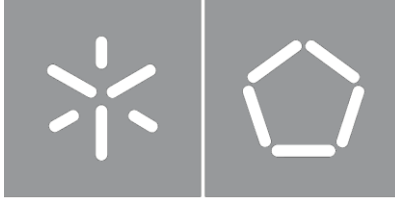




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Francisco José da Costa Machado

**Desenvolvimento dos Sistemas de Tração e
Controlo para uma Bicicleta Elétrica**



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Francisco José da Costa Machado

Desenvolvimento dos Sistemas de Tração e Controlo para uma Bicicleta Elétrica

Dissertação de Mestrado

Programa de Mestrado Integrado em Engenharia Eletrónica

Industrial e de Computadores

Eletrónica de Potência e Sistemas de Energia

Trabalho realizado sob orientação de

Professor Doutor Vítor Duarte Fernandes Monteiro

Professor Doutor João Luiz Afonso

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações

CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Aos meus pais.

Agradecimentos

A realização deste trabalho não teria sido possível sem o apoio de algumas pessoas, a quem pretendo endereçar os meus mais sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar, expresso um profundo agradecimento aos meus orientadores, Doutor João Luiz Afonso e Doutor Vítor Duarte Fernandes Monteiro, pelo incentivo, acompanhamento, disponibilidade e sentido crítico na orientação.

De seguida, expresso também um sincero agradecimento aos Investigadores do Grupo de Eletrónica de Potência e Energia, em especial ao José Cunha, Carlos Martins e Luís Barros, que de uma forma ou de outra me apoiaram em momentos críticos da realização desta dissertação.

Aos Amigos que a Universidade do Minho me trouxe, que me acompanharam ao longo dos últimos anos, por todos os momentos que passamos e memórias que jamais serão esquecidas.

À minha namorada, Catarina, por todo o apoio e momentos passados.

Por fim, e não menos importante, aos meus pais, Maria Filomena e José, pelo apoio incondicional e por acreditarem em mim em alturas que nem eu acreditava.

A todos, muito obrigado.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

A bicicleta elétrica surge no âmbito da mobilidade elétrica, e é um dos tipos de veículos elétricos cuja procura tem vindo a aumentar significativamente. Estas encontram-se em constante desenvolvimento e o seu mercado em constante crescimento. Isto acontece devido a todas as vantagens que as bicicletas elétricas apresentam em diversas áreas, tendo a sua adoção impactos positivos não só a nível ambiental, mas também na atividade física do utilizador. Estas apresentam ainda pequenas dimensões, contribuindo assim para o descongestionamento do trânsito e para facilitar o estacionamento. Um pouco por todas as partes do globo têm sido adotadas medidas no sentido de promover o uso deste tipo de veículo elétrico.

O estudo e desenvolvimento de soluções na área da mobilidade elétrica é uma das áreas em que o Grupo de Eletrónica de Potência e Energia (GEPE) da Universidade do Minho tem apostado. Nesse sentido, foi proposto o desenvolvimento dos sistemas de tração e controlo, com tecnologia própria, para serem aplicados numa bicicleta elétrica, e que consiste no tema desta Dissertação de Mestrado.

Para o desenvolvimento desta Dissertação foram estudados os vários componentes eletrónicos necessários para o funcionamento de uma bicicleta elétrica. Foram comparados os diferentes tipos de cada componente passíveis de serem aplicados numa bicicleta elétrica e analisadas as vantagens e desvantagens de cada tipo. Foi ainda realizado um estudo de mercado tendo em vista a aquisição de um motor e de uma bateria, sendo apresentados os componentes adquiridos e a bicicleta utilizada neste projeto.

A nível de simulações computacionais, foram feitos modelos de simulação do circuito de potência e do sistema de controlo que se pretendia implementar, permitindo nesta fase estudar o comportamento do sistema e validar o seu funcionamento.

Relativamente à implementação da bicicleta elétrica, é apresentado o circuito de potência utilizado. É apresentada também a plataforma digital de controlo utilizada, e os restantes componentes essenciais para o funcionamento controlado da bicicleta. É ainda apresentado o protótipo do controlador desenvolvido, que incorpora o circuito de potência e o circuito de controlo, e onde são ligados todos os restantes componentes. Por fim, são apresentados resultados experimentais do sistema desenvolvido, e ainda as conclusões retiradas com o desenvolvimento deste trabalho e as sugestões de trabalho futuro.

