

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO**

MESTRADO EM ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

**isep**



# SISTEMAS DE SOBREALIMENTAÇÃO ELÉTRICOS PARA MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

**BRUNO ANDRÉ DE OLIVEIRA FERNANDES**

novembro de 2025

SISTEMAS DE SOBREALIMENTAÇÃO  
ELÉTRICOS PARA MOTORES DE  
COMBUSTÃO INTERNA

*Estudo de mercado, de eficiência e de aplicação*

Bruno André de Oliveira Fernandes

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Sistemas e Planeamento Industrial



Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de  
Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: Bruno André de Oliveira Fernandes, Nº 1050813, [1050813@isep.ipp.pt](mailto:1050813@isep.ipp.pt)  
Orientação científica: Professor Mário Jorge de Andrade Ferreira Alves, [mjf@isep.ipp.pt](mailto:mjf@isep.ipp.pt)  
Coorientação científica: Professor José Carlos Jorge Valentim, [jjv@isep.ipp.pt](mailto:jjv@isep.ipp.pt)



Departamento de Engenharia Eletrotécnica  
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
Área de Especialização em Sistemas e Planeamento Industrial

**Novembro 2025**



Para a minha mulher, que nunca parou de incentivar.



## *Agradecimentos*

Várias pessoas contribuíram para o realizar desta tese. A minha mulher, que nunca deixou de incentivar e de me pressionar para trabalhar, os meus pais, que sempre me suportaram na minha jornada académica e ao André Tomé que se tornou o meu parceiro no desenvolvimento mecânico e de futuros projetos.

Sem estas pessoas não teria sido possível a ideia, o desenvolvimento, a conceção, nem a escrita, da presente tese. Agradeço do fundo do coração o empenho, carinho e preocupação, inabaláveis.

Aos meus orientadores, que sempre tiveram os meus melhores interesses em consideração, que sempre exigiram o nível mais alto de mim, que apesar de atrasos, revisão de proposta e uma comunicação inconstante, me orientaram e estiveram atentos aos temas abordados com imenso interesse e que com a colocação de questões difíceis, elevaram o nível desta tese.

À direção da Toyota Caetano Portugal, nomeadamente Carlos Rodrigues, António Gomes, Fernando Gualter, Ana Paula Miranda e Carla Oliveira, que em conversas paralelas me permitiram utilizar alguns componentes no suporte do desenvolvimento desta tese, que me tornaram possível nos últimos anos crescer e acrescentar conhecimento necessário para a base que viria a tornar-se a minha tese de mestrado, expresso a minha profunda gratidão por estes anos repletos das mais variadas experiências.



## *Resumo*

Considerando o atual panorama da indústria automóvel, a procura por alternativas sustentáveis, o aumento de rendimento do motor de combustão interna com recurso a sistemas *mild hybrid* de 48 V, entre outros, marcas e fabricantes trabalham para trazer a tecnologia desenvolvida em *Motorsport* para o mercado automóvel a preços competitivos.

A presente dissertação aborda o desenvolvimento de um sistema de sobrealimentação elétrica para motores de combustão interna, com base na utilização de um compressor centrífugo acionado por um motor elétrico e controlado por um microcontrolador. Esta abordagem visa responder à crescente necessidade de soluções mais eficientes, sustentáveis e adaptáveis no setor automóvel, nomeadamente em contextos de *retrofitting* e aplicações em veículos desportivos ou híbridos.

A metodologia adotada incluiu uma revisão bibliográfica aprofundada sobre os princípios de funcionamento dos motores de combustão interna, compressores centrífugos, motores elétricos síncronos e sistemas de controlo eletrónico. Foram também analisadas soluções comerciais existentes, como o sistema Mercedes-AMG M139 eTurbo, e desenvolvida uma arquitetura modular para o sistema proposto, incluindo a seleção criteriosa de componentes, dimensionamento do sistema de transmissão e conceção de um suporte de bancada.

Apesar do planeamento detalhado e da execução de várias fases do projeto, a implementação prática do protótipo não foi concluída na totalidade devido a dificuldades na adaptação mecânica do compressor. Ainda assim, os resultados obtidos na fase de conceção e testes elétricos e de controlo, permitiram validar a viabilidade do conceito e estabelecer uma base sólida para desenvolvimentos futuros.

Este trabalho contribui para o avanço do conhecimento na área da sobrealimentação elétrica, propondo uma solução de baixo custo, flexível e escalável, com potencial para aplicação em diversos contextos automóveis. As limitações encontradas reforçam a

importância de uma abordagem iterativa e multidisciplinar no desenvolvimento de sistemas mecatrónicos complexos.

## *Palavras-Chave*

*Mild hybrid 48 V*, motores de combustão interna, sobrealimentação, rendimento, *Supercharger* elétrico.

# *Abstract*

Taking into consideration the status of the automotive industry, the search for sustainable alternatives, the increase in the performance of the internal combustion engine using 48 V mild hybrid systems, among others, brands and manufacturers work to bring the technology developed in Motorsport to the automotive market at competitive prices.

The present dissertation addresses the development of an electric supercharging system for internal combustion engines, based on the use of a centrifugal compressor driven by an electric motor and controlled by a microcontroller. This approach aims to respond to the growing need for more efficient, sustainable and adaptable solutions in the automotive sector, namely in retrofitting contexts and applications in sports or hybrid vehicles.

The methodology adopted included an in-depth literature review on the operating principles of internal combustion engines, centrifugal compressors, synchronous electric motors and electronic control systems. Existing commercial solutions, such as the Mercedes-AMG M139 eTurbo powertrain, were also analyzed and a modular architecture for the proposed system was developed, including the careful selection of components, drivetrain selection and a bench stand concept.

Despite the detailed planning and execution of several phases of the project, the practical implementation of the prototype was not fully completed due to difficulties in the mechanical adaptation of the compressor. Even so, the results obtained in the *design* phase and electrical and control tests allowed the feasibility validation of the concept and establish a solid basis for future developments.

This work contributes to the advancement of knowledge in electrical supercharging, proposing a low-cost, flexible and scalable solution, with potential for application in various automotive contexts. The limitations found reinforce the importance of an iterative and multidisciplinary approach in the development of complex mechatronic systems.

## *Keywords*

*Electric supercharger, efficiency, internal combustion engines, mild hybrid*

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1.ENQUADRAMENTO .....	1
1.2.ABORDAGEM DE INVESTIGAÇÃO E DESENVOLVIMENTO .....	9
1.3.CONTRIBUIÇÕES.....	11
1.4.ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO .....	12
<b>2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO .....</b>	<b>13</b>
2.1.SISTEMAS DE SOBREALIMENTAÇÃO ELÉTRICOS APLICADOS A MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA.....	14
2.2.COMPRESSOR CENTRÍFUGO .....	18
2.3.MOTOR ATUADOR E SISTEMA DE CONTROLO .....	22
2.4.CONTROLADOR.....	29
2.5.ARDUINO .....	33
2.6.INTEGRAÇÃO .....	35
2.7.MERCADO .....	36
<b>3. ANÁLISE E ARQUITETURA DO SISTEMA.....</b>	<b>38</b>
3.1.ARQUITETURA .....	39
3.2.COMPRESSOR CENTRÍFUGO ELETRIFICADO .....	41
3.3.MOTOR ATUADOR E SISTEMA DE CONTROLO .....	45
3.4.CONTROLADOR.....	47
3.5.INTERFACE DE CONTROLO .....	49
3.6.INTEGRAÇÃO .....	51
3.7.ACOPLAMENTO .....	56
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>60</b>



## Índice de Figuras

Figura 1 – Tendência de registo de veículos novos no mercado europeu [4]	2
Figura 2 – Novos registos automóveis por tipologia [4]	3
Figura 3 – Classificação de HEV baseada na posição do motor elétrico. P0-P5 posição do motor elétrico [7]	5
Figura 4 – Fluxo de gases no sistema inteligente de indução forçada da Mercedes-Benz [8].	6
Figura 5 – <i>Supercharger</i> elétrico da Aeristech [11]	8
Figura 6 - Compressor elétrico no motor Audi 3.0l V6 TDI [16]	14
Figura 7 - Diagrama de blocos da arquitetura P0 MHEV [19]	15
Figura 8 - Fluxo de ar dentro da voluta de um compressor centrífugo [20]	19
Figura 9 - Representação gráfica dos vetores presentes nas equações de Euler [22]	19
Figura 10 - Recorte de um <i>supercharger</i> centrífugo [21]	21
Figura 11 – Diferentes tipos de <i>superchargers</i> (roots, duplo parafuso e centrífugo) [24]	22
Figura 12 - Representação explodida de um motor BLDC [28]	24
Figura 13 – Diferentes setores com utilizações para motores BLDC [25]	25
Figura 14 - Estator de um motor BLDC [28]	26
Figura 15 – Representação do enrolamento imbricado simples do estator de um motor elétrico síncrono DC [28]	26
Figura 16 - Representação do enrolamento ondulado do estator de um motor elétrico AC [28]	27

Figura 17 - Representação do sinal da força contraelectromotriz trapezoidal [26]	27
Figura 18 - Representação do sinal da força contraelectromotriz sinusoidal [26]	28
Figura 19 - Sistema porta-escovas [22]	30
Figura 20 - Conversores de potência de 6 semicondutores (a) e de 4 semicondutores (b) [28]	31
Figura 21 - Fluxograma da malha fechada de um motor BLDC e o seu ESC [27]	32
Figura 22 - Fotografia do módulo Arduino UNO [30]	33
Figura 23 . Ambiente de desenvolvimento integrado IDE [31]	34
Figura 24 - Recorte de um 3D de um <i>supercharger</i> elétrico [34]	37
Figura 25 - Fluxograma da estratégia para seleção de componentes	39
Figura 26 – Desenho do layout do <i>supercharger</i> centrífugo elétrico (a); combinação turbocompressor e <i>supercharger</i> elétrico (b) a jusante e (C) a montante [15]	42
Figura 27 – Resultados da aplicação de um <i>supercharger</i> eletrificado a jusante do turbocompressor	42
Figura 28 - Estratégias de controlo de aceleração: (a) constante; (b) por patamares; (c) por rampa	43
Figura 29 – Ilustração dos diferentes tipos de motores elétricos enumerados [35]	45
Figura 30 – Fotografia do controlador de velocidade eletrónico Hobbywing Max G2S [36]	48
Figura 31 - Desenho das ligações do sistema de controlo e motor BLDC	51
Figura 32 – Exemplo de sinais PWM a azul num indutor ideal que dão origem a uma tensão representada a Vermelho [37]	52

Figura 33 - Gráfico resultado de um teste com incrementos de 50 $\mu$ s no sinal PWM [1500 ;2000] $\mu$ s	53
Figura 34 – Captura de ecrã da medição de dados em tempo real através da app HW Link V2	54
Figura 35 - Desenho de integração dos componentes do <i>supercharger</i> elétrico	55
Figura 36 - Circuito de teste elétrico e eletrónico do ESC e motor BLDC	55
Figura 37 - Estrutura de fixação do sistema de sobrealimentação elétrica desenhada em 3D	56
Figura 38 - <i>Design</i> da estrutura de fixação do sistema de sobrealimentação elétrica com o acoplamento da flange para o motor elétrico (a azul)	57
Figura 39 - Fotografia do motor elétrico BLDC Hobbywing EZRun 7268 [36]	57
Figura 40 - Sistema de polias e correia para transmissão de potência 20T5-60T5-400mm	59
Figura 41 - Montagem do sistema de sobrealimentação elétrica	59
Figura 42 – Turbina de escape (A) e de admissão (B) do turbocompressor IHI VB20	60



## *Índice de Tabelas*

Tabela 1 – Comparação das tipologias de veículos eletrificados [5]	4
Tabela 2 – Calendarização do projeto	10
Tabela 3 – Comparação dos diferentes tipos de motor elétrico [15]	23
Tabela 4 - Comparação entre motores com e sem sensores de efeito de Hall	32
Tabela 5 - Comparação dos diferentes tipos de conversores existentes nos ESC	32
Tabela 6 - Comparação de custo e peso das arquiteturas 12 V e 48 V	39
Tabela 7 – Dados técnicos do Turbocompressor IHI VB20 - Tipo RHF3	43
Tabela 8 – Matriz de comparação das diferentes tipologias [15]	44
Tabela 9 – Matriz comparativa entre os diferentes tipos de motor elétrico	46
Tabela 10 – Matriz de tomada de decisão	46
Tabela 11 – Matriz comparativa entre motores BLDC	47
Tabela 12 – Matriz comparativa entre módulos de interface e programação para o ESC49	
Tabela 13 - Especificações dos componentes utilizados	50



## *Acrónimos*

AC	-	Alternated Current
ADAS	-	Advanced Driver Assistance Systems
BEV	-	Battery Electric Vehicle
BLDC	-	Brushless DC
CUK	-	Buck-boost converter with low ripple current
DC	-	Direct Current
DC/DC	-	Direct Current to Direct Current Converter
DIY	-	Do It Yourself
ECU	-	Electronic Control Unit
EMS	-	Energy Management System
ESC	-	Electronic Speed Controller
FOC	-	Field Oriented Control
HEV	-	<i>Hybrid</i> Electric Vehicle
IDE	-	Integrated Development Environment
I/O	-	Input/Output
IMT	-	Instituto da Mobilidade e dos Transportes
MCI	-	Motor de Combustão Interna
MHEV	-	<i>Mild-Hybrid</i> Electric Vehicle

OEM	-	Original Equipment Manufacturer
PCB	-	Printed Circuit Board
PHEV	-	Plug-in <i>Hybrid</i> Electric Vehicle
PMSM	-	Permanent Magnet Synchronous Motor
PWM	-	Pulse Width Modulation
RPM	-	Revolutions Per Minute
SEPIC	-	Singel-Ended Primary-Inductor Converter
SRM	-	Switched Reluctance Motor

# 1. Introdução

No presente Capítulo deste trabalho introduz-se o mesmo, abordando tópicos como enquadramento e justificação da dissertação de mestrado. No enquadramento, apresenta-se a motivação do trabalho. De seguida definem-se os objetivos e metodologia investigativa. Por fim, define-se a estrutura desta dissertação.

## 1.1. Enquadramento

Atualmente a indústria automóvel está dedicada à procura de maior rendimento e menos emissões na sua oferta comercial de veículos, muito derivado das restrições impostas pela

norma EURO7 [1]. Para isso dedica recursos para a investigação de combustíveis alternativos, sistemas híbridos e veículos totalmente elétricos.

Entre os veículos híbridos encontram-se os *Hybrid Electric Vehicles (HEV)* e os *Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEV)* que se distinguem pela autonomia em modo puramente elétrico e possibilidade de carga da bateria elétrica de tração. Este aspeto é crucial em termos de custo, já que a bateria (de maior capacidade e diferente arquitetura) dos PHEV terá um impacto de milhares de euros no custo final.

A oferta das mais diversas marcas, nomeadamente europeias e chinesas, tem incidido muito sobre a oferta de *Battery Electric Vehicles (BEV)*, *Mild Hybrid Electric Vehicle (MHEV)*, PHEV e HEV. As ofertas puramente a combustão estão em declínio e a ser removidas do mercado. No entanto, no mercado europeu assistimos a uma redução de 1,9% de novos registos automóveis no primeiro trimestre comparativamente ao mesmo período de 2024. Com os incentivos à aquisição de veículos elétricos a serem removidos em inúmeros países como Alemanha em 2023, que levou à queda do mercado alemão, nota-se uma adesão mais lenta a veículos puramente elétricos [2][3].

### NEW EU PASSENGER CAR REGISTRATIONS

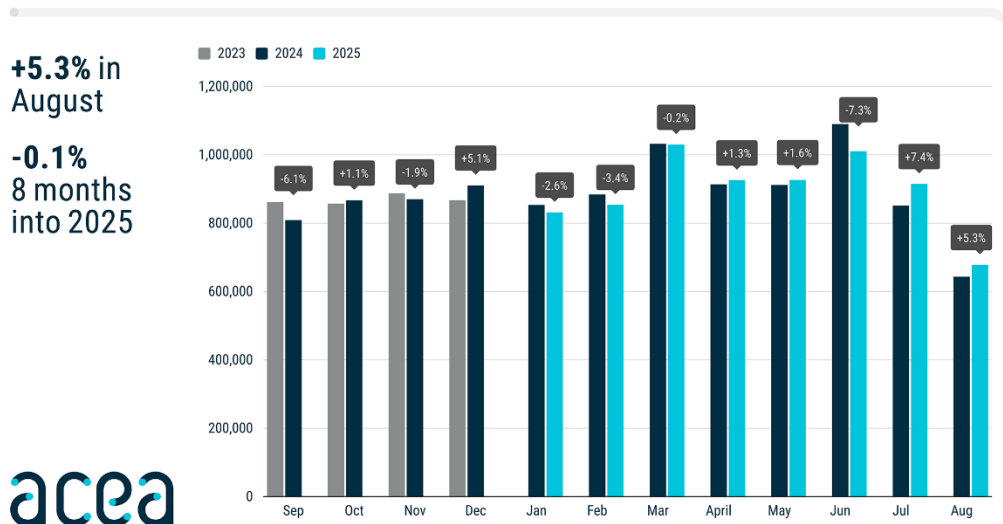
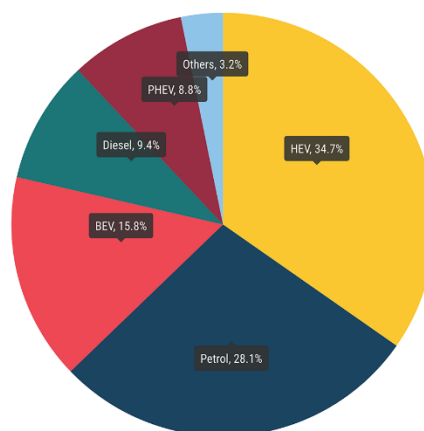


Figura 1 – Tendência de registo de veículos novos no mercado europeu [4]

## NEW EU CARS BY POWER SOURCE, AUGUST 2025 YEAR-TO-DATE

■ Petrol ■ Diesel ■ Battery electric vehicle (BEV) ■ Plug-in hybrid vehicle (PHEV) ■ Hybrid electric vehicle (HEV) ■ Others  
% market share



acea

Figura 2 – Novos registos automóveis por tipologia [4]

Com um mercado de cerca de 15%, os veículos elétricos estão aquém das expectativas definidas para atingir a meta de descarbonização imposta pelos diferentes governos e organizações mundiais. Já os modelos híbridos mantêm o seu lugar como preferido dos compradores com 34,8% de mercado, aproximando-se do mercado combinado dos veículos puramente a combustão que caíram para 37,8% [2][3].

Com o surgimento das arquiteturas híbridas, sejam elas MHEV, HEV ou PHEV, novas soluções de eletrificação tornam-se possíveis. Entre elas temos exemplos como o Motor/Gerador que permite não só o arranque do motor de combustão interna (MCI), como também gerar energia para os sistemas e funcionalidades (como *Crawl/Creep*) que possibilitam um arranque mais suave, ou o estacionamento, utilizando exclusivamente o motor elétrico.

Existem várias tecnologias e arquiteturas nos sistemas acima expostos, variando entre fabricantes, modelos, tipologia e mais. Uma arquitetura que se destacou entre as demais foi a de 48 V. Alguns fabricantes como Toyota, Stellantis, Volvo, Seat, Mercedes-Benz, entre outros, têm na sua frota veículos híbridos com esta arquitetura.

Tabela 1 – Comparação das tipologias de veículos eletrificados [5]

Tipologia	Motorização	Autonomia Elétrica (km)	Tensão de Funcionamento (V)	Custo Médio (€)	Emissões CO <sub>2</sub>	Carregamento Externo
BEV	Motor elétrico	200–500	300–800	30–60k	Zero	Sim
HEV	MCI+ elétrico	2–5 (assistência)	48–200	25–45k	Baixas	Não
PHEV	MCI + elétrico	40–80	300–400	35–60k	Muito baixas	Sim
MHEV	MCI + motor elétrico auxiliar	N/A	12–48	20–35k	Moderadas	Não

Ao analisar a Tabela 1 constata-se que na escolha entre as diferentes arquiteturas, o impacto no custo, ou na autonomia, podem ser fatores decisores. Olhando ao custo, os veículos MHEV têm um custo mais atrativo, mas dependem do MCI para produzir a energia necessária ao seu funcionamento. O seu objetivo primário é aumentar o rendimento do sistema para levar a menor consumo e menos emissões. Os veículos HEV partilham a mesma dependência em certos casos, no entanto a sua estratégia de aplicação da energia no motor elétrico é mais relevante, já que possuem uma maior capacidade na bateria

elétrica. Se considerarmos autonomia 100% elétrica escolhendo veículos como BEV ou PHEV, o custo assume outros níveis.

Na Figura 3, são demonstrados os diferentes tipos de acoplamento e integração mecânica em sistemas híbridos.

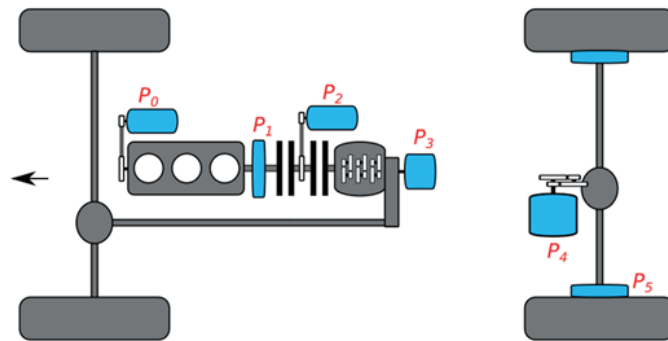


Figura 3 – Classificação de HEV baseada na posição do motor elétrico. P0-P5 posição do motor elétrico [7]

Na configuração P0, o motor/gerador elétrico de 48V é acoplado à correa do motor, sendo a mais solução mais básica de hibridização. Comparativamente, a posição P1 é das menos utilizadas derivado da complexidade e custos da solução. P2 indica que a posição do motor elétrico é ao lado da transmissão e P3 diretamente atrás da mesma. Ambas as soluções apresentam um rácio custo/benefício comparável, no entanto apresentam desafios na sua conceção. A posição dos motores elétricos dificulta o seu arrefecimento e a sua integração significar mais um componente acoplado. Ainda assim, as configurações P2 e P3, podem apresentar um aumento de rendimento até 22%. As posições P4 e P5 representam uma integração no eixo oposto ao MCI, sendo diferenciadas pelo acoplamento ao diferencial ou ao veio da roda, *in-wheel motor*. Este tipo de integração possui outras vantagens sobre os restantes *designs*, permitindo tração às quatro rodas e um aumento de rendimento total até 25% [6].

