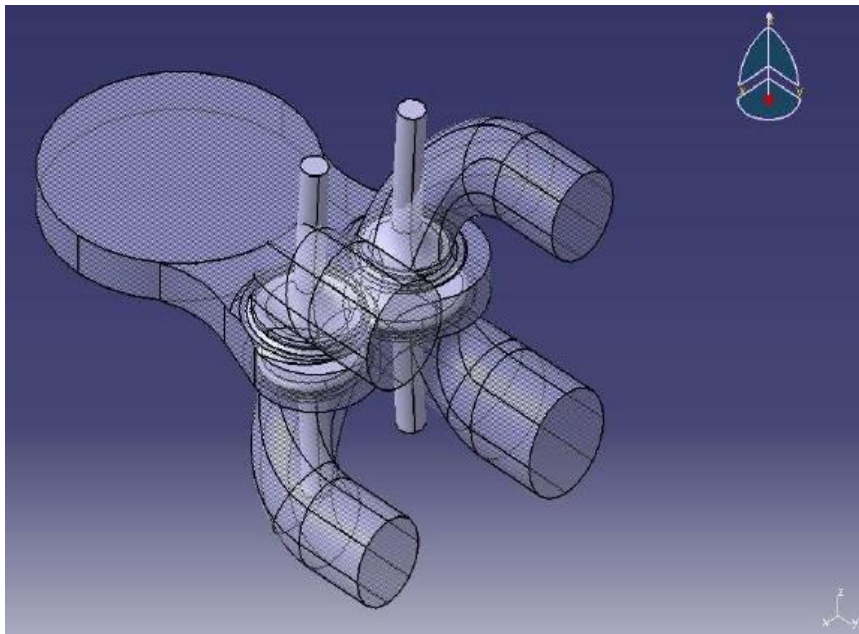


Figura 19, Domínio do modelo do motor, corpos das válvulas e respetivas portas [Extraído de Gregório, 2017].

“Para completar a descrição das soluções encontradas mostra-se uma foto do motor na configuração final, antes da realização dos testes preliminares de funcionamento, com os carburadores colocados, volantes de inércia, coletores de escape e o depósito de gasolina. A flange da tomada de força do motor foi montada sobre o veio da tomada de força (rotor da bomba de água) de uma das cambotas acoplada à roda dentada desse veio motor. O trem de engrenagens encarrega-se da transmissão de potência desde a outra cambota.” (ver Figs. 20 e 21) [Gregório, 2017].



Figura 20, Configuração do motor antes dos testes [Foto de Gregório, 2017].



Figura 21, Foto do motor em funcionamento pela primeira vez [Foto de Gregório, 2017].

A tabela 1 apresenta as características do motor utilizado para este trabalho [Gregório, 2017], e a tabela 2 apresenta os parâmetros do motor obtidos do tratamento dos dados experimentais [Gregório, 2017].

Tabela 1, Características do motor de pistões opostos antes da conversão eletrônica [Extraída de Gregório, 2017].

Descrição	Característica
Marca e modelo	UBI/UDI - OPE-BGX286
Tipo	Monocilíndrico; pistões opostos; dupla cambota; horizontal
Ciclo	Ciclo Otto, quatro tempos
Ignição	Por faísca (Uma vela de ignição)
Diâmetro x curso (mm)	63x46x2 (92)
Cilindrada (cm <sup>3</sup> )	143x2=286
Relação volumétrica de compressão	6,6
Válvulas	4 Laterais no bloco do motor
Dimensões da cabeça das válvulas (mm)	Admissão - 27; Escape - 23
Potência máxima kW (HP)/rpm	5,4 (7,2) / 4000
Potência em contínuo kW (HP)/rpm	4,7 (6,3) / 3200 5,3 (7,1) / 3600
Binário máximo N.m (kgf.m)/rpm	15 (1,53) / 2200 - 2400
Sentido de rotação na tomada de força	Sentido contrário ao dos ponteiros do relógio
Combustível	Gasolina
Alimentação	Dois carburadores Mikuni
Consumo específico (g/kWh)	315 (entre as 3200 e as 3600 rpm)
Capacidade do reservatório de combustível (L)	2,8
Capacidade do óleo lubrificante (L)	2x0,4
Sistema de lubrificação	Chapinhagem
Sistema de ignição	Magneto transistorizado
Sistema de arranque	Arranque retrátil (recoil starter)
Sistema de arrefecimento	Ar forçado
Peso (kg)	38
Distância entre eixos (mm)	270
Dimensões CxLxA/LxWxH (mm)	530x260x250
Nota: sem escapes carburadores ou depósito	

Segundo os dados experimentais [Gregório, 2017], obtidos com carburador, conclui-se que o binário máximo extraído deste motor é de 15 Nm. Este facto levou a que se tivesse de redimensionar o conjunto de rodas dentadas, de modo a evitar ruturas ou falhas durante a parte experimental visto que se pretende obter binários mais elevados com a introdução da injeção e ignição eletrónicas.

Tabela 2, Resultados obtidos do tratamento dos dados experimentais [Gregório, 2017].

Velocidade de Rotação [rpm]	Binário [Nm]	Potência [kW]	Caudal mássico horário [g/h]	Consumo Específico [g/(kW.h)]	Rendimento Global [%]	Eficiência Volumétrica [%]
1600	10	1,7	738,7	489,9	16,70	66,1
2000	14	2,9	1037,2	353,7	23,13	74,3
2200	15	3,5	1137,9	329,3	24,85	74,1
2400	15	3,8	1238,3	328,5	24,91	73,9
2800	14	4,1	1428,1	347,9	23,52	73,0
3200	14	4,7	1436,4	306,2	26,72	64,3
3600	14	5,3	1703,7	322,8	25,35	67,8
4000	13	5,4	1958,5	359,7	22,75	70,1
4400	11	5,1	2101,6	414,6	19,73	68,4

Estes dados serão depois usados como comparação, entre o funcionamento mecânico e o funcionamento eletronicamente controlado do motor.

### 3.2. MegaSquirt II

Uma centralina é um dispositivo eletrônico que permite controlar diversos dispositivos (mecânicos e elétricos) do motor. É um dispositivo imprescindível, atualmente, na construção de um carro, devido às exigências de emissões baixas e potências de motor altas. São dois temas que colidem, pois para emissões baixas tem de se perder potência, e para se ter potências altas, não se consegue ter emissões baixas. Tem de se procurar um intermédio, e com recurso a instrumentos eletrónicos é possível ter o melhor dos “dois mundos”.

De modo a que a centralina tenha controlo sobre o motor, é necessário que o motor disponibilize diversas informações sobre o seu funcionamento. O motor em si não é capaz de tal proeza mas através de sensores eletrónicos é possível determinar parâmetros como temperatura do motor, temperatura do ar na admissão, o caudal de ar no coletor de admissão, a posição do acelerador, entre outras. A centralina recebe estes parâmetros segundo a forma de uma tensão variável, depois decifrada pela centralina para determinar se deve injetar mais combustível para o motor ou se deve retardar o tempo de ignição, por exemplo. De uma maneira resumida, um bom controlo do motor e bom funcionamento da centralina, depende de forma primária dos sensores utilizados para registar os parâmetros.

Para a realização do trabalho experimental, utilizou-se uma centralina designada por MegaSquirt II, obtida através do site [www.extraEFI.co.uk](http://www.extraEFI.co.uk). (ver Fig. 22).



Figura 22, Centralina MegaSquirt MS II distribuída por ExtraEFI [Foto do autor]

## Funcionamento da Centralina

Os componentes internos principais da centralina (“hardware”) são (ver Fig. 23):

- Placa base, responsável para alojar e fazer as ligações entre os diversos componentes principais.
- Um processador (CPU), responsável pelos processos de cálculo (de 24 MHz para este caso).
- Uma porta série, que permite a ligação entre um computador (através do *Tuning Software*) e o controlador, permitindo a leitura e escrita de parâmetros neste.
- Fonte de alimentação, responsável por manter uma tensão constante de 5 Volts que alimentará os outros componentes do *hardware*.
- Diversos circuitos para sinais de entrada, como condensadores, resistências, díodos, um sensor MAP MPX4250, pré-instalado, e um isolante para o sinal da ignição.
- Diversas saídas para controlar injetores e LEDs presentes na caixa que protege a placa mãe do controlador.

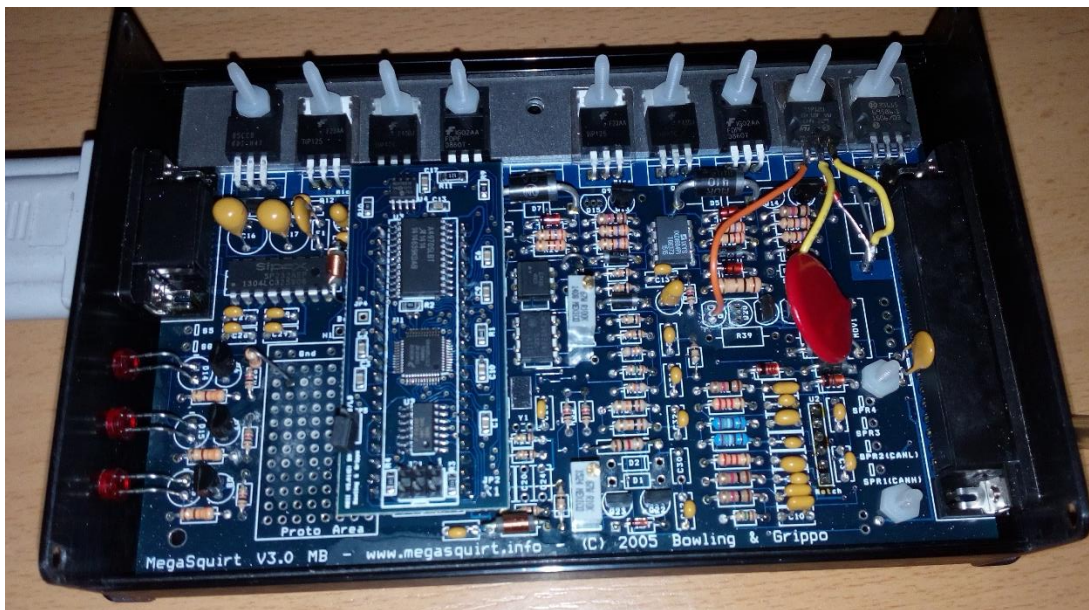


Figura 23, Centralina MegaSquirt MS-II sem a caixa [Foto do autor].

O processador é controlado por um software gravado na memória não volátil do processador (tipo de memória que não se perde quando se desliga a alimentação). Utiliza linguagem *Assembly* para escrever a memória. Uma outra parte da memória do processador encontra-se gravada na BIOS, e esta é responsável por traduzir e guardar novas versões de software que possam vir a ser carregadas através da porta série.

O software utiliza um algoritmo que analisa os sinais de entrada (inputs) e calcula os sinais de saída (outputs). Os sinais de entrada são tensões elétricas, do tipo digital (0 ou 1) ou do tipo analógico (tensão variável).

O processador lê um sinal de 5 volts como sendo On, ou True, e um sinal de 0 volts como Off, ou False. As saídas possuem dois estados, On e Off, e são controlados por um bit que pode assumir os valores 1 e 0 respetivamente. Para o valor do bit = 1, a saída encontra-se ligada, existindo uma carga elétrica a alcançar o componente. Para desligar esta carga, o valor do bit passa a 0, sendo a tensão que alcança o componente aproximadamente zero. Podem ainda existir alguns componentes que apresentam uma alimentação externa, sendo que nestes casos o sinal fornecido pela centralina funciona apenas como um “interruptor”.

Os controladores MegaSquirt calculam a quantidade de combustível necessário a injetar, ao ter em conta diversos fatores que influenciam os cálculos realizados pelo processador:

- Lei dos Gases Perfeitos, utilizada pelo software, que oferece uma relação entre a quantidade, pressão, volume e temperatura de ar a entrar no motor.
- Valores medidos por sensores que controlam o funcionamento do motor (por exemplo, o valor da pressão no coletor de admissão, temperatura do motor, as rotações por minuto, entre outros).
- Parâmetros de calibração, modificáveis através do *Tuning Software* (por exemplo, o tempo de abertura do injetor e o combustível necessário).

A análise destes parâmetros e fatores permite à centralina determinar o Pulso de Injeção (Pulse Width) que será maior, para injeção de mais combustível e menor para a injeção de menos combustível.

### **Lei dos Gases Perfeitos**

As equações que permitem o cálculo do valor do Pulso de Injeção baseiam-se inicialmente na equação da Equação dos Gases Perfeitos.

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (3.1)$$

**P** - Pressão [Pa]

**V** - Volume [m<sup>3</sup>]

**n** - Número de moles (que está relacionado com a massa do gás, 1 mol = 6.023x10<sup>23</sup> moléculas de gás, n é então a relação entre a massa, gramas, e a massa molar, MM)

**R** - Constante universal dos gases perfeitos

**T** - Temperatura Absoluta [Kelvin]

De modo a sabermos quanto combustível injetar, precisamos de saber quanto ar entra no motor de modo a conseguir obter uma mistura quimicamente correta (mistura estequiométrica). Por isso, para um motor com injeção eletrónica utiliza-se sensores para determinar a pressão e temperatura do ar no coletor de admissão.

A eficiência volumétrica (VE) [%], relaciona a pressão no cilindro com a pressão no coletor de admissão. Sabendo o volume do curso do motor é então possível calcular a massa de ar dentro do cilindro. Deste modo, pode efetuar-se o cálculo da Massa de Ar (M), a partir da equação da Lei dos Gases Perfeitos:

$$n = ( P \cdot V ) / ( R \cdot T ) \quad (3.2)$$

$$M = n \times MM \Leftrightarrow M = (( P \cdot V ) / ( R \cdot T )) \times MM_{air} \quad (3.3)$$

$$M = (( VE \times MAP \times CYL\_DISP ) / ( R \times (IAT + 273) )) \times MM_{air} \quad (3.4)$$

Onde:

**P** = **VE x MAP** - Pressão no cilindro [KPa]

**VE** - Eficiência Volumétrica

**MAP** - Pressão no coletor de admissão [KPa]

**V** = **CYL\_DISP** - Volume do curso do motor [dm<sup>3</sup>]

**R** = 8,3143510 J / mol.K

**T** = **IAT + 273°** (conversão de temperatura de Celsius para Kelvin)

**IAT** - Intake Air Temperature [°C]

**MM<sub>air</sub>** = 28,97 g / mol - Massa molar do Ar

**M** - Massa de ar

Através dos dados fornecidos pelo sensor MAP e sensor IAT, assim como os valores para a VE, provenientes do *tuning software*, consegue-se obter o valor para a massa de ar (M) a entrar no coletor de admissão. Ao multiplicarmos o valor da massa de ar por 14,7 (razão ar/combustível estequiométrica), obtém-se o valor para a massa de combustível a injetar para que a combustão seja estequiométrica, isto é, todo o oxigénio do ar admitido é queimado com todo o combustível injetado.

O injetor, controlado diretamente pela centralina (ver Fig. 24), é alimentado por uma tensão de 12 Volt continuamente, utilizada para operar a electroválvula do injetor, abrindo e fechando a válvula na extremidade inferior do injetor [MS2].

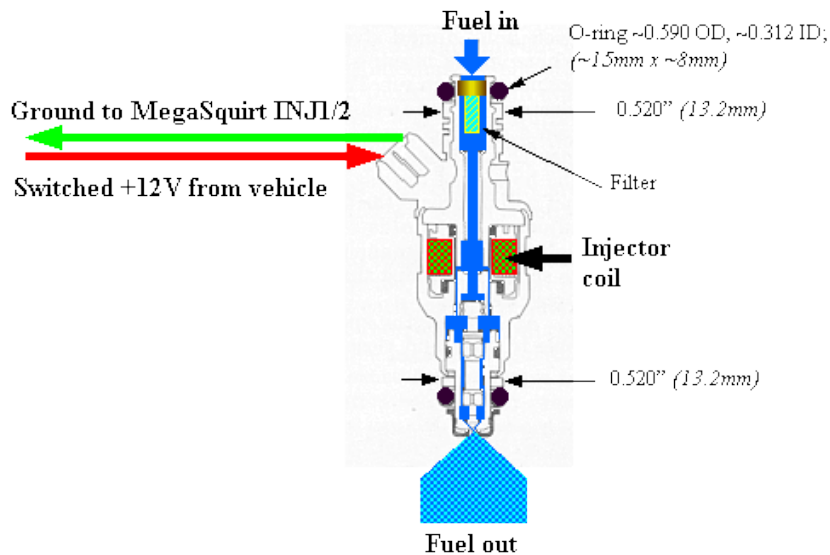


Figura 24, Esquema de funcionamento de um injetor controlado por uma centralina MegaSquirt [Extraída de MS2].

A centralina aciona o injetor ao permitir a ligação à massa e interrompe a injeção ao desligar a ligação à massa (ver Fig.25). Considera-se que um injetor apresenta apenas dois estados de funcionamento, aberto ou fechado (a abertura e fecho consideram-se quase instantâneos visto que são aproximadamente de apenas um milissegundo).