Palavras-Chave: Mobilidade Elétrica, Bicicleta Elétrica, Motor BLDC, Controlo de Velocidade.

Abstract

The electric bicycle appears within the scope of electric mobility and is one of the types of electric vehicles whose demand has been significantly increasing. These are in constant development and their market is constantly growing. This is due to all the advantages that electric bicycles have in several areas, with their adoption having positive impacts not only on the environment, but also on the user's physical activity. They are also small in size, thus helping to relieve traffic congestion and make parking easier. Measures have been taken all over the world to promote the use of this type of electric vehicle.

The study and development of solutions in the area of electric mobility is one of the areas in which the Group of Energy and Power Electronics (GEPE) of the Universidade do Minho has invested. In this sense, it was proposed the development of traction and control systems, with own technology, to be applied in an electric bicycle, and which is the theme of this Master's Thesis.

For the development of this Thesis, the various electronic components necessary for the operation of an electric bicycle were studied. The different types of each component that can be applied in an electric bicycle were compared and the advantages and disadvantages of each type were analyzed. A market study was also carried out with a view to the acquisition of a motor and a battery, with the components acquired and the bicycle used in this project being presented.

In terms of computer simulations, simulation models of the power circuit and the control system that were intended to be implemented were made, allowing this phase to study the behavior of the system and validate its operation.

Regarding the implementation of the electric bicycle, the power circuit used is presented. The digital control platform used is also presented, as well as the other essential components for the controlled operation of the bicycle. The prototype of the developed controller is also presented, which incorporates the power circuit and the control circuit, and where all other components are connected. Finally, experimental results of the developed system are presented, as well as the conclusions drawn with the development of this work and suggestions for future work.

Keywords: Electric Mobility, Electric Bicycle, E-bike, BLDC Motor, Speed Control.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	viii
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xiv
Acrónimos e Siglas.....	xv
Nomenclatura.....	xvi
Capítulo 1 Introdução.....	1
1.1 Bicicleta Elétrica.....	1
1.1.1 Evolução da Bicicleta Convencional para Elétrica.....	1
1.1.2 Importância das Bicicletas Elétricas no Âmbito da Mobilidade Elétrica.....	1
1.1.3 Breve História da Bicicleta Elétrica.....	2
1.1.4 O Mercado das Bicicletas Elétricas.....	5
1.2 Motivações.....	10
1.3 Objetivos.....	11
1.4 Organização e Estrutura da Dissertação.....	11
Capítulo 2 Bicicleta Elétrica.....	13
2.1 Introdução.....	13
2.2 Legislação sobre Bicicletas Elétricas.....	13
2.3 Componentes Necessários para uma Bicicleta Elétrica.....	14
2.3.1 Motor Elétrico.....	14
2.3.2 Controlador do Motor.....	18
2.3.3 Sensores.....	20
2.3.4 Bateria de Acumuladores.....	22
2.4 Conclusões.....	25
Capítulo 3 Sistemas de Eletrónica de Potência para Bicicletas Elétricas.....	27
3.1 Introdução.....	27
3.2 Análise de Soluções no Mercado.....	27
3.3 Seleção dos Componentes.....	28
3.4 Componentes Eletrónicos Escolhidos.....	29
3.5 Proposta de Solução a Implementar.....	31
3.6 Conclusões.....	32
Capítulo 4 Simulações Computacionais do Sistema Proposto.....	33
4.1 Introdução.....	33
4.2 Motor BLDC.....	33
4.2.1 Princípio de Funcionamento do Motor BLDC.....	34

