



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Controlo Eletrónico de um Motor Monocilíndrico

João Miguel Aguiar Caleira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Aeronáutica
(ciclo de estudos integrado)

Orientador: Prof. Doutor Francisco Miguel Ribeiro Proença Brójo

Covilhã, fevereiro de 2018

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha querida família e amigos...

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado envolveu toda uma dedicação pessoal e profissional de minha parte, que não seria possível nem tornada realidade sem todo o apoio fornecido, quer tenha sido direta ou indiretamente, por diversas pessoas que me ajudaram ao longo da minha caminhada que foi o Mestrado Integrado em Engenharia Aeronáutica na Universidade da Beira Interior. Deixo algumas palavras sentidas e de apreço a todas estas pessoas, que me ajudaram nesta grande etapa da minha formação académica, a quem estarei eternamente grato.

Ao Professor Doutor Francisco Miguel Ribeiro Proença Brójo, meu orientador de dissertação, um especial agradecimento por todo o apoio e disponibilidade fornecidas. Agradecer também por me ter proporcionado todas as condições necessárias para a elaboração da minha dissertação de mestrado, bem como todo o saber que transmitiu. As suas opiniões, críticas e dúvidas esclarecidas em muito contribuíram para a realização de todo este trabalho.

Ao Professor Abílio Manuel Pereira da Silva, docente do Departamento de Eletromecânica, pelo apoio e total disponibilidade conferidas na fase inicial da minha dissertação, demonstrando sempre um grande profissionalismo, clareza e rigor.

Ao Senhor Rui Manuel Tomé Paulo, assistente operacional do Departamento de Ciências Aeroespaciais, e Senhor João António da Silva Correia, técnico do Departamento de Engenharia Eletromecânica, pelos conhecimentos transmitidos, conselhos e críticas, que em muito me auxiliaram na componente prática da minha dissertação.

Ao Professor Hélder Correia, docente do Departamento de Eletromecânica, por todo o tempo despendido e apoio fornecido, na qual evidenciou total disponibilidade e profissionalismo numa fase crucial da minha dissertação.

A todos os docentes pertencentes ao Departamento de Ciências Aeroespaciais e ao Departamento de Eletromecânica, por todo o conhecimento e apoio transmitidos ao longo do meu percurso académico.

A todos os meus amigos pela amizade, companheirismo e afeto que em muito facilitou todo o trabalho desenvolvido, estando sempre do meu lado durante esta fase.

Por último, mas não menos importante, dirijo um grande agradecimento a toda a minha família que me apoiou e suportou, nos bons e maus momentos deste meu longo percurso. Agradecer em especial aos meus pais que tornaram tudo isto possível, acreditando sempre em mim e apoiando-me de todas as formas possíveis e alcançáveis.

Resumo

Os motores a pistão implementados na indústria automóvel, dos motociclos e da aviação, têm vindo a sofrer progressivos avanços tecnológicos no decorrer das últimas décadas. Estes são introduzidos com o objetivo de tornar os veículos mais económicos, eficientes, menos poluentes e que ao mesmo tempo apresentem um incremento considerável na potência produzida. Uma das medidas que mais se destacou terá sido a crescente implementação do controlo eletrónico de diversos componentes do motor nos anos 80, mais especificamente a nível do sistema de injeção de combustível e de ignição da mistura ar-combustível. Esta dissertação engloba todo o processo de conceção e fabricação de um corpo de acelerador e respetivo adaptador, com base em componentes já existentes. Estes funcionam como base para efetuar a transição, num motor monocilíndrico de baixa cilindrada, de um sistema de alimentação por carburador para um com injeção eletrónica de combustível. É igualmente concebido um mecanismo de medição de binário e de adaptação de uma hélice ao volante do motor. Os componentes projetados, em conjunto com outros auxiliares, permitiram realizar um estudo que teve como base analisar, registar e comparar a *performance* de um motor Honda GX31, com recursos a diversos sensores e atuadores, em três configurações diferentes, uma com carburador, outra com o sistema de injeção eletrónica e, por último, outra com injeção e ignição eletrónica aplicadas em simultâneo. A avaliação da *performance* é feita tendo em consideração a aplicação de uma carga aproximadamente constante e de diferentes regimes de funcionamento, onde para alguns dos quais os mapas da eficiência volumétrica e do ângulo de avanço à ignição são otimizados. A análise numérica consistiu na leitura do binário, através de uma célula de carga, e do consumo de combustível, a partir dos quais é possível calcular outras grandezas, tais como a potência efetiva, o consumo específico e rendimento. Grande parte do processo de afinação e de recolha dos dados obtidos, foi realizado com recurso a um controlador MegaSquirt MS-II e aos *softwares* TunerStudio MS e MegaLogViewer. Pretende-se portanto evidenciar as vantagens/desvantagens que a implementação de cada um dos sistemas controlados eletronicamente traz ao ramo dos motores de combustão interna a 4 tempos e de pequena cilindrada, focando também todo o processo computacional e base teórica envolvidos em torno da manipulação e otimização dos regimes de funcionamento. As incertezas experimentais são identificadas e quantificadas, e são propostos trabalhos futuros e melhoramentos de componente prática e teórica.

Palavras-chave

Controlo eletrónico; Transição; Motor monocilíndrico; *Performance*; Otimização; MegaSquirt MS-II; Carga aproximadamente constante

Abstract

The piston engines implemented in the automotive, motorcycle and aviation industries have been undergoing progressive technological advances over the last decades. These are introduced with the aim of turning vehicles more economical, efficient, less polluting and at the same time presenting a considerable increase in the power produced. One of the measures that stood out the most was the implementation of electronic control of several engine components in the 1980s, more specifically in the systems of fuel injection and ignition of the air-fuel mixture. This dissertation encompasses the whole process of designing and manufacturing a throttle body and its respective adapter, based on existing components. These components work as a basis for the transition, in a low-displacement single-cylinder engine, from a carburetor-fed system to an electronic fuel injection system. It is also conceived a mechanism for measuring torque and adapting a propeller to the flywheel of the engine. The components designed, together with other auxiliaries, allowed the accomplishment of a study to analyze, record and compare the performance of a Honda GX31 engine, with the resource to several sensors and actuators, in three different configurations, one with carburetor, other with the electronic injection system and another with electronic injection and ignition applied simultaneously. Performance evaluation was made having in consideration the application of an approximately constant load and different operating regimes, where for some of them the maps of the volumetric efficiency and ignition advance angle are optimized. The numerical analysis consisted of the reading of torque, through a load cell, and fuel consumption, from which is possible to calculate other quantities, such as effective power, specific consumption and efficiency. Much of the tuning and data collection process was performed using a MegaSquirt MS-II controller and the TunerStudio MS and MegaLogViewer software's. This work aimed to highlight the advantages/disadvantages that the implementation of each of the electronically controlled systems brings to the field of 4-stroke and small displacement internal combustion engines, also focusing the entire computational process and theoretical basis around the handling and optimization of operating regimes. Experimental uncertainties are identified and quantified, and future works and practical and theoretical improvements are proposed.

Keywords

Electronic control; Transition; Single-cylinder engine; Performance; Optimization; MegaSquirt MS-II; Approximately constant load

Índice

Dedicatória.....	iii
Agradecimentos.....	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xvii
Nomenclatura.....	xix
1. Motivação e Objetivos	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos do trabalho	1
1.3 Organização do documento	2
2. Revisão bibliográfica	4
2.1 Motores a pistão.....	4
2.1.1 Contexto histórico	4
2.1.2 Classificação dos motores de combustão interna.....	4
2.1.3 Constituintes básicos do motor.....	5
2.1.4 Ciclos de funcionamento	7
2.1.5 Parâmetros de desempenho	9
2.2 Controlo eletrónico de um motor	11
2.3 Sistema de Preparação/Formação da mistura ar/combustível	14
2.3.1 Carburador	15
2.3.2 Sistema de injeção de combustível.....	17
2.3.3 Injetor	19
2.4 Sistemas de ignição	19
2.4.1 Sistema de ignição por bateria convencional.....	19
2.4.2 Sistema de ignição por magneto	20
2.4.3 Ignição eletrónica.....	20
2.4.4 Vela de ignição.....	22
2.4.5 Avanço da ignição.....	23
3. Casos de estudo	24
3.1 Carburador.....	24
3.2 Injeção eletrónica	24
3.3 Injeção e ignição eletrónica.....	25
4. Componentes e Softwares	27
4.1 Ficha técnica do motor	27
4.2 Hélice	28
4.3 Controlador EFI	29
4.4 Softwares	30
4.5 Sensores.....	31
4.6 Atuadores	31
5. Conceção, fabricação e montagem de componentes	34
5.1 Conceção	34

5.2	Processo de fabrico.....	35
5.2.1	Fabricação do corpo do acelerador e adaptador do injetor	35
5.2.2	Fabricação dos restantes componentes	38
5.2.3	Soldaduras realizadas	40
5.3	Montagem e fixação de componentes	41
5.3.1	Componentes da montagem experimental.....	41
5.3.2	Sensores do sistema	44
6.	Procedimento Experimental	49
6.1	Configuração com carburador	49
6.1.1	Sensores e componentes periféricos.....	49
6.1.2	Procedimento experimental	51
6.2	Configuração com injeção eletrónica	53
6.2.1	Sensores e componentes periféricos.....	54
6.2.2	Procedimento experimental	56
6.3	Configuração com injeção e ignição eletrónica	58
6.3.1	Sensores e componentes periféricos.....	58
6.3.2	Procedimento experimental	61
7.	Resultados	62
7.1	Configuração com carburador	62
7.1.1	Binário.....	62
7.1.2	Consumo.....	63
7.2	Configuração com sistema de injeção eletrónica	64
7.2.1	Binário.....	64
7.2.2	Consumo.....	66
7.2.3	Tabelas VE.....	67
7.3	Configuração com sistema de injeção e ignição eletrónica	69
7.3.1	Binário.....	69
7.3.2	Consumo.....	71
7.3.3	Tabelas de avanço à ignição	72
7.4	Outros parâmetros	73
7.4.1	Potência efetiva.....	74
7.4.2	Consumo específico.....	75
7.4.3	Rendimento total.....	76
7.5	Incerteza das medições	77
7.5.1	Binário.....	77
7.5.2	Consumo.....	77
8.	Discussão dos resultados e conclusões	78
8.1	Discussão dos resultados	78
8.1.1	Carburador	78
8.1.2	Injeção eletrónica	79
8.1.3	Injeção e ignição eletrónicas	81
8.1.4	Outros parâmetros	82
8.2	Conclusões e trabalhos futuros	84
8.2.1	Conclusões.....	84
8.2.2	Aspetos a melhorar e trabalhos futuros	85
	Bibliografia	87
	Anexos	91

Lista de Figuras

2.1	Constituintes básicos de um motor de combustão interna	5
2.2	Ciclo termodinâmico de Otto	8
2.3	Exemplificação de um mecanismo de leitura do binário.....	9
2.4	Sistema eletrónico multiponto de injeção de combustível	12
2.5	Esquemática básica de um carburador	16
2.6	Constituição básica de um sistema de ignição eletrónico digital	21
4.1	Esquema representativo dos elementos constituintes e conectados ao sistema MegaSquirt MS-II.....	30
5.1	Corpo do acelerador e adaptador do <i>kit</i> Ecotrons para o Honda GX35.....	33
5.2	Esboço em 3D, concebido no CATIA V5, da peça completa e final obtida.....	34
5.3	Esquemática, concebida no Microsoft Paint, do mecanismo em torno do banco de ensaios	39
5.4	Esquemática, concebida e adaptada no Microsoft Paint, da totalidade das ligações estabelecidas para a célula de carga.....	45
5.5	Exemplo da calibração do termistor referente à temperatura do motor, no <i>software</i> TunerStudio MS	48
6.1	Esquema, concebido no Microsoft Paint, exemplificativo do sistema de fornecimento de combustível	50
6.2	Esquema, concebido no Microsoft Paint, das ligações elétricas estabelecidas	50
6.3	Fluxograma referente ao procedimento experimental da configuração com carburador	53
6.4	Esquemática da montagem do sistema de fornecimento de combustível	55
6.5	Fluxograma referente ao procedimento experimental da configuração com injeção eletrónica	58
6.6	Representação dos picos de tensão, no <i>software</i> PicoScope 6	60
6.7	Fluxograma referente ao procedimento experimental da configuração com injeção e ignição eletrónica.....	61
7.1	Gráfico do binário produzido em função da velocidade do motor, na configuração com carburador	63
7.2	Gráfico do consumo de combustível em função da velocidade do motor, na configuração com carburador.....	63
7.3	Gráfico do binário produzido em função da velocidade do motor para a tabela VE carburador, gerada e otimizada.....	64

7.4	Gráfico do binário produzido em função da velocidade do motor para a tabela VE carburador e de voo	65
7.5	Gráfico do consumo de combustível em função da velocidade do motor para a tabela VE carburador e para a configuração com carburador	67
7.6	Gráfico do consumo de combustível em função da velocidade do motor para a tabela VE carburador, gerada, de voo e otimizada	67
7.7	Tabela VE gerada com recurso ao <i>software</i> TunerStudio MS.....	68
7.8	Tabela VE concebida no TunerStudio MS para igualar a prestação do carburador, na produção de binário	68
7.9	Tabela VE otimizada no TunerStudio MS para obtenção de um binário mais elevado...	68
7.10	Tabela VE otimizada no TunerStudio MS e ilustrativa da afinação realizada para uma possível situação de voo	69
7.11	Gráfico do binário produzido em função da velocidade do motor para a tabela VE carburador original, com ângulo fixo e com tabela de ignição gerada.....	70
7.12	Gráfico do binário produzido em função da velocidade do motor para a tabela VE otimizada e tabela VE e de ignição otimizadas	70
7.13	Gráfico do consumo de combustível em função da velocidade do motor, para 4 regimes de funcionamento distintos	71
7.14	Gráfico do consumo de combustível em função da velocidade do motor para a tabela VE otimizada e tabela VE e de ignição otimizadas.....	72
7.15	Tabela, gerada por fonte externa e introduzida no TunerStudio MS, relativa ao ângulo de avanço à ignição.....	72
7.16	Tabela do ângulo de avanço à ignição otimizada no <i>software</i> TunerStudio MS	73
7.17	Gráfico da variação do binário de acordo com o ângulo de avanço à ignição implementado	73
7.18	Gráfico da potência efetiva em função da velocidade do motor, para 4 regimes de funcionamento distintos	74
7.19	Gráfico do consumo específico em função da velocidade do motor, para 5 regimes de funcionamento distintos	75
7.20	Gráfico do rendimento total em função da velocidade do motor, para 5 regimes de funcionamento distintos	76
A.1	Ilustração gráfica, concebida no CATIA V5, das soldaduras realizadas no corpo do acelerador.....	91
B.1	Ilustração gráfica, concebida no CATIA V5, da montagem do sistema da borboleta	91
B.2	Ilustração gráfica, concebida no CATIA V5, da montagem e posicionamento da mola. .	92
B.3	Ilustração gráfica, concebida no CATIA V5, da montagem do corpo do acelerador	92
B.4	Ilustração gráfica, concebida no CATIA V5, da montagem do adaptador e da sua fixação ao corpo do acelerador	93

B.5	Ilustração gráfica, numa segunda perspetiva concebida no CATIA V5, da montagem do adaptador e da sua fixação ao corpo do acelerador	93
C.1	Ilustração gráfica, concebida no CATIA V5, da montagem do sistema de adaptação da hélice.....	94
D.1	Ilustração gráfica, concebida no CATIA V5, da montagem do sensor de Hall	94
E.1	Ilustração gráfica, concebida no CATIA V5, da montagem do banco de ensaios	95
F.1	Ilustração gráfica, concebida no CATIA V5, da montagem da célula de carga e do respetivo suporte	95
I.1	Ilustração gráfica, concebida no Microsoft Paint, das ligações elétricas estabelecidas na configuração com injeção eletrónica.....	98
J.1	Ilustração gráfica, concebida no Microsoft Paint, das ligações elétricas estabelecidas na configuração com injeção e ignição eletrónica	99
K.1	Ilustração gráfica da distribuição das ligações estabelecidas nos 37 pinos da ficha	100
L.1	Montagem experimental aplicada na configuração com carburador.....	101
L.2	Representação da montagem experimental (esquerda) e do sistema de medição do binário (direita)	101
L.3	Montagem final do <i>kit</i> de conversão concebido para o Honda GX31.....	102
M.1	Gráfico ilustrativo da performance do Honda GX31, em termos do binário, consumo específico e potência útil	102

Lista de Tabelas

3.1	Percentagem do acelerador associada a cada manobra	25
3.2	Distribuição do tipo de mistura de acordo com a velocidade do motor	25
4.1	Especificações técnicas do Honda GX31	28
5.1	Especificações dos termístores utilizados	47
5.2	Valores de temperatura utilizados para a calibração	47
8.1	Potência efetiva, produzida em WOT, para cada configuração	82
8.2	Rendimento total, alcançado em WOT, para cada configuração.....	83

Nomenclatura

Símbolos

AFR_{est}	Razão ar-combustível estequiométrica	Adimensional
AFR_{real}	Razão ar-combustível real	Adimensional
B	Binário	N.m
C_S	Consumo específico	kg/kW.h
e_v	Eficiência volumétrica	%
F	Força realizada pela célula de carga no banco de ensaios	N
L	Braço da força aplicada	mm
M	Momento aplicado pelo motor	N.m
m_{ar}	Massa de ar	kg
m_f	Massa de combustível	kg
\dot{m}_{ar}	Caudal de ar	kg/s
\dot{m}_f	Caudal de combustível	kg/s
N	Velocidade angular	rpm
Q_{pi}	Poder calorífico do combustível	J/g
R^2	Variância	Adimensional
V_V	Volume varrido	m ³
\dot{W}_e	Potência útil	W
ϕ	Riqueza da mistura	Adimensional
λ	Excesso de ar na mistura	Adimensional
η_T	Rendimento total	Adimensional

Acrónimos

ACT	Temperatura do ar de admissão " <i>Air Charge Temperature</i> "
AC-CDI	Corrente Alternada - Ignição por Descarga Capacitiva " <i>Alternating Current - Capacitor Discharge Ignition</i> "
ADC	Conversor analógico para digital " <i>Analog to Digital Converter</i> "
AFR	Razão Ar-Combustível " <i>Air-Fuel Ratio</i> "
CATIA	Aplicação Interativa Tridimensional Assistida por Computador " <i>Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application</i> "
CAM	Fabricação Assistida por Computador " <i>Computer-Aided Manufacturing</i> "
CDI	Ignição por Descarga Capacitiva " <i>Capacitor Discharge Ignition</i> "
CLT	Sensor de Temperatura do Líquido de Refrigeração " <i>Coolant Temperature Sensor</i> "

CNC	Controlo Numérico Computadorizado “ <i>Computer Numerical Control</i> ”
DC	Corrente Contínua “ <i>Direct Current</i> ”
DC-CDI	Corrente Direta - Ignição por Descarga Capacitiva “ <i>Direct Current - Capacitor Discharge Ignition</i> ”
DT	Ciclo de trabalho “ <i>Duty Cycle</i> ”
ECU	Unidade de Controlo Eletrónico “ <i>Electronic Control Unit</i> ”
EFI	Injeção Eletrónica de Combustível “ <i>Electronic Fuel Injection</i> ”
EGR	Recirculação de Gases de Escape “ <i>Exhaust Gas Recirculation</i> ”
GND	Terra ou Massa “ <i>Ground</i> ”
IDI	Ignição por Descarga Indutiva “ <i>Inductive Discharge Ignition</i> ”
MAP	Pressão Absoluta na Admissão “ <i>Mainfold Absolute Pressure</i> ”
MPI	Injeção Multiponto “ <i>Multi Point Injection</i> ”
NTC	Coefficiente de Temperatura Negativo “ <i>Negative Temperature Coefficient</i> ”
OHC	Árvore de cames à cabeça “ <i>Overhead Camshaft</i> ”
PDF	Formato de Documento Portátil “ <i>Portable Document Format</i> ”
PFI	Injeção na Porta de Combustível “ <i>Port Fuel Injection</i> ”
PLX-DAQ	Ferramenta de Aquisição de Dados Parallax “ <i>Parallax Data Acquisition Tool</i> ”
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
PW	Duração do pulso “ <i>Pulse Width</i> ”
RPM	Rotações por minuto “ <i>Revolutions per Minute</i> ”
SPI	Injeção monoponto “ <i>Single Point Injection</i> ”
TBI	Injeção no Corpo de Acelerador “ <i>Throttle Body Injection</i> ”
TCI	Ignição por Bobina Transistorizada “ <i>Transistorized Coil Ignition</i> ”
TIG	Gás Inerte de Tungsténio “ <i>Tungsten Inert Gas</i> ”
TPS	Sensor de Posição do Acelerador “ <i>Throttle Position Sensor</i> ”
USB	Barramento Universal de Dados “ <i>Universal Serial Bus</i> ”
VE	Eficiência Volumétrica “ <i>Volumetric Efficiency</i> ”
VSS	Sensor de Velocidade do Veículo “ <i>Vehicle Speed Sensor</i> ”
WOT	Acelerador completamente aberto “ <i>Wide Open Throttle</i> ”
3D	Tridimensional “ <i>Three-Dimensional</i> ”

1. Motivação e Objetivos

1.1 Motivação

Na realização desta dissertação optou-se por abordar um tema que permita adquirir mais conhecimentos acerca da área relativa à propulsão, mais especificamente acerca dos sistemas responsáveis pela formação da mistura ar/combustível e de como se processa o controlo eletrónico de motores a pistão. Apesar de todos os avanços tecnológicos realizados e dos novos conceitos postos em prática nas últimas décadas, de forma a tentar encontrar novas alternativas de impelir movimento a uma máquina ou veículo, os motores de combustão interna a pistão ainda representam a grande maioria dos dispositivos capazes de alcançar tal feito de forma viável. Resta apenas efetuar desenvolvimentos no sentido de otimizar este conceito, que visam principalmente aumentar a eficiência e diminuir a emissão de gases poluentes dos motores a pistão, como medida para preservar o meio ambiente, diminuir o consumo dos recursos petrolíferos e corresponder às legislações cada vez mais restritas. Os motores a pistão são desde há muito tempo utilizados no ramo aeronáutico, sendo ainda predominante a sua utilização em aeronaves leves e de pequeno porte, tornando-se extremamente importante compreender os princípios básicos de funcionamento deste tipo de motores. A introdução de sistemas eletrónicos de injeção e de ignição de combustível, no início da década de 80, em motores, que anteriormente dependiam de um carburador para fornecer a tão necessária mistura ar/combustível, é um dos métodos mais viáveis no que toca a reduzir substancialmente os consumos e emissões, e ao mesmo tempo melhorar significativamente a *performance* do motor. Estes sistemas já possuem provas dadas no que diz respeito aos parâmetros anteriormente referidos e será interessante, para motores com pequenas dimensões e cilindrada, constatar qual o comportamento do motor para diferentes regimes de funcionamento testados e até que ponto esta conversão será praticável. A realização dos testes numa condição de carga aproximadamente constante é algo pouco habitual na indústria que testa este tipo de motores, sendo igualmente um fator interessante a ter em conta.

1.2 Objetivos do trabalho

Este estudo e trabalho foram realizados, em parte, para analisar o desempenho de um motor a pistão, através do controlo por meios computacionais do sistema de injeção eletrónica de combustível e do ângulo de avanço à ignição, tudo com recurso à utilização do *software* TunerStudio MS e de um controlador MegaSquirt-II. Foi também dado a conhecer todo o processo envolvido no fabrico, planificação, construção e montagem de componentes constituintes de um sistema de adaptação de um motor que possui um carburador, como responsável pela formação da mistura ar/combustível, para um motor com injeção e ignição eletrónica, tudo

isto considerando o caso particular do motor Honda GX31, podendo eventualmente estender-se até outros motores de natureza similar. De forma resumida, são descritos em seguida os objetivos teórico-práticos adjacentes à realização desta dissertação:

- Recolha e comparação de dados acerca da *performance* do motor em 3 configurações possíveis: com carburador e ignição por magneto, com sistema de injeção eletrónica e ignição por magneto, e com sistema de injeção e ignição eletrónica.
- Estudo e análise do motor no seu estado original de modo a identificar as alterações a efetuar.
- Projeção, dimensionamento, planificação, fabricação e montagem de parte dos componentes de um sistema de injeção eletrónica de combustível para motor a pistão.
- Compreensão dos princípios gerais de funcionamento do motor a pistão.
- Transição de um sistema com carburador para um com injeção eletrónica de combustível, bem como de ignição por magneto para ignição eletrónica.
- Assimilação do funcionamento de um sistema de controlo eletrónico.
- Perceção de como se computoriza a afinação dos mapas de eficiência volumétrica e do ângulo de avanço à ignição, de forma a otimizá-los conforme o pretendido.
- Averiguação de até que ponto será viável a realização desta modificação num motor monocilíndrico.
- Análise dos dados e identificação das vantagens e desvantagens das diferentes modificações.
- Evidenciar os ganhos em *performance*, quando se utiliza o sistema de controlo eletrónico, e a flexibilidade existente na manipulação do sistema.

1.3 Organização do documento

Todo o documento se encontra organizado e dividido por capítulos, mais especificamente em 8 capítulos principais. Cada um destes capítulos é dedicado às diferentes componentes que constituem o formato tradicional de uma dissertação de mestrado. O primeiro e presente capítulo desta dissertação consiste na motivação que levou à realização da mesma, nos objetivos definidos e propostos, e numa descrição suscita de como este trabalho se encontra organizado. O segundo capítulo possui um conteúdo teórico acerca dos princípios e conceitos básicos relacionados com os motores a pistão, sendo abordado também o modo de funcionamento e constituição de um sistema de controlo eletrónico. Neste capítulo são igualmente especificadas as características dos sistemas de ignição e de preparação da mistura ar/combustível, com especial foco nas versões controladas por via eletrónica de cada um destes sistemas. No terceiro capítulo é realizado um esclarecimento acerca do que consistem cada um dos regimes de funcionamento do motor aplicados, e posteriormente analisados, para as 3 diferentes configurações do motor. O quarto capítulo apresenta um resumo descritivo e específico de cada um dos principais componentes, como os sensores e atuadores, o próprio

motor utilizado e os *softwares* informáticos necessários à realização dos ensaios experimentais propostos. O quinto capítulo é unicamente dedicado à descrição de todo o processo de conceção, fabricação e montagem envolvido em torno nos componentes utilizados como base experimental para as diferentes configurações testadas. O sexto capítulo apresenta todo o procedimento experimental aplicado e envolvido em torno dos ensaios que se pretendem realizar, individualizando novamente para cada uma das 3 diferentes configurações. Apresenta descrito também os passos que antecedem o procedimento experimental em si, como as ligações elétricas efetuadas e a montagem de componentes periféricos. No sétimo capítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos, ilustrados em termos gráficos, para cada uma das configurações. Contém também a representação gráfica de outras grandezas calculadas a partir dos resultados, tais como, a potência útil e o consumo específico. São incluídas neste capítulo as tabelas de eficiência volumétrica e do ângulo de avanço à ignição aplicadas nos ensaios, onde se encontram delimitadas as zonas de afinação/teste, bem como as incertezas experimentais associadas aos dados obtidos. O oitavo e último capítulo possui como conteúdo as principais conclusões provenientes da análise dos resultados obtidos, em comparação com dados da literatura e tendo em conta os objetivos inicialmente propostos. São também sugeridos trabalhos futuros relacionados com o tema, de forma a enriquecer a componente prática e teórica, bem como possíveis aspetos do trabalho passíveis de serem melhorados.

2. Revisão bibliográfica

2.1 Motores a pistão

2.1.1 Contexto histórico

Os primeiros motores de combustão interna surgiram na década de 1860, invenção da autoria de Étienne Lenoir (1822-1900) [1]. Neste motor um gás inflamável e ar eram arrastados para o interior de um cilindro e a mistura queimada com recurso a uma faísca de natureza elétrica. Mais tarde, em 1867, Nikolaus August Otto (1832-1891) criou o chamado motor atmosférico, mais eficiente e que usava combustível líquido, e posteriormente, em 1876, implementou o ciclo de 4 tempos, descrito pelo ciclo termodinâmico de Otto, com a cooperação de Eugen Langen (1833-1895) [2]. Este era cerca de três vezes mais eficiente que o seu antecessor, devido à compressão da mistura antes da ignição. O ciclo de dois tempos foi desenvolvido simultaneamente por Karl Benz (1844-1929) e por Gottlieb Daimler (1834-1900), em conjunto com Wilhelm Maybach (1846-1929) [3]. Obtiveram um motor mais leve e rotativo, com elevada razão potência-peso, a partir da qual a maioria dos motores a gasolina atuais descende. Em 1892, Rudolf Diesel (1858-1913), surgiu com um novo conceito onde a combustão ocorria com a injeção de combustível em ar aquecido apenas devido ao processo de compressão, descrito pelo ciclo de Diesel [2]. Obteve razões de expansão mais elevadas sem detonação, o que resultou em motores com o dobro da eficiência apresentada por outros de combustão interna.

Com base nestes princípios, o mundo assistiu a um grande desenvolvimento dos motores de combustão interna, propriamente no que diz respeito ao aumento da razão potência-peso, diminuição do consumo, entre muitos outros parâmetros que experienciaram grandes melhorias.

2.1.2 Classificação dos motores de combustão interna

A classificação de um motor alternativo pode ser feita com base em inúmeros parâmetros, devido às muitas configurações possíveis de implementar. Este tipo de motor apresenta elementos, neste caso os pistões, que realizam movimentos repetitivos de translação, ao contrário do que ocorre com os motores rotativos, onde os rotores ou pistões rotativos, efetuam um movimento rotativo. Os motores de combustão interna alternativos podem ser classificados de acordo com as seguintes características [2] [3]:

- **Ciclo de funcionamento** - Ciclo de 4 tempos (motor naturalmente aspirado, sobrealimentado ou turbo alimentado), ou ciclo de 2 tempos (sobrealimentado ou turbo alimentado).
- **Tipo de ignição** - Ignição por compressão ou ignição por faísca.

- **Aplicação** - Automóveis, máquinas de construção, barcos, agricultura, pequenas aeronaves, entre muitas outras.
- **Geometria dos cilindros** - Cilindros em linha, opostos, em V, em W, em H, etc.
- **Tipo de combustível consumido** - Gasolina, gasóleo, gás natural, etanol, hidrogénio, entre outros.
- **Método de preparação da mistura** - Carburador ou injeção eletrónica.
- **Sistemas de arrefecimento** - Arrefecimento por ar, arrefecimento por líquidos, sem arrefecimento (apenas por métodos naturais de convecção e radiação).

Na literatura, o tipo de ignição é considerada geralmente como a característica mais importante na classificação de um motor, pois é a partir deste critério que são definidas muitas outras características do mesmo, como é o caso do tipo de combustível, sistemas de arrefecimentos, entre outros. O ciclo de funcionamento do motor será o parâmetro de classificação que se segue em termos de importância.

2.1.3 Constituintes básicos do motor

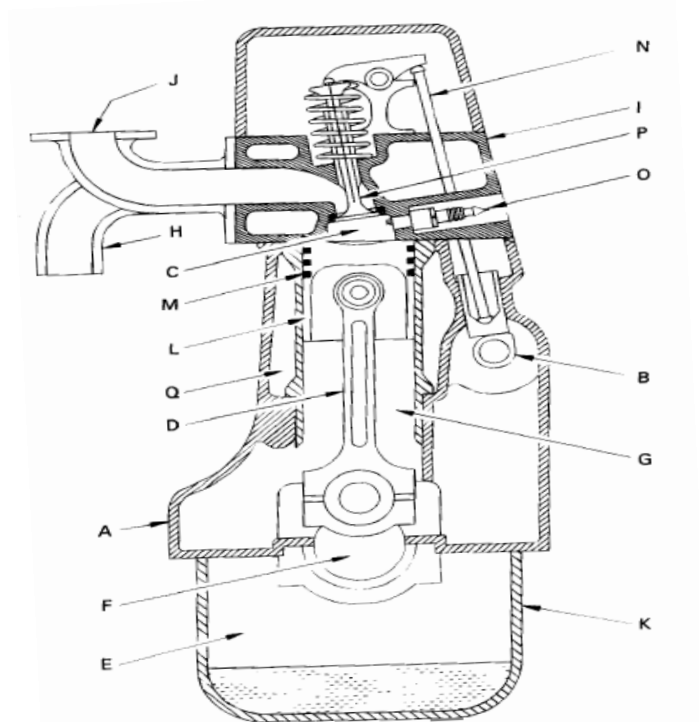


Figura 2.1: Constituintes básicos de um motor de combustão interna [4].

Os motores são mecanicamente complexos, e por este motivo constituídos por um elevado número de componentes. Com base na figura 2.1 são destacados e descritos de forma resumida os mais importantes:

A - Bloco do motor - Constitui o “corpo” do motor, onde se localizam os cilindros e componentes internos, as passagens para a admissão e escape, o cárter, entre outros. Geralmente fabricado em ferro fundido.

B - Árvore de cames - Trata-se de um eixo rotativo ao qual são fixadas variadas cames de disco. É responsável pela abertura e fecho das válvulas no momento apropriado do ciclo do motor, de forma direta ou por conexão mecânica ou hidráulica.

C - Câmara de combustão - Extremidade do cilindro delimitada pela face superior do pistão e pela cabeça do motor, no momento em que ocorre a combustão da mistura ar-combustível.

D - Biela - Componente que estabelece a ligação entre o pistão e a cambota, sendo responsável por converter um movimento linear alternativo num movimento rotativo.

E - Cárter - Parte do bloco do motor que envolve a zona onde se localiza a cambota, garantindo a lubrificação e proteção das partes móveis.

F - Cambota - Eixo rotativo que permite transferir o trabalho produzido pelo motor para os sistemas externos, transformando a força aplicada pelas bielas num momento. Possui contrapesos que equilibram o movimento rotativo.

G - Cilindro - Orifício com forma cilíndrica ao longo da qual o pistão se desloca. Possui uma superfície polida e é constituído por metais reforçados mecanicamente.

H - Coletor de escape - Apresenta uma ramificação que agrupa as várias saídas referentes aos cilindros, onde se movimentam os gases de escape.

I - Cabeça do motor - Fixado à parte superior do bloco do motor, delimita a extremidade superior dos cilindros, e conseqüentemente da câmara de combustão. Local onde se encontram instaladas as válvulas e velas de ignição.

J - Coletor de admissão - Semelhante ao coletor de escape, porém destinado a distribuir o ar ou a mistura ar/combustível pelos cilindros do motor.

K - Panela do óleo - Reservatório de óleo, localizado na parte inferior do bloco do motor, que é parte integrante do cárter.

L - Pistão - Componente geralmente feito de alumínio que se move no interior do cilindro e é responsável por transmitir as forças, resultantes da pressão na câmara de combustão, para a cambota em rotação.

M - Segmentos - Anéis metálicos que encaixam no pistão com o objetivo de impedir a fuga de gases entre o pistão e as paredes do cilindro.

N - Vareta de pressão - Estabelece uma ligação mecânica entre a árvore de cames e as válvulas.

O - Vela de ignição - Componente de natureza elétrica responsável por iniciar o processo de combustão da mistura ar/combustível.

P - Válvula - Responsável por controlar a saída e entrada de fluidos e gases nos cilindros do motor.

Q - Camisa de água - Sistema de arrefecimento do motor que promove a passagem de um líquido de refrigeração em torno das paredes dos cilindros.

2.1.4 Ciclos de funcionamento

Como foi referido anteriormente existem motores cujo ciclo de funcionamento pode ser realizado em 4 ou 2 tempos, sendo que os ciclos de Otto e Diesel podem operar em ambas as configurações. Os motores a 4 tempos são os mais produzidos e utilizados atualmente, bem como os de funcionamento mais complexo. São em seguida descritos, de forma abreviada, ambos os ciclos.

Ciclo de funcionamento em 4 tempos [2] [3] [5]

1. A etapa de **admissão** inicia-se com o pistão no ponto morto superior e acaba com o pistão no ponto morto inferior. Este movimento arrasta para a câmara de combustão uma mistura de ar e combustível, no caso do ciclo de Otto, ou de ar apenas, no caso do ciclo de Diesel. A válvula de admissão abre pouco antes do curso se iniciar e fecha depois de este terminar, de forma a aumentar a massa admitida. A válvula de escape encontra-se fechada durante esta fase.
2. A segunda etapa é a de **compressão**, que se inicia com o fecho da válvula de admissão e com a compressão da massa gasosa, que se encontra no interior do cilindro, através da subida do pistão até ao ponto morto superior. A diminuição do volume irá provocar um aumento de temperatura do conteúdo no interior do cilindro. No caso do ciclo de Otto, ao aproximar-se o fim desta etapa inicia-se a combustão da mistura, com o recurso a uma faísca. No ciclo de Diesel a razão de compressão é superior, o que provoca um aumento da temperatura do ar acima da temperatura de autoignição do combustível. Gasóleo é pulverizado para o interior do cilindro perto do fim da etapa de compressão, começando o processo de combustão no fim da etapa de compressão e início da etapa de expansão.
3. Inicia-se a etapa de **expansão/explosão**, resultante do súbito aumento da pressão e temperatura no interior do cilindro que força o pistão a deslocar-se do ponto morto superior até ao ponto morto inferior. Quando o pistão se encontra próximo do ponto morto inferior ocorre a abertura da válvula de escape. Trata-se da única etapa onde ocorre produção de trabalho.
4. A quarta e última etapa é designada por **escape** e inicia-se com a abertura da válvula de escape, que provoca uma diminuição da pressão e que em conjunto com o movimento ascendente do pistão permite a expulsão dos gases queimados do interior do cilindro. Quando o pistão se aproxima do ponto morto superior a válvula de admissão abre, e pouco depois fecha a válvula de escape, iniciando-se um novo ciclo.

Ciclo de 2 tempos

Mecanicamente mais simples e com uma maior razão potência-peso, os motores a 2 tempos, como o próprio nome indica, precisam apenas de uma revolução da cambota para completar um ciclo [2]. Ao contrário do que ocorre no ciclo de 4 tempos, as etapas não ocorrem de forma isolada, como por exemplo, a admissão e escape de gases é feita de forma simultânea [5].

Ciclo termodinâmico de Otto

Este ciclo termodinâmico é representativo do funcionamento ideal de um motor de ignição por faísca, onde um sistema (massa de ar aspirada pelo motor) é sujeito a mudanças de temperatura, volume, pressão e adição/perda de calor [3]. O cálculo do trabalho realizado pode ser feito pela determinação da área definida pelo ciclo no diagrama p-V. O ciclo de Otto é composto pela sequência de transformações termodinâmicas representadas na figura 2.2, e em seguida descritas com base na mesma.

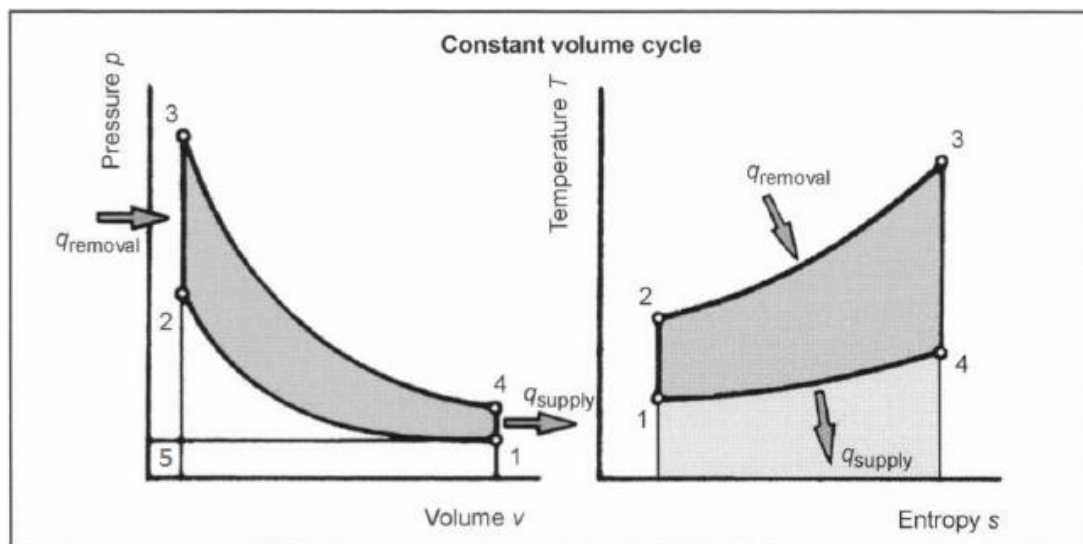


Figura 2.2: Ciclo termodinâmico de Otto (Adaptado de [3]).