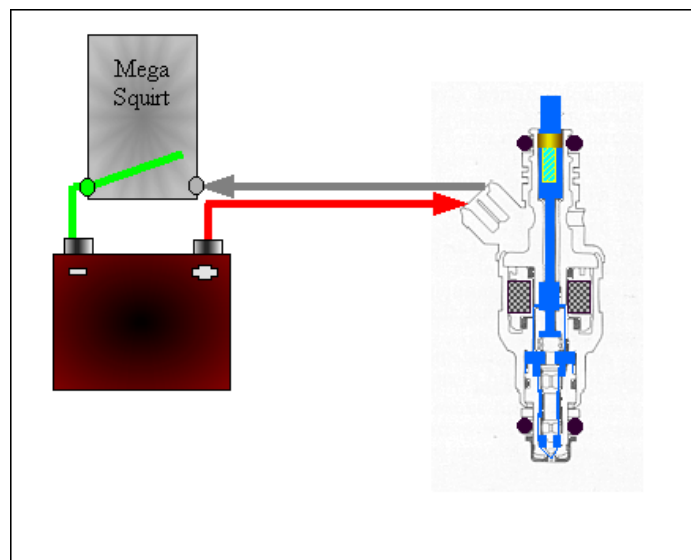


Figura 25, Esquema ilustrativo do método de controlo do injetor [Extraída de MS2].

Para a centralina ter um controlo preciso é necessário fornecer a capacidade de débito do injetor, ou seja, o volume/peso de combustível injetados num determinado período de tempo, para o software poder efetuar o cálculo do combustível necessário (REQ\_FUEL), expresso em milissegundos, que consiste no período de tempo em que a centralina ativa o injetor para que este debite combustível suficiente para alcançar a razão ar-combustível pretendida.

Depois de calculado, o valor de REQ\_FUEL , é transmitido pela centralina ao injetor. No entanto, este cálculo também está dependente de outros parâmetros como a cilindrada (CYL\_DISP), e a razão ar/combustível estequiométrica [MS2].

A razão Ar-Combustível refere-se à relação entre massa de ar e massa de combustível, e assume normalmente o valor 14,7 (para gasolina) para uma razão estequiométrica. Esse valor é utilizado pelo controlador para o cálculo do REQ\_FUEL, por consistir na relação Ar/Combustível quimicamente correta para que se queime todo o combustível utilizando todo o ar (oxigênio) disponível.

O combustível necessário (REQ\_FUEL) calculado pelo *tuning software* pode ser obtido através da equação 3.5:

$$\text{REQ\_FUEL} \times 10 = 36\,000\,000 \times \text{CID} \times (\text{AIRDEN} / (\text{NCYL} \times \text{AFR} \times \text{INJFLOW})) \times (1 / \text{DIVIDE\_PULSE})$$

[ms] (3.5)

Onde:

**REQ\_FUEL** - Período de tempo de abertura do injetor em décimos de milissegundo, por isso a multiplicação por 10 para que o resultado obtido seja descrito em milissegundos.

**36 000 000** - É o número de décimos de milissegundos numa hora, utilizado para obter o valor de débito do injetor em libras por décimo de milissegundo (quando o injetor se encontra em Libras por Hora).

**CID** - Volume do deslocamento do êmbolo em polegadas cúbicas.

**AIRDEN** - Corresponde à densidade do ar, em libras por polegada cúbica, para uma pressão de 100 KPa e 21°C.

**NCYL** - Número de cilindros.

**INJFLOW** - Capacidade de débito do injetor em centímetros cúbicos por hora.

**DIVIDE\_PULSE** - Injeção dividida pelo número de injeções por cada ciclo.

O valor da densidade do ar, AIRDEN, é obtido através da equação 3.6.

$$\text{AIRDEN} = 1.2929 \times (273.15 / (\text{Temp} + 273.15)) \times (\text{MAP} / 101,325) \text{ [Kg/m}^3 \cdot \text{°C.kPa]} \quad (3.6)$$

Onde:

**MAP** - Pressão no coletor de admissão [kPa]

**Temp** - Temperatura do ar [°C]

A equação para a quantidade de combustível a injetar pela MegaSquirt toma o valor REQ\_FUEL, e este valor é multiplicado por vários outros parâmetros sendo ainda adicionado o “enriquecimento” para acelerações e o tempo de abertura do injetor (aprox. 1 ms), segundo a equação 3.7:

$$PW = REQ\_FUEL \times VE \times MAP \times E + accel + Injetor\_open\_time \text{ [ms]} \quad (3.7)$$

O valor E consiste no produto de todos os enriquecimentos, exceto o de aceleração, sendo dado por:

$$E = \text{gamma\_enrich} = (\text{Warm\_up} / 100) \times (\text{O2 Closed Loop} / 100) \times (\text{AirCorr} / 100) \times (\text{BaroCorr} / 100) \quad (3.8)$$

Onde:

**Warm\_up** - Valor de enriquecimento durante o aquecimento do motor, retirado da tabela de combustível guardada na centralina.

**O2 Closed Loop** - Ajuste baseado na leitura do sensor de oxigênio, e as definições introduzidas pelo utilizador no *Tuning Software* com respeito à influência do sensor em ajustes de combustível.

**AirCorr** - Ajuste no valor da densidade do ar, baseado no valor da temperatura do ar admitido.

**BaroCorr** - Correção baseada na pressão do ar ambiente (esta correção acontece quando se inicia o motor. Para correções durante o funcionamento, aplica-se um segundo sensor de pressão, tipo MAP).

Os valores das correções são divididos por 100, porque quando um destes fatores se encontra a 100%, não há enriquecimento.

A adição do tempo de abertura do injetor e do enriquecimento devido a aceleração na equação PW, serve para aumentar o pulse width (PW), de modo a que este englobe o tempo de abertura total do injetor. A velocidade de funcionamento do main loop (área do código onde é calculado o pulse width, PW) de uma centralina MegaSquirt II, é de cerca de 3000 Hz (3000 vezes por segundo), valor este que pode ser maior ou menor, consoante a necessidade de processamento de dados de funcionamento do motor.

Para percebermos a equação do PW, tomamos como exemplo um motor a funcionar a baixa rotação, com uma temperatura de funcionamento adequada. Valores extraídos do *tuning software* para o exemplo são: MAP=40 KPa, VE = 74%, enriquecimentos 97%, sem aceleração, tempo de abertura do injetor de 1,3 milissegundos e o valor de REQ\_FUEL=10 milissegundos [MS2].

Apresentando a equação 3.8 sob a forma de cálculo da centralina e substituindo os valores mencionados tem-se:

$$PW = REQ\_FUEL \times (MAP / 100) \times (VE / 100) \times (\text{gamma\_enrich} / 100) + \text{Injetor\_open\_time} \text{ [ms]} \quad (3.9)$$

$$PW = 10 \times (40 / 100) \times (74 / 100) \times (97 / 100) + 1,3 = 4,17 \text{ ms} \quad (3.10)$$

Para uma certa leitura dos sensores e características de funcionamento necessárias para cálculo do pulse width, a centralina calcula um valor de PW que transmite ao injetor, podendo ser diferente daquele mostrado pelo *tuning software* devido à velocidade de transmissão ser diferente entre os dois componentes.

A centralina precisa de vários sensores localizados no motor para conseguir calcular o pulse width adequadamente e no presente caso, esta centralina já possui um sensor MAP incorporado no chassis da placa (ver Fig. 26).



Figura 26, Tubo com conector ligado ao sensor MPX4250 MAP [Foto do autor].

O sensor MPX4250 MAP, incorporado na centralina, é alimentado por esta com uma tensão de 5 volts, ou 5 Vref como é geralmente denominada, onde o sinal de retorno (do sensor para a centralina) varia entre os 5 volts e os 0 volts apresentando uma relação linear com a pressão absoluta no coletor. Um valor de tensão baixa corresponde (nunca inferior a 0 V) a um valor da pressão baixo assim como, uma tensão mais alta (nunca superior a 5 V) representa uma pressão mais elevada.

A tensão de retorno, do sensor MAP para a centralina MegaSquirt II, é convertida para um número digital entre 0 e 1024 (sinal digital de 10 bits por meio de um conversor analógico-digital (ADC, Analog Digital Converter). As centralinas MegaSquirt utilizam a unidade kilo Pascal para valores de pressão.

O sensor MPX4250 MAP informa o controlador da pressão absoluta no coletor de admissão, no entanto, a primeira leitura do sensor quando se inicia o motor e o controlador, é utilizada para efetuar correções, caso a altitude a que o motor se encontra tenha variado. Uma variação de altitude leva a uma variação na pressão atmosférica, logo, o novo valor de pressão atmosférica deve ser transmitido para que a centralina possa efetuar novos cálculos, relativos à injeção de combustível, de modo a manter a estequiometria.

Revedo a equação para o cálculo da massa de ar, verifica-se que é necessário o valor da temperatura do ar, para além do valor da pressão. O valor da temperatura do ar é transmitido para a centralina através do sensor IAT, (Intake Air Temperature). Um sensor idêntico transmite informação relativa à temperatura do motor para o controlador, denominado por Coolant Temperature, abreviado para CLT.

Com a informação da temperatura do motor, a centralina efetua correções na quantidade de combustível a injetar, de modo a enriquecer a mistura enquanto a temperatura de funcionamento do motor for baixa. A baixa temperatura de funcionamento do motor impede a correta vaporização do combustível, sendo esta menor e mais difícil, e devido a este fenómeno é necessário injetar uma maior quantidade de combustível para garantir a vaporização de combustível suficiente para ocorrer combustão [MS2].

Ambos os sensores IAT e CLT possuem o mesmo funcionamento que o sensor MAP. O sinal analógico (valor de tensão variável) transmitido para a centralina é convertido para um sinal digital entre 0 e 1024. O valor da tensão varia, visto que a resistência deste tipo de sensores varia com o valor da temperatura. O *tuning software* possui valores pré-programados de alguns sensores muito utilizados, mas caso se utilize um sensor que não esteja na base de dados da MegaSquirt, pode-se calibrar os sensores para funcionarem através do *tuning software*.

Um sensor, também com influência na quantidade de combustível injetado, e dos mais importantes para o funcionamento do motor, é o sensor TPS (“Throttle Position Sensor”) (ver Fig. 27). Este sensor informa o controlador sobre a posição do acelerador, e este por si, compara a posição atual do acelerador com a última leitura deste parâmetro para determinar se o motor se encontra em aceleração, desaceleração ou velocidade constante.

Quando deparado com uma situação de aceleração a mistura é enriquecida através de um aumento do Pulse Width, de modo a que exista combustível em excesso para compensar o regime transitório e facilitar a aceleração. Para uma situação de desaceleração a injeção de combustível é reduzida ou mesmo interrompida [MS2].



Figura 27, Exemplo de um sensor TPS [<https://www.summitracing.com/int/parts/wsn-481003-gm/overview/>].

Tal como os sensores de temperatura e pressão, o sinal enviado pelo sensor TPS para a centralina é analógico, um valor de tensão que é convertido em sinal digital para ser processado.

As centralinas MegaSquirt trabalham, normalmente, com um sensor de oxigénio ou sensor EGO, (“Exhaust Gas Oxygen”) (ver Fig. 28). Este sensor avalia a quantidade de oxigénio nos gases de escape do motor, permitindo saber se a mistura se encontra rica, pobre ou na zona estequiométrica. O sensor de oxigénio informa a centralina se a quantidade de combustível injetada foi correta para alcançar a zona estequiométrica, procedendo à correção de cálculos se não foi alcançada esta zona. Basicamente fornece um “feedback” ao controlador sobre o seu funcionamento.

Este sensor permite ainda que o motor se adapte a várias situações, como por exemplo, variações de altitude, corrigindo erros que possam ser induzidos por outros sensores [MS2].



Figura 28, Sensor de oxigénio disponível comercialmente [<https://www.race.fi/en/product/44978a/plx-wideband>].

## 4. Trabalho Experimental

### 4.1. Alterações Preliminares

Antes de se proceder às alterações do motor, começou-se por fazer um inventário dos materiais necessários, assim como projetar e desenhar algumas peças necessárias ao funcionamento deste trabalho.

#### Coletor de Admissão

A primeira peça a ter atenção foi o coletor de admissão. O motor consistia de dois coletores de admissão individuais com carburadores Mikuni (ver Fig. 29) em cada ponta.



Figura 29, Carburador Mikuni original ao motor [Foto do autor].

Para este trabalho considerou-se mais apropriado e mais simples, desenvolver um coletor que unisse as duas admissões numa só, de modo a simplificar de maneira geral e para poder aplicar um sensor de temperatura de ar de admissão, um conector para ligar a sensor MAP, e ainda um corpo de um carburador (ver Fig. 30), convertido para funcionar apenas como acelerador (aciona uma borboleta), com um sensor TPS para saber a posição do acelerador.

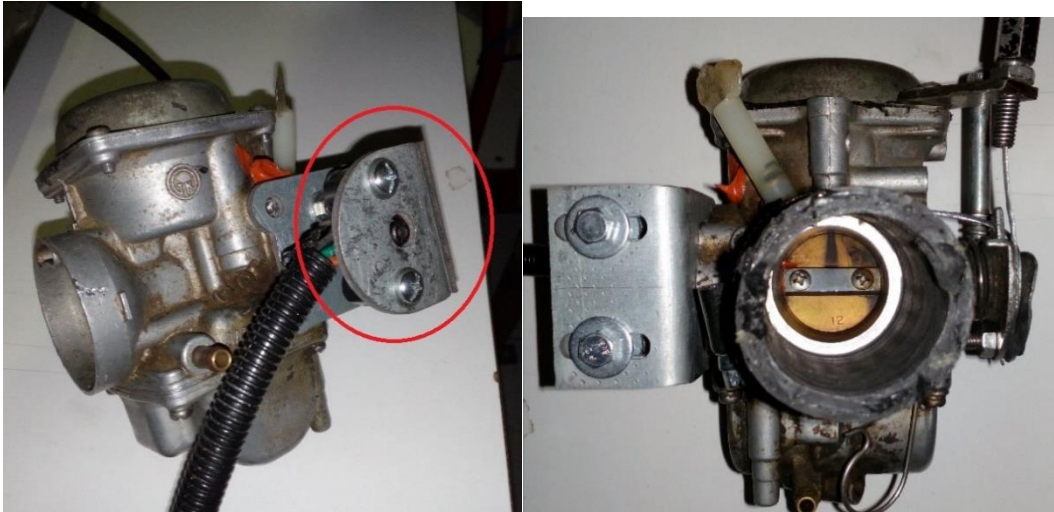


Figura 30, Corpo de borboleta utilizado para este trabalho [Foto do autor].

Para este corpo de borboleta utilizado, aproveitou-se de um carburador antigo ao qual foi aplicado um sensor TPS como observado na figura 30 a vermelho. Apenas a borboleta é utilizada em conjunto com o sensor TPS, estando o resto do carburador inutilizado.

Em relação ao coletor, primeiramente pensou-se em desenvolver um coletor em forma de “T” pois seria o mais fácil de fabricar, mas após algumas considerações como qual o sítio para pôr os injetores, a sua possível interferência com os coletores de escape, optou-se por desenvolver um coletor em forma de “Y” simplesmente porque seria melhor em termos de escoamento de ar (ver Fig. 31). As dimensões e o desenho técnico desta peça encontram-se no anexo A.

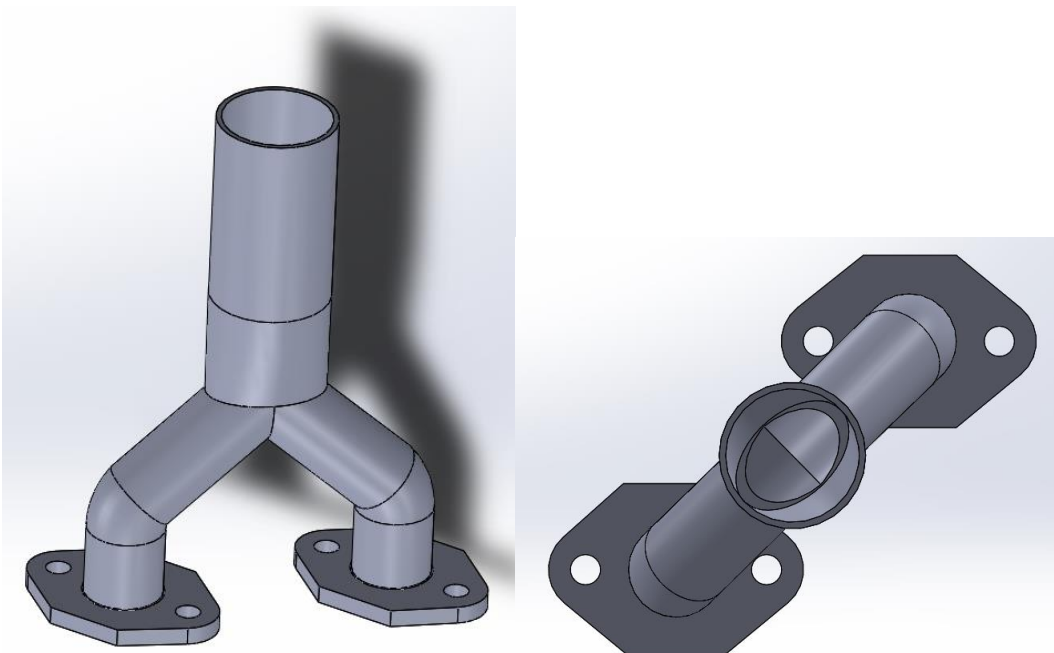


Figura 31, Vista lateral e vista de topo, respetivamente, do coletor desenvolvido em Solidworks [Desenho do autor].

Tendo decidido a forma do coletor, passou-se a decidir qual o lugar mais apropriado para o(s) injetor(es). Podia-se aplicar somente um injetor junto ao corpo da borboleta, como num sistema multiponto, mas acabou-se por optar por dois injetores de modo a tirar vantagem das duas entradas do motor e devido à cilindrada do motor. Achou-se mais apropriado por os injetores o mais próximo possível das válvulas de admissão, sendo que acabaram por ficar com uma configuração semelhante à de um motor de um automóvel (a injetar diretamente para a válvula). Desenhou-se uma peça para suportar os injetores, que pudesse ser soldada ao coletor num ligeiro ângulo para assim injetar o combustível diretamente para a válvula (ver Fig. 32). O desenho técnico desta peça encontra-se no anexo A.