Utilizando o exemplo da Mercedes-Benz como ponto de partida, temos o exemplo do *Powertrain M139*. É um sistema *Mild-Hybrid* que funciona a 48 V, de funcionamento similar ao utilizado na Fórmula 1 e com capacidade de elevar a potência nominal do grupo motopropulsor exclusivamente MCI. As maiores vantagens apresentadas pela marca são a

redução de tamanho e peso dos componentes. Ao realizar a comparação de alguns componentes nas arquiteturas de 12 V e 48 V, obtemos uma relação 1:4, ou seja, para uma determinada potência a corrente será 4 vezes mais baixa na arquitetura de 48 V. Isto indica uma redução na secção das cablagens e menores perdas por efeito de Joule. Considerando o aumento de voltagem, o cuidado com o isolamento é maior devido ao risco acrescido de arcos e de choques elétricos [8].

A Mercedes-Benz vai mais longe e exemplifica porque a arquitetura de 48 V se torna cada vez mais relevante. Devido ao aumento do consumo dos sistemas eletrónicos dos automóveis, com a adição de múltiplos módulos de controlo, bombas de combustível trifásicas primárias de baixa pressão, direção assistida eletricamente, motores e sistemas avançados de assistência ao condutor, ou Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), a arquitetura de 12 V já não comporta a quantidade de energia necessária para alimentar todos os sistemas presentes [8].

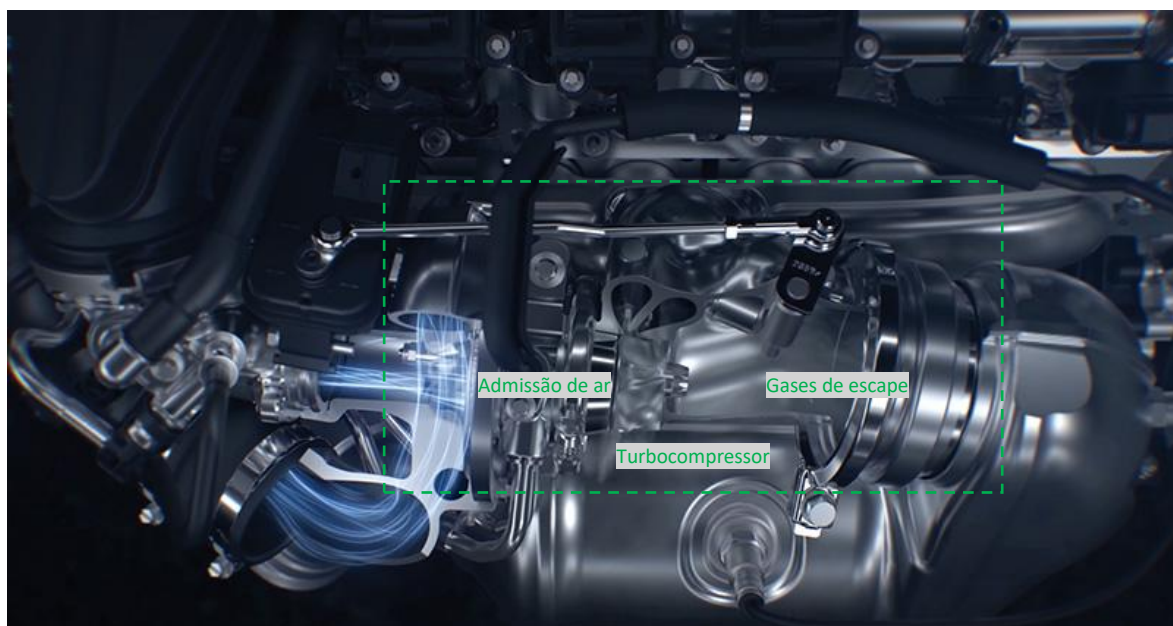


Figura 4 – Fluxo de gases no sistema inteligente de indução forçada da Mercedes-Benz [8].

Soluções como a anterior, não são compatíveis com veículos mais antigos sem modificações mais profundas. Seja através da conversão dos sistemas para funcionamento a 48 V, ou o *design* de soluções em 12 V, as possibilidades são limitadas pelo custo e disponibilidade energética. Olhando ao envelhecimento contínuo do parque automóvel

português, que passou de uma idade média de 7 para 13 anos entre 2000 e 2023, e com 1,5 milhões de automóveis a circular com mais de 20 anos de idade, percebe-se que o abate de viaturas mais antigas e a aquisição de novas abrandou e, portanto, a presença de sistemas de 48 V ainda é reduzida [9][10].

Nos últimos 7 anos, o contacto com diferentes mercados automóveis e as diferentes necessidades, indicaram a necessidade de adaptações, transformações e sistemas que pudessem trazer tecnologia moderna para veículos mais antigos. Desde a instalação de uma nova unidade de infoentretenimento como substituição do tradicional autorrádio, até adaptação de sistemas de ABS existentes para veículos clássicos de características similares. Existe mercado que requer soluções mais criativas, muitas vezes únicas, para os seus requisitos. Muitas vezes também estes, singulares.

A presente proposta surge da busca de uma maior performance dos componentes presentes num automóvel, com motor de combustão interna, turbocompressor e alimentado a gasolina. No estudo de soluções de sobrealimentação de MCI, a eletrificação do compressor centrífugo, devido à sua forma e tipo de acoplamento, torna-se então a ideia principal refletida nesta tese. Seguindo exemplos de marcas como Mercedes-Benz, Audi, Ferrari, entre outras, que promoveram a criação de turbocompressores elétricos, abordados no Subcapítulo 2.1. Existem no mercado algumas soluções, maioritariamente genéricas e com resultados limitados, exemplificadas no Capítulo 2.7.

Como resultado da análise, curiosidade e vontade de realizar um protótipo como prova de conceito e desenvolver um sistema possível de ser integrado mais tarde num veículo, dimensionado e calibrado para o mesmo, desenvolve-se o seu estudo inicial. Neste sentido, e com objetivos definidos, é realizada uma investigação sobre soluções com vista a:

- Aumento de potência – normalmente a solução são turbocompressores maiores, mas leva a maior turbo *lag* e são também soluções caras
- Aumento de rendimento – em veículos diesel poderia otimizar o funcionamento da EGR e do Turbocompressor [12]

- Alteração de parâmetros do motor – com maior rendimento na entrada de ar, menor o avanço da ignição e maior rendimento volumétrico na câmara de combustão



Figura 5 – *Supercharger* elétrico da Aeristech [11]

No entanto, alterações às características originais de qualquer veículo, adição de novos elementos, ou novas configurações que alterem os seus parâmetros, requerem a validação e registo no documento automóvel. Para que o presente projeto possa ser implementado após conclusão da sua fase de prototipagem, *redesign* e teste, terá de ser submetido ao IMT, Instituto da Mobilidade e dos Transportes, como um projeto de homologação individual. Deve ser submetida a documentação técnica como: projeto de modificação, declarações de fabricante ou engenheiro técnico e os certificados de conformidade dos componentes [13].

O IMT sendo o responsável pela regulação das modificações automóveis, tem como objetivo assegurar que qualquer alteração feita nos veículos que circulam na estrada cumpram com os requisitos legais e técnicos, garantindo a segurança rodoviária e a conformidade com o código de estrada [13][14].

## 1.2. Abordagem de Investigação e Desenvolvimento

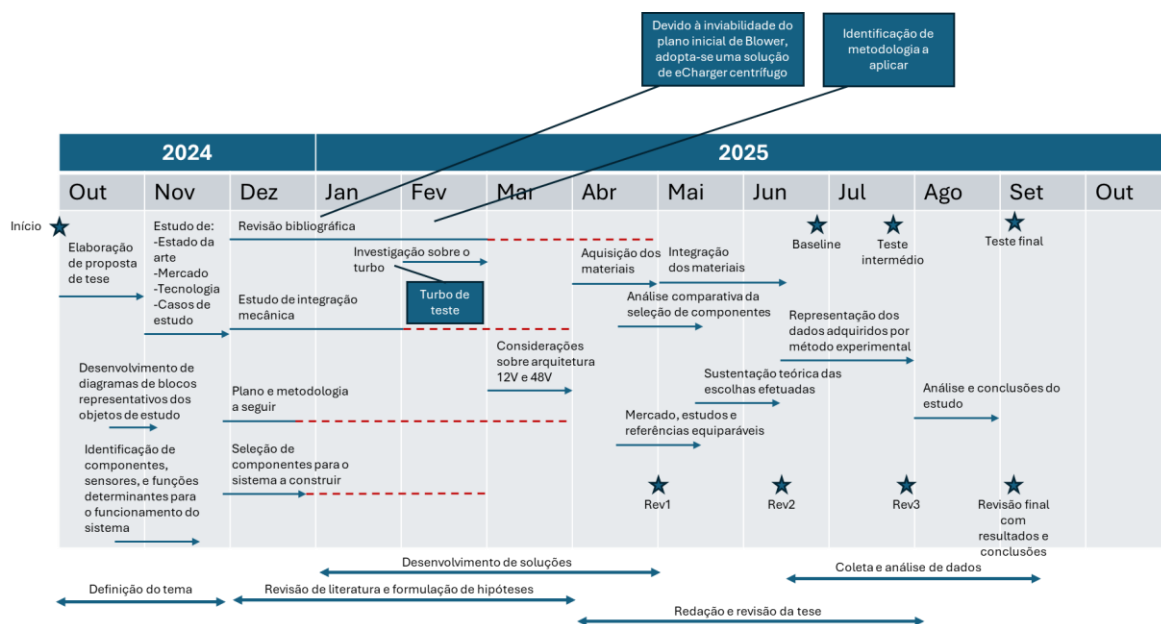
A investigação e desenvolvimento, ou I&D, constitui um pilar fundamental na construção de conhecimento aplicado, especialmente em contextos tecnológicos e de engenharia. Este capítulo apresenta a abordagem adotada, focando-se nas estratégias de investigação-ação e na aplicação sistemática do ciclo *Plan-Do-Check-Act* (PDCA) como ferramentas orientadoras para a melhoria contínua e validação prática das soluções propostas.

A investigação-ação revela-se particularmente adequada quando a investigação teórica e a aplicação prática estão simultaneamente a ser executados pela mesma pessoa. Esta abordagem permite uma interação dinâmica entre teoria e prática, promovendo a reflexão crítica, a experimentação iterativa e a adaptação constante das estratégias de intervenção.

O ciclo PDCA é utilizado para guiar o desenvolvimento e a avaliação das soluções técnicas, nomeadamente no controlo e otimização de sistemas de sobrealimentação elétrica com motores elétricos. A sua natureza cíclica e orientada para resultados permite gerir os processos mais facilmente, assegurando que cada fase do projeto é planeada, executada, monitorizada e ajustada com base em resultados concretos.

Sendo o *design* e construção da prova de conceito de um *supercharger* eletrificado a motivação deste trabalho, a sua prossecução conduziu à calendarização apresentada na Tabela 2. Esta inclui um conjunto de tarefas, como por exemplo: a revisão bibliográfica, o estudo da integração mecânica, escolha e compra de materiais, bem como as diferentes revisões da escrita.

Tabela 2 – Calendarização do projeto



Dada a complexidade inerente a este objetivo, sentiu-se a necessidade de o subdividir em tarefas de realização mais simples, tais como:

- Identificação e seleção de componentes
- Avaliação da arquitetura a utilizar – 12 V ou 48 V
- Integração do sistema:
  - Mecânico
  - Elétrico
  - Controlo

Devido a este projeto ser parte de uma maior integração, é necessário então considerar a revisão teórica direcionada ao projeto global. Nesse sentido realiza-se uma revisão incidindo principalmente sobre os componentes e a tecnologia utilizada, mas também em artigos sobre o efeito transitório do motor para atingir o binário máximo, resposta e performance do veículo com a inclusão de sistemas similares, casos de estudo e a possibilidade de adaptação a qualquer veículo.

Sendo parte do objetivo deste projeto a instalação futura num veículo a combustão, é necessário então direcionar a revisão prática para o que será construído. Para a prova de

conceito é necessário o *design*, projeto e adaptação de um turbocompressor para configuração de *supercharger* centrífugo efetuando modificações mínimas como prova de conceito. O projeto inclui a configuração de um dispositivo de interface com objetivo do seu output, o controlo de rotações por minuto (RPM) do motor atuador do *supercharger* centrífugo. Após confirmação do seu funcionamento, a realização de testes ao *supercharger* centrífugo em bancada e ao dispositivo de interface de Inputs/Outputs, ou I/O, confirmando o output dos sinais de controlo através do circuito do motor em vazio.

### 1.3. Contribuições

Uma das contribuições centrais desta investigação é a conceção de um sistema de sobrealimentação elétrica modular, capaz de ser adaptado a diferentes configurações de motores térmicos e de tensão. A utilização de um compressor centrífugo permite alcançar pressões de sobrealimentação significativas com elevado rendimento volumétrico na câmara de combustão, enquanto o motor elétrico garante uma resposta rápida e precisa, essencial para controlo fino em tempo real.

O sistema de controlo planeado para regular a velocidade do motor elétrico em função de parâmetros operacionais como a pressão de admissão, a temperatura e a carga do motor. Esta integração representa uma solução de baixo custo e elevada flexibilidade, permitindo a implementação de algoritmos de controlo personalizados e a recolha de dados em tempo real para análise e otimização.

Ao permitir uma gestão mais eficiente da admissão de ar, o sistema poderia contribuir para o aumento do rendimento volumétrico do MCI e redução das emissões poluentes, alinhando-se com os objetivos de sustentabilidade e transição energética no setor automóvel. A possibilidade de controlo ativo e adaptativo abre portas a mais integração, potenciando novas aplicações.

Finalmente, esta investigação estabelece uma base para trabalhos futuros, nomeadamente otimização de algoritmos de controlo, integração com inteligência artificial e aplicação em

veículos reais. A modularidade do sistema permite a sua escalabilidade e adaptação a diferentes contextos, tornando-o um ponto de partida relevante para projetos de inovação tecnológica.

## 1.4. Organização do relatório

O Capítulo 2, Enquadramento teórico, tem como objetivo apresentar a análise realizada, por temas, recorrendo a material próprio e de outros autores, sobre temas específicos atuais e de contexto relevante para o suporte do objeto final desta tese. A sua evolução será gradual, iniciando pela tipologia de sistemas de sobrealimentação para motores de combustão interna, passando por cada componente e abordando no final o mercado para o mesmo.

O Capítulo 3, Análise e arquitetura do sistema, tem como objetivo demonstrar os passos necessários à concretização da componente prática. Enquadra todos os componentes num sistema e determina-os, mostrando as suas características, metodologia de decisão, configuração e papel a desempenhar. Este Capítulo é essencial para a conclusão no Capítulo 4, Resultados e Discussão, já que fundamenta a origem dos resultados, baseia a discussão e procura sintetizar as bases necessárias para a sua apreciação.

## 2. Enquadramento teórico

A presente revisão bibliográfica procura sintetizar o conhecimento recolhido de artigos, trabalhos, publicações, ou outros, para um correto enquadramento nas matérias abordadas no desenvolvimento desta tese.

Com o tema de sobrealimentação elétrica em motores de combustão interna como base, a pesquisa incidiu sobre conceitos como *“48 V electric turbo”*, *“effects of electric supercharging in combustion engines”*, *“electric turbo integration in mass vehicles”* e *“efficiency of electric supercharged vehicles”*. Esta contextualização é complementada com uma análise de mercado sobre a adoção de veículos HEV, PHEV, BEV e de MCI, tecnologias, arquiteturas e sistemas utilizados. Por fim, tendo adquirido conhecimento sobre o tema, procurou-se aprofundar e comprovar o mesmo num exercício prático de possível aplicação a um caso de *retrofitting*.

O formato de pesquisa e o enquadramento bibliográfico, em paralelo com a investigação prática, teve como objetivo que esta tese pudesse apresentar uma proposta de valor académico, prático e relevante para os dias atuais.

## 2.1. Sistemas de sobrealimentação elétricos aplicados a motores de combustão interna

A crescente procura por maior rendimento dos MCI, potência e sustentabilidade tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias de sobrealimentação avançadas. Entre estas, os sistemas de sobrealimentação elétricos destacam-se como uma solução promissora, oferecendo vantagens significativas face a outros métodos, como os turbocompressores acionados por gases de escape [15].

### Audi S7 Sportback TDI

Elektrisch angetriebener Verdichter (EAV) im 3,0 Liter-V6-TDI-Motor  
Electric powered compressor (EPC) of the 3.0 litre V6 TDI engine

04/19

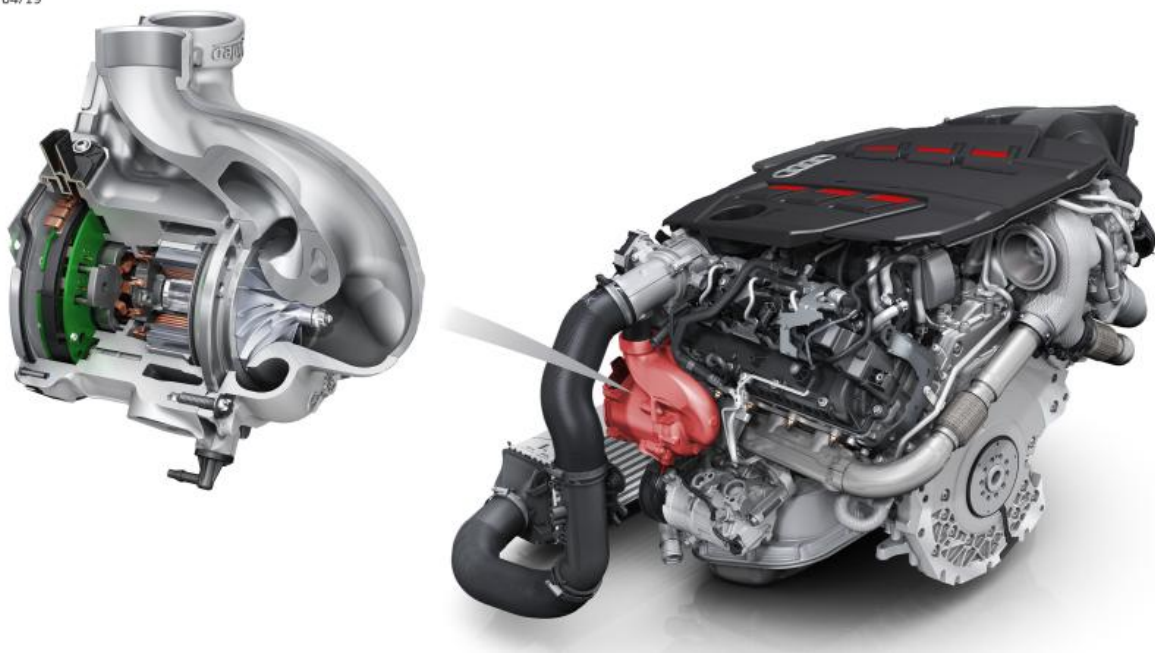


Figura 6 - Compressor elétrico no motor Audi 3.0l V6 TDI [16]

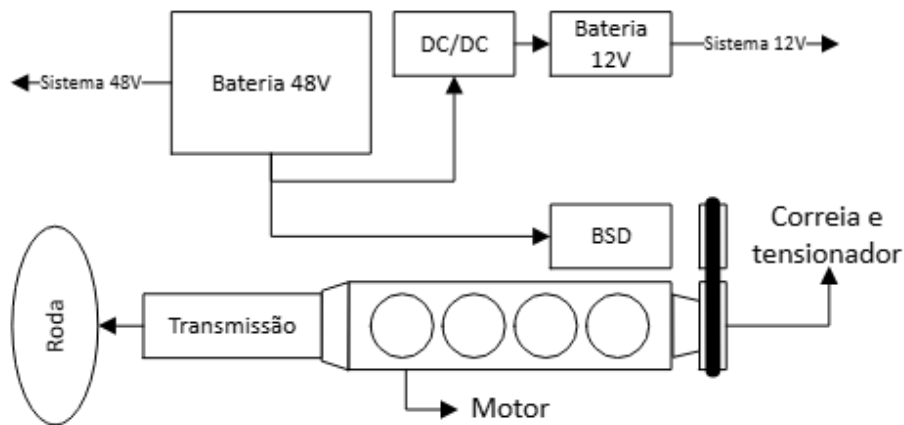


Figura 7 - Diagrama de blocos da arquitetura P0 MHEV [19]

A sobrealimentação elétrica consiste na utilização de um motor elétrico, geralmente do tipo sem escovas, ou *Brushless DC* (BLDC), para acionar um compressor centrífugo que permite aumentar a pressão do ar admitido no motor de forma independente do funcionamento do MCI. Esta independência traduz-se numa resposta mais rápida, maior binário em baixas rotações e possibilidade de controlo dinâmico da pressão de admissão, características vantajosas em veículos desportivos [15][17].

O *design* dos MCI pode ser reduzido recorrendo a soluções de sobrealimentação porque o sistema aumenta a quantidade de ar (e conseqüentemente oxigénio) que entra nos cilindros. Isso permite queimar mais combustível, obter um maior rendimento volumétrico na câmara de combustão (quantidade de mistura ar-combustível que entra no cilindro), e gerar mais potência sem precisar de aumentar a cilindrada. Em contrapartida, um motor atmosférico depende da pressão do ar ambiente para encher os cilindros.

Outras vantagens de um motor de menor tamanho, é ser mais leve e ter menos atrito interno, o que ajuda no rendimento. Com sobrealimentação, mantém-se a potência desejada sem aumentar massa e volumetria. Consideremos um motor 1.4 equipado com turbocompressor, o mesmo pode gerar 150 a 180 cv, enquanto um motor aspirado precisaria de 2.0 litros para atingir valores semelhantes.

Com a disponibilidade de outra fonte de energia, sistemas híbridos sobrealimentados eletricamente, podem apresentar benefícios como redução de consumo e emissões. O MCI pode tornar-se mais pequeno, oferecendo a mesma potência e operando em pontos de

maior rendimento. Outros benefícios são originários na recuperação de energia e a sua gestão entre o MCI, a sobrealimentação elétrica e o motor elétrico [18].

O sistema de gestão de energia, ou *Energy Management System* (EMS), atua como um supervisor da estratégia de controlo e é o cerne do *design* de um HEV. O EMS pode ser distinto entre dois grupos: baseado em estratégias de regras de controlo, ou EMS heurístico, e estratégias de controlo baseadas em otimização numérica. A função primária do EMS é otimizar a divisão de potência entre o MCI, o *supercharger* elétrico e o motor elétrico de tração para reduzir o consumo de combustível fóssil e melhorar a performance e experiência de condução enquanto gere as outras necessidades do veículo [18].

Se considerarmos a eletrificação do turbocompressor, ou a adição de um *supercharger* elétrico, o EMS terá então de controlar também esse elemento. Para isso, define a quantidade de aceleração do motor BLDC como meio de sobrealimentação do MCI, monitorizando o comportamento do sistema todo e garantindo o seu funcionamento ótimo. “Em estudos iniciais, foram estimados os benefícios teóricos da eletrificação de turbocompressores compostos num HEV. Através de dados de escala de tecnologias independentes como: assistência de energia elétrica, turbocompressão e grupos motopropulsores elétricos híbridos, foi demonstrado que um turbocompressor eletricamente assistido num MHEV pode alcançar os mesmos benefícios que em HEV.” [18].