5-1 Admissão de ar (isobárica) - Massa de ar arrastada para o interior do cilindro a pressão constante (pressão atmosférica), devido à abertura da válvula de admissão.

1-2 Compressão (isentrópica) - Compressão do fluido através da realização de trabalho, ocorre com o movimento ascendente do pistão desde o PMI até ao PMS e com ambas as válvulas fechadas.

2-3 Combustão (isocórica) - Adição de calor a volume constante por parte de uma fonte externa (ignição), sendo a quantidade definida na figura 2.2 por $q_{removal}$.

3-4 Expansão (isentrópica) - Expansão do fluido, que dá origem à realização de trabalho. Ocorre movimentação do pistão até ao ponto morto inferior.

4-1 Fase de Escape (isocórica) - Perdas na forma de calor a volume constante, cuja quantidade é definida na figura 2.2 por q_{supply} .

1-5 Fase de Escape (isobárica) - Mistura gasosa expulsa do interior do cilindro a pressão constante, com a abertura da válvula de escape.

2.1.5 Parâmetros de desempenho

A prestação de um motor pode ser caracterizada em termos dos valores de binário e potência, obtidos para todo o regime de funcionamento do motor, e a especificação do motor é caracterizada com base nos valores máximos destas grandezas. O binário de um motor representa um momento, resultante da força realizada pelos pistões na cambota, e é medido em N.m, sendo quantificado habitualmente através do uso de um freio dinamométrico [1]. Este sistema mede o binário e a potência do motor, travando-o a uma determinada velocidade. Numa vertente mais simplificada, porém limitada a motores de pequena dimensão, é possível fixar a extremidade de um eixo, suportada por rolamentos, ao motor, paralelamente à cambota [6]. Adicionando uma barra horizontal, para impedir que o motor rode em direção contrária à da hélice, e uma célula de carga ou balança, é possível medir o binário produzido pelo motor (figura 2.3).

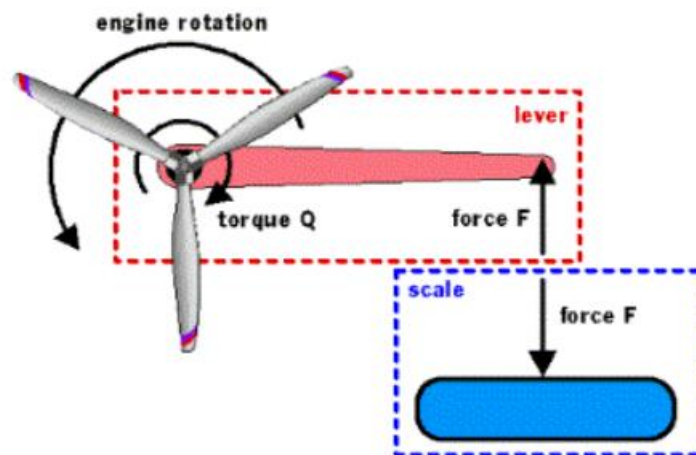


Figura 2.3: Exemplificação de um mecanismo de leitura do binário [6].

A potência representa a taxa a que o trabalho é produzido, onde o produto da velocidade de rotação “ N ” (em rot/s) com o binário “ B ” (em N.m) nos dá a potência útil “ \dot{W}_e ” (em W) e é representada através da equação (2.1) [7].

$$\dot{W}_e = 2. \pi. N. B \quad (2.1)$$

Existem outros parâmetros igualmente importantes, tais como o consumo específico (C_s), em kg/kW.h, e o rendimento total (η_T), calculados a partir das equações (2.2) e (2.3) [7].

$$\eta_T = \frac{\dot{W}_e}{\dot{m}_f \cdot Q_{pi}} \quad (2.2); \quad C_s = \frac{\dot{m}_f}{\dot{W}_e} \quad (2.3)$$

Onde “ \dot{m}_f ” representa o caudal de combustível (em g/s para o rendimento e em kg/h para o consumo específico), o “ Q_{pi} ” o poder calorífico do combustível (em J/g) e “ \dot{W}_e ” a potência útil (em W para o rendimento e em kW para o consumo específico). Ambos os parâmetros permitem ter uma noção da eficiência do motor no processo de conversão de energia.

A eficiência volumétrica trata-se da razão entre o volume da mistura ar-combustível que dá entrada no motor em cada ciclo e o volume de deslocamento do pistão, podendo esta razão ser maior que 1 para o caso de motores turbo alimentados (ver a equação (2.4)) [7].

$$e_v = \frac{\text{volume de ar que entra no cilindro}}{\text{cilindrada}} = \frac{\dot{m}_{ar} T}{\rho V_V N} \quad (2.4)$$

Onde, “ T ” representa número de tempos do ciclo, “ ρ ” a massa específica do ar (kg/m³), “ \dot{m}_{ar} ” o caudal mássico do ar (kg/s), “ N ” a velocidade de rotação (rot/s) e “ V_V ” o volume varrido pelo cilindro (m³).

Existem também parâmetros geométricos do motor, tais como a taxa de compressão, a razão diâmetro-curso do pistão e a razão entre o comprimento da biela e o raio da cambota. Todos estes parâmetros são responsáveis por influenciar a potência produzida pelo motor. Um outro parâmetro a destacar será a razão ar/combustível da mistura (eq. 2.5) que dá entrada na câmara de combustão, designada habitualmente por AFR (razão ar-combustível).

$$AFR = \frac{m_{ar}}{m_f} \quad (2.5)$$

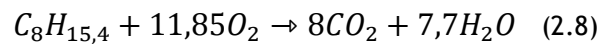
Onde “ m_{ar} ” representa a massa de ar e “ m_f ” a massa de combustível. A mistura é designada por estequiométrica (AFR_{est}) quando toda a quantidade de ar disponível permite a queima do combustível na sua totalidade. A partir dos parâmetros excesso de ar e riqueza, definidos pelas equações (2.6) e (2.7), é possível classificar a mistura como pobre ou rica:

$$\text{Riqueza: } \phi = \frac{AFR_{est}}{AFR_{real}} \quad (2.6); \quad \text{Excesso de ar: } \lambda = \frac{AFR_{real}}{AFR_{est}} \quad (2.7)$$

O fator de excesso de ar é representado pelo quociente entre a razão ar/combustível real (AFR_{real}) e a estequiométrica (AFR_{est}), e a riqueza da mistura é definida pelo inverso desta razão. Numa mistura estequiométrica ambos os parâmetros assumirão o valor de 1, no caso de

ser uma mistura rica $\phi > 1$ e $\lambda < 1$ e numa mistura pobre $\phi < 1$ e $\lambda > 1$. Habitualmente os motores a gasolina queimam misturas estequiométricas, exceto com injeção direta que permite queimar misturas pobres, e os motores de combustão por compressão queimam misturas pobres.

No caso da gasolina, a molécula mais representativa será o octano (C_8H_{18}), sendo consumida em conjunto com oxigénio (O_2). Os produtos da combustão serão o dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O), apenas quando a combustão é completa e estequiométrica. A razão estequiométrica entre a massa de ar e de gasolina será de 14,7:1, resultante do facto de o ar atmosférico não ser composto apenas por oxigénio e através do acerto apresentado na equação (2.8), em que é utilizada gasolina com uma razão de 8 átomos de carbono por 15,4 átomos de hidrogénio [8].



2.2 Controlo eletrónico de um motor

Atualmente a maioria dos motores existentes nos veículos comercializados são controlados eletronicamente, como é o caso do controlo do ângulo de avanço à ignição e da injeção de combustível. Mesmo quem possui um carro com carburador, pode optar por uma vasta gama de *kits* de conversão para EFI existentes no mercado. A principal vantagem deste sistema será a constante adaptação às condições na qual o motor opera, permitindo obter uma melhor prestação, diminuição no consumo e na emissão de gases poluentes. Todo o sistema é controlado apenas por um controlador eletrónico, de forma a maximizar o uso do mesmo e diminuir a complexidade de todo o conjunto. Existe toda uma interação e troca de dados entre o controlador eletrónico e um conjunto de sensores e atuadores, como se encontra na figura 2.4 a seguir apresentada para o sistema de injeção de combustível em específico. Nem tudo são vantagens no que toca à utilização deste tipo de sistema, que apresenta um acréscimo considerável a nível de complexidade, possui um custo mais elevado, maior necessidade de manutenção regular, maior dificuldade de reparação e menor um menor ciclo de vida, tudo em relação ao carburador.

É feita uma leitura praticamente constante por parte de diversos sensores (transdutores que convertem grandezas físicas em sinais elétricos [9]) espalhados em pontos estratégicos do motor, que fornecem dados acerca do caudal de ar e de outras variáveis do motor. Estes dados são depois dirigidos para a unidade de controlo correspondente que define o regime de funcionamento dos diversos atuadores.

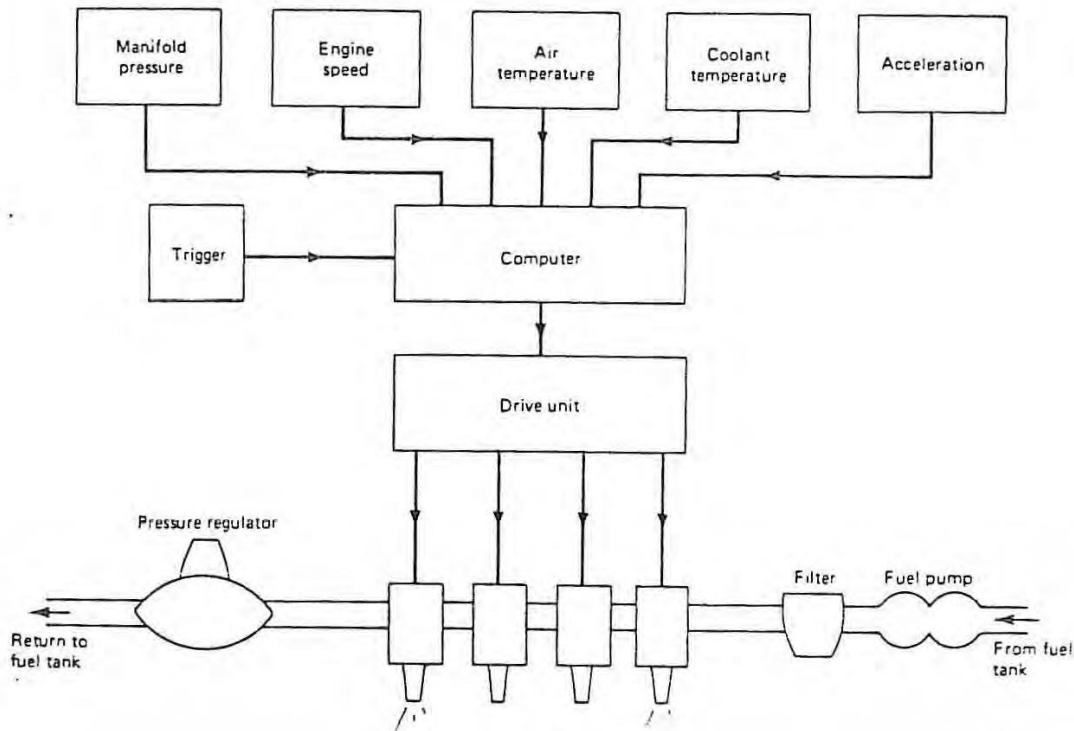


Figure 4.36 Electronic fuel injection system

Figura 2.4: Sistema eletrônico multiponto de injeção de combustível [1].

Como foi referido anteriormente, as informações recolhidas são provenientes da leitura realizada por diversos tipos de sensores, sendo os principais (Fig.2.4):

Sensor de posição da borboleta (“Acceleration”) TPS - Tem como função informar qual a posição angular da borboleta em determinado instante, e consequentemente calcular a carga do motor. Trata-se de um sensor resistivo, onde a sua resistência varia proporcionalmente com o ângulo de abertura do acelerador [7].

Sensor de temperatura do líquido de refrigeração (“Coolant temperature”) CTL - Este sensor localiza-se na parte mais quente do motor, cabeça do motor, estando em contato com o líquido de refrigeração. É composto por materiais cuja resistividade é afetada por alterações de temperatura, geralmente designados de termístores (termómetros de resistência). O material do qual é composto depende do intervalo de temperaturas a que este vai ser exposto.

Sensor de temperatura do ar admitido pelo motor (“Air temperature”) ACT - Localizado entre o filtro de ar e o corpo do acelerador, apresenta um princípio de funcionamento em tudo semelhante ao sensor de temperatura CTL.

Sensor de pressão no coletor de admissão (“Mainfold pressure”) MAP - Este sensor, ligado ao coletor de admissão por um tubo, permite informar a unidade de controlo acerca da pressão

absoluta verificada no coletor de admissão, servindo para calcular a carga do motor. O sensor no seu interior possui um diafragma que é atravessado por corrente elétrica que varia com a sua deformação, ou seja, a sua resistividade varia com a pressão registada no coletor de admissão.

Sensor de velocidade do motor (“Engine speed”) - Utilizado para fornecer dados acerca da rotação do motor e da posição da cambota a cada instante, são normalmente sensores de efeito de Hall ou indutivos, sendo que o sensor de efeito de Hall produz uma onda quadrada que corresponde já a um sinal digital para utilização pelo microprocessador [7]. Trata-se de um sensor de campos magnéticos, semelhante a um interruptor, onde a tensão de saída varia de 0V à tensão de alimentação, quando ocorre a aplicação de um campo magnético, e cujo princípio de funcionamento é baseado no efeito de Hall.

Sensor de oxigénio (ou Sonda lambda) - Sensor que tem como objetivo medir a quantidade de oxigénio existente nos gases de escape libertados, estando localizado normalmente no coletor de escape. Este sensor permite obter uma mistura próxima da estequiométrica, para diminuir a emissão de poluentes [10]. Esta sonda é geralmente constituída por um eletrólito cerâmico de óxido de zircónia (ZrO_2), estabilizado por óxido de ítrio (Y_2O_3) e coberto por platina, quer na superfície exterior que na interior [7].

Sensor de detonação - Este sensor tem como função detetar quando ocorre o fenómeno de detonação, através da medição de vibrações características. A detonação dá-se através da ocorrência de combustão deficiente e aleatória no interior do cilindro, caracterizando-se como uma combustão destrutiva e podendo ser provocada por um aumento excessivo do ângulo de avanço [11]. Trata-se de um sensor piezoelétrico que converte as vibrações em sinais elétricos processáveis e envia os dados para o ECU, que identifica a ocorrência do fenómeno e prepara a respetiva resposta.

Sensor de velocidade do veículo VSS - Como o próprio nome indica, este sensor dá a conhecer à unidade de controlo a velocidade do veículo, podendo tratar-se de um sensor magnético, de efeito de Hall ou ótico.

O ECU (*Electronic Control Unit*) é a unidade de controlo eletrónico responsável por processar toda a informação proveniente dos sensores, localizados estrategicamente, e posteriormente enviar sinais para os atuadores como forma de resposta, atuando no avanço da ignição, na injeção de combustível, entre outros parâmetros [12]. Trata-se de uma unidade digital com microprocessador, que permite um processamento eficaz de dados com grande precisão e fiabilidade e que estabelece um elo de ligação entre sensores e atuadores [9].

Dos atuadores, que recebem e convertem os sinais elétricos transmitidos pelo ECU para grandezas físicas correspondentes às ações mecânicas e/ou elétricas que serão executadas pelos mesmos, destacam-se os seguintes:

Injetores - Responsáveis pela injeção de combustível direta ou indiretamente para os cilindros, sendo a quantidade de combustível injetada dependente do intervalo de tempo de abertura do injetor.

Vela de ignição - Componente que tem como objetivo conduzir a corrente elétrica, gerada pela bobina de ignição, para o interior da câmara de combustão, dando origem a uma faísca que inicia a queima da mistura.

Bobina de ignição - Peça que se encontra conectada a um eletrodo central existente no interior da vela de ignição, e permite o fornecimento de picos de alta tensão elétrica [2].

Bomba de combustível - Acionada eletricamente, fornece aos injetores combustível, proveniente do tanque, sob elevada pressão e que é mantida a um valor constante por um regulador de pressão [2].

Ventilador do radiador - Um dos métodos de arrefecimento do motor, fazendo passar ar pelo radiador quando o carro está parado ou a deslocar-se a baixa velocidade.

Válvula canister - Esta válvula quando é aberta, por sinal do ECU, permite a recirculação dos gases, que se acumulam no tanque de combustível, através de um filtro para o motor, onde são queimados [3]. Esta válvula é apenas aberta em momentos específicos, geralmente em momentos de alta exigência para o motor.

Válvula EGR - Permite a recirculação de parte dos gases de escape para o interior dos cilindros, contribuindo para uma redução das emissões de gases poluentes.

Alguns destes sensores, como o sensor de detonação, e atuadores, como a válvula EGR, foram introduzidos mais recentemente, resultado do aumento do número de restrições impostas internacionalmente no que toca à emissão de gases poluentes, e da constante progressão tecnológica.

2.3 Sistema de Preparação/Formação da mistura ar/combustível

Desde a sua origem, os motores de combustão interna necessitam ser alimentados por uma mistura constituída por um combustível e um oxidante (neste caso o oxigénio atmosférico), de forma a tornar a combustão interna possível. Visto de uma perspetiva química, a oxidação de

moléculas de combustível requer que o oxidante tenha acesso suficiente à molécula de combustível, ou seja, é necessário preparar o combustível, transformando-o numa fase gasosa e proceder-se à sua mistura com o ar [3]. Para um motor poder funcionar de uma forma suave e eficiente, otimizando conseqüentemente o processo de combustão, é necessário fornecer ao mesmo uma mistura com determinada razão ar/combustível que satisfaça os requerimentos do motor. A melhor razão ar/combustível para um motor, em determinado instante, é aquela que fornece a potência necessária com o menor consumo de combustível, com um funcionamento consistente, seguro, suave e que cumpra com os requisitos de emissões [2]. Esta razão ar/combustível depende de um grande número de variáveis, como é o caso da velocidade do motor e carga.

A formação da mistura de ar/combustível pode ser realizada internamente, ocorrendo no interior do cilindro de um motor de combustão interna, ou externamente, onde ar e combustível são misturados antes da fase de admissão [3]. O primeiro caso encontra-se associado à **injeção direta** de combustível para o interior do cilindro, onde o ar é introduzido através do pistão, comprimido e depois é injetado o combustível no momento mais viável. Este sistema permite criar uma mistura homogênea e estequiométrica, para cargas elevadas onde o combustível é injetado no momento da entrada de ar pela válvula de admissão, ou provocar uma estratificação da carga, que ocorre para cargas baixas em que o combustível é injetado durante a fase de compressão [13]. O segundo caso trata-se da **injeção indireta** de combustível, onde este é injetado nas condutas de admissão e permite a formação de uma mistura mais homogênea. Os motores a gasolina podem ser de injeção direta ou indireta de gasolina, onde os convencionais possuem injeção indireta, tendo surgido mais recentemente motores a gasolina com injeção direta, responsáveis pela diminuição no consumo e aumento de potência [3]. Os motores a gasóleo, devido ao seu princípio de funcionamento, usam injeção direta de combustível na câmara de combustão. Existem dois tipos de mecanismos que permitem formar e fornecer a mistura ar/combustível necessária, podendo ser feita com recurso a um carburador ou a um sistema de injeção eletrônica.

2.3.1 Carburador

Tratou-se do primeiro componente mecânico que surgiu com o intuito de criar, dosear e fornecer ao motor de combustão interna a tão necessária mistura de ar/combustível. Sendo habitualmente um componente de funcionamento totalmente mecânico, devido à tecnologia existente na época, o carburador foi introduzido no início do século XX e tornou-se um sucesso imediato devido à sua durabilidade, fiabilidade, facilidade de produção e baixa manutenção, em relação a outros sistemas alternativos apresentados na mesma época. Importante referir que este componente é utilizado unicamente para os motores a gasolina, sendo ainda bastante comum em motores de pequenas dimensões (tal como acontece no caso do Honda GX31).

No carburador, o ar admitido flui por uma passagem tubular, até ao coletor de admissão, com o formato de um tubo de Venturi. A diferença de pressão estabelecida entre a admissão do carburador e a “garganta” do Venturi, que depende da taxa de fluxo de ar, é usada para fornecer o combustível necessário para atingir a razão ar/combustível apropriada [5]. O princípio de funcionamento, baseado no próprio princípio de Bernoulli, passa então pelo facto de a pressão na zona mais estreita do canal ser menor do que na zona mais larga, devido à velocidade na zona mais estreita ser superior [3]. O combustível entra na corrente de ar através de pequenos orifícios, e é atomizado pela corrente de ar, passando pela borboleta e coletor de admissão. O processo de evaporação do combustível inicia-se no carburador e continua no coletor de admissão. Os últimos desenvolvimentos feitos nos carburadores deram origem aos carburadores controlados eletronicamente, desenvolvidos com o intuito de melhorar a adaptação da mistura ao funcionamento do motor, diminuir o consumo e as emissões [3]. É habitual os carburadores encontrarem-se afinados para fornecer uma mistura aproximadamente estequiométrica ao motor, considerando as condições atmosféricas padrão. Porém este sistema praticamente não se adapta a variações que possam ocorrer nas condições atmosféricas, tais como uma perda de potência verificada para altitudes cada vez mais elevadas.

Na figura 2.5 é possível observar a constituição básica e simplificada de um carburador, que possui uma admissão de ar (1), a “garganta” do Venturi (2) e uma câmara de flutuação onde se encontra o combustível (3). Esta câmara está conectada à admissão de ar por uma passagem de ar para uniformizar a pressão (4), possuindo também um orifício por onde o combustível flui (5) até passar pelo tubo de descarga de combustível (6). Por fim uma borboleta (7), válvula conectada ao acelerador e que controla o fluxo de ar, regula a potência produzida.

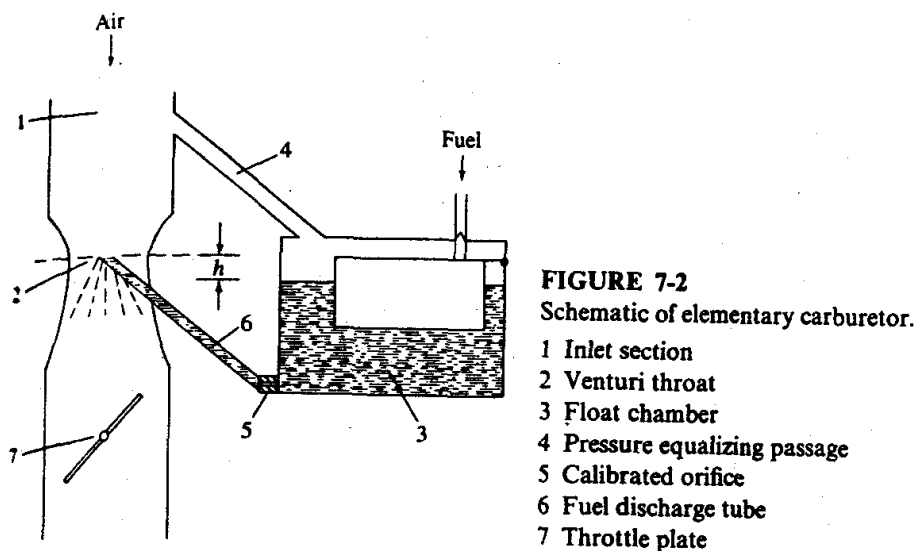


Figura 2.5: Esquematização básica de um carburador [2].

2.3.2 Sistema de injeção de combustível

Sistema desenvolvido e introduzido para substituir os carburadores, onde a principal diferença para estes últimos reside no facto de nos sistemas de injeção o combustível ser pulverizado e atomizado a elevada pressão. Diferenciam-se dois tipos de injeção: a mecânica e a eletrónica.

Sistema de injeção mecânica

Os primeiros sistemas de injeção de combustível, de natureza mecânica, foram utilizados em diversas aeronaves no período da segunda guerra mundial, com mecanismos de injeção direta. Porém devido à sua grande complexidade, ruído, baixo controlo sobre as condições de operação e por ter deixado de corresponder ao controlo minucioso das restrições a nível de poluentes, acabou por cair em desuso (Exemplo K-Jetronic da Bosch) [7]. Os injetores são acionados por impulsos de pressão e cada um alimentado por uma conduta de combustível.

Sistema de injeção eletrónica

A necessidade de obter veículos com menor consumo, diminuição de emissões de gases poluentes e alcançar uma maior potência produzida foram os principais motivos que levaram à criação do sistema de injeção eletrónica de combustível, que permitiu operar com uma mistura mais próxima da estequiométrica [3]. O injetor de combustível digitalmente controlado foi patenteado em 1970, tendo sido mais tarde introduzido em veículos produzidos em larga escala [5], ou seja, a componente eletrónica passou a ter uma maior relevância que a componente mecânica nos sistemas de alimentação dos motores, devido também à sua maior durabilidade, facilidade de controlo e menor dimensão física. A utilização de um sistema de injeção eletrónica, para além das vantagens anteriormente referidas, permite obter um funcionamento mais suave do motor, aumentar a fiabilidade de operação, uma gama mais abrangente de funcionamento, um arranque a frio facilitado, menor necessidade de manutenção e maior capacidade de adaptação ao ambiente envolvente (temperatura e pressão). Porém é mais complexo e dispendioso que um carburador. Estes sistemas realizam leituras do caudal mássico de ar através de dois métodos, enviando posteriormente ordens de abertura aos injetores [7]:

Método Velocidade-Densidade - O caudal de ar é calculado através da medição da pressão na admissão, da velocidade do motor e da eficiência volumétrica. Permite obter dados mais precisos durante acelerações e desacelerações, porém pode apresentar resultados falsos no caso de se trabalhar com eficiências volumétricas diferentes das originais do motor.

Método do fluxo de ar - O caudal de ar que entra pela admissão é calculado por meio do uso de um fio quente, não sendo necessário conhecer as eficiências volumétricas do motor. Os valores podem ser adulterados por inversões do fluxo de ar, durante a abertura e fecho de válvulas de admissão.

Existem dois tipos de sistemas de injeção eletrônica, o **digital** e o **analógico**, com o analógico a ser o primeiro introduzido no ramo automóvel. Neste sistema a massa de ar admitida por cada cilindro é determinada através de um conjunto de cálculos numéricos realizados nos circuitos integrados. A injeção eletrônica digital surgiu da necessidade de controlar as emissões de poluentes com maior rigor, mais especificamente uma precisão superior a 1% do teor da mistura. Para tal era imperativo calcular e medir o valor exato de combustível que será injetado para determinada condição, sendo estes valores introduzidos na memória do controlador eletrônico e a partir desse ponto “chamados”. Este processo requer um sistema eletrônico digital de tratamento de dados e uma grande quantidade de dados armazenados no sistema [7], resultando também num menor consumo, emissão de gases poluentes e maior binário produzido.

Os diversos sistemas de injeção eletrônica são habitualmente classificados de acordo com o número de injetores ou estratégia de determinação do tempo de injeção ou avanço de ignição [9]. De acordo com o número de injetores, podem classificar-se como:

Sistema de injeção monoponto - Mecanismo mais simplificado, denominado por SPI ou TBI, e de menor custo que o multiponto, que requer a utilização de apenas um injetor localizado diretamente acima da seção do coletor de admissão onde se localiza a borboleta, podendo ter um injetor adicional que permite um arranque a frio otimizado [2]. A principal desvantagem deste sistema será a produção de potência, em relação ao sistema multiponto, cerca de 10% menor [1]. O que torna este sistema prático será o seu baixo custo e a possibilidade de usar misturas pobres, devido à maior atomização, vaporização e homogeneização da mistura, visto que o tempo de permanência no coletor é superior [7].

Sistema de injeção multiponto - Este tipo de sistema, também conhecido por PFI ou MPI, requer um injetor para cada um dos cilindros do motor, podendo requerer um ou mais injetores para o arranque a frio. O combustível será injetado, indiretamente, perto da válvula de admissão de cada um dos cilindros [3]. Apesar da sua maior complexidade e custo, permite obter uma maior produção de potência, devido a uma maior eficiência volumétrica e distribuição uniforme do combustível, uma resposta mais rápida ao acelerador e um controlo mais preciso da razão de equivalência (razão ar/combustível) durante o arranque a frio e aquecimento do motor, bem como um baixo consumo [2]. A injeção neste sistema pode ser **paralela**, onde os injetores disparam simultaneamente, ou **sequencial**, onde os injetores são acionados de modo individual para cada um dos diversos cilindros. O primeiro é um sistema mais simples, barato e menos complexo, o segundo mais eficiente, respeitando individualmente os ciclos do motor [7].

2.3.3 Injetor

Trata-se basicamente de uma válvula electromagneticamente controlada, ou seja, controlada por impulsos elétricos [3]. No caso dos motores a gasóleo os injetores são geralmente mecânicos, abrindo com a pressão do combustível, sendo eletrônicos nos motores de ignição por faísca.

Este componente possui um êmbolo magnético, cujo movimento é acionado por uma bobina que cria um campo magnético quando atravessada por corrente elétrica. Quando a bobina não é excitada, o êmbolo do circuito magnético é forçado, por uma mola, contra o assento da válvula, fechando a passagem ao combustível com o seu vedante. Quando é excitada, o êmbolo é atraído e move um veio, permitindo a passagem de combustível. Possui um conector elétrico, onde o adaptador da centralina é conectado e quando acionado fornece corrente elétrica. O combustível pressurizado passa por um filtro e depois por um bocal, responsável por atomizar o combustível em forma de jato [2].

2.4 Sistemas de Ignição

Nos motores de ignição por faísca, a ignição da mistura ar/combustível ocorre devido à existência de uma faísca de natureza elétrica de alta tensão, proveniente da interação entre dois eléctrodos situados no interior da câmara de combustão. A faísca irá dar origem a uma frente de chama autossustentável e propagante, num ciclo repetitivo e onde ocorrem reações químicas de uma combustão exotérmica [2]. São vários os métodos para obtenção da faísca necessária à combustão, contrastando com o mecanismo único de ignição por compressão existente nos motores a Diesel. Todos os sistemas de ignição foram desenvolvidos com o objetivo de evitar fenómenos como o “*knock*” batimento, em que ocorre ignição espontânea de uma porção da mistura ar/combustível, e ignição superficial, quando ocorre a ignição da mistura através de um ponto quente, que podem danificar o motor [14].

Os sistemas de ignição mais comuns, denominados por ignição por bateria, usam corrente contínua, porém existem outros tipos de mecanismos tais como a ignição por magneto e a ignição por descarga do condensador [7].

2.4.1 Sistema de ignição por bateria convencional

Este sistema, ideal para regimes de baixas rotações, é constituído por dois circuitos: circuito primário e secundário. No circuito primário existe um alternador que transforma energia mecânica em energia elétrica e alimenta a bateria a tensão constante. Daqui a corrente vai passar pelo enrolamento primário da bobina, cujo funcionamento se baseia no princípio da indutância, onde quando o platinado está fechado, a corrente é redirecionada de novo para a bateria, dando origem a um campo magnético no núcleo de ferro da bobina [2]. Os platinados,

que funcionam como um interruptor e possuem nas extremidades um condensador (responsável por armazenar cargas elétricas excedentárias) ligado em paralelo, e a bobina, completam o circuito primário. Quando o platinado é aberto, por ação do distribuidor, o circuito de corrente primário é interrompido, provocando uma quebra no campo magnético, e induz uma força eletromotriz (tensão de 5 a 15 kV) no enrolamento primário e secundário. Esta será depois encaminhada pelo distribuidor para a vela de ignição desejada [7]. Os platinados são abertos mecanicamente, por meio de um came do distribuidor conectado à cambota. A vela ao receber este impulso elétrico dá origem a uma faísca, que provoca a ignição da mistura, completando o circuito secundário. No sistema por bateria é utilizado um dispositivo centrífugo, ou outros, para controlar o avanço à ignição e um sistema de medição de pressão para controlar o decréscimo de pressão na admissão, de modo a permitir o avanço ótimo da faísca.

2.4.2 Sistema de ignição por magneto

Representa o método mais simples de ignição e usa corrente alternada, onde praticamente todos os componentes, à exceção da bobina, se localizam no interior do magneto, tratando-se de um sistema compacto e barato. Será o movimento rotacional do magneto, que provoca uma variação do fluxo magnético, o responsável por gerar a corrente elétrica necessária para o funcionamento deste mecanismo, ou seja, observa-se a ausência de bateria pois o sistema produz a sua própria corrente elétrica. A ignição por magneto permite o fornecimento de maiores faíscas para rotações mais baixas, porém o avanço da ignição é constante para todo o regime de funcionamento do motor, restringindo bastante a prestação. A magnitude da faísca fornecida pela vela irá variar com o fluxo gerado, sendo indiretamente proporcional à velocidade do motor.

2.4.3 Ignição eletrônica

Também conhecida como TCI ou IDI, surgiu com a necessidade natural de aumentar a fiabilidade do sistema, obter uma faísca mais forte, diminuir as emissões, aumentar o ciclo de vida das velas e eliminar os problemas associados aos sistemas mecânicos, mais especificamente o desgaste mecânico e oxidação nos pontos de contacto e no interruptor. São constituídos igualmente por dois circuitos, um primário e outro secundário, onde o secundário é similar ao do sistema de ignição convencional e permite obter uma maior tensão, usando acionamento eletrônico. A necessidade de uma maior tensão resultou do aumento da distância entre os eléctrodos, de forma a permitir obter uma maior gama de regimes de funcionamento do motor. A ignição eletrônica pode ser do tipo **analógico** ou **digital**.

Ignição eletrônica analógica

Tratam-se de sistemas de ignição transistorizados, que contornam alguns problemas do sistema convencional de ignição por platinado, como é o caso do desgaste dos platinados. Este sistema

funciona em torno do transistor, usado como amplificador ou interruptor de sinais elétricos, podendo usar ou não platinados [4]. Se o sistema possuir platinados, o transistor recebe corrente da bateria e envia uma parcela para os platinados. Os platinados vão abrir, o transistor interrompe o circuito de corrente para a bobina, o que provoca um pico de tensão. Ao contrário do que acontece com o sistema convencional, o condensador não é utilizado. Caso o sistema não possua platinados, existe um gerador magnético de impulsos que cria uma corrente. Esta corrente vai comandar o transistor e origina um pico de tensão na bobina, quando ocorre interrupção. Possui amplificadores que otimizam a produção de faíscas com elevada potência.

Ignição eletrônica digital

Atualmente representa a maior aproximação que existe de um sistema ideal de ignição. Neste tipo de sistema o funcionamento do motor ocorre no limite do fenômeno de detonação, sem que este nunca ocorra, o que permite alargar o maior avanço possível da ignição e conseqüentemente o rendimento máximo atingindo [7]. Este sistema possui memorizado num mapa o avanço ótimo da ignição para cada velocidade e carga do motor, de forma a operar de um modo otimizado. O avanço da ignição será calculado com base na medição da velocidade de rotação do motor, na qual em conjunto com outros dados, como a temperatura do motor e pressão atmosféricas, serão enviados para o ECU. Nesta fase o ECU calcula o avanço da ignição necessário e envia um sinal para a bobina, e posteriormente para o distribuidor, para dar origem a uma faísca na vela desejada. Atualmente é utilizada uma bobina para cada cilindro ou par de cilindros.

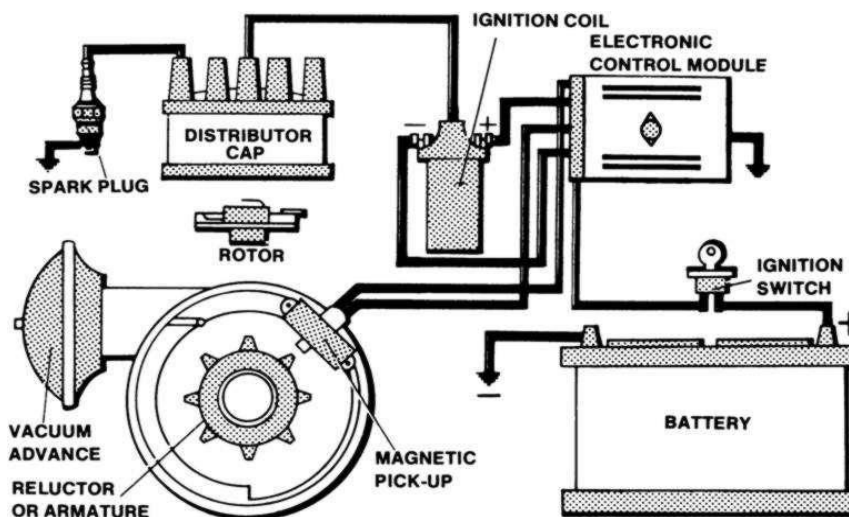


Figura 2.6: Constituição básica de um sistema de ignição eletrônica digital [15].

É possível observar na figura 2.6 uma esquematização simplificada do sistema referido, com os diversos elementos constituintes. Existe um sensor de efeito de Hall “*Magnetic Pick-up*” que permite calcular as rotações do motor e envia estes dados para o ECU. Aqui os dados são processados e é enviada uma resposta para a bobina de ignição “*Ignition Coil*”, que se trata de

um atuador. Neste ponto, a corrente gerada é encaminhada para o distribuidor “*Distributor Cap*”, que gere a corrente elétrica a ser fornecida para cada uma das velas de ignição “*Spark-Plug*” na ordem correta. Todo o funcionamento da bobina será controlado pelo módulo de ignição que se encontra no interior do ECU, neste caso em particular. O módulo de ignição tem como função controlar o *timing* de funcionamento da bobina de ignição. Usa a energia fornecida pela bateria, para alimentar o circuito da bobina e dar origem a uma faísca, através do controlo do negativo da bobina [4]. Permite também o corte da corrente primária, quando o motor não está a funcionar, e a limitação da corrente máxima no primário. Antes do instante da geração de faísca, o módulo de ignição irá receber um sinal de baixa potência, proveniente do ECU, com a qual controla a corrente pelo primário da bobina.

É importante usar os mesmos sensores e controlador digital para os sistemas de injeção, de ignição e os demais, de forma a rentabilizar todo o sistema e compensar o seu elevado custo. Um exemplo claro desta abordagem será o *Motronic* da *Bosch* [16].

CDI

Usado maioritariamente em motores de pequenas dimensões que atingem altas rotações, este sistema surgiu com o intuito de superar os longos tempos de carregamento das bobinas de elevada indutância, ao retirar a componente mecânica envolvida na quebra do circuito dos sistemas IDI, permitindo também obter uma melhor prestação e economia de combustível [17]. A bateria carrega, através de um circuito de carregamento, um condensador de alta tensão, que posteriormente descarrega para a bobina de ignição no instante de ignição, ou seja, no momento em que o condensador deixa de ser carregado. Neste sistema será o condensador o responsável por armazenar energia, onde a quantidade de energia armazenada, para fornecer à vela de ignição, irá depender da sua capacitância (C) e tensão de carregamento. Será um circuito de acionamento, no momento em que recebe o sinal de ativação, o responsável por parar a operação do circuito de carregamento. A descarga do condensador é tal que permite obter uma faísca de alta intensidade e de curta duração, podendo por vezes não ser a mais apropriada para determinado tipo de aplicações, tais como o uso de misturas pobres.

Existem dois tipos de sistemas de ignição CDI: o **AC-CDI**, que usa unicamente corrente alternada proveniente do alternador, e o **DC-CDI** que é alimentado pela bateria, necessitando de um circuito de inversão para aumentar a tensão.

2.4.4 Vela de ignição

Este dispositivo elétrico, como referido anteriormente, é o responsável por inflamar a mistura ar/combustível por meio de uma faísca elétrica. As velas de ignição operam dentro de um intervalo de temperaturas de funcionamento pré estabelecido, normalmente entre os 350°C e os 700°C [1]. Se a temperatura for demasiado elevada irá ocorrer pré ignição, por outro lado,

se a temperatura for demasiado baixa origina depósitos no isolador central e irregularidades de funcionamento. Existem no mercado velas quentes, que operam a temperaturas mais elevadas e possuem um trajeto de dissipação de calor mais longo, bem como velas frias.

