



Otimização de Consumos - Honda GX 35
Controlo Eletrónico
(versão final após defesa)

João Miguel Rego Campos

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

Orientador: Prof. Doutor Francisco Miguel Ribeiro Proença Brójo
Co-Orientador: João Manuel Laia Antunes

Abril de 2025

Declaração de Integridade

Eu, João Miguel Rego Campos, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição 43854 de Engenharia Aeronáutica da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 07 / 04 / 2025

Dedicatória

Gostaria de dedicar esta dissertação à minha avó, que infelizmente partiu no final da minha vida acadêmica, mas sempre estará presente nas minhas etapas de vida.

Agradecimentos

A concretização desta dissertação contou com a ajuda de diversos intervenientes e queria desde já agradecer ao senhor João Antunes, Pedro Oliveira, Rafael Domingues (alunos de doutoramento) por terem sido muito pacientes comigo e estarem sempre ao dispor de qualquer coisa que precisava.

Um agradecimento também ao Professor Francisco Brójo, pela sua disponibilidade, conhecimento, paciência, orientação e acompanhamento durante esta etapa do curso.

Não podia esquecer também o apoio de toda a minha família por todo o esforço investido na minha educação.

E aos meus amigos de curso, por partilharem comigo tantos momentos de aprendizagem e por me ajudarem sempre que precisei.

Um agradecimento especial à Inês Subica, ao Diogo Melo, ao Simão Pereira e ao Manuel Azevedo, por estarem sempre presentes e pelo apoio incondicional ao longo deste percurso.

Por fim, mas não menos importante, a todos os meus amigos que fiz na Covilhã que me ajudaram sempre que precisava sem pensar duas vezes.

A todos, um grande obrigado.

Resumo

Os motores a pistão, amplamente usados em veículos aeronáuticos, tem vindo a crescer significativamente nas últimas décadas, com o objetivo de tornar as aeronaves mais eficientes, potentes, económicas e menos poluentes. Um dos maiores avanços nesta área foi a introdução do controlo eletrónico, dos sistemas de injeção de combustível e de ignição.

Nesta dissertação, serão efetuadas inúmeras alterações por meio de controladores eletrónicos num motor monocilíndrico de baixa cilindrada, GX-35. Para isto, será convertido um sistema de carburação num sistema de alimentação de injeção eletrónica de combustível (EFI) e aplicado um sistema com ignição eletrónica (EI) de forma a reduzir os consumos do motor.

A implementação do sistema de EFI veio proporcionar diversas vantagens significativas ao motor trabalhado, principalmente no que diz respeito à sua eficiência e controle, dado que permite ajustar precisamente a quantidade de combustível necessária em diferentes condições de funcionamento, graças aos diversos sensores que monitorizam e otimizam constantemente a mistura ar/combustível. Já o uso do sistema de EI permitiu controlar a margem do avanço ou recuo da ignição, possibilitando a escolha de uma explosão mais antecipada ou tardia, o que se traduz num melhor desempenho do GX-35.

Ambos os sistemas eletrónicos, foram controlados por uma centralina, neste caso a MegaSquirt 2 (MS-II), que por sua vez é programada pelo TunerStudio MS.

De modo a transmitir a influencia do controlo eletrónico, serão utilizados 3 casos de estudo. Primeiramente, um caso sem nenhuma alteração no motor, em seguida um apenas com o sistema EFI e posteriormente um com ambas as adaptações (EFI e EI).

Palavras-chave

Honda GX35; Controladores eletrónicos; Consumos; Eficiência

Abstract

Piston engines, widely used in aircraft vehicles, have grown significantly in recent decades with the aim of making aircraft more efficient, powerful, economical, and less polluting. One of the greatest advancements in this field has been the introduction of electronic control, fuel injection systems, and ignition systems.

In this dissertation, numerous modifications will be made to a low-displacement single-cylinder engine, the GX-35, through electronic controllers. For this purpose, a carburettor system will be converted into an electronic fuel injection (EFI) system, and an electronic ignition (EI) system will be implemented to reduce the engine's fuel consumption.

The implementation of the EFI system has provided significant advantages to the modified engine, particularly regarding its efficiency and control, as it allows precise adjustment of the required fuel quantity under different operating conditions. This is achieved thanks to various sensors that continuously monitor and optimize the air/fuel mixture. The use of the EI system, on the other hand, enabled the control of the ignition's advance or retardation margin, allowing for the choice of an earlier or later explosion, which results in improved GX-35 performance.

Both electronic systems were controlled by an engine control unit, in this case, the MegaSquirt 2 (MS-II), which is programmed through TunerStudio MS.

To demonstrate the impact of electronic control, three case studies will be analysed. First, a case with no modifications to the engine, followed by one with only the EFI system, and finally one with both adaptations (EFI and EI).

Keywords

Honda GX35; Electronic Controllers; Consumptions; Efficiency

Índice

Declaração de Integridade.....	iv
Dedicatória	vi
Agradecimentos	viii
Resumo	x
Palavras-chave.....	x
Abstract.....	xi
Keywords	xi
Índice	xii
Lista de Figuras	xix
Lista de tabelas.....	xxii
Nomenclatura.....	xxiv
Acrónimos.....	xxiv
Símbolos	xxv
1. Introdução	1
1.1. Motivação	1
1.2. Enquadramento na Unidade Curricular	1
1.3. Objetivos do Trabalho	2
1.4. Organização do Documento	2
2. Estado da Arte	4
2.1. Contexto Histórico.....	4

2.2. Classificação de Motores	5
2.2.1. Ciclo	5
2.2.2. Geometria	5
2.2.3. Combustível	5
2.2.4. Alimentador do Combustível	6
2.2.5. Ignição	6
2.3. Componentes do Motor em estudo	6
2.4. Eletrónica dos Motores	8
2.4.1. Estudos na Área	8
2.4.2. Sistema de Injeção Eletrónica	9
2.4.3. Sistema de Ignição Eletrónica	11
2.5. Motor Honda GX-35	14
2.5.1. Ciclo a 4 Tempos	16
2.5.2. Carburador	17
2.5.3. Ignição por Magneto	18
3. Software e Hardware	20
3.1. Software	20
3.1.1. Arduíno (2.3.3)	20
3.1.2. Prop Selector	20
3.1.3. SOLIDWORKS (2022)	21
3.1.4. PrusaSlicer (2.8.1)	22
3.1.5. TunerStudio MS (3.2.03)	22

3.1.6. MegaLogViewer (4.2.4)	23
3.2. Hardware	24
3.2.1. Componentes Eletrônicos	24
3.2.2. Componentes Mecânicos	28
4. Alterações e Montagens	30
4.1. Redução do Peso	30
4.2. Componentes Externos para a Testagem Inicial	32
4.2.1. Mesa de Ensaios	32
4.2.2. Célula de Carga.....	32
4.2.3. Sensor Hall	33
4.2.4. Arduíno Nano	33
4.2.5. Hélice	34
4.2.6. Tanque de Combustível	35
4.2.7. Cabo do Acelerador	36
4.3. Injeção Eletrônica	37
4.3.1. Corpo de Acelerador	37
4.3.2. Fusível.....	37
4.3.3. TPS	37
4.3.4. Injetor	37
4.3.5. Sensor MAP	38
4.3.6. Bomba de Combustível	38
4.3.7. Sistema de Combustível.....	39

4.3.8. Sensor de IAT	40
4.3.9. Sensor de ECT	40
4.3.10. Sensor Hall.....	41
4.3.11. Sonda Lambda.....	41
4.3.12. Ligação à Bateria.....	41
4.4. Ignição Elétrica.....	43
4.4.1. Bobina e Modulo de Ignição.....	43
4.5. Calibrações.....	45
4.5.1. Célula de Carga.....	45
4.5.2. Termístores	45
4.5.3. Sonda Lambda	46
4.5.4. TPS	46
5. Ensaios	48
5.1 Contextualização das Medições.....	48
5.1.1. Medição do Binário	48
5.1.2. Medicação dos Consumos	48
5.2. Configuração Inicial	49
5.2.1. Carburador	50
5.3. Injeção Eletrónica.....	51
5.3.1 EFI - (1º teste).....	51
5.3.2. EFI - (2º teste).....	53
5.4. Injeção e Ignição Eletrónica (3º Ensaio)	53

5.4.1. EFI+EI.....	54
6. Análise de Resultados.....	55
6.1. Binário.....	55
6.1.1. Relevância dos Resultados	56
6.2. Consumo do Carburador	56
6.2.1. Tendência do Gráfico	57
6.2.2. Relevância dos Resultados	57
6.3. Consumos de EFI	57
6.3.1. Tendência dos Gráficos	58
6.3.2. Relevância dos Resultados	58
6.4. Consumos de EFI e EI	59
6.4.1. Tendência do Gráfico	59
6.4.2. Relevâncias dos Resultados.....	59
6.4.3. Importância da Otimização	60
7. Comparação.....	61
7.1. Comparação dos Resultados	61
7.2. Consumo específico.....	62
8. Conclusão	64
8.1. Limitações e Considerações	64
8.2. Trabalhos Futuros.....	65
Bibliografia	66
Anexos	69

Lista de Figuras

Figura 1- Componentes do motor [8].....	7
Figura 2- Componentes de um injetor eletromagnético [16].....	10
Figura 3- Funcionamento SPI e MPI [19].....	11
Figura 4- Componentes de uma bobina [22].....	12
Figura 5- Componentes da vela de ignição [26]	13
Figura 6-Componentes da ignição eletrônica sem distribuidor [27]	14
Figura 7- Honda GX-35 [28]	14
Figura 8- Carburador do GX-35	15
Figura 9- Ciclo a 4 tempos (admissão; compressão; expansão; escape) [30].....	16
Figura 10- Ativação da bomba do carburador [29]	17
Figura 11- Funcionamento do carburador [32]	17
Figura 12- Bonina fixa do GX-35.....	19
Figura 13- Magneto do volante	19
Figura 14- Componentes removidos	31
Figura 15- Implementação dos dados no Prop Selector.....	21
Figura 16- Desenho do spinner em SOLIDWORKS	21
Figura 17- Implementação do spinner no PrusaSlicer	22
Figura 18- Personalização do TunerStudio	23
Figura 19- Análise de dados do MegaLogViewer	23

Figura 20- Montagem da mesa de ensaios	32
Figura 21- Montagem da célula de carga	32
Figura 22- Montagem do sensor Hall	33
Figura 23- Montagem da célula de carga e sensor Hall à breadbord.....	33
Figura 24- Diagrama das ligações do Arduino [39]	34
Figura 25- Montagem do adaptador da hélice	34
Figura 26- Montagem da hélice e do spinner	35
Figura 27- Montagem da balança e do tanque	36
Figura 28- Montagem do cabo de acelerador.....	36
Figura 29- Montagem do corpo de acelerador e do limitador de fluxo	37
Figura 30- Montagem do injetor.....	38
Figura 31- Montagem do MAP	38
Figura 32- Montagem da bomba de combustível.....	39
Figura 33- Diagrama das linhas de combustível [40].....	39
Figura 34- Montagem do termístor IAT	40
Figura 35- Montagem do termístor do bloco	40
Figura 36- Montagem da sonda lambda.....	41
Figura 37- Montagem da bateria.....	42
Figura 38- Diagrama das ligações EFI [40]	42
Figura 39- Montagem da bobina e módulo de ignição	43
Figura 40- Diagrama da instalação elétrica EFI+EI [40].....	44
Figura 41- Montagem do sistema completo (EFI+EI) no motor.....	44

Figura 42- Calibração dos termístores	46
Figura 43- Calibração da sonda lambda	46
Figura 44- Calibração do TPS.....	47
Figura 45- Dados para gerar tabela VE no TunerStudio.....	51
Figura 46- Tabela AFR gerada pelo TunerStudio.....	52
Figura 47- Gráfico de binário e potência do GX-35 fornecido pela Honda [32]	55
Figura 48- Gráfico do binário do motor.....	55
Figura 49- Gráfico do consumo com carburador	56
Figura 50- Gráfico dos consumos de EFI.....	58
Figura 51- Gráfico dos consumos com EFI+EI com a variar do ângulo em velocidade de cruzeiro	59
Figura 52- Gráfico de comparação de consumos	61
Figura 53- Redução de consumos relativamente à EFI+EI (5040 RPM) Error! Bookmark not defined.	

Lista de tabelas

Tabela 1: Características do GX-35 [29]	15
Tabela 2- Componentes removidos	31
Tabela 3- Condições de voo	49
Tabela 4- Resultados com Carburador	50
Tabela 5- Resultados com EFI (VE gerado)	52
Tabela 6- Resultados com EFI (Correção da sonda lambda)	53
Tabela 7- Variação do ângulo de ignição	54

Nomenclatura

Acrónimos

AFR	<i>Air Fuel Ratio</i> (Razão Ar/Combustível)
COP	<i>Coil on Plug</i> (Bobina sobre a Vela)
DIS	<i>Distributorless Ignition System</i> (Sistema de Ignição sem Distribuidor)
ECT	<i>Engine Coolant Temperature</i> (Temperatura do Bloco do Motor)
ECU	<i>Engine Control Unit</i> (Unidade de Controle Eletrônico)
EFI	<i>Electronic Fuel Injection</i> (Injeção Elétrica de Combustível)
EI	<i>Electronic Ignition</i> (Ignição Elétrica)
GND	<i>Ground</i> (Terra ou Massa)
GNV	Gás Natural Veicular
HEI	<i>High Energy Ignition</i> (Ignição de Alta Energia)
HP	<i>Horse Power</i> (Cavalos de Potência)
IAT	<i>Intake Air Temperature</i> (Temperatura de Entrada do Ar)
IBSF	<i>International Bobsleigh and Skeleton Federation</i>
MAP	<i>Manifold Air Pressure</i> (Sensor de Pressão Absoluta do Coletor)
MPH	<i>Miles per Hour</i> (Milhas por Hora)
MPI	<i>Multi-Point Injection</i> (Injeção Multiponto)
MS-II	MegaSquirt 2
OHC	<i>Overhead Camshaft</i> (Arvore de Cames à Cabeça)
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
RPM	<i>Revolutions Per Minute</i> (Rotações por Minuto)
SFC	<i>Specific Fuel Consumption</i>
SPI	<i>Single Point Injection</i> (Injeção de Ponto Único)
TBI	<i>Throttle Body Injection</i> (Injeção no Corpo de Acelerador)
TPS	<i>Throttle Position Sensor</i> (Sensor da Posição do Acelerador)
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i> (Veículo Aéreo não Tripulado)
UBI	Universidade da Beira Interior
VCC	<i>Voltage Common Collector</i> (Coletor Comum de Tensão)
VE	<i>Volumetric Efficiency</i> (Eficiência Volumétrica)

Símbolos

AFR_{Est}	Razão Ar/Combustível Estequiométrica	Adimensional
AFR_{Real}	Razão Ar/Combustível Real	Adimensional
B	Binário	N.m
C_s	Consumo Específico	kg/kWh
e_v	Eficiência Volumétrica	%
I	Corrente Elétrica	A
F	Força Exercida pela Célula de Carga no Banco de Ensaio	N
I_1	Corrente Primária	A
I_2	Corrente Secundária	A
m_a	Massa do Ar	kg
\dot{m}_a	Caudal de Ar	kg/s
m_f	Massa do Combustível	kg
\dot{m}_f	Caudal de Combustível	kg/s
N_1	Número de Espiras do Enrolamento Primário	Adimensional
N_2	Número de Espiras do Enrolamento Secundário	Adimensional
T	Número de Ciclos	Adimensional
U	Tensão Elétrica	V
U_1	Tensão Primária (Bobina)	V
U_2	Tensão Secundária (Bobina)	V
V_v	Volume Varrido por Cilindro	m ³
\dot{W}_e	Potência Útil	W
ρ	Massa Específica	kg/m ³
η_T	Rendimento Total	Adimensional
ϕ	Riqueza da Mistura	Adimensional
λ	Excesso de Ar da Mistura	Adimensional

1. Introdução

1.1. Motivação

Os motores e o seu funcionamento sempre foram, para mim, uma temática aliciante e desafiadora, instigadora do meu desejo de aprender e aprofundar conhecimentos e habilidades na área, motivo pelo qual selecionei este tema para esta Dissertação de Mestrado.

A minha paixão por motores revela-se na forma como cada peça, ao mover-se em perfeita sintonia com as outras, forma um só movimento harmonioso e potente. Uma sincronia mecânica, onde a precisão de cada componente e a coordenação entre estes cria uma energia única e perfeita. Cada ciclo de combustão e cada rotação tem uma razão de ser, e o motor transforma essa sinfonia mecânica numa força vital, o que alimenta a minha fascinação pelo seu funcionamento.

Além disso, e dado o facto de ser um aluno deslocado durante o presente curso, surge a idealização futura da possível implementação deste motor numa aeronave adequada que possa efetuar um percurso da Covilhã para São Miguel, Açores.

1.2. Enquadramento na Unidade Curricular

A Unidade Curricular “Dissertação ou Projeto” surge como a última etapa formativa do plano de estudos, do Curso de Mestrado de Engenharia Aeronáutica da Faculdade de Engenharia, da Universidade da Beira Interior.

No caso concreto desta Dissertação, esta é constituída, essencialmente, por períodos de estudo, pesquisa, conceção, planificação, reunião de material, fabricação, montagem, implementação de softwares, testagens, reparos, análise, comparação de resultados, construção de relatórios, apresentação e defesa.

De modo geral, esta consiste num projeto transdisciplinar, integrador e demonstrativo de todos os saberes e competências adquiridos pelos estudantes ao longo da sua formação. Neste sentido, este projeto surge como método promotor da articulação dos conhecimentos e habilidades dos estudantes com vista ao seu desenvolvimento, consolidação e/ou aperfeiçoamento.

Esta pressupõe a aquisição de capacidades teórico-práticas essenciais à atuação do Engenheiro, por meio do contacto com desafios autênticos, significativos e representativos para os estudantes, o que possibilita a melhor preparação dos mesmos para o futuro ingresso na profissão.

Assim, compreende-se o facto deste projeto surgir como obrigatório para todos os alunos deste curso, no final do mesmo, pois além de promover o desenvolvimento do estudante, este permite

a conclusão da decorrente etapa formativa e obtenção da respetiva qualificação profissional enquanto Engenheiro.

1.3. Objetivos do Trabalho

De modo a estabelecer uma finalidade para este trabalho e a guiar o meu pensamento durante todo o seu processo de desenvolvimento - desde a conceção à concretização prática – tive como prioridade inicial o estabelecimento de objetivos. Um tópico que permitiu guiar o desenvolvimento do projeto e estabelecer critérios de auto e hétero avaliação para o trabalho propriamente realizado.

De um modo simplificado, o objetivo primordial deste trabalho centra-se em efetuar múltiplas adaptações num motor GX-35 da Honda, com o intuito de reduzir consumos neste motor, por meio da implementação e remoção de componentes, com o foco de fazê-lo percorrer o trajeto Covilhã - São Miguel num futuro.

Para tal, não só foram implementados sistemas de injeção e de ignição eletrónica (EFI e EI respetivamente), como também foram removidos componentes irrelevantes ao bom funcionamento do motor, atitudes estas que visaram a otimização do GX-35.

1.4. Organização do Documento

De modo a sumariar e a esquematizar o processo de desenvolvimento desta tese, optei por dividir este trabalho em 9 capítulos e seus respetivos subcapítulos.

No primeiro capítulo, denominado “Introdução” encontram-se expostos aspetos relacionados com os fatores motivadores desta tese, assim como o modo como esta surge enquadrada neste Curso, sua finalidade e método de organização.

Num segundo capítulo, denominado “Estado da Arte” encontram-se inseridos o contexto histórico e toda a evolução dos motores a combustão até aos dias de hoje, sua classificação e seu funcionamento, destacando-se o motor em estudo.

No terceiro capítulo, “Redução do Peso”, exploram-se as técnicas e metodologias empregadas para a redução do peso do motor e a eficácia destas mesmas atitudes no seu peso final.

No quarto capítulo, intitulado “Softwares e Hardwares”, descreveram-se minuciosamente os recursos utilizados ao longo do projeto, ao longo de duas secções principais: uma dedicada ao software empregado e outra direcionada aos componentes de hardware implementados.

Num quinto capítulo, “Montagem”, detalhou-se o processo de integração dos diversos componentes mencionados no capítulo anterior, de modo isolado e num sistema, além das calibrações necessárias efetuadas para assegurar o seu funcionamento adequado.

No sexto capítulo, “Contextualização das Medições”, são apresentados os métodos empregados para a medição do binário e dos consumos de combustível, ou seja, as alterações efetuadas, fornecendo-se uma base sólida para a análise dos resultados obtidos.

No sétimo capítulo, “Ensaaios”, enumeraram-se os testes realizados para as diferentes configurações do sistema, incluindo a utilização de carburador, do sistema de injeção e de ignição eletrónica, e os resultados extraídos de cada ensaio.

No oitavo capítulo, “Análise de Resultados”, procedeu-se à análise dos dados recolhidos nos ensaios, discutindo-se o binário, o desempenho do carburador, a eficiência da injeção eletrónica e sua eficácia quando combinada com a ignição eletrónica.

Por fim, mas não menos importante, no nono capítulo, “Comparação e Conclusões”, foi exposta a comparação dos resultados obtidos, efetuada a devida análise crítica bem como a identificação de possíveis erros, e ainda propostas de melhoria para trabalhos futuros.