Utilizando o exemplo da arquitetura da Mercedes-Benz, o primeiro benefício é a redução considerável do turbo *lag*. Este efeito, é o intervalo de tempo entre o momento em que o condutor solicita mais potência (por exemplo, ao carregar no acelerador) e o instante em que o turbocompressor começa a fornecer a pressão necessária para aumentar a potência do motor. Esse atraso ocorre devido à dependência do turbo dos gases de escape para girar a turbina e comprimir o ar de admissão, o que é reduzido recorrendo à eletrificação do turbocompressor, ou adicionando um *supercharger* elétrico a montante.

Como o motor atuador tem um arranque muito rápido, é possível otimizar a entrada em funcionamento do turbocompressor em qualquer regime. Apesar de possuir benefícios mais notórios a baixas rotações, o turbocompressor eletrificado ou a adição de um

*supercharger* elétrico, também apresentam reações mais rápidas no comportamento dinâmico e em aceleração [8][17].

Verifica-se então uma necessidade multidisciplinar no *design* e desenvolvimento de sistemas motrizes, onde as engenharias mecânica, eletrónica e controlo, desempenham papéis cruciais. Na escolha de materiais adequados aos regimes de funcionamento de um turbocompressor, que suportem as altas rotações a que o veio e turbinas estão sujeitos, à alta temperatura que terá de suportar dos gases de escape, a outras considerações como lubrificação e interconexão dos diversos sistemas, a engenharia mecânica está presente em todos os elementos.

A engenharia de eletrónica e controlo está presente por todo o automóvel. Desde bombas de combustível elétricas, aos motores elevadores de vidros, *chaufagem*, a própria unidade de controlo de um carro, ou electronic control unit (

DIY - Do It Yourself

ECU - Electronic Control Unit

), os sistemas elétricos estão presentes e são absolutamente necessários ao funcionamento global dos sistemas. No caso de um turbocompressor ou *supercharger* elétrico, essa presença traduz-se no motor atuador elétrico, o seu ESC, conexões elétricas, e a correta programação das unidades de controlo dos diversos sistemas.

Segundo A. Jain [18] em termos de estratégias de controlo para otimizar o desempenho do sistema de sobrealimentação eletrificado, não existem novas metodologias. O mesmo refere que com a utilização de estratégias de minimização do consumo equivalente, o controlo do motor BLDC não é efetuado de forma independente. Situações onde o controlo do motor BLDC é direcionado para maximizar a aceleração do veículo, estão ligadas pela metodologia ao controlo ótimo de HEV, e a combinação das duas estratégias está presente no campeonato mundial de Fórmula 1.

A integração de sistemas de controlo eletrónicos e microcontroladores, permite uma gestão inteligente e adaptativa do sistema de sobrealimentação, contribuindo para a otimização do desempenho global do veículo. Esta abordagem representa uma

convergência entre a engenharia mecânica e eletrônica, refletindo a tendência atual da indústria automível para soluções mecatrônicas avançadas.

Neste contexto, esta tese propõe-se a estudar, desenvolver e testar um sistema de sobrealimentação elétrica com base num compressor centrífugo, atuado por um motor elétrico e controlado por um módulo de *interface*.

## 2.2. Compressor centrífugo

Utilizado em indústrias como a automível, aeroespacial e energia, entre outras, o compressor centrífugo é um dispositivo mecânico que tem como principal função aumentar a pressão de gases e líquidos através da conversão de energia cinética em pressão. A sua operação baseia-se na rotação de um impulsor que acelera o elemento radialmente para fora, onde a difusão subsequente converte a velocidade em pressão [20].

No sector automível, o compressor centrífugo tem a sua aplicação mais relevante nos sistemas de sobrealimentação de MCI, com a sua utilização mais proeminente nos turbocompressores. Aqui os gases de escape movimentam uma turbina que, através de uma ligação mecânica por um veio, irá rodar o compressor, aumentando a quantidade de ar admitido nas câmaras de combustão. A presença de um turbocompressor num MCI representa então maior potência e rendimento energético [20][21].

Apesar de ter menor expressão no mercado, existem também os *superchargers*. A diferença entre os dois dispositivos é a sua fonte de energia. Os turbocompressores são alimentados por gases de escape que acionam uma turbina e comparativamente, os *superchargers* são alimentados mecanicamente por uma correia ou corrente de acionamento conectada à cambota do MCI para acionar a turbina. Este irá girar o impulsor com maior velocidade, forçando o ar para dentro da carcaça, e a força centrífuga irá guiar o mesmo para o difusor. O resultado, em semelhança ao turbocompressor, é maior potência e rendimento volumétrico na câmara de combustão [20][21].

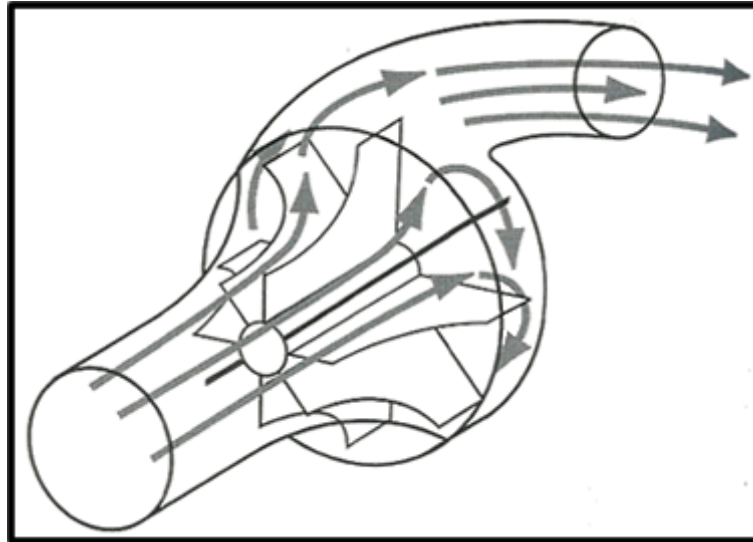


Figura 8 - Fluxo de ar dentro da voluta de um compressor centrífugo [20]

Os quatro principais componentes de um compressor centrífugo são o impulsor (ou rotor), o difusor, a carcaça (ou voluta) e o sistema de entrada (ou conduta de admissão). As carcaças são tipicamente fundidas numa forma de alumínio ao invés de outras ligas pela sua combinação de resistência mecânica, peso e resistência à corrosão. Estas são maquinadas com precisão para integrar o impulsor. Os impulsores têm várias configurações de *design*, e a equação de Euler desempenha um papel importante no entendimento da performance do impulsor. Os impulsores são tipicamente formados por metais fundidos numa peça maciça moldada e depois maquinados [20][21].

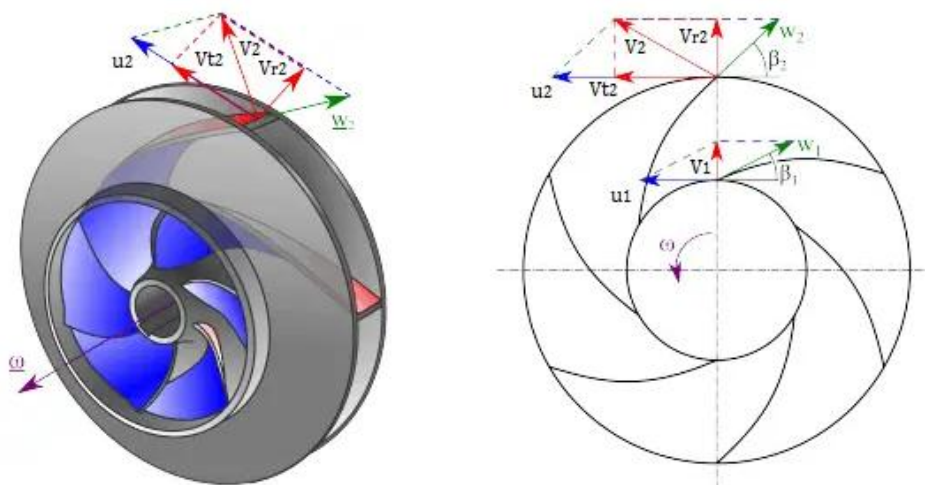


Figura 9 - Representação gráfica dos vetores presentes nas equações de Euler [22]

A equação de bombagem de Euler, relaciona o trabalho específico feito pelo fluido no rotor, a geometria e as velocidades no impulsor. A equação é baseada nos conceitos de observação do momento angular e conservação de energia. As suas equações [22] para binário no veio, potência do fluido e cabeça da bomba são respetivamente:

$$T_{shaft} = \rho Q (r_2 V_{t2} - r_1 V_{t1}) . \quad (1)$$

$$P_w = \omega . T_{shaft} = \rho Q (u_2 V_{t2} - u_1 V_{t1}) . \quad (2)$$

$$H = P_w / \rho g Q = \rho Q (u_2 V_{t2} - u_1 V_{t1}) / g . \quad (3)$$

Onde:

- $r_1$  e  $r_2$  são os diâmetros do impulsor na entrada e na saída, respectivamente
- $u_1$  e  $u_2$  são as velocidades absolutas do impulsor ( $u_1 = r_1 \cdot \omega$ ) na entrada e na saída, respetivamente
- $V_{t1}$  e  $V_{t2}$  são as velocidades tangenciais do fluxo na entrada e na saída, respetivamente:

$$V_r = u \tan \beta . \quad (4)$$

$$Q = 2\pi . r . b . V_r . \quad (5)$$

- $\rho$  representa a densidade do fluido
- $Q$  a representa a descarga de bombagem e pode ser obtida pelo cálculo da velocidade radial  $V_r$  acima exposta

As equações de bombagem de Euler [22] podem prever o impacto da mudança da geometria do impulsor na cabeça. Não importa se estamos a lidar com uma bomba ou uma turbina. Se o binário e a velocidade angular são como um sinal, o trabalho está a ser feito no fluido (bomba ou compressor). Se o binário e a velocidade angular são de sinal oposto, o trabalho está a ser extraído do fluido (turbina). Assim, para o projeto de turbinas e bombas, as equações de Euler são extremamente úteis.

Ao analisar os triângulos de velocidade e aplicar esta equação, é possível determinar o projeto ideal para o impulsor maximizar a energia adicionada ao fluido. O trabalho

específico contribui diretamente para o aumento da pressão e da energia cinética do fluido, que são as principais funções de um supercarregador [22].

Como podemos verificar pela Figura 10, o compressor centrífugo automóvel contém uma transmissão (6). A mesma providencia um aumento de rácio do veio de entrada (5) movido pela cambota do motor, por meio das engrenagens (6 e 3), para o veio do impulsor (2), sendo comum atingirem velocidades de 100 000 RPM ou superiores. Devido às altas velocidades e forças envolvidas todos os componentes são maquinados e montados com tolerâncias extremamente apertadas, utilizando também rolamentos de esferas e selados para suportar os veios e a sua alta rotação (4). A carcaça (1) tem um papel determinante já que tem como função converter o ar veloz e de baixa pressão do impulsor em ar sob pressão para o motor.

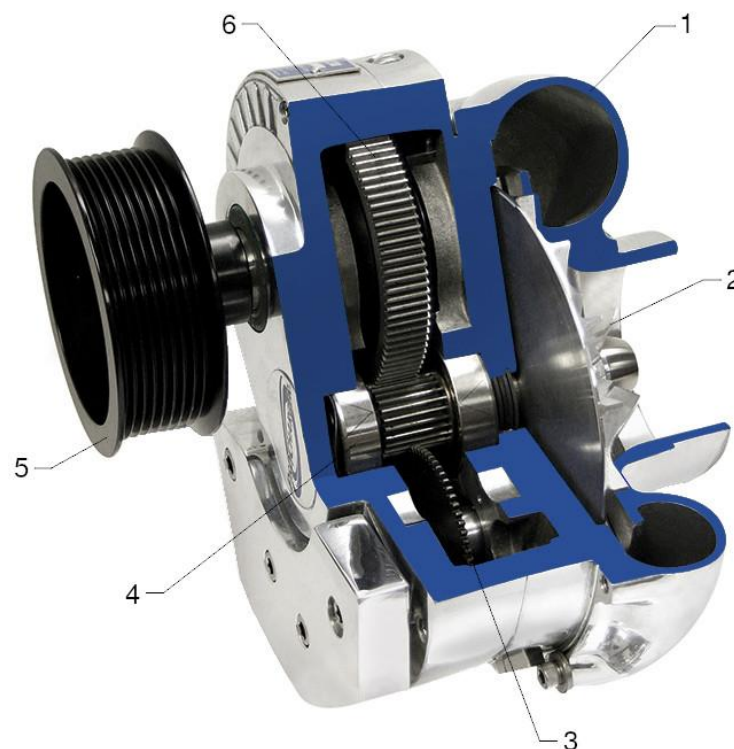


Figura 10 - Recorte de um *supercharger* centrífugo [21]

Compressores centrífugos apresentam vantagens relativamente a outros tipos de *superchargers*, como de parafuso duplo e *Roots*. O facto de usar forças centrífugas para gerar pressão permite a redução de consumo de energia e menor dissipação por calor, logo, apresentam maior rendimento. Outra vantagem é o seu posicionamento, tendencialmente

na lateral da frente do motor por meio de suportes. O distanciamento ao MCI e a inclusão de elementos radiantes de calor evita a transmissão de calor para o compressor centrífugo.

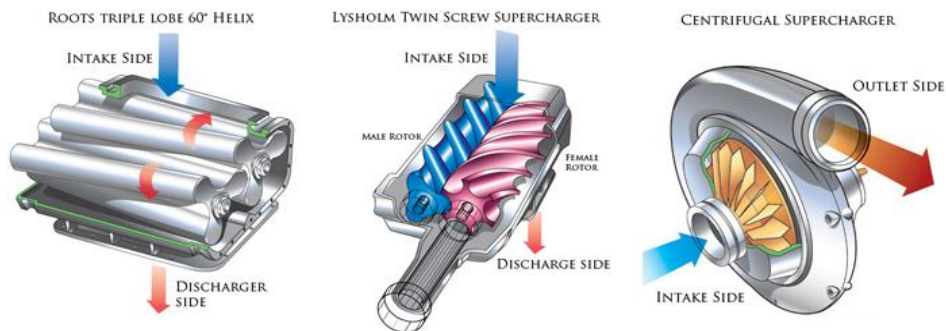


Figura 11 – Diferentes tipos de *superchargers* (roots, duplo parafuso e centrífugo) [24]

Comparativamente, os outros tipos de *supercharger*, por estarem em cima do MCI, absorvem mais calor pela irradiação inerente ao seu posicionamento. Temperaturas elevadas no *supercharger* influenciam diretamente a temperatura de admissão de ar do motor reduzindo o aumento de potência e aumentando a probabilidade de danos no motor causados por detonação nos cilindros. Nos anexos inclui-se uma tabela comparativa dos diferentes tipos de sobrealimentação ilustrados na Figura 11 [15][20][21][24].

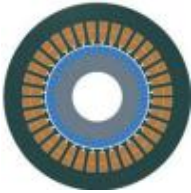
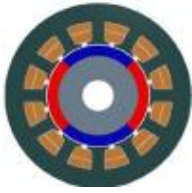


### 2.3. Motor atuador e sistema de controlo

Os motores elétricos desempenham um papel fundamental na eletrificação automóvel e, mais recentemente, na implementação de sistemas de sobrealimentação elétrica. A escolha do tipo de motor elétrico influencia diretamente a performance do sistema, a resposta dinâmica e a viabilidade do sistema. Outros fatores como custo e peso interferem no *design* e na escolha do tipo de motor elétrico a escolher.

Entre as tecnologias mais utilizadas destacam-se os motores BLDC e os motores síncronos de ímanes permanentes (PMSM), ambos sem escovas e com ímanes permanentes no rotor, garantindo elevada densidade de potência e baixo desgaste mecânico. A escolha entre BLDC e PMSM depende do equilíbrio entre custo, complexidade e desempenho. Para sistemas de sobrealimentação elétrica, ambos oferecem vantagens, mas os PMSM destacam-se em aplicações que exigem máxima eficiência e suavidade, enquanto os BLDC

são ideais para protótipos e soluções de baixo custo, tal comparação pode ser analisada na Tabela 3.

Tabela 3 – Comparação dos diferentes tipos de motor elétrico [15]

	<b>Indução</b>	<b>Ímanes permanentes DC</b>	<b>Relutância comutada</b>	<b>Comutação de fluxo com ímanes permanentes</b>
Motor elétrico				
Efeito de Joule	Perdas no cobre	Desligamento a quente Desmagnetização Redução de binário	Elevadas perdas no cobre Elevadas perdas no núcleo	Desligamento a quente Desmagnetização Redução de binário
Vantagens	Sem ímanes permanentes Robusto Baixo custo	Alta densidade de potência Rendimento elevado	Sem ímanes permanentes Estrutura do rotor simples e robusta Inércia do rotor baixa Tolerância a falhas	Estrutura do rotor simples e robusta Refrigeração dos ímanes mais fácil Inércia do rotor baixa
Desvantagens	Perdas altas no rotor Refrigeração do rotor necessária Factor de potência menor Menor rendimento	Retenção dos ímanes Elevada inércia do rotor Perdas por corrente de Eddy nos ímanes	Capacidade elevada do inversor Complexidade de controlo Elevado ripple de binário Elevado ruído de funcionamento	Poderá necessitar de uma frequência fundamental elevada Ripple de binário médio Ruído de funcionamento médio

Os motores *brushless*, motores sem escovas, são alimentados através de conversores de potência. A alimentação de cada fase é feita em função da posição do rotor através da inclusão de sensores de posição no motor. Os sinais emitidos pelos sensores controlam a entrada em condução dos semicondutores do andar Inversor, denominado de comutação eletrônica [26][27];

- Motor *Brushless* DC (distribuição trapezoidal do campo no entreferro);
- Motor *Brushless* AC (distribuição sinusoidal do campo no entreferro).

Os motores síncronos são utilizados por vários tipos de indústria como aeroespacial, consumidor e automotiva. Como o nome indica, estes motores elétricos não utilizam o sistema de escovas tradicional para efetuar a comutação, ao invés, são eletronicamente comutados. Estes apresentam várias vantagens sobre motores contínuos comutados e de indução, como [26][27]:

- Melhor característica de binário em relação à velocidade
- Resposta dinâmica superior
- Alta eficiência
- Longevidade
- Operação silenciosa
- Velocidades superiores

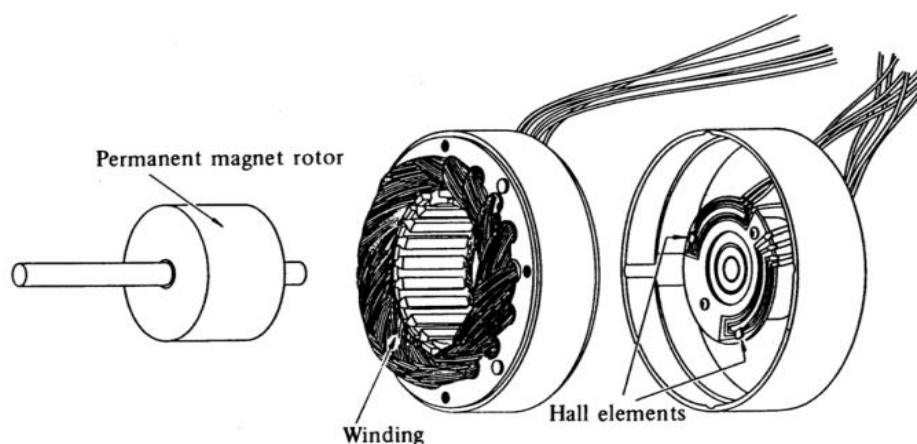


Figura 12 - Representação explodida de um motor BLDC [28]

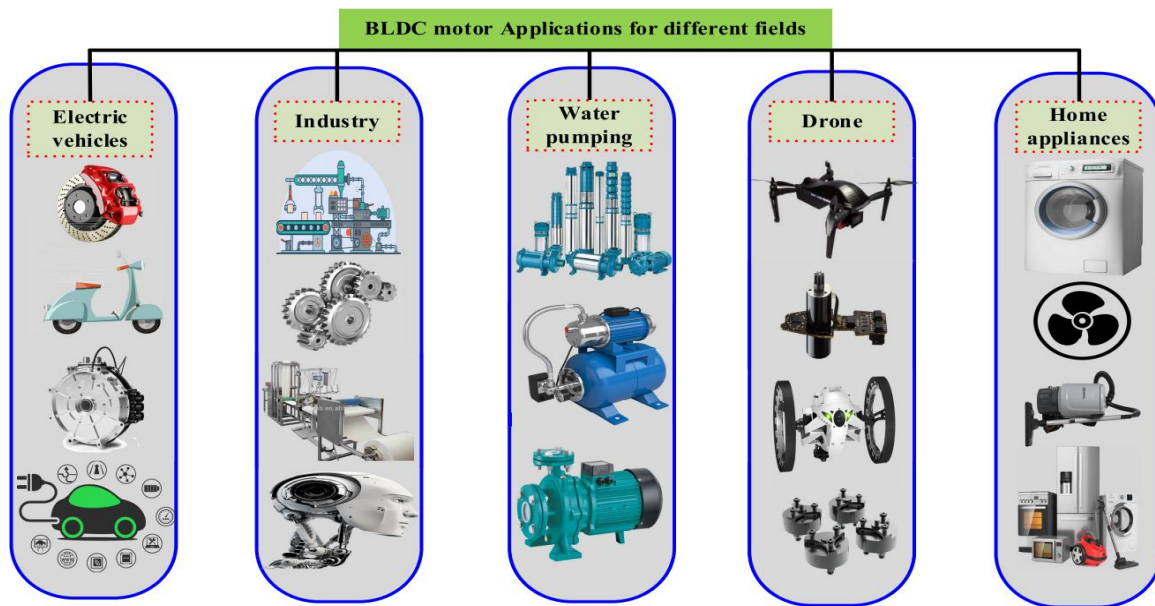


FIGURE 9. Applications of BLDC motors in diverse sector.

Figura 13 – Diferentes setores com utilizações para motores BLDC [25]

Como o rácio de binário entregue em relação ao tamanho do motor elétrico é superior, torna-o bastante útil onde o espaço e o peso são fatores críticos.

Motores sem escovas são do tipo de motor síncrono, o campo magnético do rotor é gerado por um enrolamento excitado por corrente contínua ou por ímanes permanentes, e a sua velocidade é síncrona (igual) à do campo magnético do estator, não apresentando o assincronismo tipicamente visto em motores de indução. O estator e o rotor possuem o mesmo número de fases podendo apresentar configurações de uma, duas ou três fases, sendo os últimos os mais usuais e o caso em estudo [26][29]. Nos motores assíncronos (de indução), o campo do rotor é induzido pelo campo do estator através do escorregamento, e por isso a sua velocidade é sempre ligeiramente inferior à do campo magnético rotativo do estator.