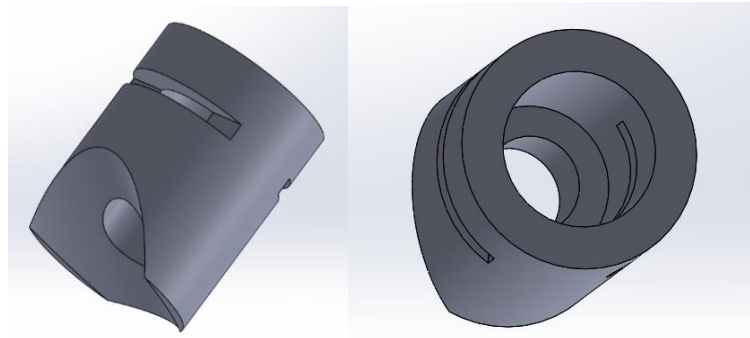


Figura 32, Vista de perfil e vista do interior, respetivamente, da peça desenvolvida em Solidworks, para suportar o injetor [Desenho do autor].

Reutilizando os coletores anteriores, acrescentando um tubo com um diâmetro similar ao do corpo da borboleta (32mm), e acrescentando por fim as duas peças para os injetores, acabou-se com a peça apresentada na Figura 33.



Figura 33, Coletor terminado com as peças para os injetores soldadas e perfurações para acoplamento de sensores [Foto do autor].



Figura 34, Coletor de Admissão com o sensor IAT aplicado, e um conector para o sensor MAP [Foto do autor].

Como se pode observar pela figura 34, o coletor possui uma conexão para acoplar um tubo para o sensor MAP, assim como ainda possui um sensor de temperatura (ver Fig. 35) para o ar de admissão.



Figura 35, Sensor de temperatura de ar de admissão utilizado [Foto do autor].

Devido à proximidade do fio do sensor com o coletor de escape, e devido a possíveis problemas com os fios elétricos utilizados, decidiu-se envolver os fios em tubos termo retráteis com a adição de fita adesiva de modo a obter uma peça rígida. Isto ajudará a que os terminais não se soltem ou que ocorra quebra dos fios devido a vibrações induzidas pelo motor.

## Colocação do Sensor de Hall

O motor possuía inicialmente, um sistema de ignição de faísca por magneto, adequado para um motor monocilíndrico de baixa cilindrada operado a carburadores, mas para este trabalho foi substituído por um sensor de hall que se encarregará de fornecer o sinal para calcular as rotações do motor, fornecendo à centralina um dado essencial para calcular quando injetar o combustível e iniciar a faísca.

Na figura 36, pode-se observar o sensor de hall montado, através de um suporte, no local onde estava o magneto.

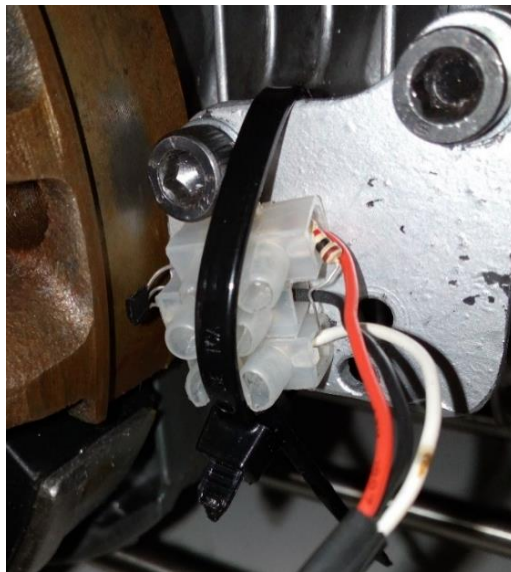


Figura 36, Sensor de Hall montado no sítio do magneto [Foto do autor].

Esta configuração final para o sensor de Hall, deveu-se a vários problemas com o funcionamento do sensor. Por esta razão é que se escolheu utilizar conetores “rápidos” para a instalação do sensor, para o caso de, se ocorrerem problemas inesperados, o sensor ser de fácil substituição.

## Colocação do Sensor de Temperatura do Motor

A centralina possui um terminal designado por CLT, ou seja, temperatura da água de refrigeração, que pode ser usada na centralina para corrigir o valor da injeção de combustível, como falado anteriormente. Como o motor em questão se trata de um motor refrigerado a ar, teve de se proceder a uma abordagem diferente para obter a temperatura do motor. Pensou-se em utilizar um sensor para medir a temperatura do óleo, mas por ser um motor de lubrificação por chapinhagem e devido à posição em que o motor se encontra, considerou-se melhor utilizar um sensor diretamente na cabeça, como ilustra a figura 37:

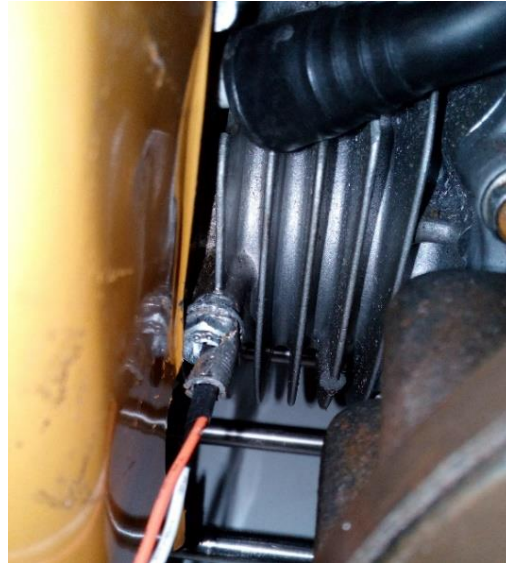


Figura 37, Sensor de Temperatura aplicado no Motor [Foto do autor].

### **Alteração do Sincronismo entre Cambotas**

O sincronismo deste motor era constituído por um conjunto de engrenagens com módulo de 1,5 mm, sendo estas formadas por duas engrenagens centrais de 65 dentes e duas engrenagens acopladas aos veios motores com 56 dentes (ver Fig. 38). Estas foram escolhidas segundo o binário de fábrica do motor (6,7 Nm) que se revelou ser menos de metade do binário que o motor chegou a produzir (15 Nm). Segundo os cálculos para dimensionamento de rodas dentadas, chegou-se à conclusão que estas não iriam aguentar de maneira segura, a carga produzida pela junção dos motores.

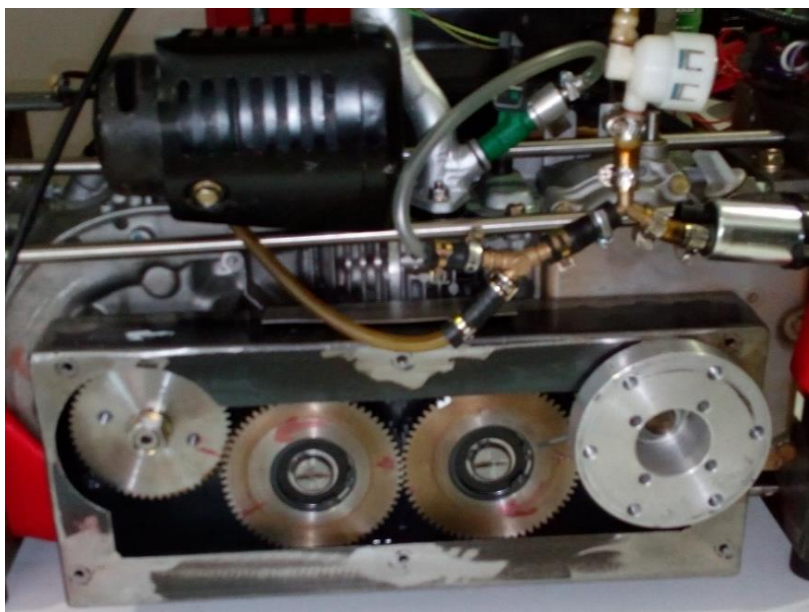


Figura 38, Conjunto de rodas anteriores [Foto do autor].

Procedeu-se então ao dimensionamento de um conjunto de rodas dentadas com o mesmo diâmetro primitivo, para evitar desenhar e produzir outro suporte, mas com um módulo de dentado superior.

Os cálculos realizados demonstraram que as engrenagens escolhidas aguentarão a carga, estando estes cálculos no anexo B, no final deste documento. As engrenagens escolhidas são da empresa HPC Gears cujas características são apresentadas na Tabela 3:

Tabela 3, Características das Engrenagens Seleccionadas [Catálogo HPC Gears].

Engrenagens	Referência	Material	Modulo de Dentado	Furo	Diâmetro Primitivo	Dentes
Veio do motor	M2-42 CH14	Aço	2 mm	16 mm	84 mm	42
Centrais	M2-48 CH1			16 mm	96 mm	48



Figura 39, Engrenagens encomendadas antes de serem maquinadas [Foto do autor].

As engrenagens para o veio do motor tiveram de ser encomendadas com um diâmetro interno específico de 16mm para poderem ser acopladas aos motores (ver Fig. 39). As rodas centrais escolhidas possuem um diâmetro interno de 16mm, o que não constitui grande problema, e precisaram de ser maquinadas para poderem acoplarem a um rolamento com 47 mm de diâmetro externo.



Figura 40, Engrenagens após processo de maquinação [Fotos do autor].

As rodas tiveram de ser maquinadas de maneira a serem similares às rodas dentadas anteriormente usadas, de modo a evitar, ter de redefinir espaçamentos entre as rodas (ver Fig. 40). Desta maneira evita-se trabalho desnecessário, ao mesmo tempo que se tem a certeza de que o acoplamento será correto (teoricamente). Os desenhos utilizados como guia para a maquinação das engrenagens encontram-se no anexo C.

## Sensor de Oxigénio

O sensor de oxigénio utilizado neste trabalho é denominado por “Bosch LSU ADV Lambda Sensor” (ver Fig. 41). Segundo o site do vendedor, é uma versão melhorada baseada no chip do modelo original CJ125, proporcionando uma leitura mais precisa, rápida e fiável para uma grande amplitude de temperaturas [Wideband].

Este sensor consegue registar uma maior gama de valores para a relação ar-combustível nos gases de escape do que os sensores convencionais, daí o nome “wideband”, permitindo ao utilizador e à centralina determinar o quão longe esta relação se encontra da estequiometria.



Figura 41, Sensor de oxigénio com o respetivo controlador e ecrã [Extraído de <https://i2.wp.com/ldperformance.co.uk/wp-content/uploads/2016/01/7M7A6017.jpg?fit=2048%2C1365&ssl=1>].

O sensor é comercializado sob a forma de um “kit”, sendo este composto pelo sensor de oxigénio e controlador, podendo ainda incluir um pequeno display que irá mostrar os valores instantâneos registados pelo sensor. O sensor é vendido com instruções de instalação como, diagrama de terminais (anexo D) e os valores de tensão de calibração a introduzir na centralina.

Segundo as instruções, a saída de 0 a 5 Volt corresponde respetivamente aos valores de 7,35 AFR e 22,39 AFR. Acrescenta-se ainda que, este sensor foi escolhido por ser do tipo “wideband” e por, segundo o vendedor, ser compatível com as centralinas Megasquirt, evitando desta maneira problemas de compatibilidade no desenvolver do trabalho [Wideband].

## Construção da Cablagem Necessária

O conjunto de condutores elétricos com o terminal adequado para esta centralina já se encontrava instalado noutra motor, procedeu-se assim à sua extração, tendo sido refeito de forma a organizar, de maneira conveniente, os condutores, agrupando-os segundo a posição dos sensores e em geral para evitar ter fios soltos sobre o motor, que poderiam acidentalmente queimar-se nos coletores de escape ou ainda interferir com partes móveis expostas do motor, como o volante de motor ou a tomada de força (ver Fig. 42).

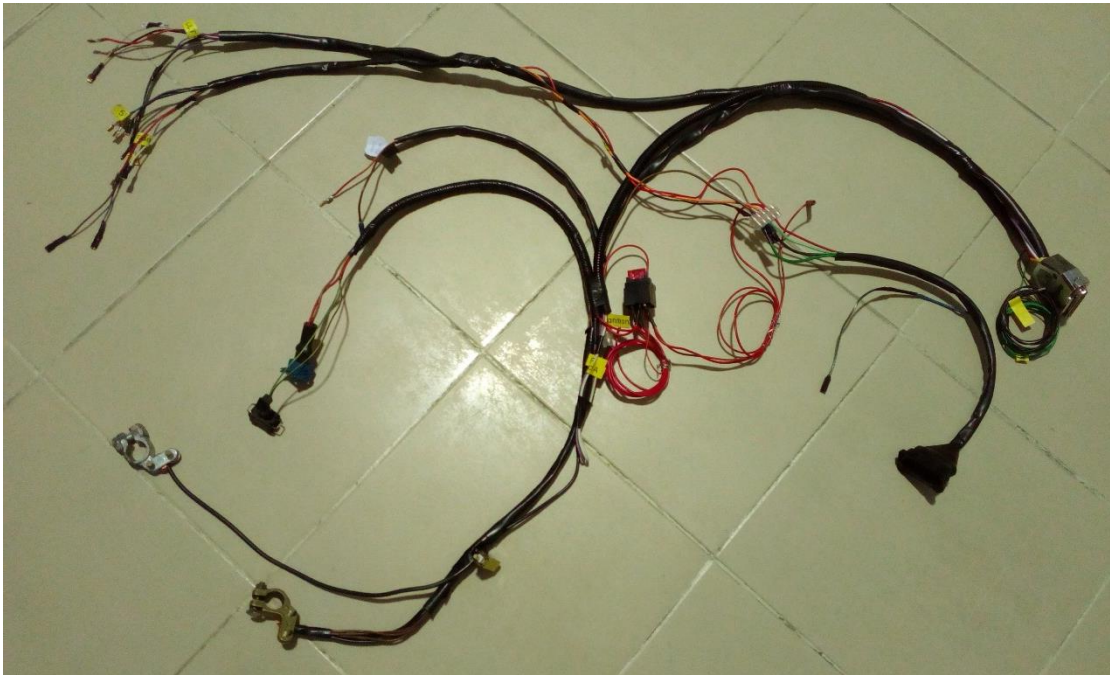


Figura 42, Cablagem depois de ter sido organizada e modificada [Foto do autor].

De modo a evitar erros e problemas de funcionamento, utilizou-se o esquema de ligações, apresentado no anexo D, para verificar e confirmar se os condutores elétricos se encontravam na posição correta, do terminal da centralina.

Este foi um passo importante, pois embora a cablagem estivesse ligada a outro projeto, a funcionar, verificou-se que havia conexões muito duvidosas e sem identificação, dificultando o trabalho de conexão ao motor utilizado neste trabalho.

## 4.2. Programação da Centralina MegaSquirt II

Assim que se deu por terminada a fase de fabricação de peças e de acoplamento de sensores, procedeu-se à ligação da centralina aos sensores através da cablagem feita para tal. Para se programar a centralina usou-se o programa *TunerStudio MS*, programa desenvolvido para funcionar com centralinas MegaSquirt.

O programa *TunerStudio MS*, consegue gerar parâmetros como tabelas de combustível e de ignição, através da introdução de alguns dados relativos ao motor, permitindo obter uma referência/ base para depois se proceder a afinações mais precisas.

No programa aparece uma janela para introduzir parâmetros iniciais para injeção de combustível, como número de cilindros, número de injetores, tipo de controlo admissão (MAP, MAF, ou Speed density), tipo de injeção entre outros como observado na Figura 43.

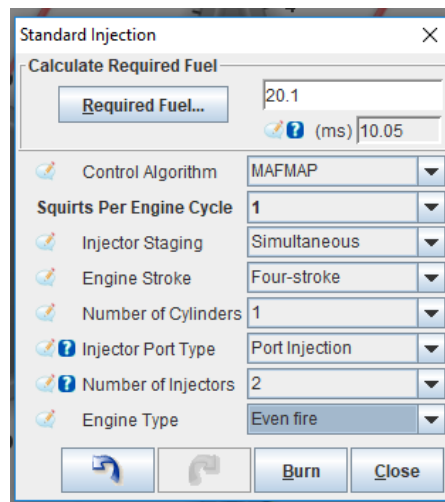


Figura 43, Introdução de alguns parâmetros no programa *TunerStudio* [Foto do autor].

A quantidade de combustível necessária, pode ser calculada no programa ao clicar em “Required Fuel”, que faz aparecer a janela apresentada na figura 44.

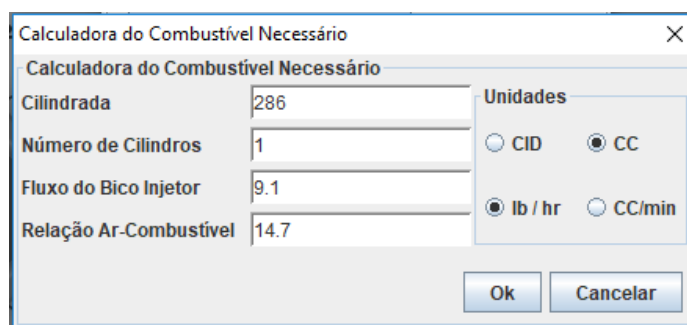


Figura 44, Calculadora de combustível necessário [Foto do autor].