No momento em que ocorre a passagem de corrente da bobina para os eléctodos desenvolve-se um potencial eléctrico ao longo do espaço entre o eléctrodo central e o lateral. Após um aumento considerável da tensão, que provoca a ionização dos gases e os torna condutores, ocorre a passagem de corrente entre os eléctodos. A impedância neste espaço diminui drasticamente e a corrente que passa aumenta subitamente, sendo esta fase designada por “*breakdown phase*”. Esta fase é seguida da “*arc phase*” em que, após a obtenção do arco, ocorre uma expansão do canal cilíndrico de gás ionizado devido à condutividade térmica, difusão e reacções exotérmicas, que levam à combustão da mistura [2].

2.4.5 Avanço da ignição

O controlo do momento exato em que ocorre a ignição da mistura ar/combustível é crucial no desempenho do motor e representa, a par da razão ar/combustível e da eficiência volumétrica, um dos parâmetros fundamentais a ter em conta no controlo electrónico de um motor [4]. O avanço da ignição refere-se à posição exata da cambota, em graus de rotação da cambota, no momento em que é iniciada a ignição da mistura, sendo normalmente especificada como uma posição angular antes do PMS. Este avanço, habitualmente de 10° a 30° antes do PMS, tem influência na potência produzida, na longevidade do motor, no consumo de combustível e na emissão de poluentes [18]. A ignição é realizada antes do PMS devido ao facto da combustão da mistura ar/combustível demorar alguns milissegundos a ocorrer, sendo o ângulo de avanço da ignição influenciado pela geometria da câmara de combustão, velocidade e carga do motor, localização da vela, escoamento da mistura, da razão ar/combustível, entre outros.

Um aumento da velocidade do motor provoca uma diminuição do intervalo de tempo que o pistão demora a deslocar-se do PMI para o PMS, e no caso em que o tempo que a mistura ar/combustível demora a queimar totalmente é praticamente constante é necessário aplicar um incremento no avanço da ignição, sendo maior para velocidades do motor mais elevadas e menor para velocidades do motor mais baixas. O avanço será sempre seleccionado por forma a permitir a queima total da mistura ar/combustível, sempre próximo do limite da detonação, e de maneira a que se obtenha o valor máximo de pressão logo após o PMS [7]. É importante referir que nem sempre o maior avanço de ignição possível de implementar, sem detonação, corresponde ao ponto de funcionamento mais otimizado. Este fenómeno, que ocorre com o aumento exagerado do ângulo de avanço, provoca um aumento excessivo da pressão durante a subida do pistão, o que reduz a sua componente útil [8]. Para cargas baixas, ou seja misturas pobres, a duração da combustão é maior e por esse motivo é necessário utilizar um maior avanço da ignição, acontecendo totalmente o oposto quando o motor funciona com uma mistura rica.

3. Casos de estudo

Para que seja possível alcançar os objetivos propostos, mais especificamente o de evidenciar de forma clara e objetiva a influência das diferentes configurações na prestação geral do motor, é necessário estabelecer um conjunto de diferentes tipos de regimes de funcionamento a serem testados. Esta estratégia permite analisar um maior número de situações possíveis, e desta forma obter resultados mais esclarecedores e abrangentes. O motor foi testado na sua configuração original, com carburador e ignição por magneto, e em outras duas configurações alternativas, uma com injeção eletrónica e ignição por magneto e, por fim, outra com injeção e ignição eletrónica. Nos próximos subcapítulos são especificados os regimes de funcionamento implementados para cada uma das 3 configurações testadas.

3.1 Carburador

É naturalmente necessário testar a prestação do motor na sua configuração original, funcionando como uma ferramenta de comparação em relação aos dados de desempenho apresentados pelo fabricante e às outras configurações testadas, tratando-se também de um meio para avaliar o estado atual do motor. Nesta fase não é feito qualquer tipo de afinação ao carburador, sendo testadas as velocidades do motor compreendidas entre um ralenti estável e a velocidade máxima atingida em WOT.

3.2 Injeção eletrónica

Nesta configuração, devido maioritariamente à grande adaptabilidade e capacidade de manipulação computacional do sistema de injeção de combustível, optou-se por testar 4 regimes de funcionamento diferentes. O primeiro é obtido através da aplicação de uma tabela VE gerada pelo *software* TunerStudio MS, com a introdução de diversos parâmetros de funcionamento fornecidos pelo fabricante e compatíveis com o motor. O segundo regime testado apresenta uma tabela VE manipulada de forma a permitir a obtenção de um binário muito semelhante ao da configuração com carburador. Foi desenvolvido com o principal objetivo de comparar o consumo na configuração com injeção eletrónica com o da configuração original do motor, para a mesma produção de binário. Para o terceiro regime optou-se pela implementação de uma tabela VE otimizada para uma maior produção de binário, tendo em conta o comportamento do motor e adotando uma abordagem conservadora. Finalmente, para o quarto e último regime foi feita uma simulação da afinação de um motor, concebida para uma situação de voo. Apesar dos testes não serem realizados nas condições consideradas como as mais apropriadas e corretas de acordo com o que é prática neste tipo de situações, mais especificamente o facto de o motor durante os testes se encontrar estático, este teste tem como objetivo mostrar a capacidade de aplicar variações consideráveis na tabela VE para

diferentes velocidades. Ora numa situação de voo é comum haver uma utilização de diferentes tipos de misturas, pobres ou ricas, de acordo com a manobra realizada. Baseado em dados típicos de UAV's e assumindo por senso comum e razoável, são especificadas as manobras e respectivas percentagens de acelerador associadas (ver Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Percentagem do acelerador associada a cada manobra.

Manobra	Acelerador [%]
Descolagem	90
Subida	80
Cruzeiro	60
Emergência	100

Considerando o intervalo de velocidades entre as 2200 e as 5800 rpm, gama de velocidades alcançável, os dados acima apresentados e a prestação que se pretende obter, foi feita uma distribuição do tipo de mistura a usar para as diferentes manobras e velocidades aplicadas, como se encontra apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Distribuição do tipo de mistura de acordo com a velocidade do motor.

Velocidade do motor [rpm]	Tipo de mistura
2200 - 2700	Pobre
2700 - 3000	Estequiométrica
3000 - 4000	Pobre
4000 - 5800	Rica

Para rotações baixas, ralenti (entre as 2200 e as 2700 rpm), e médias, cruzeiro (entre as 3000 e as 4000 rpm), pretende-se obter uma mistura pobre para promover uma maior poupança de combustível. Entre as 2700 e as 3000 rpm é aplicada uma mistura estequiométrica de forma a permitir obter um ralenti a velocidade mais elevada e com maior estabilidade. Para velocidades elevadas (a partir das 4000 rpm) a mistura é rica, com o objetivo de alcançar uma melhor prestação em manobras que requerem uma resposta rápida e mais potência.

3.3 Injeção e ignição eletrónica

Nesta ultima configuração, foram testados 3 regimes de funcionamento distintos. Dois deles são obtidos com base na tabela VE que permite obter uma produção de binário similar à do carburador, onde um deles inclui uma tabela do ângulo de avanço à ignição gerada por uma fonte externa com base nas características do motor [19] e outro um ângulo de avanço fixo e igual ao do sistema de ignição de origem. São implementados com o objetivo de testar o comportamento do motor quando aplicada uma tabela de ignição variável e quando é feita uma aproximação do sistema de ignição eletrónica à ignição por magneto, para o mesmo ângulo de

avanço à ignição. O último regime é aplicado para constatar se é possível otimizar ainda mais o desempenho do motor, com foco num aumento do binário produzido, usando a tabela VE referente a uma tentativa de otimizar o desempenho do motor e uma tabela do ângulo de avanço à ignição aperfeiçoada manualmente através de um processo iterativo.

4. Componentes e *Softwares*

Para que seja possível a realização dos ensaios laboratoriais propostos, associados a montagens e procedimentos experimentais relativamente complexos, é necessário todo um conjunto de componentes e *softwares* informáticos, que interagem entre si e com os restantes componentes fabricados e projetados (capítulo 5). É em seguida realizada, de forma suscita, uma descrição de cada um destes elementos, em específico, utilizados no decorrer dos testes.

4.1 Ficha técnica do motor

O motor monocilíndrico disponibilizado, para efetuar as modificações e ensaios, foi o Honda GX31, antecessor do atual GX35 e pertencente também à série GX da Honda [20]. Tratou-se do motor selecionado para a realização dos ensaios de teste devido à sua simplicidade mecânica, facilidade de manuseamento e de adaptação de componentes, dimensões reduzidas e pelo facto de se tratar de um dos únicos motores do género, na posse do departamento, para a realização dos ensaios e modificações implementadas e pretendidas.

Contexto de mercado e especificações do motor

O Honda GX31, apesar de não se tratar de um modelo recente, representa um dos motores a 4 tempos mais pequenos do mundo, que se distingue pelo seu reduzido peso, facilidade de arranque e durabilidade. Este apresenta um desempenho que seria expectável apenas num motor de maiores dimensões, ou seja, trata-se de um formato compactado. Destaca-se também por pertencer à primeira gama de motores a nível mundial que funcionam em perfeitas condições para qualquer que seja a inclinação do motor. Como é habitual neste tipo de motores de pequena complexidade e dimensões, este possui uma embraiagem centrífuga e as válvulas são comandadas por um sistema OHC [20]. O motor é alimentado por uma mistura ar/combustível proveniente de um carburador, um dos componentes sobre a qual se debruça o tema desta dissertação e onde se concentram as modificações implementadas. Este motor para além das vantagens anteriormente referidas apresenta muitas outras, tais como um baixo custo de operação, elevada fiabilidade, funcionamento suave e pouco ruidoso, fácil manutenção e elevada eficiência energética, quando comparado com motores semelhantes. Como consequência destas características, o GX31 é utilizado nas mais diversas aplicações, tais como em bombas de água, geradores, equipamento para jardinagem/agricultura e equipamento industrial/construção. Todo o conjunto de especificações técnicas, revelantes para obter uma melhor perceção do motor, encontram-se referidas e agrupadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Especificações técnicas do Honda GX31 [20].

	Especificações técnicas	Unidade
Tipo de motor	4 tempos, monocilíndrico	-
Cilindrada	31	cm ³
Potência máxima	1.10 @ (7000 rpm)	kW
Binário máximo	1.64 @ (4500 rpm)	Nm
Razão de compressão	8.0:1	-
Carburador	Tipo diafragma	-
Sistema de ignição	Ignição por magneto	-
Sistema de arranque	"Recoil" Puxa-corda	-
Sistema de lubrificação	Cárter acionado por pressão	-
Capacidade de óleo	100	cm ³
Combustível	86 Octanas ou superior, sem chumbo	-
Capacidade tanque de combustível	0.62	L
Peso a seco	3.4	kg
Diâmetro x Curso	39 x 26	mm
Dimensões <i>layout</i> horizontal	210 (comp) x 251 (larg) x 250 (altura)	mm
Consumo combustível	340	g/kWh
Máxima rotação sem carga	10000	rpm

4.2 Hélice

Para o motor não funcionar sem carga foi necessário introduzir um elemento que permitisse travar o motor, e tendo em conta o contexto do ramo aeronáutico foi decidido utilizar uma hélice para este fim, que em relação ao volante de inércia possui um atrito muito menor e trata-se de um sistema muito mais leve. A carga aplicada será aproximadamente constante, já que os testes são feitos num modo estático e a eficiência propulsiva da hélice será aproximadamente zero, obtendo-se uma curva de binário apenas em função da fração do acelerador [21]. Ou seja para a hélice selecionada está associada uma determinada carga, sendo necessário utilizar diversas hélices se o pretendido for variar a carga para a mesma fração do acelerador. Este facto contrasta com as curvas de binário obtidas nos ensaios típicos de uma construtora de motores, onde existem diversas curvas de binário para o acelerador a WOT e uma carga aplicada variável.

Foi estabelecido que a hélice seria colocada no lado correspondente ao volante do motor, devido ao sentido de rotação (sentido anti-horário) característico das hélices “puxa”. A hélice utilizada possui 17 polegadas de diâmetro e um passo de 10 polegadas, por se tratar de uma das hélices mais usadas em drones com motores de potência semelhante. De qualquer forma, a hélice foi selecionada com recurso ao *software* PropSelector como apoio, que através de uma

extensa base de dados experimentais permite prever o comportamento de diversos parâmetros da hélice selecionada para determinadas condições de voo, e desta forma selecionar a que melhor se enquadra com as características do motor e não implementar uma carga excessiva.

4.3 Controlador EFI

O “cérebro” de todo o sistema de controlo eletrónico de um motor trata-se naturalmente da centralina, responsável pela gestão de toda a informação que circula entre os diversos sensores e atuadores e pelo próprio funcionamento dos mesmos. Para o fim proposto foi utilizado um controlador EFI da família MegaSquirt®, que se tratam basicamente de controladores experimentais, eletrónicos e programáveis de injeção de combustível para motores de ignição por faísca [22], onde a componente experimental sugere desde logo que alguns dos parâmetros de funcionamento terão que ser encontrados por tentativas sucessivas, e serão específicos para cada aplicação e equipamento. Estes controladores funcionam para qualquer tipo de motor, sendo destinados apenas para propósitos educacionais, para compreender, de forma mais clara e simplificada, como se processa todo o funcionamento em torno de um sistema de injeção eletrónica.

A centralina utilizada é um produto comercializado pela empresa *extraefi* [23] tratando-se um modelo equipado com o MegaSquirt-II. O ECU é constituído maioritariamente por dois componentes, o processador (MS1, MS2 ou MS3) e a placa onde este é instalado. Como o próprio nome indica esta centralina possui um processador MS2, fixado a uma placa de versão V3.0. Esta placa é compatível com todos os processadores existentes, funciona com injetores de baixa e alta impedância, é de fácil reparação, entre outras das muitas vantagens desta versão. Em relação ao processador MS2, permite aumentar a capacidade processamento em relação ao modelo anterior MS1, o que contribui também para o aumento das funcionalidades do equipamento [24]. Associado e compatível com este processador, existe um código, constituído pelos diversos algoritmos de cálculo, que sofre atualizações com a introdução de novas versões de processadores. Esta empresa tem como função executar a complexa tarefa de montar os componentes fornecidos pelo *kit* MegaSquirt, estabelecendo todas as ligações em torno da placa principal “*Main Board*”. A montagem do *kit* é feita com recurso a um ferro de soldar, fio de solda e outros acessórios. É consultada uma série de designações encriptadas, para identificar os diversos componentes necessários, e uma legenda de códigos de cor, para estabelecer todas as ligações de forma correta. Esta centralina possui também, já incorporado no seu interior, o sensor MAP. Na figura 4.1 encontra-se representado um esquema que evidencia de forma clara o tipo de elementos que constituem o próprio sistema MegaSquirt e aqueles que de alguma forma estão conectados por via eletrónica a este sistema.

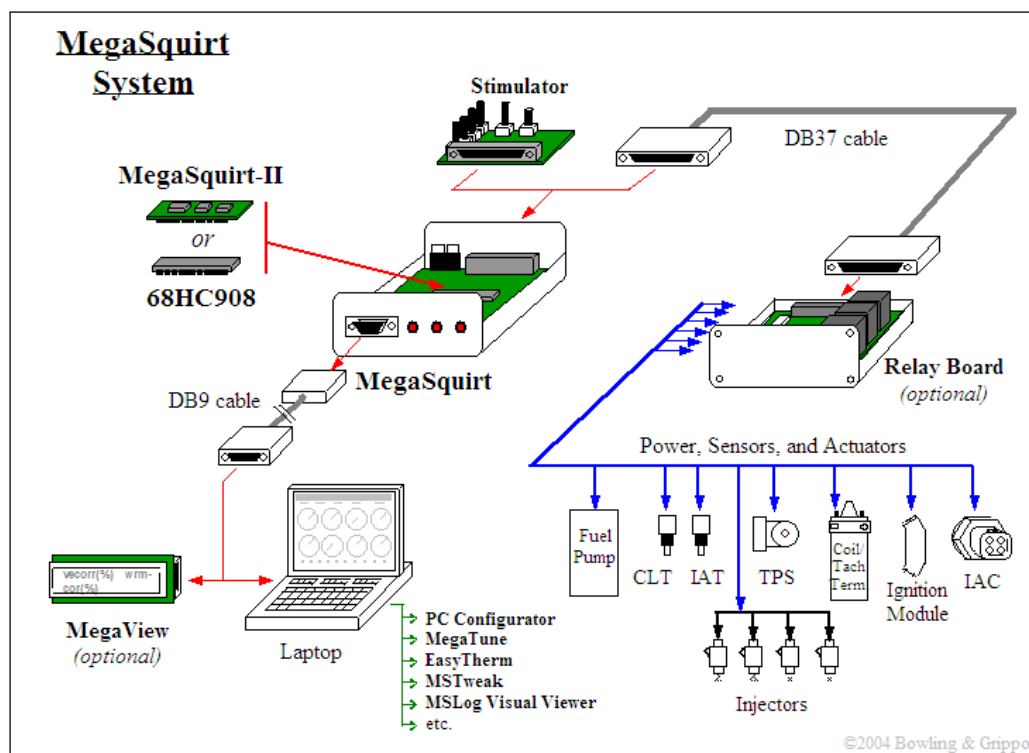


Figura 4.1: Esquema representativo dos elementos constituintes e conectados ao sistema MegaSquirt MS-II [25].

4.4 Softwares

Todas as funcionalidades associadas ao sistema MegaSquirt podem ser controladas pelo utilizador através da aplicação de um *software* informático de afinação que seja compatível e otimizado para o controlador EFI selecionado. Para este fim foi utilizado o TunerStudio MS que representa o *software* padrão de eleição da comunidade MegaSquirt, com a particularidade de ser o único compatível com todas as versões de controladores EFI MegaSquirt. Trata-se de um programa simples, interativo, intuitivo e que possibilita um controlo, visualização e registo eficaz de diversos parâmetros de funcionamento do motor em tempo real, permitindo afinar e configurar com um grau de precisão bastante razoável. Importante referir que a versão deste *software* utilizada nos ensaios experimentais foi a 3.0.22.

Como plataforma de registo e análise dos dados obtidos, em função das alterações realizadas com o recurso ao TunerStudio MS, foi utilizado o programa MegaLogViewer MS versão 4.2.4. A sua utilização permite também identificar problemas e criar possíveis oportunidades de resolução, bem como visualizar os resultados obtidos em tempo real com grande pormenor e detalhe [26].

De forma a permitir a obtenção de dados por parte da célula de carga selecionada e posteriormente proceder à sua calibração, foi necessário recorrer ao programa Arduino, versão 1.8.3. Este programa é uma plataforma para criar os códigos pretendidos, numa linguagem

C/C++, e introduzi-los na placa apropriada. Associado ainda à leitura de dados por parte da célula de carga, é utilizado o *software* PLX-DAQ versão 2.11, que permite extrair os dados diretamente para uma folha de Excel. Para a calibração do ângulo de avanço à ignição, no sistema eletrónico, é usado o *software* PicoScope 6.

4.5 Sensores

Em qualquer uma das 3 configurações foram implementados diversos sensores, com o principal destaque para as configurações com injeção e/ou ignição eletrónica, que usa a gama completa de sensores disponibilizados por forma a tornar possível a sua correta operação. De forma breve e resumida serão referidos os sensores utilizados nas montagens experimentais, onde posteriormente (no capítulo 5) serão dadas a conhecer as especificações, o processo de montagem, entre outros pormenores relevantes.

Sensor de Hall - Foi utilizado um sensor Haltech S3 de efeito de Hall, tratando-se este modelo em específico de um dispositivo de dois canais [27].

Célula de carga - Foi selecionada uma célula com a configuração de dupla flexão. Este componente tem capacidade para efetuar medições de massas até 5 kg e possui 4 fios (preto, branco, vermelho e verde) de saída, sendo compatível com o amplificador da célula de carga disponibilizado que necessita de um *input* de 4 fios. Foi escolhida esta célula em detrimento de uma célula de carga proveniente de uma balança doméstica pelo facto da primeira possuir uma maior precisão nas leituras efetuadas.

Sensores de temperatura do motor e do ar admitido - Ambos os sensores são compostos por termístores, do tipo NTC. Foi selecionado um modelo de dimensões reduzidas, o que torna mais prática a implementação dos mesmos no motor.

Sensor MAP - Este sensor, do tipo diafragma, encontra-se já embutido no interior da centralina, sendo conectado ao coletor de admissão através de um tubo plástico. Não é conhecido o *Part Number*, e conseqüentemente o modelo do sensor, já que estas informações não são fornecidas pelo fabricante da centralina.

4.6 Atuadores

Depois de definida a unidade de controlo e os sensores a serem utilizados, é necessário selecionar os atuadores que cumpram os comandos provenientes do controlador eletrónico, como forma de resposta por parte do sistema. Em seguida são referidos os diversos atuadores utilizados na componente experimental.

Injetor - Foi utilizado um injetor de combustível da série EFIJ destinado a motores de pequenas dimensões, mais especificamente motores de até 35 cc de cilindrada, possuindo um débito de combustível de 109 cc/min [28].

Bobina de ignição - Componente fabricado pela empresa Intermotor, especializada em sistemas de ignição. O modelo utilizado pode ser encontrado principalmente em motores de 4 cilindros em linha, do grupo Peugeot-Citroën.

Módulo de ignição - Utilizada uma configuração de módulo de ignição exterior ao ECU. O módulo utilizado é pertencente à empresa Bosch e pode-se encontrar em diversos automóveis, geralmente com motores de 4 ou 5 cilindros.

Bomba de combustível - É um dos componentes básicos do sistema de injeção eletrónica, sendo geralmente acionado por um pequeno motor DC. A bomba selecionada, com *part number* EFP-25D, é capaz de debitar 25 litros de combustível por hora a uma pressão de 3 bar [29].

5. Conceção, fabricação e montagem de componentes

Todos os componentes concebidos, como parte do proposto nesta dissertação, foram baseados num sistema já existente, pertencente à empresa Ecotrons que é responsável por projetar e conceber componentes eletrónicos e mecânicos para variadas gamas de motores e veículos. De entre as categorias principais de produtos, produzidos por esta empresa, destaca-se a categoria referente aos sistemas de injeção eletrónica de combustível para motores de pequenas dimensões, que comercializa *kits* de conversão EFI para fabricantes ou mercado de reposição. Esta empresa possui um *kit* EFI especialmente concebido para o motor Honda GX35, sucessor do GX31 utilizado para os testes experimentais, devido à habitual escolha deste motor para os veículos utilizados nas provas Shell Eco-Marathon. Através de informações disponibilizadas pelo *website* desta empresa e da observação e levantamento das dimensões de um corpo de acelerador e respetivo adaptador, pertencente a um *kit* Ecotrons existente nas instalações da universidade (figura 5.1), foi possível projetar a peça desejada no programa CATIA V5, bem como delinear os processos de fabrico necessários para obter a peça adaptada às condições experimentais [30]. O fabrico desta peça foi feito de raiz com o objetivo de obter uma peça personalizada, para os fins propostos, e poupar recursos financeiros devido ao elevado valor de mercado da peça em questão, acrescentado mais um desafio a esta dissertação.

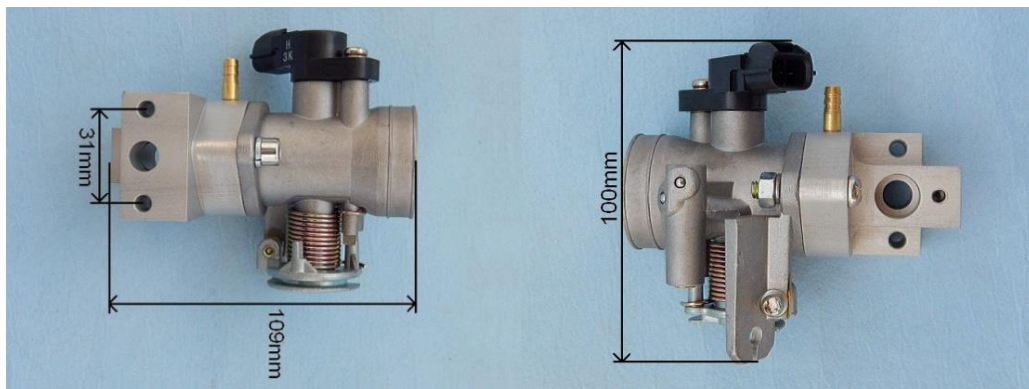


Figura 5.1: Corpo do acelerador e adaptador do *kit* Ecotrons para o Honda GX35 [31].

Para além dos componentes referidos anteriormente, outros foram projetados com o intuito de possibilitar a fixação, de forma segura e funcional, do motor e da hélice. Ambos os componentes foram, à semelhança do que ocorre com o corpo do acelerador, projetados e fabricados a partir de peças já existentes e de outras por conceber.

5.1 Conceção

A projeção e conceção das peças pretendidas foi feita no *software* informático CATIA V5 versão R20, que se trata do software líder mundial de engenharia e design para produtos CAD em 3D, tornando-se por este mesmo motivo ideal para o objetivo pretendido. Como foi referido anteriormente, o modelo do corpo de acelerador criado no CATIA V5 foi concebido com base em medições realizadas à peça original, pertencente ao *kit* Ecotrons do GX35. Depois de retiradas as medidas, com recurso a um paquímetro, régua e transferidor, procedeu-se à introdução dos *sketchs* no programa para obter a peça em 3D. A peça foi dividida em duas partes: no corpo do acelerador e no adaptador, que permite o encaixe do injetor e do motor à peça. Foram também introduzidos todos os componentes periféricos como o injetor, o sensor MAP, todos os parafusos e anilhas utilizados, entre outros, na montagem final no CATIA V5, de forma a ter uma noção mais precisa e realista da peça final. Foram feitas diversas alterações nos projetos de cada uma das peças, de forma a permitir a adaptação aos métodos de fabricação e materiais disponíveis, obtendo-se o esboço representado na figura 5.2.

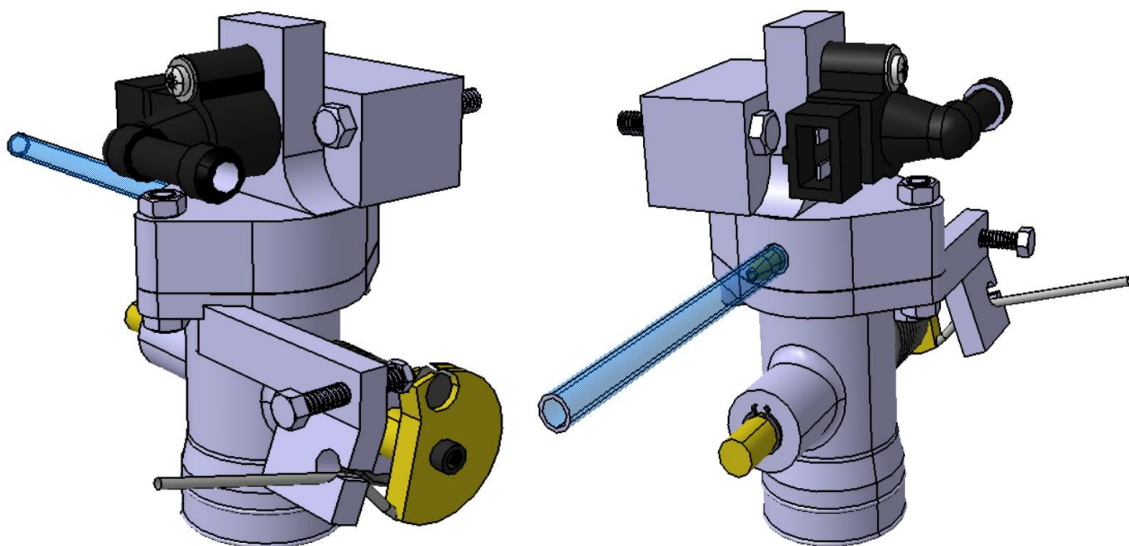


Figura 5.2: Esboço em 3D, concebido no CATIA V5, da peça completa e final obtida.

Foram feitas diversas modificações à peça original, das quais se destacam a exclusão da parte referente à afinação do ralenti do motor através de um sistema de *bypass*, e do suporte para o sensor de posição da borboleta (TPS). A primeira parte foi excluída por se tratar de um componente dispensável na operação realizada com o motor, tendo sido o ralenti afinado unicamente através do parafuso que controla a posição inicial da borboleta quando o acelerador está a 0%. O TPS não foi incluído pelo simples motivo de se tratar de um sensor com a mesma função do MAP, na qual ambos permitem determinar o fluxo de massa de ar que entra no motor, e pelo facto de o algoritmo de controlo escolhido ser o “*speed density*”, que usa a pressão na admissão e a velocidade do motor para calcular a quantidade de combustível a injetar.

Referente ao sistema de fixação da hélice e ao banco de ensaios, foram retiradas também as medidas necessárias do motor e avaliadas as melhores opções para estabelecer cada um destes sistemas no conjunto. Relativamente à conceção destes componentes, também realizada no *software* CATIA, existiu uma maior liberdade no design das mesmas, tendo sido selecionada a configuração que melhor cumpria os objetivos desejados. Foi também concebido um suporte simplificado para fixar o sensor de Hall ao motor e um componente impresso em plástico, com o objetivo de diminuir a seção transversal da passagem do ar na admissão.

5.2 Processo de fabrico

Esta fase é abordada e iniciada após completada a fase de conceção dos componentes necessários na fase experimental, sendo um processo que envolve a maquinação de várias matérias-primas diferentes. Foi adotado o alumínio como matéria-prima para a maioria das peças a serem maquinadas e fabricadas, devido à sua baixa densidade, resistência à corrosão, elevada condutividade térmica e por se tratar do elemento mais comum na construção de peças de natureza semelhante, como acontece no *kit* Ecotrons. Outra das matérias-primas utilizada foi o latão, utilizado em alguns dos componentes, cuja fácil maquinação foi um fator essencial a ter em conta. Para além das duas matérias-primas referidas anteriormente, foi também utilizado arame de aço e aço sob a forma de chapa.

Inicialmente, de forma a tentar executar uma reutilização de recursos existentes, procedeu-se à fundição de restos de alumínio a 850 °C, num forno elétrico. Posteriormente, o alumínio, em estado líquido, foi retirado do interior do forno e colocado em moldes, de forma a obter os blocos necessários para maquinação. Dois tipos de moldes, de areia e de aço, foram utilizados, porém nenhuma das tentativas permitiu obter blocos de alumínio totalmente compactos, homogêneos e maciços. Compreendendo-se que a fundição de alumínio se tratava de um processo mais complexo que o antecipado, foi adquirido alumínio, em forma de varão, por via externa, com uma qualidade ideal para ser maquinado.

A maquinação de todos os componentes envolveu a utilização dos mais variados tipos de equipamentos, tais como um torno mecânico, uma máquina de corte por jato de água, uma máquina CNC, um centro de maquinagem vertical, entre outros. O modo e momento em que cada um destes equipamentos é utilizado será descrito ao longo dos próximos subcapítulos de forma esclarecedora e explícita, individualizando cada uma das peças.

5.2.1 Fabricação do corpo do acelerador e adaptador do injetor

Como esta peça se trata basicamente da junção de duas com funções relativamente distintas, apesar de pertencentes ao mesmo sistema, a descrição do processo de construção será individualizada. Inicia-se pela descrição da construção da peça relativa ao corpo do acelerador,

e posteriormente da peça que funcionará como adaptador para o injetor e para a fixação da peça completa ao motor.

Processo de construção do corpo do acelerador

Esta terá sido a peça que mais dedicação e mão-de-obra implicou, já que se trata do componente com mais detalhes específicos a ter em conta e também pelo fato de não ser possível obter a mesma através de um único processo de fabrico. Por este mesmo motivo todos os pormenores da peça foram tratados de forma individual, tendo sido dividido em vários passos de construção. Importante referir que grande parte da fabricação desta peça foi realizada num torno (Quantum Torno D 360X1000) já que que a mesma é composta por um considerável número de componentes de revolução, ou seja, com uma forma cilíndrica. É possível usar as figuras (B.1 a B.5) que se encontram no anexo B como apoio, e cuja descrição feita nos próximos parágrafos permite identificar facilmente os diferentes componentes constituintes do sistema.

Conduta admissão de ar - Foi fabricada com recurso a um varão cilíndrico de alumínio maciço com 36mm de diâmetro, utilizando-se o torno para desbastar, até obter a geometria exterior indicada na figura 5.2. Usada depois uma broca de centrar, também no torno, para marcar um furo e garantir que o mesmo fica centrado. Realizado posteriormente um furo com broca de 20mm, de forma a permitir a entrada do ferro interior e iniciar a maquinação no interior da peça, que desbasta até se obterem as dimensões pretendidas. Usado um ferro de sangrar, no processo de corte, para separar a peça maquinada do restante varão de alumínio. Para finalizar foi feito um furo, perpendicular à conduta, com uma broca M8, onde irá passar o eixo da borboleta.

Suporte do eixo da borboleta - Este suporte foi maquinado no torno a partir de um bloco cilíndrico de alumínio com 20 mm de espessura, tendo sido desbastado até se obterem os 18mm pretendidos. Usada a broca de centrar para marcação do furo, este feito com uma broca de 8mm de diâmetro ao longo de todo o comprimento da peça. Foi depois usado o ferro de sangrar para cortar a peça nas duas secções pretendidas, uma com 18 mm de comprimento e outra com 24 mm. Para que o encaixe perpendicular destas secções com a conduta de admissão de ar seja perfeito, de forma a facilitar o processo de soldagem das peças, foi necessário desbastá-las numa fresadora vertical, equipada com uma fresa com o diâmetro exterior da admissão de ar. No segmento com 24 mm de comprimento foi feito um furo com 2,5 mm de diâmetro para fixar a mola.

Flange - Para obtenção da flange foi utilizada uma placa de alumínio, com a espessura pretendida de 5,5 mm, e uma máquina CNC de corte por jato de água. Introduziu-se o *sketch* em formato “igs”, proveniente do CATIA, num programa informático compatível (VCarve) com o sistema de corte, o que permite obter um corte preciso da peça. Procedeu-se depois ao corte da peça e posterior confirmação das medidas pretendidas.

Suporte do cabo do acelerador - O suporte do cabo do acelerador e do parafuso de ajuste do ralenti do motor, à semelhança do que foi feito com a flange, foi obtido através do corte de uma pequena placa de alumínio, com 6 mm de espessura, na máquina CNC de corte por jato de água. Após o corte foi aberta uma rosca M4, no furo realizado pela máquina de jato de água, e dobrada a parte da peça que suporta o cabo do acelerador, com recurso a um torno e martelo, num ângulo de 20 graus.

Borboleta - A borboleta foi obtida a partir de um varão de latão de 34 mm de diâmetro, tendo sido desbastado no torno até se obter o diâmetro pretendido, de 28 mm. Em seguida a peça foi cortada, com a espessura desejada de 1,5 mm, através do uso do ferro de sangrar no torno. Posteriormente foi utilizada uma polidora, de forma a alisar e dar um acabamento suave à borboleta, e foram feitos dois furos passantes M3, para fixar a borboleta ao respetivo eixo (figura B.1 em anexo).

Eixo da borboleta - O eixo, feito a partir de um pequeno varão de latão com 10mm de diâmetro, foi maquinado no torno até obtenção da geometria pretendida, tendo sido usando posteriormente o ferro de sangrar para cortar a peça com o comprimento desejado (96 mm). Feito um furo M3, com rosca, numa das extremidades para o fixar ao acelerador. Realizado um ligeiro corte, no torno, para encaixe de um freio, de forma a garantir que este se encontra fixo e que realiza apenas um movimento rotacional. O eixo foi depois desbastado para fixar a borboleta, através do uso da fresadora vertical com uma fresa de 8 mm de diâmetro. Realizados dois furos com rosca M3, para colocar dois parafusos, e um furo M2, todos para fixarem a borboleta ao eixo. Para completar a peça foi feito um furo M2,5, para fixar a mola ao eixo (figura B.1 em anexo).

Placa do acelerador - Fabricada a partir de um varão de latão, com 34 mm de diâmetro. Desbastada no torno até ficar com um diâmetro de 31 mm, onde depois é feito um corte interior, com o ferro de sangrar, por onde passará o cabo do acelerador. Feito um furo M10, não passante, na placa, para permitir o encaixe do eixo da borboleta na mesma. No centro deste furo foi feito um outro furo M3, desta vez passante, para permitir a fixação do eixo à peça. Para finalizar, foi feito um furo M8 passante, que permite a fixação do cabo do acelerador, e a peça desbastada com o uso de uma lima, até que permite-se um movimento rotacional de 90° à borboleta (figura B.1 em anexo).

Mola - Foi necessário fabricar este componente devido à falta de uma mola com as características pretendidas, nomeadamente em termos de diâmetro e elasticidade. Para fabricar a mola foi usado arame de aço, posteriormente enrolado num varão com o diâmetro de 20 mm e temperado num forno a cerca de 450°C. Após permanecer no forno durante cerca de 30 minutos, a mola foi retirada e diretamente colocada num banho de óleo de motor usado. Este repentino arrefecimento no banho de óleo permite obter as características pretendidas para a mola na sua função específica.

Estrangulador - Este componente foi fabricado na máquina de impressão em 3D, sendo composto por plástico ABS. Foi concebido para restringir a quantidade de ar que entra no motor, e desta forma obter um funcionamento mais estável.

Processo de construção do adaptador

Toda a fabricação desta peça foi realizada num centro de maquinagem vertical de 5 eixos. Tratando-se de um processo complexo e que requer um grande número de operações e passos a serem tomados, este irá ser clarificado de forma resumida e objetiva. Iniciou-se com a preparação do CAM, assumindo que a máquina funcionava com os 5 eixos corretamente e com recurso ao *software* ESPRIT. Este primeiro passo é feito partindo do modelo 3D concebido no *software* CATIA, sendo necessário importar o formato igs para SOLIDWORKS e posteriormente para o ESPRIT. Foram depois definidas as operações e ferramentas, com base na geometria, para permitir a maquinação da peça (20 operações e 8 ferramentas), da qual se obtém um código que será depois introduzido no pós-processador da máquina. Inclui operações de desbaste, definição de contornos, abertura de furos e de acabamento, tendo sido necessário utilizar as ferramentas apropriadas para tal. Algumas destas operações tiveram que ser realizadas manualmente na máquina, pelo facto de alguns dos eixos não se encontrarem devidamente afinados.

5.2.2 Fabricação dos restantes componentes

Sistema de fixação da hélice ao motor - De forma a poder fixar a hélice ao volante do motor, de forma estável e segura, foi necessário projetar alguns componentes obtidos a partir de diferentes materiais disponíveis (anexo C). Aproveitando os dois parafusos existentes no volante do motor, para fixar à embraiagem centrífuga de origem, foi cortada uma chapa de aço, com 80 mm de largura por 50 mm de comprimento, de forma a estabelecer um elo de ligação entre o volante do motor e o eixo da hélice. Como é possível observar no anexo C, esta possui 7 furos. O furo centrado, de 8mm de diâmetro, serve para fixar o eixo da hélice à chapa de aço, os outros dois furos, também com 8 mm de diâmetro, têm como função fixar a chapa ao volante do motor, e os restantes furos, com 3 mm de diâmetro, funcionam como reforço e garantia que não ocorrerá deslizamento do suporte do eixo em relação à placa. É extremamente importante que estes furos sejam precisos, de forma a evitar uma oscilação do eixo da hélice e possivelmente provocar danos irreversíveis ao motor.

Para suportar o eixo da hélice e garantir a estabilidade do mesmo, foi fabricado um suporte feito de alumínio. Este foi obtido através de um varão de alumínio com 35 mm de diâmetro que foi entretanto maquinado, com a forma pretendida, num torno. Com o recurso a esta mesma máquina, em conjunto com uma broca M8, foi feito um furo com 8mm de diâmetro ao longo da peça, tendo sido usado no final um ferro de sangrar para separar a peça do varão. Procedeu-se depois à abertura, na face do suporte do eixo em contacto com o volante do motor, de 4 furos

com uma broca de 2,5 mm, para posteriormente abrir rosca com um macho M3. Na face oposta foram realizados dois furos, com recurso a uma broca de 2,5 mm para também serem roscados com um macho M3, que estabelecem a ligação entre a hélice e o suporte do eixo. No cubo da hélice e a base do cone, em alumínio, são também feitos dois furos passantes M3, para estabelecer a conexão referida anteriormente. O eixo da hélice, responsável por estabelecer a ligação da mesma ao motor, será constituído por um parafuso com 90 mm de comprimento e 8 mm de diâmetro.