4.2.2	Modelos Elétrico e Matemático do Motor BLDC	36
4.2.3	Conversores de Eletrónica de Potência para Motores BLDC.....	38
4.2.4	Técnicas de Modulação para Inversores Trifásicos	39
4.3	Travagem Regenerativa	41
4.4	Simulações do Sistema de Controlo do Motor BLDC.....	43
4.4.1	Circuito de Potência.....	43
4.4.2	Circuito de Controlo.....	44
4.4.3	Resultados de Simulação.....	44
4.5	Conclusões	53
Capítulo 5	Implementação do Sistema Proposto.....	55
5.1	Introdução.....	55
5.2	Circuito de Eletrónica de Potência do Controlador	55
5.3	Circuito de Controlo do Controlador	58
5.3.1	Plataforma Digital de Controlo.....	58
5.3.2	Sensores de Efeito <i>Hall</i>	59
5.3.3	Sensor de Velocidade	60
5.3.4	Potenciómetro	60
5.3.5	Sensor da Pedaleira.....	62
5.3.6	Manetes de Travão com Sensor de Travagem	63
5.3.7	Botão de Ajuda ao Arranque	64
5.3.8	Sensor de Tensão.....	65
5.3.9	Sensor de Temperatura	66
5.3.10	Reguladores de Tensão.....	67
5.4	Versão Final do Controlador Desenvolvido.....	68
5.5	Conclusões	76
Capítulo 6	Resultados Experimentais.....	77
6.1	Introdução.....	77
6.2	Ensaio do Motor em Vazio	77
6.3	Ensaio do Motor em Carga	83
6.4	Ensaio dos Componentes de Controlo.....	85
6.5	Conclusões	87
Capítulo 7	Conclusão.....	88
7.1	Conclusões	88
7.2	Sugestões de Trabalho Futuro	91
Lista de Referências.....		93
Anexo		96

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Bicicleta elétrica patenteada por <i>Ogden Bolton Jr.</i> (imagem retirada de [3]).	3
Figura 1.2 – Bicicleta elétrica patenteada por <i>Hosea W. Libbey</i> (imagem retirada de [4]).	3
Figura 1.3 – Bicicleta elétrica patenteada por <i>Gordon J. Scott</i> (imagem retirada de [5]).	4
Figura 1.4 – Bicicleta elétrica patenteada por <i>John Schnepf</i> (imagem retirada de [6]).	4
Figura 1.5 – Número de vendas de bicicletas elétricas a nível mundial em 2016, por região, em milhões de unidades (dados obtidos de [8]).	5
Figura 1.6 – Número de bicicletas elétricas vendidas na União Europeia entre 2006 e 2016, em milhares de unidades (dados obtidos de [10]).	6
Figura 1.7 – Distribuição percentual das vendas de bicicletas elétricas na União Europeia por país, em 2016 (dados obtidos de [10]).	7
Figura 1.8 – Bicicleta elétrica BEEQ <i>E800 Urban Motion</i> (fonte da imagem [21]).	9
Figura 1.9 – Estimativa de vendas anuais de bicicletas elétricas mundialmente (dados obtidos de [7]).	10
Figura 2.1 – Localização dos motores na bicicleta elétrica: (a) <i>Hub Motor</i> na roda da frente; (b) <i>Hub Motor</i> na roda de trás; (c) <i>Mid Drive Motor</i> .	15
Figura 2.2 – Exemplo de um controlador de um motor BLDC e caixa de suporte do mesmo.	19
Figura 2.3 – Princípio de funcionamento do efeito de <i>Hall</i> (imagem retirada de [32]): (a) Na ausência de campo magnético; (b) Na presença de campo magnético.	21
Figura 2.4 – Pilha de <i>Volta</i> (imagem retirada de [35]).	23
Figura 3.1 – Componentes incluídos no <i>kit</i> adquirido.	30
Figura 3.2 – Bicicleta fornecida para o projeto.	30
Figura 3.3 – Bicicleta com o novo <i>kit</i> instalado.	31
Figura 4.1 – Relação entre os sinais de saída dos sensores de efeito <i>Hall</i> e a força contra-eletromotriz, o binário e a corrente de fase em cada estado.	35
Figura 4.2 – Sentido da corrente nos enrolamentos em cada estado.	36
Figura 4.3 – Modelo elétrico do motor BLDC.	36
Figura 4.4 – Esquema de ligação entre o inversor trifásico e o modelo do motor BLDC.	39
Figura 4.5 – Estados de excitação dos enrolamentos do motor BLDC.	41
Figura 4.6 – Modos de operação do inversor durante o processo de travagem regenerativa para o estado 2 da sequência de comutação previamente apresentada.	42
Figura 4.7 – Circuito de potência implementado para simulações computacionais.	44
Figura 4.8 – Circuito de controlo implementado para simulações computacionais.	44
Figura 4.9 – Sinais de saída dos sensores de efeito <i>Hall</i> do motor BLDC.	45
Figura 4.10 – Sinais de comando dos MOSFET da parte superior do inversor.	46
Figura 4.11 – Sinais de comando dos MOSFET da parte inferior do inversor.	46
Figura 4.12 – Tensões compostas aplicadas ao motor BLDC em vazio.	46
Figura 4.13 – Correntes consumidas pelo motor BLDC em vazio.	47
Figura 4.14 – Velocidade do Motor BLDC.	47