O estator de um motor síncrono consiste num empilhamento de chapas de ferro magnético silicioso (isoladas entre si) com forma de coroa circular, ranhuradas na periferia interior (semifechadas). Na superfície das chapas podem existir furos que vão formar canais de ventilação. Do ponto de vista elétrico, o estator da máquina síncrona é idêntico ao da máquina assíncrona (indução). O seu circuito elétrico é formado por enrolamentos em cobre, eletricamente isolados do circuito magnético, compostos por três bobinas

desfasadas no espaço de  $120^\circ$  (eletricamente), colocadas nas ranhuras referidas e com ligação em estrela (na sua maioria) [29].



Figura 14 - Estator de um motor BLDC [28]

Existem dois tipos de enrolamentos para o estator: imbricados e ondulados, representados na Figura 15 e na Figura 16. Este tipo de diferenciação é escolhido com base na interconexão das bobinas para obter diferentes tipos de força eletromotriz induzida. Com os enrolamentos imbricados obtemos uma força eletromotriz induzida do tipo trapezoidal, com enrolamentos ondulados obtemos uma força eletromotriz induzida do tipo sinusoidal. A corrente segue o mesmo tipo de variação que a força eletromotriz induzida [26][27][28].

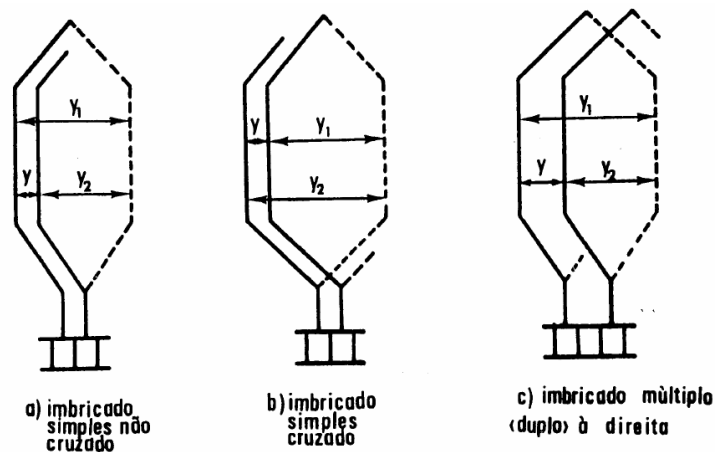


Figura 15 – Representação do enrolamento imbricado simples do estator de um motor elétrico síncrono DC [28]

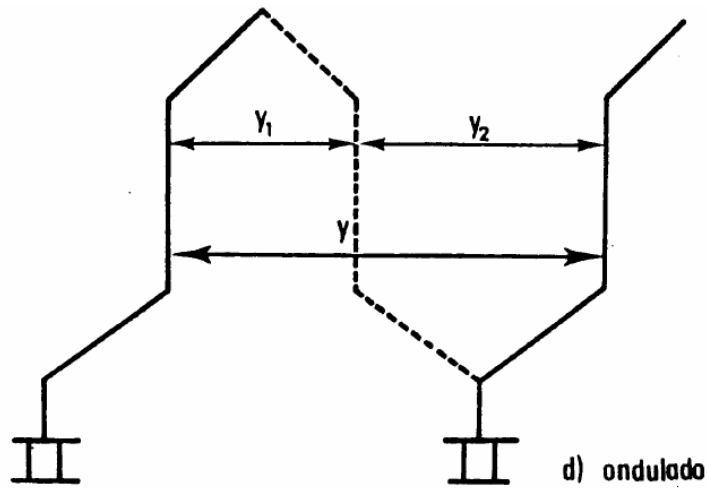


Figura 16 - Representação do enrolamento ondulado do estator de um motor elétrico AC [28]

O efeito que esta consideração tem no binário, visível na Figura 17 e na Figura 18, é que com uma onda sinusoidal a sua curva é mais suave que a de uma onda trapezoidal, contudo, devido à distribuição das bobines na periferia do estator é necessária uma quantidade maior de enrolamentos, aumentando o consumo de cobre [26].

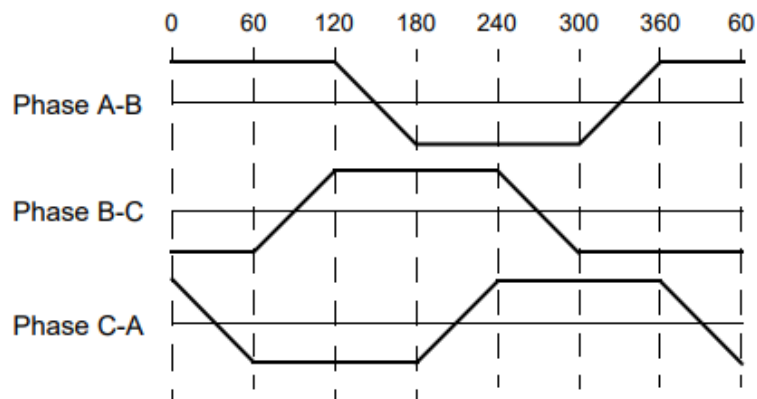


Figura 17 - Representação do sinal da força contraelectromotriz trapezoidal [26]

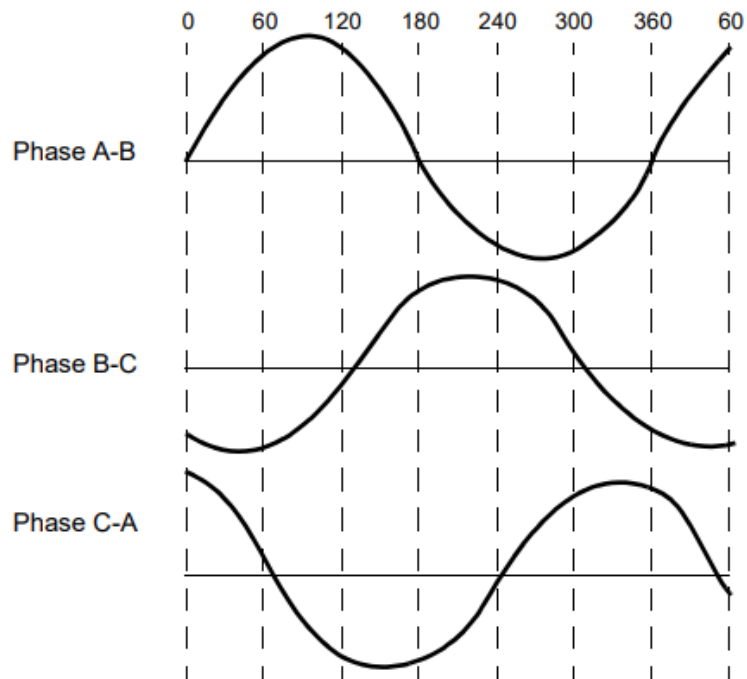


Figura 18 - Representação do sinal da força contraelectromotriz sinusoidal [26]

Dependendo da capacidade do controlador e da fonte de energia, várias alternativas de motores síncronos podem ser escolhidas. Na indústria é comum ter tensões de funcionamento iguais ou superiores a 100V, no ramo automóvel é comum utilizar 48 V, 24 V ou 12 V [26].

Para o funcionamento do motor BLDC é necessária uma unidade eletrônica de controle de velocidade ou ESC. Para rodar o motor, a unidade irá energizar as bobinas do estator em sequência. É importante então saber a posição do rotor para entender que enrolamento será energizado de seguida na sequência de energia [26].

Na maioria dos motores BLDC são utilizados três sensores de Hall inseridos no estator, montados numa placa de circuito impresso, ou *Printed Circuit Board* (PCB), no topo oposto ao do veio. Sempre que os polos magnéticos do rotor passem pelos sensores de Hall será gerado um sinal digital indicando a polaridade detetada. Este efeito ocorre quando um condutor ou semiconductor, por onde passa uma corrente elétrica, é submetido a um campo magnético perpendicular. Com base no output destes sensores a sequência exata de comutação pode ser determinada [26].

O rotor é feito de ímanes permanentes e pode variar de dois a oito polos com polaridades alternadas, sendo o caso em estudo com quatro polos. A escolha do material magnético apropriado é feita com base na densidade do campo magnético pretendida, ímanes de ferrite eram os tradicionalmente utilizados para fazer ímanes permanentes. Com o evoluir da tecnologia, ligas magnéticas de terras raras passaram a ser utilizadas sendo a mais popular o Neodímio-Ferro-Boro (*NeFeB*). Estas últimas apresentam a vantagem de uma maior densidade de fluxo por volume, representando melhorias no rácio tamanho-peso e no binário para um mesmo tamanho comparativamente a utilizar ferrite [26].

## 2.4. Controlador

Os controladores de velocidade eletrónicos, ou *electronic speed controllers* (ESC), desempenham um papel fundamental. Estes dispositivos são responsáveis por regular a velocidade, o binário e a direção de rotação dos motores síncronos, através da modulação da tensão e da sequência de comutação aplicada às bobinas do estator. O controlo é geralmente efetuado por sinais de modelação de pulsos, ou *Pulse Width Modulation* (PWM), e algoritmos de comutação baseados em sensores (*sensored*) ou sem sensores (*sensorless*).

O controlo por sinais de PWM em DC é simples, liga-se e desliga-se a tensão de forma controlada. Em AC, a ideia é semelhante, mas aplicada ao sinal sinusoidal. O sinal AC é cortado em segmentos dentro de cada ciclo, criando pulsos que representam frações da onda. Para isso utiliza-se eletrónica de potência (tirístores, TRIACs ou IGBTs) para interromper partes da onda, a largura dos pulsos é ajustada para controlar a energia média entregue, o resultado é a redução ou aumento da potência sem alterar a frequência da rede.

Comparativamente, nos motores de indução, o controlo é feito ao variar a tensão ou a frequência pois a comutação é efetuada pelo sistema de escovas tradicional, visto na Figura 19. Isto reduz o custo do sistema e a sua complexidade, no entanto apresenta menor rendimento e uma necessidade de manutenção periódica. A arquitetura geral de um ESC moderno é constituída por um microcontrolador, um conjunto de semicondutores de

potência (geralmente MOSFET), circuitos de detecção de corrente e tensão, e interfaces de comunicação. Em aplicações automóveis, a integração com sistemas como microcontroladores Arduino ou STM32, permite a implementação de estratégias de controle avançadas, como controle vetorial, ou *Field Oriented Control* (FOC), que melhora significativamente a resposta dinâmica e rendimento energético do sistema [25][26][28].

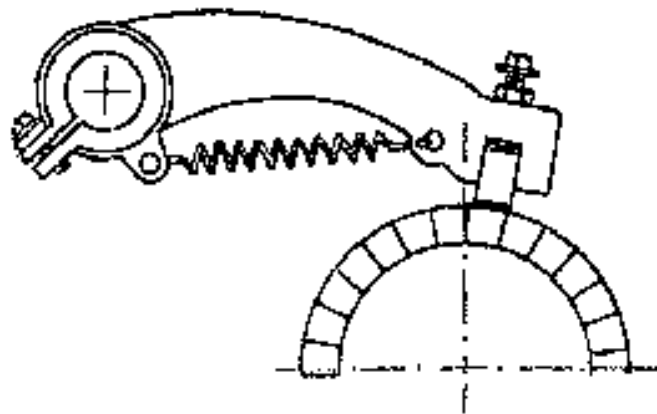


Figura 19 - Sistema porta-escovas [22]

A escolha e parametrização adequada do controlador de velocidade são cruciais para garantir a estabilidade do sistema, minimizar perdas e proteger os componentes eletrônicos e mecânicos. Assim, o estudo e desenvolvimento de ESC para motores síncronos, como os utilizados em projetos de sobrealimentação elétrica em MCI, constitui uma área importante no desenvolvimento de plataformas elétricas e híbridas, como os utilizados em projetos de sobrealimentação elétrica em MCI.

Geralmente, para um motor BLDC trifásico, são utilizados seis semicondutores de potência para a comutação. Atualmente, muitas pesquisas estão a estudar como reduzir o custo do acionamento do motor BLDC. Uma topologia de quatro semicondutores de potência seria uma solução para reduzir o custo de um controlador de velocidade eletrônico para motor BLDC trifásico. A principal desvantagem desta topologia é a limitação de velocidade do motor BLDC. O motor BLDC nesta condição só pode operar até metade da velocidade nominal. Ao combinar um conversor DC/DC de duas entradas com uma topologia de acionamento BLDC de quatro semicondutores de potência, pode ser criado um sistema BLDC trifásico de baixo custo para um veículo elétrico híbrido. O conversor step-up DC/DC de duas entradas é utilizado para fornecer tensão ao controlador de velocidade eletrônica

de quatro semicondutores de potência. Ao controlar a tensão de saída para o motor BLDC; O motor pode funcionar à velocidade nominal [28].

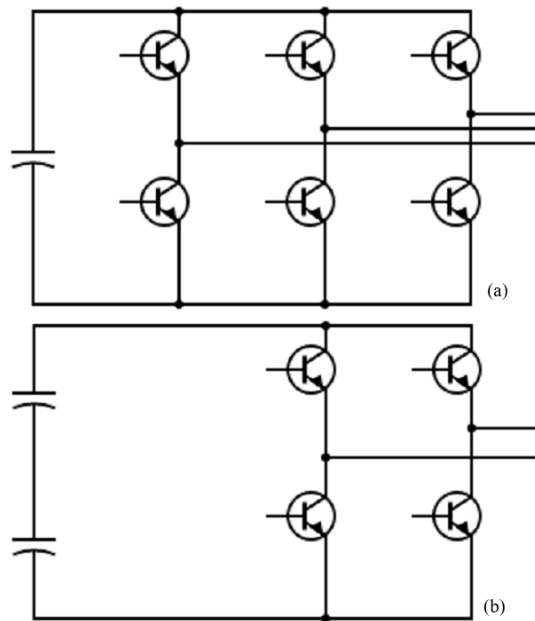


Figura 20 - Conversores de potência de 6 semicondutores (a) e de 4 semicondutores (b) [28]

Como visto no Capítulo anterior, o motor BLDC é um motor síncrono de ímãs permanentes alimentado por um inversor trifásico. A figura seguinte demonstra a configuração do sistema em malha fechada do motor trifásico BLDC e controlador.

Mediante o tipo de utilização e considerações relativas a velocidades de rotação, estabilidade e controlo, um tipo diferente de arquitetura é selecionado: *sensored* ou *sensorless*. Em aplicações que requerem um controlo superior da velocidade a baixas rotações é utilizado um sistema de malha fechada, para isso são utilizados sensores do tipo Hall para detetar a posição do rotor e otimizar a sequência de comutação dos enrolamentos do motor. Motores do tipo *sensorless*, como o nome indica, não possuem o mesmo tipo de controlo, sendo este feito através da força contraelectromotriz o que implica algoritmos de controlo mais complexos, mas sistemas mais baratos e robustos [15][25][26].

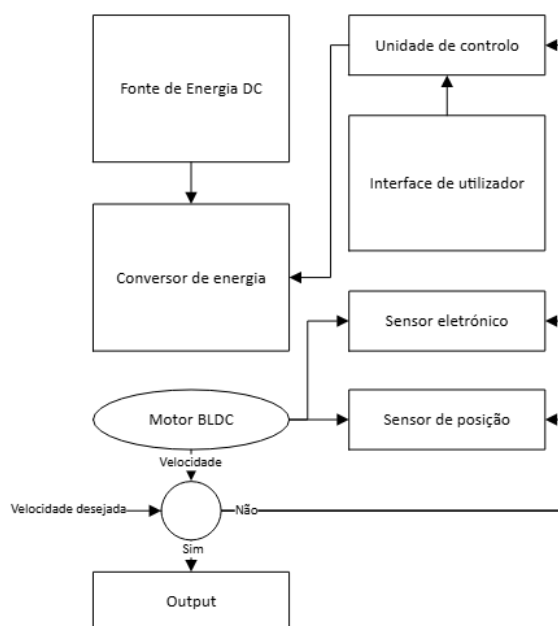


Figura 21 - Fluxograma da malha fechada de um motor BLDC e o seu ESC [27]

Sumarizando, um controlador de motor BLDC é um conversor de potência que executa a comutação da alimentação dos enrolamentos do motor BLDC. Existem várias tipologias como conversores bidirecionais, do tipo CUCK ou SEPIC onde características como direção de energia, complexidade e custo entram em consideração e distinguem o tipo de aplicações entre eles [27].

Tabela 4 - Comparação entre motores com e sem sensores de efeito de Hall

Característica	<i>Sensored</i>	<i>Sensorless</i>
<b>Deteção de posição</b>	Sensores físicos (ex.: Hall)	Estimativa via força contraelectromotriz
<b>Custo</b>	Mais elevado	Mais económico
<b>Complexidade de controlo</b>	Menor	Maior (algoritmos de estimativa)
<b>Desempenho a baixa rotação</b>	Excelente	Limitado
<b>Robustez</b>	Menor (sensores sujeitos a falhas)	Maior (menos componentes)
<b>Aplicações típicas</b>	Robótica, automação, veículos	Ventoinhas, drones, ferramentas

Tabela 5 - Comparação dos diferentes tipos de conversores existentes nos ESC

Característica	CUK	SEPIC	Bidirecional Genérico
Direção de energia	Unidirecional (adaptável)	Unidirecional	Bidirecional
Corrente de entrada	Contínua	Pulsada	Contínua ou pulsada
Complexidade	Alta	Média	Alta
Aplicações típicas	Motores, painéis solares	LEDs, baterias portáteis	Baterias, veículos eléctricos

## 2.5. Arduino

Arduino é, antes de tudo, uma empresa de hardware e software de computador de código aberto. A Comunidade Arduino refere-se ao projeto e à comunidade de utilizadores que projeta e utiliza placas de desenvolvimento baseadas em microcontroladores. Essas placas de desenvolvimento são conhecidas como Módulos Arduino, que são plataformas de prototipagem de código aberto. A placa microcontroladora simplificada existe numa ampla variedade de tipos de placas de desenvolvimento, sendo utilizada em projetos de automação, robótica e sistemas embebidos devido à sua simplicidade e flexibilidade.



Figura 22 - Fotografia do módulo Arduino UNO [30]

A abordagem mais comum para a programação destes sistemas é usar o ambiente de desenvolvimento integrado, ou Integrated Development Environment (IDE), Arduino, que utiliza a linguagem de programação C. Isso permite o acesso a uma enorme Biblioteca Arduino que está em constante crescimento graças à comunidade de código aberto. Devido a enorme comunidade existente de utilizadores e desenvolvedores da plataforma, existem todo o tipo de projetos com aplicações variadas baseados em Arduino como enumerado acima.



Figura 23 . Ambiente de desenvolvimento integrado IDE [31]

A integração de um microcontrolador Arduino com motores DC sem escovas e controladores de velocidade eletrônicos permite o controlo avançado e suave do motor BLDC através de sinais PWM. Além de fornecer um controlo eficiente do motor, esta configuração também é aplicável em vários cenários de automação e controlo. Em muitas aplicações, incluindo robótica, veículos elétricos, máquinas industriais e outras formas de automatização, a velocidade controlada é crucial para uma utilização eficaz dos motores [32].

Neste caso, o ESC funciona perfeitamente devido ao uso de sinais PWM. Para gerir o excesso de energia de forma eficaz, dois elementos tecnológicos essenciais, o silício e o software, colaboram para alcançar os sinais PWM para o controlo da velocidade. *Pulse milling surge* como uma técnica de regulação do motor BLDC baseada nos retificadores que ajustam a velocidade do motor BLDC variando o período do sinal de potência fornecido ao motor. A interface de um microcontrolador Arduino com um ESC e a condução de um motor BLDC é parte do tema deste projeto [32].

O ESC suaviza as variações de velocidade do motor recebendo e decodificando os sinais PWM enviados pelo Arduino e transformando-os em instruções apropriadas que

comandam o movimento do motor BLDC. O sistema inclui ainda uma interface manual de controlo de velocidade através de um potenciômetro, permitindo ajustes em tempo real à velocidade do motor BLDC. Além disso, os principais parâmetros operacionais, como a velocidade do motor BLDC e os passos do potenciômetro, são monitorizados continuamente através dos outputs do IDE fornecendo feedback instantâneo aos utilizadores para uma gestão eficiente do sistema.

## 2.6. Integração

As integrações dos diferentes aspetos referidos até agora necessitam tanto de engenharia eletrotécnica como de mecânica para assim considerar os componentes corretos, com o correto dimensionamento e configuração. Para construir um *supercharger* elétrico, são necessários os seguintes componentes:

- Microcontrolador para gerir o sistema e integrar com outros
- Controlador de velocidade do motor elétrico
- Motor elétrico
- Compressor centrífugo
- Sensores
- Estrutura de fixação do sistema
- Sistema de transferência de potência mecânica
- Fonte de energia

A integração destes requer atenção a diferentes aspetos, como o tipo de malha a utilizar no controlo da velocidade do motor síncrono, sensores para controlar os diferentes componentes do *supercharger*, quantidade de I/O do interface, fonte de energia, entre outros que serão abordados no Capítulo 3, Análise e arquitetura do sistema. Os acoplamentos, refrigeração e lubrificação são pontos cruciais na interconexão dos diferentes componentes, evitando perdas, aquecimento e desalinhamentos. A implementação de um *supercharger* elétrico enfrenta desafios como sincronização entre o

ESC e o Arduino, as perdas por dissipação de calor, ruído e vibração, sendo necessário minimizar os efeitos adversos.

## 2.7. Mercado

A sobrealimentação elétrica é uma evolução significativa na tecnologia de MCI, oferecendo uma alternativa ou complemento em resposta aos tradicionais turbocompressores. Com o avanço da eletrificação automóvel e a procura por soluções de alto desempenho com menor impacto ambiental, os *superchargers* elétricos têm vindo a ganhar espaço tanto no mercado OEM, ou *Original Equipment Manufacturer*, como no segmento de personalização e pós-venda.

Historicamente, os sistemas de sobrealimentação eram exclusivamente mecânicos ou acionados por gases de escape. Tendo evoluído o seu *design* com a introdução com geometria variável, estes apresentaram um salto significativo no aumento do rendimento do componente. No entanto popularizou-se nos MCI alimentados a Diesel, as altas temperaturas nos MCI alimentados a gasolina, tornavam o custo deste componente mais alto. Com o desenvolvimento de motores elétricos compactos e controladores de velocidade eletrónicos de alto rendimento, surgiram os *superchargers* elétricos, capazes de fornecer pressão no ar de admissão de forma instantânea, sem o atraso típico dos turbocompressores [33].

As principais tendências que moldam o mercado são a busca por uma resposta instantânea, a eliminação do *turbo lag* é um dos principais atrativos para fabricantes e consumidores. Na customização e *tuning* há um crescimento no mercado de pós-venda, com entusiastas a instalar kits de sobrealimentação elétrica em veículos convencionais. Nos fabricantes a redução de emissões utilizando sobrealimentação elétrica em motores mais pequenos com maior potência específica, contribui para a redução de CO<sub>2</sub>.