Como se pode observar na figura 44, é necessário introduzir a cilindrada do motor (neste caso 286 cm<sup>3</sup>), o número de cilindros, o caudal do injetor e a relação ar-combustível desejada, que neste caso tem o valor de 14,7 para se alcançar uma mistura estequiométrica.

O valor de caudal do injetor foi obtido pela pesquisa das especificações do injetor (ver Tab. 4) recorrendo ao número identificador da peça (ver Fig.45).



Figura 45, Caixa do injetor com o número identificativo da peça [Foto do autor].

Tabela 4, Especificações dos valores de fluxo do Injetor utilizado [Extraído de [www.robietherobot.com/storm/fuelinjectorguide2.htm](http://www.robietherobot.com/storm/fuelinjectorguide2.htm)].

Caudal			Estimativa	
Número Peça	Lbs/hr	cc/min	Gramas/min	Bar
0-280-156-025	6,1	95,69	<b>68,84</b>	3,0

Depois de inseridos os dados, o programa calcula o tempo de abertura de injetor (PW, *Pulse Width*) base para o motor funcionar.

#### 4.2.1. Calibração de Sensores

De modo a que a centralina funcione de maneira correta, é necessário que esta perceba de forma correta os sinais que está a receber. As centralinas MegaSquirt já possuem dados de alguns sensores muito utilizados, disponíveis comercialmente, gravados na sua memória, mas para sensores pouco utilizados pode-se recorrer às ferramentas de calibração do programa *TunerStudio*.

Calibra-se os sensores de modo a evitar discrepâncias entre valores reais e os valores lidos pelo sensor. Com isto, enuncia-se a lista de sensores utilizados para a conversão:

- Termistor (usado para medir temperatura de ar de admissão e temperatura do motor)
- Sensor de Hall
- Sensor TPS
- Sensor de Oxigénio
- Sensor MAP

O sensor MAP não necessita de calibração, pois encontra-se acoplado diretamente á placa base da centralina, estando este já pré-configurado e pronto a utilizar.

## Termistores

Os termistores utilizados são calibrados através da medição da sua resistência para três temperaturas diferentes. A Tabela 5 apresenta os valores registados para os dois termístores e a Figura 6 a janela de calibração do software.

Tabela 5, Valores de resistência registados para diferentes temperaturas.

Sensor Temperatura de Admissão	
T [°C]	R [ohm]
0	292k
16	112K
81	9,5k
Sensor Temperatura Motor	
T [°C]	R [ohm]
0	321k
20	127,4k
90	8,2k

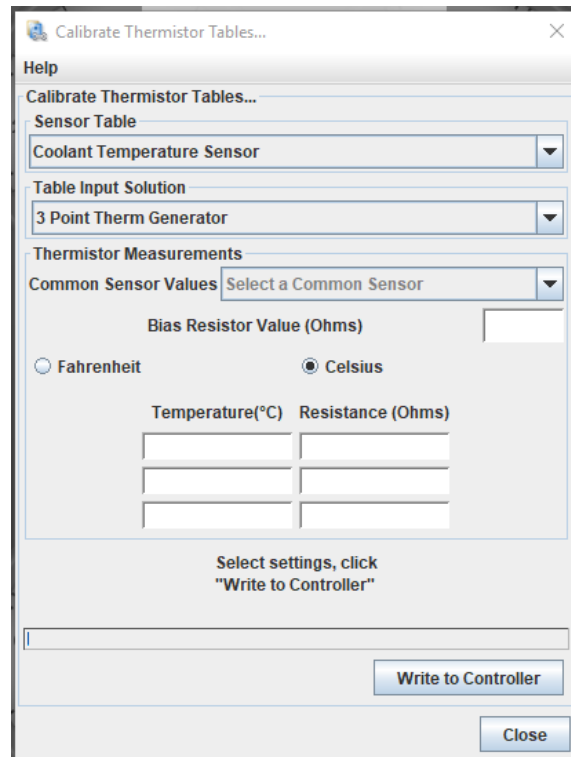


Figura 46, Janela do Software para calibrar os termistores [Fotos do autor].

É necessário um valor denominado por “*Bias Resistor Value*” (2500  $\Omega$  neste caso) para que a centralina leia os valores do sensor de maneira correta.

Estes três valores foram extraídos da seguinte maneira:

- 1) Primeiramente obteve-se a temperatura ambiente, e em seguida registou-se a resistência do termistor.
- 2) De seguida, utilizou-se um aparelho para levar água ao ponto de ebulição, momento a partir do qual se inseriu o termistor na água, aguardando alguns momentos para estabilizar; registou-se a temperatura da água, seguida do valor da resistência aos terminais do termistor.
- 3) Por último, colocou-se cubos de gelo num copo com água, de modo a alcançar os zero graus celsius; depois de estabilizado mediu-se a temperatura da água, comprovando que realmente se encontrava a zero graus celsius, tendo de seguida registado o valor da resistência do termistor.

Os valores inseridos na tabela 5, foram ordenados da temperatura menor para a maior, de maneira a observar um padrão na resistência do termistor. Verifica-se que é possível extrair uma função mais ou menos linear de variação de resistência consoante a temperatura, e é esta função que a centralina irá usar como referência para depois extrair valores de temperatura.

### Sensor de Hall

O sensor de hall em si, não pode ser calibrado, porque não passa de um interruptor magnético. No entanto, pode-se calibrar o tipo de input para a centralina (*basic trigger* neste caso, por ser um sensor de hall) e em que ângulo antes do PMS se encontra, de modo a que o mapa de avanço de ignição funcione corretamente, e para que não haja pré-ignição da mistura.

O ângulo de offset, foi medido manualmente recorrendo a um transferidor, ao medir o ângulo entre a posição do íman do volante de inércia no sítio do magneto, até ao cruzamento de válvulas (teoricamente PMS). O ângulo medido foi de 23°, informação esta que foi depois introduzida no *tuning software* para calibrar a ignição.

### Sensor TPS

O sensor de TPS é relativamente simples de calibrar. O sensor TPS não passa de um potenciômetro (resistência variável). É alimentado por uma tensão de 5 Volts, e consoante a posição em que se encontra, altera o valor da tensão que o atravessa. Este valor de tensão é depois medido pela centralina. Como se pode observar pela figura 47, calibra-se o sensor ao registar o valor de tensão para a posição de borboleta fechada, e para a posição de borboleta completamente aberta (WOT). A centralina cria depois uma função linear como referência, para determinar a posição da borboleta.

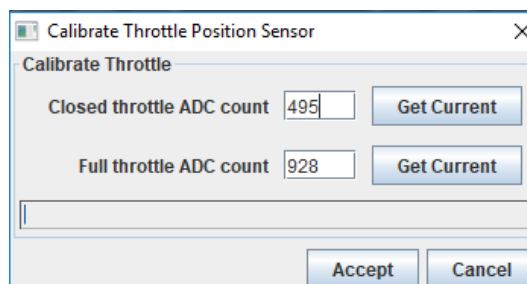


Figura 47, Janela do software para calibrar o sensor TPS [Foto do autor].

## Sensor de Oxigénio

O sensor de oxigénio escolhido é compatível com as centralinas MegaSquirt, e ainda possui um controlador próprio, no entanto é necessário introduzir os valores de tensão para valores de AFR, como mencionado no subcapítulo anterior (ver Fig. 48).

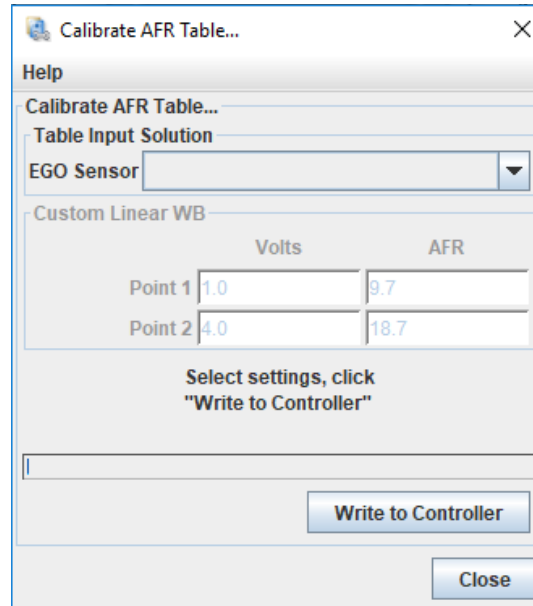


Figura 48, Janela para configuração do sensor de oxigénio [Foto do autor].

### 4.2.2. Configuração de Tabelas de Combustível e Ignição

Para obtermos o mapa de injeção de combustível inicial, recorreu-se à ferramenta do programa denominada por Table Generator, como observada na figura 49.

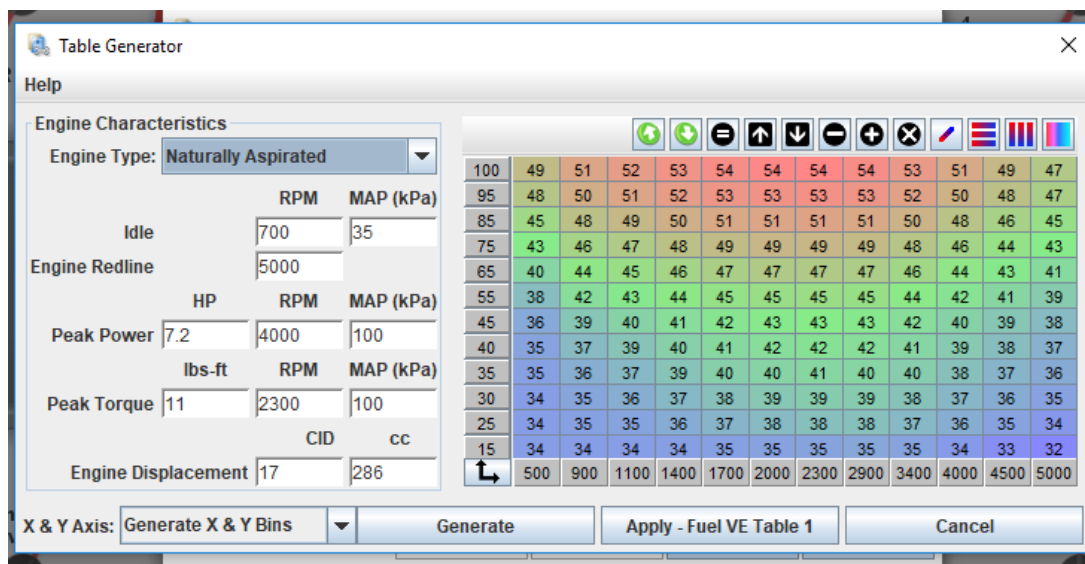


Figura 49, Ferramenta do *TunerStudio* para gerar tabelas de combustível [Foto do autor].

Como se pode observar na figura 47, tem de se introduzir várias informações como rotação de ralenti, rotação máxima, potência máxima para uma certa rotação (dados extraídos de [Gregório, 2017], considerados como referência), assim como a cilindrada.

Clica-se em *Generate*, e o programa irá gerar uma tabela de combustível para os dados de referência. No entanto, não quer dizer que esta tabela seja ideal, mas sim um ponto de partida que permite ao motor funcionar. Depois de pôr o motor em funcionamento, poderá vir-se a alterar esta tabela de modo a que o motor trabalhe de maneira adequada e eficiente.

Para obtermos a tabela de ignição, o processo é semelhante, mas em contraste com a tabela de combustível, tem de se aceder ao site [Spark], e introduzir os dados na interface demonstrada na figura 50.

Cylinder Bore:	63	millimeters
Combustion Chamber Type:	2-valve closed chamber w/ optimized quench	
Fuel:	premium (94+ octane)	
Compression Ratio:	< 9.0:1	
Idle Vacuum:	15	in.Hg
Maximum boost level: (0 for naturally aspirated, max. boost (psi) for turbo/supercharged)	0	psi (21 psi maximum)
Maximum RPM:	6000	RPM
Idle RPM:	600	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>	

Reset Form

Generate Advance Table

Figura 50, Parâmetros inseridos para gerar a tabela de ignição [Foto do autor].

O site criará uma tabela de ignição base para os parâmetros inseridos, dada sob a forma de código, para criar um ficheiro que poderá ser aberto pelo *TunerStudio*. Devido a problemas de software não foi possível criar esse ficheiro, e então teve de se introduzir os valores manualmente. A tabela de ignição base ficou como apresentado na figura 51.

Ignition Table 1 (Spark Advance) 3D View

	600	750	1100	1400	1800	2100	2500	2800	3200	3500	3900	6000
i	101.0	13.0	10.0	16.8	20.6	25.8	29.7	34.9	38.7	41.3	41.3	41.3
g	94.0	13.0	10.0	16.5	20.3	25.4	29.2	34.3	38.1	40.6	40.6	40.6
n	87.0	13.0	10.0	16.2	19.9	24.9	28.7	33.7	37.4	39.9	39.9	39.9
l	80.0	13.0	10.0	15.9	19.6	24.5	28.2	33.1	36.7	39.2	39.2	39.2
o	73.0	13.0	10.0	15.6	19.2	24.0	27.6	32.5	36.1	38.5	38.5	38.5
a	66.0	13.0	10.0	15.3	18.9	23.6	27.1	31.9	35.4	37.8	37.8	37.8
d	60.0	13.0	10.0	15.1	18.6	23.2	26.7	31.4	34.8	37.2	37.2	37.2
	53.0	13.0	10.0	14.8	18.2	22.8	26.2	30.8	34.2	36.5	36.5	36.5
	46.0	13.0	10.0	14.5	17.9	22.3	25.7	30.2	33.5	35.7	35.7	35.7
k	39.0	13.0	10.0	14.2	17.5	21.9	25.2	29.6	32.8	35.0	35.0	35.0
P	32.0	13.0	10.0	13.9	17.2	21.4	24.7	29.0	32.2	34.3	34.3	34.3
a	25.0	5.0	10.0	13.6	16.8	21.0	24.2	28.4	31.5	33.6	33.6	33.6

Figura 51, Tabela de Ignição base [Foto do autor].

No entanto, no início dos testes, de forma a isolar potenciais problemas selecionou-se tempo de ignição fixo para todo o regime de funcionamento. Isto permitiu regular as tabelas de combustível para obter um comportamento aceitável, antes dos testes para extração de potência. Estas e outras opções podem ser alteradas no *tuning software* como visto na figura 52.

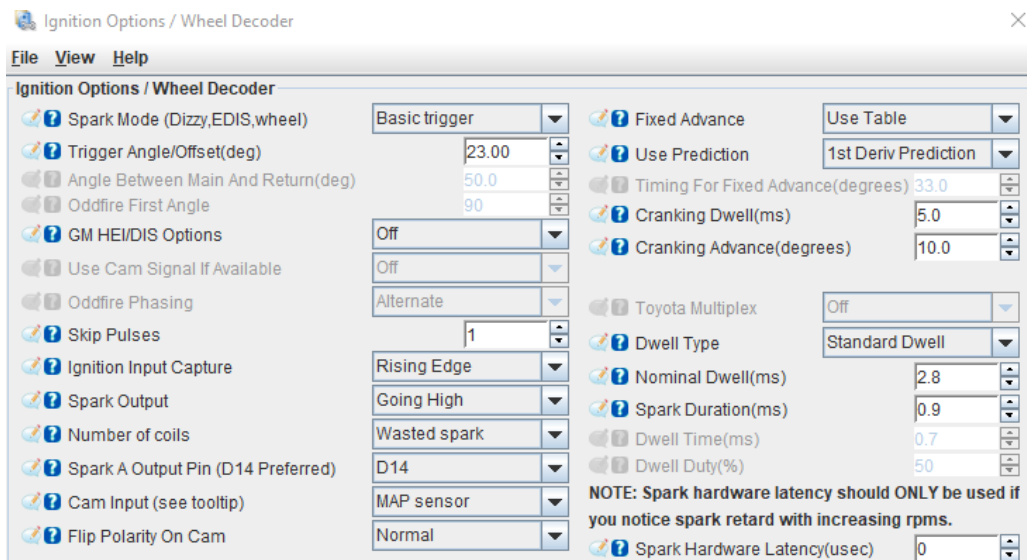


Figura 52, Janela de configuração do método de faísca [Foto do autor].

O ângulo de *offset* para o “*trigger*” foi determinado visualmente, recorrendo a um transferidor, ao ver o ângulo entre o PMS e o ponto em que o magneto do volante do motor passava pelo sensor de Hall.

## 4.3. Ensaio Experimental

### 4.3.1. Equipamento e Método para Extração de Dados

A instalação experimental é constituída por um volante de inércia (ver Fig. 53), cujas características são enunciadas a seguir: Material ASTM-A36,  $\rho=7800$  [kg/m<sup>3</sup>], R=127mm.

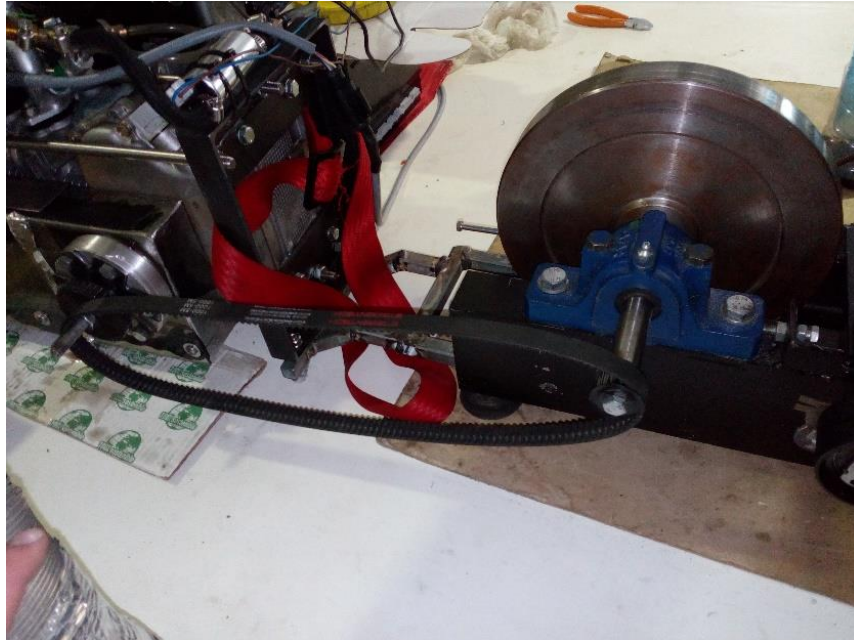


Figura 53, Banco de Ensaio usado nos testes [Foto do autor].