2. Estado da Arte

2.1. Contexto Histórico

Os primeiros motores a combustão interna tiveram a sua aparição na década de 1860, quando Étienne Lenoir desenvolveu um motor que queimava uma mistura de gás e ar, sem compressão prévia, utilizando apenas uma faísca elétrica para iniciar a combustão [1]. Este motor, apesar de inovador, apresentava diversas limitações, nomeadamente, um consumo de 18 litros e 2 cavalos de potência.

Em 1867, Nikolaus August Otto e Eugen Langen introduziram um motor atmosférico mais eficiente que consumia metade do combustível em relação ao seu antecessor [2]. Mais tarde, em 1876, Otto desenvolveu o ciclo de 4 tempos, que solucionou problemas de eficiência térmica e de peso excessivo, permitindo que a indústria dos motores de combustão interna crescesse [3].

Paralelamente, os motores com o ciclo de 2 tempos foram desenvolvidos por Dugald Clerk e James Robson na Inglaterra [4], e por Karl Benz na Alemanha. Motores esses mais leves e com menor relação peso-potência em comparação com os de 4 tempos.

Outro grande avanço ocorreu em 1892, quando Rudolf Diesel apresentou um novo tipo de motor, no qual a combustão acontecia pela injeção de combustível em ar aquecido apenas pela compressão, sem necessidade de uma faísca, o que permitiu a criação de motores com o dobro da eficiência dos anteriores [5].

Essas inovações estabeleceram as bases para o contínuo desenvolvimento dos motores de combustão interna. Todavia, e apesar de mais de um século se ter passado, ainda há espaço para melhorias, na medida em que, atualmente, os fabricantes procuram constantemente pelo aumento de potência, melhoria da eficiência e minimização das emissões.

Na indústria aeronáutica, os veículos aéreos não tripulados, em inglês denominados *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), geralmente utilizam motores muito pequenos, com cilindradas que variam de 20 a 200cc, embora existam diversas exceções. Estes motores são frequentemente de um ou 2 cilindros, predominantemente de 2 tempos.

Antes da popularização dos UAV, muitos desses pequenos motores eram utilizados em aeromodelos de controlo remoto, e empregavam sistemas de carburador devido ao baixo custo e simplicidade. No entanto, com a evolução da tecnologia, as limitações dos carburadores tornaram-se evidentes, fazendo com que a EFI se tornasse necessária. De igual modo, tornou-se evidente a necessidade de implementar a EI, de modo que os motores acompanhassem a evolução tecnológica e melhor se adaptassem às condições inerentes do voo.

2.2. Classificação de Motores

Como referido anteriormente, na atualidade existem diversos tipos de motores, tendo cada um as suas vantagens e desvantagens dependendo da finalidade a que se destinam [6].

Cada um destes é classificado de acordo com o seu ciclo, geometria, combustível, alimentador de combustível e ignição. Assim sendo, deixo enumerados abaixo os mais comuns dentro de cada uma dessas categorias:

2.2.1. Ciclo

- 2 tempos: Completam o ciclo de combustão em duas etapas (com o movimento de subida e descida do pistão). São mais leves, têm estrutura simples e entregam potência em todas as rotações, mas são menos eficientes e libertam mais poluentes, dado que misturam combustível e óleo.
- 4 tempos: Realizam o ciclo em 4 etapas (admissão, compressão, combustão e exaustão). São mais eficientes, mais económicos, menos poluentes.

2.2.2. Geometria

- Cilindros em linha: Configuração comum para motores menores, com cilindros alinhados em uma única fila. Oferece simplicidade e equilíbrio.
- Cilindros em V: Cilindro disposto em formato “V”, com motor compactado e maior potência. Ideal para motores maiores (V6, V8) e de alto desempenho.
- Boxer/Opostos: Cilindros horizontalmente opostos e com um centro de gravidade mais baixo, o que melhora a estabilidade e reduz as vibrações causadas no motor.
- Rotativo (Wankel): Usa rotores triangulares em vez de pistões, proporcionando alta potência e leveza, embora uma eficiência térmica mais baixa (grandes perdas de energia).
- Cilindros opostos: Cilindros disposto horizontalmente, mas ao contrario do motor em geometria em boxer estes pistões partilham a câmara de combustão.

2.2.3. Combustível

- Gasolina: Ideal para alta rotação e potência. São eficientes e necessitam sempre de uma faísca para criar a ignição do combustível na câmara de combustão.
- Gasóleo: Focados em ter uma alta eficiência energética. Possuem maiores binários em baixas rotações e são usados em veículos pesados e de carga. A ignição é feita por compressão, sendo assim desnecessária a faísca da vela.

2.2.4. Alimentador do Combustível

- Carburador de corpo simples: Ideal para motores menores onde a mistura ar/combustível é feita por um único tubo.
- Injeção Direta: Injeta combustível diretamente na câmara de combustão, melhorando a eficiência e aumentando a potência.
- Injeção Indireta: Injeta o combustível no coletor de admissão ou próximo à sua válvula. Menos precisa do que a injeção direta, mas comumente usada em motores de menor complexidade e custo, oferecendo uma boa mistura e melhor controle de consumos e emissões.

2.2.5. Ignição

- Ignição por Magneto: Comum em motores pequenos, como motosserras e cortadores de relva. Um magneto gera uma faísca ao girar com o motor e é independente de uma fonte de energia externa.
- Ignição com Distribuidor: É utilizada em sistemas mais antigos, onde um distribuidor direciona a faísca para cada cilindro, emitindo faíscas no momento certo, por meio de contatos e um rotor interno.
- Ignição sem Distribuidor: É utilizada em sistemas mais modernos, onde sensores de posição e módulos eletrônicos controlam a distribuição da faísca sem a necessidade de um distribuidor mecânico. Oferece melhor controle e eficiência.
- Ignição Direta (Coils-on-Plug ou COP): Cada cilindro tem sua própria bobina, o que elimina a necessidade de cabos de vela e melhora a precisão e a eficiência. É utilizado em motores modernos e de alto desempenho [7].
- Ignição por Compressão: É utilizada nos motores a diesel e ocorre pela compressão do ar dentro da câmara de combustão, até que ele atinja uma temperatura suficiente para inflamar o combustível injetado. Como não há faísca, o processo é controlado pela alta compressão e pela pressão de injeção do combustível. É eficiente em termos de binário, mas exige motores com construção mais robusta para suportar a alta compressão.

2.3. Componentes do Motor em estudo

De modo a simplificar a estrutura geral do motor, é ilustrado, na Figura 1, um motor a gasolina, de modo a melhor se compreenderem todos os componentes que um motor a 4 tempos precisa para o seu bom funcionamento.

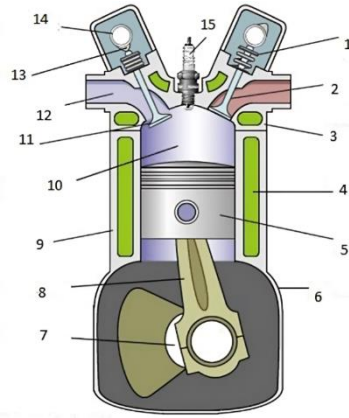


Figura 1- Componentes do motor [8]

1. Mola da Válvula: Mantém a válvula fechada e garante que ela retoma à posição correta após ser aberta pela árvore de cames. Esta comprime-se ao abrir e expande-se ao fechar, assegurando o sincronismo do motor e evitando falhas em altas rotações.
2. Válvula do Escape: Permite a saída dos gases resultantes da combustão.
3. Cabeça do Cilindro: Corresponde à parte superior do cilindro que contém as válvulas e a vela de ignição.
4. Refrigeração: Mantém a temperatura do motor em níveis adequados, evitando o sobreaquecimento. Pode incluir radiadores, bombas de água e líquidos refrigerantes.
5. Pistão: Componente cilíndrico que se move dentro do cilindro. Este é ativado pela pressão da combustão que empurra o pistão para baixo, convertendo a energia química (explosão) em energia mecânica.
6. Carter: Corresponde ao reservatório de óleo do motor, localizado na parte inferior do mesmo. Armazena o óleo lubrificante e é fundamental para um funcionamento suave e de pouco desgaste.
7. Cambota: Eixo que converte o movimento linear do pistão num movimento rotativo.
8. Biela: É a conexão entre o pistão e a cambota, transferindo a força criada pela combustão do cilindro até à cambota.
9. Cilindro: Espaço onde ocorre a combustão e onde o pistão se move para cima e para baixo, gerando pressão e movimento.
10. Câmara de Combustão: Local dentro do motor onde ocorre a explosão controlada que empurra o pistão para baixo, transformando a energia.
11. Válvula de Admissão: Permite a entrada da mistura ar/combustível no cilindro.

12. Coletor de Admissão: Fornece ar fresco ao cilindro do motor, criando uma boa mistura ar/combustível.
13. Árvore de Cames: Controla a abertura e fecho das válvulas e é acionada pela cambota, sincronizando o movimento das válvulas com o movimento dos pistões.
14. Came: O constituinte principal da árvore de cames e um elemento principal para abrir e fechar uma válvula no momento certo.
15. Vela: Responsável por gerar uma faísca essencial para a ignição da mistura ar/combustível.

2.4. Eletrónica dos Motores

Atualmente, a maioria dos motores em veículos comercializados são controlados eletronicamente, com sistemas que gerem o ângulo de ignição e a injeção do combustível [9]. A principal vantagem desse controlo elétrico é a sua capacidade de adaptação constante às condições operacionais do motor, o que resulta num melhor desempenho, reduz o consumo de combustível, diminui as emissões de gases poluentes e aumenta a durabilidade do motor [10].

O sistema de EFI é gerido pela ECU, uma unidade que centraliza e otimiza o funcionamento de todo o conjunto elétrico.

Esta unidade troca constantemente informações com sensores e atuadores distribuídos pelo motor, proporcionando uma visão abrangente das condições operacionais em tempo real. De modo geral, esta recebe informação dos sensores e envia informação para os atuadores controlando o seu modo de funcionamento. Algumas dessas informações dizem respeito ao caudal de ar, temperatura, posição do acelerador, entre outros parâmetros fundamentais, que permitem ajustar a mistura ar/combustível em tempo real.

Assim como o sistema anterior, o EI também é gerido pela ECU, no entanto, este é responsável por ajustar os parâmetros de ignição de modo instantâneo e simultâneo com o último.

Contudo, a utilização deste tipo de sistemas também traz desafios. De facto, a complexidade eletrónica e a integração de múltiplos sensores e atuadores resultam num custo mais elevado tanto para a aquisição como para a manutenção. Além disso, a nível eletrónico, estes exigem mais inspeções regulares para evitar falhas que possam prejudicar o desempenho e a durabilidade do motor.

2.4.1. Estudos na Área

Todavia, esta evolução é particularmente relevante em motores de pequena cilindrada, como o Honda GX-35. Um exemplo prático prende-se com a conversão de motores de UAVs com

carburadores em motores com sistemas eletrônicos. Estudos demonstram que esta transição permite uma redução de 15% no consumo de combustível e de 20% nas emissões de poluentes, além de melhorar a estabilidade em regimes de voo variáveis. Fatores estes cruciais em aplicações onde a fiabilidade e a autonomia são determinantes [11].

Outro aspeto relevante prende-se ao desenvolvimento de kits de conversão concretamente projetados para sistemas eletrônicos em motores pequenos, da qual é exemplo o sistema Ecotrons, um modelo especificamente direcionado para o motor GX-35, com a finalidade de facilitar a sua conversão/otimização [12].

De facto, motores equipados com carburadores tradicionais apresentam baixa eficiência de combustível e níveis elevados de emissões. Em resposta a esses desafios, foi aplicado um projeto pelo Professor Kari Tammi, no qual foi desenvolvido um sistema de EFI adaptável a motores pequenos, anteriormente projetado por uma equipa composta por 5 engenheiros mecânicos: Johannes Niinikoski, Joni Kotilainen, Jonathan Ewalds, Esa Heikkinen e Marko Kääriäinen.

Os resultados deste projeto evidenciaram que a implementação de EFI em motores melhora significativamente a eficiência do consumo de combustível, além de reduzir emissões e otimizar o controlo operacional, particularmente na rotação do motor. Estes avanços fazem do EFI uma alternativa técnica superior aos sistemas mecânicos, dado que proporciona uma combustão mais eficiente e controlada.

Assim, este projeto demonstra que sistemas EFI não apenas aprimoram o desempenho dos motores de pequena cilindrada, como também reforçam a sua viabilidade em aplicações que exigem maior eficiência e menor impacto ambiental [13].

Por sua vez, os sistemas EFI podem partir de uma injeção de ponto único (SPI), multiponto (MPI) ou direta (DI), sendo esta última a mais eficiente em termos de potência e emissões. Segundo a literatura estudada, o EFI pode reduzir até 96% das emissões de monóxido de carbono e 55% das emissões de hidrocarbonetos, quando equiparado com os carburadores, garantindo maior fiabilidade e conformidade com normas ambientais rigorosas, especialmente em motores de pequena cilindrada [14]. Estes dados são válidos quando estamos perante um regime dinâmico.

Assim, denota-se que o presente trabalho se insere num panorama de evolução tecnológica, dado que implementa sistemas EFI e EI num motor de pequena cilindrada (GX-35), sistemas estes melhor explorados nos subtópicos seguintes.

2.4.2. Sistema de Injeção Eletrónica

Evidentemente, os injetores elétricos são projetados para dosear e pulverizar combustível no coletor de admissão ou diretamente nos cilindros [15].

Apesar de existirem diversos tipos de injetores, irei focar-me no eletromagnético, dado que optei por utilizá-lo neste projeto.

De modo explicativo, a atuação deste injetor é iniciada pela entrada de combustível pressurizado através de um filtro, responsável por impedir a entrada de qualquer tipo de detritos capazes de obstruí-lo. Este processo termina com o preenchimento de toda a sua cavidade interna, ficando o combustível retido no seu interior, local onde estão presentes uma válvula e uma bobina eletromagnética que funcionam numa sinergia de movimento despoletada por um impulso elétrico, que por sua vez origina um fenómeno eletromagnético na bobina. Assim que essa tensão é aplicada na bobina, uma válvula localizada na extremidade oposta do injetor abre-se, permitindo a saída do combustível até então armazenado no seu interior. Quando o fornecimento de tensão é cortado, o campo magnético desvanece e o sistema válvula-mola fecha-se, o que impede o injetor de pulverizar mais combustível.

Salienta-se que tanto a sua entrada como a sua saída possuem um o-ring que impede fugas de combustível em ambas as portas, como é possível visualizar-se na Figura 2.

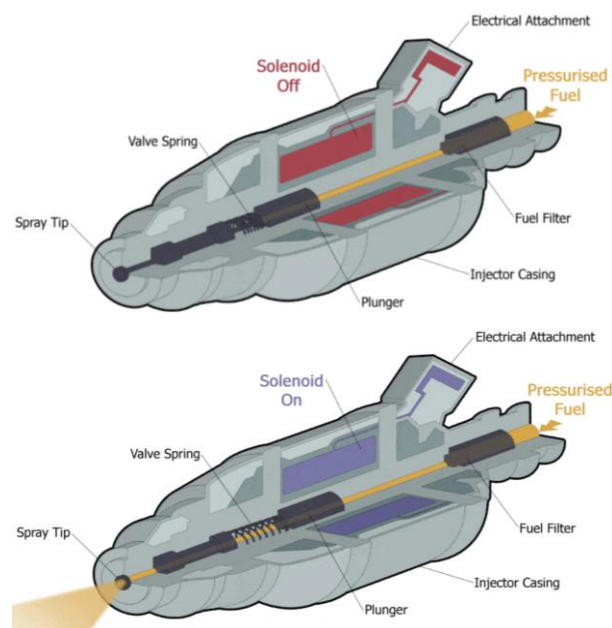


Figura 2- Componentes de um injetor eletromagnético [16]

Apesar de existirem 2 tipos de injeção (direta e indireta), irei abordar apenas esta segunda, visto que foi a selecionada para o presente projeto [17].

A injeção indireta é um sistema onde o combustível é pulverizado fora da câmara de combustão, geralmente no coletor de admissão ou na pré-câmara, localizados atrás da válvula de admissão. Neste sistema, o ar mistura-se com o combustível antes de entrar no cilindro. Um método amplamente utilizado por ser mais simples, económico e possuir um menor custo de manutenção

[18]. No entanto, em comparação com a injeção direta, é menos eficiente no que diz respeito ao consumo de combustível, uma vez que o combustível é pulverizado antes de entrar na câmara de combustão, o que pode resultar em perdas para as paredes da admissão.

Relativamente à injeção indireta, esta pode ser dividida em 2 tipos – injeção de ponto único e injeção multiponto.

Na primeira, também conhecida como *Single Point Injection* (SPI), há apenas um único injetor de combustível, que alimenta todos os cilindros. Assim sendo, é mais simples e tem menos componentes, o que a torna mais económica, no entanto, menos precisa na distribuição do combustível.

Já na segunda, conhecida como *Multi-Point Injection* (MPI), a injeção é feita individualmente para cada cilindro, através de múltiplos injetores. Ou seja, cada entrada de ar tem o seu próprio injetor, permitindo uma maior precisão na entrega de combustível, resultando numa combustão mais eficiente e num melhor desempenho do motor em termos de potência e economia de combustível (ver Figura 3).

Dentro da MPI, existe ainda a injeção sequencial, onde os injetores pulverizam o combustível de forma sincronizada com o tempo de admissão de cada cilindro. Diferente de sistemas onde os injetores disparam ao mesmo tempo ou em grupos, a injeção sequencial injeta o combustível exatamente quando a válvula de admissão abre-se, otimizando a mistura ar-combustível.

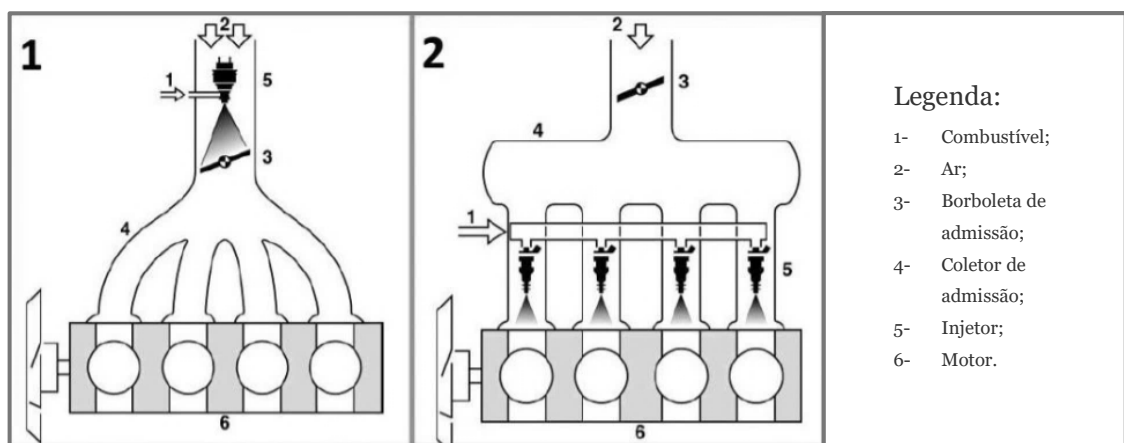


Figura 3- Funcionamento SPI e MPI [19]

2.4.3. Sistema de Ignição Eletrónica

De modo a compreender-se a ignição eletrónica temos de ter em conta 3 componentes essenciais: o módulo de ignição, o gerador de alta tensão (bobina) e o elemento de ignição (vela), responsável pela explosão [20].

O módulo de ignição é um circuito eletrônico, que através de um transistor de saída de alta potência, controla de forma precisa tanto o momento da faísca quanto o tempo em que a bobina de ignição fica energizada [21].

A bobina de ignição funciona com o mesmo princípio de um transformador. Basicamente, esta é composta por um enrolamento primário, secundário, um núcleo de ferro e uma caixa com material de isolamento (ver Figura 4).

Esta surge acoplada a um núcleo de ferro (E), a nível bilateral, através de 2 enrolamentos. O primário (N1) possui um fio mais grosso e um menor número de enrolamentos relativamente ao secundário (N2), que se situa do outro lado do núcleo, e é composto por um fio mais fino e um maior número de enrolamentos.

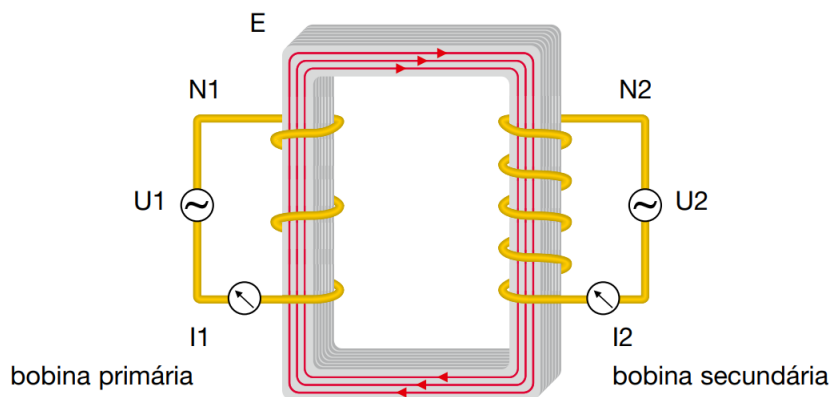


Figura 4- Componentes de uma bobina [22]

Efetivamente, ao ocorrer um fornecimento de corrente (I_1) e tensão (U_1) à bobina, estas são armazenadas sob a forma de energia no campo magnético. Num momento de ignição específico, previamente programado pela centralina, a corrente é interrompida, dando-se uma alteração de corrente, passando esta para uma corrente I_2 e tensão U_2 , que é então acumulada no circuito secundário, com $I_1 > I_2$ e $U_1 < U_2$. Tal como acontece num transformador, ocorre um efeito de eletromagnetismo, sendo a tensão alcançável proporcional à relação de enrolamento primário/secundário (N_1/N_2), equação (1).