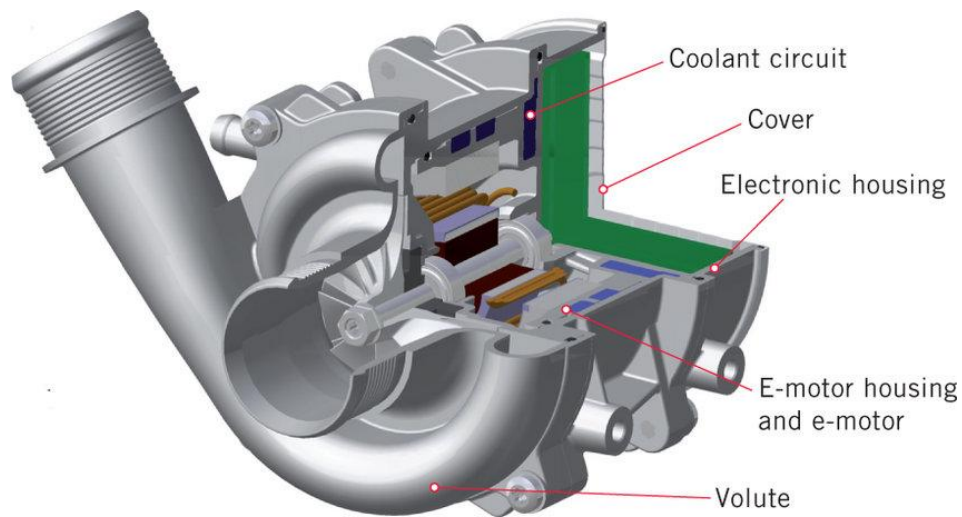


Figura 24 - Recorte de um 3D de um *supercharger* elétrico [34]

Entre os principais fabricantes e fornecedores de soluções de sobrealimentação elétrica destacam-se a Valeo, a Garrett Motion e a BorgWarner com vários modelos diferentes utilizados por diversas marcas de automóveis. Outras marcas, como a TorqAmp, a Rotrex, ou a Aeristech, atuam no mercado de customização e pós-venda oferecendo soluções mais genéricas já que têm de suportar inúmeros tipos de aplicações.

O mercado de *superchargers* elétricos está em expansão, impulsionado pela necessidade de soluções mais eficientes, leves e adaptáveis. A sua aplicação em veículos desportivos e personalizados demonstra a versatilidade desta tecnologia. Com o avanço da eletrónica automóvel e a crescente procura por desempenho sustentável, espera-se que os *superchargers* elétricos desempenhem um papel mais relevante na mobilidade do futuro [15].

Atualmente, o consumidor final pode encontrar kits completos de *supercharging* elétrico com motor BLDC, ESC, compressor centrífugo e controlador, soluções modulares ou universais. Isto permite ao consumidor o ajuste do produto aos seus objetivos, sejam eles um aumento de potência constante no funcionamento do MCI, investigação, ou criação de uma solução direcionada a objetivos concretos. Algumas empresas destacam-se por oferecer soluções personalizáveis com integração de sistemas eletrónicos personalizados, compatíveis com

DIY - Do It Yourself

ECU - Electronic Control Unit

pós-venda e oferecem suporte técnico nos seus kits para o consumidor.

# 3. Análise e arquitetura do sistema

O presente Capítulo procura enquadrar o sistema a desenvolver e testar na prática, aprofundando os conceitos do Compressor Centrífugo, Motor síncrono, ESC e a plataforma de interface como sendo os principais objetos de estudo.

Sendo o Compressor Centrífugo o principal interveniente do sistema, é também o primeiro a ser abordado. Procurou-se incidir a pesquisa por palavras como compressor centrífugo, *eCharger*, sobrealimentação de motores de combustão interna, entre outros, complementando com fatores diretamente relacionados com o objetivo em torno do qual esta tese se foca. Após a introdução das bases de funcionamento e *design*, introduz-se o conceito de eletrificação como meio de otimização do seu funcionamento e performance.

Seguindo a introdução teórica e fundamental para o entendimento do sistema como um todo, abordam-se os diferentes tipos de motores elétricos, incidindo no seu funcionamento, *design*, controlo e as suas vantagens e desvantagens. O seu controlo é também fator relevante já que afeta o *design* do sistema como um todo considerando questões como custo e integração. Para complementar uma possível integração de aplicação automóvel aborda-se por fim o Arduino.

Os componentes foram identificados e selecionados com base em diversas categorias, sendo o custo e o peso os fatores primários de decisão, como demonstrado na Figura 25. A sua escolha também deriva da adaptação e funcionalidade específica à utilização, pelo que as escolhas apresentadas já terão passado antes numa verificação tendo em base aspetos como o grau de proteção IP, tendo em conta a sua aplicação final terá de ser no mínimo IP67, tensão de funcionamento, como mencionado previamente, suporte e comunidade não só de desenvolvedores mas também de entusiastas, comumente os mais pró-ativos nas comunidades e em suporte.

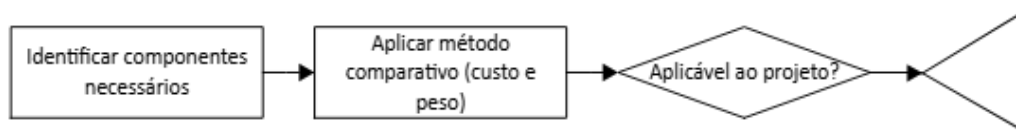


Figura 25 - Fluxograma da estratégia para seleção de componentes

### 3.1. Arquitetura

Como referido, um dos aspetos principais a considerar no presente projeto é a tensão de funcionamento dos equipamentos elétricos. A tensão da maioria das viaturas com MCI é de 12 V provenientes da bateria de ácido-chumbo, sendo que com o alternador em funcionamento, esta poderá variar tipicamente entre 13,5 V e 14,5 V. Seguindo este princípio então apresentam-se duas opções, ou utilizar o sistema de produção e armazenamento elétricos presentes no veículo, ou ter um sistema *standalone* que nos permita garantir o funcionamento do sistema mas com uma autonomia limitada.

As características mais relevantes neste *design* são o custo e a complexidade da integração do sistema. Na Tabela 6 são apresentados os dados recolhidos de algumas consultas no mercado. Levou-se em consideração o tempo de entrega dos componentes, de modo a garantir a calendarização, o seu custo e peso. Sendo o custo o aspeto com maior impacto na tomada de decisão, e a complexidade da potencial integração futura, toma-se de seguida a decisão de qual será a tensão a utilizar.

Tabela 6 - Comparação de custo e peso das arquiteturas 12 V e 48 V

Designação	12 V		48 V		
	Custo	Peso (kg)	Custo	Peso (kg)	
eCharger	Supercharger	2 771,24 €	5,1	2 771,24 €	5,1
	Motor	99,00 €	0,4	343,92 €	2
	Controlador	128,00 €	0,2	439,00 €	0,78
	Dispositivo I/O	50,00 €	0,2	50,00 €	0,2
	Outros				
Extra	Cablagem	29,00 €	25	3,80 €	2,5
	Bateria 1kWh	145,00 €	19	405,00 €	7
	DC/DC	N/A	N/A	260,00 €	1,45
TTL	3 222,24 €	49,9	4 272,96 €	19,03	

Cada arquitetura tem as suas vantagens e desvantagens para além das considerações apresentadas na tabela. A complexidade da integração, bem como a extensão de modificações necessárias, têm um peso considerável. Isto pode implicar custos não previstos, porque é necessário passar mais tempo a desenhar o sistema e a garantir que os sistemas comunicam corretamente entre si. Ainda que muito seja comum, em termos de programação e comunicação, o controlo sobre a voltagem e a adição de novos equipamentos, como o conversor DC/DC para a arquitetura de 48V, trazem consigo diferentes desafios que é necessário antever.

Em todos os projetos é importante manter os timings e evitar atrasos com entregas. Para isso é importante garantir que todos os componentes selecionados estão prontamente disponíveis, ou num prazo aceitável, e que o tempo necessário para desenvolver, montar e testar, esteja dentro dos limites aceitáveis para a respetiva entrega de conclusões. Outra consideração, é que como os aspetos de programação e controlo são transversais, é possível depois aprimorar o processo para o desenvolvimento de outras arquiteturas.

O contínuo envelhecimento do parque automóvel em Portugal e a arquitetura mais comum nos veículos ser a de alimentação a 12 V, aumentam a relevância do desenvolvimento inicial ser em 12 V. O potencial de *retrofitting*, a aplicabilidade, o custo reduzido, facilidade de integração para testes, e ser uma boa base de aprendizagem para futuros desenvolvimentos tornam esta arquitetura a escolha para o desenvolvimento da prova de conceito.

A arquitetura de 48 V, apesar de apresentar vantagens sobre a de 12 V como menor peso, maior rendimento, capacidade para motores BLDC maiores e velocidades superiores com isso, sendo o acoplamento direto uma possibilidade, não apresenta a viabilidade de execução em tempo útil para os testes pretendidos, ficando como consideração para um desenvolvimento futuro. Deste estudo sairão a aprendizagem das diversas necessidades de integração, os dados relevantes da programação e controlo, bem como a maioria dos componentes necessários para poder prosseguir tal estudo com tensões de alimentação superiores.

### 3.2. Compressor centrífugo eletrificado

O objeto desta tese, o compressor centrífugo elétrico, apresenta como diferença principal o seu meio de atuação elétrico. Não depende assim da energia mecânica do MCI, não tem constrangimentos de posicionamento derivados dessa necessidade de acoplamento à cambota nem depende das rotações da mesma. Isto oferece mais flexibilidade em termos de controlo, podendo o compressor centrífugo funcionar nos seus regimes de maior rendimento, e também maior flexibilidade no seu posicionamento, podendo afastá-lo de fontes de calor e aumentando a exposição a ar fresco. Este tipo de tipologia carece de um meio de gerar energia, tendo de extrair a mesma do alternador do veículo ou de um sistema de armazenamento dedicado.

Considerando então a flexibilidade de posicionamento e que este componente é compatível com MCI atmosféricos, bem como MCI sobrealimentados com turbocompressor, coloca-se a hipótese de este poder ser utilizado para aumento de potência e também ajudar na redução do momento transitório do turbocompressor. O mesmo poderia ser colocado a jusante como a montante do turbocompressor, no entanto é necessário considerar os efeitos e *design* apropriados para cada tipo, representados na Tabela 8.

As diferentes topologias do sistema combinado, também conhecido por turbo compounding, estão representadas na Figura 26. No geral, o posicionamento a jusante, Figura 26 (b), obtém uma maior resposta transitória comparativamente ao posicionamento a montante, Figura 26 (c), já que este último tem um maior volume para pressurizar. Outro benefício é que as modificações necessárias para esta arquitetura são mínimas para a eletrificação do sistema de sobrealimentação [15].

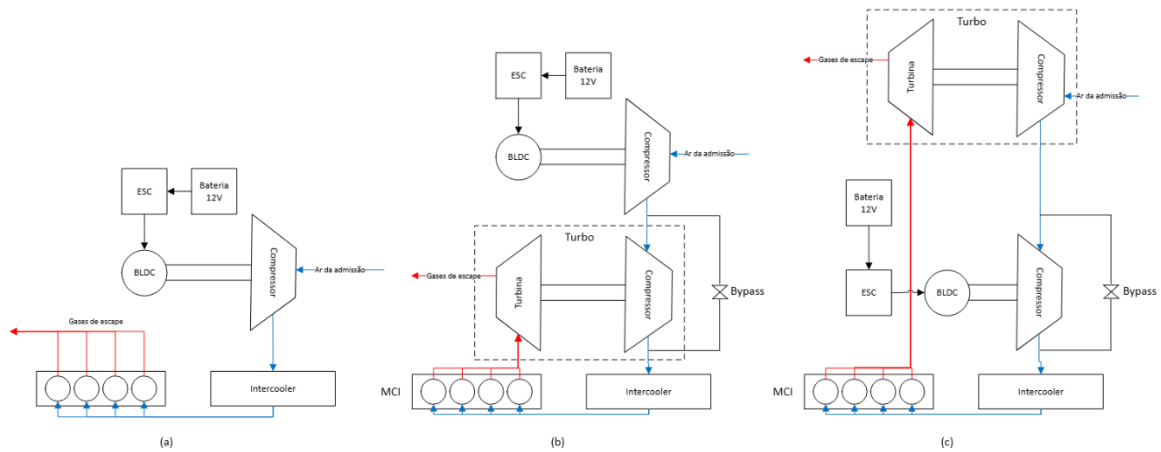


Figura 26 – Desenho do layout do *supercharger* centrífugo elétrico (a); combinação turbocompressor e *supercharger* elétrico (b) a jusante e (c) a montante [15]

Nesta topologia, o *supercharger* elétrico opera independentemente do turbocompressor, e assim é desenhado para aumentar a pressão do ar a um regime rotacional do MCI reduzido. Com esta consideração, poderemos argumentar que a resposta transitória do MCI é melhorada por não haver inércia nem dependências do sistema elétrico em relação aos gases de escape. Na Figura 27 podemos observar os efeitos numa experiência prática, realizada por Yingguang Liu considerando diferentes estratégias de aceleração e desaceleração, nomeadamente: aceleração constante do motor elétrico, Figura 28 (a), por patamares de aceleração, Figura 28 (b), e por estratégia de rampa, Figura 28 (c). Contudo, como mencionado previamente, não tem meios de regenerar energia [15].

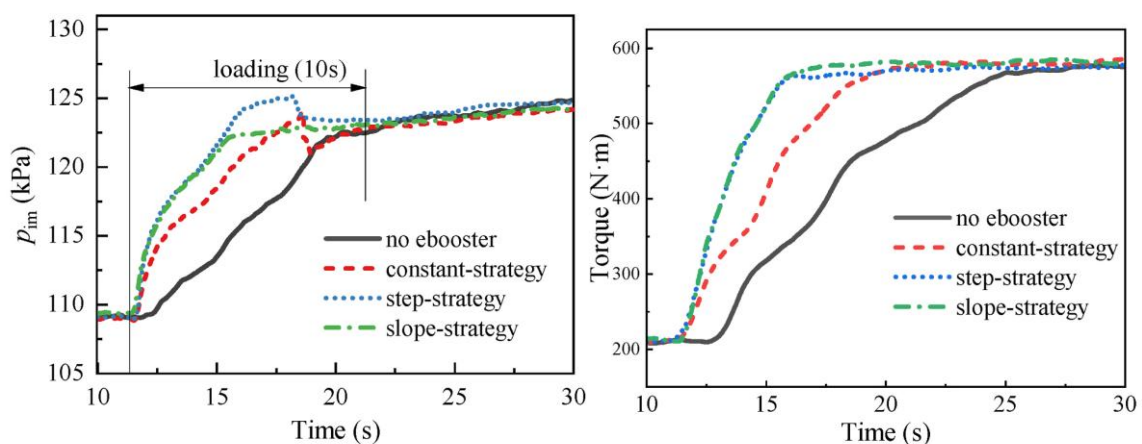


Figura 27 – Resultados da aplicação de um *supercharger* eletrificado a jusante do turbocompressor

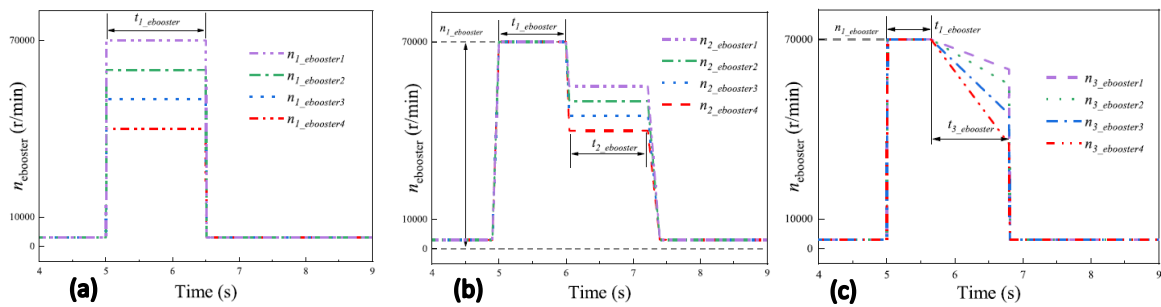


Figura 28 - Estratégias de controlo de aceleração: (a) constante; (b) por patamares; (c) por rampa

Para o presente estudo optou-se pela utilização de um Turbo IHI VB20 pela disponibilidade imediata e por se tratar de uma cedência para efeitos de testes práticos da presente tese. Considerando a aplicação prática num automóvel há que dimensionar corretamente o turbo levando em conta diversos fatores como a arquitetura de sobrealimentação, espelhada na Figura 26, o tamanho do MCI e os objetivos relativamente ao output do sistema.

Tabela 7 – Dados técnicos do Turbocompressor IHI VB20 - Tipo RHF3

		type	RHF3
Item	Air Flow Rate (at: $\pi=2.0$ )	m <sup>3</sup> /min ft <sup>3</sup> /min	0.75-6.3 26.5-222.5
	Maximum Pressure Ratio		2.7
	Maximum Speed	X 10 <sup>3</sup> rpm	250
	Maximum Allowable Gas Temperature	°C °F	950 1742
	Weight (without waste-gate valve)	kg lb	(1.9) (4.2)
	Diesel Engine Application	Ps	20~100
	Gasoline Engine Application	Ps	27~135
	A		135
	B		22
	C		133
External Dimensions	D		88
	E		58
	F		65
	G-1 with Waste-Gate Valve	m/m	162
	G-2 without Waste-Gate Valve		(136)
	H-1 with Waste-Gate Valve		135
H-2 without Waste-Gate Valve		(127)	

Através do exame da Tabela 7 é possível constatar dados relevante para aplicação do compressor centrífugo como um *supercharger* eletrificado. Dados como o limite de 250k RPM, rácio de pressão máximo, fluxo de ar com um rácio de pressão de 2.0 e a potência expectável mediante o tipo de combustível do motor considerado – 1 PS  $\approx$  0.73549875 kW  $\approx$  0.98632 cv.

Tabela 8 – Matriz de comparação das diferentes tipologias [15]

<b>Tipo</b>	<b>Turbocompressor eletricamente assistido</b>	<b>Compressor eletrificado</b>	<b>TEDC (montante)</b>	<b>TEDC (jusante)</b>
<b>Fonte de Energia</b>	Gases de escape	Bateria	Gases de escape	Gases de escape
	Bateria		Bateria	Bateria
	Alternador	Alternador	Alternador	Alternador
<b>Capacidade do Motor/Inversor</b>	Baixa	Alta	Baixa	Baixa
<b>Perdas de Joule</b>	Altas	Baixas	Baixas	Baixas
<b>Tamanho</b>	Médio	Pequeno	Grande	Grande
<b>Turbocompressor elétrico composto</b>	Sim	Não	Não	Não
<b>Acoplamento turbina e compressor eletricamente atuado</b>	Sim	Não	Não	Não
<b>Vantagens</b>	Compacto	Compacto	Sem inércia adicional	Resposta transitória mais rápida
		Sem inércia adicional	Instalação fácil	Instalação fácil
	Motor e inversor pequenos	Flexibilidade de controlo	Motor e inversor pequenos	Motor e inversor pequenos
		Flexibilidade de instalação	Melhoria do desempenho em funcionamento constante	Melhoria do desempenho em funcionamento constante
	Sem válvula de descarga	Sem contrapressão		
<b>Desvantagens</b>	Additional cooling	Inércia adicional no veio por contrapressão (limite de surge)	Não é a resposta transitória mais rápida	Necessário mais espaço
			Necessário mais espaço	Rendimento inferior
			Rendimento inferior	

### 3.3. Motor atuador e sistema de controlo

O motor atuador elétrico desempenha o papel crítico de providenciar movimento ao sistema mecânico de sobrealimentação elétrica. É então necessário acautelar diversos parâmetros como a tensão de funcionamento do motor, a velocidade máxima e nominal, entre outros. Como visto na Tabela 6, as arquiteturas investigadas foram as de 12 VDC e 48 VDC, sendo as mais comuns nos sistemas atuais de combustão interna e *mild-hybrids*.

Tendo em conta o envelhecimento do parque automóvel português, é seguro deduzir que na sua maioria, os veículos possuirão a arquitetura de 12 VDC como sendo a sua principal. Outros fatores como a maioria dos registos pertencerem a motores de combustão interna tradicionais, decréscimo de viaturas para abate e aumento da idade do parque automóvel, ajudaram na tomada de decisão tendo em vista uma maior abrangência imediata [2][3][9][10].

Para a aplicação, foram considerados os seguintes tipos de motor elétrico:

- Motor DC com escovas (*Brushed DC*)
- Motor DC sem escovas (BLDC)
- Motor síncrono de imanes permanentes (PMSM)
- Motor de indução (*Induction*)
- Motor de relutância comutada (SRM)



Figura 29 – Ilustração dos diferentes tipos de motores elétricos enumerados [35]

Podemos verificar nas tabelas abaixo a comparação dos diversos aspetos para tomada de decisão.

Tabela 9 – Matriz comparativa entre os diferentes tipos de motor elétrico

<b>Critério</b>	<b>Motor de escovas</b>	<b>BLDC</b>	<b>Indução</b>	<b>PMSM</b>	<b>SRM</b>
<b>Rendimento</b>	Médio	Alto	Médio	Muito alto	Alto
<b>Binário a baixa rotação</b>	Alto	Alto	Médio	Alto	Muito alto
<b>Controlo</b>	Simples	Moderado	Moderado	Complexo	Complexo
<b>Custo</b>	Baixo	Médio	Médio	Alto	Médio
<b>Manutenção</b>	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
<b>Ruído e vibração</b>	Alto	Baixo	Médio	Muito baixo	Alto
<b>Resposta dinâmica</b>	Boa	Excelente	Boa	Excelente	Boa
<b>Tamanho/peso</b>	Médio	Compacto	Grande	Muito compacto	Compacto
<b>Integração</b>	Limitada	Muito boa	Razoável	Excelente	Boa

Como verificado na Tabela 10, o motor BLDC é o mais indicado considerando a presente aplicação. O seu custo reduzido, ampla disponibilidade, variadas aplicações com diferentes tipos de controlo e considerando um elevado binário a baixas rotações tornam-no a escolha preferida. Seguido do motor PMSM, este seria uma excelente alternativa, no entanto o seu custo e tipo de controlo fazem com que não seja viável para o desenvolvimento da presente tese. Por último, o motor SRM oferece alto binário e robustez, mas exige um tipo de controlo mais complexo e pode gerar mais ruído [15].

A pesquisa incidiu então sobre o motor BLDC considerando a aplicação de uma tensão entre 12 V a 14,5 V. Vários fabricantes, na sua maioria de motores e equipamentos de veículos de controlo remoto surgem como potenciais soluções. Entre Castle, Hobbywing, Leopard, entre outras marcas, existiam modelos que se ajustavam ao pretendido.