O procedimento para aquisição de dados consistia em pôr o motor a funcionar utilizando um berbequim acoplado ao volante de inércia. Depois de o motor estar em funcionamento, o *tuning software* foi utilizado para registar dados, visto este possuir uma opção para gravar parâmetros durante algum tempo. Após o motor atingir a temperatura de funcionamento, a borboleta do motor era aberta na sua posição máxima (WOT) e o motor acelerava o volante de inércia. Ao atingir a velocidade de rotação máxima considerada segura pelo utilizador (4000 RPM), o motor era desligado e o volante de inércia forçado a parar (para evitar desgaste da chumaceira).

Para calcular o binário do motor é necessário saber o momento de inércia do volante. Para calcular o momento é necessário saber o raio e o peso do volante de inércia.

Sabendo o tipo de material utilizado na fabricação, e através do volume, consegue-se calcular o peso (ver equação 4.1 e 4.2).

$$V = [ (\pi \cdot 0.127^2 / 4) - (\pi \cdot 0.05^2 / 4) ] \cdot 0.29 = 0.003 \text{ m}^3 \quad (4.1)$$

Onde:

0.127 - Raio do Volante [m]

0.05 - Raio da secção oca [m]

0.29 - Espessura do Volante [m]

$$m = V * \rho = 0.003 * 7800 = 24 \text{ kg} \quad (4.2)$$

Com os parâmetros calculados, procede-se a calcular o momento de inércia, mostrado na equação 4.3.

$$I = \frac{1}{2} * 24 * 0.127^2 = 0.1935 \text{ kg/m}^2 \quad (4.3)$$

O valor obtido será usado na equação 4.4, para calcular o valor do binário para cada rotação.

$$B = RT * I * \alpha \text{ [N.m]} \quad (4.4)$$

Onde:

RT - Relação de transmissão entre o motor e o volante de inércia.

### 4.3.2. Extração e Tratamento de Dados

Ao realizar os testes, verificou-se que o motor, inicialmente, apresentava um trabalhar agressivo, não querendo manter-se ao relanti e não se mantinha a velocidade constante para uma determinada posição da borboleta de admissão, e ainda, os valores de AFR eram um pouco altos para o motor se manter em correto funcionamento (ver Fig. 54). Ao longo do desempenho dos testes, foi-se monitorizando atentamente a temperatura do motor, para assim evitar sobreaquecimento e problemas associados.

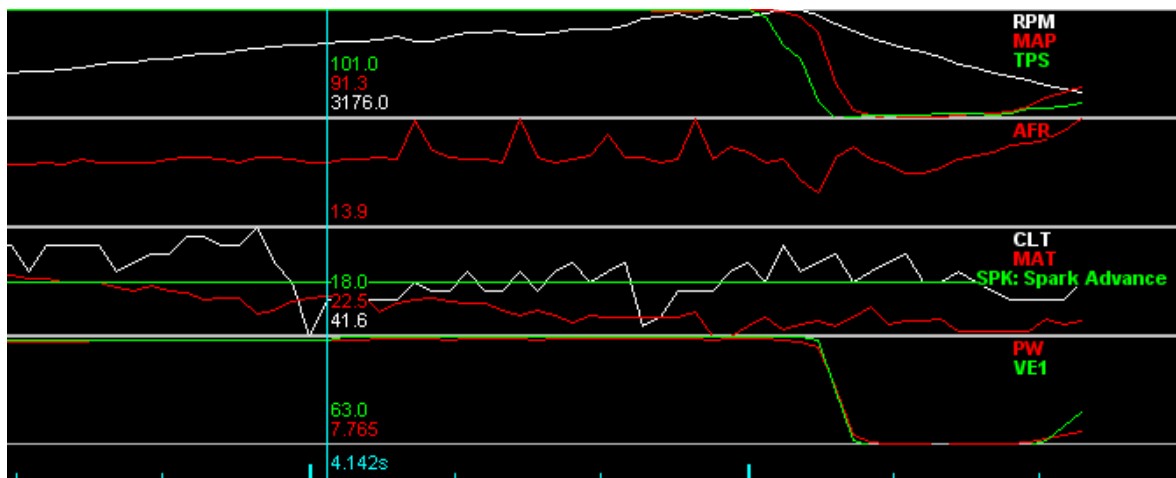


Figura 54, Picos de valores AFR durante a fase de testes [Foto do autor].

Como se pode observar na figura 54, a afinação do motor teve alguns problemas devido a problemas de picos de valores de AFR, que indicavam falta de combustível enquanto sob aceleração.

Outros problemas encontrados durante a fase de ensaios, foram as folgas existentes entre o conjunto de rodas dentadas do motor, que podem ter tido influência nos resultados obtidos. Para além das engrenagens, existia a folga entre a correia dentada que transmitia a potência do motor até ao volante de inércia. Ambos estes problemas eram ajustados quando se tornavam

graves, mas acabaram por voltar sempre (conclui-se ser necessário fazer peças com maior tolerância a vibrações).

Os valores recolhidos dos testes, recorrendo ao *data logger* do *tuning software*, eram depois analisados no programa *Mega Log Viewer Ms* de modo a verificar se era necessário mais algum tipo de afinação. Os valores recolhidos são, depois de verificado o bom funcionamento do motor, utilizados para calcular os parâmetros do mesmo.

Na Figura 55 pode-se diferenciar os binários obtidos entre os vários ensaios.

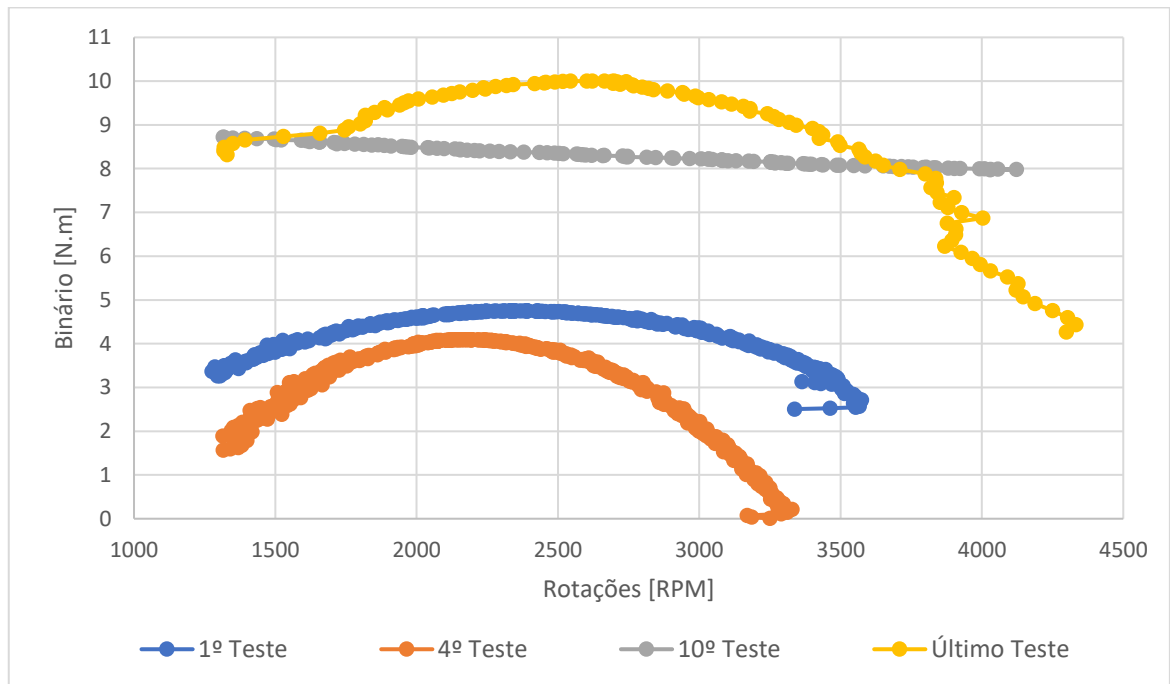


Figura 55, Binário segundo as Rotações de 4 teste diferentes.

Como observado na figura 55, foi-se obtendo melhores valores de binário a cada teste realizado, exceto para o 4º teste por problemas inesperados de afinação. Depois de concluídos os ensaios, extraiu-se os valores daquele que se considerou ser o melhor ensaio (Tabela 6), de modo a calcular os parâmetros característicos do motor.

Observa-se que neste caso, o último teste foi o melhor pois foi aquele que produziu um maior binário, embora o 10º teste seja semelhante para rotações baixas.

Tabela 6, Características extraídas do melhor ensaio do motor.

Time	RPM	MAP	Pressão	TPS	AFR	MAT	CLT	PW
s	RPM	kPa	psi	%	AFR	°C	°C	ms
0,87	1319	75	-2,5	56,8	11,5	25,7	50,9	4,978
1,07	1528	91	-0,2	101,1	12,9	25,6	50,6	6,731
1,202	1745	91,8	0	101,6	14	25,5	50,4	7,299
1,676	1897	91,5	-0,1	101,6	13	24,5	50,3	7,207
2,15	2095	91,5	-0,1	101,9	13,2	24,5	50,7	7,062
2,625	2318	91,6	-0,1	101,8	13,8	23,8	50,8	7,013
3,033	2517	91	-0,2	101,8	14	23,4	50,7	7,193
3,436	2692	91	-0,2	101,8	13,9	22,8	51	7,532
4,253	2941	90,8	-0,2	101,9	13,9	21,8	50,6	7,532
4,659	3114	90,9	-0,2	101,8	13,8	22,1	50,6	7,518
5,135	3318	90,9	-0,2	102	14	21,6	50,6	7,567
5,605	3498	91	-0,2	101,9	13,9	21,5	50,2	7,608
6,006	3710	90,7	-0,2	101,8	13,8	20,7	50,4	7,713
6,544	3880	90,6	-0,2	101,8	14	21	50,2	7,788
7,351	4090	90,7	-0,2	102	13,4	20,9	49,9	7,854
8,09	4297	90,7	-0,2	102	13,4	18,8	49,8	7,876

De modo a que seja fácil de observar os dados recolhidos, selecionou-se apenas alguns dados para determinadas rotações do motor. A partir destes dados pode-se então, tal como descrito em 2.5, caracterizar o motor segundo parâmetros específicos. No entanto, algumas expressões têm de ser ligeiramente alteradas de modo a possibilitar e facilitar o cálculo dos parâmetros.

Na Figura 56, pode observar-se a variação da rotação do motor, ao longo do tempo, tal como registado pelo *tuning software*, ao longo do curso de todo o ensaio (desde a aceleração inicial até à sua desaceleração), de modo a obter uma função mais precisa.

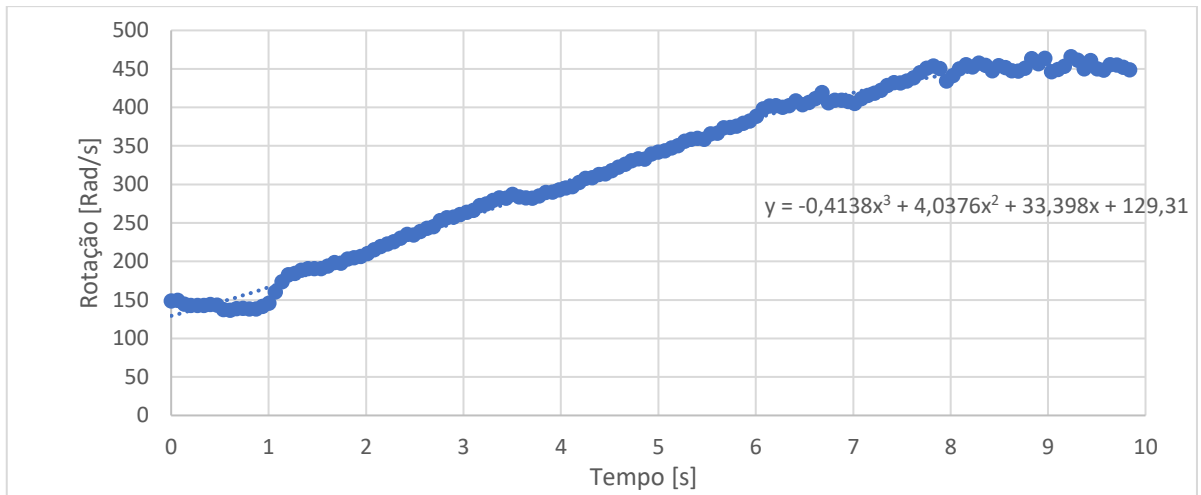


Figura 56, Variação da rotação do motor ao longo do tempo.

Determina-se com base nesses dados uma linha de tendência polinomial de grau 3, que será derivada de modo a obter uma equação para a aceleração angular. O binário é então calculado pela equação 4.5.

$$B = (20/18) * 0,1935 * \alpha(s) \text{ [N.m]} \quad (4.5)$$

Onde:

(20/18) - Relação de transmissão entre o volante de inércia e o motor.

0,1935 - Momento de Inércia do volante de Inércia utilizado [kg/m<sup>2</sup>].

$\alpha(s)$  - Aceleração angular segundo o tempo [rad/s<sup>2</sup>].

Calculado o binário, prosseguiu-se ao cálculo da potência efetiva do motor utilizando a equação 4.6.

$$P = B * N * 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (4.6)$$

Onde:

N - Rotações do motor em radianos por segundo.

O consumo específico de combustível é calculado utilizando o caudal mássico de combustível utilizando a expressão 4.7.

$$CE = (mfs * 3600) / P \text{ [g/kW.h]} \quad (4.7)$$

Os cálculos da eficiência volumétrica e rendimento global foram efetuados de acordo com as equações apresentadas no capítulo 2.5, não necessitando nenhum tipo de alteração para os cálculos de este trabalho, devendo apenas apontar-se que para o valor médio de MAT, a massa volumica de ar = 1,122 kg/m<sup>3</sup>. Os resultados dos ensaios com os devidos parâmetros calculados apresentam-se na tabela 7.

Tabela 7, Parâmetros extraídos dos ensaios do motor.

RPM	Aceleração Angular [Kg/m2]	Binário [N.m]	Potência [kW]	Caudal Mássico Horário [g/hr]	Consumo Específico [g/kW.h]	Eficiência Volumétrica [%]	Rendimento Global [%]
1319	39,48381	8,489019	1,172549	452,0022	385,4869	40,93676	21,22463
1528	40,61719	8,732695	1,397334	708,0172	506,6914	62,09119	16,14754
1745	41,31081	8,881824	1,623029	876,7982	540,2234	73,07219	15,14525
1897	43,44497	9,340669	1,855555	941,1584	507,2111	66,9975	16,13099
2095	45,02131	9,679581	2,123583	1018,48	479,6046	66,65955	17,05951
2318	46,04138	9,898896	2,402862	1119,072	465,7247	69,20598	17,56793
2517	46,47033	9,991121	2,633456	1246,333	473,269	72,011	17,28788
2692	46,4883	9,994984	2,817642	1395,81	495,3822	74,86621	16,51617
2941	45,28737	9,736785	2,998743	1524,917	508,5188	74,86621	16,08951
3114	44,07418	9,475949	3,090081	1611,617	521,5451	74,18945	15,68765
3318	42,13064	9,058087	3,147324	1728,387	549,1607	75,75521	14,89877
3498	39,65964	8,526823	3,123458	1832,024	586,5371	75,62163	13,94936
3710	37,11783	7,980333	3,100441	1969,872	635,3523	76,11375	12,87761
3880	33,08047	7,112302	2,889818	2080,169	719,8268	77,9677	11,36637
4090	25,67701	5,520558	2,364476	2211,338	935,2337	75,25865	8,748421
4297	17,4791	3,758006	1,69103	2329,764	1377,719	75,46946	5,938672
4427	5,990958	1,288056	0,597135	2401,467	4021,645	74,94429	2,034446

A tabela de tempos de injeção combustível foi a mais ajustada durante a fase de testes e ensaios, pois o *tuning software* não conseguiu fornecer uma tabela base que se aproximasse do necessário.

Revelou-se que estes parâmetros seriam os mais adequados para o funcionamento do motor, na altura em que foram realizados os ensaios. A tabela de ignição base (ver Fig. 57), fornecida pelo site [Spark], manteve-se inalterada, pois revelou-se ser a adequada para o propósito.

100.0	54	54	54	56	60	62	62	62	62	62	64	64
95.0	54	54	54	56	60	62	62	62	62	62	64	64
90.0	53	54	54	55	59	61	61	61	61	62	64	64
80.0	50	52	52	53	57	56	56	58	59	60	64	64
70.0	46	49	49	51	54	54	54	56	57	58	62	64
60.0	44	46	46	48	52	52	52	54	55	56	60	63
55.0	43	45	45	47	50	51	51	53	53	55	59	61
50.0	42	44	44	46	48	49	49	52	52	53	57	60
45.0	42	43	43	45	45	46	46	46	46	47	51	54
40.0	41	42	42	42	42	43	43	43	44	45	45	47
35.0	41	41	41	41	41	43	42	43	43	44	44	46
25.0	41	41	41	41	40	40	40	39	39	40	41	43
↙	500	900	1100	1400	1700	2000	2300	2700	3100	3500	4000	4500

Figura 57, Tabela de Combustível Final [Foto do autor].