Banco de ensaios do motor - A cambota do motor ao rodar em determinado sentido, no mesmo que o da hélice, vai dar origem a uma reação do bloco do motor com um momento aplicado, no sentido oposto, representado um exemplo do princípio de ação e reação (3ª Lei de Newton). A conceção do banco de ensaios teve em conta este fenómeno e foi concebido para permitir a quantificação desta reação, na forma de uma força aplicada. Como é possível observar na fig. 5.3, o lado do ponto “A” corresponde a um ponto de fixação do banco, através de duas rótulas para minimizar o atrito, tal como o lado do ponto “B”, onde se encontra fixada a célula de carga. A força resultante da reação será medida nesta última extremidade. Consequentemente este sistema permite obter leituras acerca do momento relativo ao binário produzido pelo motor, usando a força quantificada pela célula de carga e o próprio braço da força “L”. O somatório dos momentos do sistema representado na figura 5.3 é igual a zero, devido ao seu estado estático, e o somatório de momentos no ponto “A” igualmente nulo, por se tratar de um ponto fixo. Considerando a força realizada pela célula de carga no banco de ensaios (força “F”) e o momento aplicado pelo motor (momento “M”) podemos chegar à equação (5.1).

$$M - F.L = 0 \rightarrow M = F.L \quad (5.1)$$

Esta equação permite concluir que o braço usado nos calculados é independente da localização do momento aplicado pelo motor ao longo do banco de ensaios. A medida “L” possui 137,5 mm de comprimento.

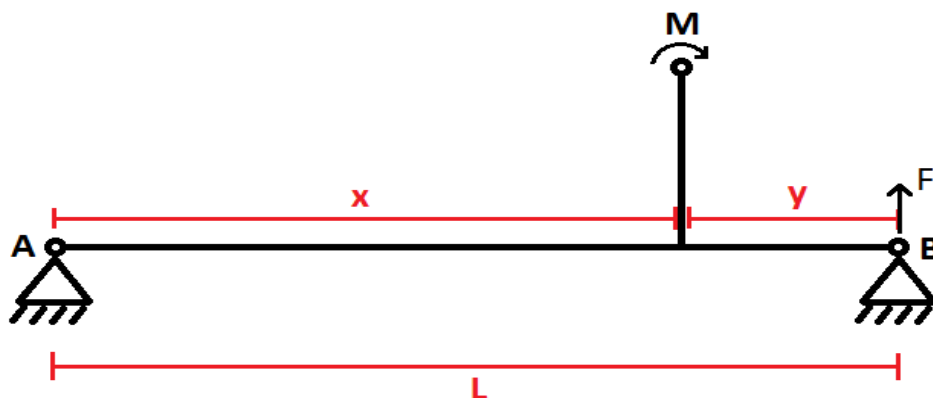


Figura 5.3: Esquemática, concebida no Microsoft Paint, do mecanismo em torno do banco de ensaios.

A construção do banco de ensaios pretendido foi bastante simples, tendo-se recorrido a dois varões de aço de seção transversal quadrada, um com 2 cm e outro com 4 cm de lado. Do varão, com seção 4x4 cm, cortaram-se, com recurso a uma serra de cortar ferro, 3 segmentos, que irão compor a base do banco e reforça-lo estruturalmente. Foi cortada também uma pequena porção do varão com seção 2x2 cm, que funciona como um reforço estrutural e permite um perfeito encaixe da base desnivelada do motor. Todas estas porções de varão foram soldadas, com recurso a TIG, de forma a estabelecerem uma estrutura estável e robusta. Após a obtenção da estrutura do banco de ensaios foi fixada, de um dos lados, uma pequena chapa de aço à estrutura do banco de ensaios, soldando duas rótulas, que permitem estabelecer o movimento rotacional e fixar toda a estrutura a uma mesa de madeira. Foi tido em conta um certo desnível entre a chapa e o banco de ensaios, de forma a permitir a deformação da célula de carga durante os ensaios. É possível ver na figura E.1, em anexo, com maior detalhe, a configuração do banco de ensaios.

Suporte da célula de carga - Constituído por um bloco de madeira com 30 cm de comprimento, 5,5 cm de largura e 4,5 cm de altura, aparafusado à mesa através de dois parafusos M5. A altura do bloco foi definida através do nivelamento da célula e do motor, onde a célula será aparafusada tanto ao bloco como ao banco de ensaios (figura F.1 em anexo).

Suporte do sensor de Hall - Para fabricar este suporte foi utilizada uma pequena porção de uma chapa de aço, com 2 mm de espessura. Esta chapa foi depois cortada com a forma e dimensões pretendidas através do uso de uma rebarbadora. Feita uma dobra na chapa de 90°, com recurso ao torno e a um martelo, bem como um furo de 16mm de diâmetro, feito com recurso a um berbequim de coluna, onde passa o sensor. Para finalizar a peça, foi feito um furo M5 em rasgo, com 20 mm de comprimento, onde se fixa o suporte ao motor (figura D.1 em anexo).

Suporte do módulo de ignição - O suporte do módulo de ignição é composto por uma porção de tubo, que possui uma seção transversal quadrada de 5x5 cm, com 35 cm de comprimento. Foram realizados dois furos M4 nas extremidades do tubo, com o objetivo de fixá-lo, e um furo M6, perpendicular aos últimos, para fixar o módulo de ignição ao mesmo. Para finalizar a peça, foi feito um furo M14, na face oposta ao furo M6, para facilitar o processo de fixação do módulo.

5.2.3 Soldaduras realizadas

Nesta fase procedeu-se à fixação das secções de suporte do eixo da borboleta, da flange e do suporte do acelerador à conduta da admissão de ar, todas feitas em alumínio. Soldar alumínio é um processo bastante complicado e que requer extremo cuidado, tendo sido utilizado para este fim o processo de soldagem TIG. Necessário posteriormente utilizar uma lima/lixa de forma a remover o excesso de material nos pontos fixados por soldadura, e dar um melhor acabamento a nível estético. O banco de ensaios foi também completado com recurso a soldadura TIG. As

soldaduras realizadas, na peça relativa ao corpo do acelerador, encontram-se evidenciadas no anexo A.

5.3 Montagem e fixação de componentes

Neste subcapítulo a montagem dos diferentes componentes é descrita de forma pormenorizada e explícita, usando como suporte uma série de imagens extraídas do *software* CATIA onde os passos são numerados e apresentados graficamente nos anexos B, C, D e F. Nestas imagens encontram-se identificados os passos realizados, permitindo obter uma visualização espacial do que foi feito durante a montagem. É também feita uma descrição mais pormenorizada de como foi realizada a preparação dos sensores a serem utilizados.

5.3.1 Componentes da montagem experimental

Montagem e vistoria do motor - O motor disponibilizado para a componente experimental encontrava-se desmontado, requerendo por isso mesmo uma montagem minuciosa e rigorosa de todos os componentes, apesar da relativa simplicidade mecânica, para garantir um correto funcionamento do motor. Durante a montagem foi verificada a condição de cada um dos componentes, à procura de fraturas ou defeitos, tendo sido também aplicado vedante nas juntas de peças para impedir fugas de óleo. Foram inspecionados todos os parafusos, de forma a garantir que se encontram enroscados e apertados corretamente. Após a montagem do motor, procedeu-se às devidas preparações e inspeções propostas pelo manual de utilizador do GX31 que permitem garantir, com um grau de certeza aceitável, um funcionamento suave e correto do motor, respeitando também as medidas de segurança. Procedeu-se primeiramente à colocação, no cárter, de óleo específico para motores a 4 tempos, tendo-se enchido o tanque de óleo até à sua capacidade máxima (100ml). Posteriormente foi colocada, como combustível, gasolina sem chumbo de 95 octanas num tanque de combustível. Para bombear o combustível do tanque para o carburador, através de um tubo de conexão, a bomba diafragma, localizada no carburador, foi pressionada diversas vezes. Verificou-se o estado da vela de ignição e se não existiam fugas de óleo ou gasolina no motor. No procedimento de arranque do motor a entrada de ar no carburador foi parcialmente tapada, de forma a enriquecer a mistura e facilitar o arranque, e puxou-se a corda de forma repentina e repetida, até ao momento em que o motor pega. Após pegar e ajustar o ralenti, deixou-se o motor em funcionamento por alguns minutos de forma a garantir a lubrificação dos componentes móveis e verificar se existe alguma irregularidade de funcionamento ou fuga.

Corpo do acelerador e adaptador (anexo B) - A montagem da primeira parte, relativa ao corpo do acelerador, iniciou-se com a colocação do eixo da borboleta no interior do respetivo suporte, que posteriormente é fixado através da colocação de um freio (1) com um alicate de freios. A borboleta é colocada no eixo, através da colocação de dois parafusos M3 (2), de cabeça redonda com fenda cruzada e com 5 mm de comprimento, com recurso a uma chave Philips. Colocação

da mola, encaixando as extremidades da mesma no eixo da borboleta e no suporte do eixo, para que o eixo fique na posição pretendida (3). Fixação da placa do acelerador através de um parafuso M3 (4), com cabeça cilíndrica de sextavado interior e 10 mm de comprimento, colocado com recurso a uma chave sextavada. Para afinar a posição inicial da borboleta, foi colocado um parafuso M4, de cabeça sextavada com 25 mm de comprimento, no respetivo suporte (5). Colocado posteriormente o cabo do acelerador, fixando-o na placa e passando-o no orifício do suporte do cabo do acelerador (6).

Concluída a montagem da primeira parte procedeu-se à fixação da peça relativa ao adaptador para o injetor ao corpo do acelerador, através de um parafuso M5 (7), de cabeça sextavada com 25 mm de comprimento em conjunto com uma porca freada M5, e de um parafuso M5, com cabeça cilíndrica de sextavado interior com 15 mm de comprimento (8). Neste momento foi também colocado o estrangulador na seção da admissão de ar com recurso a um martelo de borracha (9). Todo o conjunto é depois fixado ao motor através de dois parafusos M5 de cabeça sextavada, com 35 mm de comprimento (10). Foi em seguida colocado o injetor, em conjunto com o *o-ring*, no orifício com 14,1 mm de diâmetro do adaptador (11), garantido que o encaixe é feito de forma correta. Estes componentes são depois fixados um ao outro através de uma anilha e de um parafuso M3 (12) Philips com 20 mm de comprimento, colocado com uma chave Philips. Para finalizar, o macho para o tubo, proveniente do sensor MAP, é colocado com recurso a um martelo de borracha, de forma a evitar a danificação da peça e garantir a sua fixação de forma estável (13). Importante referir que também foi colocado um filtro de ar no bocal da conduta de admissão de ar, de forma a prevenir a entrada de partículas para o interior do motor.

Sistema da hélice (anexo C) - Começa-se pela junção do suporte do eixo à placa de aço, através de 4 parafusos M3 (1), com cabeça em fenda simples e com 10 mm de comprimento, colocados com recurso a uma chave de fendas. De seguida o cubo da hélice, a base em alumínio do cone e o suporte do eixo, são unidos através de dois parafusos (2), com cabeça em fenda simples e com 40 mm de comprimento, colocados também com recurso a uma chave de fendas. É depois fixado o eixo da hélice, com recurso a duas porcas freadas para garantir que o mesmo se mantém devidamente instalado (3). O cone foi fixado à base de alumínio através de dois parafusos M2 (4), com cabeça redonda de fenda cruzada, com 5mm de comprimento, colocados com uma chave Philips. Depois de o cone ser integrado no sistema, todo o conjunto é fixado ao motor através de dois parafusos M8 (5), de cabeça hexagonal e com 25 mm de comprimento, integrados através do recurso a uma chave fixa. Após fixação da hélice ao motor, é necessário conferir se existe alguma folga e se tudo se encontra devidamente fixado, de forma a prevenir que a hélice durante o seu movimento de rotação danifique o motor e ponha em causa a segurança dos seus utilizadores.

Sensor de Hall (anexo D) - O sensor de Hall foi fixado ao suporte, especialmente concebido para o efeito, através de duas porcas M16 (1), já incluídas com o sensor. O suporte é depois

estabilizado e fixado ao motor, na posição pretendida, através de um parafuso M5 (2), de cabeça sextavada auto-brocante com fenda cruzada e com 20 mm de comprimento, e de uma porca M5 (3), fixados com recurso a uma chave Philips e uma chave estrela respetivamente. O sensor de Hall é colocado próximo do volante do motor, onde se encontra o magneto, através do adaptador feito em chapa, a cerca de 3 mm de distância do magneto, encontrando-se dentro dos valores aconselhados para este sensor e pelo manual da Ecotrons [30].

Sistema do acelerador - Este sistema é constituído basicamente por um cabo de aço, com cerca de 70 cm de comprimento, que passa no interior de um cabo bicha desviador. Este permite reduzir consideravelmente o atrito provocado pelo movimento do cabo de aço, e desta forma prevenir qualquer perturbação nos dados obtidos pela célula. São depois colocados dois serracabos nas extremidades, que permitem a fixação do cabo ao acelerador do sistema EFI e ao acelerador por patilha.

O acelerador por patilha possui um parafuso no topo que permite regular a resistência da patilha ao movimento, sendo necessário afiná-la para que a patilha se mantenha na posição pretendida. O sistema é aparafusado na mesa, na posição pretendida, com recurso a dois parafusos M5 para madeira, com cabeça redonda com fenda redonda, com 25 mm de comprimento, colocados com recurso a uma parafusadora.

Banco de ensaios (anexo E) - Inicia-se com a colocação das rótulas no varão de aço (1), que serão depois fixados ao banco com recurso a dois parafusos M8 de cabeça sextavada e com 50 mm de comprimento (2). O banco é fixado a uma mesa de madeira através de dois parafusos (3), para madeira, com cabeça redonda de fenda cruzada e com 25 mm de comprimento, colocados com recurso a uma parafusadora. Posteriormente, a fixação deste componente ao motor será feita com recurso a quatro parafusos M6, dois deles com cabeça redonda de sextavado interior com 35 mm de comprimento (4) e outros dois com cabeça sextavada auto-brocante de fenda cruzada com 25 mm de comprimento (5). Todos colocados com recurso a uma chave canhão com adaptador de sextavado interior e de chave estrela.

Célula de carga e suporte (anexo F) - Este componente será fixado ao banco de ensaios do motor, através de um parafuso M4 com cabeça sextavada e 45 mm de comprimento (1) e de uma porca freada M4 (2), e ao bloco de madeira, através de dois parafusos M5 para madeira com cabeça redonda de fenda simples e 40 mm de comprimento (3). Os parafusos M5 foram colocados com recurso a uma chave de fendas e o parafuso e porca freada M4 fixados com recurso a uma chave inglesa e uma chave canhão. Importante referir que a célula de carga foi colocada sensivelmente em linha com o centro de massa do conjunto, de forma a obter dados mais precisos. O bloco de madeira será fixado, também à mesa, através de dois parafusos M5 localizados nas extremidades (4), colocados com recurso a uma parafusadora. Tratam-se de parafusos para madeira com rosca completa e com cabeça escareada de fenda cruzada, cada um com 65 mm de comprimento.

Suporte do módulo de ignição - O segmento do tubo utilizado foi fixado à mesa de madeira através de dois parafusos M4, de rosca parcial, para madeira, com cabeça redonda de fenda cruzada e com 65 mm de comprimento. Estes dois parafusos foram colocados com recurso a uma parafusadora. O módulo de ignição foi fixado ao suporte através de um conjunto de porca e parafuso M8, de cabeça cilíndrica e sextavado interno, com 30 mm de comprimento. A montagem destas peças foi feita com recurso a uma chave estrela e uma chave canhão com adaptador de sextavado interior.

Bobina - A bobina foi fixada à base da mesa através de dois parafusos para madeira, colocados em dois orifícios já existentes no suporte original deste componente. Estes dois parafusos utilizados são M5, com rosca completa e cabeça escareada de fenda cruzada, e possuem 45 mm de comprimento.

5.3.2 Sensores do sistema

Célula de carga

Com o objetivo de obter um método para medir o binário produzido pelo motor, foi introduzido na montagem experimental um sistema composto por uma célula de carga em conjunto com uma placa Arduino Nano e um módulo ADC HX711 (conversor analógico-digital), que funciona como amplificador do sinal. A célula de carga utilizada, de dupla flexão, opera como um transdutor, captando a intensidade da força a que é sujeita e convertendo-a num sinal elétrico diretamente proporcional, devido à existência de resistências variáveis com a deformação. Esta força deforma os quatro medidores de tensão, que se encontram numa configuração em ponte de Wheatstone e que medem a deformação através de uma variação da resistência elétrica. Este sinal elétrico é depois enviado para um microprocessador que vai ler o sinal, e posteriormente obter uma leitura da massa registada. O sinal de saída, na ordem de apenas alguns milivolts, é posteriormente amplificado pelo módulo ADC e transmitido para a placa Arduino.

A célula utilizada, e que melhor cumpre os objetivos propostos, tem capacidade para efetuar medições de massas de até 5 kg e possui 4 fios (preto, branco, vermelho e verde) de saída, sendo compatível com o amplificador da célula de carga disponibilizado que necessita de um *input* de 4 fios [32]. Os 4 fios provenientes da célula de carga representam o positivo e negativo da alimentação, o sinal positivo e o sinal negativo, sendo necessário utilizar um multímetro para identificar cada um destes elementos, já que não existe uniformidade entre os diferentes fabricantes na identificação do elemento através da cor do fio. Os dois fios com a maior resistência são o “E+” e o “E-“, e os restantes dois fios com menor resistência serão o “A+” e o “A-“, sendo necessário trocá-los de posição até o valor da leitura ser positivo. Procedeu-se depois ao estabelecimento das ligações entre o módulo ADC e a placa Arduino Nano. De acordo com instruções providenciadas foram feitas as seguintes ligações, também representadas na

figura 5.4. As ligações efetuadas entre os pinos do ADC e da placa Arduino, respetivamente, são: GND - GND; DT - D3; SCK - D2; VCC - 5V. Foi utilizado um alicate de cravar, nos terminais dos cabos que estabelecem as ligações, e posteriormente colocadas fichas, de formar a simplificar a montagem dos circuitos, e foram colocadas mangas termo-retráteis a cobrir as ligações e resistências, para evitar curtos-circuitos e maus contactos.

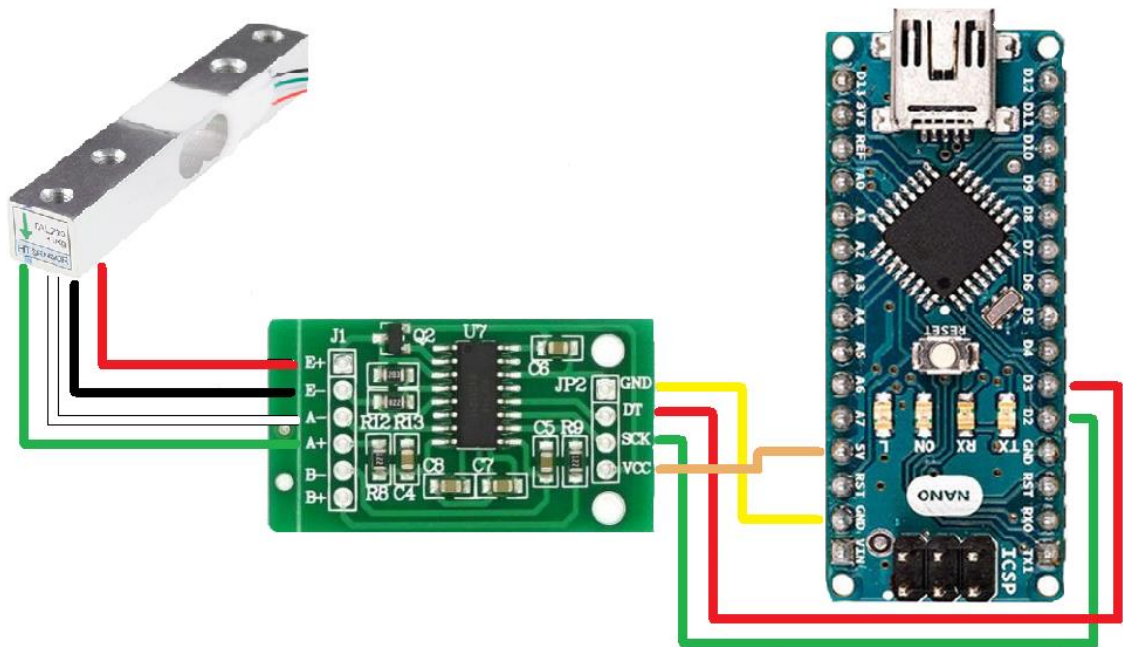


Figura 5.4: Esquematisação, concebida e adaptada no Microsoft Paint, da totalidade das ligações estabelecidas para a célula de carga [33] [34] [35].

Antes de estabelecer a ligação entre a placa Arduino Nano e o computador, através um cabo USB/Mini USB, é necessário instalar a última versão do *software* fornecido pela Arduino, tratando-se da 1.8.3. São depois conferidos alguns parâmetros do programa na secção “*Tools*”, tais como “*Board: “Arduino Nano”*” e “*Processor: “ATmega328”*”, que garantem o correto funcionamento da célula. É verificado, também na secção “*Tools*”, que a porta USB utilizada é a mesma seleccionada em “*Port*”. Foram depois criados dois códigos, um para calibrar a célula e outro para a obtenção de dados, com base em códigos já existentes, que foram ligeiramente alterados [36]. Iniciou-se pela introdução, no *software* Arduino, do código “*calibration*” (anexo G), programado numa linguagem C/C++, que permite obter uma leitura intervalada do peso em kg e calibrar a célula de acordo com a alteração de um fator de calibração, tendo sido usado um peso de 0,5 kg neste processo. O fator de calibração é alterado em tempo real, até que a massa medida pela célula seja igual à do peso utilizado. Por fim um outro código foi compilado “*final-sketch*” (anexo H), permitindo obter também leituras, intervaladas no tempo, da massa registada pela célula, introduzindo-se no código o fator de calibração obtido anteriormente. O passo utilizado na recolha de dados, por parte da célula de carga, foi de 250 ms. Cada um dos

códigos é compilado e na secção “Tools” é selecionada a ferramenta “Serial Monitor”, que permite visualizar numa tabela os dados que estão a ser obtidos.

É instalada uma extensão para o Microsoft Excel, designada por PLX-DAQ (*Parallax Data Acquisition Tool*), que permite extrair diretamente as medições efetuadas, pela célula, para uma folha Excel. A estimativa do erro aleatório da leitura realizada pela célula de carga é de cerca de ± 10 gramas, valor considerado aceitável para o fim proposto.

Sensor de velocidade do motor

Foi usado um sensor de Hall, que varia a sua tensão de saída quando exposto a um campo magnético e cujo funcionamento se baseia no efeito de Hall, atuando como um interruptor. Este efeito ocorre num condutor que é atravessado por uma corrente elétrica e submetido a um campo magnético. O campo magnético, por aplicação da força de Lorentz, irá provocar um desvio dos eletrões portadores da carga, onde um plano do condutor fica carregado negativamente e o lado oposto carregado positivamente, e dar origem à tensão de Hall.

O sensor selecionado é um Haltech S3, semelhante ao utilizado no *kit* da Ecotrons, que cumpre com os requisitos propostos. O sensor foi colocado próximo do volante do motor através de uma chapa metálica adaptada e aparafusada ao motor, tendo sido a distância definida, entre o magneto e o sensor de Hall, de 3mm, usando como referência o intervalo de valores recomendado pela Ecotrons [3-5mm] para este tipo de sensor [30]. Proveniente do sensor de Hall, existem 4 fios que representam a massa (fio azul), a alimentação (fio vermelho), o sinal (fio amarelo) e o “home” (fio verde) [27]. Destes 4 fios, apenas 3 destes foram utilizados nas ligações, tendo-se excluído o “home” por ser dispensável ao funcionamento do sensor. As ligações foram efetuadas como se encontra ilustrado no anexo I.

Sensor de temperatura do ar na admissão e no motor

Para este fim são utilizados os termístores, que se tratam basicamente de dispositivos elétricos cuja resistência elétrica se encontra dependente da temperatura, servindo como um dispositivo de controlo. Os termístores usados são do tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*) onde a resistência elétrica, com o aumento da temperatura, diminui, tratando-se de sensores de alta precisão e ótima repetibilidade de leitura. São constituídos por uma pequena quantidade de pasta semicondutora, revestida por epóxi, sobre 2 fios de platina, onde um representa o positivo e outro o sinal de tensão ou corrente. Como os termístores apresentam uma variação de resistência elétrica para mudança de temperatura e os conversores ADC leem sinais de tensão elétrica, é necessário implementar um circuito em ponte de Wheatstone, onde o sensor é um dos 4 componentes da ponte, para realizar esta conversão. As especificações do modelo utilizado encontram-se na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Especificações dos termístores utilizados [37].

Especificações	Unidade	
Tipo de sensor	NTC	-
Resistência	100	kOhm
Potência	3.5	mW
Dimensões	Ø3x4	mm
Temperatura de funcionamento	[-55,125]	°C

A cada um dos termístores foram soldados dois fios, um a cada um dos terminais de platina, e colocadas mangas termo-retráteis, de forma a prevenir curtos circuitos. Na extremidade do termístor, referente ao que fornece a temperatura do motor, foi colocado um terminal elétrico. Este terminal elétrico será colocado sob a cabeça de um parafuso que se encontra próximo da cabeça do motor. A extremidade do termístor da temperatura na admissão é colocada no interior do filtro de ar, e a este fixado com cola quente. O sensor de temperatura do motor foi colocado o mais próximo possível da cabeça do motor, porém não foi possível colocar o mesmo num local onde estive privado do fluxo de ar proveniente do movimento da hélice, o que pode ter interferido um pouco nos dados registados. Referente ao termístor da temperatura do ar de admissão, os dois fios foram conectados de acordo com o estipulado no anexo I, onde um dos fios é conectado ao “*Ground sensor*” e o restante ao “*Air Temp*”. O termístor da temperatura do motor é conectado ao “*CLT Temp*” e também ao “*Ground Sensor*”, sendo indiferente qual dos dois fios escolhidos na conexão por se tratar basicamente de uma resistência.

Depois de montados é necessário calibrá-los através do TunerStudio MS, onde o projeto do motor é aberto, seleciona-se “*Tools*” e posteriormente “*Calibrate Thermistor Tables*”. Nesta fase o programa pede 3 pontos de calibração, ou seja, 3 temperaturas para 3 resistências obtidas pelo termístor. Para obter estes 3 pontos foi utilizado um banho termostático, um multímetro e umas garras. O multímetro foi ligado ao termístor pelas garras, e o termístor colocado posteriormente no banho termostático a 3 temperaturas diferentes, de 26, 51 e 96 graus *Celsius*. No momento de obtenção das temperaturas estabelecidas é anotada a resistência obtida pelo multímetro (tabela 5.2).

Tabela 5.2: Valores de temperatura utilizados para a calibração.

Temperatura [C°]	Resistência [kOhms]
26	93,7
51	34,6
96	7,4

Após inserir os valores acima apresentados, é ainda necessário introduzir um valor no campo “*Bias Resistor Value*”, que toma o valor de 2490 ohms. Esta trata-se do valor *standard* dos resistores *bias* nos controladores EFI da MegaSquirt. O resistor *bias* é usado nos sensores,

atuando em apenas um sensor de cada vez em determinado momento, que possuem uma resposta de variação na resistência. Definidos todos estes parâmetros, é selecionada a opção “*Write to Controller*”, responsável por compilar os dados na centralina e proceder à devida calibração do sensor. O processo anterior é repetido para ambos os termístores, como se encontra apresentado na figura 5.5.

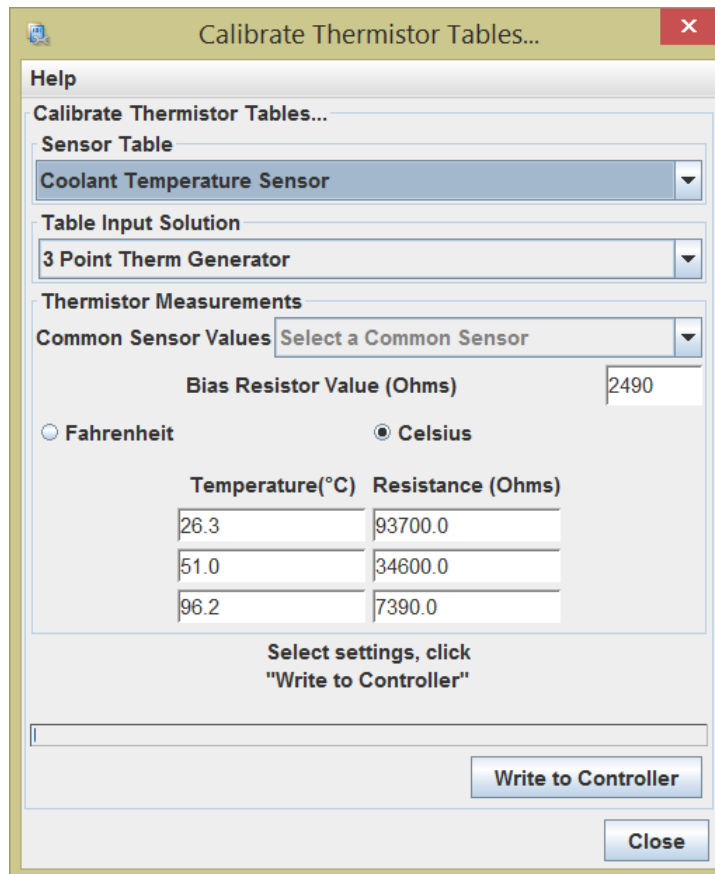


Figura 5.5: Exemplo da calibração do termístor referente à temperatura do motor, no *software TunerStudio MS*.

6. Procedimento Experimental

Cada uma das 3 configurações do motor, testadas, envolveram toda uma montagem experimental específica, com a utilização de diferentes sensores, atuadores e procedimentos. Porque esse motivo não foi possível generalizar o método experimental para todas as configurações, sendo necessário dedicar especial atenção a cada um dos mesmos. Descrito de forma breve, esclarecedora e pormenorizada, todo o procedimento experimental é apresentado em seguida, individualizando para cada caso em específico.

6.1 Configuração com carburador

O procedimento experimental envolvido nesta configuração é relativamente simples, já que requer apenas a utilização de um número reduzido de elementos, porém solicita um trabalho sincronizado entre duas pessoas para limitar os erros a valores aceitáveis. Foram feitos quatro testes, cada um com 11 ensaios para diferentes velocidades do motor. Os ensaios foram realizados considerando um intervalo entre as 3000 e as 5800 rpm, com um incremento de 300 rpm à exceção do último ensaio (100 rpm). As 3000 rpm foram escolhidas como ponto de partida por se tratar do ponto de ralenti que oferecia maior estabilidade de funcionamento e níveis de vibração aceitáveis, de forma a obter dados coerentes na célula de carga. O limite superior do intervalo foi definido pela velocidade máxima alcançável pelo motor, para a carga em questão. Para cada um destes ensaios, o consumo de combustível, em g/min, e a força aplicada na célula de carga, que permite obter o binário produzido em N.m, foram medidos e quantificados. A montagem experimental inclui apenas, como sensores, o sensor de Hall e a célula de carga, requerendo também a utilização de um computador com os *softwares* TunerStudio MS, Arduino 1.8.3 e extensão PLX-DAQ *Spreadsheet* para o Excel. Foram também estabelecidas as ligações elétricas específicas associadas a estes componentes. Nesta fase não são utilizados quaisquer tipos de atuadores, sendo em seguida descritos todos os passos que antecedem o procedimento experimental.

6.1.1 Sensores e componentes periféricos

Montagem da rede de distribuição de combustível

Através da utilização de uma torneira de 3 vias e do recurso a 3 tubos plásticos, estabeleceu-se uma rede de fornecimento de combustível entre o motor, o tanque de combustível e a pipeta graduada. A pipeta foi fixada a um suporte em madeira e os tubos plásticos, com 7 mm de diâmetro interior, conectados ao motor e tanque com recurso a braçadeiras. A manipulação da torneira permite seleccionar as conexões que se pretendem estabelecer. Neste sistema o tanque de combustível alimenta o motor aquando do seu arranque inicial e a pipeta graduada é

utilizada para medir o consumo de combustível, durante determinado intervalo de tempo. Após estabelecer a rede de fornecimento, foi introduzido combustível e certificou-se que todas as bolhas de ar eram extraídas do sistema, de forma a evitar um funcionamento irregular do motor e a minimizar os erros das medições realizadas. O sistema foi estabelecido de acordo com o representado na fig. 6.1. As ligações estabelecidas dependem da posição da torneira, encontrando-se abertas as vias alinhadas com os ponteiros cor de laranja.

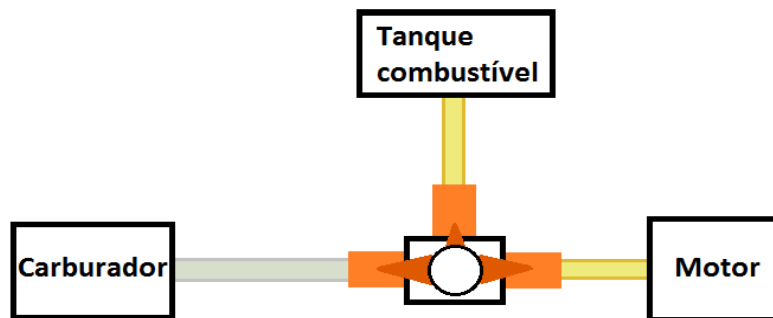


Figura 6.1: Esquema, concebido no Microsoft Paint, exemplificativo do sistema de fornecimento de combustível.

Conectar a centralina e sensor de Hall à fonte de alimentação

Do sensor de Hall são provenientes 4 fios distintos (vermelho, azul, amarelo e verde), sendo que apenas 3 deles serão conectados ao sistema. O fio vermelho é conectado, por um borne, ao fio rosa, que será ligado aos 12 V positivos. O fio azul e o amarelo serão conectados diretamente à centralina. O fio verde, correspondente ao “home”, não é conectado [27]. Para simplificar a conexão dos fios correspondentes à massa, conjunto de fios pretos provenientes da centralina, foi utilizada uma barra de conexão com 4 bornes e pequenos segmentos de fios de forma a estabelecer pontes, ou seja, possuindo apenas um fio na ligação com os 12 volts negativos. O fio vermelho, identificado como “5V”, foi ligado, em conjunto com o fio rosa proveniente do sensor, aos 12 Volt positivos. Todas estas ligações são feitas de acordo com o representado na figura 6.2.

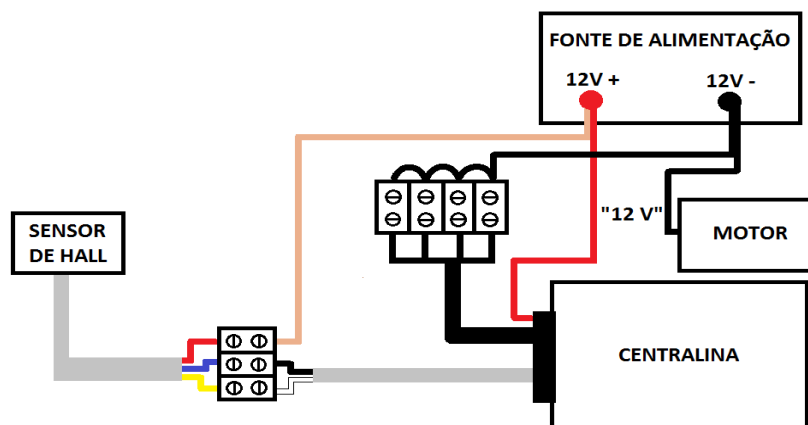


Figura 6.2: Esquema, concebido no Microsoft Paint, das ligações elétricas estabelecidas.

Ligação da centralina e calibração da célula de carga

A célula de carga, já montada na estrutura, é conectada ao computador via cabo USB, com o *software* Arduino já aberto. É iniciado o código referente à calibração da célula, onde o peso é tarado e a célula calibrada usando um peso de 0,5 kg, colocado sob o ponto de contacto entre a célula de carga e o banco de ensaios. O coeficiente de calibração obtido é depois introduzido no programa final, que é nesse momento iniciado para obtenção dos dados pretendidos. No decorrer dos ensaios, mais especificamente a cada 4 ensaios, são realizadas novas inspeções com o peso de 0,5 kg, de forma a garantir que a célula se mantém calibrada. A centralina é também conectada ao computador, através de um adaptador para a porta USB, para dar a conhecer a velocidade do motor.

Colocação de combustível na pipeta graduada

Após conferir que todos os componentes se encontram bem montados e a funcionar corretamente, procedeu-se à colocação de combustível numa garrafa de esguicho, que fornece uma bureta graduada. É depois colocado, através deste sistema, combustível na pipeta graduada até ao nível pretendido, definido como a marca dos 34 ml.

Preparação dos *softwares* de aquisição de dados

Foram iniciados no computador o código final no Arduino e a extensão do Arduino para o Excel, que foi definido para uma aquisição de dados com um passo de 250 milissegundos, bem como o TunerStudio MS, que permite a ativação da centralina.

Ligar a fonte de alimentação e ativar a célula de carga

Após verificar que os *softwares* se encontram em pleno estado de funcionamento, a fonte de alimentação foi ligada, de forma a alimentar todo o sistema elétrico e colocá-lo “*online*”. No TunerStudio MS é iniciado um novo projeto, onde são introduzidos os parâmetros básicos do motor, tais como o número de cilindros, a cilindrada, o ciclo de funcionamento, e verificado se o sensor de Hall se encontra em funcionamento. Nesta fase apenas o indicador relativo à velocidade do motor, em rpm, é de interesse.

6.1.2 Procedimento experimental

Após completada toda a montagem experimental (anexo L, fig. L.1), foram iniciados todo um conjunto de passos, realizados de forma sequencial. A descrição de cada um destes passos experimentais é feita em seguida, de forma suscita, e um fluxograma (fig. 6.3) desenvolvido, que permite ter uma noção mais abrangente de todo o processo e da respetiva ordem dos passos realizados.

1º Passo - Ativar a recolha de dados por parte da célula de carga

A célula de carga, que neste momento já se encontra conectada ao computador, é ativada através da abertura e compilação do código “*final_sketch*”, no Arduino. É depois aberta a extensão PLX-DAQ e iniciada a recolha de dados, seleccionando-se a opção “*Connect*”. A célula de carga é ativada cerca de 10 segundos antes do momento de arranque do motor.

2º Passo - Proceder ao arranque do motor

Com recurso a um berbequim, ao qual é fixado o adaptador de arranque por encosto, é feito o arranque do motor, certificando-se que a torneira mantém a ligação apenas entre o tanque e o motor. Este procedimento é feito com extremo cuidado, aplicando-se uma força relativamente baixa no encosto, para evitar qualquer tipo de incidente grave.

3º Passo - Implementar a velocidade do motor pretendida

Com recurso à manipulação manualmente do acelerador e à visualização do leitor das rpm, que se encontra no *software* TunerStudio MS, o motor foi estabilizado à velocidade pretendida. Apesar de ligeiras oscilações do indicador das rpm, a velocidade do motor é mantida praticamente constante durante o intervalo de tempo desejado.

4º Passo - Registrar tempo de consumo e força exercida pelo motor

Manipulação da torneira, que provoca a mudança no fornecimento de combustível do motor para a pipeta graduada. Neste mesmo instante, um cronómetro é acionado para registar o tempo necessário para que o nível de combustível na pipeta desça 3 ml. Foi este o valor adotado, com o objetivo de minimizar os erros das medições. Esta fase requereu a intervenção de dois elementos, um para registar o tempo e outro para manipular a torneira, que realizaram a tarefa da forma mais sincronizada possível.