Tabela 10 – Matriz de tomada de decisão

<b>Critério</b>	<b>BLDC</b>	<b>PMSM</b>	<b>SRM</b>	<b>Peso</b>
Rendimento	8	10	9	10
Binário a baixa rotação	9	9	10	15
Controlo	8	7	6	20
Custo	8	6	7	25
Manutenção	9	9	9	10
Ruído/Vibração	9	10	6	10
Tamanho/Peso	9	10	9	10
Total (Max. 100)	845	815	775	

Tabela 11 – Matriz comparativa entre motores BLDC

Modelo	KV Rating	RPM Máx.	Eficiência Térmica	Grau IP	Preço (€)
Hobbywing EZRun 4268 SD G2R	2500	60.000	Alta (reduz aquecimento)	IP67	~105
Hobbywing XeRun 4268 SD G3	1900–2200	55.000	Melhorada (6% mais eficiente que G2)	IP5X	~130
Castle Creations 1515 2200KV	2200	50.000	Média	N/A	~140
Leopard 4282 2000KV	2000	48.000	Média	N/A	~120
Hobbywing QuicRun 3650	3300	45.000	Baixa	N/A	~60

O motor então selecionado é do tipo BLDC, da marca Hobbywing, modelo EZRun 4268SD G2R, foi selecionado por se enquadrar na amplitude de tensões existentes num automóvel, considerando a mais baixa de 12 V (bateria) e a superior de 14,5 V (alternador). Comparativamente a outras alternativas apresentou uma maior comunidade de suporte faça você mesmo, ou *Do It Yourself* (DIY), bem como integrações com plataformas Arduino em projetos similares o que facilitam a obtenção de informação e diminuem o tempo até prototipagem, crucial muitas vezes no mundo automóvel. Para além destas considerações levou-se em conta o baixo custo, disponibilidade e o seu grau de proteção IP, já que para a sua aplicação final é absolutamente necessário.

### 3.4. Controlador

Feita a escolha do motor, é então necessário escolher o ESC adequado. Nesse sentido, e para evitar problemas de compatibilidade e de especificações, é sempre melhor o ESC proposto pelo fabricante. O seu *design* é sempre com o objetivo de obter o maior rendimento do seu próprio motor, bem como funções integradas de controlo e monitorização.

O controlador em estudo é o Hobbywing EZRun Max8 G2S. Para além de ser o controlador aconselhado pela marca para este motor, apresenta outras características que se enquadram no tipo de funcionamento que pretendemos, tais como: funcionamento dentro da gama funcional da bateria e alternador 12~14,5V, capacidade de alimentação do motor até à sua velocidade limite, à prova de água, baixo custo e peso, vários tipos de suporte online e *bluetooth* para monitorização em tempo real e data log.

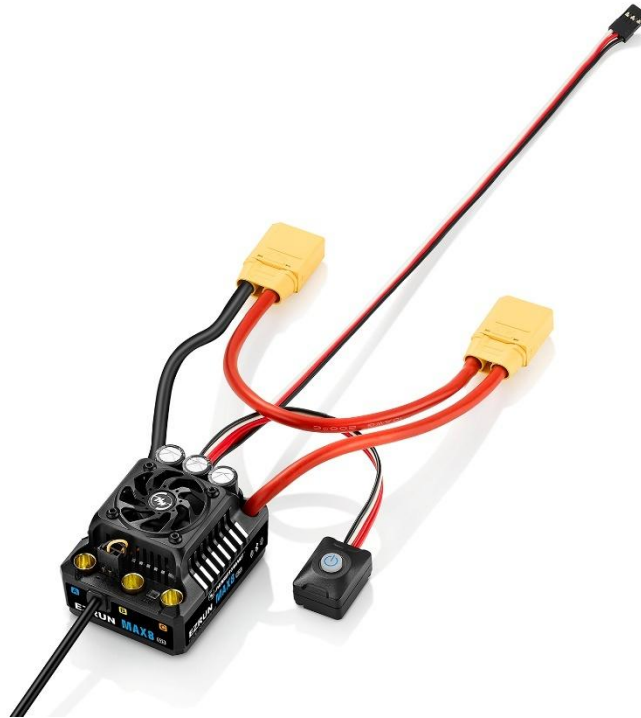


Figura 30 – Fotografia do controlador de velocidade eletrónico Hobbywing Max G2S [36]

Os seus aspetos construtivos permitem que a utilização pretendida, neste caso a integração final num veículo, seja possível. É necessário que os componentes sejam capazes de manter o seu bom funcionamento em condições adversas, como chuva e altas temperaturas ambientes, bem como a sujidade que acumula com o tempo. Outra vantagem é a possibilidade da temporização do modo turbo, que nos permite tempos de aceleração menores em condições específicas (launch control). Em termos de conectividade, o mesmo suporta Bluetooth, o que nos garante acesso a dados em tempo real através da HW Link App e tem funções de *data logging*.

Algo necessário na sua primeira utilização, é a calibração das instruções PWM em função da sua utilização. O ESC poderá controlar o motor BLDC de várias maneiras. Considera-se então CCW como o movimento no sentido contrário ao dos ponteiros dos relógios, direção rotacional pré-definida, CW como o seu inverso e BK como um travão. Mediante a configuração primária, pode-se considerar então estratégias de controlo CCW+BK, CCW/CW+BK e CCW/CW direto. Para a finalidade pretendida, a configuração implementada no ESC foi a pré-definida de FW+BK configurando os timings PWM entre 1000 $\mu$ s e 1450 $\mu$ s para o travão, 1500 $\mu$ s para o ponto neutro e de 1550 $\mu$ s até 2000 $\mu$ s para o acelerador. A programação para calibração e teste encontra-se nos Anexos.

### 3.5. Interface de controlo

Na integração de diferentes sistemas eletrónicos, neste caso considerando a sua aplicação futura, é necessário acomodar as diferentes linhas de comunicação e linguagens de programação e controlo. Então o dispositivo terá de suportar a integração com comunicação CAN, *Controller Area Network bus*, e possuir a capacidade de “traduzir” em tempo real essa informação para um output PWM que irá controlar o ESC e a velocidade do motor BLDC.

Na Tabela 12, podemos observar as diferentes plataformas e módulos considerados para a execução da tarefa descrita. O STM32, é uma das plataformas mais completas e adequadas para o tipo de utilização considerada, com a exigência de controlo preciso, alta velocidade e baixo consumo energético. No entanto, a curva de aprendizagem para o utilizador é maior e menos intuitiva, quando comparada ao IDE Arduino. Já a Raspberry Pi, não sendo ideal para aplicações em tempo real e custo mais elevado, sai de consideração. Enquadrando a aplicação, rapidez de prototipagem e o próprio conhecimento do autor, a plataforma Arduino foi a selecionada por apresentar maior facilidade de realização.

O módulo Arduino aplicado ao caso presente será o Arduino Uno ATmega328P [32] onde se pretende executar o procedimento de calibração e controlar o sistema propulsor, o motor BLDC e respetivo ESC. Através desta integração, pretende-se criar programas de teste, inseridos no Arduino e através da medição de dados em tempo real através de sensores específicos para o efeito, entender pontos ótimos de funcionamento, melhor rendimento e possíveis efeitos no sistema de energia de uma viatura de passageiros.

Tabela 12 – Matriz comparativa entre módulos de interface e programação para o ESC

Controlador	Facilidade de Programação	Bibliotecas Disponíveis	Custo (€)	Consumo Energético
Arduino Uno (ATmega328P)	Muito fácil (IDE Arduino)	Servo.h, ESC libs, suporte sensorless	~20	Baixo
ESP32	Fácil (Arduino IDE ou MicroPython)	Suporte BLDC + Wi-Fi/Bluetooth	~10–15	Baixo
STM32 (Blue Pill)	Médio (necessário HAL ou bare-metal)	Bibliotecas robustas, mas menos intuitivas	~8–12	Baixo
Raspberry Pi	Médio/Alta (Python, C++)	Suporte via GPIO, mas não ideal para tempo real	~50	Alto

Tabela 13 - Especificações dos componentes utilizados

Componentes	Especificações
Arduino Uno	Microcontroller, 16 MHz clock speed, 5V logic, 6 PWM pins
BLDC Motor	Hobbywing EZRun 4268SD G2R
Power Source	Fonte de alimentação DC 12 V
ESC	Hobbywing EZRun Max8 G2S

Os principais componentes de hardware deste sistema são fornecidos na tabela acima. Cada componente é selecionado de modo a obter um controlo e operação baseado em sinais PWM providenciados pelo Arduino. Abaixo descrevem-se os principais componentes utilizados no projeto, quais os seus parâmetros técnicos, quantitativos e propósitos funcionais, a fim de garantir o controlo preciso da velocidade do motor BLDC.

- Arduino Uno: Conectado ao ESC, para gerar os sinais PWM que controlam a velocidade do motor BLDC
- Motor BLDC: Hobbywing EZRun 4268SD G2R é um motor BLDC leve, com 360g, capaz de 36 250 RPM @14,5 V, baixo custo e disponibilidade imediata no mercado
- Fonte de alimentação: O motor e o ESC são alimentados por uma fonte de alimentação industrial da Orno, modelo OR-ZL-1640. Tensão de alimentação constante a 14,5 VDC e uma potência máxima de 500 W
- ESC: O controlador eletrónico de velocidade Hobbywing EZRUN MAX8 G2S funciona nas gamas de tensão entre 11,1 VDC e 22,2 VDC, e uma corrente contínua de 160A. A sua função é a de regular a velocidade do motor com base nos sinais PWM enviados pelo Arduino

Esta arquitetura permite um controlo preciso do motor BLDC incorporado no sistema de sobrealimentação elétrica.

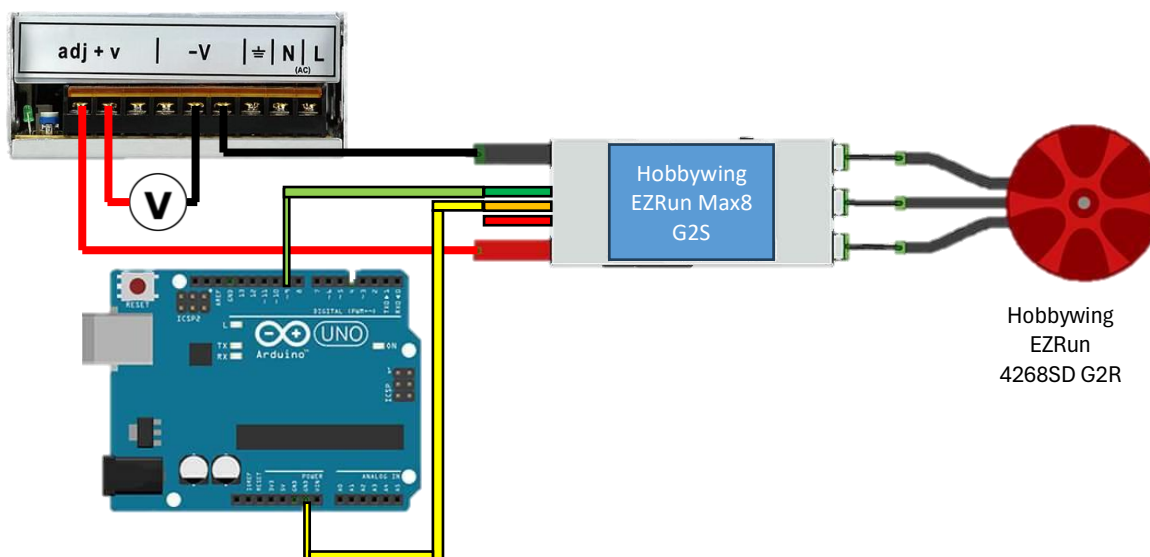


Figura 31 - Desenho das ligações do sistema de controlo e motor BLDC

### 3.6. Integração

A integração de sistemas de controlo eletrónico com motores BLDC tem ganho destaque em aplicações automotivas, especialmente em soluções de *supercharging* elétrico. O Arduino, enquanto plataforma de prototipagem eletrónica, permite o controlo eficiente do ESC, regulando a velocidade e o binário de motores BLDC e monitorizando parâmetros como temperatura, corrente e tensão. Este Capítulo aborda os princípios de controlo, linguagens utilizadas, cálculos de dimensionamento e a metodologia de verificação do sistema [32].

O controlo do motor BLDC é realizado através de sinais PWM gerados pelo Arduino e interpretados pelo ESC. A abordagem será em malha fechada, preferida em aplicações que exigem precisão. Para isso, a malha fechada utiliza sensores de efeito Hall para realimentação da velocidade ou posição do rotor, permitindo ajustes dinâmicos e precisos.

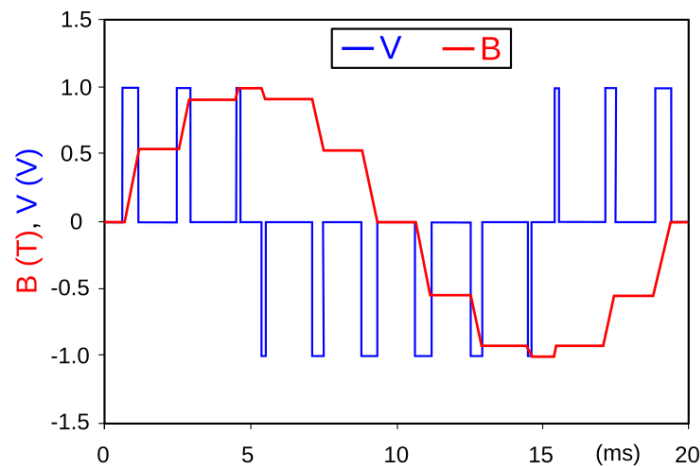


Figura 32 – Exemplo de sinais PWM a azul num indutor ideal que dão origem a uma tensão representada a Vermelho [37]

A linguagem principal utilizada é o C/C++ através do ambiente de desenvolvimento Arduino IDE. Bibliotecas como Servo.h ou ESC.h facilitam a geração de sinais PWM. Em sistemas mais complexos, poder-se-ia recorrer a plataformas como PlatformIO ou integração com MATLAB/Simulink para controlo em tempo real. O dimensionamento do sistema envolve:

- Escolha do ESC com margem de corrente superior à nominal do motor
- Definição do *baudrate* de comunicação entre Arduino e ESC
- Cálculo da potência elétrica  $P = U \times I$  em vazio

A verificação planeada do sistema é realizada através de testes experimentais do sistema acoplado. Para verificar os efeitos do mesmo, fazem-se testes comparativos ao output de ar do *supercharger* centrífugo através da redução da abertura da saída por meio de um elemento plástico, com os seguintes objetivos:

- Validar a resposta dinâmica do motor BLDC (tempo de aceleração, desaceleração)
- Medir a corrente consumida em regimes de aceleração e contante a diferentes velocidades
- Verificar a estabilidade térmica do ESC e do motor
- Avaliar a precisão do controlo de velocidade

É necessário considerar que para a implementação real num veículo de MCI no futuro, os tempos de resposta do motor BLDC, consumos e output, não serão os mesmos. Novos

testes terão de ser efetuados ao MCI sem integração do sistema de sobrealimentação elétrica, com medição de fluxo e massa de ar para assim poder criar uma linha base que o *supercharger* elétrico deverá seguir. De seguida, com a implementação do sistema de sobrealimentação elétrico, realizar o teste com o objetivo de seguir a *baseline* do motor original e perceber os potenciais pontos de otimização da atuação do sistema.

Sensores utilizados incluem:

- Sensor de corrente
- Sensor de rotação por efeito de Hall
- Sensor de temperatura
- Sensor de fluxo de ar (MAF)
- Sensor de pressão de ar (MAP)

Os dados são recolhidos via App HW Link V2 da Hobbywing, que permite a visualização em tempo real dos dados do ESC e através do IDE do Arduino onde se pode visualizar o output do mesmo. A App HW Link V2 permite também o data log sempre que o ESC e motor BLDC são ativados, a póstuma análise permite uma maior compreensão do comportamento do sistema como se pode ver na Figura 33 e Figura 34.

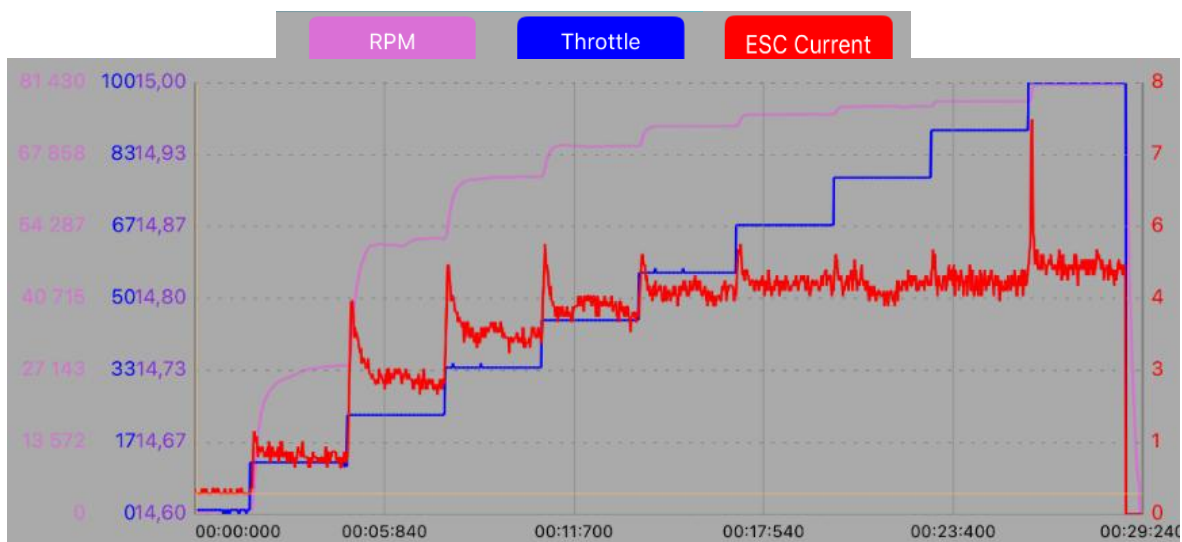


Figura 33 - Gráfico resultado de um teste com incrementos de 50 $\mu$ s no sinal PWM [1500 ;2000]  $\mu$ s

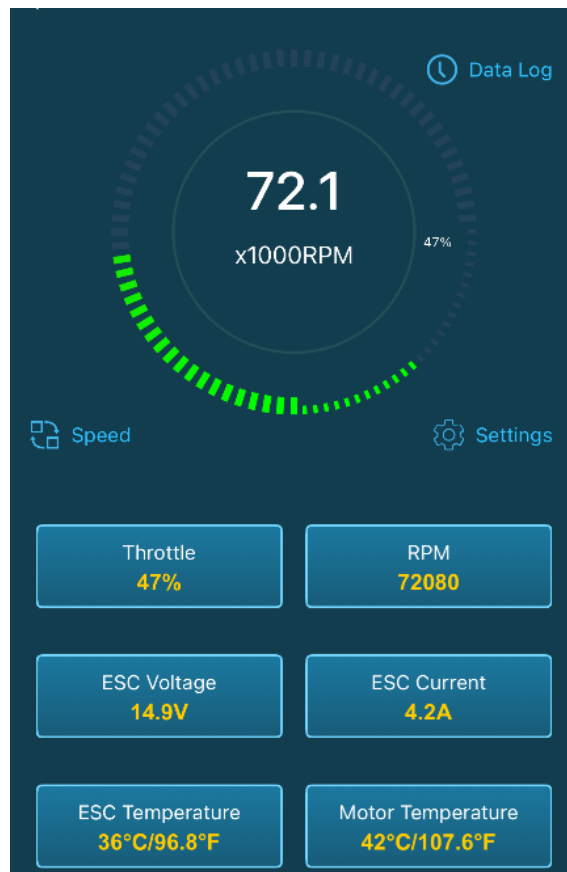


Figura 34 – Captura de ecrã da medição de dados em tempo real através da app HW Link V2

A integração de Arduino, ESC e motor BLDC constitui uma solução eficaz e acessível para controlo de sistemas mecatrónicos em aplicações automóveis. O sucesso do projeto depende de um correto dimensionamento, programação eficiente e verificação experimental rigorosa.

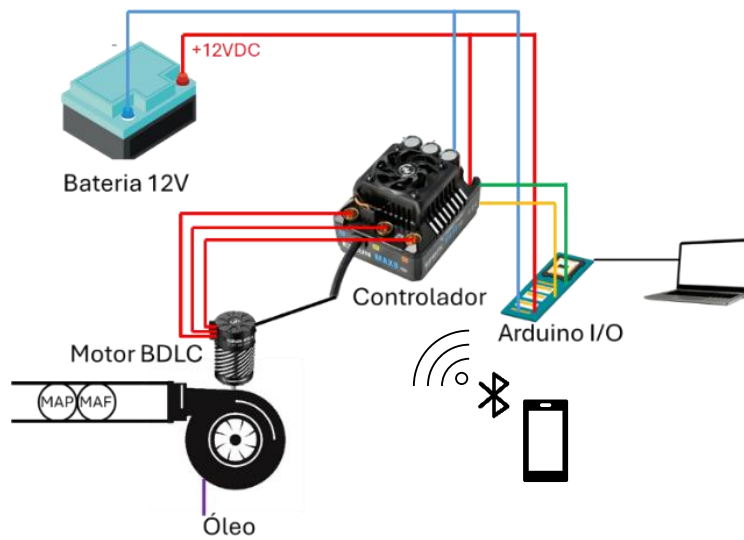


Figura 35 - Desenho de integração dos componentes do *supercharger* elétrico

O objetivo do presente trabalho é a preparação para a montagem correspondente ao desenho da Figura 35, onde o controlo do sistema é efetuado pelo Arduino e o output é medido pelo fluxo de ar resultante da ação mecânica do motor BLDC.