## 5. Discussão de Resultados

Com a fase de testes terminada e com os resultados tratados, procede-se a verificar o propósito deste trabalho, que é, se um sistema eletrónico consegue superar um sistema mecânico.

De modo a entender a diferença entre os valores dos ensaios, utilizando um sistema de controlo mecânico ou um sistema de controlo eletrónico, recorreu-se ao uso de gráficos, para a comparação entre os dois métodos.

O primeiro gráfico (Fig. 58) descreve o binário em função da rotação do motor. Neste caso, observa-se que o sistema mecânico conseguiu produzir mais binário que o sistema de controlo eletrónico, além de manter o mesmo valor de binário para várias rotações, enquanto o sistema eletrónico atinge o binário máximo por volta das 3000 RPM, e depois começa a perder. Embora seja menor, consegue manter uma curva mais estável, isto é, exerce continuamente o mesmo valor de binário ao longo da maioria do regime de rotação.

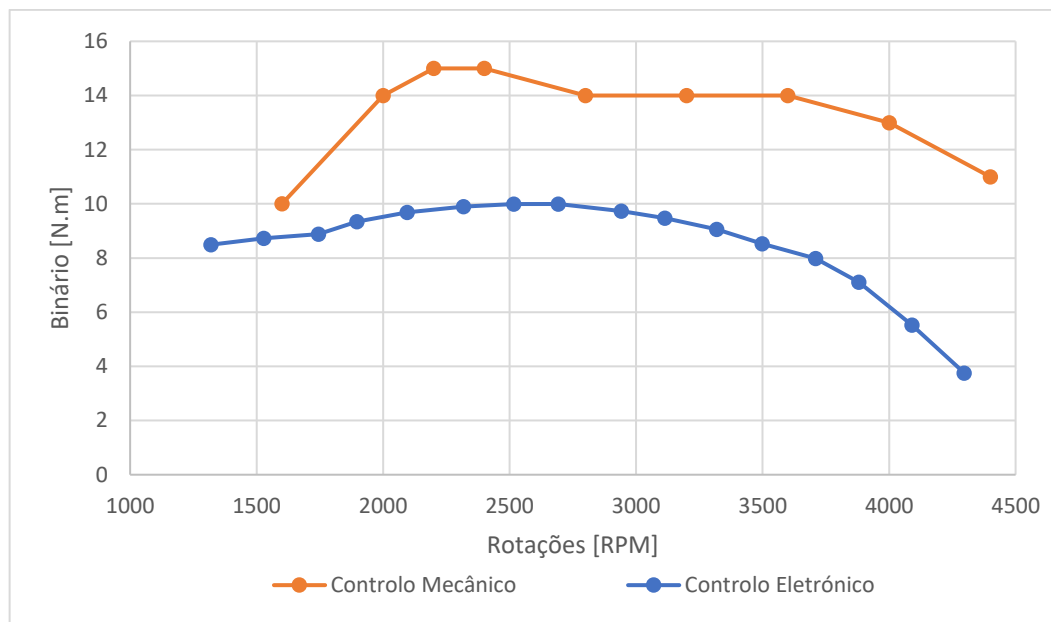


Figura 58, Comparação entre o Binário produzido por controlo mecânico e controlo eletrónico.

A Fig. 59 descreve a potência efetiva segundo a rotação do motor. Como a potência varia em função do binário, o resultado é o mesmo, com o controlo mecânico a ser superior ao controlo eletrónico, embora o controlo eletrónico apresente uma curva mais suave (sem perdas, nem hesitações).

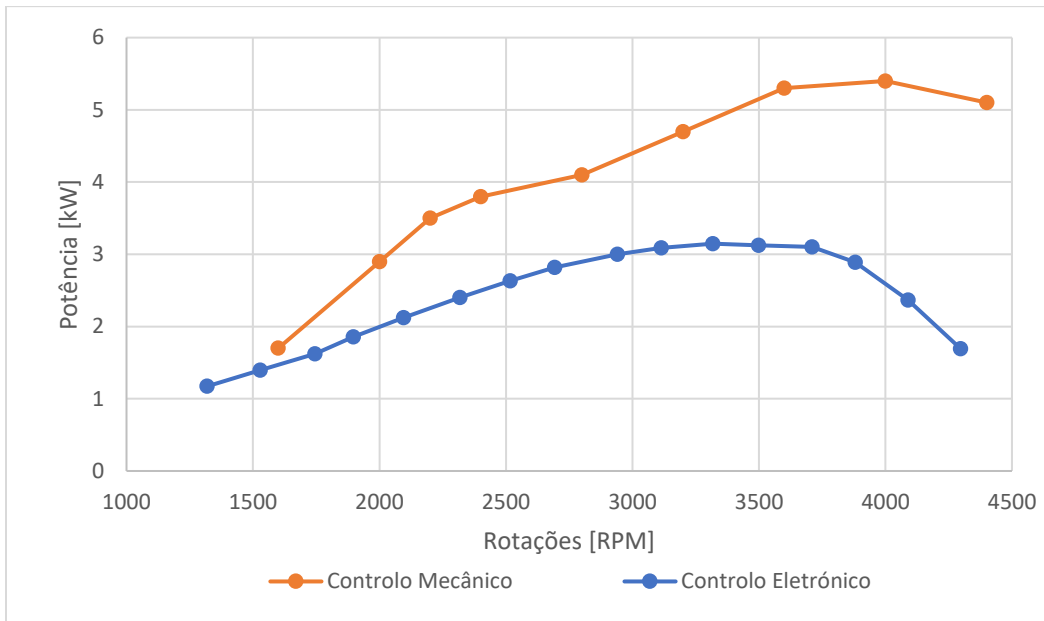


Figura 59, Comparação entre a Potência produzida por controle mecânico e controle eletrônico.

A Fig. 60 apresenta o caudal mássico horário de combustível segundo as rotações. Neste gráfico consegue-se observar que o caudal de combustível, para o controle eletrônico é ligeiramente menor para rotações mais baixas até às 2500 RPM. A partir das 2500 RPM, o controle eletrônico tem um maior caudal mássico, ou seja, há uma maior entrega de combustível ao cilindro, ao contrário do caso do controle mecânico.

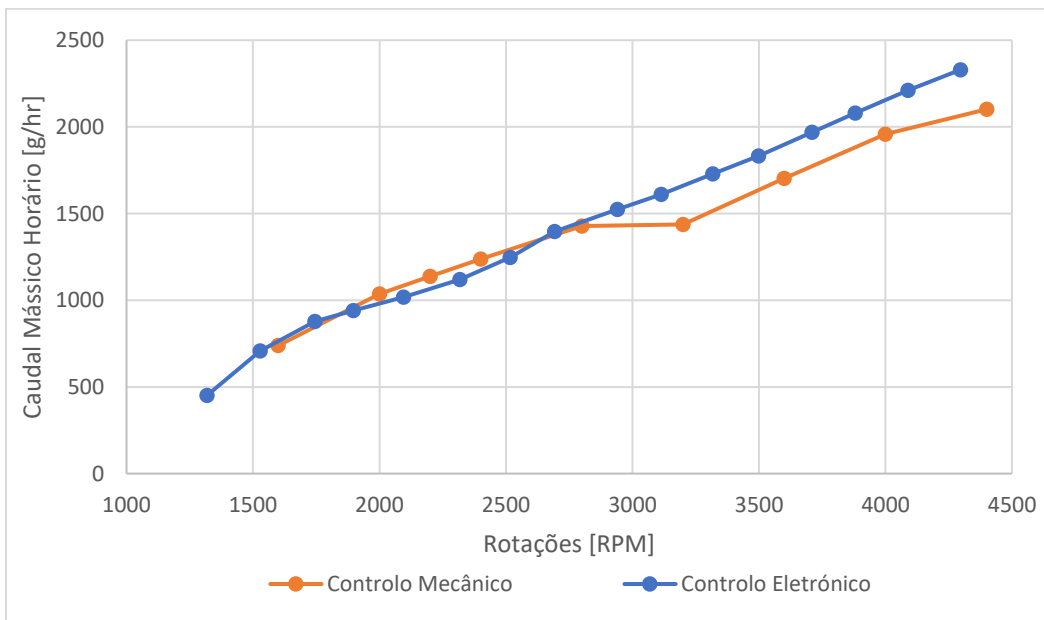


Figura 60, Comparação entre o Caudal Mássico para controle mecânico e controle eletrônico.

A Fig. 61 apresenta o consumo específico e demonstra que o sistema de controlo eletrónico tem, sem dúvidas, um consumo ligeiramente maior do que o sistema de controlo mecânico.

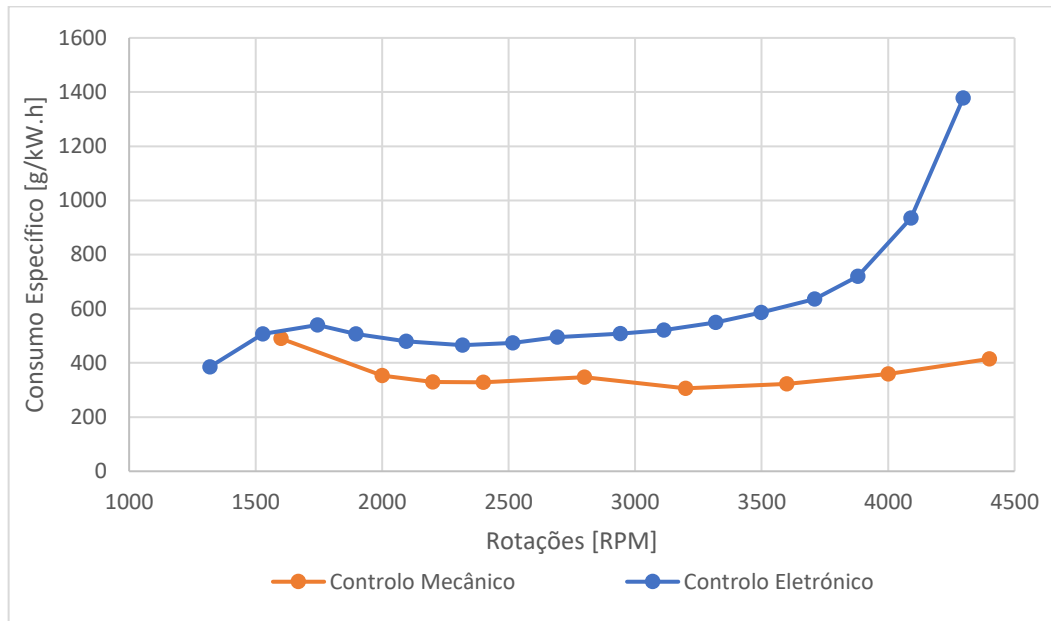


Figura 61, Comparação entre o Consumo Específico para o controlo mecânico e controlo eletrónico.

O rendimento global é menor para o caso do controlo eletrónico, visto que para um maior consumo de combustível, produz menor binário e conseqüentemente potência ao freio, em comparação com o controlo eletrónico que consegue produzir mais binário com um consumo específico menor (ver Fig. 62).

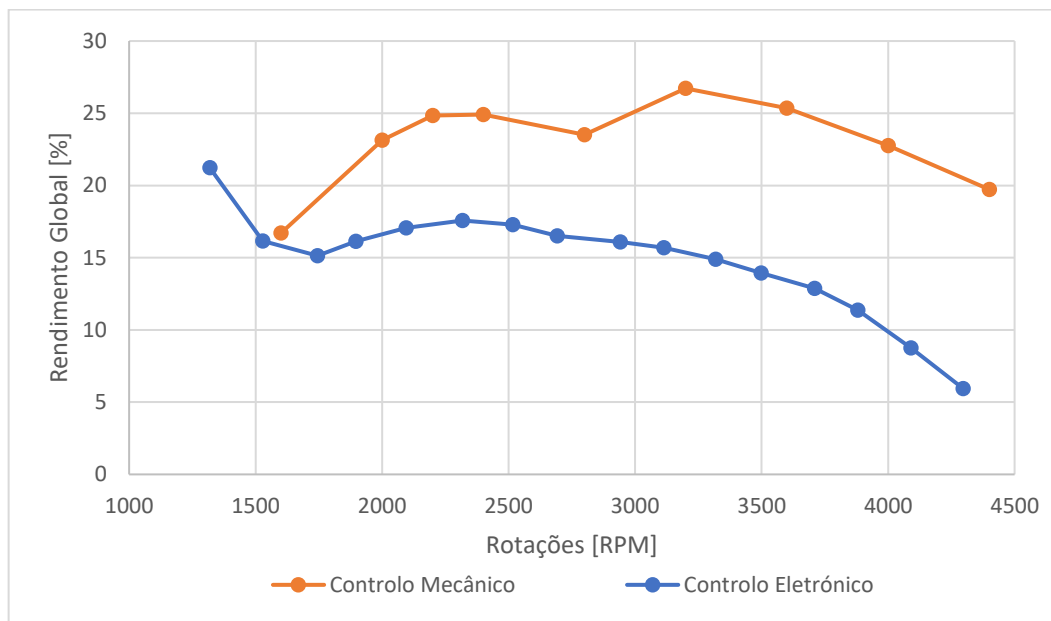


Figura 62, Comparação entre o Rendimento Global para controlo mecânico e controlo eletrónico.

A eficiência volumétrica, são semelhantes para ambos os casos, sendo no caso do controle eletrônico melhor para regimes de rotação altos, e no controle mecânico melhor para regimes de rotação entre as 2000 RPM e as 2500 RPM (ver Fig. 63).

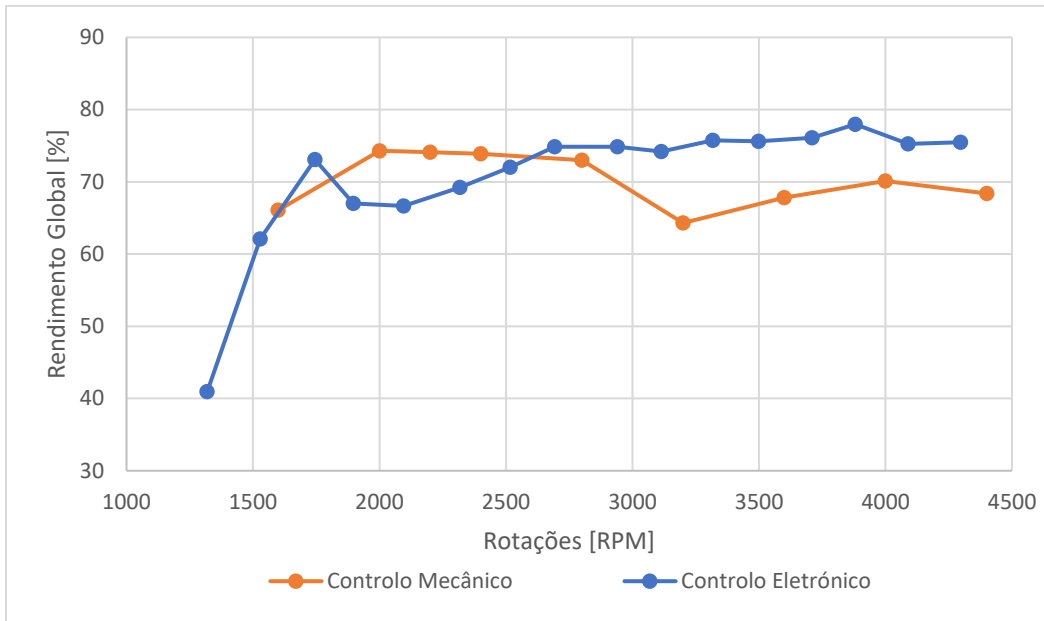


Figura 63, Comparação entre a Eficiência Volumétrica para o controlo mecânico e controlo eletrônico.

## 6. Conclusões

Os objetivos para a realização deste trabalho foram cumpridos, embora tenham existido momentos de dúvida sobre a conclusão da mesma.

No desenrolar deste trabalho foram apresentados e relembrados alguns conceitos teóricos, respetivos ao tema de motores de combustão interna, como termodinâmica, mecânica dos materiais, entre outros.

O trabalho começou no reconhecimento do motor, como se iria acoplar as peças, como se iriam desenhar/ conceber. Por estar na presença de um motor invulgar e especial, mas não diferente daquilo que já existe, houve alguma consideração e estudo para entender o funcionamento deste. A fabricação de peças foi simples embora demorada, quer por falta de ferramentas para trabalhar o material, ou por quebra destas e ainda devido a atrasos logísticos que atrasaram ainda mais o calendário para a realização de tarefas.

A colocação de sensores verificou-se ser um verdadeiro obstáculo á realização de tarefas dentro de um prazo, não por serem de difícil colocação, coisa que não eram, mas pelo continuo mal funcionamento de muitos destes. Tomando como exemplo o sensor de Hall, que só á quinta vez decidiu funcionar dentro do esperado.

A realização de testes revelou-se ser outro obstáculo por ser muito em cima do prazo de entrega deste referido trabalho. Isto deveu-se ao facto de ter de fabricar um suporte para acoplar o motor ao suporte do volante de inércia, seguido da fabricação de um adaptador, de modo a que a tomada de força do motor pudesse albergar uma polia para uma correia 5M. Para além disto, os testes tiveram de ser realizados com o “tempo contado” pois, o banco de ensaios já estava requisitado para outro projeto. No entanto, efetuou-se os ensaios sem grandes problemas e os valores recolhidos e apresentados, foram aqueles para os quais se pensou ser o melhor ensaio do dia.