Figura 4.15 – Diagrama de blocos do controlador PI.	48
Figura 4.16 – Velocidade de referência e velocidade atual do motor BLDC.	48
Figura 4.17 – Sinais de comando dos MOSFET da parte superior do inversor com controlo de velocidade.	49
Figura 4.18 – Sinais de comando dos MOSFET da parte inferior do inversor com controlo de velocidade.	49
Figura 4.19 – Tensões compostas aplicadas ao motor BLDC com controlo de velocidade.	50
Figura 4.20 – Correntes consumidas pelo motor BLDC com controlo de velocidade.	50
Figura 4.21 – Velocidade de referência e velocidade atual do motor BLDC com controlo de velocidade e uma carga de 1 Nm.	51
Figura 4.22 – Correntes consumidas pelo motor BLDC com controlo de velocidade e uma carga de 1 Nm.	52
Figura 4.23 – Velocidade de referência e velocidade atual do motor BLDC com controlo de velocidade e uma carga de 2 Nm.	52
Figura 4.24 – Correntes consumidas pelo motor BLDC com controlo de velocidade e uma carga de 2 Nm.	52
Figura 4.25 – Velocidade de referência e velocidade atual do motor BLDC com controlo de velocidade e uma carga de 3 Nm.	53
Figura 4.26 – Correntes consumidas pelo motor BLDC com controlo de velocidade e uma carga de 3 Nm.	53
Figura 5.1 – CI FNA41060: (a) Aspetto físico; (b) Diagrama de bloco interno [43].	56
Figura 5.2 – Desenho da PCB de teste do circuito de potência: (a) <i>Top view</i> , (b) <i>Bottom view</i>	56
Figura 5.3 – PCB de teste do circuito de potência impressa: (a) <i>Top view</i> , (b) <i>Bottom view</i>	57
Figura 5.4 – PCB de teste do circuito de potência soldada.	57
Figura 5.5 – DSP <i>TMS320F28027</i> da <i>Texas Instruments</i>	58
Figura 5.6 – Diagrama de blocos do DSP <i>TMS320F28027</i> [44].	59
Figura 5.7 – Motor utilizado já instalado na roda.	59
Figura 5.8 – Circuito de condicionamento de sinal para os sensores de efeito <i>Hall</i>	60
Figura 5.9 – Potenciômetro de ajuste da referência de velocidade.	61
Figura 5.10 – Circuito de condicionamento de sinal do potenciômetro.	61
Figura 5.11 – Sensor da pedaleira.	62
Figura 5.12 – Possíveis saídas do sensor da pedaleira: (a) e (b) Com a pedaleira parada; (c) Com a pedaleira a rodar para trás; (d) Com a pedaleira a rodar para a frente.	63
Figura 5.13 – Manetes de travão com sensor de travagem.	63
Figura 5.14 – Circuito de condicionamento de sinal dos travões.	64
Figura 5.15 – Acelerador convertido a botão de ajuda ao arranque.	64
Figura 5.16 – Circuito de condicionamento de sinal do divisor resistivo.	65
Figura 5.17 – Monitor de carga digital com voltímetro.	66
Figura 5.18 – Conversor TSR 0.6-48150WI da <i>Traco Power</i>	68
Figura 5.19 – Conversor <i>OKI-78SR-3.3/1.5-W36-C</i> da <i>Murata Power Solutions</i>	68
Figura 5.20 – Projeto desenvolvido no final da versão inicial.	69
Figura 5.21 – Controlador original e respetiva caixa de armazenamento.	69
Figura 5.22 – Desenho da versão final da PCB: (a) <i>Top view</i> , (b) <i>Bottom view</i>	70
Figura 5.23 – Versão final da PCB impressa: (a) <i>Top view</i> , (b) <i>Bottom view</i>	71
Figura 5.24 – Versão final da PCB soldada.	71