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (1)$$

A formação de faísca acontece quando a tensão de ignição é atingida (*breakthrough*), momento onde a energia acumulada é descarregada no canal de faísca.

Este processo inicia-se na parte superior da vela, onde se localiza o conector do terminal e onde entra a alta tensão (U_2) proveniente da bobina. [23] Esta tensão é então transferida através deste terminal até ao eléctrodo central no interior da vela. Quando a energia atinge a extremidade oposta deste último, esta depara-se com um intervalo, tendo de ionizar o ar de modo a chegar ao eléctrodo terra, um elemento indiretamente conectado ao motor por meio do enroscamento da vela no alojamento do motor, que faz contato direto com o bloco metálico.

O bloco do motor, por sua vez, está ligado ao potencial de terra do sistema elétrico, garantindo que este funcione como uma extensão da terra da vela, sem serem necessários fios adicionais.

De modo a evitar perdas de energia elétrica, toda a parte exposta da vela (não inserida no motor) encontra-se revestida por um isolamento de cerâmica. Além disso, a vela possui um isolante térmico conhecido como nariz isolador. Ambos responsáveis por promover uma boa faísca, dado que regulam as perdas de energia, quer elétricas quer térmicas. Todos estes componentes podem ser visualizados na Figura 5.

Efetivamente, a temperatura do ar desempenha um papel fulcral na sua ionização, dado que um ar mais quente facilita a passagem de eletrões pelo intervalo da vela [24].

Esta pode ser classificada em 2 tipos, as quentes e frias. Normalmente, são escolhidas velas frias para os motores mais potentes, pois, como possuem um nariz mais isolado, previnem o sobreaquecimento e a pré-ignição. Contrariamente, as velas quentes são mais utilizadas em motores de baixa potência, pois, por serem menos isoladas, atingem mais rapidamente uma boa temperatura [25].

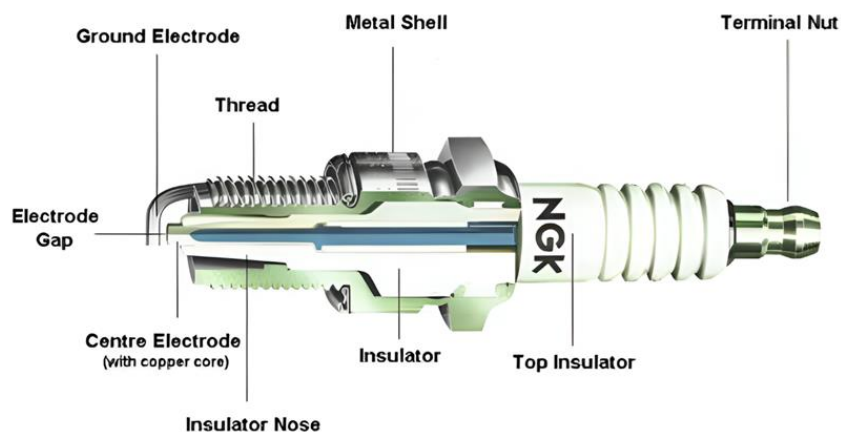


Figura 5- Componentes da vela de ignição [26]

Apesar de existirem diversos tipos de sistemas de ignição, irei abordar apenas a ignição eletrónica sem distribuidor, visto que foi esta a seleccionada para o presente projeto, atendendo a que só implementei uma vela.

Neste tipo de sistema sem distribuidor, cada cilindro possui a sua própria bobina de ignição, eliminando a necessidade de um distribuidor. Este sistema é controlado pela ECU, que envia pulsos para as bobinas com base em informações de sensores. Neste sistema, a centralina regula o módulo de controle eletrônico e dirige as bobinas de ignição para a faísca das velas, permitindo um maior controle de cada uma, como disposto na Figura 6.

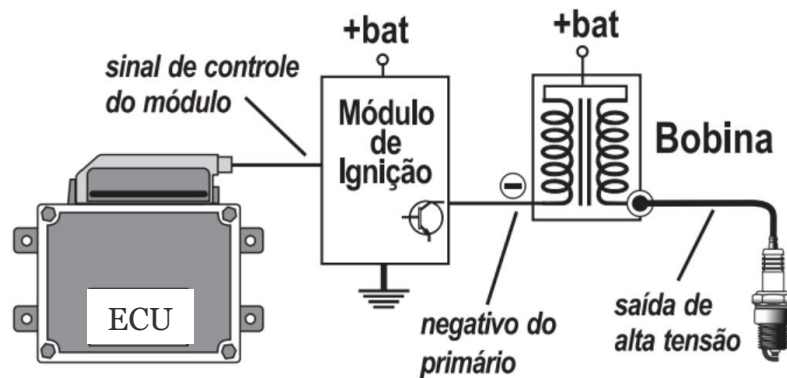


Figura 6-Componentes da ignição eletrônica sem distribuidor [27]

2.5. Motor Honda GX-35

Assim como referido numa etapa inicial deste projeto, o objeto de trabalho desta Dissertação remete para o motor Honda GX-35, um motor a 4 tempos, reconhecido pela sua leveza, durabilidade e alta eficiência energética. Esse motor monocilíndrico, refrigerado a ar, foi projetado para aplicações versáteis, combinando potência com um design compacto de fácil manuseio. A simplicidade da sua mecânica permite uma manutenção prática e de baixo custo operacional, fazendo deste uma escolha ideal para diversas finalidades comerciais e industriais (ver Figura 7).



Figura 7- Honda GX-35 [28]

Além disso, o GX-35 apresenta algumas características únicas para a sua categoria, incluindo a sua capacidade de funcionar em qualquer posição ou inclinação, graças ao seu sistema de lubrificação forçada. Um aspeto que expande as possibilidades do seu uso em equipamentos que operam em posições variadas, como máquinas de jardinagem, bombas de água, geradores portáteis, ferramentas de construção, entre outros.

A sua alimentação é feita por meio de um carburador, Figura 8, componente onde se mistura o ar com o combustível numa proporção adequada antes de serem injetados na câmara de combustão. Embora este motor ainda utilize um sistema de carburador em vez de um sistema de injeção eletrónica, a sua simplicidade mecânica torna-o muito mais duradouro, resistente e confiável.



Figura 8- Carburador do GX-35

Além disso, o GX-35 é conhecido por ter um arranque fácil, baixo peso e resistência a condições de uso intensivo. O seu design foi projetado para reduzir emissões, tornando-o numa opção mais sustentável para as suas aplicações.

Para o melhor detalhe das suas especificações técnicas, que incluem potência, binário, consumo de combustível e outras características mecânicas, consulte a Tabela 1.

Tabela 1: Características do GX-35 [29]

Especificações	Detalhes
Arranque	Cordel
Capacidade	35,8 cm ³
Capacidade de Óleo do Motor	0,1 Litros
Capacidade do Tanque de Combustível	0,63 Litros
Ciclo do Motor	4 tempos
Combustíveis	Gasolina
Consumo de Combustível e Potência	0,71 L/h 7000 rpm
Diâmetro x Curso	39 x 30 mm
Dimensão (L x W x H)	198 x 234 x 240 mm

Especificações	Detalhes
Lubrificante	Óleo de Mistura
Número de Cilindros	1 cilindro (Monocilíndrico)
Massa Seca	3,679 kg
Potência Efetiva	1,0 kW (1,3 HP) /7000 rpm
Razão de Compressão	8,0:1
Rotação do Veio	Anti-Horário
Sistema de Alimentação de Combustível	Carburador
Sistema de Arrefecimento	Ar Forçado
Sistema de Ignição	Ímã Transistorizado
Binário Máximo Efetivo	1,6 N.m (0,16 kg.f.m) /5500 rpm
Velocidade de Ralenti	3100 ± 200 rpm

De todas estas características, saliento 3: o ciclo de 4 tempos, o carburador e a ignição por magneto, dado que na minha ótica, são estes os aspetos que melhor definem o motor em desenvolvimento, e que, portanto, decidi atuar e alterar com o intuito de otimizar o motor.

2.5.1. Ciclo a 4 Tempos

O funcionamento motor GX-35 envolve uma passagem por 4 fases de forma a completar o seu ciclo. Estas fases passam pela admissão do ar, compressão do ar, expansão dos gases de combustão e escape, sendo necessário para isto 2 voltas completas da cambota, Figura 9.

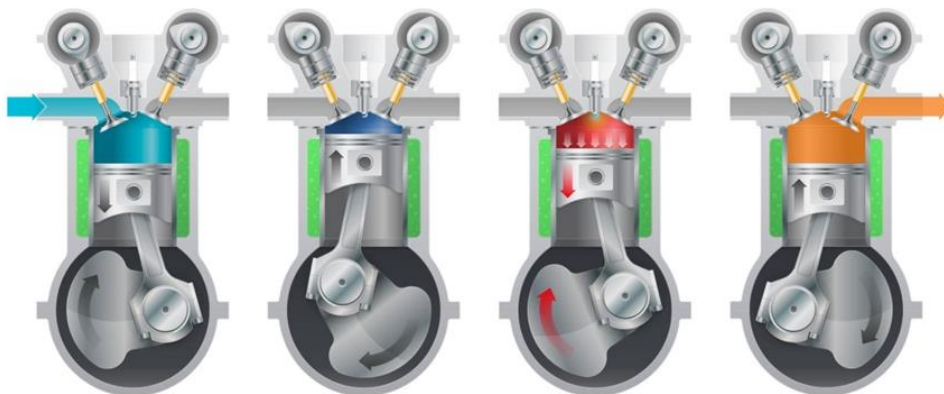


Figura 9- Ciclo a 4 tempos (admissão; compressão; expansão; escape) [30]

No primeiro tempo, ocorre a admissão da mistura ar/combustível, previamente feita pelo carburador, no interior do cilindro. Para que tal aconteça, a válvula de admissão abre-se e o pistão move-se até ao ponto morto inferior (PMI), sugando este gás para o interior do cilindro.

Em seguida, no segundo tempo, chamado de compressão, o pistão desloca-se do PMI para o ponto morto superior (PMS) e a válvula de admissão fecha-se, criando um vácuo para que a mistura possa ser comprimida, sem risco de escapamento, dada a subida do pistão.

Já no terceiro tempo, a vela de ignição liberta uma pequena faísca para que a mistura comprimida se inflame. Esta queima gera energia e empurra o pistão do PMS para o PMI, motivo pelo qual esta etapa é denominada de expansão.

Por fim, no quarto tempo do ciclo, designado de escape, a válvula de escape abre-se e o pistão que previamente se encontrava no PMI começa a subir e os gases provenientes da queima são libertados durante o seu deslocamento até ao PMS, recomeçando-se um novo ciclo após. [31]

2.5.2. Carburador

De modo que o combustível chegue ao motor, inicialmente é necessário acionar uma bomba manual para criar um vácuo e assim preencher o carburador de combustível. No entanto, durante o funcionamento do motor, esta ação já não se aplica, dado que o nível de combustível é controlado por uma válvula autossuficiente, que se fecha quando o carburador fica cheio de gasolina de maneira a não deixar passar mais, processo este retratado na Figura 10.

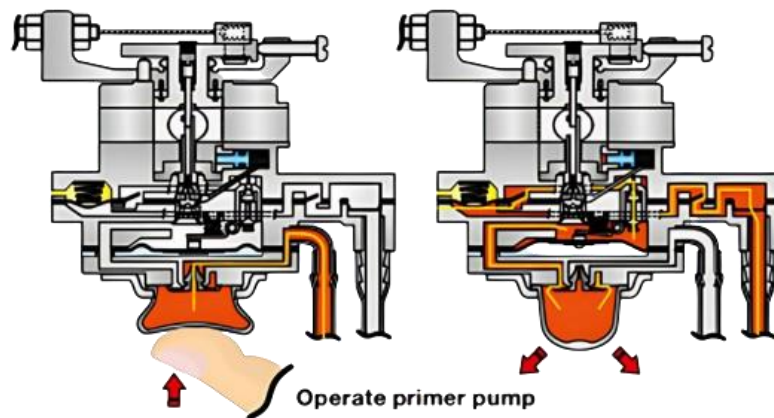


Figura 10- Ativação da bomba do carburador [29]

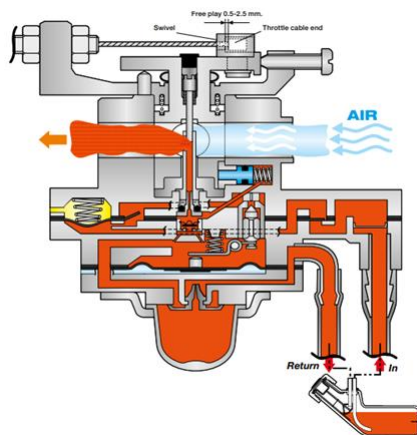


Figura 11- Funcionamento do carburador [32]

Na Figura 11 é possível observar que, depois do carburador se encontrar cheio de combustível, o ar é sugado para dentro do motor, criando uma corrente que direciona o combustível presente no carburador para a mesma direção e sentido do ar, gerando-se uma mistura ar/combustível uniforme. Assim, quanto maior for o caudal de ar, maior será a quantidade de gasolina levada do carburador. Nessa mesma figura, também é possível perceber que existem 2 mangueiras, uma de admissão, que leva a gasolina para o carburador, e outra de retorno, que leva o excesso de combustível para o tanque, mantendo assim o carburador sempre cheio e com uma pressão constante necessária ao seu bom funcionamento.

2.5.3. Ignição por Magneto

Para que a queima de ar/combustível proveniente do carburador receba a faísca originada pela vela, é necessário um sistema de ignição, que no caso do GX-35, é um sistema por magneto.

Este tipo de ignição é independente, autossuficiente e amplamente utilizado em motores de baixa cilindrada, como os de corta-relvas, motosserras e alguns motores antigos de automóveis ou monociclos. A grande vantagem deste sistema é que não precisa de uma bateria ou de qualquer fonte externa de energia para gerar a faísca para a ignição do combustível.

O funcionamento da ignição por magneto começa com um ímã permanente, Figura 12, montado num rotor que gira junto com o motor. À medida que o rotor gira, o ímã passa próximo de uma bobina de indução, Figura 13, composta por 2 enrolamentos de fio, tal como já referido.

Neste motor em específico, a bobina vem colocada estrategicamente num ângulo de ignição de 27°, ângulo este versátil tanto para baixas como para altas rotações, pois permite um bom funcionamento em qualquer rotação.

Uma das maiores desvantagens deste método é que não é possível a variação deste ângulo, o que impossibilita a obtenção de ignições ótimas para baixas e altas rotações.



Figura 12- Bonina fixa do GX-35



Figura 13- Magneto do volante

3. Software e Hardware

3.1. Software

De modo a alcançar todas as alterações a que me predispus realizar no presente trabalho, foi necessária a implementação de diversos softwares, cada um destes direcionado para um aspeto em concreto dessas mesmas modificações.

Dito isto, e por ordem de utilização, foram implementados os seguintes softwares: Arduíno, Prop Selector, SOLIDWORKS, PrusaSlicer, TunerStudio MS, MegaLogViewer.

3.1.1. Arduíno (2.3.3)

Para um primeiro processo de ensaio do motor, ainda sem quaisquer alterações, foi necessário implementar um software que permitisse a leitura, recolha e calibração dos dados emitidos pelo mesmo. Esta plataforma de desenvolvimento permitiu criar um código necessário em linguagem C/C++ e programar a placa Arduíno para a comunicação com a célula de carga e com o sensor Hall.

No Anexo A estão disponíveis os 2 códigos utilizados neste trabalho, mais propriamente, um primeiro que permitiu a calibração da célula de carga e um segundo que permitiu a leitura tanto desta última como do sensor Hall.

3.1.2. Prop Selector

Para que o motor não funcionasse sem carga, foi necessário adicionar um elemento que oferecesse resistência ao seu movimento. Considerando o contexto aeronáutico, decidi utilizar uma hélice para esse propósito.

De facto, a carga aplicada pela força da hélice no motor foi aproximadamente constante, dado que os testes foram realizados num modo estático. Dessa forma, a curva de binário obtida dependeu apenas da posição do acelerador.

A escolha desta hélice foi apoiada pelo software Prop Selector, que com sua extensa base de dados permitiu prever teoricamente o comportamento de diversos parâmetros da hélice em determinadas condições de voo. Isto garantiu que a hélice selecionada fosse a mais adequada às características do motor em trabalho, evitando a aplicação de uma carga por excesso ou defeito.

Em termos práticos, e assim como ilustrado na Figura 14, foi configurada tanto a rotação máxima do motor (7000 RPM) como a velocidade do ar (35 MPH), e ajustados os valores de *pitch* e de

diâmetro da hélice de modo que a potência efetiva final correspondesse à idealizada para o motor (aproximadamente 1 kW). Após um processo iterativo, chegou-se à configuração ideal de 21x8, ou seja, uma hélice com 21 polegadas de diâmetro e 8 polegadas de *pitch*.

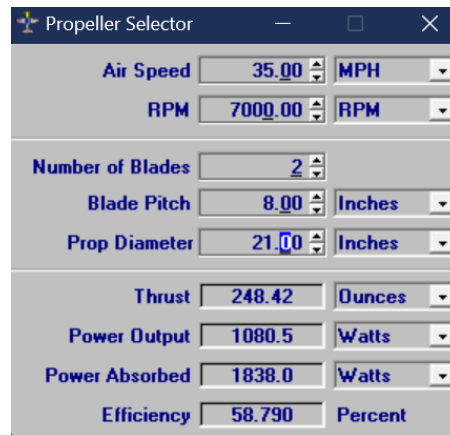


Figura 14- Implementação dos dados no Prop Selector

3.1.3. SOLIDWORKS (2022)

O SOLIDWORKS foi utilizado para criar modelos tridimensionais detalhados e precisos. No âmbito deste projeto, este foi fundamental para o desenvolvimento do *spinner* da hélice, disponibilizando-se no Anexo B o seu desenho técnico.

Este processo começou com a criação de um esboço inicial que definiu as dimensões e as formas básicas da peça. Posteriormente, foram aplicadas técnicas de modelação 3D, como extrusões e cortes, para dar forma ao modelo final. Após a validação, o modelo foi exportado em formato STL.

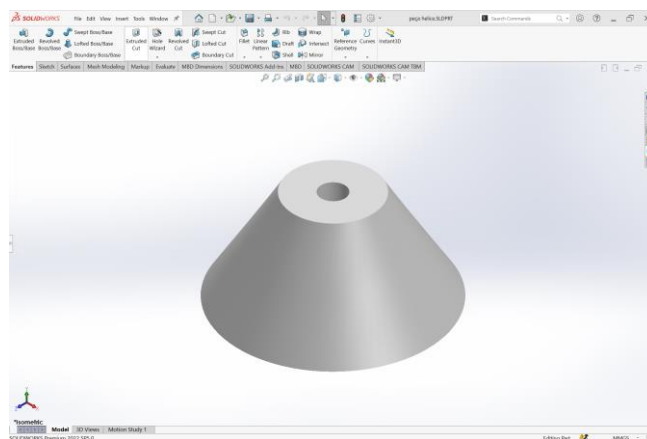


Figura 15- Desenho do spinner em SOLIDWORKS

3.1.4. PrusaSlicer (2.8.1)

O PrusaSlicer foi utilizado para converter o modelo 3D gerado anteriormente no SOLIDWORKS num ficheiro G-code, de modo que este seja lido pela impressora utilizada nesta tese - a 3D Prusa MK3-i.

Neste caso, o processo de impressão implicou a importação do ficheiro em formato STL no software e a configuração dos parâmetros de impressão, nomeadamente, a tipologia de material, a altura das camadas impressas, a densidade da peça impressa e a velocidade de impressão. Dito isto, a implementação deste software permitiu processar o modelo, dividindo-o em camadas e gerando as instruções necessárias para que a impressora reproduzisse a peça com precisão.

Após, este ficheiro foi convertido em G-code e transferido para a impressora, permitindo que esta fabricasse a peça de acordo com as especificações definidas no desenho original, conforme pode ser observado na Figura 16.

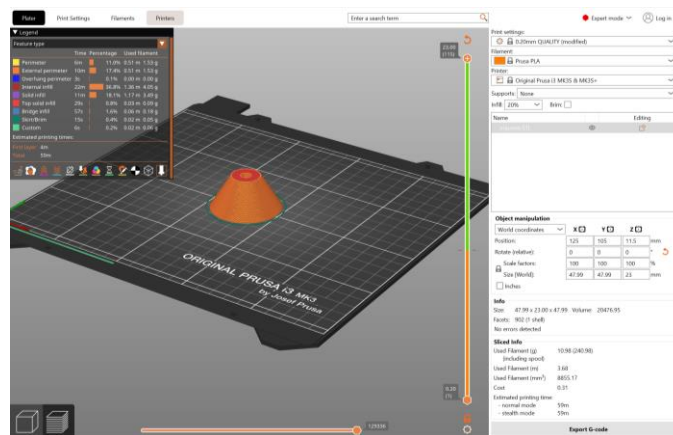


Figura 16- Implementação do spinner no PrusaSlicer

3.1.5. TunerStudio MS (3.2.03)

Assim como referido anteriormente, todas as funcionalidades do sistema centralina MegaSquirt-II podem ser controladas por um utilizador através de múltiplos softwares. No caso prático deste trabalho foi utilizado o TunerStudio MS.