Ao tratar os dados dos ensaios concluiu-se que, talvez, o mapa de injeção que produziu melhores resultados, precisava de um pouco mais de afinação.

A diferença de binário e potência entre o controlo mecânico e eletrónico, vem de certo modo de todas as perdas por atrito nos ensaios, como perdas na correia ligada ao banco de ensaios, nas engrenagens responsáveis pela sincronização, devido a uma lubrificação deficiente, e ainda na folga entre ditas engrenagens, que causaram um ligeiro dessincronizamento no motor.

No entanto, a diferença entre binários deve-se essencialmente à falta de combustível injetado no motor. Os logs dos ensaios mostraram que o motor funcionou em aceleração, sempre com uma mistura ligeiramente pobre, que se traduz em potência perdida. Mas apesar desse problema, os gráficos acima mostrados permitem observar que embora os resultados não sejam os esperados para este trabalho, denota-se que o controlo eletrónico tem um efeito mais suave no motor quando comparado com o controlo mecânico. As curvas para o controlo eletrónico são mais suaves, lineares, ao contrário do controlo mecânico que dá “saltos” pelo gráfico. Espera-se que com um enriquecimento do mapa de injeção se possa atingir e mesmo superar os valores obtidos para o carburador.

Conclui-se então, que o trabalho aqui desenvolvido não conseguiu demonstrar exatamente o que pretendia inicialmente, mas prevê-se que com maior tempo de afinação é possível obter melhores resultados.

## **6.1. Sugestões para Trabalhos Futuros**

Para este motor propõe-se, a fabricação de uma melhor caixa para albergar as engrenagens de sincronização, de modo a permitir um melhor e mais fácil ajuste destas, assim como uma melhor lubrificação, visto a caixa presente não permite um ajuste preciso e a correta vedação do conjunto, perdendo-se fluido lubrificante verter e “disparar” todo o fluido lubrificante.

Sugere-se ainda a otimização minuciosa dos mapas de injeção, de modo a produzir uma potência semelhante aquela produzida pelo controlo mecânico ou maior ainda. Depois de ter assegurado a melhor potência com ar atmosférico, utilizar um sobrealimentador para verificar que tipo de potências poderá produzir um motor de tal geometria.

# Bibliografia

[André] - [André Almeida D'Amil, 2016, "Otimização dos Mapas de Injeção e Ignição Eletrónica de um Motor", Mestrado em Engenharia Eletromecânica, UBI]

[Antal, 1995] - [Dr. Antal Penninger, Ferenc Lezsovits, János Roháli, Vilmos Wolf. "Internal Combustion Engines", 1995. Revised: Dr. Ákos Bereczky, 2006.]

[Basshuysen, 2004] - [Richard Van Basshuysen, Fred Schafer, 2004, "Internal Combustion Engine Handbook - Basics, Components, Systems, and Perspectives"; SAE International, Warrendale, Pa. USA, 870 p.]

[Bosch, 1999] - [Bosch, Gasoline-engine management, 1st edition September 1999, SAE Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA 15096-0001 U.S.A., ISBN 0-7680-0510-8]

Branco, Moura; Ferreira, C Martins; Costa, J Domingos; Ribeiro, J Silva; "Projeto de Órgãos de Máquinas". Fundação Calouste Gulbenkian. 2005.

[Carb tech] - [<https://www.britannica.com/technology/carburetor>]

[Catálogo HPC Gears] - [<https://shop.hpceurope.com/an/produit.asp?prid=221&produit=Spur%20gear>]

[Eduardo, 2017] - [Eduardo João Nóbrega Spínola, 2017, "Controlo Eletrónico de um Motor de Combustão Interna para Regular um Gerador Elétrico", Mestrado em Engenharia Eletrotécnica Telecomunicações, Universidade da Madeira]

[GANESAN, 2007] - [V Ganesan, 2007, "Internal Combustion Engines", McGraw-Hill, USA , 733 p.]

[Gregório, 2017] - [Jorge Manuel Pereira Gregório, 2017, "Desenvolvimento de um Motor Alternativo de Combustão Interna de Pistões Opostos", Tese para Obtenção Grau de Doutor, Engenharia Aeronáutica, Universidade da Beira Interior]

[Heywood, 1988] - [Heywood J., 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, USA, 930 p.]

[Marat-Mendes 2012] - Marat-Mendes, Rosa; Folhas de Apoio à unidade curricular de Elementos de Máquinas II, ENGRENAGENS, DEM, Instituto Politécnico de Setúbal, 2012.

[Moran e Shapiro, 2006] - [Michal Moran, Howard Shapiro, 2006, "Fund. Of Engineering thermodynamics", Jonh Wiley & Sons Inc., England, 832 p.]

[MS2] - [<http://www.megamanual.com/ms2/>]

[Otto archive] - [<https://web.archive.org/web/20110507083259/http://www.nicolaus-august-otto.de/node/15> ]

[Otto motor] - [<http://www.mecanica.ufrgs.br/mmotor/otto.html>]

[Stone, 1999] - [Richard Stone, 1999, "Introduction to Internal Combustion Engines", MACMILLAN PRESS LTD, UK, 642 p.]

[Taylor, 1985] - [Charles Fayette Taylor, 1985, "Internal-Combustion Engine in Theory and Practice, Volume 2 - Combustion, Fuels, Materials, Design", The M.I.T. Press, USA, 680 p.]

[Wideband] - [[https://ldperformance.co.uk/product/wideband-controller/?attribute\\_option=Wideband+Controller%2BBosch+LSU+ADV](https://ldperformance.co.uk/product/wideband-controller/?attribute_option=Wideband+Controller%2BBosch+LSU+ADV)]

[Spark] - [<http://www.useasydocs.com/theory/spktable.htm>]

# Anexos

# Anexo A

## Desenhos Solidworks de Peças Dimensionadas

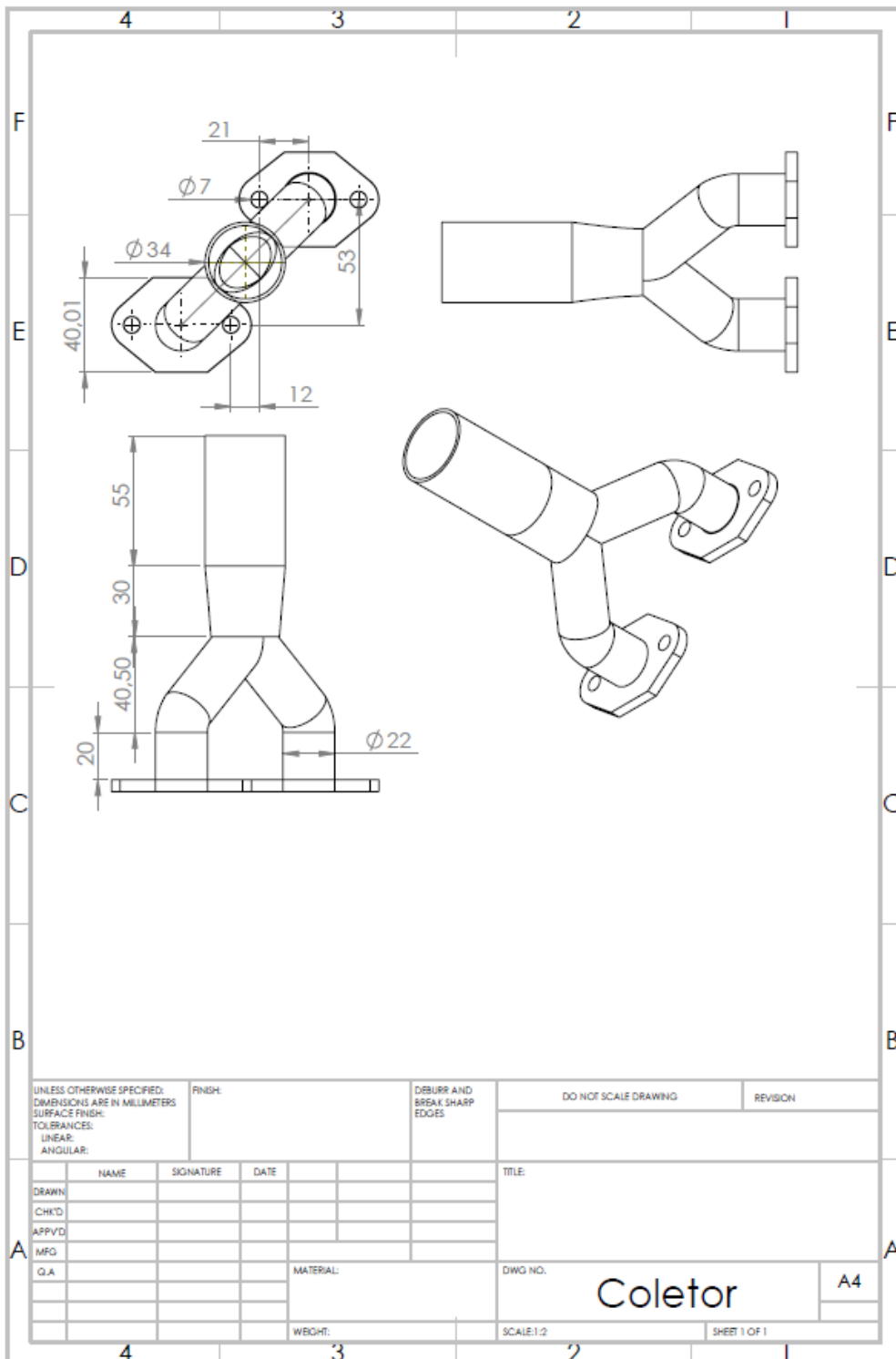


Figura 1A, Desenho em Solidworks do coletor de admissão [Foto do Autor].

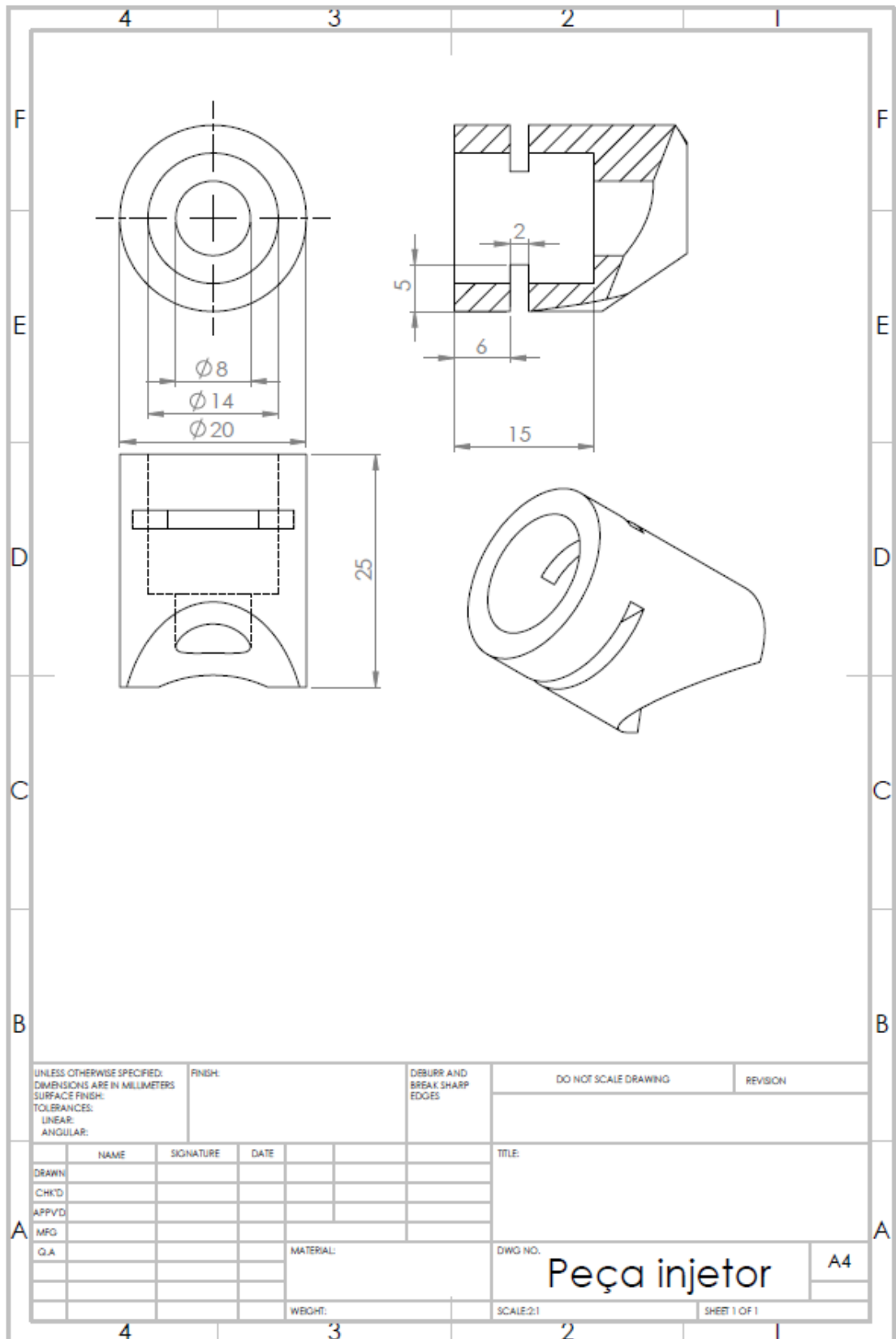


Figura 2A, Desenho em Solidworks da peça para acoplar o injetor ao coletor de admissão [Foto do Autor].

## Anexo B

### Verificação da resistência do dentado à flexão

As engrenagens são elementos cruciais dos órgãos de máquinas. Segundo Branco (2005), podem falhar basicamente por dois tipos de causas distintas:

- Aparecimento de picadas na superfície dos dentes devido ao valor excessivo das pressões de contacto que são gerados no decurso do engrenamento dos dentes;
- rotura dos dentes por excesso do valor da tensão máxima de flexão na secção crítica localizada no pé do dente.

Considerou-se que a causa mais provável de ruína, seria o excesso do valor da tensão máxima de flexão que ocorre no pé do dente, devido à flexão causada pela carga transmitida. Procedeu-se então à verificação de resistência do dentado à flexão para tentar prevenir este tipo de falha.

O cálculo da capacidade de carga à rotura de uma engrenagem baseia-se na comparação da tensão máxima de flexão na secção crítica do pé do dente  $\sigma_{max}$ , com a tensão admissível  $\sigma_{adm}$  do material usado para cada uma das rodas, como se mostra na equação A.1.

$$\sigma_{max} < \sigma_{adm} \quad (A.1)$$

De acordo com o modelo simplificado da teoria Lewis, enunciada em 1892, o cálculo da resistência do dentado é baseado na determinação da tensão máxima de flexão que ocorre na secção mais crítica do dente (base do dente), dada pela seguinte equação A.2:

$$\sigma_{max} = \frac{Ft}{Cv \times L \times md \times Y} \quad (A.2)$$

onde: Ft representa a força tangencial, Cv, coeficiente de velocidade ou de solitação dinâmica, L a largura do dentado, md o módulo normal do dentado e Y é o fator de forma.

Esta equação é importante, pois forma a base do procedimento AGMA (American Gear Manufacturers Association) para determinar a resistência à flexão de dentes de engrenagens. Deste modo, pode-se usar esta equação para uma estimativa preliminar do tamanho das engrenagens necessárias para várias aplicações [Marat-Mendes 2012]. A determinação do coeficiente de velocidade, Cv é dada pela equação A.3.

$$Cv = \frac{A}{A+V} \quad (A.3)$$

Onde, A é igual a 6 para engrenagens de média precisão. Por sua vez a velocidade calcula-se pela equação A.4, e o diâmetro da engrenagem pela equação A.5.

$$V = \omega \times \frac{d}{2} = \frac{2 \times \pi \times n}{60} \times \frac{d}{2} \quad (\text{A.4})$$

$$d = m_d \times Z = 2 \times 42 = 84 \text{ mm} \quad (\text{A.5})$$

onde  $\omega$  é a velocidade angular,  $d$  o diâmetro primitivo da roda dentada,  $n$  a velocidade de rotação,  $m_d$  o módulo do dentado e  $Z$  o número de dentes. Substituindo os valores na equação A.4, onde o a velocidade de rotação do binário máximo considerado é de 2800 rpm obtém-se na equação A.6 o valor da velocidade tangencial.

$$V = \frac{2 \times \pi \times 2800}{60} \times \frac{84 \times 10^{-3}}{2} = 12.32 \text{ m/s} \quad (\text{A.6})$$

Substituindo o valor de  $A$  e da velocidade na equação A.3, obtém-se A.7 o valor de  $C_v$ :

$$C_v = \frac{6}{6+12.32} = 0.328 \quad (\text{A.7})$$

A força tangencial descrita na equação A.8 tem o valor de 357.14 N, onde  $B$  é o binário. Neste caso o binário máximo considerado é de 15 Nm, como obtido na tese da conceção do motor.

$$F_t = \frac{B}{d/2} = \frac{15}{84 \times 10^{-3} / 2} = 357.14 \text{ N} \quad (\text{A.8})$$

Logo o valor da tensão máxima obtém-se na equação A.9 que resulta da substituição, na equação A.2, dos valores entretanto calculados,

Valor tabelado do fator de forma depois de interpolação:  $Y=0,3944$  ( $Z = 42$  dentes). [Marat-Mendes 2012]

$$\sigma_{max} = \frac{357.14}{0.328 \times 20 \times 2 \times 0.3944} = 69.02 \text{ MPa} \quad (\text{A.9})$$

A tensão admissível será dada pela equação A.10.:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_r}{n} = \frac{600}{5} = 120 \text{ MPa} \quad (\text{A.10})$$

onde  $\sigma_r$  é a tensão de rotura do material, valor tabelado para o aço CK 45, 600 MPa, e  $n$  é o coeficiente de segurança, considerou-se 5, valor superior para transmissões sujeitas a choques e oscilações de carga.

$$\sigma_{max} < \sigma_{adm} ; 69.02 \text{ MPa} < 120 \text{ MPa} \quad (\text{A.11})$$

A comparação feita na equação A.11 permite considerar como validado este critério de verificação. Quando um par de engrenagens roda a uma velocidade moderada ou elevada e há

ruído, poderão ocorrer efeitos dinâmicos, logo a equação de flexão de Lewis toma a seguinte forma A.12 para permitir confirmar o cálculo do módulo do dentado.

$$m_d \geq \frac{n \times Ft}{\sigma_r \times C_v \times L \times Y} \quad (\text{A.12})$$

Substituem-se os valores na equação A.12 e obtém-se o valor do módulo do dentado na equação A.13.

$$m_d \geq \frac{5 \times 357.14}{600 \times 0.328 \times 20 \times 0.3944} = 1.15 \text{ mm} \quad (\text{A.13})$$

Comparação entre o valor considerado e o valor calculado a partir da tensão máxima e da tensão admissível.

$$1.15 \text{ mm (valor calculado)} < 2 \text{ mm (valor considerado)} \quad (\text{A.14})$$

A comparação feita na equação A.14 permite considerar também validado este critério de verificação.