5º Passo - Desligar o motor e desconectar a célula de carga

Após esta fase o motor é desligado, com recurso a uma chave de fendas que provoca o descarregamento elétrico da bobina de ignição, por provocar o contacto com a massa, e a célula de carga desconectada, através da opção “*Disconnect*” em “*Data Acquisition for Excel*”.

6º Passo - Determinar o consumo e repor o nível de combustível na pipeta

O sistema da bureta graduada e garrafa de esguicho, que ainda possui combustível, é pesado, numa balança digital, e tarado. É depois repostado na pipeta graduada o nível de combustível existente no início do ensaio. O sistema é pesado novamente na balança digital, dando a conhecer o consumo de combustível em gramas.

7º Passo - Repetir todo o procedimento para a próxima velocidade do motor definida

Os passos anteriormente descritos são repetidos para cada uma das velocidades do motor definidas. Ao todo foram realizados 4 testes, que englobam todas as velocidades do motor que se pretenderam testar, num total de 44 ensaios. Por vezes foi necessário reabastecer o tanque de combustível e o sistema da bureta e garrafa de esguicho.

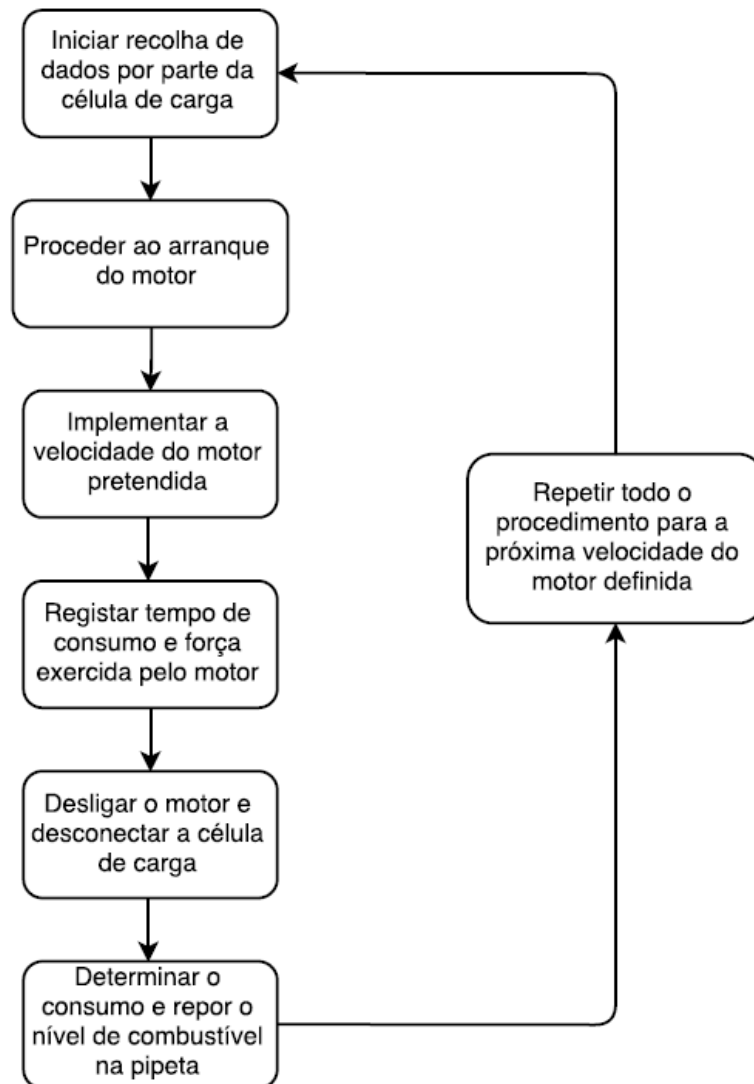


Figura 6.3: Fluxograma referente ao procedimento experimental da configuração com carburador.

6.2 Configuração com injeção eletrónica

Devido à complexidade da componente prática associada à adaptação de um sistema de injeção eletrónica para um motor monocilíndrico, a descrição do processo experimental e metodologia

acabam por ser um pouco mais extensas. Em seguida são descritos todos os passos e etapas que antecedem o procedimento experimental associado aos testes com injeção eletrônica.

6.2.1 Sensores e componentes periféricos

Devido ao elevado número de ligações efetuadas nesta montagem experimental, a explicação das conexões estabelecidas será realizada por etapas, e individualizada para cada um dos diferentes componentes. Foi possível obter uma ficha de 37 pinos, compatível com a centralina e já com todos os respetivos fios identificados. Este componente foi montado com base no diagrama fornecido pelo fabricante (anexo K), que também serve como suporte para as ligações dos diversos componentes ao sistema. As ligações em seguida descritas, são introduzidas com base no esquema do anexo I.

Ligações Efetuadas

1-Sensor de Hall - À semelhança do que se observou na montagem experimental para os ensaios com carburador, do sensor de Hall são provenientes 4 fios distintos (vermelho, azul, amarelo e verde). O fio vermelho é conectado, por um borne, ao fio rosado, que será ligado aos 12 V positivos e os fios azul e amarelo serão conectados, também através de bornes, aos fios preto e branco respetivamente, ambos provenientes da centralina. O fio verde, correspondente ao “*home*”, não é conectado.

2-Termistor da temperatura do motor e do ar admitido - Os dois fios provenientes de cada um destes sensores (vermelho e amarelo) são conectados, por meio de bornes, ao “*Sensor Ground*”, através de uma barra de conexão com 2 bornes e de uma ponte, e aos respetivos fios identificados e dedicados a cada um dos sensores. O termistor da temperatura do motor será o que possui uma ligação com o “*CLT Temp*”, e o termistor da temperatura do ar admitido uma ligação com o “*Air temp*”.

3-Bomba de combustível - A bomba de combustível, de onde são provenientes dois fios (laranja e preto), é conectada à alimentação (12 V positivos), pelo fio laranja, e à centralina, pelo fio preto “*Fuel Pump*”. Ambos os fios são conectados, à ficha existente na bomba, através da colocação de terminais na extremidade dos mesmos.

4-Injetor - Este componente, da qual é proveniente um fio vermelho e outro azul, é conectado ao fio branco “*Inject A*”, através do fio azul e da utilização de um borne, e é alimentado através da ligação ao fio azul. Será o fio branco “*Inject A*”, proveniente da centralina, responsável por controlar o intervalo de tempo durante a qual o injetor abre e o momento em que este abre, seguindo os comandos definidos.

5-Sensor MAP - Este sensor, que já se encontra no interior da centralina, é conectado ao macho do tubo, localizado na parte relativa à conduta de admissão de ar. A ligação entre estes dois componentes é estabelecida através de um tubo de plástico com 4 mm de diâmetro interior.

Novamente para simplificar as ligações estabelecidas, e consequentemente todo o circuito, foi utilizada uma barra de conexão com 5 bornes, em que são estabelecidas diversas pontes até se obter apenas um fio de ligação aos 12 V negativos da bateria. O mesmo foi feito com a “alimentação” de grande parte do sistema, onde todos os fios com este propósito foram conectados a uma barra de conexão com 3 bornes. Desta barra de conexão, através da implementação de pontes entre os bornes, sai apenas um fio azul, que é conectado aos 12 V positivos da bateria.

Sistema de fornecimento de combustível

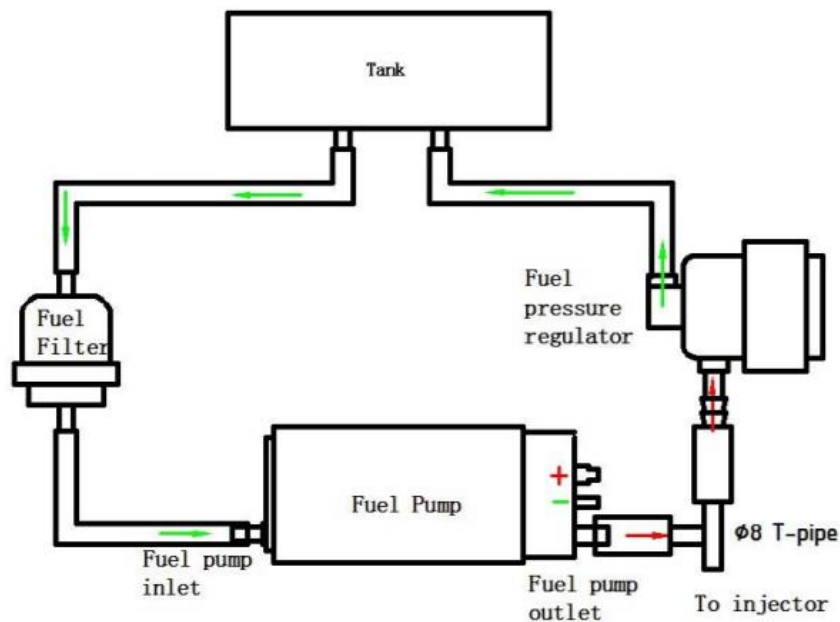


Figura 6.4: Esquematização da montagem do sistema de fornecimento de combustível [29].

Este sistema é composto por diversos componentes, tais como um tanque de combustível, uma bomba de combustível, um regulador de pressão, um filtro de combustível, diversos segmentos de tubo especialmente concebidos para gasolina, e uma união em forma de “Y” para mangueira. Num tanque vertical de combustível é conectado um tubo na base inferior, que conduz o combustível até ao filtro de combustível. Como o próprio nome do componente indica, neste ponto o combustível é isento de qualquer tipo de partículas de sujidade, seguindo para a bomba de combustível. A função da bomba será a de fornecer, com a pressão desejada e necessária, combustível ao injetor. O combustível sob pressão, proveniente da bomba, é direcionado para uma união em “Y”, que estabelece uma distribuição do combustível para o injetor e para o regulador de pressão do combustível. O regulador de pressão só permite a passagem de

combustível, direcionado para o topo do tanque através de um tubo, se a pressão do mesmo for superior a 3 bar, funcionando como “retorno” do excedente de combustível. São utilizadas braçadeiras metálicas para garantir a fixação dos tubos, devido à elevada pressão induzida pela bomba. Após completada toda a montagem deste sistema, o combustível é introduzido e todo o ar extraído, para permitir o correto funcionamento da bomba de combustível. A montagem é semelhante à apresentada na figura 6.4, com exceção da união em “T”.

Configuração do *software*

Após estabelecimento das ligações elétricas, do sistema de fornecimento de combustível e do corpo do acelerador em conjunto com o injetor, a centralina é conectada ao computador, via USB. No *software* TunerStudio MS, na opção “*Basic/Load Settings*” > “*Engine and Sequential Settings*” são inseridos os parâmetros básicos do motor, tais como o algoritmo de controlo, o ciclo de funcionamento, o tipo de motor e o combustível requerido.

O combustível requerido trata-se do parâmetro que dá a conhecer ao sistema a capacidade do injetor e a cilindrada do motor. O “*Required Fuel*”, dado em ms, representa o intervalo de tempo em que o injetor se deve encontrar aberto para obter a quantidade estequiométrica de combustível num ciclo, considerando uma eficiência volumétrica de 100%, a uma pressão absoluta na admissão de 100 kPa e a uma temperatura de 21 graus *Celsius*. De forma a conhecer o fluxo de combustível debitado pelo injetor, este foi conectado diretamente à bateria e posto a injetar combustível, de forma ininterrupta, para o interior de um recipiente de plástico, num intervalo de tempo cronometrado. O recipiente com o combustível é depois colocado numa balança, previamente tarada, e pesado, onde em conjunto com o tempo registado permite confirmar a capacidade do injetor (109 cc/min).

6.2.2 Procedimento experimental

Os primeiros testes foram realizados tendo em vista a adoção da tabela VE gerada pelo programa TunerStudio MS, através de dados técnicos do motor. A velocidade máxima do motor foi definida nas 8500 rpm, valor inferior às 10000 rpm teoricamente obtidas sem carga, por ser desnecessário explorar velocidades do motor que nunca serão alcançáveis com carga. Inicia-se em seguida com os seguintes passos experimentais (ver Fig. 6.5):

1º Passo - Ativar a recolha de dados por parte da célula de carga e iniciar o TunerStudio MS

A célula de carga é ativada através da abertura e compilação do código “*final_sketch*”. É depois aberta a extensão PLX-DAQ e iniciada a recolha de dados, selecionando-se a opção “*Connect*”. O TunerStudio MS é iniciado, e o projeto criado para o motor selecionado. Neste *software*, na opção “*Data Logging*” > “*Start Logging*”, é iniciada a recolha de dados por parte do MegaLogViewer.

2º Passo - Proceder ao arranque do motor

Com recurso a um berbequim, ao qual é fixado o adaptador de arranque por encosto, procede-se ao arranque do motor. O motor é deixado a funcionar até atingir uma temperatura de cerca de 50 graus celsius, onde deixa de existir enriquecimento da mistura para o arranque a frio, para não influenciar os dados obtidos a nível do consumo de combustível.

3º Passo - Implementar a velocidade do motor pretendida

Com recurso ao acelerador por cabo e à visualização do leitor das rpm, que se encontra no *software* TunerStudio MS, o motor é estabilizado à velocidade pretendida. Tenta-se manter a velocidade do motor praticamente constante durante o intervalo de tempo desejado (cerca de 15 segundos).

4º Passo - Desligar o motor, desconectar a célula de carga e por fim à recolha de dados

Nesta fase o motor é desligado, desconectando-se os cabos ligados ao positivo da bateria, e a célula de carga desconectada, através da opção “Disconnect” em “Data Acquisition for Excel”. Na opção “Data Logging” > “Stop” é posto um fim à recolha de dados.

5º Passo - Repetir todo o procedimento para a próxima velocidade do motor definida

Após obtenção dos dados pretendidos os passos 1,2,3,4 e 5 são repetidos 4 vezes, para cada uma das velocidades do motor, definidas dentro do intervalo de estudo pretendido. Novamente são realizados 44 ensaios, onde em 2 dos 4 ensaios realizados para cada velocidade são recolhidos dados com o MegaLogViewer.

Depois de concluída esta primeira fase, e após análise dos gráficos do carburador e do EFI com a tabela VE gerada, foram realizados ensaios que envolvem alterações na tabela VE gerada. Esta foi manipulada de modo a obterem-se 3 tabelas, onde uma produz binário semelhante à da configuração com carburador, outra um binário superior e outra otimizada para um plano de voo. O procedimento experimental é semelhante para cada uma das tabelas, possuindo em comum todos os passos do procedimento realizado com a tabela VE gerada. A grande diferença reside na introdução de um passo, entre o 3º e 4º passo. Este envolveu a manipulação da tabela VE após a estabilização do motor em determinada velocidade, onde o ponto de funcionamento do motor é acompanhado ao longo da tabela VE. Procedeu-se à diminuição ou aumento da eficiência volumétrica nesse ponto, registando ao mesmo tempo as leituras obtidas pela célula de carga. Estas leituras terão que se encontrar, com determinada precisão, dentro do pretendido. No caso da tabela VE de binário superior ao do carburador e da tabela VE otimizada para um plano de voo, a manipulação da eficiência volumétrica é levada ao limite tendo em conta o comportamento do motor e o pretendido, quer a nível de ruído que a nível de vibração.

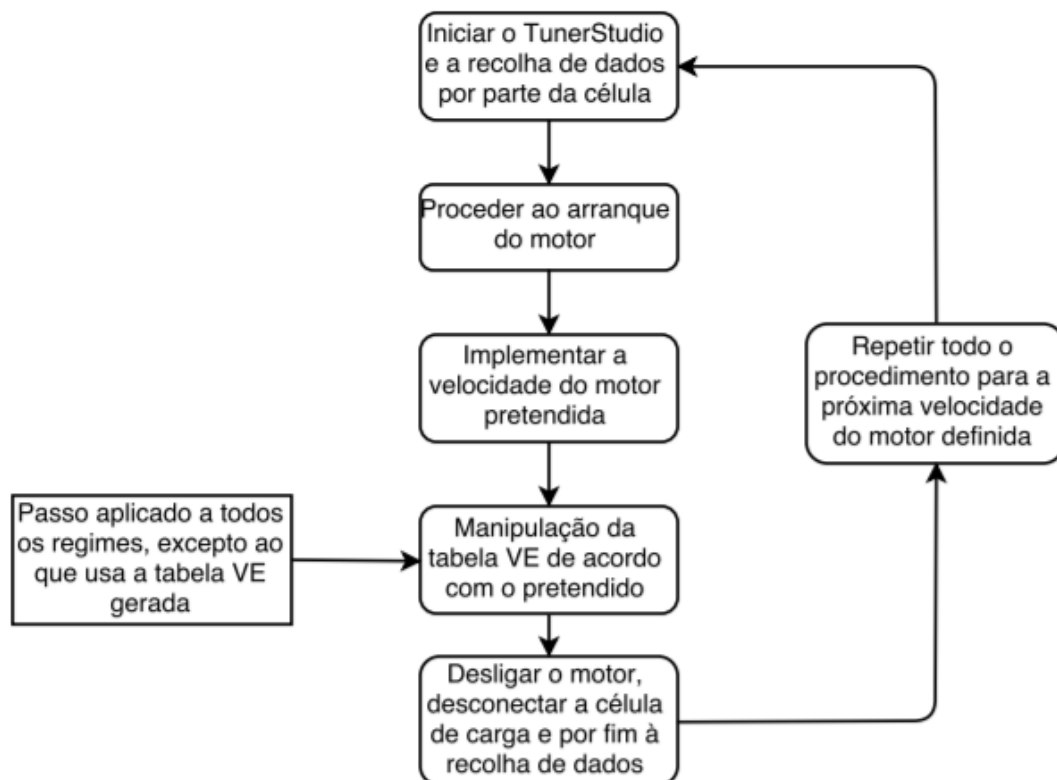


Figura 6.5: Fluxograma referente ao procedimento experimental da configuração com injeção eletrónica.

6.3 Configuração com injeção e ignição eletrónica

Trata-se da fase mais delicada e complexa de todos os procedimentos experimentais aplicados, devido ao risco envolvido na transição da ignição de origem para a ignição comandada. Antes de se poder iniciar o procedimento experimental propriamente dito, é necessário efetuar as ligações elétricas para incorporar o sistema de ignição e posteriormente proceder à sua afinação. Todos estes procedimentos são em seguida descritos nos próximos tópicos.

6.3.1 Sensores e componentes periféricos

Ligações Efetuadas

As ligações implementadas nesta fase trataram-se de uma adição feita ao esquema anteriormente referido, para a configuração de injeção eletrónica. As ligações adicionadas têm como objetivo incorporar o sistema de ignição comandada na montagem, ou seja, a bobina, a vela e o módulo de ignição (visualizar anexo J).

1-Vela de ignição e bobina - A vela de ignição e a bobina encontram-se conectadas através do cabo laranja, com revestimento especial para suportar as elevadas descargas elétricas provenientes da bobina. Já a bobina vai estar ligada à alimentação, através do fio de cor

vermelha conectado ao pino 1, e ao módulo de ignição, através do fio de cor azul conectado ao pino 2. Será esta ligação com o módulo de ignição que controla o regime de funcionamento da bobina.

2-Módulo de ignição - Este componente possui 5 fios de saída, das quais dois (verde e preto) são ligados à massa ou terra do sistema. O fio azul estabelece a ligação do módulo à bobina de ignição. Para alimentar o módulo de ignição, o mesmo é ligado à alimentação do sistema através do fio vermelho. O fio verde, ligado ao laranja “*Spark*” proveniente da centralina, estabelece o controlo eletrónico da ignição. Todos estes fios são conectados ao módulo com recurso a uma ficha apropriada de 7 pinos.

No menu, do *software* TunerStudio MS, correspondente às definições da ignição “*Ignition Settings*” é selecionado o campo referente às opções “*Ignition Options/Wheel Decoder*”. Grande parte dos parâmetros são mantidos constantes, adotando a opção “*Basic trigger*” que é a mais apropriada para a localização do sensor de Hall e do íman. Inicialmente o ângulo de avanço à ignição é definido como constante, adotando o valor de fábrica, para ser possível realizar a calibração.

Calibração da ignição comandada

Foi necessário primeiramente conhecer-se o ângulo de avanço à ignição de origem do motor, e consequentemente o adotado em todos os ensaios anteriores, que se verificou tratarem-se de 27 graus antes do ponto morto superior [38]. Posteriormente todo o sistema, com as ligações já estabelecidas, foi testado de forma a verificar se a vela de ignição produzia faísca. Para tal, de forma a ser possível visualizar este fenómeno e a não comprometer o estado do motor, a vela de ignição foi fixada no exterior do motor, mais especificamente ao bloco do motor, com recurso a um alicate de pressão. Nesta fase o sistema de ignição por magneto ainda se encontra instalado no motor, e o motor é posto a funcionar. Sendo visível que a vela de ignição se encontra a funcionar corretamente, cessa-se o funcionamento do motor. Procedeu-se então à fixação do sensor de Hall o mais próximo possível da bobina de ignição por magneto e à instalação de um osciloscópio de resolução flexível PicoScope® 5000 Series no sistema de forma a sincronizar o pico de tensão, corresponde à descarga elétrica para obtenção de faísca, da ignição por magneto com o da ignição comandada e garantir que o avanço de ignição do sistema eletrónico iguala o valor de fábrica (27 graus). São usados dois canais, “*A*” e “*B*”, conectados aos cabos provenientes de cada uma das duas bobinas, e as massas ligadas ao bloco do motor. Esta sincronização é feita com recurso à manipulação do “*Ignition Offset Angle*”, ângulo em graus de rotação da cambota que define o descompasso existente entre a ignição original e a eletrónica, até que o desfasamento seja o mais pequeno possível. O ângulo que permitiu obter a melhor aproximação terá sido de 50 graus, apresentando os picos de tensão representados na figura 6.6. O pico de tensão 1 e o 3 representam disparos que ocorrem no tempo correto e o 2 no tempo de escape, por se tratar de um motor de 4 tempos. Medindo o intervalo de tempo

entre o ponto 1 e 3, que corresponde a 360° ou seja a duas voltas da cambota, e depois medindo o intervalo de tempo entre pico de tensão de disparo da injeção eletrónica (vermelho) e a ignição por magneto no ponto 1, é possível calcular o ângulo de defasamento.

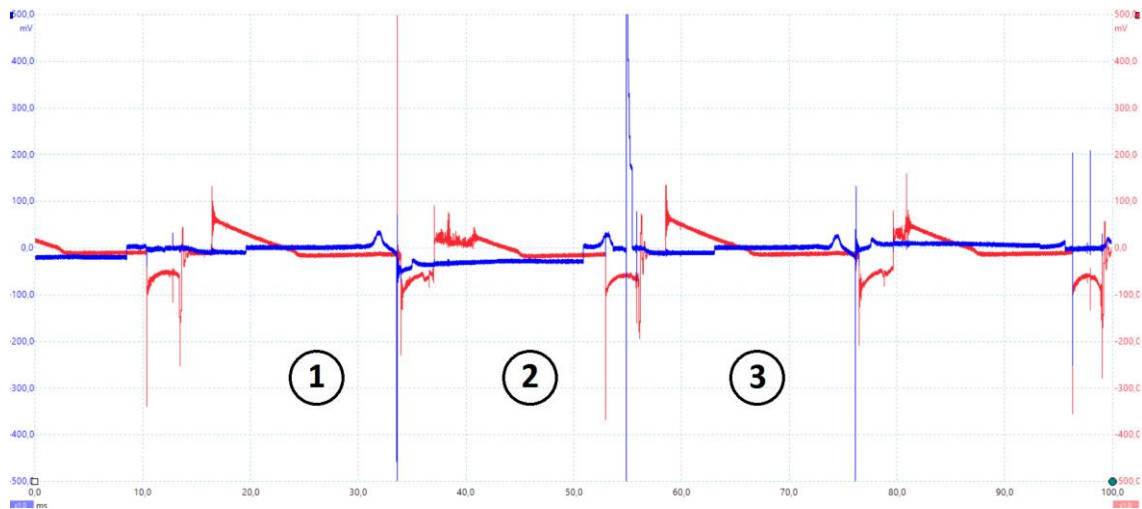


Figura 6.6 - Representação dos picos de tensão, no *software* PicoScope 6.

Tempo de carregamento da bobina

Após a calibração da ignição verificou-se que o motor apenas era capaz de alcançar, com o acelerador a 100%, as 4500 rpm. Por este motivo se levantaram duas possíveis causas para este problema, ora a calibração da ignição comandada ora o tempo de carregamento da bobina “*dwell time*” definido estaria incorreto. Tendo-se realizado da forma mais precisa possível a calibração da ignição, assumiu-se que o problema estaria relacionado com o tempo de carregamento. Pode dever-se pelo facto de na ignição por magneto o tempo de carregamento da bobina diminuir com o conseqüente aumento da velocidade do motor, e de no caso das predefinições da ignição eletrónica o tempo definido ser demasiado elevado. A determinação do tempo de carregamento da bobina pode ser realizada através de diversos métodos, especificados pela MegaSquirt [39]. O método adotado encontra-se relacionado com um processo interativo, onde o objetivo será definir o tempo de carregamento mais baixo possível sem provocar falhas na ignição no ralenti ou para velocidade baixas, algo que costuma ocorrer entre os 2.0 e os 4.0 ms. A estratégia foi diminuir o tempo de carregamento original, de 3 ms, em 0,1 ms de cada vez até ao limite de ocorrência de falha na ignição ou até atingir as rpm pretendidas, tendo-se adotado o valor final de 2ms.

6.3.2 Procedimento experimental

Para esta última configuração é usada a tabela VE que iguala a produção de binário com carburador e a tabela VE otimizada para uma maior produção de binário. O procedimento experimental em si, para o caso da manutenção do ângulo fixo e da tabela de ignição gerada, é muito semelhante ao realizado para a configuração com injeção eletrónica apenas e tabela VE gerada, sendo todos os passos iguais à exceção naturalmente do passo relativo à manipulação da tabela VE (ver Fig. 6.7). Na situação em que se pretende otimizar uma tabela de ignição, de forma a aumentar a produção de binário, é necessário adicionar um passo ao procedimento. Este passo engloba o processo de manipulação do ângulo de avanço à ignição até se obter o maior acréscimo de binário possível.

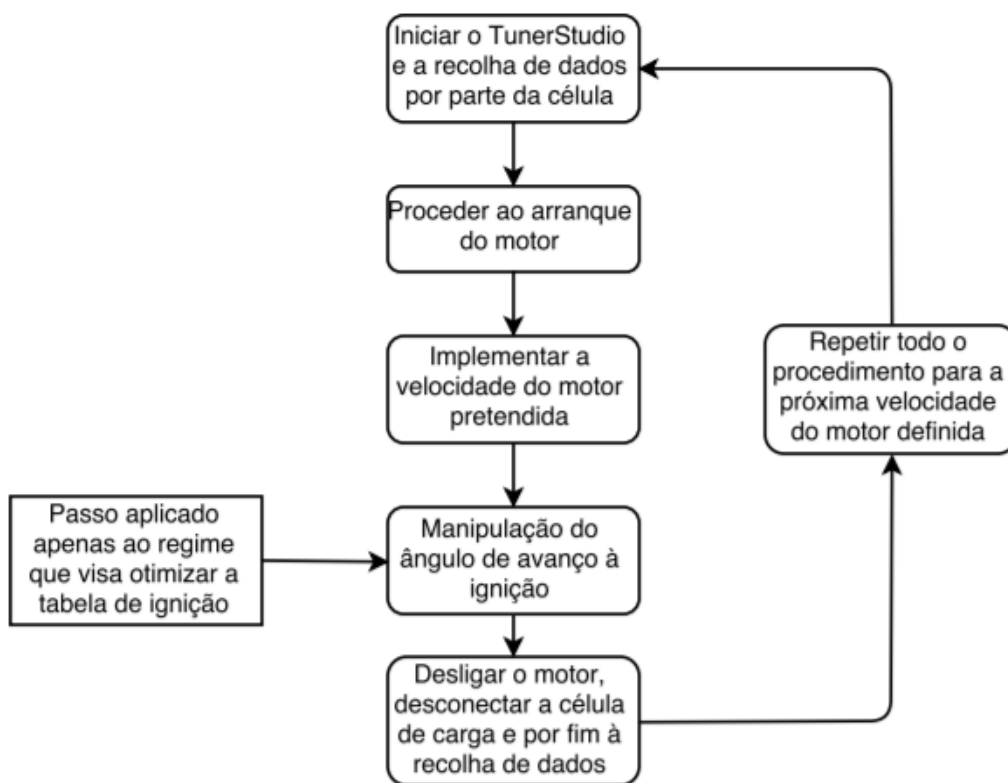


Figura 6.7: Fluxograma referente ao procedimento experimental da configuração com injeção e ignição eletrónica.

No anexo L é possível observarem-se fotos da montagem experimental com grande parte dos componentes referidos anteriormente e do sistema de medição do binário (figura L.2), bem como o aspeto final do sistema concebido para a conversão de carburador para injeção eletrónica de combustível (figura L.3).

7. Resultados

Os resultados consistem nos obtidos experimentalmente para a determinação do binário e do consumo de combustível do motor, ao longo de uma gama onde ocorre uma variação da velocidade do motor. São apresentados também os gráficos referentes a outras grandezas, calculadas a partir dos resultados obtidos e relevantes para a avaliação da *performance*, para os regimes de funcionamento mais importantes, bem como as tabelas VE e do ângulo de avanço à ignição. Devido ao elevado número de dados registados e grandezas calculadas foi necessário proceder-se à dita seleção dos resultados referentes aos regimes de índole mais relevante. São primeiramente apresentados os dados relativos ao binário, consumo de combustível e tabelas adotadas para cada uma das 3 configurações testadas, de forma individual, e no final apresentadas as grandezas complementares. Cada ponto representado representa a média dos 4 ensaios realizados para cada velocidade, à exceção do consumo de combustível com injeção eletrónica (2 ensaios), as respetivas funções das linhas de tendência são exibidas com uma média de 10 casas decimais, para representarem com uma precisão aceitável o que se encontra apresentado nos respetivos gráficos, e os valores de R^2 são igualmente dados a conhecer. No final deste capítulo é apresentada uma pequena seção dedicada ao cálculo das incertezas associadas aos valores experimentais obtidos.

7.1 Configuração com carburador

Em seguida encontram-se ilustrados, em dois gráficos, os dados obtidos relativamente ao consumo de combustível e binário produzido pelo motor na sua configuração original, funcionando como base de comparação.

7.1.1 Binário

Depois de introduzidos os dados e formatado o gráfico da figura 7.1, é necessário selecionar o tipo de função que permite obter um valor de R^2 o mais próximo possível de 1, ou seja, o que possibilita um melhor ajuste da linha relativamente aos dados e desta forma permite visualizar a evolução dos dados por meio de uma linha. O valor de R^2 representa a variância, coeficiente que quantifica o quanto o modelo é capaz de explicar os dados observados. Foi selecionada uma linha de tendência baseada numa função logarítmica, representada pela equação (7.1).

$$y = 1,2721788577\ln(x) - 9,9222126859 \quad (7.1)$$

A linha de tendência possui um valor de R^2 de 0,967, o que representa um ajuste bastante bom da linha para os dados.

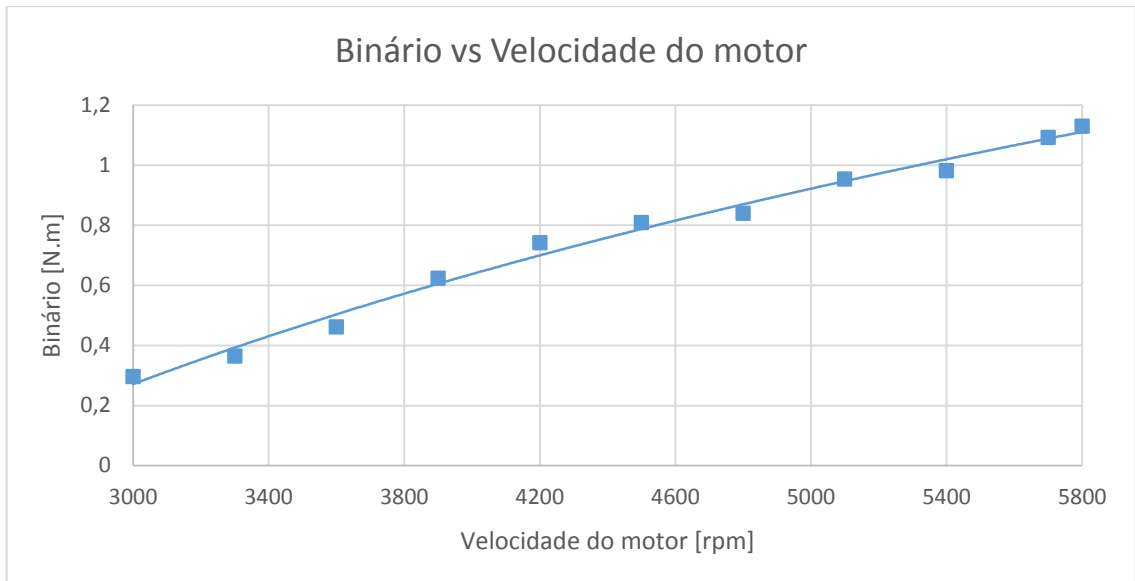


Figura 7.1: Gráfico do binário produzido em função da velocidade do motor, na configuração com carburador.

7.1.2 Consumo

No gráfico da figura 7.2 relativo ao consumo de combustível, por parte do motor para diferentes velocidades, foi adotada uma linha de tendência baseada numa função exponencial, ideal para conjuntos de dados que comparam medidas que aumentam a uma taxa cada vez mais alta, representada pela equação (7.2).

$$y = 0,8258880e^{0,0003701x} \quad (7.2)$$

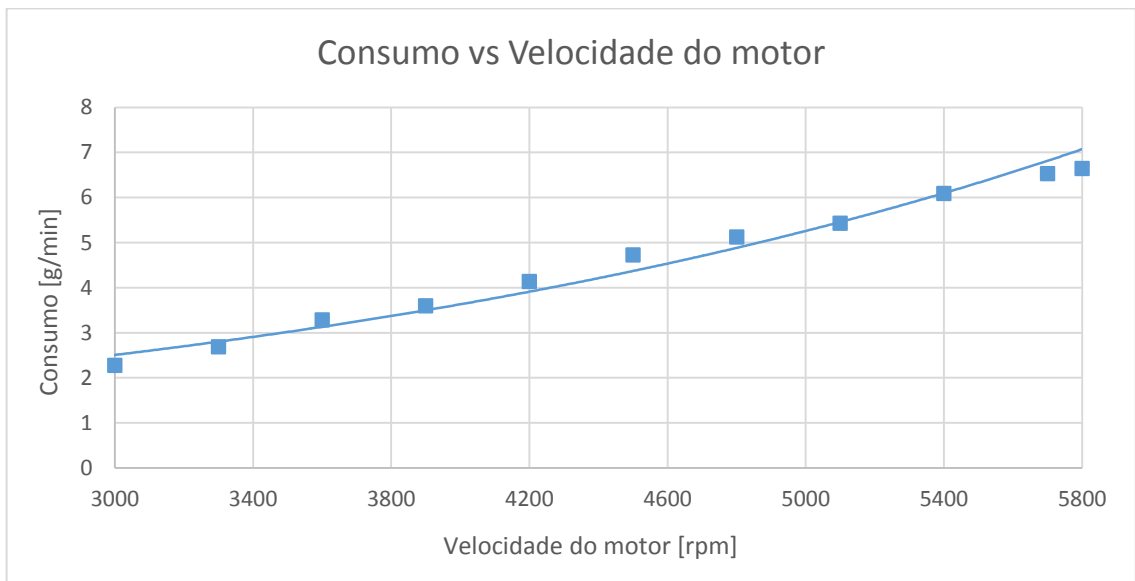


Figura 7.2: Gráfico do consumo de combustível em função da velocidade do motor, na configuração com carburador.

A linha de tendência possui um valor de R^2 semelhante ao observado no primeiro caso, de 0,983, o que representa um ajuste muito bom da linha para os dados observados.

7.2 Configuração com sistema de injeção eletrônica

Os resultados, referentes aos ensaios realizados para diferentes configurações da tabela VE, são exibidos em conjunto, num total de dois gráficos para cada uma das grandezas. Adicionalmente as quatro tabelas VE adotadas são ilustradas no seu formato bidimensional, encontrando-se a área de interesse delimitada por uma elipse.

7.2.1 Binário

No gráfico da figura 7.3 estão representados os dados obtidos para diferentes tabelas VE testadas. Uma concebida com o objetivo de igualar a performance do motor, no que toca à produção de binário, na sua configuração original com carburador (Tabela VE carburador), outra gerada através do TunerStudio MS que tem em conta as características de funcionamento do motor (Tabela VE gerada) e, por último, outra otimizada de forma a permitir um incremento considerável na produção de binário (Tabela VE otimizada).

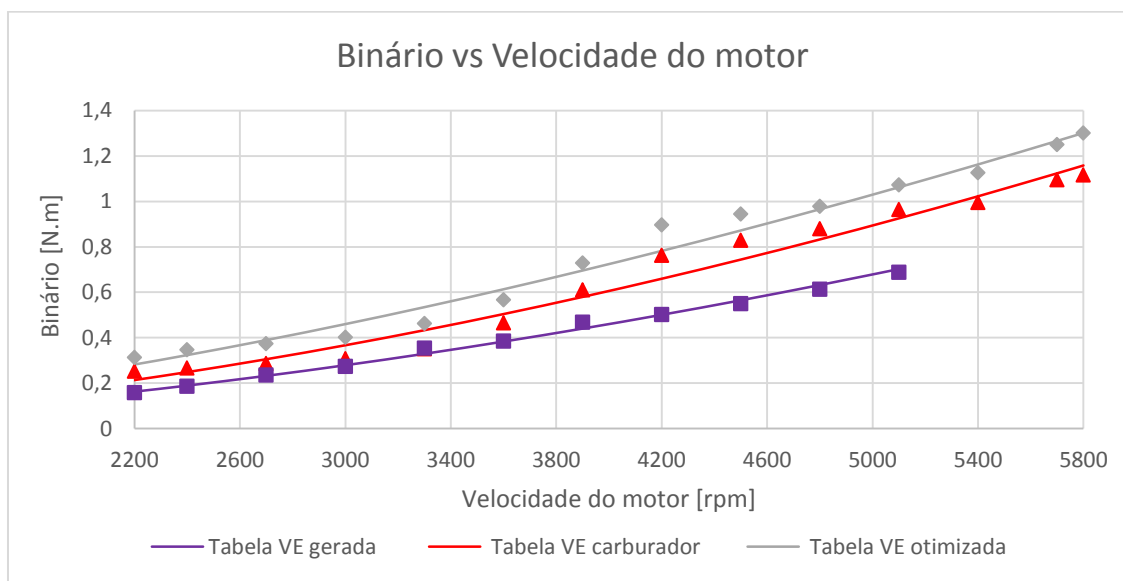


Figura 7.3: Gráfico do binário produzido em função da velocidade do motor para a tabela VE carburador, gerada e otimizada.

Em seguida são apresentadas as equações (7.3, 7.4, 7.5) das linhas de tendência e os respectivos valores de R^2 :

Tabela VE carburador:

$$y = 0,3142 * 10^{-6} x^{1,7448537093}; R^2 = 0,953 \quad (7.3)$$

Tabela VE gerada:

$$y = 0,25341257 e^{0,00050777x}; R^2 = 0,982 \quad (7.4)$$

Tabela VE otimizada:

$$y = 0,14951 * 10^{-5} x^{1,5783070579}; R^2 = 0,964 \quad (7.5)$$

Na figura 7.4 são comparados os dados obtidos com a tabela VE que iguala a performance com carburador (Tabela VE carburador) e com a tabela VE que pretende simular, de forma aproximada, a afinação realizada num motor para voo (Tabela VE voo). A função da linha de tendência de “Tabela VE voo” é (eq. 7.6):

$$y = -0,506 * 10^{-11} x^3 + 6,277824 * 10^{-7} x^2 - 0,0021208371927x + 2,32596676949 \quad (7.6)$$

O valor de R^2 estabelece-se em 0,981, correspondendo novamente a uma aproximação bastante precisa.