De facto, este software é um padrão amplamente adotado pela comunidade MegaSquirt e o único compatível com todas as versões de controladores desta linha. Distingue-se dos demais pela sua interface intuitiva e interativa, que permite um controlo abrangente e uma visualização detalhada dos parâmetros operacionais do motor em tempo real, facilitando a afinação em diferentes condições de teste e operação.

Como é possível visualizar na Figura 17, personalizei o TunerStudio para exibir os 8 valores mais relevantes para o melhor controle do funcionamento do motor. Assim sendo, as métricas configuradas incluem a rotação do motor (RPM), a posição do acelerador (TPS), a temperatura do ar, a temperatura do bloco, o avanço da ignição, a pressão absoluta do coletor (MAP), a razão ar/combustível (AFR) e a perda de sinal (Lost Sync Counter). A seleção destes parâmetros surgiu do facto destes se apresentarem como cruciais para a monitorização e ajuste do desempenho e da eficiência do motor.



Figura 17- Personalização do TunerStudio

3.1.6. MegaLogViewer (4.2.4)

Para registo e análise dos dados obtidos no software anterior, houve a necessidade de implementar um novo software, o MegaLogViewer. Uma plataforma de análise que permite visualizar, em tempo real e com elevado grau de detalhe, os resultados dos testes efetuados e as respostas do motor às diferentes configurações aplicadas.

Além disso, este também auxilia na identificação de possíveis problemas e na consequente criação de soluções adequadas para a otimização do desempenho do sistema.

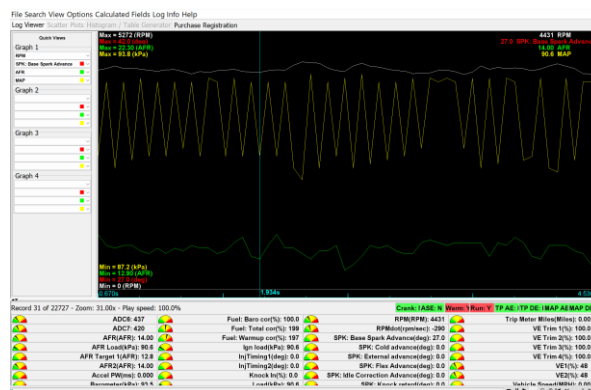


Figura 18- Análise de dados do MegaLogViewer

3.2. Hardware

Para realizar as conversões e adaptações necessárias para EFI e EI, foi imprescindível o uso de diversos componentes. Estes incluem sensores, atuadores e outros elementos essenciais ao funcionamento dos sistemas, da qual são exemplo os componentes eletrônicos e mecânicos. Abaixo, apresenta-se uma lista detalhada destes componentes, acompanhada de uma breve descrição das suas funções, características e aplicabilidade dos mesmos nesta tese.

3.2.1. Componentes Eletrônicos

Bateria (AUTOSIL 12V): Inicialmente, foi utilizada uma única bateria de 12V para alimentar a centralina, a bomba de combustível e o motor de arranque. Contudo, para preservar a carga e otimizar o desempenho destes últimos, optou-se por se adicionar mais uma bateria idêntica. Uma delas dedicada exclusivamente ao motor de arranque e a outra dedicada ao fornecimento de energia à centralina e à bomba de combustível.

Bobina de Ignição (MAGNETI MARELLI 060717010012): Tal como já mencionado, esta bobina opera seguindo o princípio de um transformador. No entanto, o que a diferencia das demais é a sua capacidade de fornecer uma tensão elevada de forma consistente e uma consequente combustão eficiente. Além disso, este modelo específico é projetado para suportar condições exigentes, como variações extremas de temperatura e vibração.

Ademais, esta contribui para a minimização de perdas de energia e para a maximização da eficiência do motor, economizando combustível e reduzindo emissões. Outro aspeto relevante é o seu sistema de dissipação térmica, que assegura a durabilidade da bobina mesmo sob uso intenso, fazendo desta, uma escolha confiável para motores de alto desempenho. Neste projeto, a sua implementação foi fundamental dado a sua implicância no processo da ignição eletrónica.

Bomba de combustível (10 bar): Projetada para operar a uma pressão de até 10 bar. Esta assegura uma pressão constante para o injetor, contribuindo para uma mistura ar/combustível eficiente.

Dado o seu design compacto de 31mm de diâmetro, é ideal para aplicações onde o espaço disponível é limitado. Além disso, esta possui um consumo reduzido de energia, operando com uma corrente de apenas 2A. Contudo, esta é capaz de fornecer um caudal de 25L/h, garantindo um suprimento adequado de combustível para atender às necessidades do motor, mesmo em sobrecarga. No caso concreto desta tese, este foi aplicado dada a sua necessidade no sistema EFI.

Célula de Carga (S Type DYLY-103, 20kg): É uma peça de metal que, sob carga, sofre deformação elástica. Esta deformação/tensão é detetada e convertida num sinal elétrico, tendencialmente muito fraco, motivo pelo qual se utilizou um amplificador HX711. Uma

adaptação que possibilita a medição da força aplicada no elemento de metal e no binário do motor, em consequência.

ECU (MegaSquirt 2): A MegaSquirt 2 é uma ECU versátil e programável, essencial para gerir e otimizar o desempenho do motor em sistemas EFI e EI. Assim sendo, este componente permite um controlo preciso da quantidade de combustível injetada, ajustando dinamicamente a mistura ar/combustível com base nos dados recolhidos por sensores espalhados pelo motor.

Além disso, este calcula o momento ideal para a ignição da mistura, garantindo uma queima eficiente e estável, o que melhora o desempenho do motor, reduz o consumo de combustível e minimiza problemas de pré-ignição. Graças à sua capacidade de ser calibrada e ajustada pelo utilizador, esta ECU é altamente personalizável, permitindo configurações adaptadas às necessidades específicas do motor e do projeto. [33]

Fusíveis (5 e 10A): A proteção dos circuitos elétricos foi efetuada mediante a utilização de determinados fusíveis, no que diz respeito à sua amperagem, com vista ao consumo específico dos restantes componentes. Assim, no caso da centralina, optou-se por um fusível de 5A. Já para a bomba de combustível foi implementado um fusível de 10A.

Em qualquer caso, o seu uso não apenas maximiza a segurança do sistema, como também simplifica os procedimentos de diagnóstico e manutenção, garantindo a integridade dos componentes individuais e em grupo, promovendo a confiabilidade global do sistema.

Injetor (160cc): Especialmente projetado para aplicações de baixa cilindrada, garantindo uma entrega precisa de combustível ao motor. Este modelo é capaz de fornecer 160cm³ de combustível por minuto, o que assegura uma dosagem exata para a combustão ideal, fundamental para a eficiência de motores, como o GX-35.

Este foi concebido para funcionar consistentemente em diversas condições de pressão e temperatura, garantindo a sua fiabilidade mesmo em ambientes desafiadores, mantendo o desempenho do motor em níveis ótimos.

Mainfold Air Pressure (MAP): O sensor de pressão absoluta do coletor é responsável por medir a pressão do ar dentro do coletor de admissão do motor, uma informação essencial para a ECU. Efetivamente, este elemento surge integrado na ECU e permite calcular com precisão a quantidade de combustível a ser injetada, assegurando uma mistura ar/combustível ideal. Neste caso, a sua aplicabilidade no projeto não difere da acima exposta.

Módulo de Ignição (BOSCH 1 227 022 008): Desempenha um papel essencial no sistema EI. Conhecido também como estágio final ou de potência, este incorpora um transístor de potência responsável por controlar o lado negativo da bobina de ignição, por meio do corte da

corrente primária, o que induz a alta tensão necessária para a criação da faísca e limitação da corrente máxima, o que protege o sistema do sobreaquecimento.

O seu uso neste projeto advém da sua compatibilidade com a bobina selecionada neste trabalho, aspecto este comprovado aquando do teste de faísca.

Motor de arranque (Sullivan Dynatron): O motor de arranque selecionado para este projeto é do tipo *spinner* externo, um modelo especificamente projetado para transferir movimento ao motor, aquando do arranque, através do atrito gerado pelo contato direto entre o motor de arranque e o *spinner* acoplado à hélice. Esta estratégia elimina a necessidade de mecanismos sofisticados, dado que se baseia exclusivamente na fricção para a indução da rotação do GX-35 até um estado operacional autónomo. Para além disso, o seu uso reduz significativamente o peso total do sistema, uma vez que o motor é acionado apenas no solo, o que proporciona uma vantagem em relação aos motores de arranque fixos, que adicionam peso e complexidade permanente ao conjunto.

Sensor de Posição do Acelerador (TPS): O *Throttle Position Sensor* surge instalado no corpo do acelerador e tem a função de medir a posição da válvula de borboleta, que ajusta a entrada do ar no motor. Este transmite essas informações à ECU por meio de um sinal elétrico, que é convertido em uma percentagem equivalente à abertura da válvula de borboleta. Com base nesse dado, a ECU ajusta a injeção de combustível, garantindo uma resposta instantânea do motor e uma mistura ar/combustível adequada às condições de operação.

Comparativamente com o sensor MAP, este apresenta-se especialmente útil aquando de mudanças bruscas no acelerador, dado que permite que a centralina reaja de forma mais rápida.

Dado que nesta tese todos os testes efetuados decorreram num regime estático, no que diz respeito às RPM utilizadas, o sensor MAP surge como o mais indicado a ser implementado dado que melhor se direciona para situações estáveis, mostrando-se assim o TPS desnecessário neste trabalho. Contudo, este também foi instalado no trabalho tendo em conta a sua importância em possíveis cenários de acelerações ou desacelerações bruscas, em condições reais de voo.

Sensor de Temperatura do Ar e do Bloco (NTC 100kR): Estes sensores desempenham um papel fundamental em sistemas eletrónicos. No entanto, enquanto o sensor de temperatura do ar de admissão (IAT) mede a temperatura do ar que entra no motor, o sensor de temperatura do motor (ECT) monitoriza a temperatura do próprio bloco do motor. Ambos são termístores do tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*), cujo valor de resistência diminui à medida que a temperatura aumenta.

Conforme referido acima, o sensor IAT fornece dados essenciais à ECU sobre a temperatura do ar admitido. Conforme esta temperatura, este ajusta a quantidade de combustível injetada para manter uma relação ar/combustível ideal.

Do mesmo modo, o sensor ECT informa a ECU sobre a temperatura de funcionamento do motor, ajustando o enriquecimento da mistura durante o aquecimento e cortando a corrente durante o sobreaquecimento do motor, desligando-o para a sua preservação. [34]

Sensor Hall (VMA 313): É um dispositivo de alta precisão usado para detetar o número de rotações no motor. No caso do GX-35, este lê as rotações quando o seu ímã do volante passa por ele. Baseado no efeito Hall, este sensor gera uma diferença de potencial (tensão Hall) sempre que é exposto a um campo magnético, como o do ímã do volante. Este sinal elétrico é então utilizado para monitorar a posição do motor e sincronizar o sistema de ignição de forma precisa, garantindo um desempenho eficiente. [35]

Sonda Lambda (BOSCH LSU 4.9): É um sensor de oxigénio de banda larga instalado no sistema de escape, amplamente utilizado em sistemas eletrónicos. Tem como funções a monitorização do teor de oxigénio nos gases de escape, a gestão da combustão, a redução das emissões e a otimização da relação ar/combustível em motores.

Contrariamente aos sensores de banda estreita, que apenas indicam se a AFR está próxima do valor estequiométrico de 14,7:1 (para a gasolina), a BOSCH LSU 4.9 permite medições precisas em uma ampla faixa de funcionamento. Esta sonda mede valores de lambda de 0,68 a 1,36, correspondendo a uma AFR de 10:1 a 20:1 para a gasolina. Isto torna possível à ECU controlar a mistura em diferentes condições operacionais, proporcionando enriquecimento da mistura para uma máxima potência ou empobrecendo a mistura para uma economia de combustível. [46]

Wideband Controller (LD): Este componente é essencial para o funcionamento preciso de sistemas de monitorização da relação ar/combustível, em motores equipados com a sonda lambda BOSCH LSU 4.9. A sua principal função debruça-se sobre a interpretação do sinal elétrico gerado pela sonda e pela sua conversão em uma voltagem linear (0-5V).

Ao receber o sinal da sonda lambda, o controlador LD processa as informações com alta precisão, permitindo que a AFR seja medida em toda a faixa de operação do motor, desde misturas ricas a pobres. Isso é crucial para aplicações onde ajustes dinâmicos na injeção de combustível são necessários para otimizar o desempenho, a eficiência e as emissões.

Com a sua capacidade de fornecer um sinal de saída confiável e padronizado, esta é indispensável para sistemas eletrónicos modernos, garantindo que a ECU tenha sempre dados precisos. [37]

3.2.2. Componentes Mecânicos

Acelerador por Cabo: Um sistema que permite a variação do acelerador à distância, de modo constante, o que garante uma maior segurança para o utilizador, facilitando o processo de testagem do motor.

Adaptador da Hélice: Uma peça anexada ao volante do motor, anteriormente desenvolvida num trabalho académico, de contexto semelhante, com o intuito de instalar uma hélice no decorrente motor em desenvolvimento.

Corpo de Acelerador (28 mm): Um componente de 28mm de diâmetro, com flange, que integra uma entrada para o injetor de combustível e um sensor de posição do acelerador (TPS). A implementação deste dispositivo surge como essencial para a regulação do fluxo de ar que entra no motor, influenciando diretamente a mistura ar/combustível e o consequente desempenho do veículo [38].

Limitador de fluxo: Devido à diferença de diâmetro entre a entrada original de ar no motor e o corpo de acelerador instalado, foi necessário utilizar um adaptador para restringir o fluxo de ar que entra no motor. Tal como o adaptador da hélice, este componente também foi anteriormente desenvolvido num trabalho semelhante, denominado “Controlo Eletrónico de um Motor Monocilíndrico”, para o mesmo fim. É importante referir que esta peça de alumínio possuía duas entradas, uma para o sensor MAP e outra para o injetor, 2 elementos cruciais para os sistemas de EI e EFI.

Mesa de Ensaio: Um componente projetado com base na 3ª Lei de Newton, ou seja, no princípio de ação e reação. Esta é composta por um eixo que possui 2 rótulas, responsáveis por permitir o movimento da mesa aquando da aplicação de uma força proveniente da rotação da hélice do motor. Por sua vez, a célula de carga localizada na extremidade oposta das rótulas reage de forma contrária a este movimento, impossibilitando a movimentação dessa mesa e medindo a força aplicada pelo motor.

A decisão da sua implementação neste trabalho adveio de uma inspiração no projeto “Controlo Eletrónico de um Motor Monocilíndrico”, tendo sido necessário efetuar apenas pequenas alterações de modo a ser possível aplicá-la no GX-35.

Spinner da Hélice: Consiste numa peça específica projetada no software SOLIDWORKS, presente no Anexo B, com o intuito de ser colocada na extremidade da hélice, de modo a evitar deslocamentos indesejados da hélice e a permitir o uso do motor de arranque. Para o seu processo de impressão no PrusaSlicer foram definidos alguns aspetos, como o material da impressão (PLA), o seu *infill* (20%) e a necessidade de uma breve interrupção automática, no próprio

processo de impressão, num momento específico, de modo a ser-se possível inserir uma porca de forma precisa, por meio de um furo prévio.

Regulador de Pressão: Constituído por uma membrana (diafragma) e uma mola, que controla uma válvula que se abre e fecha de acordo com a pressão do combustível. Quando a pressão de combustível na linha está abaixo da calibrada no regulador, a válvula permanece fechada até que a bomba consiga pressurizar o sistema. Ultrapassado o valor ideal, neste caso, os 3 bar de pressão na linha, a pressão abre a válvula, permitindo que o excesso de combustível retorne ao tanque.

Tanque de Combustível: Um reservatório no qual é armazenado o combustível e onde tanto se inicia como se encerra o percurso do seu conteúdo. Este tanque contém um filtro de modo a evitar que qualquer impureza do combustível chegue à bomba ou até mesmo ao injetor, prejudicando o bom funcionamento do motor.

Hélice 16x10: A hélice acrescentada neste motor possui 16 polegadas de diâmetro e um passo de 10 polegadas, sendo uma das hélices mais usadas em drones com motores de potência semelhante. Apesar de ligeiramente contraditório, ao recorrer ao software PropSelector e à sua extensa base de dados experimentais, que permite prever o comportamento de diversos parâmetros da hélice, para determinadas condições de voo, é possível seleccionar a que melhor se enquadra com as características do motor. Com o seu uso, obtive como recomendação uma hélice de dimensões ligeiramente diferentes (21x8), contudo implementei a de 16x10, uma decisão influenciada pelo facto de só haver disponível em laboratório, no imediato, esta última.

4. Alterações e Montagens

De todos os componentes referidos anteriormente apenas foi necessário a compra do corpo de acelerador. Apesar de não ser um objetivo primordial, tentei sempre manter esta tese dentro de um nível baixo de orçamento, utilizando sempre que possível e plausível os componentes que estavam à minha disposição.

De um modo geral, o processo da adaptação e desenvolvimento deste trabalho subdividiu-se em 4 grandes momentos, sendo estes: a remoção dos componentes, a montagem inicial de componentes externos para a testagem do motor inicial, a implementação do sistema EFI e a implementação do sistema EI.

Por sua vez, cada um destes momentos engloba diversas fases. Assim sendo, num primeiro instante procedi à remoção de componentes não essenciais para o bom funcionamento do motor.

Numa segunda fase efetuei a montagem da mesa de ensaio, à instalação da hélice, à implementação do Arduino Nano, à montagem do cabo de acelerador, do tanque de combustível e da sua respetiva balança.

Já na terceira fase, removi o carburador e conseqüente instalação do corpo de acelerador e seus constituintes, à realização de ajustes no sistema de combustível, à implementação de termístores, à montagem da sonda lambda e à implementação de sensores na centralina.

Finalmente, numa quarta fase executei a montagem do módulo de ignição e da bobina. Momentos estes melhor descritos abaixo:

4.1. Redução do Peso

A primeira alteração efetuada no GX-35 foi a redução do peso, pois, apesar deste ser um motor bem compacto, este possui elementos passíveis de remoção, dado que não comprometem o bom funcionamento do motor.

Numa primeira instância, foram retiradas todas as capas protetoras do bloco, extraindo-se uma massa total de 215,09 g. Além disso, foi retirado o conjunto de arranque por cordel, com 141,64 g, um acessório que se tornou dispensável dado que este será sempre acionado por meio de um arranque elétrico.

Ademais, a embraiagem centrífuga e a respetiva chapa protetora também foram removidas, com uma massa combinada de 283,44 g. Adicionalmente, a capa protetora do carburador e a esponja de filtro também foram removidas, resultando numa redução de mais 62,28 g.

Além disso, foram omitidos o escudo de calor e o seu suporte em plástico, bem como o suporte inferior, com uma massa total de 121,17 g e de 70,46 g, respectivamente.

Adicionalmente, inúmeras pequenas peças também foram retiradas, pois, embora o peso individual destas não seja considerável, em conjunto, proporcionaram uma redução de 164,26 g da massa total do motor, o que contribuiu significativamente para a diminuição do seu peso total e para a melhoria da sua eficiência, conforme expresso na Tabela 2:

Tabela 2- Componentes removidos

Componentes Removidos [Figura 19]	Massa (g)
Capas protetoras do motor	215,09
Conjunto do Cordel (Arranque)	141,64
Componentes da embraiagem	283,44
Capa protetora do carburador e filtro	62,28
Escudo térmico	121,17
Suportes de plástico	70,46
Pequenas peças	164,26
Total (Anexo C)	1062,34

Efetivamente, foi possível remover 1062,34 g, ou seja, cerca de 1 kg de um motor que originalmente pesava 3679,05 g seco. Isto traduziu-se numa redução de cerca de 29% do seu peso, obtendo-se uma massa final de 2612,09 g.



Figura 19- Componentes removidos

4.2. Componentes Externos para a Testagem Inicial

4.2.1. Mesa de Ensaio

Foi utilizada uma mesa de ensaios equipada com um suporte fixado por 4 parafusos, cada um acompanhado de uma porca e uma anilha, para garantir maior aderência e estabilidade, como mostrado na Figura 20.



Figura 20- Montagem da mesa de ensaios

4.2.2. Célula de Carga

Neste suporte, foi também instalada a célula de carga, presa através de duas porcas (uma na parte superior e outra na inferior), conforme visível na Figura 21. Também foi afixado um motor ao suporte, por meio de 2 parafusos, como ilustrado na mesma figura, aspecto este extremamente importante para a futura análise estática do mesmo.