Por último considera-se também o dente sujeito a um carregamento dinâmico e para isso usa-se a Fórmula de Lewis corrigida para carregamento dinâmico, equação A.15.

$$m_d \geq \frac{Ft \times K_s \times K_t \times K_1}{\sigma_r \times C_v \times L \times Y \times K_2} \quad (\text{A.15})$$

Substituindo-se os valores na equação A.15 obtém-se o valor do módulo do dentado na equação A.16.

$$m_d \geq \frac{357.14 \times 5 \times 1.33 \times 1.25}{600 \times 0.328 \times 20 \times 0.3944 \times 1} = 1.91 \text{ mm} \quad (\text{A.16})$$

Na equação A.17 compara-se o valor considerado para o módulo do dentado e o valor calculado a partir da Fórmula de Lewis corrigida para carregamento dinâmico.

$$m_d = 2 \text{ mm (valor considerado)} > 1.91 \text{ mm (valor calculado)} \quad (\text{A.17})$$

A comparação feita na equação A.17 permite considerar também validado este critério de verificação.

## Anexo C

### Desenhos Solidworks para Maquinagem das Engrenagens

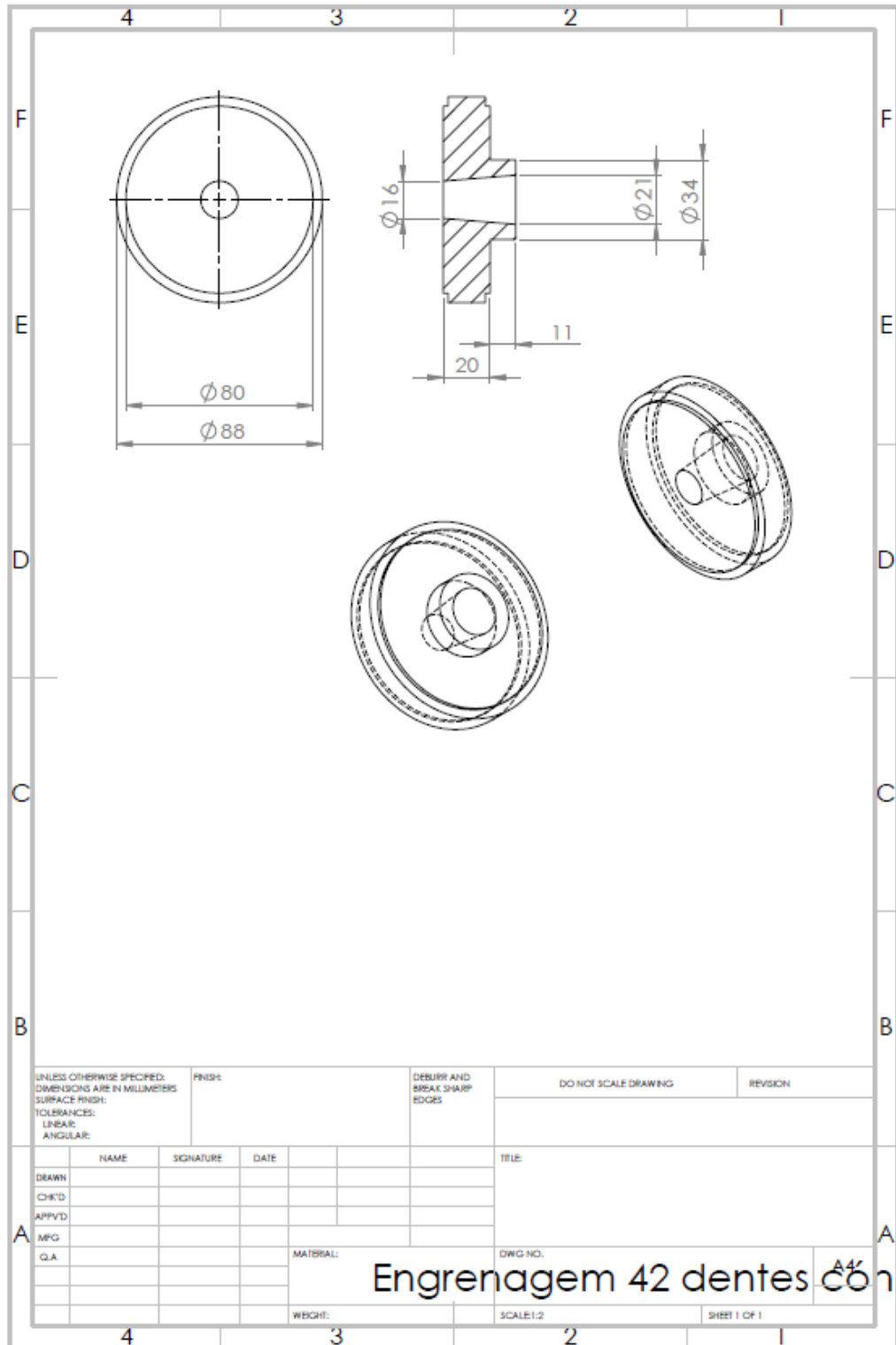


Figura 1C, Desenho para engrenagem de 42 dentes com um perfil interior cônico [Foto do autor].

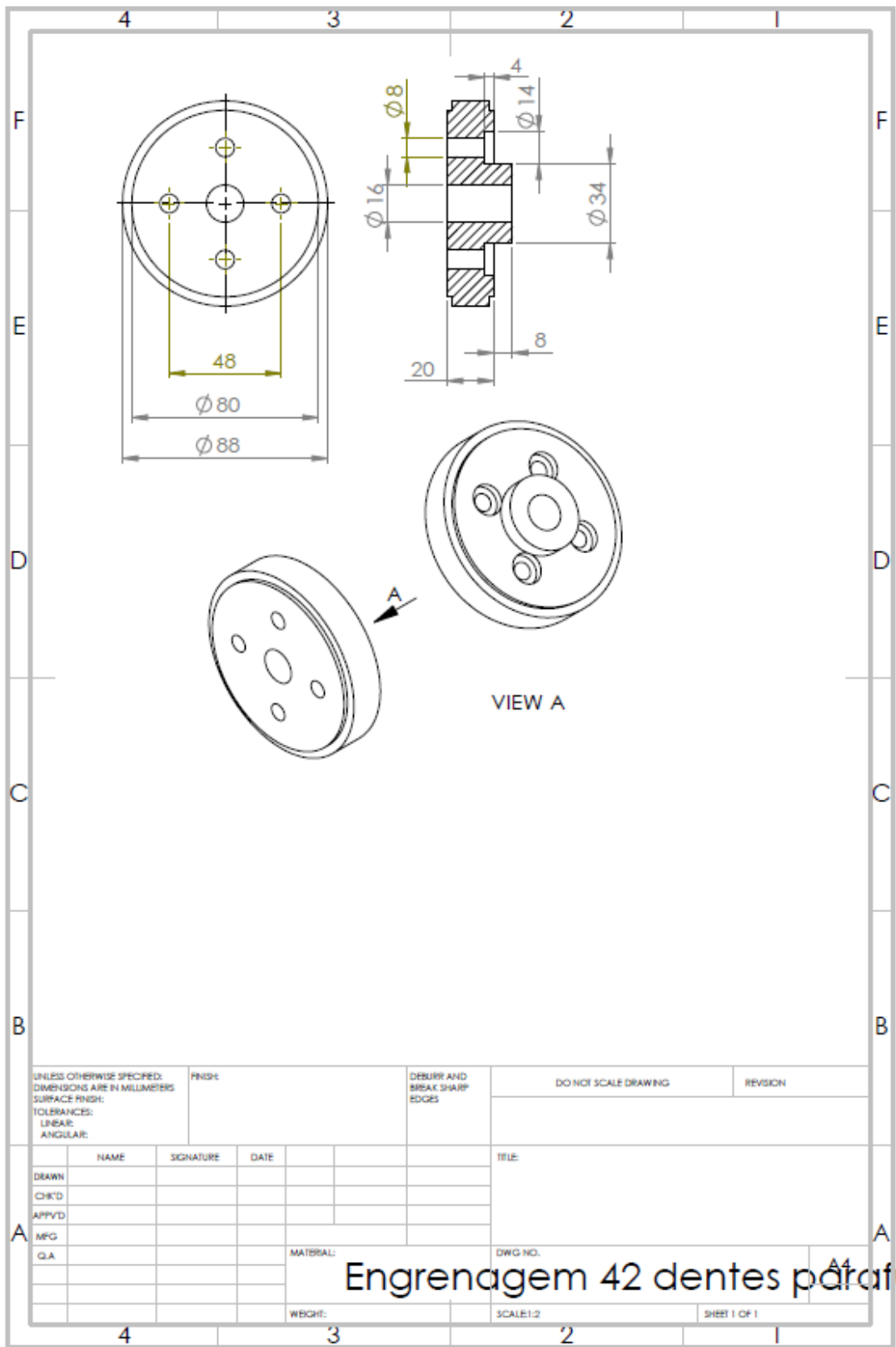


Figura 2C, Desenho para engrenagem de 42 dentes com perfurações para acoplamento de uma junta universal [Foto do autor].

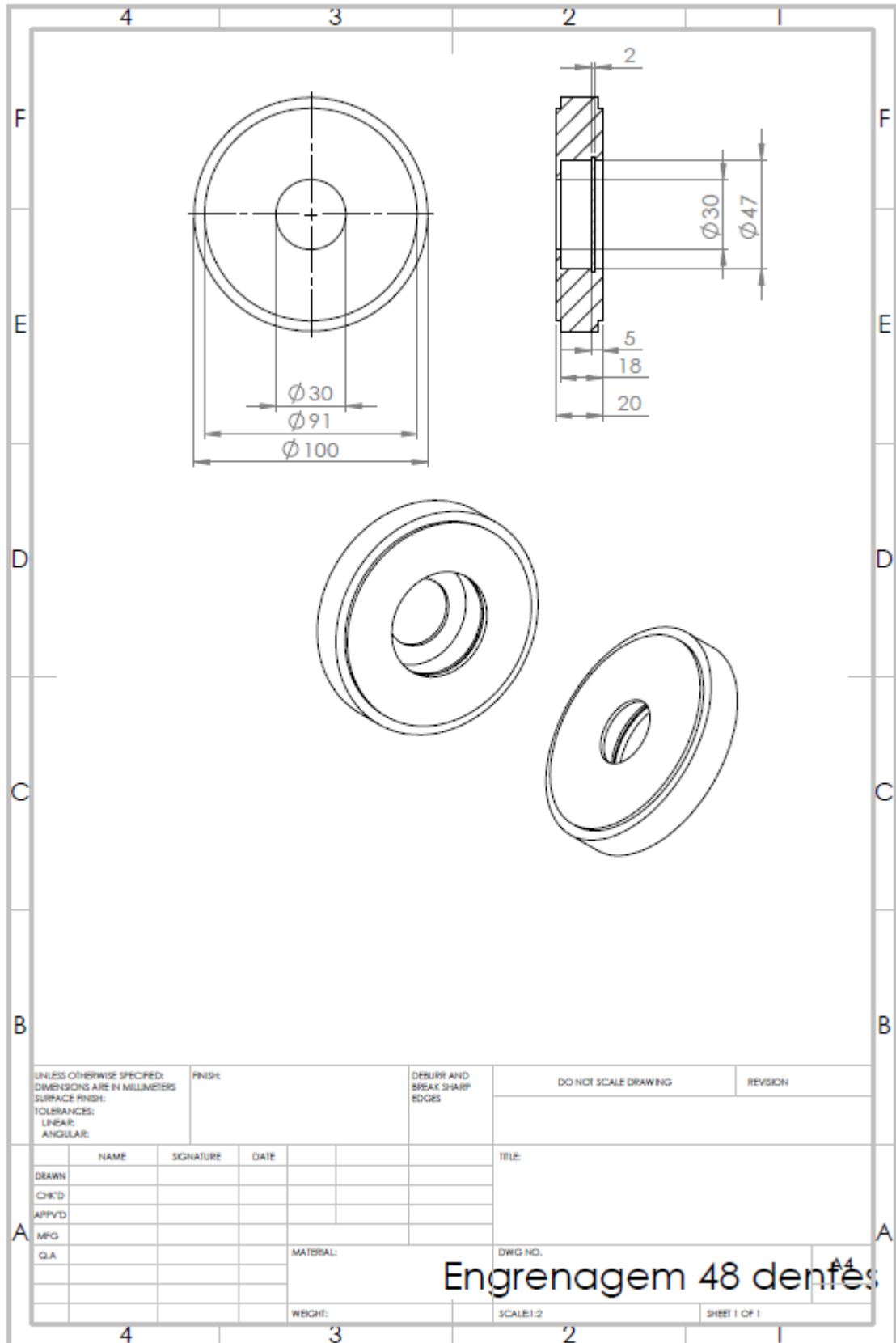
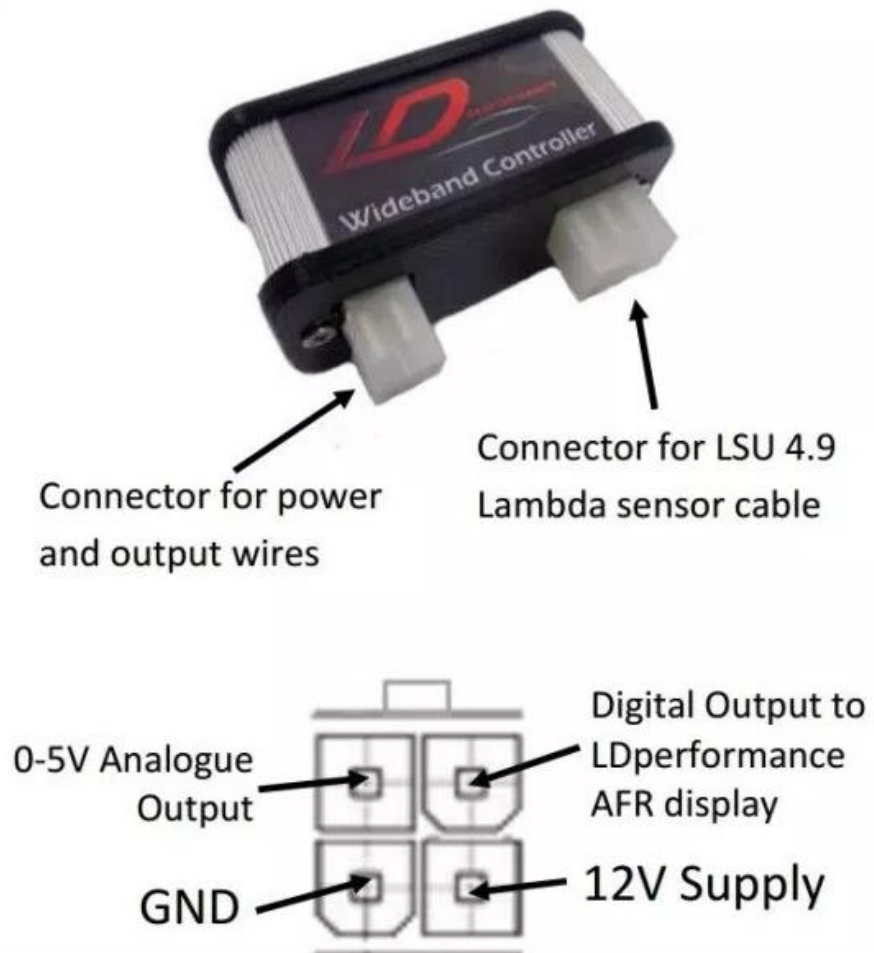


Figura 3C, Desenho para engrenagens de 48 dentes com um perfil interior para colocação de chumaceira de rolamentos [Foto do autor].

## Anexo D

### Diagrama de Ligações do Sensor de Oxigénio

[Extraída de Wideband]



## Diagrama de Ligações para a Centralina MegaSquirt

[Extraída de <http://www.stcolombia.com/portal/hazlo-tu-mismo-diy-/35523-diy-mods-megasquirt-ii-extra.html>].