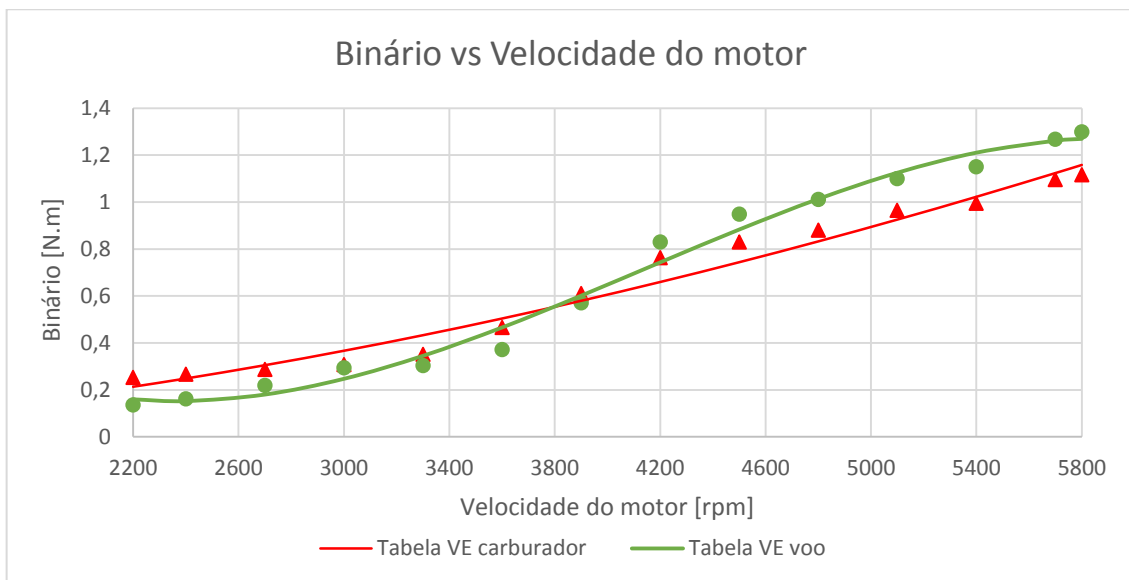


Figura 7.4: Gráfico do binário produzido em função da velocidade do motor para a tabela VE carburador e de voo.

7.2.2 Consumo

O consumo, nas duas configurações que usam injeção eletrônica, é calculado com recurso ao *software* MegaLogViewer. Nos ficheiros relativos ao registo de funcionamento não é possível obter o consumo de combustível diretamente. Porém existe um registo de todas as grandezas que permitem calcular o consumo, que se tratam da duração do pulso “*Pulse Width*”, em ms, e do ciclo de trabalho “*Duty Cycle*”, em percentagem. É necessário conhecer também o intervalo de tempo que o injetor leva a reagir “*Dead time*”, que segundo um documento relativo ao injetor utilizado é de 1 ms [28].

O processo de cálculo do consumo de combustível foi feito por partes, iniciando-se pelo cálculo do intervalo de tempo em que o injetor está realmente a injetar combustível, em percentagem (eq. 7.7). Com o valor obtido é possível calcular o ciclo de trabalho real, em percentagem (eq. 7.8). Multiplicando depois pelo caudal mássico do injetor temos a quantidade de combustível debitada, em cc/min (eq. 7.9). Importante referir que os valores do *Pulse Width* “PW” e do *Duty Cycle* “DT” são obtidos através de uma média dos valores obtidos durante 10 segundos, na velocidade do motor previamente definida.

$$\frac{PW-DT}{PW} * 100 = \text{pulso real} \quad (7.7) \quad \frac{\text{pulso real}}{100} * \text{duty cycle} = \text{ciclo de trabalho real} \quad (7.8)$$

$$\text{Ciclo de trabalho real} * \text{caudal mássico} = \text{consumo de combustível} \quad (7.9)$$

Para fins de comparação entre o consumo de combustível do motor na sua configuração original e na sua configuração com injeção eletrônica de combustível, com a implementação da “Tabela VE carburador”, é apresentado o gráfico da figura 7.5. A função da linha de tendência de “Tabela VE carburador” é (eq. 7.10):

$$y = 0,365030e^{0,000492x} \quad (7.10)$$

A aproximação é extremamente precisa, com o valor de R^2 a fixar-se em 0,989.

Para o gráfico representado pela figura 7.6 as funções das linhas de tendência, e os respetivos valores de R^2 , são as seguintes (eqs. 7.11, 7.12 e 7.13):

Tabela VE gerada:

$$y = 0,25341257e^{0,00050777x}; R^2 = 0,982 \quad (7.11)$$

Tabela VE voo:

$$y = 0,24477e^{0,00059x}; R^2 = 0,975 \quad (7.12)$$

Tabela VE otimizada:

$$y = 0,591 * 10^{-7} x^{2,1409418092}; R^2 = 0,995 \quad (7.13)$$

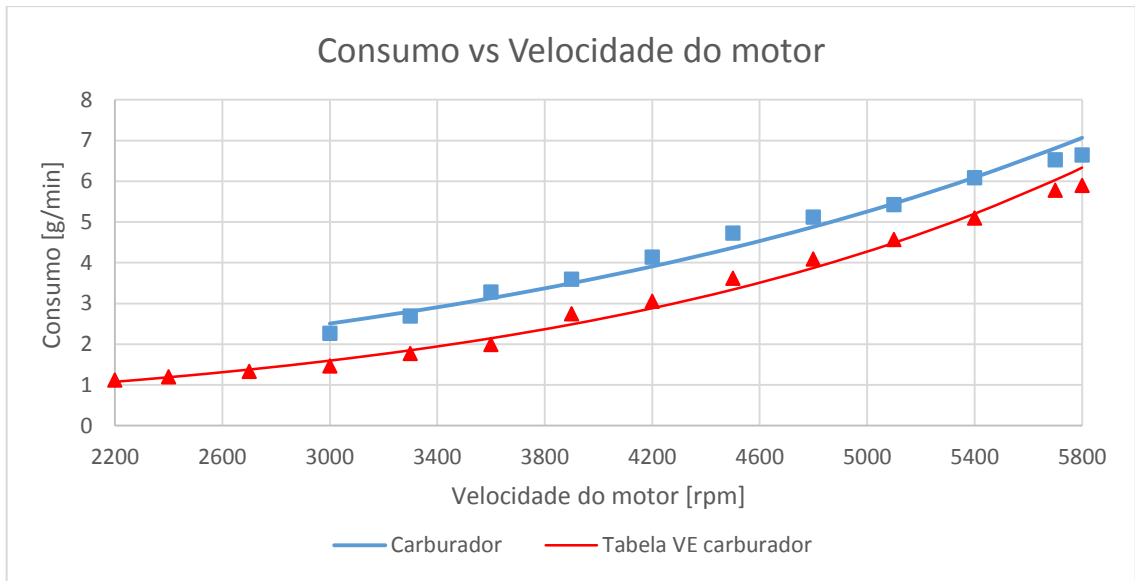


Figura 7.5: Gráfico do consumo de combustível em função da velocidade do motor para a tabela VE carburador e para a configuração com carburador.

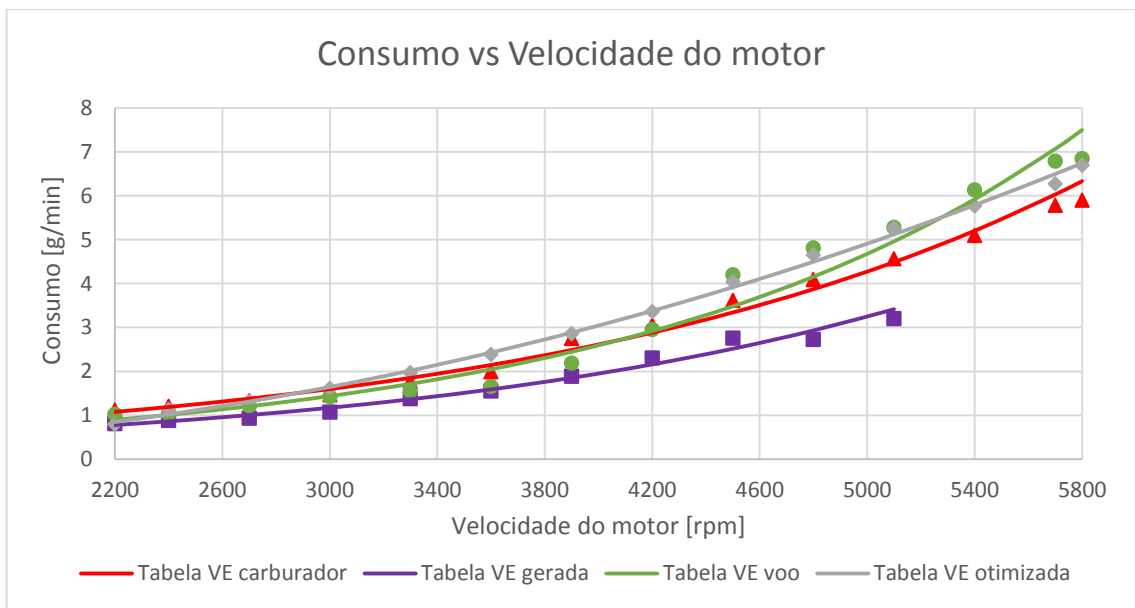


Figura 7.6: Gráfico do consumo de combustível em função da velocidade do motor para a tabela VE carburador, gerada, de voo e otimizada.

7.2.3 Tabelas VE

Em seguida são apresentadas as tabelas relativas à eficiência volumétrica aplicada para cada um dos casos de estudo (Figs. 7.7 a 7.10). A zona no mapa demarcada pela linha vermelha é referente à área sobre a qual se encontram os pontos de funcionamento do motor para este regime e onde, conseqüentemente, se concentram as alterações realizadas.

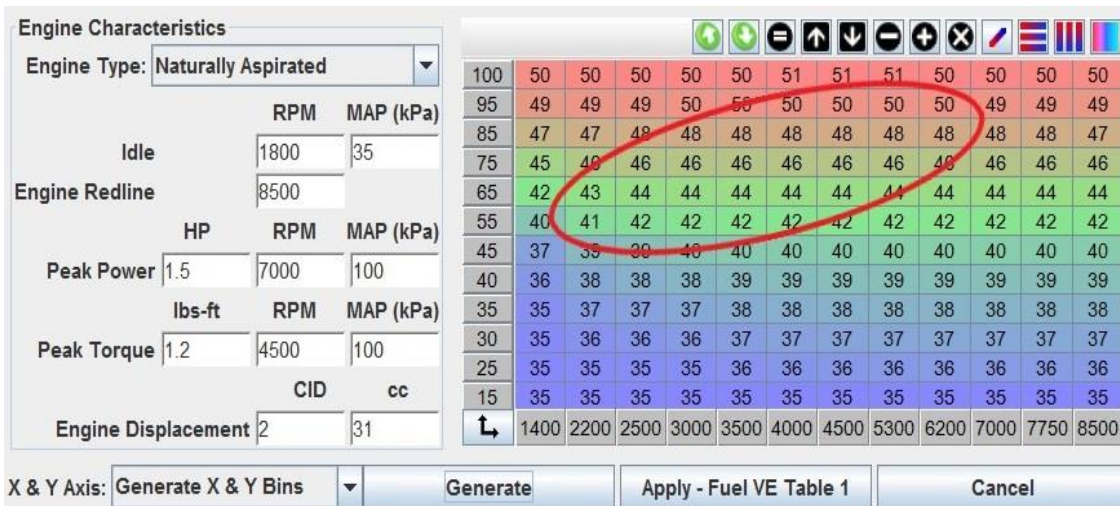


Figura 7.7: Tabela VE gerada com recurso ao software TunerStudio MS.

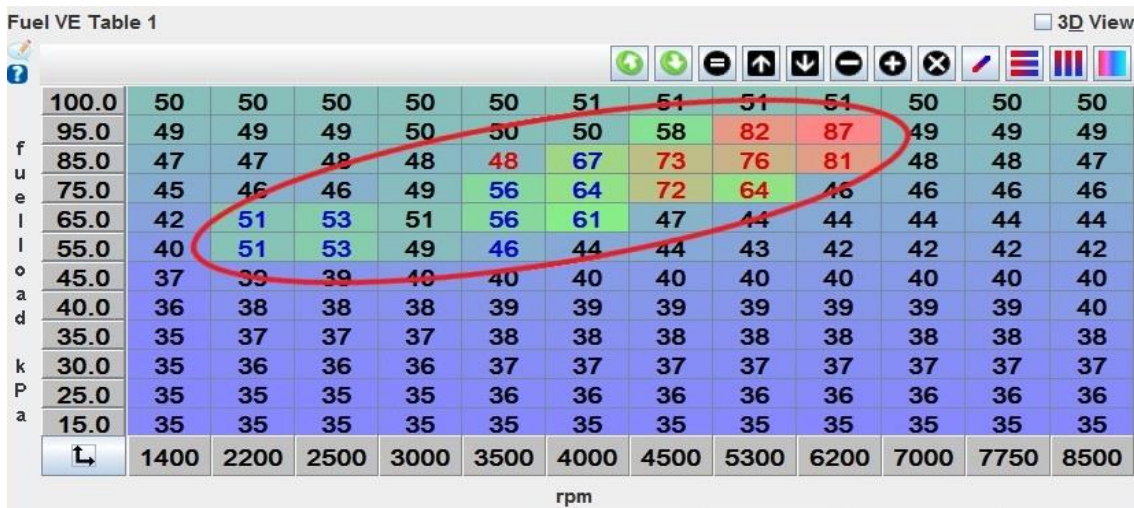


Figura 7.8: Tabela VE concebida no TunerStudio MS para igualar a prestação do carburador, na produção de binário.

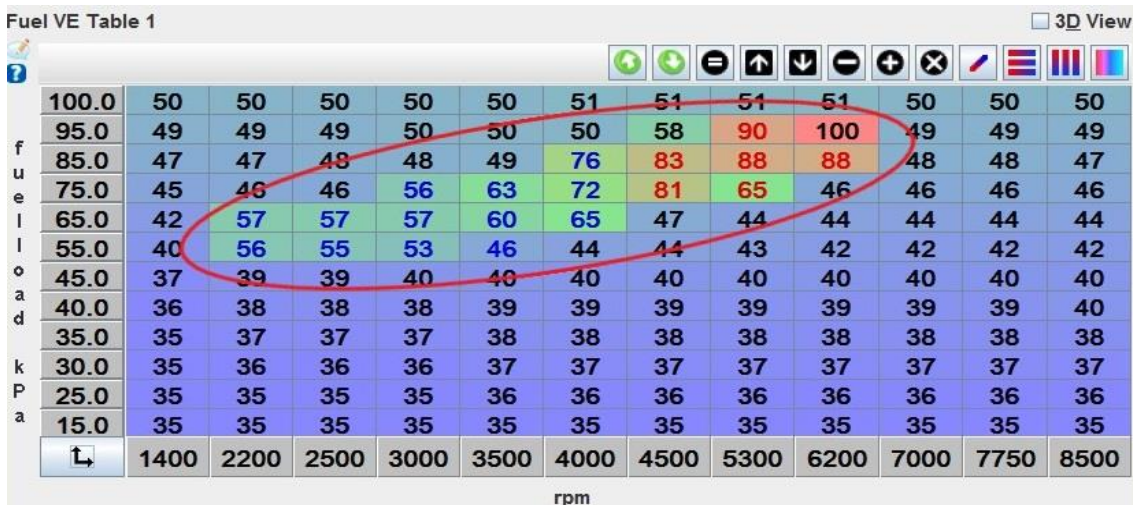


Figura 7.9: Tabela VE otimizada no TunerStudio MS para obtenção de um binário mais elevado.

Fuel VE Table 1 3D View

100.0	50	50	50	50	50	51	51	51	51	50	50	50
95.0	49	49	49	50	50	50	58	92	100	49	49	49
85.0	47	47	48	48	49	59	86	90	91	48	48	47
75.0	45	46	46	49	47	55	83	67	46	46	46	46
65.0	42	42	43	51	42	46	47	44	44	44	44	44
55.0	40	40	41	49	41	44	44	43	42	42	42	42
45.0	37	39	39	40	40	40	40	40	40	40	40	40
40.0	36	38	38	38	39	39	39	39	39	39	39	40
35.0	35	37	37	37	38	38	38	38	38	38	38	38
30.0	35	36	36	36	37	37	37	37	37	37	37	37
25.0	35	35	35	35	36	36	36	36	36	36	36	36
15.0	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
↵	1400	2200	2500	3000	3500	4000	4500	5300	6200	7000	7750	8500
	rpm											

Figura 7.10: Tabela VE otimizada no TunerStudio MS e ilustrativa da afinação realizada para uma possível situação de voo.

7.3 Configuração com sistema de injeção e ignição eletrónica

Nesta seção os resultados, referentes aos ensaios realizados para diferentes configurações da tabela VE e da tabela do avanço à ignição, são exibidos novamente em conjunto, num total de dois gráficos para cada uma das grandezas. As tabelas 2D do ângulo de avanço à ignição são igualmente apresentadas, bem como um gráfico referente a uma pequena demonstração prática acerca da influência do ângulo de avanço na produção de binário.

7.3.1 Binário

Neste caso (Fig. 7.11) os resultados obtidos, com a implementação de uma tabela VE cujo objetivo é o de igualar a performance do motor na sua configuração original com carburador (Tabela VE carburador), são comparados com dois casos de estudo, que usam igualmente a tabela VE carburador como base, em que é implementado adicionalmente o sistema de ignição eletrónica. Num dos casos o ângulo de avanço à ignição é mantido constante e com valor igual ao implementado pelo sistema de ignição por magneto (Tabela VE carburador com ângulo fixo), e no outro é implementado um ângulo de avanço variável com base numa tabela gerada por fonte externa (Tabela VE carburador com tabela de ignição gerada). As funções das linhas de tendência são as seguintes (eqs. 7.14 e 7.15):

Tabela VE carburador com ângulo fixo:

$$y = 0,3224 * 10^{-6} x^{1,7382363137}; R^2 = 0,965 \quad (7.14)$$

Tabela VE carburador com tabela de ignição gerada:

$$y = 0,5534 * 10^{-6} x^{1,6726586564}; R^2 = 0,977 \quad (7.15)$$

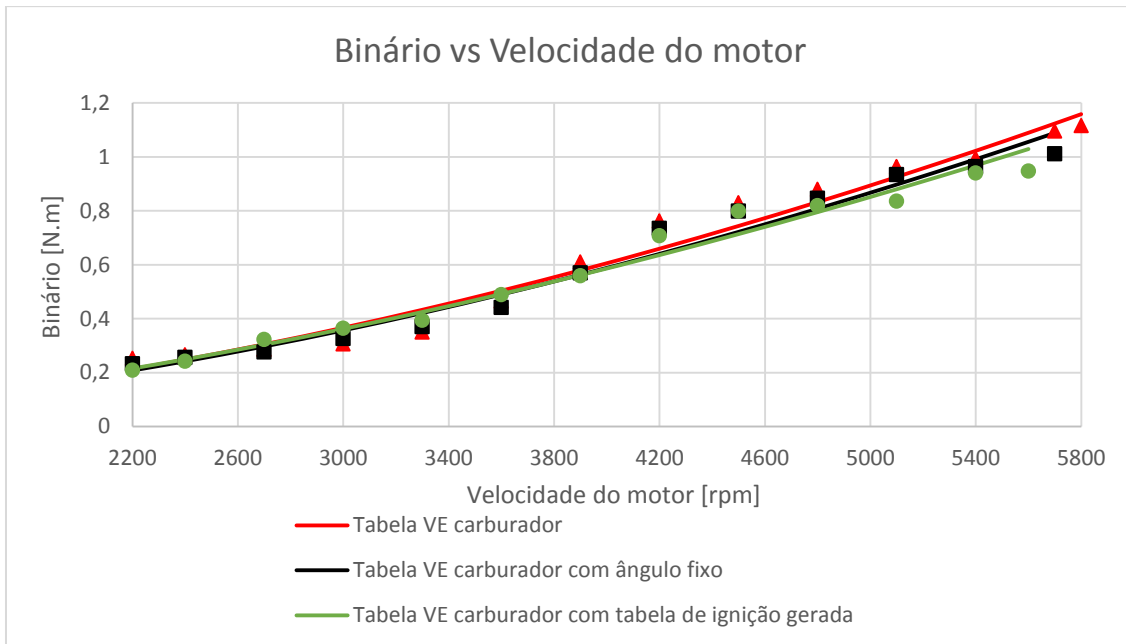


Figura 7.11: Gráfico do binário produzido em função da velocidade do motor para a tabela VE carburador original, com ângulo fixo e com tabela de ignição gerada.

São evidenciadas as melhores prestações obtidas, após um processo de otimização e afinação, na figura 7.12. Compara-se o caso em que o motor funciona com uma tabela VE já otimizada (Tabela VE otimizada) com o caso em que é implementada igualmente uma tabela de avanço à ignição otimizada (Tabela VE e de ignição otimizadas). A equação da linha de tendência deste novo teste experimental é dada por (eq. 7.16):

$$y = 0,0000017826x^{1,5651925059} \quad (7.16)$$

O valor de R^2 neste caso situa-se nos 0,959, representando uma aproximação bastante boa.

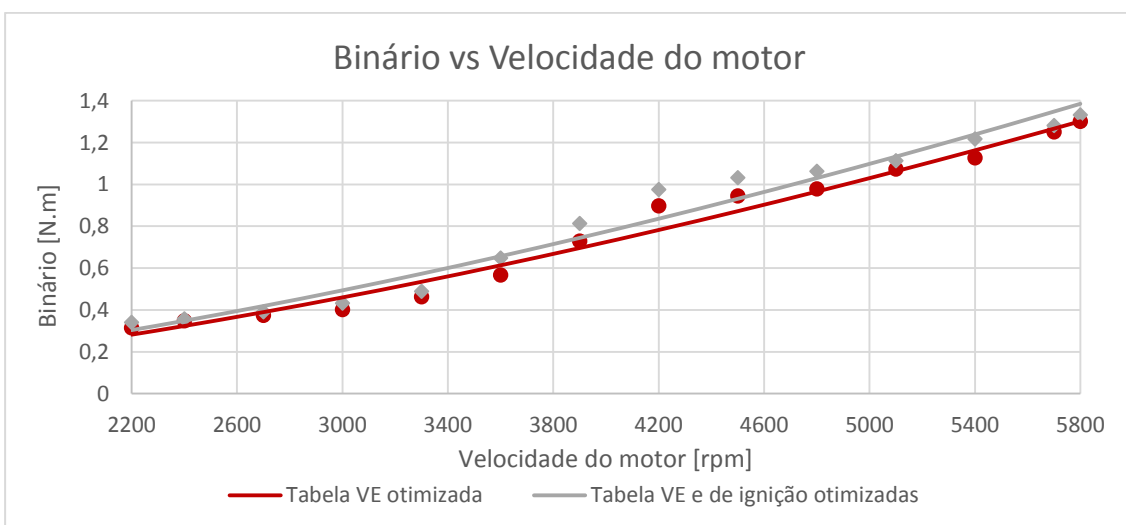


Figura 7.12: Gráfico do binário produzido em função da velocidade do motor para a tabela VE otimizada e tabela VE e de ignição otimizadas.

7.3.2 Consumo

Na figura 7.13 é estabelecida uma comparação entre o consumo do motor na configuração com carburador (Carburador), com injeção eletrônica e semelhante produção de binário ao carburador (Tabela VE carburador), com injeção e ignição eletrônica com ângulo fixo (Tabela VE carburador com ângulo fixo) e, por último, com injeção e ignição eletrônica baseada numa tabela de ignição gerada (Tabela VE carburador com tabela de ignição gerada). As funções e valores de R^2 são os seguintes (eqs. 7.17 e 7.18):

Tabela VE carburador com ângulo fixo:

$$y = 0,4897436e^{0,0004636x}; R^2 = 0,978 \quad (7.17)$$

Tabela VE carburador com tabela de ignição gerada:

$$y = 0,4371601e^{0,0005030x}; R^2 = 0,988 \quad (7.18)$$

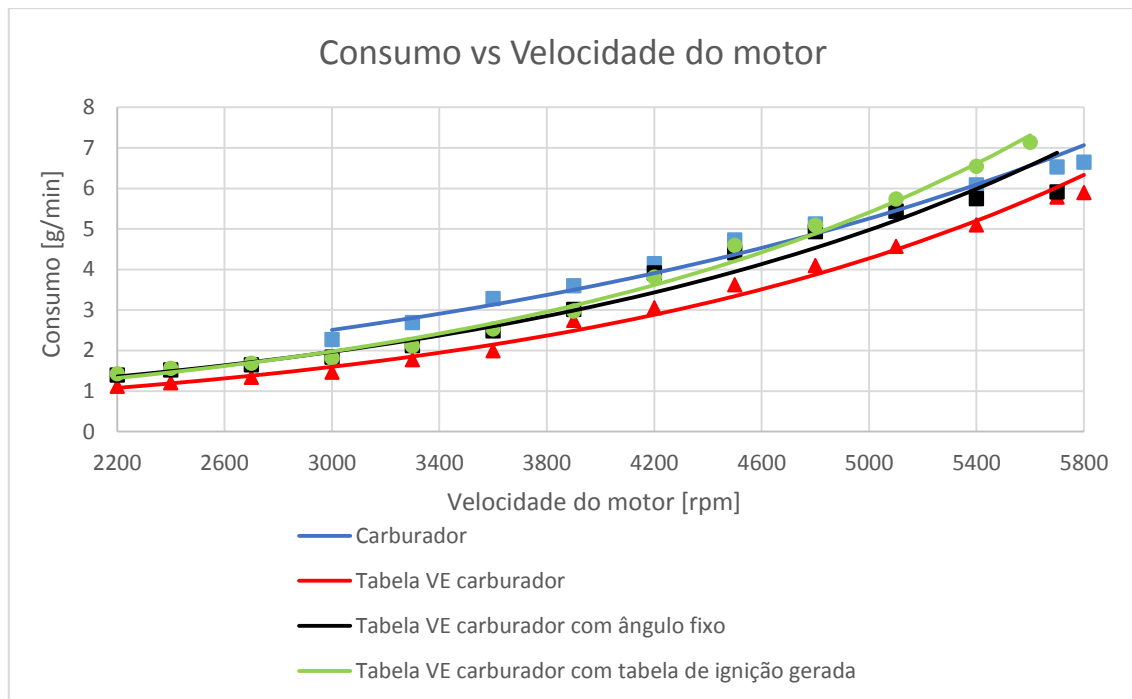


Figura 7.13: Gráfico do consumo de combustível em função da velocidade do motor, para 4 regimes de funcionamento distintos.

No gráfico representado na figura 7.14 compara-se o consumo das duas prestações otimizadas, uma com injeção eletrônica apenas (Tabela VE otimizada) e outra com injeção e ignição eletrônica a funcionar em simultâneo (Tabela VE e de ignição otimizadas). A função da linha de tendência é (eq. 7.19):

$$y = 0,41899060e^{0,00048773x} \quad (7.19)$$

O valor de R^2 correspondente é de 0,986.

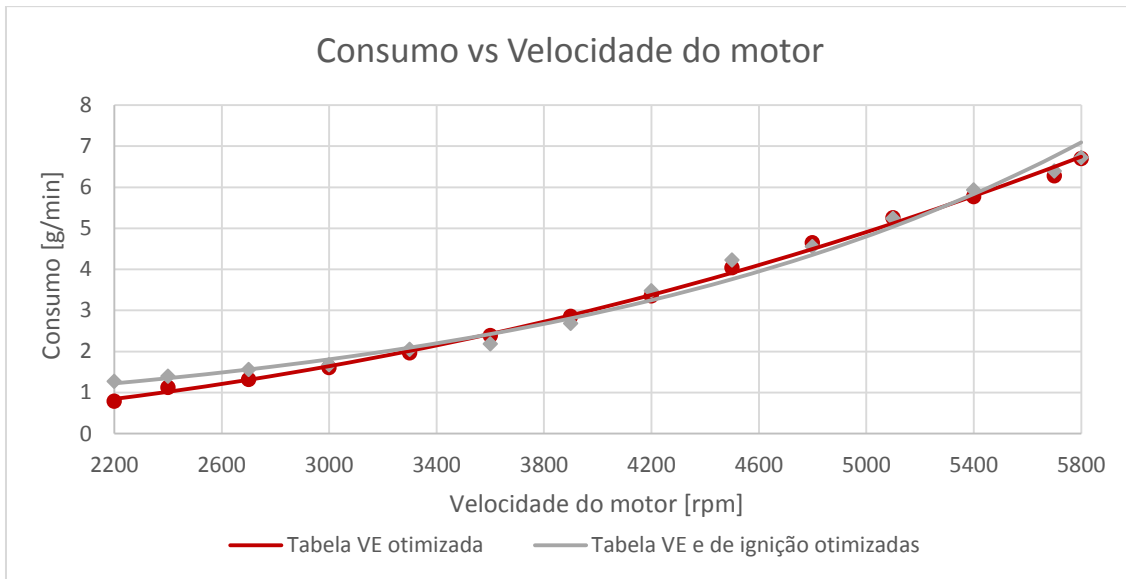


Figura 7.14: Gráfico do consumo de combustível em função da velocidade do motor para a tabela VE otimizada e tabela VE e de ignição otimizadas.

7.3.3 Tabelas de avanço à ignição

Encontram-se em seguida apresentadas as duas tabelas de avanço à ignição implementadas, uma gerada e outra otimizada (ver Figs. 7.15 e 7.16). A zona demarcada no interior da elipse trata-se do conjunto de pontos de funcionamento do motor, ou seja, os pontos de interesse/manipulação. Na figura 7.17 é apresentada uma pequena exemplificação do que foi observado em relação ao aumento do ângulo de avanço à ignição para obtenção de um incremento na produção de binário. Este apresenta resultados obtidos às 5400 rpm com a utilização da tabela VE otimizada, e pretende demonstrar como ocorre a variação do binário produzido com o ângulo de avanço à ignição.

Ignition Table 1 (Spark Advance) 3D View

	5.0	10.0	17.3	20.2	21.2	24.5	27.7	30.2	30.2	30.2	30.2	30.2
	5.0	10.0	17.6	20.5	21.6	25.0	28.3	30.8	30.8	30.8	30.8	30.8
	13.0	10.0	17.8	20.9	22.0	25.5	28.8	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5
k	13.0	10.0	18.1	21.3	22.5	26.0	29.4	32.1	32.1	32.1	32.1	32.1
a	13.0	10.0	18.4	21.6	22.9	26.5	30.0	32.8	32.8	32.8	32.8	32.8
i	13.0	10.0	18.7	22.0	23.3	27.0	30.6	33.4	33.4	33.4	33.4	33.4
x	13.0	10.0	19.0	22.3	23.7	27.4	31.1	33.9	33.9	33.9	33.9	33.9
	13.0	10.0	19.3	22.9	24.4	27.9	31.7	34.6	34.6	34.6	34.6	34.6
k	13.0	10.0	19.5	23.1	24.5	28.4	32.3	35.2	35.2	35.2	35.2	35.2
P	13.0	10.0	19.9	23.4	24.9	28.9	32.8	35.8	35.8	35.8	35.8	35.8
a	13.0	10.0	20.1	23.8	25.4	29.4	33.4	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5
	13.0	10.0	20.4	24.2	25.9	30.4	34.0	37.1	37.1	37.1	37.1	37.1
↳	1300	1400	1700	2000	2200	2500	2800	3100	3400	3600	3900	6000
	rpm											

Figura 7.15: Tabela, gerada por fonte externa e introduzida no TunerStudio MS, relativa ao ângulo de avanço à ignição.

Ignition Table 1 (Spark Advance) 3D View

101.0	10.0	25.0	24.7	25.3	25.9	27.5	28.3	28.5	28.5	28.5	28.5	28.5	28.5
94.0	10.0	25.0	25.2	25.8	26.6	28.0	29.0	29.2	29.2	29.2	29.2	29.2	29.2
87.0	16.0	25.0	25.6	26.3	27.0	28.5	29.6	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
80.0	16.0	25.0	26.2	26.8	27.5	29.0	30.0	30.8	30.8	30.8	30.8	30.8	30.8
73.0	16.0	25.0	26.5	27.4	28.0	29.4	30.5	31.4	31.4	31.4	31.4	31.4	31.4
66.0	16.0	25.0	27.0	27.7	28.5	29.8	31.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0
60.0	16.0	25.0	27.4	28.0	28.8	30.3	31.6	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5
53.0	16.0	25.0	27.6	28.4	29.2	30.6	32.1	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0
46.0	16.0	25.0	27.9	28.8	29.5	30.9	32.3	33.7	33.7	33.7	33.7	33.7	33.7
39.0	16.0	25.0	28.3	29.2	29.9	31.2	32.8	34.2	34.2	34.2	34.2	34.2	34.2
32.0	16.0	25.0	28.8	29.6	30.4	31.4	33.4	34.7	34.7	34.7	34.7	34.7	34.7
25.0	16.0	25.0	29.2	30.1	30.9	31.9	34.0	35.4	35.4	35.4	35.4	35.4	35.4
↳	1300	1400	1700	2000	2200	2500	2800	3100	3400	3600	3900	6000	
	rpm												

Figura 7.16: Tabela do ângulo de avanço à ignição otimizada no software TunerStudio MS.

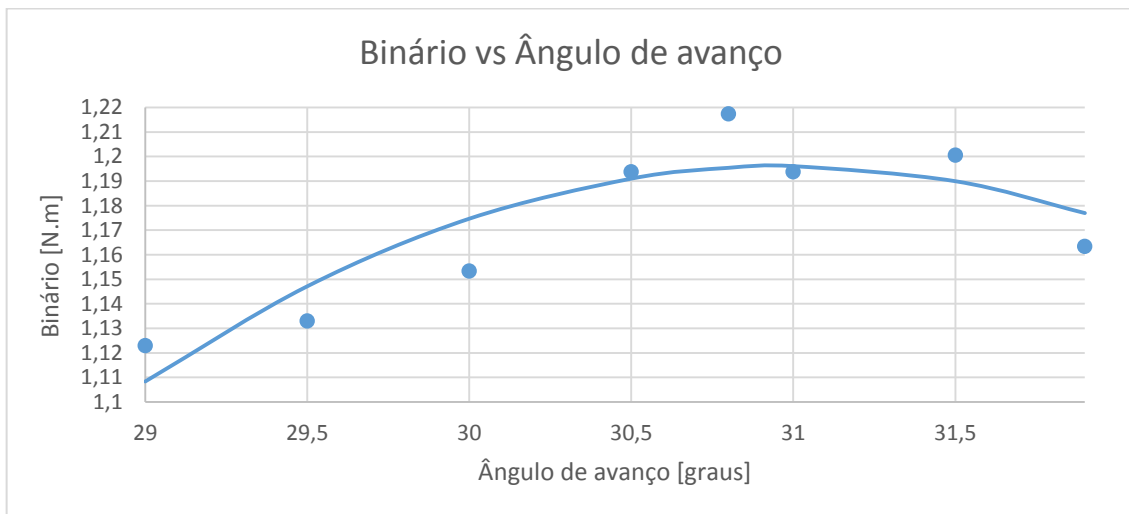


Figura 7.17: Gráfico da variação do binário de acordo com o ângulo de avanço à ignição implementado.

7.4 Outros parâmetros

Neste subcapítulo são apresentadas as curvas referentes às grandezas adicionais calculadas, com o objetivo de ter uma perspectiva mais clara da influência de cada uma das configurações na prestação do motor. As grandezas exibidas tratam-se da potência efetiva, do consumo específico e do rendimento total, respetivamente. É apresentada uma curva para cada grandeza, que reúne os regimes de funcionamento mais importantes.

7.4.1 Potência efetiva

Na figura 7.18 encontra-se representada a variação da potência efetiva, calculada a partir de uma ligeira modificação da equação 2.2 (capítulo 2) que permite o cálculo da potência em cavalos. Cada cavalo corresponde a 745,7 watts, dando resultado à equação (7.20).

$$\dot{W}_e = \frac{2\pi.N.B}{745,7} \quad (7.20)$$

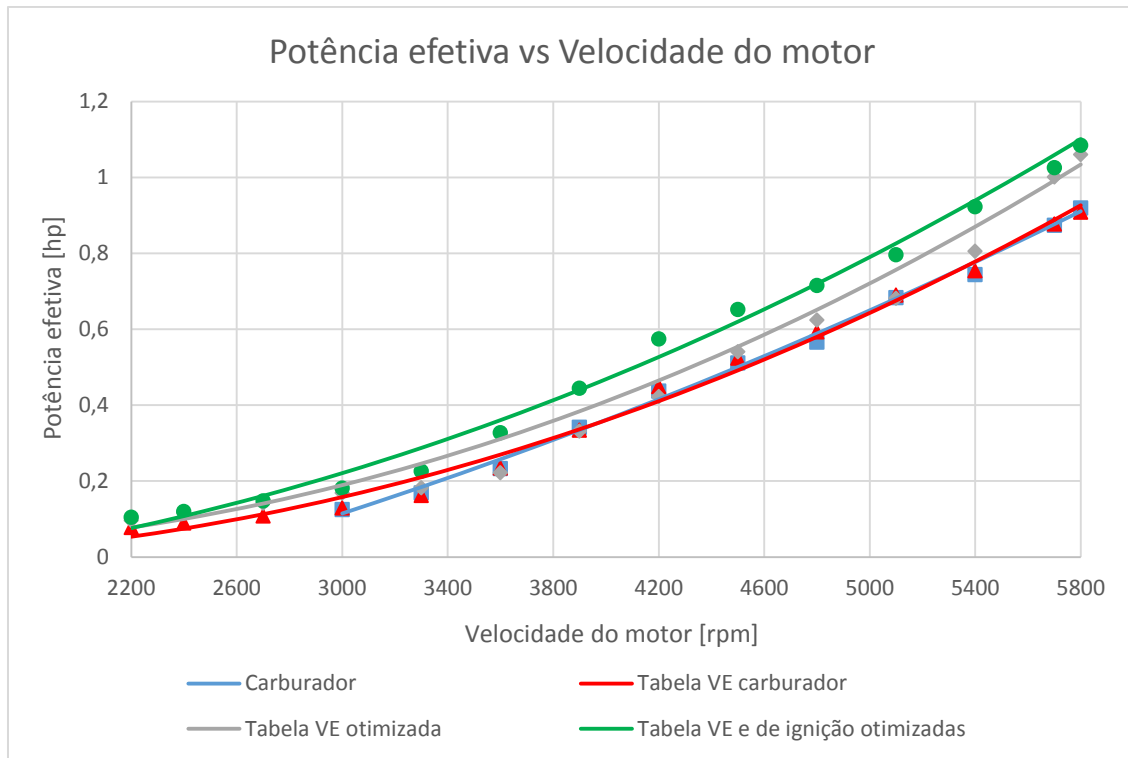


Figura 7.18: Gráfico da potência efetiva em função da velocidade do motor, para 4 regimes de funcionamento distintos.