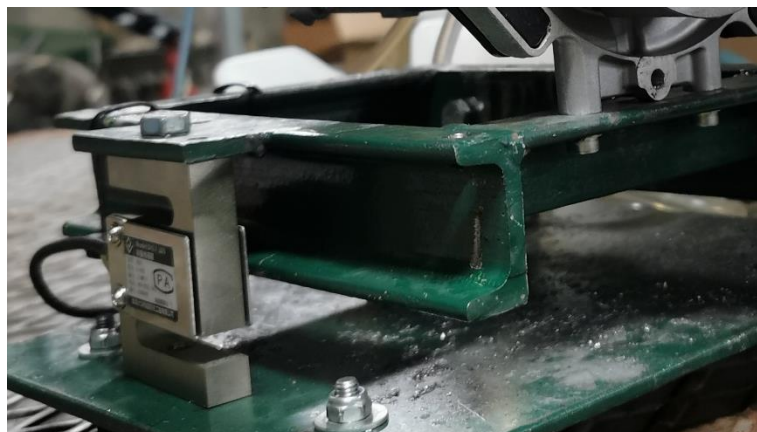


Figura 21- Montagem da célula de carga

4.2.3. Sensor Hall

O sensor Hall foi instalado conforme apresentado na Figura 22, sendo fixado o mais próximo possível do volante do motor, por meio de 2 parafusos. Esta posição foi escolhida para garantir medições mais precisas da velocidade.

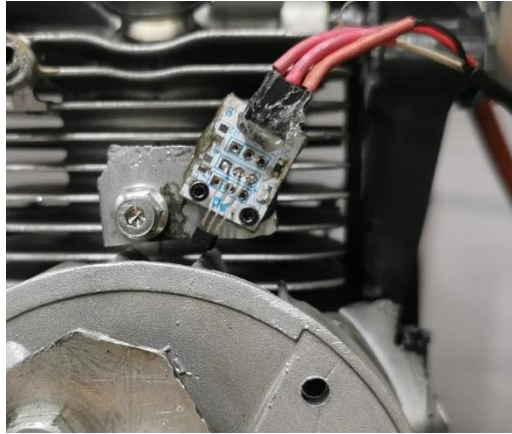


Figura 22- Montagem do sensor Hall

4.2.4. Arduíno Nano

A instalação completa do sensor Hall e da célula de carga foi feita através de uma *breadboard*, como demonstrado na Figura 23. Esta serviu como plataforma para conectar o Arduíno e o amplificador HX711, elementos necessários ao bom funcionamento do sistema.

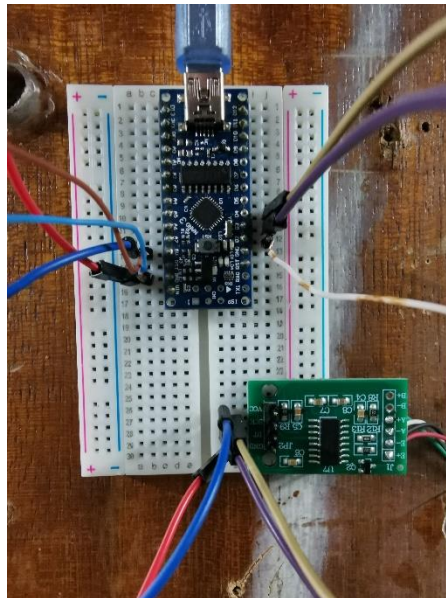


Figura 23- Montagem da célula de carga e sensor Hall à breadbord

Para melhor percepção do panorama geral do referente sistema (sensor Hall, célula de carga, Arduino e amplificador), deixo ilustrado um diagrama na Figura 24.

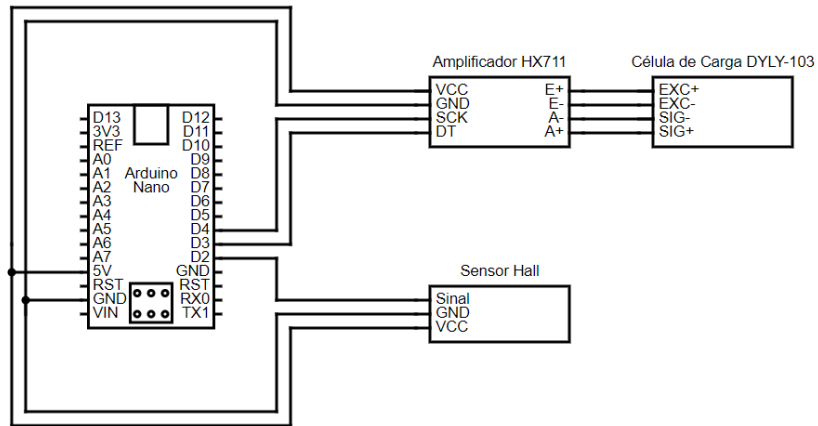


Figura 24- Diagrama das ligações do Arduino [39]

4.2.5. Hélice

Já para possibilitar a aplicação de uma hélice no sistema, foi implementado um adaptador de alumínio fixado diretamente ao volante do motor por meio de 2 parafusos. Este adaptador possui um eixo roscado para a hélice ser instalada de forma segura (Figura 25).



Figura 25- Montagem do adaptador da hélice

A instalação da hélice foi realizada no lado correspondente ao volante do motor, tendo em conta o sentido de rotação anti-horário, característico de hélices do tipo *puller*.

Após a sua montagem, foi inserido um *spinner*, projetado especificamente para esta aplicação e fabricado por impressão 3D. Durante o processo de impressão, uma porca foi embutida no

interior do *spinner*, reforçando a sua fixação ao eixo. Esse detalhe construtivo foi fundamental para garantir a resistência da peça durante o seu funcionamento.

Para finalizar a sua montagem, uma nova porca foi utilizada para prender o *spinner*, garantindo que todo o conjunto – adaptador, hélice e *spinner* – estivesse firmemente fixado e alinhado. Esse sistema foi desenvolvido para assegurar a estabilidade e a segurança durante a operação do motor, além de oferecer uma solução aerodinâmica e funcional, como mostrado na Figura 26.

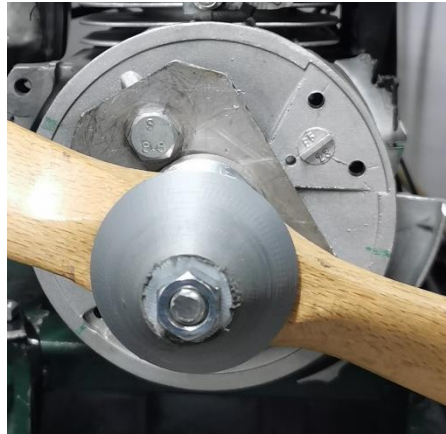


Figura 26- Montagem da hélice e do spinner

4.2.6. Tanque de Combustível

Também foi substituído o tanque de combustível por um modelo de maior capacidade. Assim, as linhas de combustível foram reposicionadas para fora da mesa de ensaios, permitindo que o tanque fosse colocado sobre uma balança. Essa mudança teve como objetivo minimizar interferências de vibrações externas, durante os testes, garantindo maior precisão na medição do consumo de combustível (Figura 27).

Para reforçar ainda mais a estabilidade da balança e reduzir ao máximo as interferências, foi colocado um tapete de espuma sob a mesa de ensaios. Uma camada adicional que serviu como um amortecedor, capaz de absorver vibrações transmitidas pelo ambiente ou pelo funcionamento do próprio motor, permitindo uma operação mais precisa e confiável da balança. Este mesmo processo foi aplicado nos pés da mesa de ensaio com um propósito idêntico. Alterações estas que contribuíram para a otimização da coleta de dados e para a obtenção de resultados mais consistentes durante os testes.



Figura 27- Montagem da balança e do tanque

4.2.7. Cabo do Acelerador

Para finalizar, foi também implementado um mecanismo de acelerador, previamente adaptado para controlar o carburador de forma precisa e segura, especialmente durante os testes. Conforme observado na Figura 28, o acelerador utilizado foi da Shimano, um elemento originalmente projetado para bicicletas.

Para a sua fixação, foi utilizado um parafuso firmemente preso a uma base de madeira, solução esta essencial para a estabilidade do mesmo durante o seu acionamento, dado que impede que este se mova quando sujeito a forças.

Além disso, o cabo do acelerador foi conectado diretamente ao carburador de modo a possibilitar o ajuste preciso do fluxo de ar e do combustível para o motor. Uma configuração que oferece um bom controle das RPM, minimizando o risco de falhas ou variações indesejadas aquando dos testes.



Figura 28- Montagem do cabo de acelerador

4.3. Injeção Eletrônica

A implementação de um sistema completo de injeção eletrônica exigiu uma série de alterações estruturais, que se apresentam expostas nos seguintes subtópicos.

4.3.1. Corpo de Acelerador

Num processo inicial, estas direcionaram-se para a remoção do carburador e consequente instalação do corpo de acelerador, com 28 mm de diâmetro de abertura, devidamente equipado com limitador de fluxo (Figura 29).



Figura 29- Montagem do corpo de acelerador e do limitador de fluxo

4.3.2. Fusível

Como já mencionado, foram também integrados 2 fusíveis (um de 5 e um de 10A). O primeiro foi diretamente ligado ao pólo positivo da bateria de 12V, de forma a evitar curtos-circuitos e o segundo à bomba, com o intuito de proteger o sistema elétrico.

4.3.3. TPS

Além disso, também foi inserido um sensor TPS, elemento este já incorporado no corpo de acelerador. Este foi conectado à centralina através de 3 condutores: positivo (12V), terra (GND) e sinal, devidamente associados aos seus pinos específicos.

4.3.4. Injetor

Ademais, um injetor também foi estrategicamente instalado na interface do limitador de fluxo (Figura 30), sendo mantido em posição por uma vedação eficiente, proporcionada por um o-ring de alta qualidade. A sua implementação requereu apenas 2 conectores elétricos: um condutor

positivo protegido por um fusível principal e um condutor de aterramento, ambos integrados no sistema de controlo eletrónico da centralina.

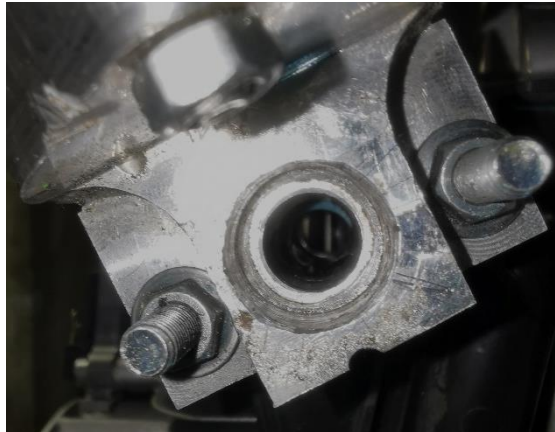


Figura 30- Montagem do injetor

4.3.5. Sensor MAP

Do mesmo modo, também foi conectado ao limitador de fluxo um sensor MAP (através de um tubo integrado na MS-II) com o intuito de canalizar o fluxo de ar para a centralina.



Figura 31- Montagem do MAP

4.3.6. Bomba de Combustível

Além disso, também foi implementada uma bomba de combustível com 2 terminais: positivo e negativo. O positivo foi conectado a um fusível (10A), em seguida a um interruptor *on/off* e à bateria, o que permitiu o acionamento controlado da bomba conforme a demanda. Já o negativo foi ligado diretamente à bateria, de modo a fechar o circuito.

4.3.7. Sistema de Combustível

Também foi adicionado um tanque de combustível, equipado agora com uma bomba entre o tanque e o injetor, que foi fixada à estrutura com abraçadeiras que asseguram a sua estabilização (Figura 32).



Figura 32- Montagem da bomba de combustível

Além disso, uma linha de alimentação de combustível foi conectada à entrada da bomba, enquanto uma linha de alta pressão foi direcionada ao injetor com o intuito de fazer chegar combustível pressurizado à entrada do injetor.

Do mesmo modo, uma linha de retorno foi integrada à saída do regulador de pressão com o intuito de fazer o combustível excedente retornar ao tanque. Todas estas conexões foram seladas com abraçadeiras de modo a prevenir fugas, formalizando-se assim o seguinte esquema, apresentado na Figura 33.

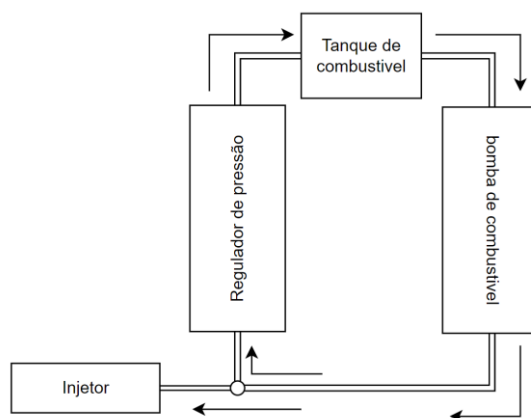


Figura 33- Diagrama das linhas de combustível [40]

4.3.8. Sensor de IAT

Para além disso, também foi inserido um sensor de temperatura de entrada de ar atrás do corpo de acelerador por meio de cola térmica (Figura 34). Este sensor, composto por 2 fios, encontra-se conectado ao GND e à centralina, e transmite valores de tensão que são interpretados pela MS-II, registrando a temperatura do ar de entrada.



Figura 34- Montagem do termistor IAT

4.3.9. Sensor de ECT

Adicionalmente, foi instalado um sensor de temperatura no bloco do motor para monitorizar a temperatura do mesmo aquando do arranque, tanto a frio quanto a quente, promovendo a sua segurança. Este sensor foi fixado no topo do bloco com um parafuso (Figura 35) e assim como o sensor de ar, este também possui 2 terminais: um conectado ao GND e outro ao pino correspondente na centralina.



Figura 35- Montagem do termistor do bloco

4.3.10. Sensor Hall

Apesar do sensor Hall ter permanecido na sua posição original, as suas 3 conexões foram redirecionadas para a MS-II. Assim, enquanto o GND e o sinal foram conectados diretamente aos respetivos pinos da centralina, o positivo foi ligado ao circuito protegido pelo fusível (5A).

4.3.11. Sonda Lambda

Além disso, foi necessário soldar uma anilha no escape de modo a criar-se uma espessura suficiente para abrir rosca, garantindo uma fixação segura e selada da sonda, que evite perdas de gases e favoreça leituras confiáveis. [41]

Esta sonda foi conectada ao controlador LD, que por sua vez estabelece ligações com a centralina, com o GND e com o fio positivo do sensor Hall, também protegido pelo fusível (5A).



Figura 36- Montagem da sonda lambda

4.3.12. Ligação à Bateria

Para finalizar, e de modo a fornecer energia à centralina, foi necessário ligá-la à bateria. O negativo da centralina foi ligado diretamente ao polo correspondente enquanto a ligação do positivo foi indiretamente efetuada ao polo positivo da bateria, por meio de um fusível geral (5A).



Figura 37- Montagem da bateria

Todas as ligações realizadas estão sintetizadas na Figura 38.

Já no Anexo D encontra-se o *pinout* completo da centralina.

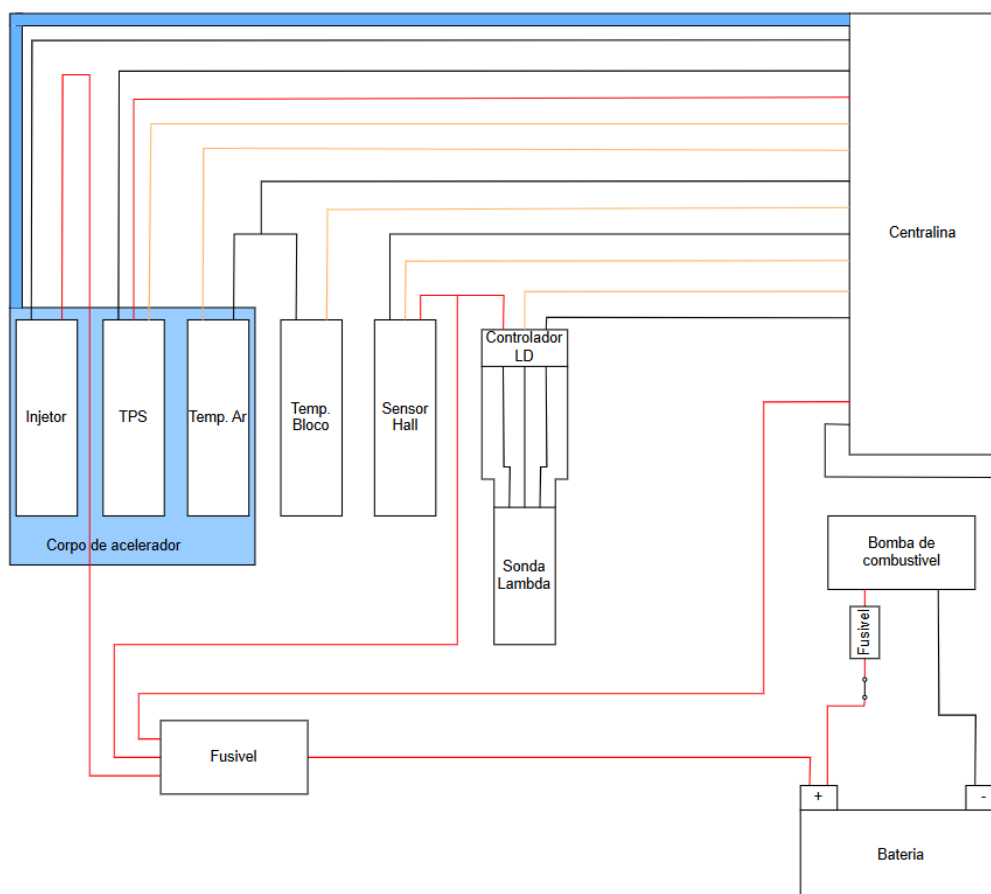


Figura 38- Diagrama das ligações EFI [40]

4.4. Ignição Elétrica

4.4.1. Bobina e Módulo de Ignição

Para a implementação do sistema de ignição eletrônica, foi removida a bobina de ignição original, e implementada uma nova bobina e um módulo de ignição, conforme ilustrado na Figura 39.



Figura 39- Montagem da bobina e módulo de ignição

Assim, o módulo de ignição foi integrado no sistema elétrico com uma ligação em paralelo da terra (GND) à chapa metálica da bobina, ao motor e ao GND principal da ECU, com o intuito de reforçar a ligação à terra e assegurar a integridade do circuito [42].

Adicionalmente, a alimentação de 12V, proveniente do fusível (5A), foi derivada para fornecer energia tanto ao módulo de ignição quanto à bobina. A comunicação entre este e a MS-II foi estabelecida por meio de um condutor, enquanto a interação direta entre a bobina e o módulo de ignição foi garantida por uma conexão entre ambos.

Dado que tanto a bobina como o módulo de ignição geram calor durante o seu funcionamento, foram selecionadas posições estrategicamente ventiladas para a sua instalação. Assim, a bobina foi fixada à estrutura do sistema por meio de 1 parafuso, enquanto o módulo de ignição foi montado com segurança através de 2, garantindo estabilidade e eficiência térmica.

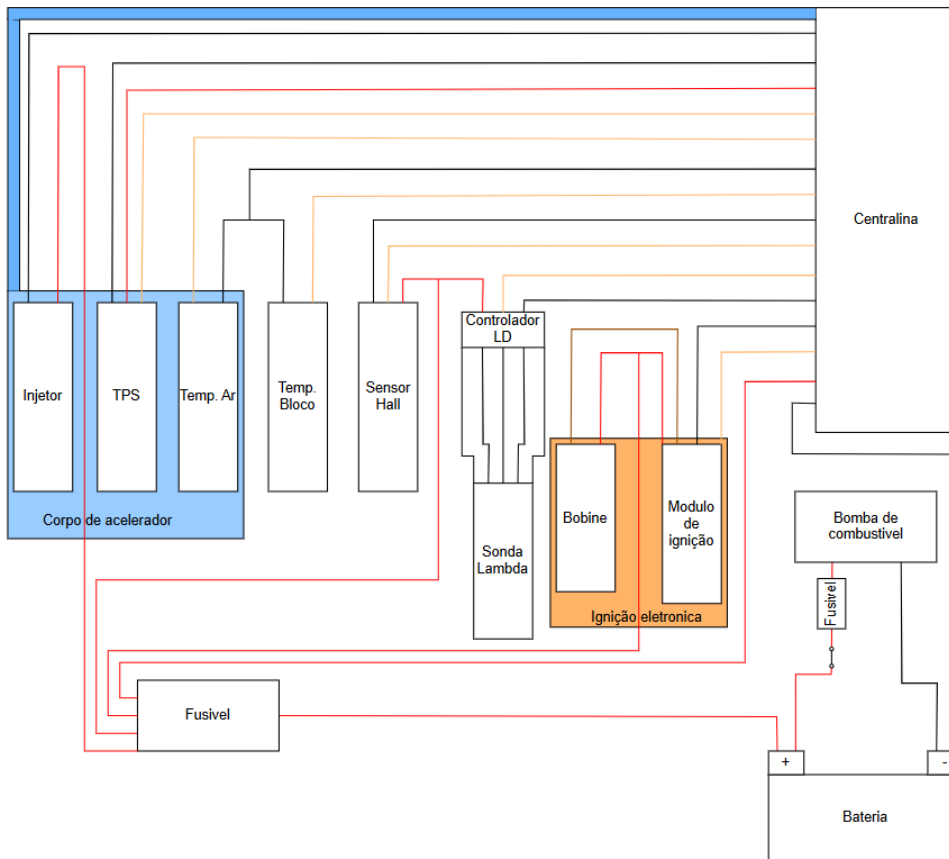


Figura 40- Diagrama da instalação elétrica EFI+EI [40]

Apesar de não ser possível adicionar a este trabalho uma foto real que ilustre claramente o modo como todos os componentes foram integrados no projeto, optou-se por se deixar exposta a Figura 41, de forma a favorecer uma compreensão prática da sua disposição final real.