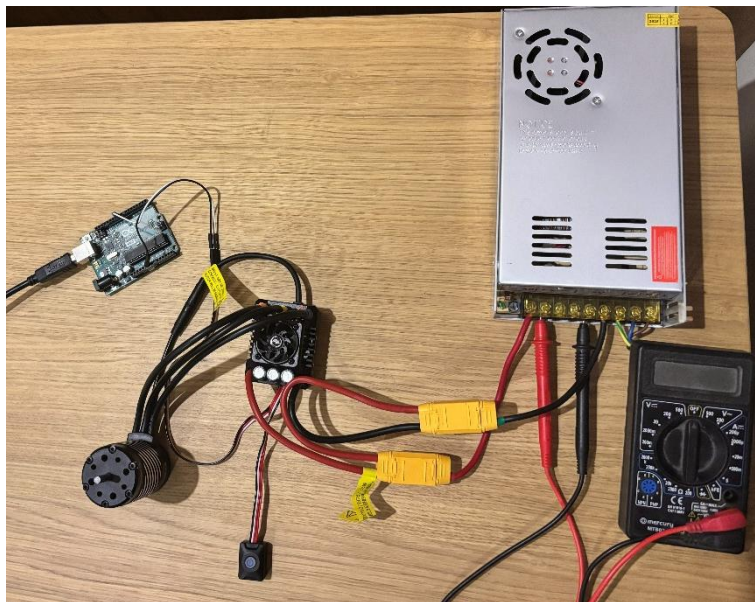


Figura 36 - Circuito de teste elétrico e eletrónico do ESC e motor BLDC

### 3.7. Acoplamento

Para o funcionamento do sistema em perfeito sincronismo, é necessário adequar as estruturas, componentes, fixações e meios de transmissão de potência. O acoplamento mecânico entre o motor elétrico e o compressor centrífugo é um dos pontos críticos no desenvolvimento de um sistema de sobrealimentação elétrica. A escolha do método de transmissão de potência influencia diretamente o rendimento do sistema, a durabilidade e a capacidade de atingir as rotações necessárias para gerar pressão de sobrealimentação adequada. Neste projeto, optou-se por um sistema de transmissão por polias e correia, para ser montado sobre um suporte de bancada maquinado, garantindo robustez, alinhamento e facilidade de manutenção.

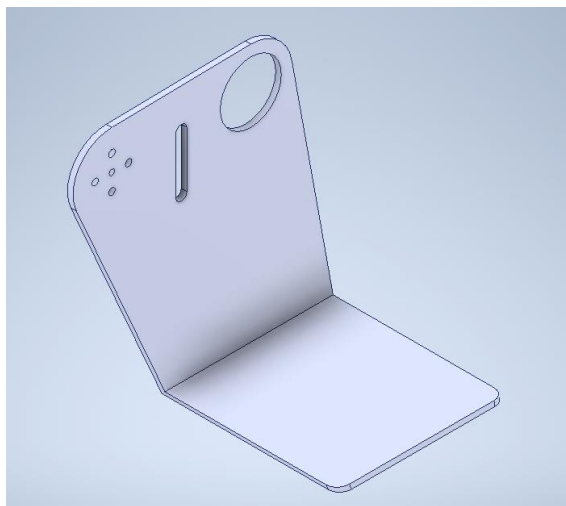


Figura 37 - Estrutura de fixação do sistema de sobrealimentação elétrica desenhada em 3D

Na Figura 37 e Figura 38 podemos observar o elemento 3D para fixação dos diferentes componentes, o compressor centrífugo, motor BLDC, engrenagens e polias. O suporte de bancada tem como objetivos garantir o alinhamento entre as polias, absorver vibrações e cargas dinâmicas, e permitir ajustes na tensão da correia. Para isso o material considerado foi o alumínio, pela sua leveza, resistência e facilidade de maquinar. Os aspectos construtivos do mesmo apresentam uma forma em “L”, considerando na base furações para fixação em bancada. No lado vertical existe um rasgo para ajuste da posição do tensor e furações para fixação do motor BLDC e compressor centrífugo.

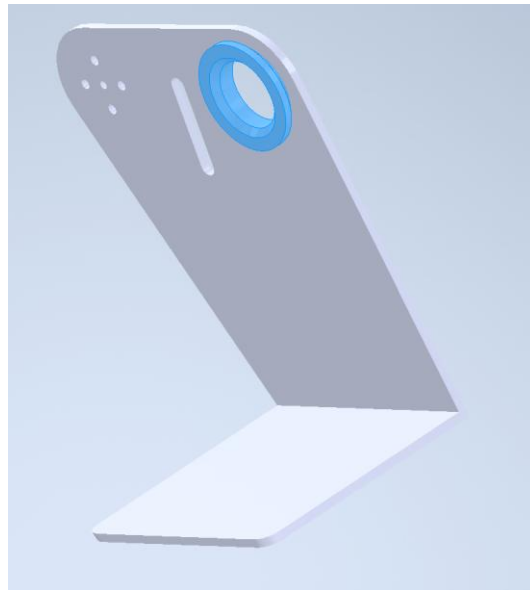


Figura 38 - *Design* da estrutura de fixação do sistema de sobrealimentação elétrica com o acoplamento da flange para o motor elétrico (a azul)



Figura 39 - Fotografia do motor elétrico BLDC Hobbywing EZRun 7268 [36]

O conceito e *design* 3D a abordagem iniciou-se pelas medidas dos componentes seleccionados, nomeadamente o motor representado na Figura 39, as polias na Figura 40, e possível posição do turbocompressor. Utilizando estes dados foi possível o desenvolvimento em ambiente 3D, recorrendo ao software Solidworks®, a plataforma de suporte e fixação para todo o sistema representada da Figura 37 e Figura 38 . A ausência

de modelos 3D do turbocompressor em estudo implicou que a sua fixação fosse determinada na execução prática.

Para o tipo de aplicação, considerando as velocidades até 30k RPM do motor BLDC considerou-se uma relação de 1:3, com o intuito de obter 90k RPM na turbina do *supercharger*. Este nível de rotação permite criar pressão suficiente para obter resultados positivos, testar o sistema em causa e realizar ajustes ao considerar a sua aplicação final. Sendo então um valor de rotações elevado, é necessário um sistema leve, fiável e com o mínimo de perdas.

Procedeu-se então ao estudo de soluções considerando custo e rapidez de integração, apresentando-se soluções como polias e correia, corrente e rodas dentadas, o acoplamento direto e engrenagens. A utilização de engrenagens foi colocada de parte pois iria requerer um sistema de refrigeração standalone para testes, complexidade acrescida e sairia mais custosa em termos de tempo e monetariamente. O acoplamento direto, sendo uma solução promissora em voltagens superiores, traria o constrangimento de que o motor BLDC não conseguiria elevar as rotações da turbina do compressor para níveis de maior rendimento.

Entre o sistema de polias e correia e a alternativa de corrente e rodas dentadas, tomou-se a decisão pelo primeiro, já que o segundo necessitaria da lubrificação nas rodas dentadas e manutenção regular. Na Figura 40, apresenta-se o sistema de polias considerado, com a relação de 1:3, feito em alumínio e com uma correia dentada HTD, *High Torque Drive*, para evitar escorregamento.



Figura 40 - Sistema de polias e correia para transmissão de potência 20T5-60T5-400mm

Assim que todos os componentes ficaram disponíveis, procedeu-se então à montagem do sistema de sobrealimentação elétrica em suporte de bancada, Figura 41. Novos testes foram realizados com o intuito de se verificar diferenças com a adição de carga mecânica no veio do motor BLDC, os mesmos estão espelhados no Anexo C.

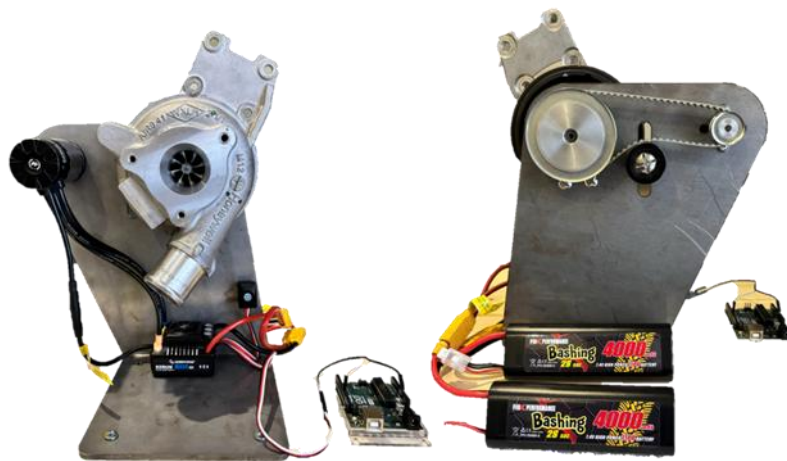


Figura 41 - Montagem do sistema de sobrealimentação elétrica

## 4. Resultados e Discussão

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema de sobrealimentação elétrica baseado no motor BLDC, acoplado a um compressor centrífugo e controlado por um módulo Arduino. Ao longo da investigação, foram abordados os princípios teóricos dos sistemas de sobrealimentação, as características dos motores BLDC, estratégias de controlo e algumas das vantagens da sua implementação.

A análise bibliográfica e o desenvolvimento de um conceito, permitiram demonstrar a viabilidade técnica desta abordagem, destacando benefícios como a redução do *turbo lag* e um maior controlo sobre a pressão de sobrealimentação. Foram também definidos os critérios para seleção de componentes, contudo, a fase experimental não foi desprovida de constrangimentos técnicos. Na Figura 42 podemos verificar os danos provocados na tentativa de remover a turbina de admissão (B) para depois poder maquinar e remover a turbina do lado de escape (A) e adaptá-lo para o acoplamento com a polia.

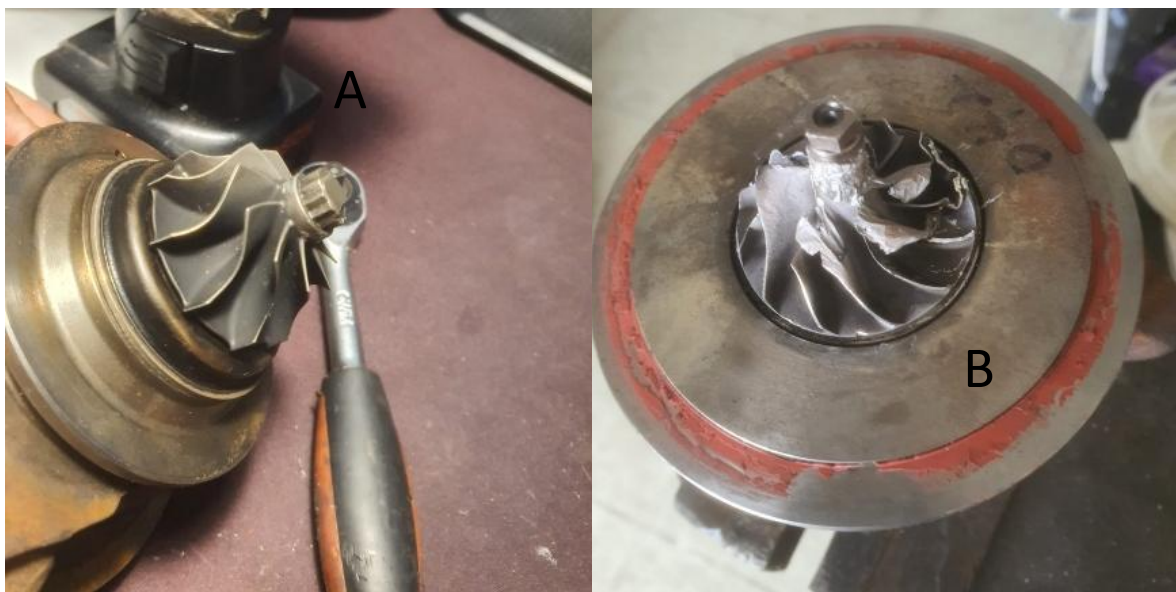


Figura 42 – Turbina de escape (A) e de admissão (B) do turbocompressor IHI VB20

Apesar destas limitações, o trabalho prosseguiu com a integração elétrica e eletrónica do sistema de controlo do motor BLDC. É possível analisar nos Anexos a programação efetuada e os resultados obtidos durante testes em vazio. Estes testes permitiram confirmar a viabilidade e criar a plataforma onde foram realizados os testes com o sistema acoplado.

Com um novo turbo cedido, procedeu-se com a execução das experiências propostas e foi possível concluir o objetivo da presente tese. Para o efeito todos os componentes ilustrados previamente foram maquinados, cortados e adquiridos para no final, serem montados num suporte para demonstração do sistema de sobrealimentação elétrica. Testes iniciais demonstraram a sua viabilidade ao se verificar a rotação da turbina e, ao se elevar a velocidade, verificou-se que o presente sistema é capaz de atingir outros patamares em desenvolvimentos futuros.

Dados iniciais apresentam um ligeiro aumento no consumo elétrico de 20% com um decréscimo na velocidade de 45%. Isto deve-se primariamente ao acoplamento mecânico e a ausência de lubrificação apresentarem uma carga para o motor. Com 17% de aceleração verifica-se um consumo de 56 W, comparativamente em vazio a 100% de aceleração o mesmo era de 73 W. Novos testes estão planeados com a adição de um sistema de lubrificação para permitir atingir velocidades mais elevadas.

Através da ligação entre o Arduino e o ESC, pelo canal de comunicação, é possível o controlo direto da velocidade do motor BLDC utilizando linguagem servo, considerando a modulação PWM que é escrita em  $\mu\text{s}$  no Arduino. Através dos resultados obtidos nos testes confirmamos que um incremento de 10  $\mu\text{s}$  no ESC, produz uma variação no “acelerador” do motor BLDC correspondente a 2%.

O controlo preciso, considerando então a variação à unidade percentual de “aceleração”, poderá ser realizada utilizando incrementos de 5  $\mu\text{s}$ . Também é possível inverter a metodologia de controlo, ao invés de input manual, por uma lógica com base em sensores, equações e integração de sistemas, através dos quais é calculada a rotação necessária e traduzida então para um valor de PWM em múltiplos de 5 de  $\mu\text{s}$ .

O trabalho realizado fornece uma base promissora para futuras implementações. A arquitetura proposta e as matrizes comparativas desenvolvidas constituem um guia prático

para investigadores e engenheiros interessados na integração de sistemas de sobrealimentação elétrica em aplicações automóbéis. Embora a execução prática se tenha confrontado com desafios e imprevistos, foi possível concluir que a sobrealimentação elétrica é uma solução que comporta uma solução interessante para desenvolvimentos futuros na otimização de motores de combustão interna, com potencial para reduzir emissões e melhorar o rendimento energético em qualquer veículo.

O sistema desenvolvido leva em consideração a sua aplicação futura num veículo próprio. A experiência deste desenvolvimento aumentou a curiosidade sobre o tema e a continuidade de testes e integração possível com as presentes considerações. Outras indústrias, além da automóvel, têm aplicabilidade para este tipo de soluções. A indústria aeronáutica, turbinas hidroelétricas mais pequenas, entre outras aplicações, poderão também ser visadas com sistemas adequados e dimensionados para o efeito. Por fim, é também considerada a possibilidade didática com a realização de experiências, permitindo a demonstração de conceitos mecânicos, eletrónicos e de programação ao utilizar e beneficiar da modularidade da plataforma criada.

## Referências Documentais

- [1] <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2024/04/12/euro-7-council-adopts-new-rules-on-emission-limits-for-cars-vans-and-trucks/>
- [2] <https://www.acea.auto/publication/report-vehicles-on-european-roads-2025/>
- [3] <https://www.acea.auto/news/europe-still-not-up-to-par-on-ev-purchase-and-tax-schemes-new-publication-confirms-disparities/>
- [4] [new car registrations: -0.1% in august 2025 year-to-date; battery-electric 15.8% market share - acea - european automobile manufacturers' association](https://www.acea.auto/news/new-car-registrations:-0.1%in-august-2025-year-to-date;battery-electric-15.8%market-share-acea-european-automobile-manufacturers-association)
- [5] <https://gdauto.pt/2025/05/07/comparacao-detalhada-veiculos-eletricos-vs-veiculos-hibridos/>
- [6] <https://www.seg-automotive.com/48v/mild-hybrid-technology/0>
- [7] Ruzimov, sanjarbek & mavlonov, jamshid & mukhitdinov, akmal. (2022). Analysis of the powertrain component size of electrified vehicles commercially available on the market. Communications - scientific letters of the university of zilina. 24. B74-b86. 10.26552/com.c.2022.1.b74-b86.
- [8] <https://www.designnews.com/automotive-engineering/2022-mercedes-amg-c-43-debuts-the-world-s-first-e-turbo>
- [9] <https://www.acap.pt/index.php?route=base/pt/noticia/831>
- [10] <https://www.acap.pt/index.php?route=base/pt/noticia/818/parque-automovel-portugues-envelhece-cada-vez-mais>
- [11] <https://www.aeristech.co.uk/casestudy-48v-esupercharger>
- [12] Kai shen, zishun xu, zhongpan zhu, linsen yang: combined effects of electric *supercharger* and *lp-egr* on performance of turbocharged engine, energy, volume 244, part b, 2022, 123176, issn 0360-5442
- [13] <https://caetanoretail.pt/blog/reprogramacao-centralinas/>
- [14] <https://www.imt-ip.pt/quem-somos/missao-e-valores/>
- [15] W. Lee, e. Schubert, y. Li, s. Li, d. Bobba and b. Sarlioglu, "overview of electric turbocharger and *supercharger* for downsized internal combustion engines," in *ieee transactions on transportation electrification*, vol. 3, no. 1, pp. 36-47, march 2017, doi: 10.1109/tte.2016.2620172
- [16] <https://www.greencarcongress.com/2019/04/20190411-audi.html>
- [17] Yingguang liu, yanping song, ling leng, lei shi, kangyao deng, effects of control strategies of the electric *supercharger* on transient processes of a turbocharged diesel engine, energy, volume 307, 2024, 132427, issn 0360-5442

- [18] A. Jain, t. Nueesch, c. Naegele, p. M. Lassus and c. H. Onder, "modeling and control of a *hybrid* electric vehicle with an electrically assisted turbocharger," in *iee* transactions on vehicular technology, vol. 65, no. 6, pp. 4344-4358, june 2016, doi: 10.1109/tvt.2016.2533585.
- [19] Shang, ming & zhang, zhendong & yin, congbo & li, kai. (2024). The development of the fuel saving control strategy for 48 v p0 system: design and experimental investigation. *Advances in mechanical engineering* 16.10.1177/16878132231222067
- [20] <https://superchargersonline.com/2002/01/08/the-centrifugal-supercharger-explained/?srsltid=afmbooql3u5rkfeh0mjv1jzclil2mso3tvfxxwu8v9lcwjomg0x8zfuy>
- [21] <https://x-engineer.org/mechanical-centrifugal-supercharger/>
- [22] <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/fluid-dynamics/centrifugal-pumps/eulers-turbomachine-equations/>
- [23] <https://web.mit.edu/16.unified/www/fall/thermodynamics/notes/node91.html>
- [24] <https://stateofspeed.com/2021/07/27/what-is-a-supercharger/>
- [25] D. Mohanraj et al., "a review of bldc motor: state of art, advanced control techniques, and applications," in *iee* access, vol. 10, pp. 54833-54869, 2022, doi: 10.1109/access.2022.3175011.
- [26] P. Yedamale - brushless dc (bldc) motor fundamentals. Microchip technology inc., an885
- [27] Singh, surya & singh, krishna & verma, k & singh, jaswant & tiwari, naveen. (2021). A review on control of a brushless dc motor drive.
- [28] M. R. Hazari, e. Jahan, m. E. Siraj, m. T. I. Khan and a. M. Saleque, "design of a brushless dc (bldc) motor controller," 2014 international conference on electrical engineering and information & communication technology, dhaka, bangladesh, 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/iceeict.2014.6919048.
- [29] Diapositivos disciplina de máquinas eléctricas 1, curso de engenharia eletrotécnica – sistemas de energia do instituto superior de engenharia do porto. J. Beleza
- [30] Por arduino.cc - <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>, cc by-sa 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=84499752>
- [31] Por harvie - made this one especially for wikimedia on debian linux, gpl, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3880661>
- [32] Reddy, m. & pranav, k. & rahman, wasiqur & kumar, b. & jain, alok & a b, gurulakshmi. (2025). Speed control of bldc motor using pwm and arduino uno. *E3s web of conferences*. Doi: 619.0.1051/e3sconf/202561902007
- [33] Hu b, turner jw, akehurst s, brace c, copeland c. Observations on and potential trends for mechanically supercharging a downsized passenger car engine: a review. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part d: journal of automobile engineering*. 2016;231(4):435-456. Doi:10.1177/0954407016636971

- [34] Rothgang, stefan & pachmann, michael & nigrin, sven & scheven, markus. (2016). The electric *supercharger* — challenge, conception and implementation. Auto tech review. 5. 26-31. 10.1365/s40112-016-1102-2
- [35] [youtube.com/watch?v=6h5vtu5\\_sf4](https://www.youtube.com/watch?v=6h5vtu5_sf4)
- [36] <https://www.hobbywing.com/en/rc-systems/rc-cars-power-system/ezrun>
- [37] Zureks - own work, cc by-sa 3.0,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1835361>

# Anexo A. Planeamento e resultado de Testes

Neste anexo são descritos alguns dos pormenores do desenvolvimento e testes planeados para o sistema de sobrealimentação elétrico, controlado por Arduino. [30]

## Teste I - Planeamento

Sem o sistema acoplado, testar o controlo da velocidade do motor BLDC através de sinais PWM enviados pelo Arduino.