As funções das linhas de tendência apresentadas, e respectivos valores de R^2 , para a potência útil são as seguintes (eqs. 7.21 a 7.24):

Carburador:

$$y = 0,21 * 10^{-7}x^2 + 0,000099602x - 0,373182855; R^2 = 0,985 \quad (7.21)$$

Tabela VE carburador:

$$y = 0,4 * 10^{-7}x^2 - 0,00007745x + 0,03019018; R^2 = 0,989 \quad (7.22)$$

Tabela VE otimizada:

$$y = 0,45 * 10^{-7}x^2 - 0,000094303x + 0,067260963; R^2 = 0,990 \quad (7.23)$$

Tabela VE e de ignição otimizadas:

$$y = 0,37 * 10^{-7}x^2 - 0,000011430x - 0,077830332; R^2 = 0,990 \quad (7.24)$$

7.4.2 Consumo específico

Esta grandeza, apresentada na figura 7.19, foi calculada a partir da forma original da equação (7.25), apresentada também no capítulo 2 (2.3).

$$C_s = \frac{\dot{m}_f}{\dot{W}_e} \quad (7.25)$$

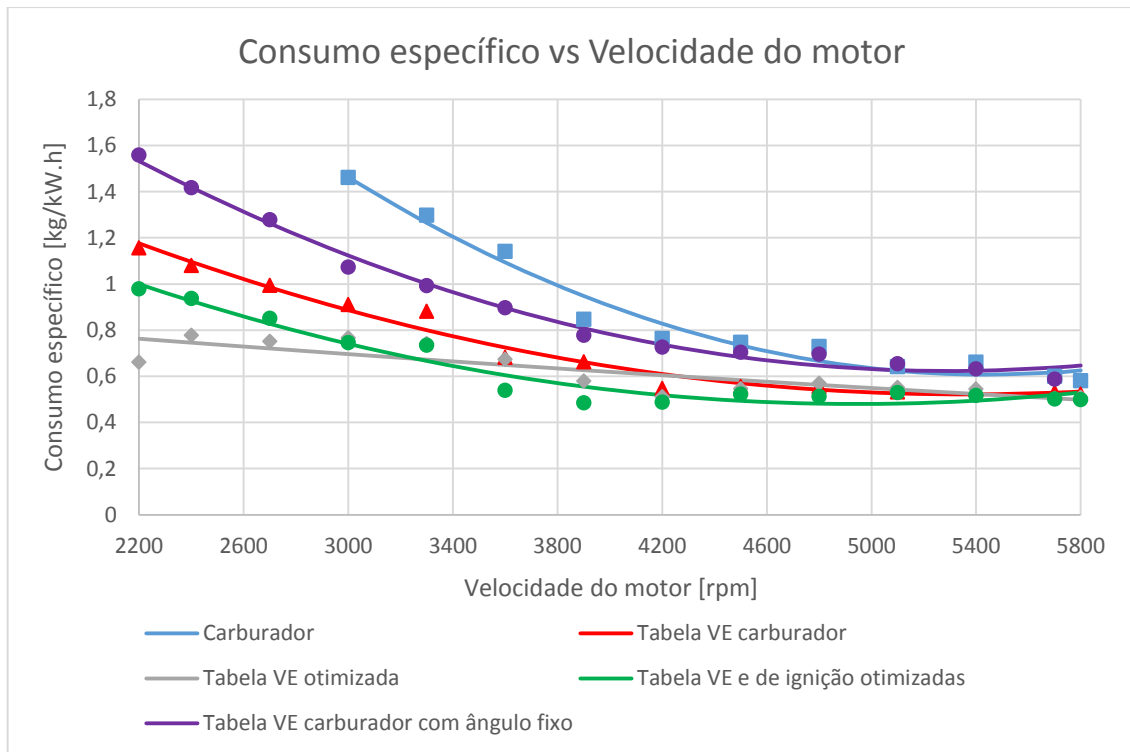


Figura 7.19: Gráfico do consumo específico em função da velocidade do motor, para 5 regimes de funcionamento distintos.

As funções das linhas de tendência acima apresentadas, e os respectivos valores de R^2 , são as seguintes (eqs. 7.26 a 7.30):

Carburador:

$$y = 0,0000001433x^2 - 0,0015597813x + 4,8516219933; R^2 = 0,906 \quad (7.26)$$

Tabela VE carburador:

$$y = 0,655 * 10^{-7}x^2 - 0,000702330x + 2,4043449754; R^2 = 0,932 \quad (7.27)$$

Tabela VE carburador com ângulo fixo:

$$y = 0,947 * 10^{-7}x^2 - 0,0010036140x - 3,2820225301; R^2 = 0,955 \quad (7.28)$$

Tabela VE otimizada:

$$y = 0,35 * 10^{-8}x^2 - 0,0001014344x + 0,9690537475; R^2 = 0,669 \quad (7.29)$$

Tabela VE e de ignição otimizadas:

$$y = 0,689 * 10^{-7}x^2 - 0,0006814674x + 2,1651776661; R^2 = 0,887 \quad (7.30)$$

7.4.3 Rendimento total

A grandeza representada na figura 7.20 é calculada tomando como base a equação 2.2 do capítulo 2, que é multiplicada por 100 de forma a fornecer o valor do rendimento sob a forma de percentagem. A equação é (7.31):

$$\eta_T = \frac{\dot{W}_e}{\dot{m}_f \cdot Q_{pi}} \cdot 100 \quad (7.31)$$

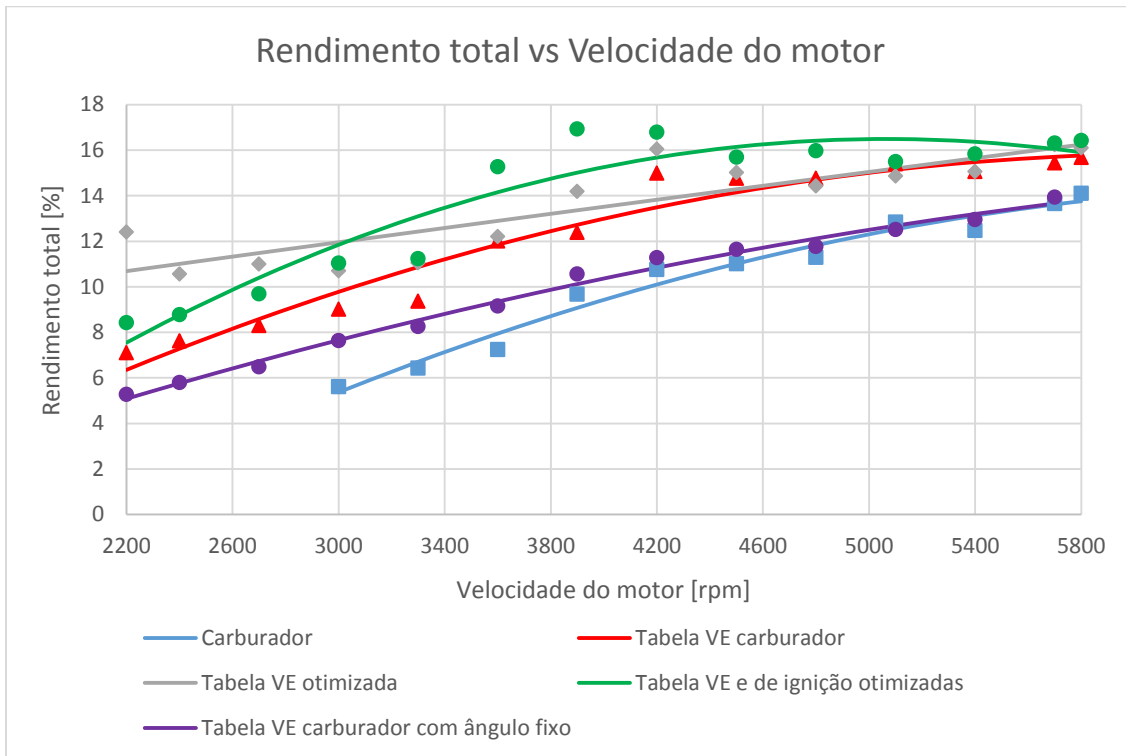


Figura 7.20: Gráfico do rendimento total em função da velocidade do motor, para 5 regimes de funcionamento distintos.

As funções das linhas de tendência, e os valores de R^2 , são as seguintes (eqs. 7.32 a 7.36):

Carburador:

$$y = -0,5908 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0081939129x - 13,8962419659; R^2 = 0,910 \quad (7.32)$$

Tabela VE carburador:

$$y = -0,5966 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0073857942x - 7,0091267406; R^2 = 0,920 \quad (7.33)$$

Tabela VE carburador com ângulo fixo:

$$y = -0,2847 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,0046990077x - 3,8773660553; R^2 = 0,973 \quad (7.34)$$

Tabela VE otimizada:

$$y = -0,147 \cdot 10^{-7}x^2 + 0,0016609904x + 7,1046399326; R^2 = 0,695 \quad (7.35)$$

Tabela VE e de ignição otimizadas:

$$y = 0,10895 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,0110360726x - 11,4583343875; R^2 = 0,848 \quad (7.36)$$

7.5 Incerteza das medições

7.5.1 Binário

Esta grandeza foi calculada pelo mesmo método para todas as 3 diferentes configurações testadas. Observou-se que a célula de carga usada para este fim possuía um erro aleatório e para tal foram realizadas 10 medições com um peso de 500 gramas, do qual se conclui que a mesma apresenta um erro aleatório estimado em ± 10 gramas. Para calcular a incerteza relativa associada à melhor estimativa desta grandeza, proveniente principalmente da precisão finita dos instrumentos e do utilizador, foi necessário primeiramente determinar o desvio-padrão. Este foi estimado de acordo com uma média de valores obtidos pela célula de carga, para as diferentes velocidades e configurações testadas, e pode ser calculado pela equação (7.37) [40].

$$s = \sqrt{\frac{\sum \delta x_i^2}{(N-1)}}, \text{ onde } \delta x_i = x_i - \bar{x} \quad (7.37)$$

Onde “N” representa o tamanho da amostra, “ \bar{x} ” a média das leituras e “ x_i ” uma leitura em particular. Neste caso a incerteza associada ao valor médio obtido é o erro padrão, dado pela equação (7.38) [40].

$$\sigma_x = \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (7.38)$$

Após aplicação das equações (7.37) e (7.38) foi possível concluir que a incerteza relativa das leituras realizadas para o binário era de aproximadamente 8%.

7.5.2 Consumo

Para o caso particular do cálculo do consumo com injeção eletrónica, o procedimento adotado para o cálculo da incerteza relativa foi o mesmo que o descrito anteriormente para o binário e permitiu concluir que esta era de 4%. No cálculo do consumo feito para a configuração com carburador, dado que envolve a utilização de diversos instrumentos de medição, foi necessário calcular a propagação da incerteza relativa. Sendo que o consumo é dado pela massa de combustível consumido em função do intervalo de tempo decorrido, ou seja pelo quociente entre duas grandezas (função “f” dependente de “y” e “x”), a incerteza relativa é dada pela equação (7.39) [40].

$$\frac{\sigma_f}{f} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2} \quad (7.39)$$

Para esta situação em particular a incerteza relativa obtida foi de aproximadamente 3,5%.

8. Discussão dos resultados e conclusões

8.1 Discussão dos resultados

Neste subcapítulo procede-se ao levantamento de toda a informação possível de retirar e concluir dos dados obtidos e apresentados no capítulo 7. Importante referir que a discussão é feita a partir de resultados que apresentam uma coerência bastante satisfatória, com exceção da “Tabela VE otimizada” e da “Tabela VE e de ignição otimizadas” para os casos do rendimento total e do consumo específico. Neste casos em específico as linhas de tendência não se ajustam de forma muita aproximada aos pontos representados graficamente (Fig.7.19 e 7.20).

8.1.1 Carburador

Em relação aos testes realizados com a configuração original do motor, que possui um sistema de ignição por magneto e é alimentado por um carburador, é possível observar na figura 7.1 que o binário aumenta ao longo de todo o intervalo das velocidades do motor testadas, o que suporta o comportamento que seria de esperar numa situação de carga aproximadamente constante. Porém a função da linha de tendência, que mais se aproximou dos resultados obtidos para os ensaios, é logarítmica, ou seja, é a ideal quando a taxa de alteração dos dados aumenta ou diminui rapidamente e depois tende a estabilizar. Este não seria o comportamento expectável para a curva do binário a carga constante, cuja função que idealmente melhor descreveria o seu comportamento seria a exponencial onde as medidas aumentam a uma taxa cada vez mais alta. A função potencial, com aumento a taxa constante, também representaria uma aproximação razoável. Este fenómeno pode ser derivado da forma como o acelerador foi manipulado durante o funcionamento, sem o recurso ao sistema por cabo utilizado nas outras configurações testadas. A manipulação com a mão pode sempre resultar em algumas destas imprecisões, como o alívio ou aumento da carga aplicada na célula de carga e, conseqüentemente, do binário registado. Através da consulta do gráfico fornecido pelo fabricante (anexo M) é possível observar que às 5800 rpm o binário registado é de cerca de 1,64 N.m. Ora este valor é superior em cerca 50% ao registado experimentalmente de 1,11 N.m para as mesmas rpm, em WOT. Esta divergência pode ser devida a vários motivos tais como, o facto de o motor não se encontrar nas melhores condições e possuir já muitas horas de uso, os testes não terem sido realizados em condições de atmosfera padrão tais como nos meios laboratoriais (altitude do local onde foram realizados os testes), e devido a alguma imprecisão dos instrumentos de medição. Também não existe a garantia de que o carburador forneceu uma mistura estequiométrica no decorrer dos testes. Esta diferença entre os resultados obtidos e os apresentados pelo fabricante, no que toca à produção de binário, vai influenciar outras grandezas que se encontram dependentes, como o caso do consumo específico e da potência efetiva.

O consumo de combustível assumiu, na figura 7.2 um comportamento de crescimento exponencial com o aumento da velocidade do motor, como seria de esperar teoricamente. Ou seja, com a abertura da borboleta o caudal de ar que dá entrada no motor aumenta bem como o consumo de combustível. O valor de R^2 de 0,983 espelha bem a elevada aproximação dos dados à linha de tendência exponencial.

8.1.2 Injeção eletrónica

Binário

Nos testes realizados com a configuração de injeção eletrónica e ignição por magneto as conclusões retiradas das figuras 7.3 e 7.4 foram esclarecedoras do efeito da integração deste sistema em relação à configuração original. A tabela relativa à eficiência volumétrica que foi inicialmente gerada, figura 7.7, com recurso à ferramenta disponibilizada para o efeito no *software* TunerStudio MS, contém uma distribuição bastante uniforme para toda a gama de funcionamento e serviu como base para uma tabela que permitisse obter uma prestação semelhante à original, para meios de comparação. É possível constatar que o binário produzido pelo motor com a “tabela VE gerada” é consideravelmente inferior ao da sua configuração original, em cerca de 25%, restringindo igualmente a gama de funcionamento do motor até às 5100 rpm. Isto é resultado, naturalmente, de uma eficiência volumétrica baixa, ou seja foi necessário aumentar o volume de ar- combustível que dá entrada no cilindro a cada ciclo para igualar a prestação do carburador. Tal deu origem à respetiva “tabela VE carburador”, figura 7.8, que foi possível de obter graças a um aumento de cerca de 16% da eficiência volumétrica. O aumento da eficiência foi superior para as velocidades mais elevadas, resultado da maior diferença entre binários. No caso da “tabela VE otimizada”, figura 7.9, os valores da eficiência volumétrica foram aumentados em 7% em relação à “tabela VE carburador”. Este aumento apesar de não ter sido muito acentuado, por se ter adotado uma abordagem conservadora devido ao estado imprevisível do motor, permitiu um ganho substancial de binário de 20%, atingindo em WOT os 1,3 N.m. Observa-se portanto um comportamento exponencial do binário em relação ao aumento da eficiência volumétrica. Este facto explica a razão pela qual os motores atualmente com a mesma cilindrada conseguem produzir um binário muito mais acentuado, devido principalmente à introdução do turbo. O comportamento de ambos os 3 casos foi o expectável, porém apenas o comportamento exponencial da linha de tendência da “tabela VE gerada” é o que mais se aproxima do previsto a nível teórico.

No gráfico da figura 7.4 referente à implementação da tabela VE que permite simular aproximadamente a afinação que é feita a um motor de aeronave, figura 7.10, é possível observar o seu comportamento em relação à “tabela VE carburador”. Tal como pretendido, para baixas rotações, foi possível implementar uma mistura mais pobre (VE menor), e para altas rotações implementou-se uma mistura mais rica (VE mais elevado). Isto demonstra a flexibilidade do sistema na implementação deste tipo de regimes de funcionamento, o que se

revela ser uma das maiores vantagens. Do que foi inicialmente idealizado, passando para os resultados obtidos na prática, apenas a tentativa de estabelecer uma mistura estequiométrica entre as 2700 e as 3000 rpm, e o facto de a transição entre mistura rica e pobre não ocorrer exatamente às 4000 rpm, falhou. Tal pode ser explicado pela introdução de uma linha de tendência polinomial de grau 3, de forma a melhor evidenciar a transição entre regimes, onde as transições bruscas de binário não serão tao evidentes e sim suavizadas. A “tabela VE voo” é constituída basicamente por segmentos retirados das tabelas de outros ensaios já realizados, sendo a parte da mistura pobre retirada da “tabela VE gerada”, a estequiométrica da “tabela VE carburador”, e a rica da “tabela VE otimizada”. Importante observar também que, com a introdução da injeção eletrónica, foi possível alargar a gama de funcionamento, à exceção da “tabela VE gerada”, através da obtenção de um ralenti estável às 2200 rpm. A obtenção de um ralenti a uma menor velocidade é possível graças à obtenção de um caudal mínimo de ar menor, do que aquele que é praticado pelo carburador. É possível observar que a carga constante o ponto de funcionamento do motor só se desloca ao longo de uma linha diagonal da tabela VE, ao contrário do que ocorre com carga variável em que se desloca ao longo de toda a tabela.

Consumo

Em geral é evidenciada a razão exponencial que existe entre o consumo de combustível e a velocidade do motor adotada, ao contrário da “tabela VE otimizada” que é representada por uma linha de tendência potencial. O gráfico mais relevante será o que compara o consumo do motor na sua configuração original, figura 7.5, e na configuração com injeção eletrónica, onde é evidente um decréscimo considerável no consumo de combustível para a produção dos mesmos níveis de binário. Esta descida no consumo foi quantificada em aproximadamente 23% em relação ao consumo original, resultado de um fornecimento mais eficiente e ajustado às condições. A diferença entre consumos é mais evidente para velocidades mais baixas, onde a eficiência volumétrica é naturalmente também mais baixa e conseqüentemente injeta menos combustível.

No segundo gráfico, figura 7.6, o que mais se evidencia será a razão de proporcionalidade direta entre a eficiência volumétrica e o consumo de combustível. Por exemplo, no regime da “tabela VE otimizada” o consumo de combustível é mais elevado do que para a “tabela VE carburador”, em apenas 5% e obtendo um ganho de binário de 20%. No ralenti, o consumo da “tabela VE otimizada” é mais baixo, apesar da maior eficiência volumétrica nestes pontos, em comparação com o da “tabela VE carburador”. Pode dever-se ao facto de o motor ter realizado os ensaios da “tabela VE carburador” num dia de clima mais frio (diferença de 11 graus celsius), influenciando o consumo. O consumo com a “tabela VE gerada” é 24% mais baixo que com a “tabela VE carburador”, resultado novamente de pontos com menor eficiência volumétrica. Já para o caso da “tabela VE voo” as variações no consumo acompanham as variações na produção de binário, possuindo menor consumo que a “tabela VE carburador” para velocidades baixas e

maior para velocidades do motor elevadas. Chega mesmo a possuir um consumo a WOT superior ao da “tabela VE otimizada”, devido provavelmente à variação súbita de regime.

8.1.3 Injeção e ignição eletrônicas

No gráfico da figura 7.11, é possível verificar a influência que a introdução do sistema eletrônico de ignição e a introdução de um ângulo de avanço à ignição variável possuem na produção de binário. As diferenças entre os casos só são visíveis para velocidades do motor mais elevadas. Para a “tabela VE carburador” com ignição eletrônica e definido o ângulo fixo original de 27 graus antes do PMS, é possível observar que o binário produzido é ligeiramente inferior ao da “tabela VE carburador”, chegando apenas às 5700 rpm em WOT. Esta diferença de prestação pode dever-se ao facto de o ângulo de avanço à ignição não se encontrar exatamente nos 27 graus e de o tempo de carregamento da bobina ser constante, ao contrário do que ocorre com a ignição por magneto. Quando se aplica a “tabela VE carburador” em conjunto com uma tabela de avanço à ignição gerada, de acordo com as propriedades do motor, o binário obtido é cerca de 3% inferior à da “tabela VE carburador” sem ignição eletrônica e a velocidade alcançada em WOT de 5600 rpm. Como é possível observar na figura 7.15, a tabela aí representada apresenta os valores dos ângulos de avanço à ignição implementados, rodeados pela elipse, que se revelaram não se tratarem dos mais adequados para o motor. Para velocidades elevadas (a partir das 3100 rpm) o ângulo de avanço mostrou ser elevado demais, pois o comportamento do motor era instável e apresentava um ruído típico de detonação. Para velocidades mais baixas o funcionamento era mais estável e similar ao obtido com ângulo de avanço fixo de 27 graus.

Adotando uma abordagem conservadora obteve-se uma melhoria bem-sucedida da “tabela VE otimizada”, representada no gráfico 7.12, através de sucessivas afinações da tabela de avanço à ignição, figura 7.16. Foi possível aumentar a produção de binário em 7% em relação ao da “tabela VE otimizada”, adotando um tempo de carregamento da bobina mais pequeno e aplicando incrementos aos ângulos de avanço à ignição de forma ponderada. Este gráfico é de extrema importância por demonstrar que através da manipulação do ângulo de ignição o melhoramento de *performance* é alcançável, através da ignição da mistura próximo do ponto de potência máxima. Na figura 7.17 fica evidenciada uma pequena experiência que permite concluir que nem sempre o ângulo de avanço à ignição mais elevado, perto do limite da detonação, é o ponto de *performance* máxima. A área rodeada pela elipse, figura 7.16, representa os valores dos ângulos de avanço à ignição adotados, com base também no que foi observado com a tabela de ignição gerada. Seria de esperar ser possível praticar ângulos de avanço à ignição mais elevados sem ocorrência de detonação, o que demonstra algumas limitações do sistema de ignição eletrônico introduzido.

Consumo

A nível do consumo observa-se na figura 7.13 que as linhas correspondentes à “tabela VE carburador” com ignição eletrónica de ângulo fixo e com ângulo variável, se encontram basicamente entre a linha da “tabela VE carburador” sem ignição eletrónica e da configuração com carburador. A “tabela VE carburador” com ângulo variável chega mesmo a superar o consumo realizado na configuração com carburador. Este fato pode ser explicado pelo funcionamento irregular do motor nesta fase e pelos fenómenos de detonação, que provocam oscilações no fornecimento de combustível. Referente ao gráfico 7.14, é possível observar que o consumo obtido com a “tabela VE e de ignição otimizadas” é muito semelhante ao da “tabela VE otimizada”, intercalando com esta última. Para rotações mais baixas (até 3300 rpm) e mais altas (a partir das 5400 rpm) o consumo com a ignição otimizada é maior, e para rotações intermedias menor. Porém a diferença entre os dois consumos é muito reduzida, e por esse mesmo motivo praticamente insignificativa. Importante referir que estes testes foram realizados a uma temperatura atmosférica com cerca de 8 graus celsius de diferença para os testes de consumo com as outras configurações, o que inflaciona de certa forma o consumo obtido. Para a produção do mesmo binário naturalmente que com ignição eletrónica o consumo foi menor, resultado da ignição da mistura num ponto mais próximo da eficiência máxima.

8.1.4 Outros parâmetros

Potência efetiva

Iniciando-se pelo gráfico referente à potência efetiva (Fig. 7.18), constata-se que esta grandeza aumenta ao longo de todo o intervalo de velocidades testadas, sendo a função da linha de tendência que mais se aproxima dos resultados uma função polinomial de segundo grau. Como seria de esperar, as linhas correspondentes ao carburador e à “tabela VE carburador” são praticamente coincidentes, devido à estreita relação desta grandeza com o binário, sendo capaz de produzir a WOT cerca de 0,92hp. Já a linha corresponde à “tabela VE otimizada” apresenta um ganho de potência efetiva de 20%, produzindo a WOT aproximadamente 1.03hp. Para o caso da tabela VE e de ignição otimizadas o ganho de potência em relação ao carburador é de 33%, apresentando 1,1hp para WOT. Na tabela 8.1 é possível observar os valores obtidos para a potência efetiva, em WOT, para as diferentes configurações testadas.

Tabela 8.1: Potência efetiva, produzida em WOT, para cada configuração.

Configuração	Potência efetiva [hp]
Carburador	0,91
Tabela VE carburador	0,93
Tabela VE otimizada	1,03
Tabela VE e de ignição otimizadas	1,1

Consumo específico

A tendência do consumo específico será a de diminuir com a velocidade do motor na forma de uma função polinomial de grau 2, o que é um indicador de que a potência efetiva produzida pelo motor aumenta a um maior ritmo que o respectivo consumo de combustível. Observa-se, na figura 7.19, que o consumo específico do carburador é o mais elevado de todos os representados, apenas igualado, para velocidades a partir das 4800 rpm, pela “tabela VE carburador com ângulo fixo”. O consumo específico da “tabela VE carburador” resultou mais baixo que estes dois últimos referidos, com uma diminuição de 25%. As linhas correspondentes à “tabela VE carburador otimizada” e à “tabela VE e de ignição otimizadas”, obtiveram um consumo específico mais reduzido aproximando-se para velocidades elevadas da “tabela VE carburador”. A “tabela VE e de ignição otimizadas” obteve um consumo específico mais elevado que o da “tabela VE carburador” para baixas velocidades (2200 a 3200 rpm) e menor para o resto do intervalo. Apresenta uma redução de 32% em relação ao carburador, tal como a “tabela VE otimizada”. Seria de esperar que a “tabela VE e de ignição otimizadas” apresentasse um consumo específico menor ao da “tabela VE otimizada”, para todo o regime de velocidades.

Rendimento

Tendência para aumentar constantemente, à exceção da linha de tendência da tabela VE e de ignição otimizadas sob a forma de uma função polinomial de segundo grau. Basicamente observa-se, na figura 7.20, uma situação inversa à do consumo específico, verificando-se uma relação quase inversamente proporcional. Como seria de esperar o carburador apresenta o rendimento mais baixo, apenas próximo da “tabela VE carburador com ângulo fixo”. A “tabela VE carburador” apresenta um ganho no rendimento, chegando mesmo a aproximar-se das duas curvas otimizadas para as velocidades mais elevadas. A linha da “tabela VE e de ignição otimizadas” apresenta o rendimento máximo, sendo apenas inferior ao da “tabela VE otimizada” para velocidades até 3000 rpm e em WOT. Em relação ao carburador, a “tabela VE otimizada” apresenta uma melhoria no rendimento de aproximadamente 45% e a “tabela VE e de ignição otimizadas” de 54%. Os valores obtidos para o rendimento do motor, apesar de serem consideravelmente baixos, estão de acordo com grande parte dos valores típicos observados para este tipo de motor de combustão interna, como pode ser observado na tabela 8.2 em WOT.

Tabela 8.2: Rendimento total, alcançado em WOT, para cada configuração.

Configuração	Rendimento total [%]
Carburador	13,75
Tabela VE carburador	15,75
Tabela VE otimizada	16,24
Tabela VE carburador com ângulo fixo	13,25
Tabela VE e de ignição otimizadas	15,9

8.2 Conclusões e trabalhos futuros

8.2.1 Conclusões

Adotando uma visão do panorama geral do que consistiram os ensaios experimentais e dos respectivos resultados obtidos podemos afirmar que estes últimos validam experimentalmente os fundamentos teóricos inicialmente apresentados, neste caso em específico para um motor de baixa cilindrada. Apesar de algumas divergências existentes entre as linhas de tendência que melhor explicam os dados obtidos, torna-se clara a conclusão de que todas estas grandezas medidas e calculadas evoluem num só sentido ao longo do intervalo de velocidades quando o motor opera com carga aproximadamente constante. Ou seja, em todo o intervalo, as grandezas aumentam ou diminuem de forma consistente, a uma taxa que aumenta ou se mantém constante, ao contrário do que acontece quando a carga é variável. Em relação aos valores obtidos na configuração original, e comparando-os com os gráficos desenvolvidos pelo fabricante, chega-se à conclusão que a performance é inferior à que deveria ser teoricamente obtida, principalmente devido às condições de uso do motor. Por este motivo todos os dados calculados não podem ser comparados com outros dados relativos da literatura que possam existir, referentes a alterações deste motor em específico. A incerteza associada à leitura do binário produzido é principalmente proveniente de vibrações provocadas pelo motor, mais acentuadas para velocidades baixas, e à própria precisão da célula de carga.

As vantagens da implementação dos sistemas de injeção e de ignição eletrónicas é evidenciada pelos ganhos na prestação em relação ao que foi inicialmente observado. Podemos concluir que a prestação mais otimizada é obtida com a implementação dos dois sistemas em simultâneo, que se evidencia principalmente a nível do binário, rendimento e potência efetiva. Em relação ao consumo este é muito similar ao obtido com o sistema de injeção eletrónico, com algumas diferenças resultantes das divergências observadas para as condições atmosféricas. Mas é preciso ter em consideração que a produção de binário é maior, ou seja para o mesmo binário produzido o consumo com a ignição eletrónica será menor. A maior inconsistência experimental, que se revelou ser bastante limitativa, prende-se com o sistema de ignição eletrónico, onde teoricamente deveria ser possível implementar um maior incremento no ângulo de avanço à ignição sem a ocorrência de detonação. Seria também de esperar um aumento da velocidade do motor máxima com a introdução da injeção e ignição eletrónica, o que não se veio a verificar provavelmente devido a uma limitação do sistema de fornecimento de combustível ou do tempo de carregamento da bobina. É possível observar que nas tabelas VE e do ângulo de avanço à ignição os pontos de funcionamento do motor se deslocam ao longo de uma diagonal do mapa, com o aumento das rpm e da pressão absoluta no coletor de admissão. Isto deve-se ao facto do acelerador ser variável e da carga aplicada ser constante, para todo o regime de funcionamento. A instalação apenas do sistema de injeção eletrónica apresenta igualmente grandes melhorias nos parâmetros de estudo, expandido mesmo a gama

de funcionamento do motor. São bastante evidentes as melhorias a nível de *performance* que a introdução destes sistemas traz ao motor, bem como a grande capacidade de adaptação às condições de funcionamento requeridas. Porém existe igualmente um incremento proporcional ao nível da complexidade, tamanho e peso do sistema. Estes fatores são eles também fundamentais no ramo aeronáutico, não sendo possível prever de forma exata qual a influência que cada um destes parâmetros teria na prestação em voo.

8.2.2 Aspetos a melhorar e trabalhos futuros

Existe uma grande e variada gama de possibilidades no que diz respeito à realização de trabalhos futuros relacionados com o tema na qual esta dissertação se debruça. Igualmente muitas são as melhorias possíveis de implementar, por forma a apresentar resultados mais precisos e estudar outros regimes de funcionamento e procedimentos experimentais.

A utilização da sonda lambda tornaria possível controlar de forma eficaz a razão ar/combustível da mistura que dá entrada no motor. Ou seja, a integração deste sensor na montagem experimental permitiria utilizar as tabelas AFR disponibilizadas no *software* TunerStudio MS, onde são definidas as razões ar/combustível objetivo e conseqüentemente afinam, no decorrer do funcionamento do motor, a tabela VE de acordo com estes objetivos propostos. Há uma noção se o motor está a ser alimentado por uma mistura rica, pobre ou estequiométrica, sendo alcançáveis performances ainda mais otimizadas. Existem dois tipos de sensores de oxigénio, com banda larga e estreita. Um sensor com banda estreita apenas dá a conhecer se a mistura é estequiométrica, rica ou pobre, não especificado valores acerca do quão pobre ou rica é. Para o caso específico desta experiência seria mais aconselhável utilizar um sensor com banda larga, que sendo mais sofisticado permite dar a conhecer o valor exato da razão ar/combustível e obter leituras mais rapidamente. A aplicação de um sensor de detonação representaria igualmente uma melhoria considerável, principalmente na parte experimental relativa à afinação do ângulo de avanço à ignição, em que o motor é levado habitualmente ao limite da detonação. Traz benefícios em relação à manutenção da integridade do motor, a nível de segurança e na otimização da ignição. Ainda ligada à parte referente à afinação do ângulo de avanço à ignição, a utilização de uma lâmpada de ponto "*timing light*" permite verificar de forma mais precisa o ângulo de avanço na qual o motor está a operar, melhorando conseqüentemente toda a eficiência do processo de calibração. Outro procedimento que deveria ter sido adotado, como forma de obter uma maior coerência nos resultados obtidos e minimizar as incertezas devido à divergência das condições atmosféricas, seria a normalização das condições atmosféricas, a nível de temperatura e pressão, para as da atmosfera padrão. Este método exige a medição não só da temperatura bem como da pressão, no momento em que são realizados os testes, e a aplicação das fórmulas apropriadas. A utilização de um dinamómetro, apropriado para motores de pequenas dimensões, representaria uma boa adição à montagem experimental, permitindo obter valores mais precisos, e conseqüentemente diminuir a incerteza das medições realizadas. Instalar uma célula de carga mais precisa, ou

desenvolver um engenho mais prático para substituir o dinamómetro é uma ideia interessante a ter igualmente em conta. No procedimento experimental, relativo à configuração com carburador, teria sido mais aconselhável usar um mecanismo para o acelerador semelhante ao usado para as restantes duas configurações, de forma a promover uma diminuição do erro das medições.

De entre as diversas possibilidades na realização de trabalhos futuros são destacadas as de maior relevância. Para uma maior precisão e grande melhoramento a nível de segurança seria interessante proceder-se ao desenvolvimento de um compartimento, provavelmente constituído por acrílico, específico para permitir o manuseamento e teste de motores de pequenas dimensões no seu interior, sob uma atmosfera controlada e estabelecendo uma barreira física entre o utilizador e o motor. Esta condição permitiria aproximar as condições à da atmosfera padrão, típicas nos testes realizados pelos fabricantes de motores, e manter uma base de dados de comparação, entre diversos testes realizados, consistente. A introdução de um sensor para avaliar as percentagens de cada um dos gases emitidos pelo motor nas diferentes configurações e a utilização de diversas hélices com diferentes diâmetros e passos, de forma a alargar a gama de velocidades do motor testadas, são outras propostas interessantes. Examinar uma maior gama de regimes de funcionamento de forma a obter resultados mais abrangentes e esclarecedores, como no caso específico do consumo de combustível na configuração com ignição eletrónica, revela-se como mais um ponto possível a considerar. No caso concreto da ignição eletrónica, seria interessante verificar qual a influência que um tempo de carregamento da bobina variável, para o intervalo de velocidades, teria na produção de binário. Finalmente a proposta de introduzir o motor, com as diferentes configurações, num UAV e testá-lo, comparando os respetivos resultados, seria na opinião do autor a componente experimental mais interessante de ser testada.

Bibliografia

- [1] R. Stone, (1992). *Introduction to Internal Combustion Engines*. 2ª Edição, THE MACMILLAN PRESS LTD. Brunel University, Uxbridge. Londres. 4, 9, 12, 18, 22
- [2] J. B. Heywood, (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 1ª Edição, McGraw-Hill, Inc. Michigan University. EUA. 4, 7, 8, 14, 15, 16, 18, 19, 23
- [3] R. V. Basshuysen, e F. Schäfer, (2004). *Internal Combustion Engine Handbook: Basics, Components, Systems and Perspectives*. 1ª Edição, SAE International. Traduzido da edição original em língua alemã, *Handbuch Verbrennungsmotor*. Warrendale. 4, 7, 8, 14, 15, 16, 17, 18, 19
- [4] W. W. Pulkrabek, (1997). *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engines*. 1ª Edição, Prentice Hall. University of Wisconsin, Platteville. Nova Jérсия. 5, 21, 22, 23
- [5] C. R. Ferguson e A. T. Kirkpatrick, (2001). *Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences*. 2ª Edição, John Wiley & Sons, Inc. Mechanical Engineering Department, Colorado State University. Nova Iorque. 7, 8, 16, 17
- [6] “Testing the Performance of Model Engines” [Online]. Disponível: <https://www.mh-aerotoools.de/airfoils/engingepformance.htm> (Acedido em: 2017-10-15). 9
- [7] J. Martins, (2011). *Motores de combustão interna*. 3ª Edição, Publindústria, Edições Técnicas. Universidade do Minho. Porto. 9, 10, 12, 13, 17, 18, 19, 20, 21, 23
- [8] “Principles of Tuning Programmable EFI Systems” [Online]. Disponível: <http://www.megamanual.com/begintuning.htm> (Acedido em: 2017-08-12). 11, 23
- [9] D. Rocha e D. Correia, “Utilização de sensores na indústria automóvel,” Tech. Rep., 2012. 11, 13, 18
- [10]. P. N. Botsaris e A. Poluhroniadis, “Microprocessor controlled exhaust gas lambda sensor,” *Microprocessors and Microsystems*, vol. 24, pp. 121-127, jun 2000. 13
- [11] Z. Wang, H. Liu e R. D. Reitz, “Knocking combustion in spark-ignition engines,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 61, pp. 78-112, jul 2017. 13
- [12] Y. Jiang, G. Ren, B. Liu e B. Pi, “A Study of Electronic Control Unit (ECU) Design and Hybrid Simulation for Motorcycle Engine,” in *SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Congress*, 2008. 13
- [13] A. Kolchin e V. Demidov, (1984). *Design of Automotive Engines*. 2ª Edição, Mir Publishers. Traduzido da edição original em língua russa. Moscovo. 15

- [14] P. Bares, D. Selmanaj, C. Guardiola e C. Onder, “A new knock event definition for knock detection and control optimization,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 131, pp. 80-88, feb 2018. 19
- [15] “Electronic Ignition Systems” [Online]. Disponível: http://arrc.ebscohost.com/ebsco_static/repair-tips/8852CH13_ELECTRONIC_IGNITION_SYSTEMS.htm (Acedido em: 2017-09-14). 21
- [16] “Bosch Auto Parts - Motronic” [Online]. Disponível: http://br.bosch-automotive.com/en/internet/parts/parts_and_accessories_2/motor_and_sytems/benzin/injection_system/motronic/motronic_1.html (Acedido em: 2017-07-23). 22
- [17] “A High-energy Capacitor Discharge Ignition system” [Online]. Disponível: <http://www.molla.org/DIY-CDI/SC-DIY-CDI-article-hires.pdf> (Acedido em: 2017-11-03). 22
- [18] E. Sendzikiene, A. Rimkus, M. Melaika, V. Makareviciene e S. Pukalskas, “Impact of biomethane gas on energy and emission characteristics of a spark engine fuelled with a stoichiometric mixture at various ignition advance angles,” *The Science and Technology of Fuel and Energy*, vol. 162, pp. 194-201, dec 2015. 23
- [19] “Creating an Initial Spark Table for Tuning” Disponível: <http://www.useasydocs.com/theory/spktable.htm> (Acedido em: 2017-10-28). 25
- [20] “Owner’s Manual GX22-GX31,” *Honda Engines*, 2003 [Online]. Disponível: <http://cdn.powerequipment.honda.com/engines/pdf/manuals/31zm3613.pdf> (Acedido em: 2017-09-08). 27, 28
- [21] A. J. Brezina e S. K. Thomas, “Measurement of static and dynamic performance characteristics of small electric propulsion systems,” *Department of Mechanical and Materials Engineering*, Wright State University, Dayton, Ohio 45435. 28
- [22] “Introduction to the MegaSquirt® EFI Controller” [Online]. Disponível: <http://www.megamanual.com/v22manual/mintro.htm#what> (Acedido em: 2017-06-15). 29
- [23] “Extraefi.co.uk” [Online]. Disponível: <http://www.extraefi.co.uk/> (Acedido em: 2017-06-17). 29
- [24] “Megasquirt Product Comparison” [Online]. Disponível: <http://www.msextra.com/feature-xref.html> (Acedido em: 2017-09-23). 29
- [25] “What is a MegaSquirt® EFI Controller?” [Online]. Disponível: <http://www.megamanual.com/MSFAQ.htm#whatis> (Acedido em: 2017-06-15). 30
- [26] “MegaLogViewer MS” [Online]. Disponível: <https://www.efianalytics.com/MegaLogViewer/> (Acedido em: 2017-12-14). 30
- [27] “S3 and S4 Hall Effect Sensor - Installation and Setup Procedure,” *Haltech Engine Management Systems*, [Online]. Disponível: <http://www.haltech.com/wp-content/uploads/2011/01/S3-S4-Hall-Sensor-setup1.pdf> (Acedido em: 2017-08-24). 31, 46, 50

- [28] “EcoEFI Fuel Injector - Technical Spec,” ECOTRONS LLC, [Online]. Disponível: <http://www.ecotrons.com/files/ECOTRONS%20Fuel%20Injector%20technical%20spec.pdf> (Acedido em: 2017-11-18). 32, 66
- [29] “EcoEFI Small Size Fuel Pump - Technical Spec,” ECOTRONS LLC, [Online]. Disponível: <http://www.ecotrons.com/files/ECOTRONS%20Small%20Size%20Fuel%20Pump%20technical%20spec.pdf> (Acedido em: 2017-11-15). 32, 55
- [30] “Honda GX35 Installation Manual - Conversion Kit” ECOTRONS LLC, [Online]. Disponível: <https://www.ecotrons.com/files/Ecotrons%20EFI%20installation%20manual%20for%20Honda%20GX35.pdf> (Acedido em: 2017-04-03). 33, 43, 46
- [31] “Honda GX35 Engine Fuel Injection Kit” [Online]. Disponível: http://www.ecotrons.com/products/honda_gx35_engine_fuel_injection_kit/ (Acedido em: 2017-10-26). 33
- [32] PCB Piezotronics, “Load Cell Technical Information,” Tech. Rep., 2006. 44
- [33] “Getting Started with Load Cells” [Online]. Disponível: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/getting-started-with-load-cells> (Acedido em: 2017-06-16). 45
- [34] “Arduino Nano” [Online]. Disponível: <https://store.arduino.cc/arduino-nano> (Acedido em: 2017-06-16). 45
- [35] “Arduino: Celula de Carga + Hx711” [Online]. Disponível: <https://www.robocore.net/modules.php?name=Forums&file=viewtopic&t=5757> (Acedido em: 2017-06-16). 45
- [36] “Arduino Nano and Visuino: Measure Weight With HX711 Load Cell Amplifier and ADC” [Online]. Disponível: <http://www.instructables.com/id/Arduino-Nano-and-Visuino-Measure-Weight-With-HX711/> (Acedido em: 2017-06-20). 45
- [37] “SR PASSIVES NTCM-100K-B3950” [Online]. Disponível: <https://www.tme.eu/es/details/ntcm-100k-b3950/termistores-ntc-de-medicion-tht/sr-passives/> (Acedido em: 2017-07-03). 47
- [38] “Honda GX31 Specs” [Online]. Disponível: <https://itstillruns.com/honda-gx31-specs-7602285.html> (Acedido em: 2017-08-03). 59
- [39] “V3 MicroSquirt® - QuickStart Guide” [Online]. Disponível: <http://www.useasydocs.com/theory/setdwell.htm> (Acedido em: 2017-09-11). 60
- [40] “Introduction to Measurements & Error Analysis” [Online]. Disponível: <https://physics.unc.edu/files/2012/10/uncertainty.pdf> (Acedido em: 2018-01-20). 77
- [41] “ExtraEFI Wiring Diagram,” *Wiring Loom Single VR*, Tech. Rep., 2011. 100
- [42] “GX31 Engine Performance Curves (courtesy of Honda-Engines Website)” [Online]. Disponível: <http://www.me.sc.edu/research/AARG/images/AARG/Camless%20Page2.htm> (Acedido em: 2017-11-17). 102

Anexos

Anexo A

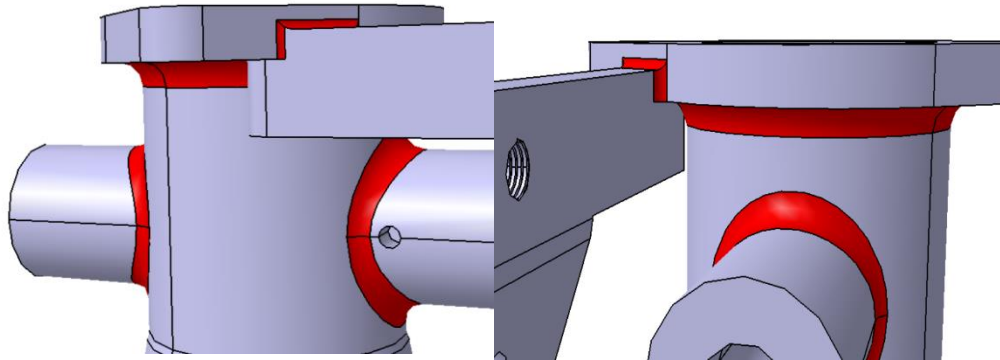


Figura A.1: Ilustração gráfica, concebida no CATIA V5, das soldaduras realizadas no corpo do acelerador.