Figura 41- Montagem do sistema completo (EFI+EI) no motor

4.5. Calibrações

Depois de instalados todos componentes foram necessárias 4 calibrações cruciais: da célula de carga, dos termístores, da sonda lambda e do TPS.

4.5.1. Célula de Carga

Para a calibração da célula de carga, recorreu-se à utilização do microcontrolador Arduino Nano em conjunto com um peso de referência conhecido. Através da utilização deste último foi possível determinar com precisão o fator de calibração específico para a célula de carga, em análise, por meio de um código elaborado, presente no Anexo A.

4.5.2. Termístores

A calibração dos termístores foi conduzida através do software TunerStudio MS, através dos seguintes passos:

Ao selecionar a opção “Calibrate Thermistor Tables” no menu “Tools”, o software solicitou a introdução de 3 pontos de calibração, cada um representando um valor de resistência e a respetiva temperatura. Todavia, dado que os termístores eram idênticos aos previamente caracterizados no estudo “Controlo Eletrónico de um Motor Monocilíndrico”, foi viável reutilizar os dados já obtidos, eliminando a necessidade de uma nova recolha de valores.

Após a definição dos pontos de calibração, procedeu-se à introdução do valor do resistor de polarização (Bias Resistor Value), que neste caso é 2490 ohms, um valor standard dos resistores bias da MegaSquirt.

Concluída esta etapa, selecionou-se a opção “Write to Controller” para gravar os dados na ECU e proceder à devida finalização do processo.

Este método foi aplicado tanto ao termístor responsável pela medição da temperatura do ar de admissão como ao termístor destinado ao monitoramento da temperatura do bloco, visto que ambos apresentavam especificações técnicas idênticas.

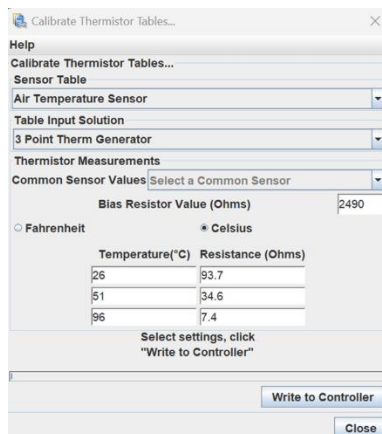


Figura 42- Calibração dos termístores

4.5.3. Sonda Lambda

A calibração da sonda lambda também foi realizada no TunerStudio. Para tal, acedeu-se à opção “Calibrate AFR Table” no menu “Tools” e selecionou-se o modelo “Innovate LC1/LC-2 Default” como padrão de configuração do sensor EGO. Após esta configuração, os dados foram compilados na ECU através do comando “Write to Controller”, encerrando a operação.

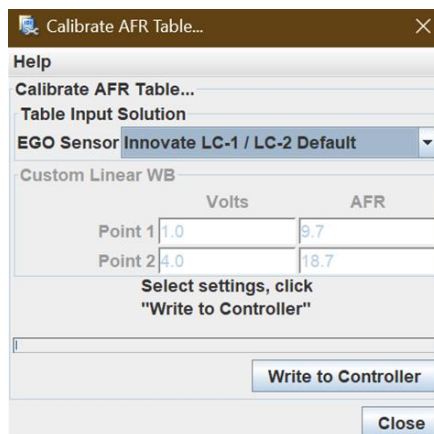


Figura 43- Calibração da sonda lambda

4.5.4. TPS

Por fim, a calibração do sensor TPS começou com a opção “Calibrate TPS” no menu “Tools”. Para isto o acelerador foi inicialmente posicionado em repouso (0%) e o valor da corrente recebida pela ECU foi registado após pressionar-se a opção “Get Current”. Seguidamente, o acelerador foi levado à posição máxima (100%) e o processo de registo foi repetido. Por fim, os dados foram gravados na ECU utilizando o comando “Write to Controller”, completando assim a calibração de todos os sensores envolvidos.

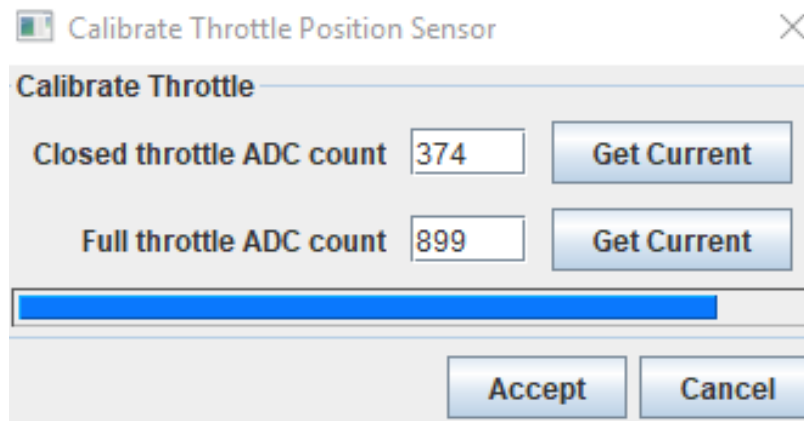


Figura 44- Calibração do TPS

Para além dessas 4 calibrações, também efetuei ajustes num dos programas utilizados anteriormente (TunerStudio) para este efeito. Dado o vasto número de ajustes realizados, irei salientar, em seguida, aqueles que na minha ótica se destacam como os principais.

No que diz respeito ao cálculo do combustível requerido, foi tido em consideração a cilindrada do motor (35.8 CC), o número de cilindros (1), o fluxo do injetor (160 cc/min) e a AFR (14.7).

Relativamente às características do motor, destaco o algoritmo de controlo (MAP) e o ciclo do motor (4 tempos).

Por fim, nas opções de ignição atendeu-se ao modo de faísca (basic trigger) e ao ângulo de disparo (52.10 °).

5. Ensaios

5.1 Contextualização das Medições

A melhor forma encontrada para realizar as medições do binário e dos consumos do GX-35, prendeu-se ao uso de uma célula de carga e de uma balança.

5.1.1. Medição do Binário

Efetivamente, a célula de carga mede em (kg), sendo depois convertida em uma força pelo meio da equação (2):

$$F_c = M_c g \quad (2)$$

Onde, M_c é a carga aplicada na célula de carga e g é a aceleração gravítica (9,80665 m/s²).

Esta força (F_c) que a hélice cria, aquando do seu funcionamento, permite calcular o binário de um motor, desde que se saiba a distância do centro da hélice à célula de carga (braço), por meio da equação (3):

$$B_m = L F_c \quad (3)$$

Onde, L o braço (0,18m).

Essa equação só é válida dado que o sistema se encontra em equilíbrio estático, sendo o somatório dos momentos em torno do eixo, nulo.

5.1.2. Medição dos Consumos

Para que fosse possível analisar os consumos do motor, foi utilizada uma balança com uma precisão de 0,01 g, capaz de medir a massa do combustível presente no tanque, no início e no final de um determinado tempo e velocidade escolhidos.

$$\dot{m}_f = \frac{m_{f_i} - m_{f_f}}{\Delta t} \quad (4)$$

Com, m_{f_i} é a massa inicial de combustível, m_{f_f} é a final e Δt o intervalo do tempo.

E por fim o *specific fuel consumption* (SFC) é dado pela fórmula (5) para que as unidades sejam em g/kWh temos então:

$$SFC = \frac{\dot{m}_f * 9549 * 3600}{B_m * RPM} \quad (5)$$

O binário será sempre o mesmo para cada um dos ensaios pois so depende da velocidade a que a hélice está, ou seja, o B_m para as 3000 RPM com carburados será o mesmo que para as 3000 com o controlo eletrónico pois o caudal de ar que passa pela hélice é o mesmo.

Para a realização dos testes, mais bem desenvolvidos no tópico seguinte, foi necessário padronizar um intervalo de tempo para este efeito, tendo este sido um intervalo de 2 minutos.

Para a escolha da velocidade do motor e dado o contexto aeronáutico, decidi seleccionar 4 velocidades distintas correspondentes às 4 condições de voo, inerentes a qualquer trajeto de uma aeronave (ralenti, descida, cruzeiro e aterragem). Para que isto fosse possível de atingir, foi necessário acionar manualmente um acelerador, sendo necessário aguardar alguns segundos para a estabilização dessas rotações.

Na teoria, o motor atingia as 7000 RPM, mas a hélice escolhida tinha um passo de 10 enquanto a recomendada pelo Prop Selector seria de 8. Este maior passo exigiu mais binário do motor, o que impediu o motor de alcançar as 7000 RPM esperadas. Por este motivo, foi definido que o acelerador a 100% corresponderia às 6000 RPM, valor atingido quando o carburador estava totalmente aberto.

Assim sendo, o alcance das rotações variou num intervalo de 3100 a 6000 RPM, correspondendo a 0% e a 100% da abertura do acelerador, respetivamente. Assim sendo, considerou-se o voo de cruzeiro a 5040 RPM, estando o acelerador entre 60 a 70%.

Na Tabela 3 seguinte estão enumeradas todas estas condições de voo:

Tabela 3- Condições de voo

Condições de voo	TPS (%)	RPM
Ralenti	0-10	3100-3400
Descida	40	4000-4300
Cruzeiro	60-70	4700-5000
Subida	100	6000-6300

5.2. Configuração Inicial

Apesar de ter substituído o carburador pelo sistema EFI e EI, como já foi referido anteriormente, decidi, ainda assim, realizar ensaios com este e equiparar os resultados de binário obtidos com os resultados fornecidos pelo fabricante, de modo a averiguar se o motor original se encontrava em boas condições de operação.

Além disso, decidi analisar os consumos do motor na sua configuração inicial e após as modificações efetuadas nos sistemas, de modo a concluir se as alterações efetuadas foram ou não vantajosas nesse quesito. Para isto, tive a necessidade de efetuar alguns testes, nos subcapítulos seguintes.

5.2.1. Carburador

Relativamente ao carburador, foi efetuado apenas um teste num momento inicial do projeto, pois, como referido anteriormente, este foi removido do motor e substituído por outro sistema.

De modo a melhor ilustrar este processo, deixo enumerado abaixo os passos que efetuei para a devida testagem deste componente.

1. Adição de óleo: Foram adicionados 100 ml de óleo ao motor utilizando-se uma seringa.
2. Abastecimento do tanque: O tanque de gasolina foi completamente abastecido (3 litros).
3. Primeira ignição: O motor foi ligado com o motor de arranque, permanecendo em funcionamento por uns minutos sem quaisquer intervenções.
4. Carregamento do código: O código presente no Anexo A foi implementado no software Arduino Nano para recolher informações da célula de carga e do sensor Hall.
5. Verificação dos sensores: O Arduino Nano foi conectado a um computador, de modo a confirmar-se a funcionalidade dos sensores enquanto se dava uso à câmara de combustão e o motor aquecia em consequência.
6. Recolha de dados: Foram medidos os resultados observados durante 120 segundos, em rotações constantes de 3180, 4080, 5040 e 6060 RPM.
7. Síntese de dados: Com os dados obtidos, foi construída a Tabela 4, que se direciona para os consumos de combustível e o binário em cada condição testada.

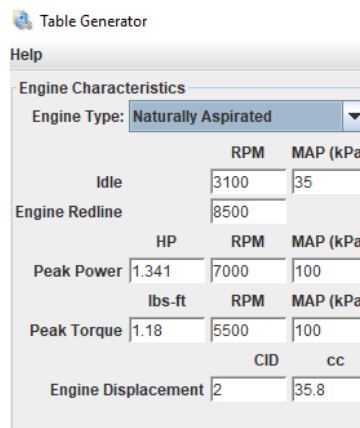
Tabela 4- Resultados com Carburador

	RPM	M_c [kg]	Δt [s]	m_{f_i} [g]	m_{f_f} [g]	Δm_f [g]	\dot{m}_f [g/s]	F_c [N]	B_m [N.m]
Carburador	3180	0,28	120	466,760	464,320	2,44	0,0203	2,7468	0,4944
	4080	0,38	120	456,0	449,250	6,75	0,0563	3,7278	0,6710
	5040	0,58	120	446,350	434,360	12,0	0,0999	5,6898	1,0242
	6060	0,93	120	428,580	413,470	15,1	0,1259	9,1233	1,6422

5.3. Injeção Eletrônica

Como já foi referido, para a implementação de uma injeção eletrônica foi necessário utilizar uma centralina (MS-II). Uma conversão que tornou o motor mais versátil e adaptativo às condições de operação. Tendo em vista a quantificação dessas alterações, foi necessário realizar-se 2 testes distintos.

O primeiro foi conduzido por uma função do software TunerStudio MS, na qual foram introduzidas algumas informações fornecidas pelo fabricante (Figura 45), sendo imediatamente após gerada uma tabela de VE de modo automático (*Volumetric Efficiency*).



	RPM	MAP (kPa)	
Idle	3100	35	
Engine Redline	8500		
	HP	RPM	MAP (kPa)
Peak Power	1.341	7000	100
	lbs-ft	RPM	MAP (kPa)
Peak Torque	1.18	5500	100
	CID	cc	
Engine Displacement	2	35.8	

Figura 45- Dados para gerar tabela VE no TunerStudio

5.3.1 EFI - (1º teste)

De modo a melhor ilustrar esta primeira parte deste processo, deixo enumerado abaixo os passos que efetuei para a devida testagem do sistema.

1. Preparação da centralina: A centralina foi conectada aos polos correspondentes da bateria. No computador, abriu-se o TunerStudio MS, preenchendo-se os devidos campos com os dados do motor GX-35 e dos sensores adicionados.
2. Criação da tabela VE: Ainda numa outra ferramenta do TunerStudio MS, foram inseridos outros dados do motor, Figura 45. Ação esta que fez o software gerar instantaneamente uma tabela VE, tabela esta que foi imediatamente aplicada no motor pelo utilizador.
3. Primeiro funcionamento: A bomba de combustível foi ligada por um interruptor, e, com auxílio de um motor de arranque, o motor foi ligado. Este foi então deixado a trabalhar em ralenti por 5 minutos, de modo a verificar se os sensores respondiam corretamente e o bloco se aquecia devidamente, suspendendo-se o enriquecimento de combustível.

4. Recolha de dados: O acelerador foi ajustado para as quatro diferentes posições, permitindo atingir as rotações desejadas. Em cada rotação, aguardou-se 120 segundos, e em cada uma destas recolheu-se o massa inicial e final do combustível consumido.
5. Síntese de dados: Com os dados obtidos, foi construída a Tabela 5-Resultados com EFI (VE gerado), que se foca exclusivamente nos consumos de combustível em cada condição testada.

Tabela 5-Resultados com EFI (VE gerado)

EFI - (1ºteste)	RPM	Δt [s]	m_{f_i} [g]	m_{f_f} [g]	Δm_f [g]	\dot{m}_f [g/s]
	3180	120	2366,82	2362,07	4,75	0,0396
	4080	120	2358,04	2351,15	6,89	0,0574
	5040	120	2367,85	2357,15	10,7	0,0892
	6060	120	2345,17	2334,54	10,6	0,0886

O segundo teste partiu de um processo de correção da tabela VE previamente gerada pelo software. Este novo regime iterativo, foi efetuado através da sonda lambda, um elemento fulcral neste segundo teste tanto para a recolha de informações sobre os gases de escape como para o envio desta informação para a MS-II, que por sua vez ajusta a quantidade de combustível a ser injetado, de forma a aproximar esses dados como os da tabela AFR, Figura 46, também gerada pelo software.

Por outras palavras, o GX-35 é colocado em diversas posições de acelerador enquanto a função “Tune Analyze Live! – Tune For You” do software lê continuamente os dados do escape e, em tempo real, fornece as respetivas correções necessárias à centralina.

	2400	3800	4100	4400	4700	5200	5500	6000	6500	7000	7000
100.0	12.8	12.8	12.7	12.6	12.6	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
95.0	13.1	12.8	12.8	12.7	12.7	12.6	12.6	12.6	12.6	12.6	12.6
85.0	13.7	12.9	12.9	12.9	12.9	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
75.0	14.0	13.4	13.4	13.4	13.3	13.1	13.0	12.9	12.9	12.8	12.8
65.0	14.1	14.0	14.0	13.9	13.8	13.6	13.4	13.1	12.9	12.9	12.9
55.0	14.2	14.7	14.7	14.7	14.6	14.3	14.1	13.6	13.6	13.1	13.1
45.0	14.7	14.8	14.9	14.9	14.8	14.7	14.6	14.3	13.9	13.5	13.5
40.0	14.7	14.9	14.9	15.0	14.9	14.7	14.7	14.5	14.2	14.0	14.0
35.0	14.7	15.0	15.0	15.0	15.0	14.8	14.7	14.7	14.6	14.4	14.4
30.0	14.7	15.1	15.1	15.1	15.1	14.8	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
25.0	14.7	15.1	15.1	15.1	15.1	14.8	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
15.0	14.7	15.1	15.1	15.1	15.1	14.8	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
L	2400	3800	4100	4400	4700	5200	5500	6000	6500	7000	7000

Figura 46- Tabela AFR gerada pelo TunerStudio

5.3.2. EFI - (2º teste)

De modo a melhor ilustrar a segunda parte deste processo, deixo enumerado abaixo os passos que efetuei para a devida testagem do sistema.

1. Ajuste em tempo real: No TunerStudio MS, foi selecionada a opção "*Tune Analyze Live! - Tune For You*". O motor foi então testado em diversas rotações, enquanto o software, com o auxílio da sonda lambda, ajustava automaticamente e em tempo real os valores da tabela VE. O objetivo desta etapa prendia-se com a otimização da mistura ar/combustível, de modo que esta atendesse à tabela AFR previamente configurada.
2. Medição de consumos: Após testar o motor em várias rotações e confirmar o funcionamento satisfatório dos ajustes realizados, procedeu-se à medição dos consumos utilizando-se a tabela VE.
3. Recolha de dados: O acelerador foi ajustado para as quatro diferentes posições, permitindo atingir as rotações desejadas. Em cada rotação, aguardou-se 120 segundos, e em cada uma destas recolheu-se a massa inicial e final do combustível consumido.
4. Síntese de dados: Com os dados obtidos, foi construída a Tabela 6, que se foca exclusivamente nos consumos de combustível em cada condição testada.

Tabela 6- Resultados com EFI (Correção da sonda lambda)

	RPM	Δt [s]	m_{f_i} [g]	m_{f_f} [g]	Δm_f [g]	\dot{m}_f [g/s]
EFI - (2º teste)	3180	120	2245,68	2239,52	6,16	0,0513
	4080	120	2234,39	2227,37	7,02	0,0585
	5040	120	2224,03	2211,13	12,9	0,1075
	6060	120	2208,8	2196,73	12,07	0,1006

5.4. Injeção e Ignição Eletrónica (3º Ensaio)

Esta nova e última configuração, também teve por base a tabela VE (inicialmente gerada pelo software), na qual foram efetuados alguns ajustes manuais de modo a melhor otimizar os consumos. Para além disso, também se fez variar no programa o ângulo de ignição, de forma a identificar-se os menores valores de consumos possíveis para a velocidade de cruzeiro (velocidade em que uma aeronave permanece na maioria do tempo aquando do seu trajeto).

Assim sendo, iniciei este processo nos 27º, valor este usado até então pelo magneto fixo. Atendendo a que quanto maior é a rotação, maior deve ser o ângulo de ignição, aumentei então este valor gradualmente até aos 37º, de unidade em unidade, não sentindo a necessidade de aumentá-lo para além deste valor, dado que os consumos começaram a crescer significativamente após este.

5.4.1. EFI+EI

Como referido acima, o objetivo deste ensaio foi identificar o melhor ângulo que permitisse obter um consumo mínimo para a velocidade de cruzeiro, definida em 5040 RPM.

De modo a melhor ilustrar este processo, deixo enumerado abaixo os passos que efetuei para a devida testagem dos sistemas.

1. Aquecimento do motor: O motor foi ligado e deixado em funcionamento até a temperatura do bloco atingir um valor previamente definido no qual deixaria de haver enriquecimento de combustível.
2. Teste com o ângulo inicial: O ângulo de ignição inicial foi ajustado para 27° , correspondendo ao ângulo utilizado anteriormente com uma bobina fixa.
3. Coleta de dados em 5040 RPM: Ao atingir 5040 RPM, o motor foi mantido nessa rotação por aproximadamente 3 minutos. Após este período, foram medidos os consumos nesta instância (com um ângulo de 27°).
4. Variação de ângulos: Após medir os consumos com o ângulo inicial de 27° , e a cada 120 segundos, foi alterado o valor desse mesmo ângulo até aos 37° (de grau em grau).
5. Recolha de dados: Para cada ângulo, foi recolhido valor do massa inicial e final do combustível consumido.
6. Síntese de dados: Com os dados obtidos, foi construída a Tabela 7, que se foca exclusivamente nos consumos de combustível em cada condição testada.