Medições:

- Tensão e corrente absorvida em vazio pelo ESC e o motor BLDC por via de datalog
- Rotações do veio

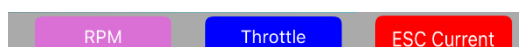
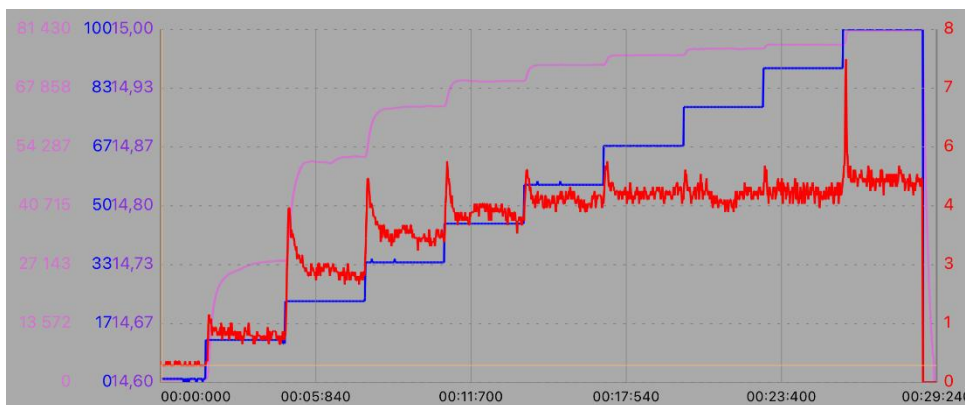
Metodologia:

- Amostragem em intervalos de 10% RPM
- Arranque direto
- Registo por meio de visualização na aplicação HW Link V2 com valores instantâneos
- Registo em datalog

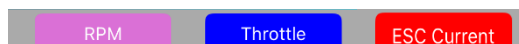
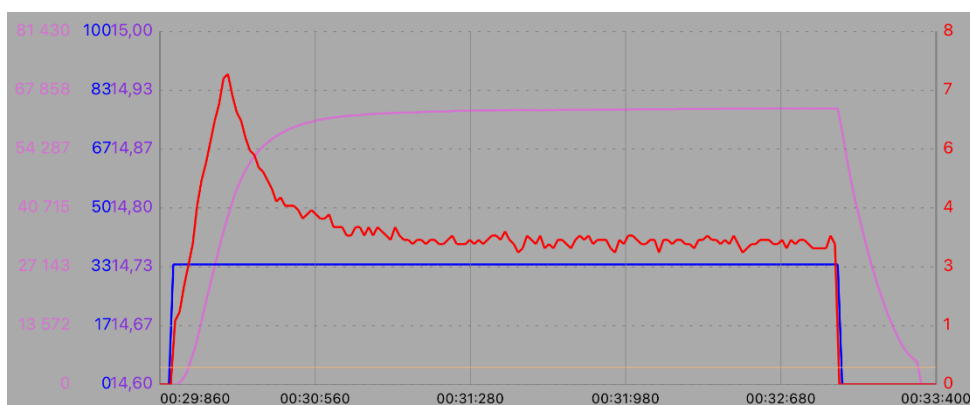
Objetivos:

- Testar e comprovar a correta comunicação entre o Arduino e o ESC
- Testar e comprovar a correta programação para os valores de velocidade pretendidos
- Com base nos resultados, desenvolver a programação automatizada de testes finais
- Determinar menor tempo entre 0 RPM e 30.000 RPM

## Teste I - Resultados

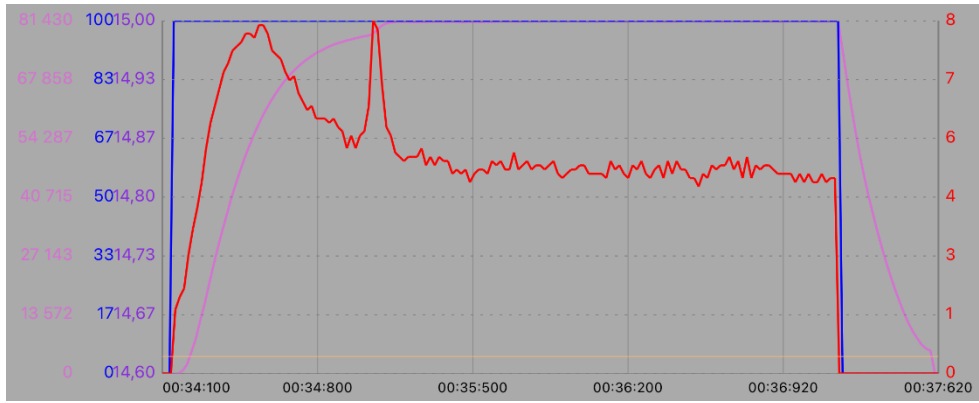


PWM	$I_{min}$ (A)	$I_{max}$ (A)	% Acelerador	RPM	%
1550	0,4	0,5	1	620	10%
1600	0,9	1,6	12	27950	20%
1650	2,3	4,1	23	50840	30%
1700	3,1	4,8	34	63600	40%
1750	3,5	5,2	45	69320	50%
1800	4	5	56	73220	60%
1850	4,4	5,2	67	75400	70%
1900	4	5	78	77020	80%
1950	4,3	5,1	89	77860	90%
2000	4,4	7,6	100	81070	100%



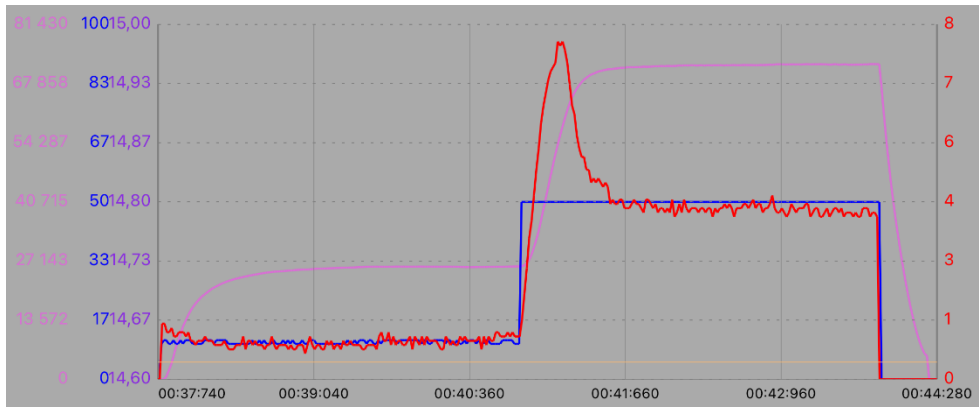
### Teste arranque direto 33% (vazio)

$I_{max}$ (A)	7,1
t (s)	0,7s



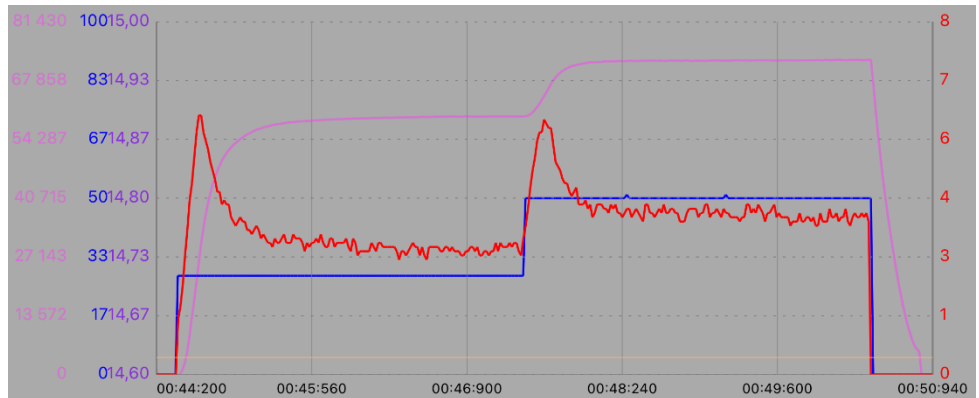
**Teste arranque direto 100% (vazio)**

$I_{max}$ (A)	8
t (s)	0,9s



**Teste 10~50% (vazio)**

$I_{max}$ (A)	7,9
t (s)	0,7





**Teste 30~50% (vazio)**

Imax	6
t (s)	0,54

## Teste II

Com o acoplamento do motor BLDC ao compressor centrífugo, criando assim um sistema de sobrealimentação elétrico, é objetivo testar as condições de funcionamento iniciais. Para isso, e no sentido de obter o máximo de dados possível, a parte II compreende-se uma fase intermédia de testes onde se verificarão potenciais estrangimentos e oportunidades de melhoria.

Medições:

- Tensão, corrente absorvida, RPM e temperaturas por meio da app HW Link V2 conectada por Bluetooth ao ESC

Metodologia:

- Amostragem em intervalos de 6% RPM
- Registo por meio de visualização da App com valores instantâneos
- Registo em formatos digitais onde aplicável

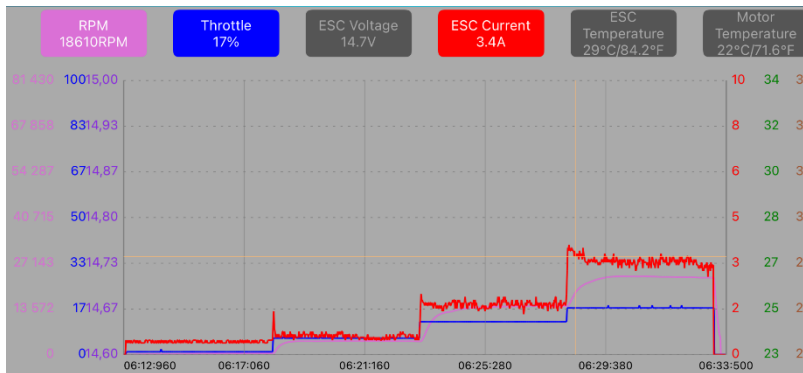
Objetivos:

- Verificar, a velocidades mínimas, o funcionamento do sistema pela primeira vez (“Hello World”)
- Verificar se existe aumento de temperatura nos elementos mecânicos que possa levar a um desgaste acentuado dos componentes
- Verificar o aumento de consumo de corrente por parte do ESC e motor BLDC

# Teste II – Resultados

## Teste acoplado

PWM	RPM	% Acelerador	I (A)
1550	280	1	0,5
1575	4040	6	1,1
1600	14400	12	2,1
1625	23090	17	3,8



## Anexo B. Programação Arduino para Teste I

Neste anexo está incluída a programação base para controlo por Arduino via potenciómetro. [11]

Código:

```
#include <Servo.h>

// -----

#define MIN_PULSE_LENGTH 1000 // Brake pulse length in µs
#define ZERO_PULSE_LENGTH 1500 // Zero pulse length in µs
#define BASE_PULSE_LENGTH 1595 // 1% accelerator pulse length in µs
#define MAX_PULSE_LENGTH 2000 // Maximum pulse length in µs

// -----

Servo motA;

char data;

// -----

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    motA.attach(9, MIN_PULSE_LENGTH, MAX_PULSE_LENGTH);
    displayInstructions();
}

void loop() {
    if (Serial.available()) {
        data = Serial.read();

        switch (data) {
            // 0
            case 48 : Serial.println("Sending Min throttle");
                    motA.writeMicroseconds(MIN_PULSE_LENGTH);
                    break;
            // 1
            case 49 : Serial.println("Sending zero throttle");
```

```
        motA.writeMicroseconds(ZERO_PULSE_LENGTH);
break;

// 2
case 50 : Serial.println("Sending maximum throttle");
        motA.writeMicroseconds(MAX_PULSE_LENGTH);
break;

// 3
case 51 : Serial.print("Running test A in 3");
        delay(1000);
        Serial.print(" 2");
        delay(1000);
        Serial.println(" 1...");
        delay(1000);
        testA();
// 4
case 52 : Serial.print("Running test B in 3");
        delay(1000);
        Serial.print(" 2");
        delay(1000);
        Serial.println(" 1...");
        delay(1000);
        testB();
// 5
case 53 : Serial.print("Running test C in 3");
        delay(1000);
        Serial.print(" 2");
        delay(1000);
        Serial.println(" 1...");
        delay(1000);
        testC();
```

```

// 6
case 54 : Serial.print("Running test D in 3");
        delay(1000);
        Serial.print(" 2");
        delay(1000);
        Serial.println(" 1...");
        delay(1000);
        testD();

// 7
case 55 : Serial.print("Running test E in 3");
        delay(1000);
        Serial.print(" 2");
        delay(1000);
        Serial.println(" 1...");
        delay(1000);
        testE();
        break;
    }
}
}

void testA() {
    for (int i = ZERO_PULSE_LENGTH; i <= MAX_PULSE_LENGTH; i += 50) {
        Serial.print("Pulse length = ");
        Serial.println(i);
        motA.writeMicroseconds(i);
        delay(3000);
    }
    Serial.println("STOP");
    motA.writeMicroseconds(ZERO_PULSE_LENGTH);
}

```

```
void testB() {  
    motA.writeMicroseconds(ZERO_PULSE_LENGTH);  
    delay(3000);  
    motA.writeMicroseconds(1700);  
    delay(3000);  
    motA.writeMicroseconds(ZERO_PULSE_LENGTH);  
    Serial.println("STOP");  
    motA.writeMicroseconds(ZERO_PULSE_LENGTH);  
}
```

```
void testC() {  
    motA.writeMicroseconds(ZERO_PULSE_LENGTH);  
    delay(3000);  
    motA.writeMicroseconds(MAX_PULSE_LENGTH);  
    delay(3000);  
    Serial.println("STOP");  
    motA.writeMicroseconds(ZERO_PULSE_LENGTH);  
}
```

```
void testD() {  
    motA.writeMicroseconds(BASE_PULSE_LENGTH);  
    delay(3000);  
    motA.writeMicroseconds(1775);  
    delay(3000);  
    Serial.println("STOP");  
    motA.writeMicroseconds(ZERO_PULSE_LENGTH);  
}
```

```
void testE() {  
    motA.writeMicroseconds(1675);  
    delay(3000);  
    motA.writeMicroseconds(MAX_PULSE_LENGTH);  
    delay(3000);  
}
```

```
Serial.println("STOP");
motA.writeMicroseconds(ZERO_PULSE_LENGTH);
}
void displayInstructions() {

    Serial.println("READY - PLEASE SEND INSTRUCTIONS AS FOLLOWING :");
    Serial.println("\t0 : Send min throttle");
    Serial.println("\t1 : Send zero throttle");
    Serial.println("\t2 : Send max throttle\n");
    Serial.println("\t3 : Do test routine\n");
}
```

## Anexo C. Programação Arduino para Teste II

```
#include <Servo.h>
#define MIN_PULSE_LENGTH 1000 // Brake pulse length in µs
#define ZERO_PULSE_LENGTH 1500 // Zero pulse length in µs
#define BASE_PULSE_LENGTH 1595 // 1% accelerator pulse length in µs
#define MAX_PULSE_LENGTH 2000 // Maximum pulse length in µs
// -----

Servo motA;
char data;

// -----

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  motA.attach(9, MIN_PULSE_LENGTH, MAX_PULSE_LENGTH);
  displayInstructions();
}

void loop() {
  if (Serial.available()) {
    data = Serial.read();

    switch (data) {
      // 0
      case 48 : Serial.println("Sending Min throttle");
                motA.writeMicroseconds(MIN_PULSE_LENGTH);
                break;
      // 1
      case 49 : Serial.println("Sending zero throttle");
                motA.writeMicroseconds(ZERO_PULSE_LENGTH);
                break;

      // 2
      case 50 : Serial.println("Sending maximum throttle");
                motA.writeMicroseconds(MAX_PULSE_LENGTH);
                break;

      // 3
      case 51 : Serial.print("Running test A in 3");
                delay(1000);
                Serial.print(" 2");
                delay(1000);
                Serial.println(" 1...");
                delay(1000);
    }
  }
}
```

```

        testA();
    break;
}
}
}

void testA() {
    for (int i = 1550; i <= 1625; i += 25) {
        Serial.print("Pulse length = ");
        Serial.println(i);

        motA.writeMicroseconds(i);

        delay(5000);
    }

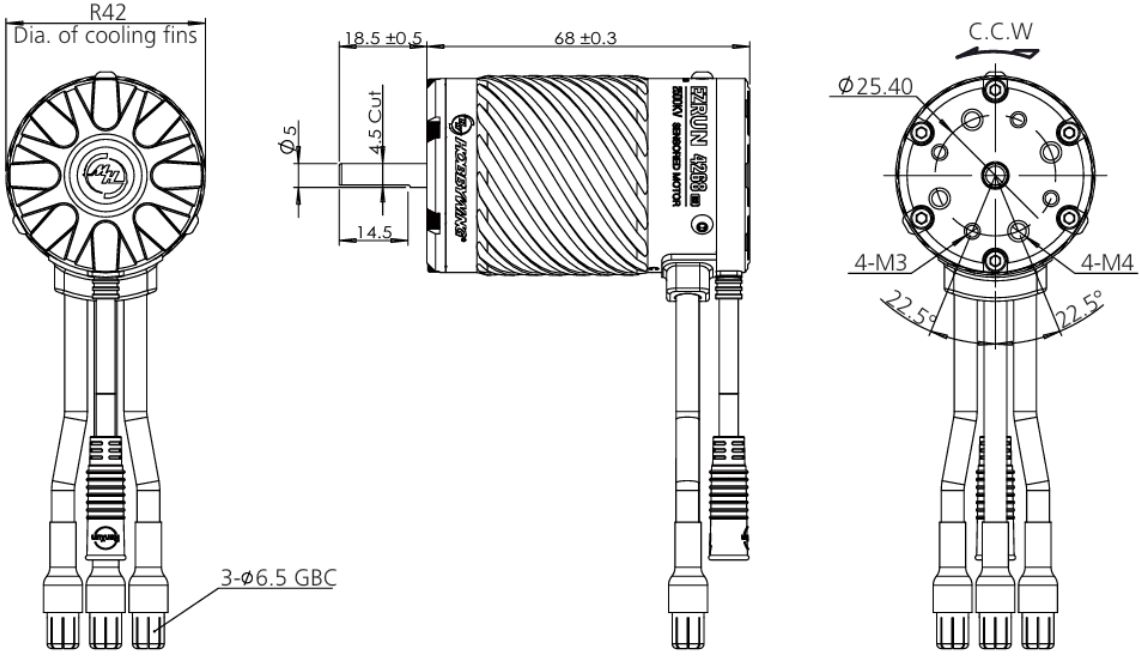
    Serial.println("STOP");
    motA.writeMicroseconds(ZERO_PULSE_LENGTH);
}

void displayInstructions() {

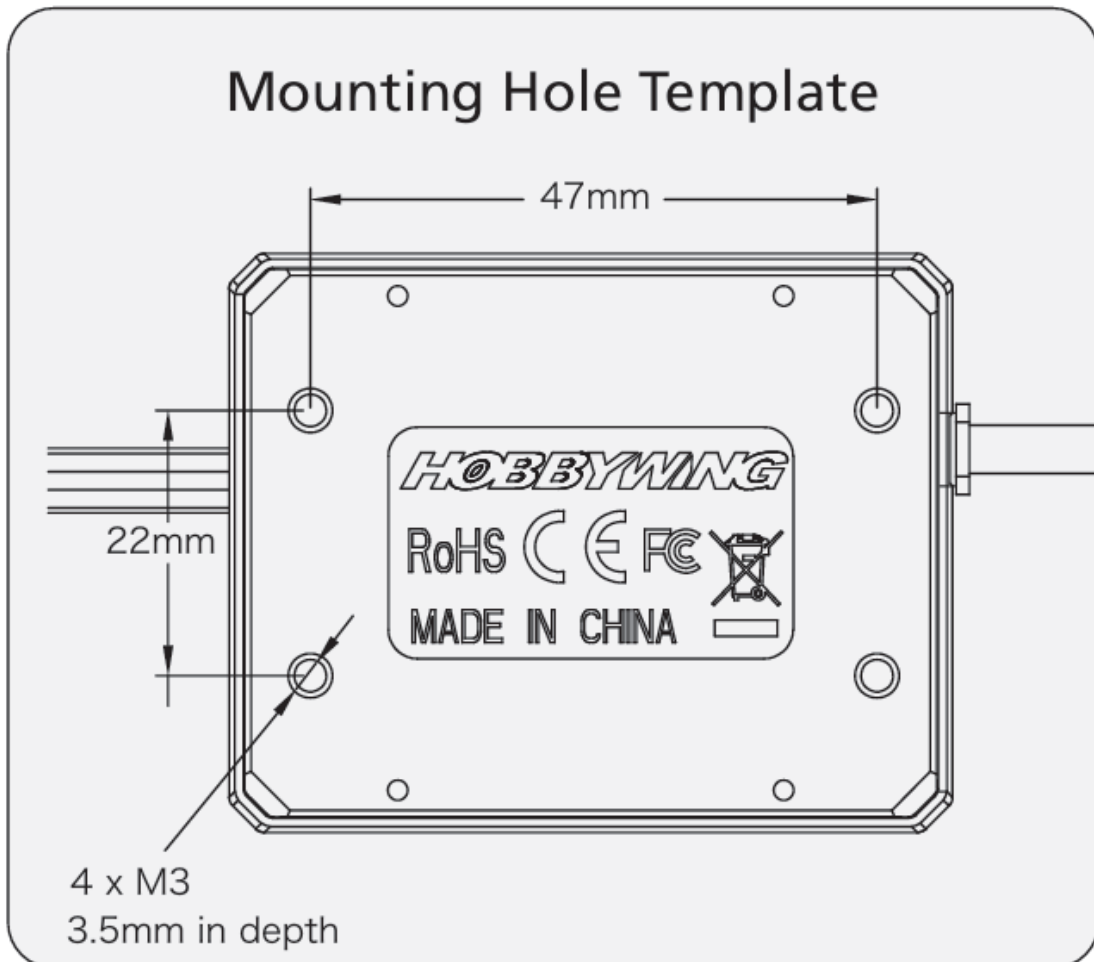
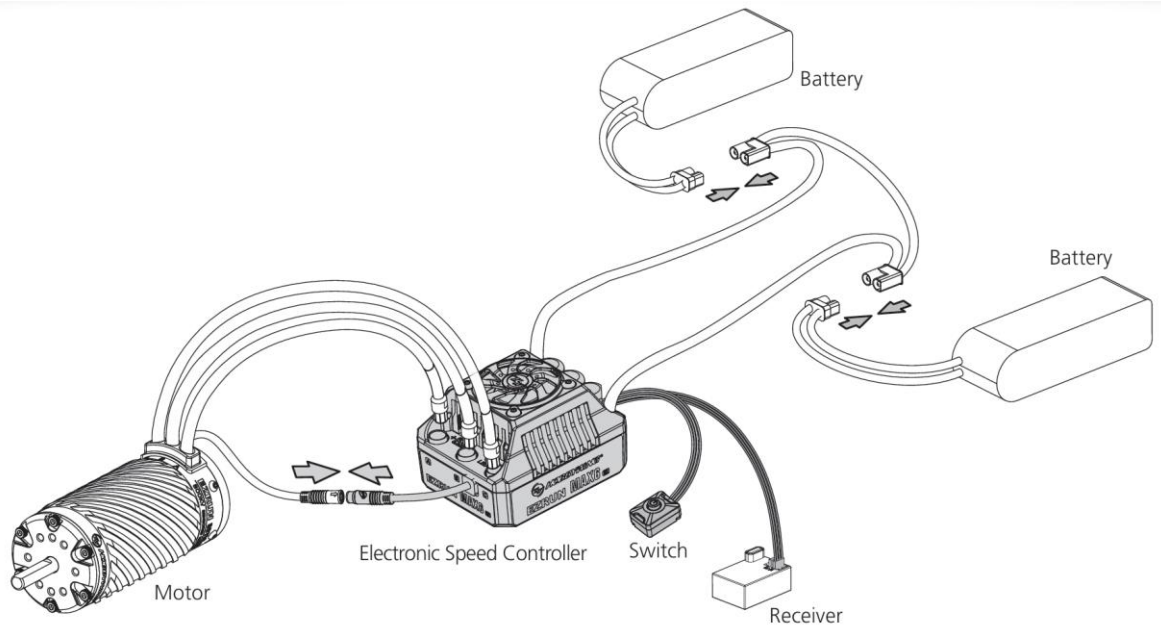
    Serial.println("READY - PLEASE SEND INSTRUCTIONS AS FOLLOWING :");
    Serial.println("\t0 : Send min throttle");
    Serial.println("\t1 : Send zero throttle");
    Serial.println("\t2 : Send max throttle\n");
    Serial.println("\t3 : Do test routine\n");
}
}

```

# Anexo D. Desenhos técnicos



**EZRUN 4268SD G2R**



EZRUN MAX8 G2S

## Histórico

- 31 de Outubro de 2007, Versão 1.0, <mailto:pfa@isep.ipp.pt>
- 2 de Novembro de 2007, Versão 1.0a, <mailto:pfa@isep.ipp.pt>
- 16 de Novembro de 2007, Versão 1.0b, <mailto:pfa@isep.ipp.pt>

§Id:MEEC-TEDI.dot v1.0b Date:16-11-2007§