Anexo B - Ilustração gráfica da montagem do corpo do acelerador e do respetivo adaptador.

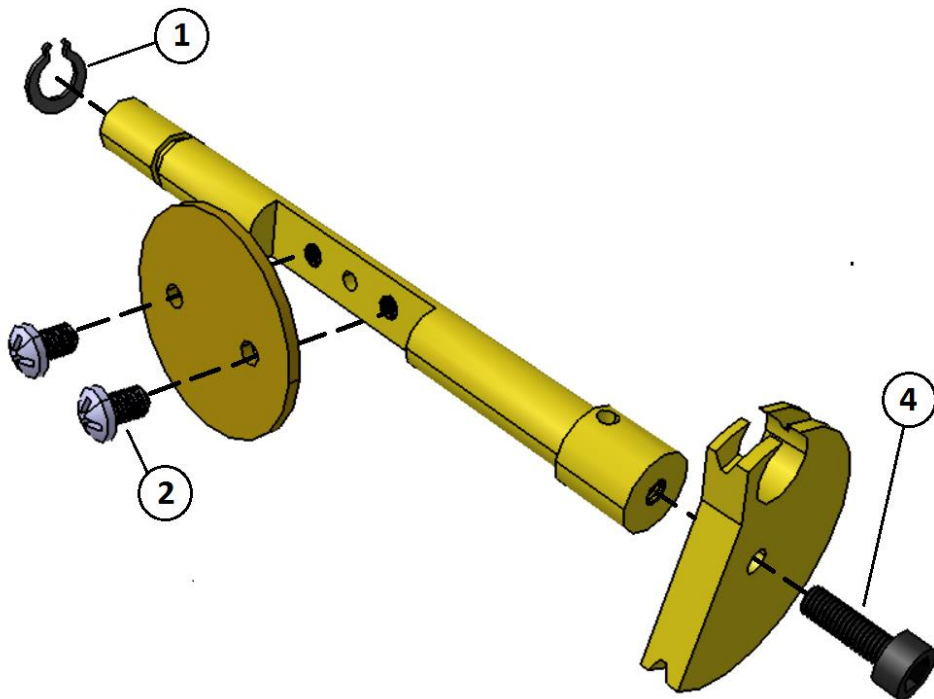


Figura B.1: Ilustração gráfica, concebida no CATIA V5, da montagem do sistema da borboleta.

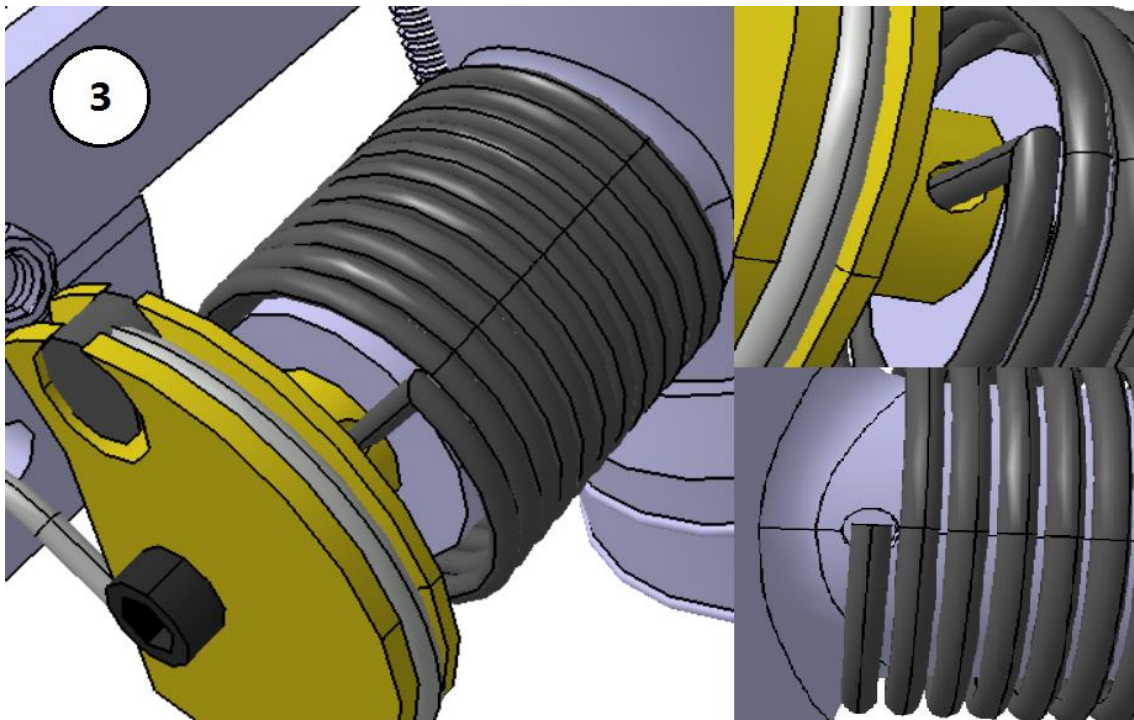


Figura B.2: Ilustração gráfica, concebida no CATIA V5, da montagem e posicionamento da mola.

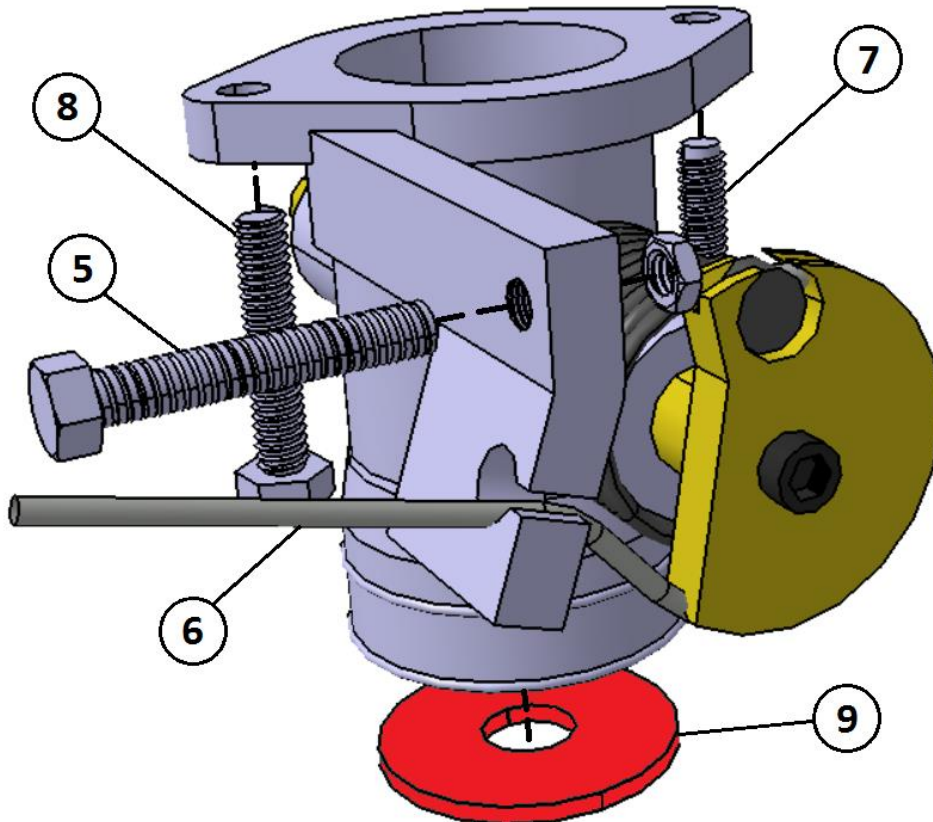


Figura B.3: Ilustração gráfica, concebida no CATIA V5, da montagem do corpo do acelerador.

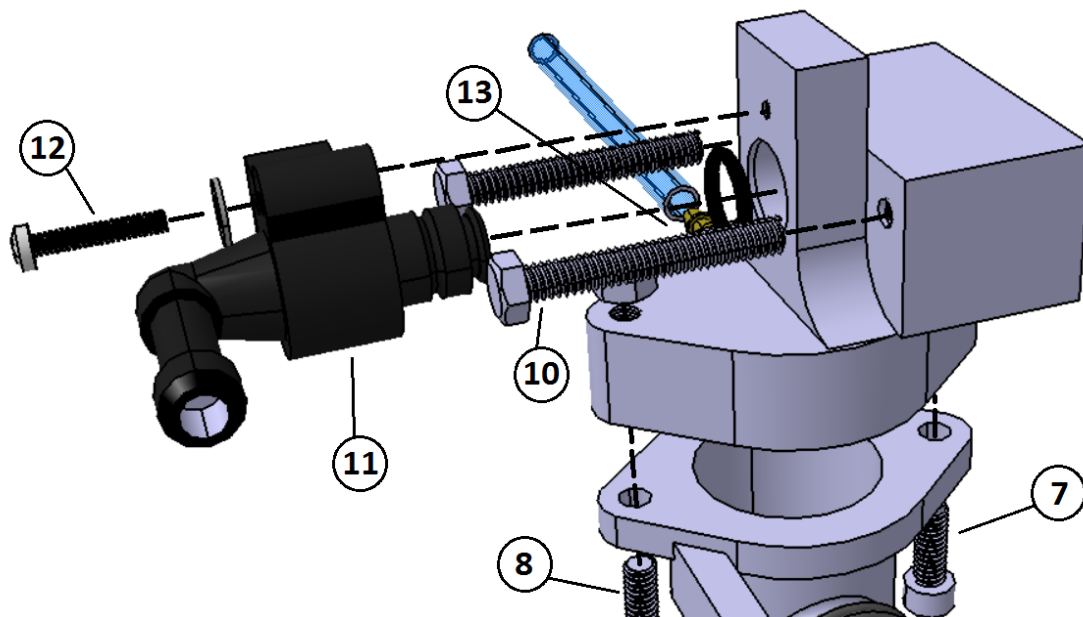


Figura B.4: Ilustração gráfica, concebida no CATIA V5, da montagem do adaptador e da sua fixação ao corpo do acelerador.

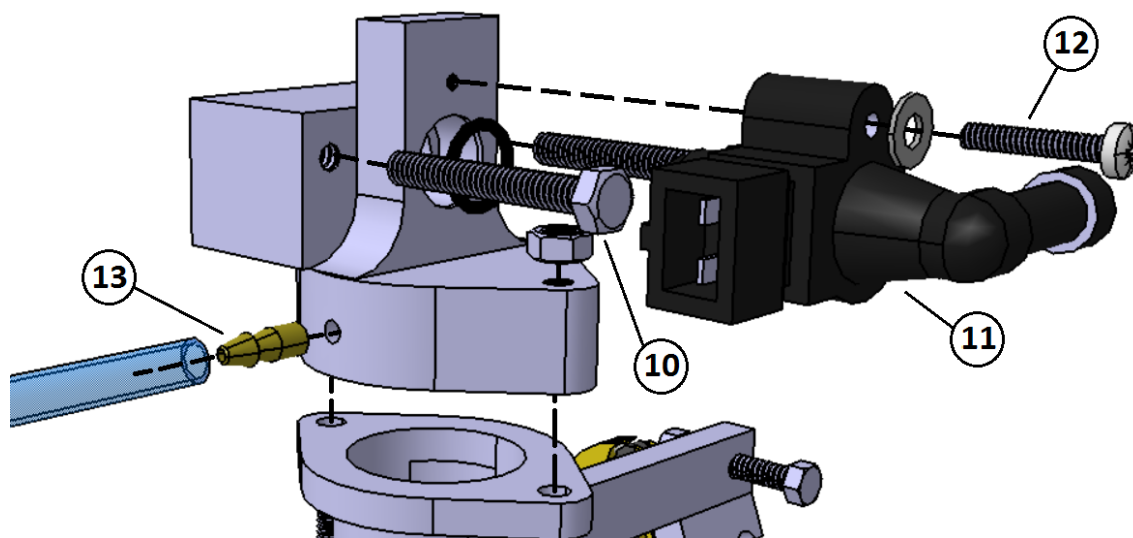


Figura B.5: Ilustração gráfica, numa segunda perspetiva concebida no CATIA V5, da montagem do adaptador e da sua fixação ao corpo do acelerador.

Anexo C

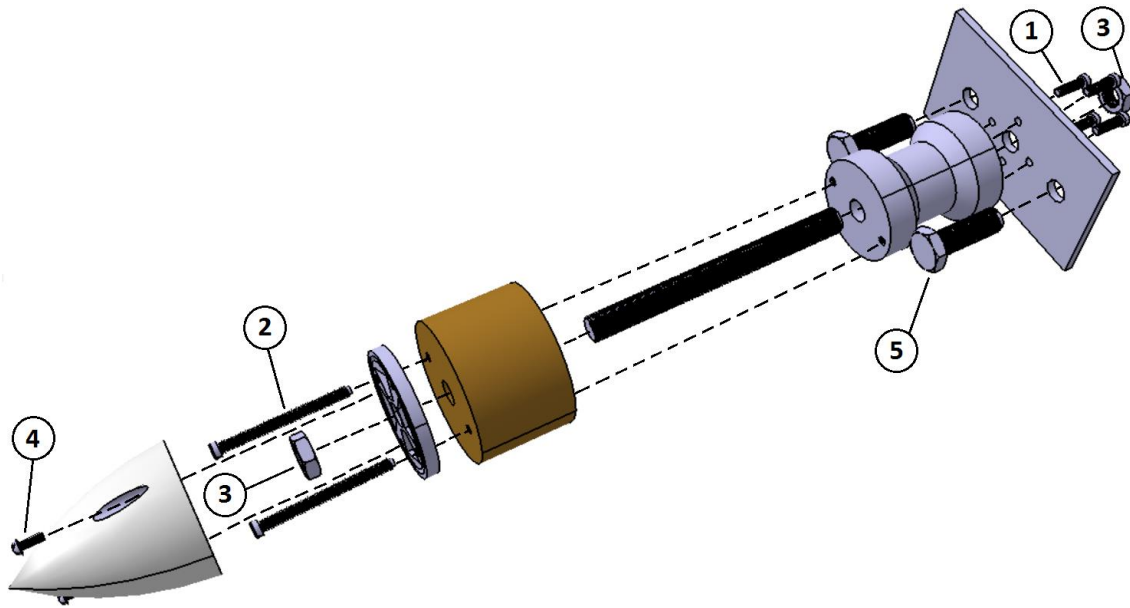


Figura C.1: Ilustração gráfica, concebida no CATIA V5, da montagem do sistema de adaptação da hélice.

Anexo D

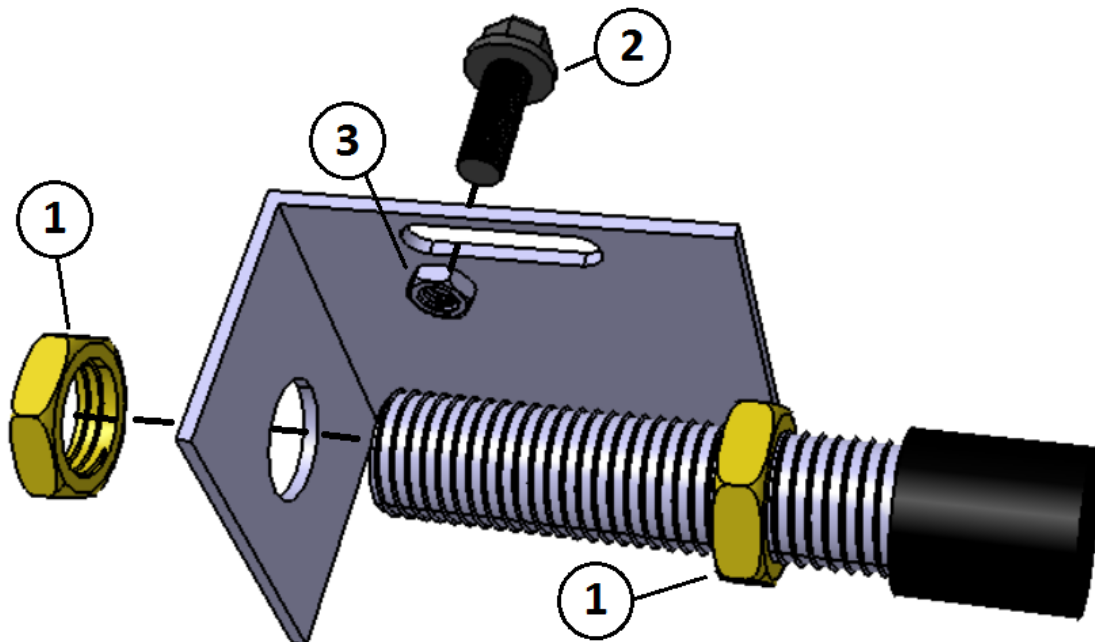


Figura D.1: Ilustração gráfica, concebida no CATIA V5, da montagem do sensor de Hall.

Anexo E

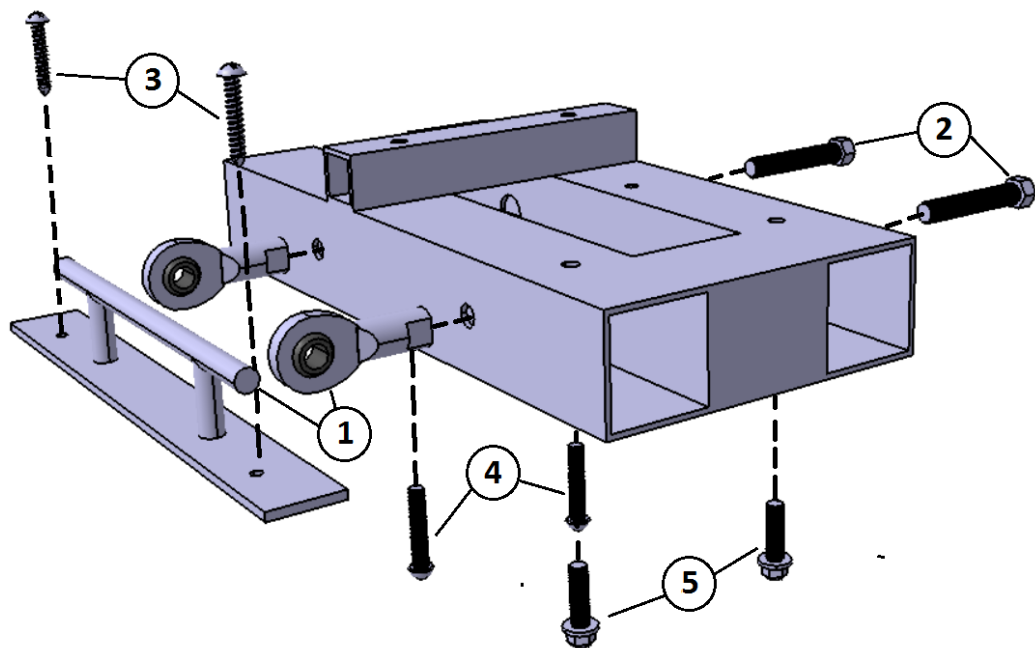


Figura E.1: Ilustração gráfica, concebida no CATIA V5, da montagem do banco de ensaios.

Anexo F

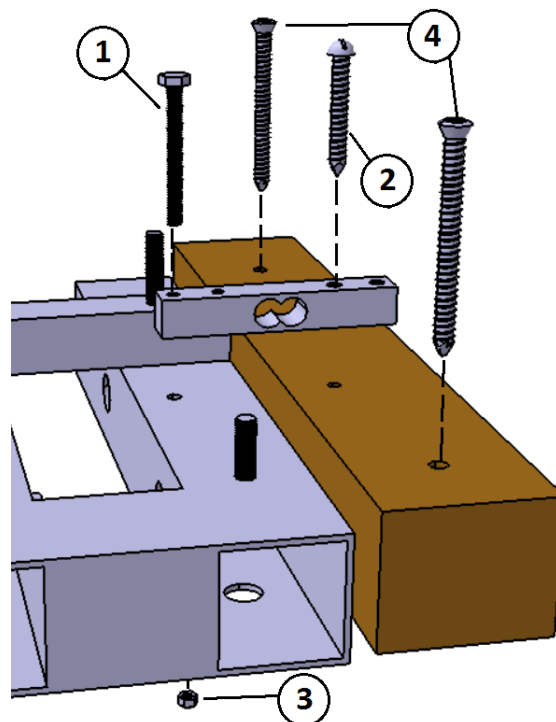


Figura F.1: Ilustração gráfica, concebida no CATIA V5, da montagem da célula de carga e do respetivo suporte.

Anexo G - Código utilizado para calibrar a célula de carga, tendo em conta um fator de calibração.

```
HX711 scale(DOUT, CLK);

//Change this calibration factor as per your load cell once it is found you many need
to vary it in thousands
float calibration_factor = 30250; //-106600 worked for my 40Kg max scale setup

//=====
//          SETUP
//=====
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("HX711 Calibration");
  Serial.println("Remove all weight from scale");
  Serial.println("After readings begin, place known weight on scale");
  Serial.println("Press a,s,d,f to increase calibration factor by 10,100,1000,10000
respectively");
  Serial.println("Press z,x,c,v to decrease calibration factor by 10,100,1000,10000
respectively");
  Serial.println("Press t for tare");
  scale.set_scale();
  scale.tare(); //Reset the scale to 0

  long zero_factor = scale.read_average(); //Get a baseline reading
  Serial.print("Zero factor: "); //This can be used to remove the need to tare the
scale. Useful in permanent scale projects.
  Serial.println(zero_factor);
}

//=====
//          LOOP
//=====
void loop() {

  scale.set_scale(calibration_factor); //Adjust to this calibration factor

  Serial.print("Reading: ");
  Serial.print(scale.get_units(), 3);
  Serial.print(" kg"); //Change this to kg and re-adjust the calibration factor if you
follow SI units like a sane person
  Serial.print(" calibration_factor: ");
  Serial.print(calibration_factor);
  Serial.println();

  if(Serial.available())
  {
    char temp = Serial.read();
    if(temp == '+' || temp == 'a')
      calibration_factor += 10;
    else if(temp == '-' || temp == 'z')
      calibration_factor -= 10;
    else if(temp == 's')
      calibration_factor += 100;
    else if(temp == 'x')
      calibration_factor -= 100;
    else if(temp == 'd')
```

```

        calibration_factor += 1000;
    else if(temp == 'c')
        calibration_factor -= 1000;
    else if(temp == 'f')
        calibration_factor += 10000;
    else if(temp == 'v')
        calibration_factor -= 10000;
    else if(temp == 't')
        scale.tare(); //Reset the scale to zero
    }
    delay(1000);

}

```

Anexo H - Código utilizado para obtenção de dados provenientes da célula de carga, já calibrada.

```

//=====
//          SETUP
//=====
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    Serial.println("Press T to tare");
    scale.set_scale(338850); //Calibration Factor obtained from first sketch
    scale.tare();          //Reset the scale to 0

    Serial.println("CLEARDATA"); //clears up any data left from previous projects
    Serial.println("LABEL,Time,Weight kg"); //always write LABEL, so excel knows the next
    things will be the names of the columns (instead of Acolumn you could write Time for
    instance)

}

//=====
//          LOOP
//=====
void loop() {
    Serial.print("DATA,TIME,");
    //Serial.print("Weight: ");
    Serial.println(scale.get_units(), 3); //Up to 3 decimal points
    //Serial.println(" kg"); //Change this to kg and re-adjust the calibration factor if you follow
    lbs

    //Serial.print("Time");
    //Serial.print("Weight");

    if (Serial.available())
    {
        char temp = Serial.read();
        if (temp == 't' || temp == 'T')
            scale.tare(); //Reset the scale to zero
    }

    delay(250); //add a delay miliseconds

}
//=====

```


Anexo J

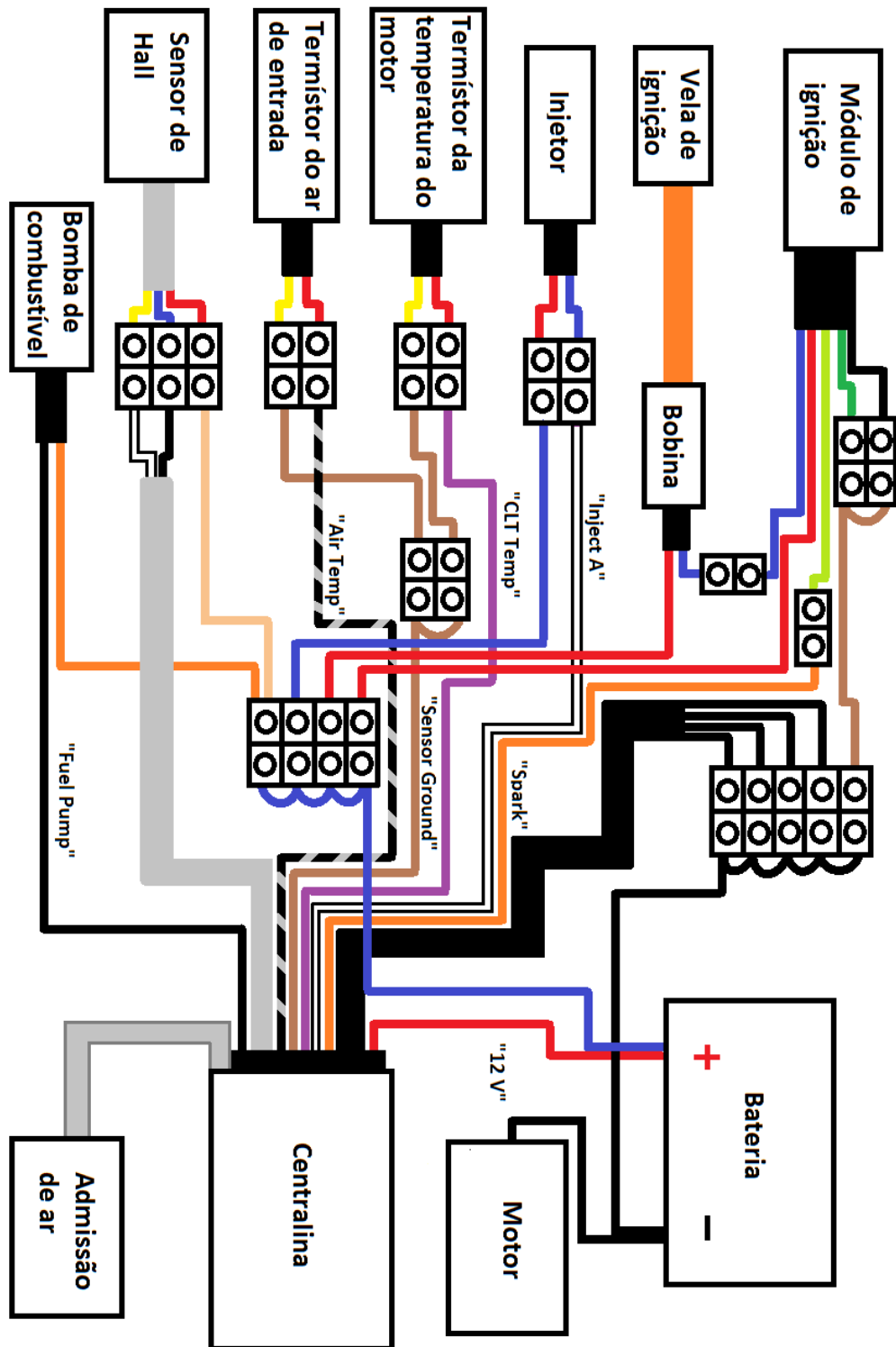


Figura J.1: Ilustração gráfica, concebida no Microsoft Paint, das ligações elétricas estabelecidas na configuração com injeção e ignição eletrônica.

Anexo K



ExtraEFI Wiring Diagram.

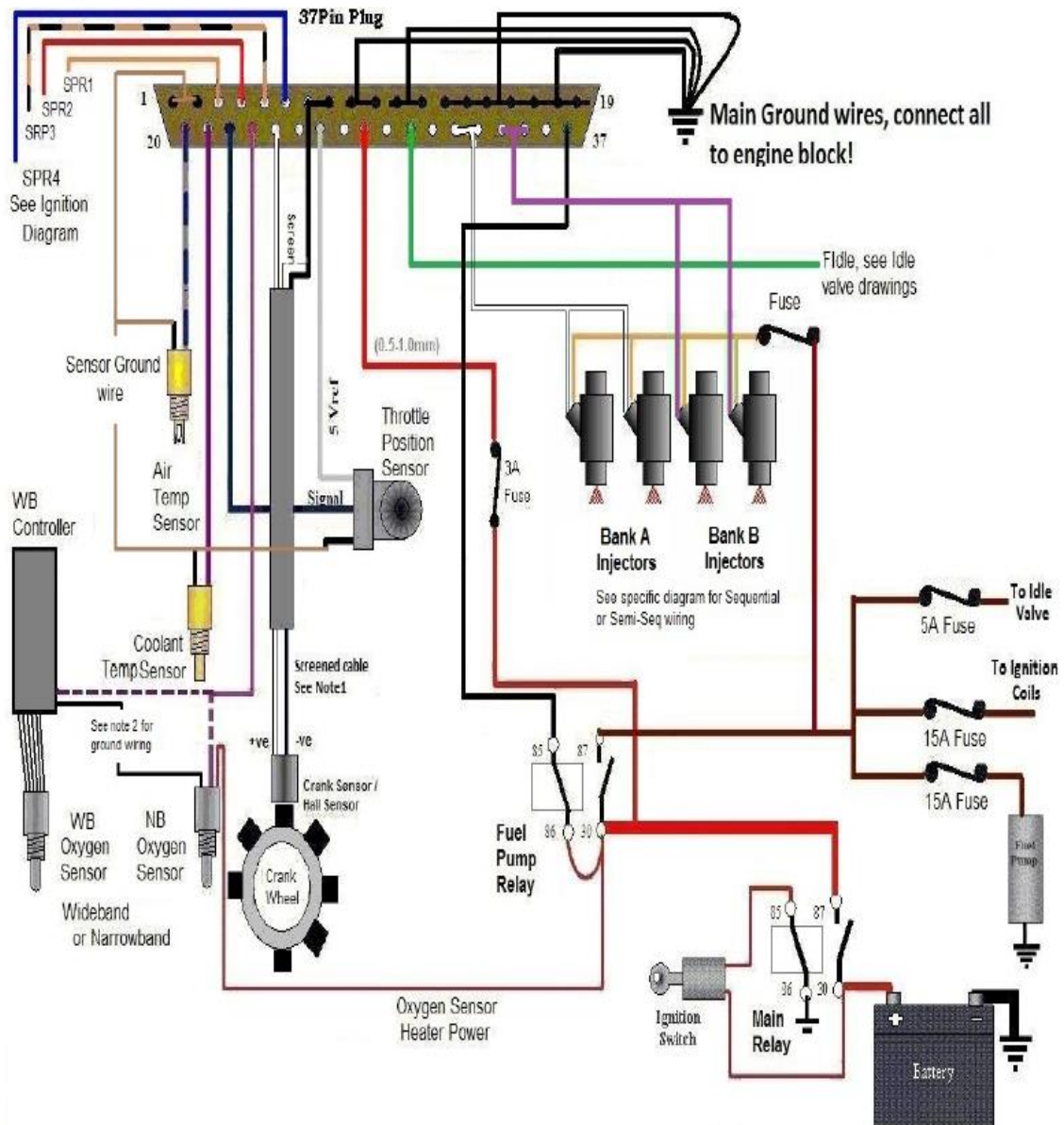


Figura K.1: Ilustração gráfica da distribuição das ligações estabelecidas nos 37 pinos da ficha [41].

Anexo L



Figura L.1: Montagem experimental aplicada na configuração com carburador.

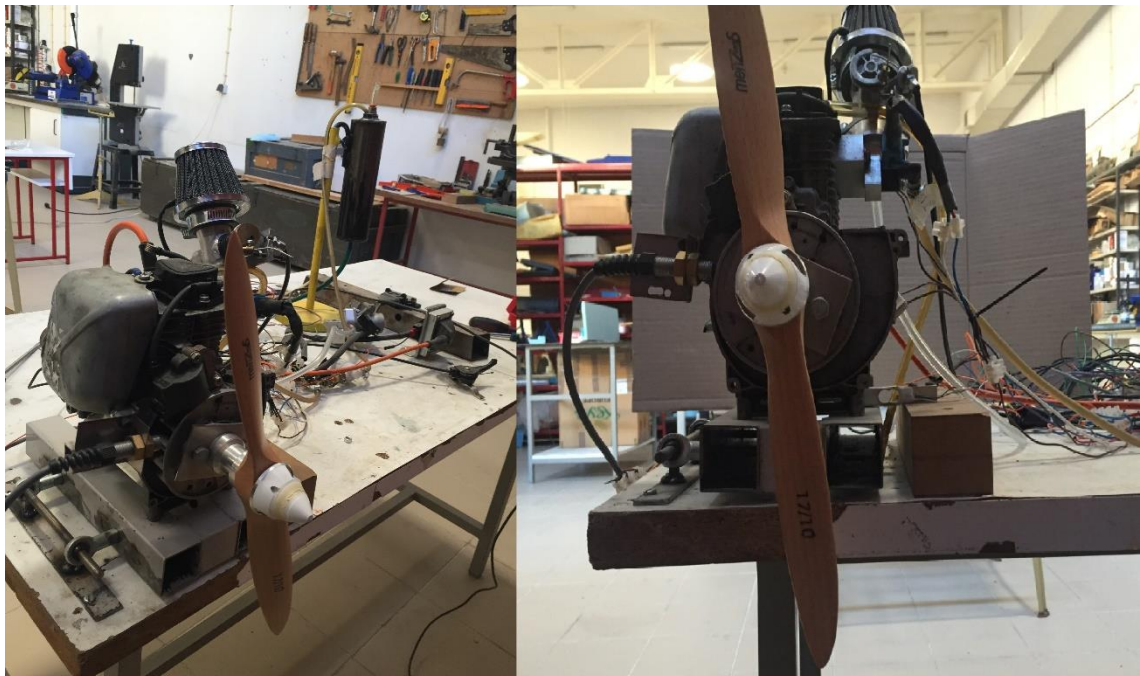


Figura L.2: Representação da montagem experimental (esquerda) e do sistema de medição do binário (direita).



Figura L.3: Montagem final do *kit* de conversão concebido para o Honda GX31.

Anexo M

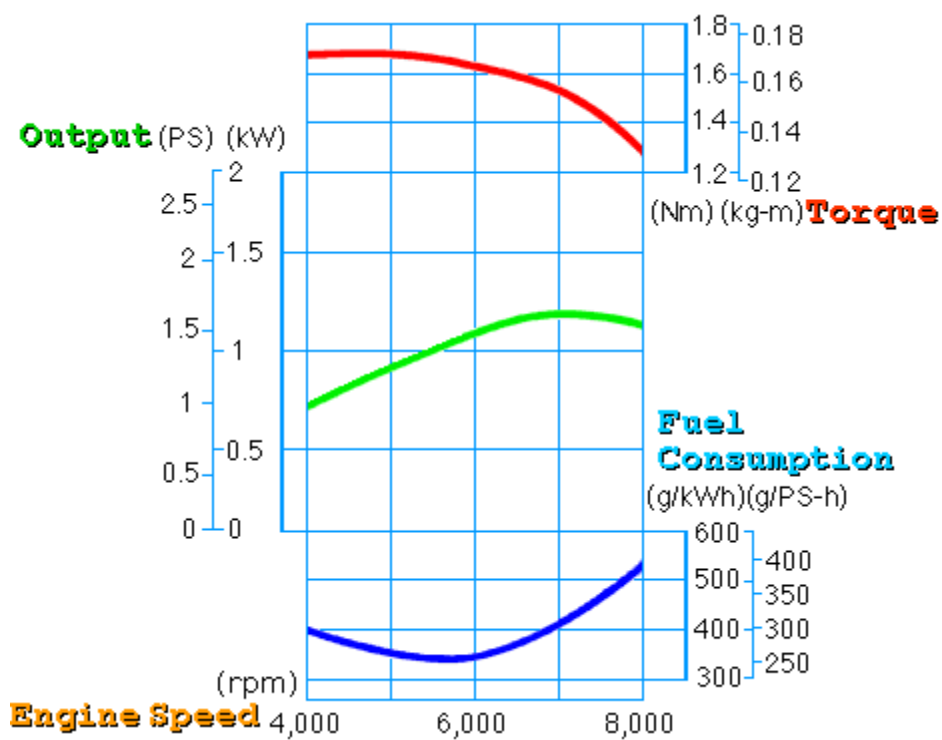


Figura M.1: Gráfico ilustrativo da *performance* do Honda GX31, em termos de binário, consumo específico e potência útil [42].