Tabela 7- Variação do ângulo de ignição

		RPM	Δt [s]	m_{f_i} [g]	m_{f_f} [g]	Δm_f [g]	\dot{m}_f [g/s]
EFI+EI	27°	5040	120	2765	2755,03	9,97	0,0831
	28°	5040	120	2553	2544,68	8,32	0,0693
	29°	5040	120	2478	2470,72	7,28	0,0607
	30°	5040	120	2564	2557,06	6,94	0,0578
	31°	5040	120	2576	2568,46	7,54	0,0628
	32°	5040	120	2587	2578,63	8,37	0,0698
	33°	5040	120	2598	2589,77	8,23	0,0686
	34°	5040	120	2610	2601,58	8,42	0,0702
	35°	5040	120	2623	2614,36	8,64	0,0720
	36°	5040	120	2520	2512,57	7,43	0,0619
	37°	5040	120	2636	2626,14	9,86	0,0822

6. Análise de Resultados

6.1. Binário

Comparando-se os valores de binário obtidos no 1º ensaio (Figura 48) com os fornecidos pela Honda (Figura 47), é possível denotar-se que o binário máximo do motor é de 1,6 N.m , valor este corresponde a uma faixa de velocidades compreendida entre as 5000 e as 6000.

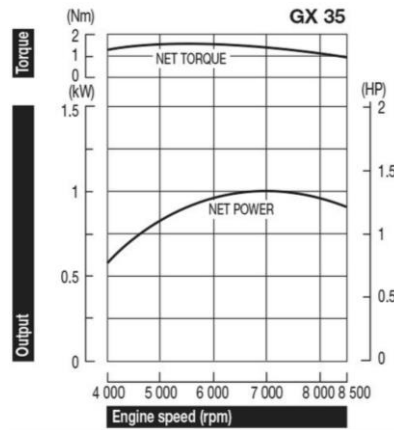


Figura 47- Gráfico de binário e potência do GX-35 fornecido pela Honda [32]

Tendo em conta os resultados obtidos nos ensaios com o carburador, observa-se pelo gráfico que o pico de binário é atingido a 6060 RPM, correspondendo aproximadamente a 1,6422 N.m.

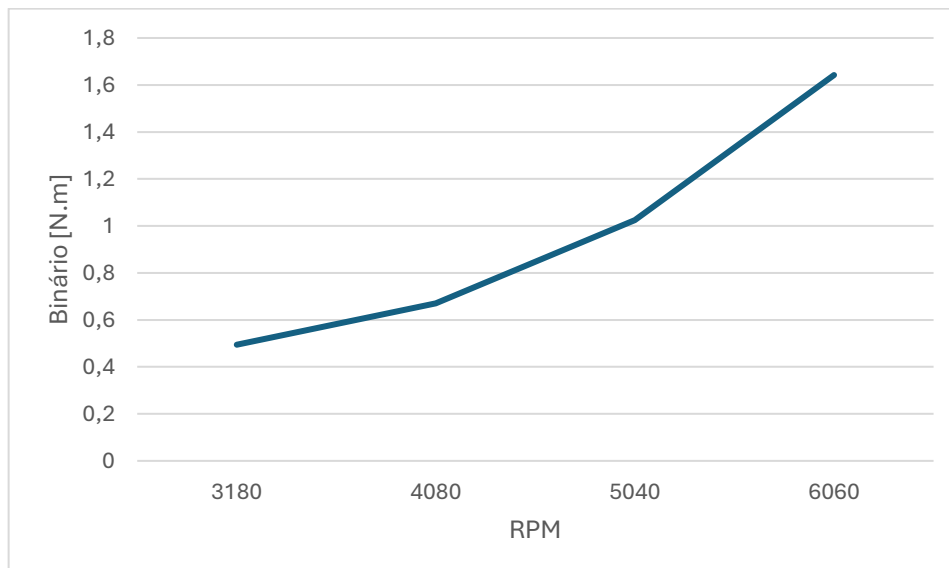


Figura 48- Gráfico do binário do motor

6.1.1. Relevância dos Resultados

Ao comparar a Figura 48 e Figura 47, é possível denotar que:

- O pico de binário no gráfico oficial ocorre numa faixa próxima das 5000-6000 RPM, valor este relativamente próximo ao obtido nos testes realizados, cujo binário máximo obtido foi às 6060 RPM. Esta diferença pode ser atribuída a fatores como condições reais de ensaio, possíveis perdas mecânicas, variações na afinação do motor e tipo de hélice.
- Apesar dessa pequena diferença no regime de rotações, os valores de binário são bastante próximos (cerca de 1,6 N.m), o que confirma o bom desempenho do motor GX-35 e a sua fiabilidade.

6.2. Consumo do Carburador

De modo a demonstrar o consumo do carburador no presente trabalho, foi elaborado um gráfico com base na Tabela 4, no qual se expõe a evolução do caudal de combustível (g/s) em função da rotação do motor (RPM) durante os ensaios realizados com carburador. Neste, a relação entre consumo e rotação segue uma tendência crescente, como é esperado em motores de combustão interna.

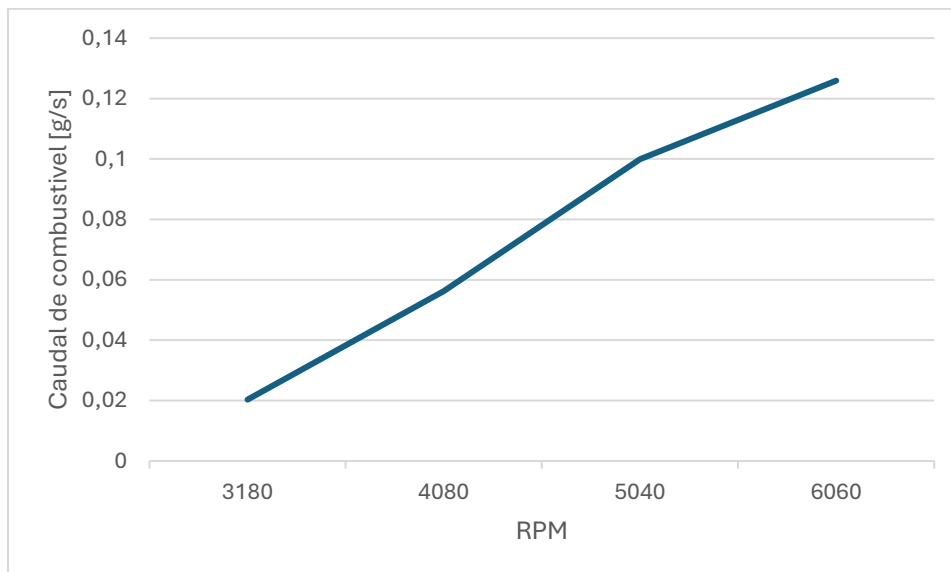


Figura 49- Gráfico do consumo com carburador

6.2.1. Tendência do Gráfico

De facto, à medida que as rotações aumentam, o consumo de combustível também aumenta, praticamente de forma linear. Aspeto este esprectável, dado que o que controla a quantidade de combustível consumida é a passagem de ar, que deixa sempre a mistura com a mesma razão ar/combustível. Como o carburador atua de forma mecânica não permite fazer qualquer tipo de ajuste dinâmico ao contrário do controlo eletrónico.

Assim, ao aumentar o caudal de ar que entra no motor, para aumentar as rotações, é sugada na mesma proporção mais combustível para dentro do mesmo. O consumo varia de aproximadamente 0,02 g/s a 0,125 g/s para velocidades de 3180 e 6060 RPM, respetivamente, evidenciando-se um aumento significativo em regimes mais altos.

6.2.2. Relevância dos Resultados

Assim como previsto e exposto no gráfico anterior, o comportamento observado é típico de motores pequenos com carburador, no qual a sua eficiência tende a diminuir em rotações mais elevadas devido à sua dificuldade em ajustar com precisão a mistura ar/combustível.

6.3. Consumos de EFI

Do mesmo modo, para demonstrar o consumo do sistema EFI, foi elaborado um gráfico com base nas Tabela 5 e Tabela 6, no qual se compara o caudal de combustível (g/s) em função da rotação do motor (RPM) para dois testes distintos de ajuste de EFI:

- 1º Teste: Utilização da tabela VE gerada automaticamente pelo software TunerStudio MS, sem ajustes em tempo real.
- 2º Teste: Utilização da sonda lambda para realização de correções automáticas na tabela VE, em tempo real, garantindo-se uma mistura ar/combustível próxima ao valor da tabela AFR.

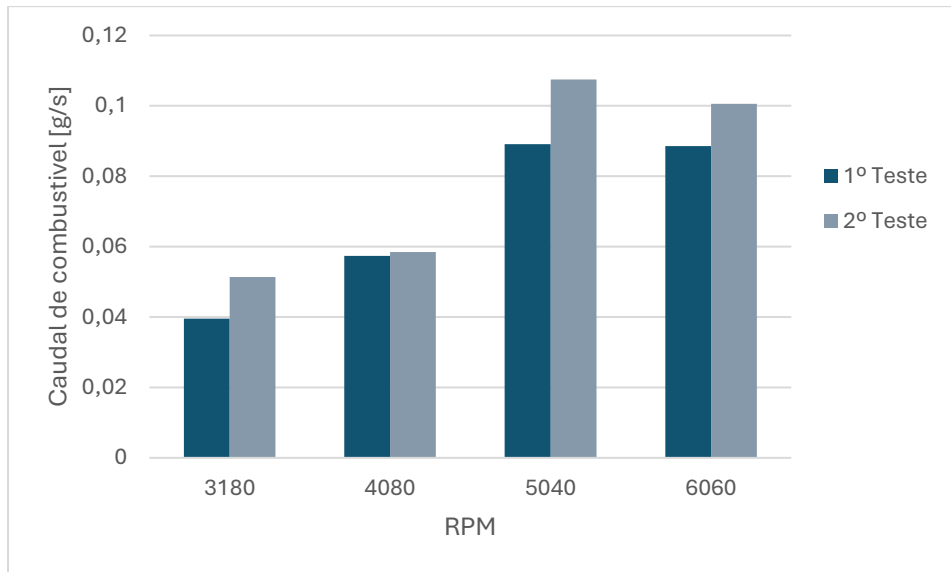


Figura 50- Gráfico dos consumos de EFI

6.3.1. Tendência dos Gráficos

Em ambos os testes, o consumo de combustível aumentou com o aumento das rotações, assim como esperado, dado que neste nível o motor exige maior quantidade de combustível para gerar maior potência.

No entanto, existem diferenças significativas entre os dois testes, o que pode ser justificado pela tentativa do sistema EFI em manter a razão ar/combustível otimizada para cada condição de voo, corrigindo eventuais desvios, o que normalmente induz um aumento de consumos nas mesmas rotações. Por exemplo, uma mistura ligeiramente rica (mais combustível) pode ser necessária em rotações mais altas para garantir a estabilidade da combustão e evitar falhas.

Assim, perante consumos praticamente iguais nos 2 testes, podemos concluir que a tabela gerada pelo software se encontrava razoavelmente próxima do valor ideal de AFR, sendo assim necessários menos ajustes na tabela VE e, em consequência, menos alterações nos consumos.

6.3.2. Relevância dos Resultados

A análise dos dados demonstra que a utilização de uma sonda lambda no ajuste da tabela VE, em tempo real, proporciona uma melhor precisão na mistura ar/combustível, mesmo que isto resulte num pequeno aumento nos consumos em certas rotações.

Este ajuste é um aspeto extremamente importante, pois garante que o motor opere com uma mistura otimizada (AFR), melhorando o seu desempenho, protegendo os seus componentes e aumentando o seu tempo de vida útil.

6.4. Consumos de EFI e EI

De modo a demonstrar o consumo do conjunto EFI + EI no presente trabalho, foi elaborado um gráfico com base na Tabela 7, no qual se apresenta a variação do ângulo de ignição que proporciona o menor consumo de combustível possível para a velocidade de cruzeiro (5040 RPM). Um aspeto muito importante, uma vez que a aeronave permanecerá a maior parte do seu tempo nesta condição operacional.

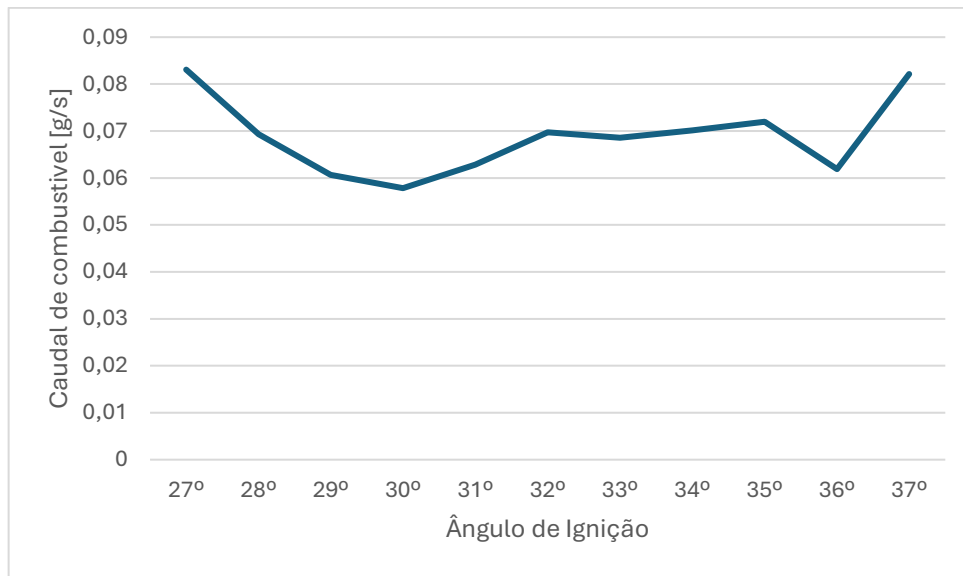


Figura 51- Gráfico dos consumos com EFI+EI com a variar do ângulo em velocidade de cruzeiro

6.4.1. Tendência do Gráfico

Como observado no gráfico resultante das testagens, é possível denotar que os consumos de combustível diminuíram significativamente conforme o ângulo de ignição é avançado de 27° para 30°, atingindo um valor mínimo nos 30°, com um caudal aproximado de 0,0578 g/s. Após este valor os consumos tendem a aumentar.

6.4.2. Relevâncias dos Resultados

Como referido anteriormente, o ângulo de ignição influencia diretamente a eficiência da combustão. Assim sendo, um ajuste adequado permite que a mistura ar/combustível seja queimada de forma mais completa e no momento ideal, gerando um menor consumo.

No caso do motor em estudo, no ângulo de 30°, a sua eficiência é maximizada, possivelmente devido a um equilíbrio ideal entre a combustão e o avanço da ignição.

Ângulos mais avançados, como 37° , tendem a aumentar o consumo, o que pode ser explicado por um avanço excessivo e consequentes perdas de eficiência térmica que podem colmatar em combustões incompletas (Auto-detonação).

6.4.3. Importância da Otimização

Assim, a escolha do ângulo de 30° foi crucial para a eficiência em cruzeiro, dado que minimiza o consumo de combustível, aumentando a autonomia da aeronave, reduzindo os custos operacionais e o impacto ambiental. Esta otimização garante, ainda, que o motor opere de forma eficiente, aproveitando ao máximo os benefícios da injeção e ignição eletrónica.

7. Comparação

Para uma última análise dos dados obtidos, foram dispostos todos os testes em dois gráficos de modo a obter-se uma melhor visão do impacto que as adaptações feitas no motor têm nos consumos, especialmente em rotações de cruzeiro (5040 RPM), onde o motor em condições normais de voo deverá operar com maior frequência.

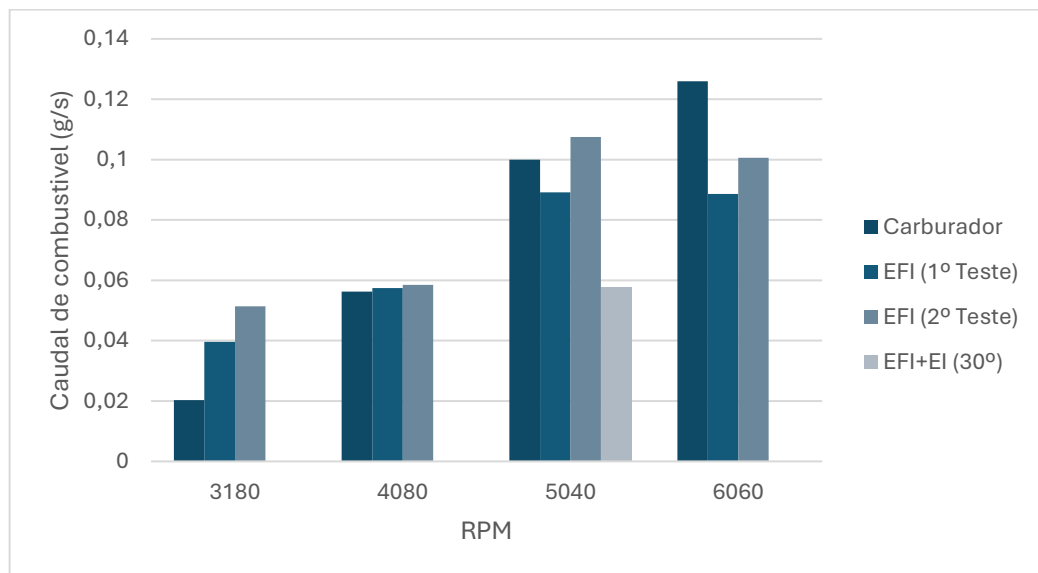


Figura 52- Gráfico de comparação de consumos

7.1. Comparação dos Resultados

A análise dos quatro testes apresentados na figura 52 revela o comportamento do motor GX-35 em diferentes configurações de alimentação e ignição, abaixo exploradas.

Teste com Carburador: O carburador apresentou consumos estáveis em todas as rotações, aumentando linearmente com o aumento das rotações. Embora menos eficiente em termos de precisão na mistura ar/combustível, mostrou-se uma solução confiável e com comportamento previsível, sem grandes variações nos consumos.

Teste com EFI – Tabela VE Padrão (1º Teste): Neste caso, verificou-se que os consumos do motor são mais elevados em rotações mais baixas (3180 RPM), apresentando uma queda significativa em rotações mais altas (6060 RPM). Esse comportamento sugere que, sem os ajustes finos, a tabela inicial ainda oferece ganhos em eficiência a rotações elevadas.

Teste com EFI – Sonda Lambda (2º Teste): Com a implementação das correções em tempo real, por meio da sonda lambda, o comportamento do motor foi semelhante ao teste anterior,

contudo com um leve aumento nos consumos, dado que o seu objetivo era ajustar a mistura ar/combustível para corresponder à tabela AFR. Um aspeto que, embora não direcionado para o objetivo principal deste trabalho (dado o conhecimento à priori do aumento nos consumos), permitiu o funcionamento mais otimizado e seguro do motor.

Além disso, a sua implementação possibilitou o entendimento prático da sonda lambda e da diversidade de ferramentas do TunerStudio.

Teste com EFI + EI: Neste último teste efetuado, observou-se uma redução drástica a nível dos consumos. Para a rotação de cruzeiro (5040 RPM), estes caíram para cerca de 0,055 g/s, comparando-se aos 0,099 g/s do carburador. Isto evidencia a eficiência da combinação da injeção eletrónica com o ajuste do ângulo de ignição, dado que permite alcançar uma relação ideal entre consumo e desempenho.

Comparação dos 4 Testes em Regime de Cruzeiro: Atendendo a que o motor, em condições normais de voo deverá operar com maior frequência, em rotações de cruzeiro (5040 RPM), decidi equiparar os 4 testes apenas nesta rotação, de modo a interpretar os resultados obtidos pelas modificações introduzidas no GX-35.

Como disposto no tópico anterior, a relação ideal entre o consumo e o desempenho do motor ocorre perante a implementação combinada dos sistemas EFI e EI, daí ser mais relevante focar apenas nos resultados obtidos por meio desta estratégia.

De facto, estes dados expressam reduções significativas nos consumos em relação à configuração inicial do motor, com o carburador e aos seus sistemas intermediários, conforme discriminado em seguida:

- **42,12%** de redução relativamente ao sistema com carburador.
- **35,15%** de redução relativamente ao sistema EFI com Tabela VE.
- **46,20%** de redução relativamente ao sistema EFI ajustado pela sonda lambda.

7.2. Consumo específico

Passando para outro tipo de comparação, apresento o gráfico X, que ilustra os consumos específicos (g/kWh) de cada ensaio. Esta análise permite uma compreensão mais detalhada de como as adaptações impactaram o consumo específico de combustível (SFC). Como se pode

observar, para alcançar a mesma potência (ou seja, a mesma rotação), o motor passou a necessitar de uma quantidade consideravelmente menor de combustível.

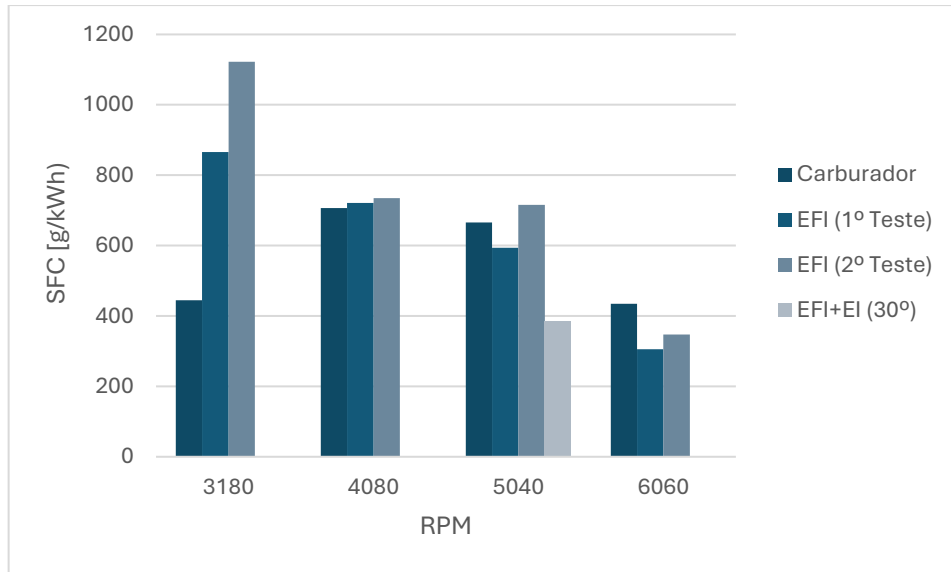


Figura 53- Consumo específico de combustível

Por exemplo, a 5040 RPM, um regime de cruzeiro onde o motor permanece por mais tempo, o carburador apresentou um consumo específico de 665,4 g/kWh. Já com o EFI (1º teste), o consumo foi reduzido para 593,8 g/kWh, e com o EFI (2º teste) observou-se um pequeno aumento para 715,9 g/kWh. No entanto, quando foi utilizada a combinação de EFI+EI, o consumo caiu significativamente para 385,1 g/kWh, indicando uma melhoria substancial na eficiência do motor.

Esses resultados demonstram que, ao manter a mesma potência (mesma rotação), o motor com EFI e EFI+EI exigiu menos combustível para funcionar, com uma grande redução no consumo específico.

8. Conclusão

A implementação da injeção eletrônica de combustível (EFI) e da ignição eletrônica (EI), aliada a uma calibração precisa, evidencia o potencial dos sistemas modernos para melhorar significativamente o desempenho, a eficiência e a fiabilidade dos motores. Comparando com os sistemas mecânicos tradicionais, a EFI+EI oferece um controlo muito mais preciso da mistura ar-combustível e do avanço da ignição, resultando numa combustão mais eficiente, menor consumo de combustível e redução das emissões poluentes.

A avaliação dos resultados demonstra claramente o impacto das intervenções realizadas, particularmente, com a integração da ignição e da injeção eletrônica. O sistema final alcançou uma eficiência de cerca de 42% relativamente à sua configuração original, o equivalente a uma redução no consumo de 0,4861 L/h para 0,275451 L/h. Este resultado reforça a importante contribuição do ajuste em simultâneo com a ignição.

De facto, os ganhos observados traduzem-se diretamente em eficiência operacional, resultando numa significativa economia de combustível e numa redução do impacto ambiental. Além disso, estes reforçam a viabilidade do uso destas tecnologias na prática, como no caso da aviação ligeira, onde a eficiência de combustível é um fator determinante para o desempenho e a sustentabilidade da aeronave.

8.1. Limitações e Considerações

Apesar dos bons resultados obtidos, é importante mencionar que durante os ensaios, erros de medição poderão ter ocorrido devido a vários fatores:

- **Precisão da balança:** Pequenas variações na medição da massa do combustível podem influenciar diretamente os resultados. Por exemplo, vibrações externas ou a linha de retorno de combustível podem provocar oscilações no tanque.
- **Temperatura do motor:** O consumo pode variar ligeiramente com a temperatura, afetando o processo de evaporação da mistura ar/combustível.
- **Condições ambientais:** Fatores como densidade do ar e humidade podem influenciar a mistura ar/combustível, alterando a combustão.
- **Fugas:** Possíveis fugas de combustível ou de ar também podem ter ocorrido, embora tenham sido minimizadas durante os testes.

Reconhecer essas limitações é essencial para validar os resultados e identificar possíveis pontos de melhoria para ensaios futuros.

8.2. Trabalhos Futuros

Para otimizar ainda mais o sistema estudado e expandir os resultados, sugere-se para trabalhos futuros:

1. **Implementação de uma ignição variável** – Substituir o ângulo de ignição fixo por uma tabela dinâmica adaptativa, ajustando o ângulo em tempo real conforme a rotação e a carga do motor.
2. **Desenvolvimento de uma aeronave completa** – Testar o motor em condições reais de voo, incluindo uma hélice otimizada para cruzeiro.
3. **Adição de um turbo** – Implementar um sistema de sobrealimentação para melhorar o binário e a potência do motor em rotações mais baixas.
4. **Injeção direta de combustível** – Converter o sistema EFI para injeção direta, maximizando a eficiência e o desempenho.
5. **Utilização de outro tipo de ignição** – Implementar um sistema de coil-on-plug e comparar o seu impacto no consumo de combustível face ao sistema atual.
6. **Variação da tabela AFR** – Ajustar a tabela AFR para otimizar o consumo e a potência em diferentes condições de voo.

Este conjunto de sugestões poderá não apenas melhorar o desempenho do GX-35, mas também avaliar a viabilidade destas soluções em aplicações aeronáuticas, contribuindo para o avanço dos motores de pequena escala na aviação.

Bibliografia

- [1] Étienne Lenoir, *Primeiro motor de combustão interna sem compressão prévia*. 1860.
- [2] E. L. Nikolaus August Otto, *Introdução do motor atmosférico eficiente*. 1867.
- [3] Nikolaus August Otto, *Desenvolvimento do ciclo de quatro tempos*. 1876.
- [4] J. R. Dugald Clerk, *Desenvolvimento de motores de dois tempos*.
- [5] Rudolf Diesel, *Desenvolvimento do motor a diesel*. 1892.
- [6] CEFET-RJ, “Motores de Combustão Interna – Parte 1,” <https://www.cefet-rj.br/attachments/article/6786/01%20-%20Motores%20de%20Combust%C3%A3o%20Interna%20PARTE%2001.pdf>.
- [7] R. Stone, “Introduction to Internal Combustion Engines,” <https://www.macmillanihe.com/page/detail/introduction-to-internal-combustion-engines-richard-stone/?k=9780230576636>.
- [8] Dorota Anna Krawczyk, *Bulidings 2020+ . Energy sources*.
- [9] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill Education. 1988.
- [10] R. Stone, *Introduction to Internal Combustion Engines (4th ed.)*. 2012.
- [11] Y. Wang *et al.*, “Optimization of Fuel Injection Control System of Two-Stroke Aeroengine of UAV,” *Complexity*, 2020, doi: 10.1155/2020/8921320.
- [12] Ecotrons, “Honda GX35 Engine Fuel Injection Kit,” https://ecotrons.com/honda_gx35_engine_fuel_injection_kit/.
- [13] J. Niinikoski, J. Kotilainen, J. Ewalds, and E. Heikkinen, “EFI for small combustion engines,” 2020. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:210690532>
- [14] K. V. M. K. Reddy, B. M. Reddy, K. C. S. Reddy, P. Kartheek, and T. S. Adarsh, “Comparative investigation of electronic fuel injection in two-wheeler applications: A Review,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1116, no. 1, p. 012073, Apr. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1116/1/012073.

- [15] W. W. Pulkrabek, *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine (2nd ed.)*. 2013.
- [16] Wikipédia, “Injeção eletrônica,” https://pt.wikipedia.org/wiki/Inje%C3%A7%C3%A3o_eletr%C3%B3nica.
- [17] R. Bosch, *Gasoline Engine Management*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. doi: 10.1007/978-3-658-03964-6.
- [18] C. F. Taylor, *The Internal-Combustion Engine in Theory and Practice: Volume 1 - Thermodynamics, Fluid Flow, Performance*. 1985.
- [19] LD Auto, “Sistemas de injeção gasolina,” <https://ldauto.net/pt/sistemas-de-injecao-gasolina>.
- [20] R. Bosch, *Automotive Handbook (6th ed.)*. 2003.
- [21] D. A. Crolla, *Automotive Engineering: Powertrain, Chassis System, and Vehicle Body*. 2009.
- [22] Oficina Brasil, “Bobinas de ignição: como funcionam e qual é o controle realizado pelo módulo do motor,” <https://oficinabrasil.com.br/noticia/tecnicas/bobinas-de-ignicao-como-funcionam-e-qual-e-o-controle-realizado-pelo-modulo-do-motor>.
- [23] MechLesson, “Electronic Ignition System,” <https://mechlesson.com/electronic-ignition-system/>.
- [24] M. J. , S. H. N. , B. D. D. , & B. M. B. Moran, *Principles of Engineering Thermodynamics*. 2010.
- [25] Auto Training Centre, “Intro to Coil-Plug Ignition Systems for Interested Auto Mechanic Training,” <https://www.autotrainingcentre.com/blog/intro-coil-plug-ignition-systems-interested-auto-mechanic-training/>.
- [26] eEuroparts, “A guide to spark plugs,” <https://europarts.com/blog/a-guide-to-spark-plugs/>.
- [27] Golcht, “Módulo de ignição,” <https://golcht.com.br/modulo-de-ignicao/>.
- [28] Norserviço, “Honda GX35 Motor 4 Tempos,” <https://norservico.pt/roadoras/370-honda-gx35-motor-4-tempos.html>.

- [29] Honda Engines EU, “Manual do Proprietário GX25, GX35, GX50.”
- [30] S. M. Shahid, S. Ko, and S. Kwon, “Real-Time Classification of Diesel Marine Engine Loads Using Machine Learning,” *Sensors*, vol. 19, no. 14, p. 3172, Jul. 2019, doi: 10.3390/s19143172.
- [31] J. Voss, “Four-stroke cycle engine,” https://www.researchgate.net/figure/Four-stroke-cycle-engine-20_fig1_334568325, 2020.
- [32] Honda Engines EU, “Honda GX35 - Motor de 4 Tempos,” <https://www.honda-engines-eu.com/en/products/power-units/gx35>.
- [33] Megasquirt Inc., “MegaSquirt 2 ECU User Manual,” <https://www.msextra.com/product-range/traditional-megasquirt/megasquirt-2/>.
- [34] NTC Thermistor Technologies, “NTC Thermistor Sensors Technical Specifications,” <https://www.vishay.com/en/sensors/sensors-temperature/ntc/tab/products/>.
- [35] Vishay Intertechnology, “Hall Effect Sensor VMA 313 Datasheet,” https://cdn.velleman.eu/downloads/29/vma313_a4v01.pdf.
- [36] R. Bosch, “Lambda Sensor LSU 4.9: Application Guide,” <https://www.bosch.com>, 2020.
- [37] LDPerformance, “Wideband Controller,” <https://ldperformance.co.uk/product/wideband-controller/>.
- [38] AliExpress, “Corpo de acelerador.” Accessed: Oct. 12, 2024. [Online]. Available: <https://pt.aliexpress.com/item/32751440032.html?gatewayAdapt=glo2bra>
- [39] Circuit Diagram, “Circuit Diagram,” <https://www.circuit-diagram.org/editor/>.
- [40] diagrams.net, “draw.io,” <https://app.diagrams.net/>.
- [41] Bosch Motorsport, “Lambda Sensor LSU 4.9 Data Sheet,” https://www.bosch-motorsport.com/content/downloads/Raceparts/Resources/pdf/Data%20sheet_69034379_Lambda_Sensor_LSU_4.9.pdf.
- [42] Bosch, “Bosch 008 - Technical Documentation,” https://www.shoeyes.com/docs/Bosch_008.pdf.

Anexos

Anexo A

Arduíno (Código)

- Calibração da célula de Carga

```
#include "HX711.h"

// Pinos do HX711
#define DT 3 // Data (DT) conectado ao pino digital 3
#define SCK 4 // Clock (SCK) conectado ao pino digital 4

HX711 scale;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Calibração do HX711");

  // Inicializar o HX711
  scale.begin(DT, SCK);
  Serial.println("Por favor, remova qualquer peso da balança...");
  Serial.println("Aguardando estabilização...");
  delay(3000); // Esperar estabilizar

  // Tarar a balança
  Serial.println("Tara executada.");
  scale.tare();

  Serial.println("Coloque um peso conhecido na balança e aguarde...");
}

void loop() {
  if (scale.is_ready()) {
    // Ler valor bruto do HX711
    long reading = scale.get_units(10); // Média de 10 leituras
    Serial.print("Leitura bruta: ");
    Serial.println(reading);

    Serial.println("Insira o peso do objeto conhecido (em gramas) no monitor serial:");
    while (!Serial.available()) {
      // Esperar o usuário inserir o peso
    }
  }
}
```

```

String input = Serial.readString();
float knownWeight = input.toFloat();

// Calcular o fator de calibração
float calibrationFactor = reading / knownWeight;
Serial.print("Fator de calibração: ");
Serial.println(calibrationFactor);

Serial.println("Use este fator no seu código final.");
Serial.println("Reinicie o Arduino para recalibrar.");
while (true) {
    // Parar o loop após calcular
}
} else {
    Serial.println("HX711 não está pronto. Verifique as conexões.");
    delay(1000);
}
}
}

```

- Célula de Carga e Sensor Hall

```

#include "HX711.h"
// Pinos do HX711
const int DT = 3 // Data (DT) conectado ao pino digital 3
const int SCK = 4 // Clock (SCK) conectado ao pino digital 4

HX711 scale;

// RPM measurements
const int rpmPin = // Pin 2
2;
connected to hall sensor signal
int
rpm;
// RPM value to be displayed
float PrevTime = // Time of
0;
previous magnet detection in microseconds
float Duration = // Time
0;
elapsed between magnet detection in microseconds

void setup() {
    Serial.begin(9600);
}

```

```

Serial.println("Iniciando leitura da célula de carga e do sensor
Hall");

// Inicializar o HX711
scale.begin(DT, SCK);

// Configurar o pino do sensor Hall como entrada e associar a
interrupção
pinMode(HALL_PIN, INPUT);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(HALL_PIN), countHallPulses,
RISING);

// Tara a balança para começar com zero
Serial.println("Tarando a balança...");
scale.tare();
Serial.println("Pronto para leitura.");
}

void loop() {
// Leitura da célula de carga
if (scale.is_ready()) {
float weight = scale.get_units(10); // Média de 10 leituras
Serial.print("Peso: ");
Serial.print(weight);
Serial.println(" gramas");
} else {
Serial.println("HX711 não está pronto.");
}

// Leitura do sensor Hall (contador de pulsos)
RPM(); //
Calculate the engine RPM
Serial.print("RPM: ");
Serial.println(rpm);
}

void countRpm() {
Duration = micros() - PrevTime; // Calculates
time difference between revs in microsecond
PrevTime = micros();
}

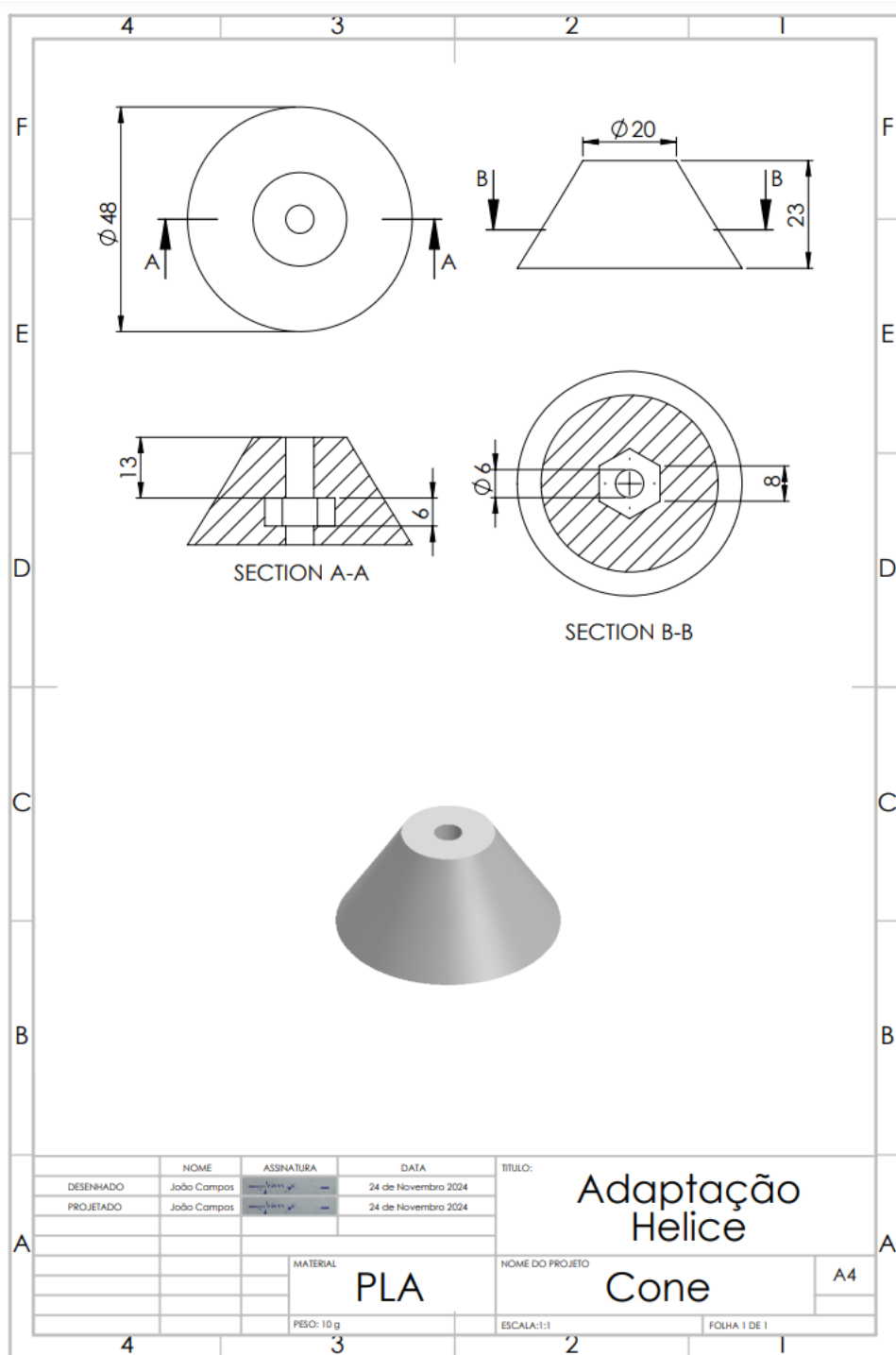
void RPM()
{
rpm = 60000000 / Duration; // rpm =
(1/ time millis)*1000*1000*60;
}

```

```
if (micros() - PrevTime > 2*1000000) // Check
if motor stopped - unchanged after 2s
{
    rpm = 0;
}
}
```

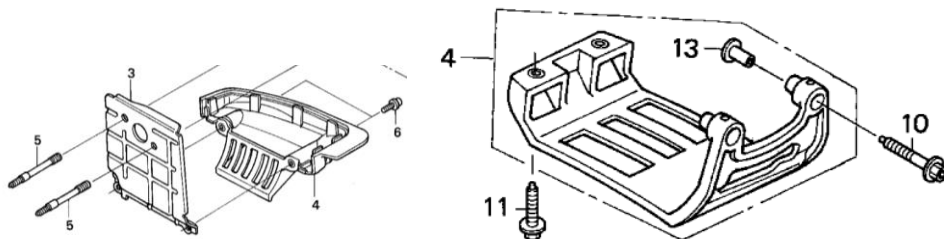
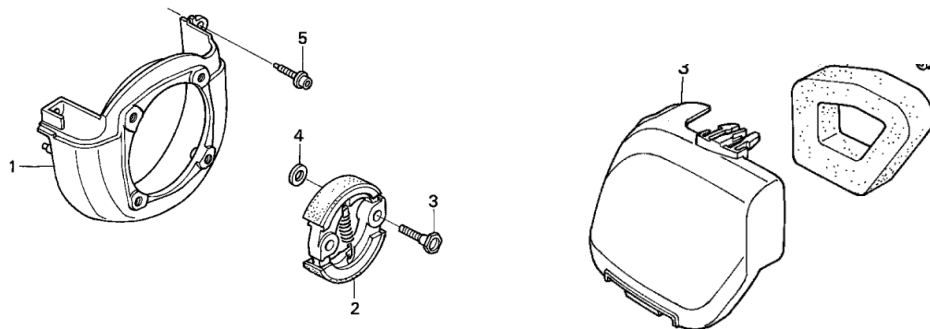
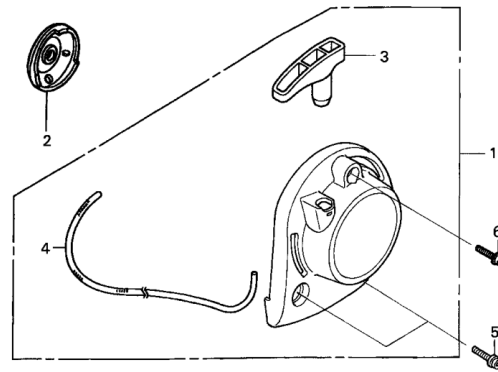
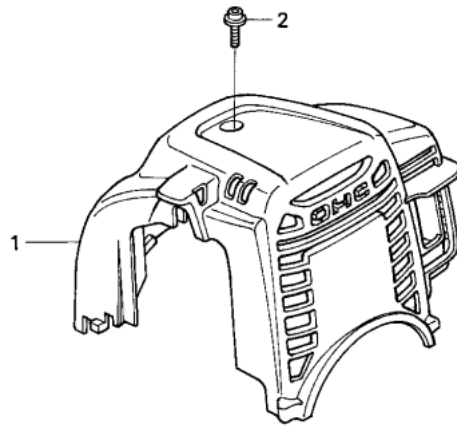
Anexo B

Desenho técnico do adaptador da hélice



Anexo C

Componentes Removidos



Pinout da Megasquirt 2



ExtraEFI Wiring Diagram.