Figura 5.25 – Versão final da PCB.	72
Figura 5.26 – PCB com os conectores ligados.	72
Figura 5.27 – PCB pronta a ser instalada.....	72
Figura 5.28 – PCB no interior da caixa.....	73
Figura 5.29 – Caixa com a PCB instalada na bicicleta.	73
Figura 5.30 – Caixa de interface com o utilizador.	74
Figura 5.31 – Aspeto final da bicicleta elétrica (vista 1).	75
Figura 5.32 – Aspeto final da bicicleta elétrica (vista 2).	75
Figura 5.33 – Bancada de trabalho.....	76
Figura 6.1 – Sinais de saída dos sensores de efeito <i>Hall</i> (5 V/div.).	78
Figura 6.2 – Sinais de comando dos IGBT da parte superior do inversor (5 V/div.).	78
Figura 6.3 – Sinais de comando dos IGBT da parte inferior do inversor (5 V/div.).	79
Figura 6.4 – Resultados experimentais para uma velocidade de 8 km/h: (a) Imagem retirada do modo <i>debug</i> do <i>Code Composer Studio</i> ; (b) Tensões compostas <i>ab</i> , <i>bc</i> e <i>ca</i> (50 V/div.); (c) Tensão na bateria e tensão composta <i>ab</i> (20 V/div.); (d) Correntes nas fases <i>a</i> , <i>b</i> , e <i>c</i> (1 A/div.); (e) Corrente na bateria (500 mA/div.) e corrente da fase <i>a</i> (1 A/div.).	80
Figura 6.5 – Resultados experimentais para uma velocidade de 14 km/h: (a) Imagem retirada do modo <i>debug</i> do <i>Code Composer Studio</i> ; (b) Tensões compostas <i>ab</i> , <i>bc</i> e <i>ca</i> (50 V/div.); (c) Tensão na bateria e tensão composta <i>ab</i> (20 V/div.); (d) Correntes nas fases <i>a</i> , <i>b</i> , e <i>c</i> (1 A/div.); (e) Corrente na bateria (500 mA/div.) e corrente da fase <i>a</i> (1 A/div.).	81
Figura 6.6 – Resultados experimentais para uma velocidade de 20 km/h: (a) Imagem retirada do modo <i>debug</i> do <i>Code Composer Studio</i> ; (b) Tensões compostas <i>ab</i> , <i>bc</i> e <i>ca</i> (50 V/div.); (c) Tensão na bateria e tensão composta <i>ab</i> (20 V/div.); (d) Correntes nas fases <i>a</i> , <i>b</i> , e <i>c</i> (1 A/div.); (e) Corrente na bateria (500 mA/div.) e corrente da fase <i>a</i> (1 A/div.).	82
Figura 6.7 – Montagem realizada para obtenção de resultados em carga.	83
Figura 6.8 – Resultados experimentais para uma velocidade de 8 km/h: (a) Corrente na bateria e corrente na fase <i>a</i> (5 A/div.) para utilizador de 65 kg; (b) Corrente na bateria e corrente na fase <i>a</i> (5 A/div.) para utilizador de 95 kg.....	84
Figura 6.9 – Resultados experimentais para uma velocidade de 14 km/h: (a) Corrente na bateria (com acoplamento AC) e corrente na fase <i>a</i> (5 A/div.) para utilizador de 65 kg; (b) Corrente na bateria e corrente na fase <i>a</i> (5 A/div.) para utilizador de 95 kg.....	84
Figura 6.10 – Sinal de saída do sensor de velocidade (2 V/div.).	85
Figura 6.11 – Sinais de saída do sensor da pedaleira: (a) Quando a pedaleira está a rodar para a frente (2 V/div.); (b) Quando a pedaleira está a rodar para trás (2 V/div.).....	86
Figura 6.12 – Resposta da tensão composta <i>ab</i> (20 V/div.) ao acionamento dos travões (2 V/div.).....	86
Figura 6.13 – Resposta da tensão composta <i>ab</i> (20 V/div) à diminuição da tensão de alimentação (10 V/div).....	87

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Comparação do motor BLDC com o motor CC (com dados obtidos em [26]).	17
Tabela 2.2 – Comparação do motor BLDC com o motor de Indução (com dados obtidos em [26]).	18
Tabela 2.3 – Comparação entre diferentes tipos de baterias (com dados obtidos em [33]).	25
Tabela 3.1 – <i>Kits</i> de transformação encontrados mais interessantes.	29
Tabela 4.1 – Exemplo de sequência de comutação com modulação a 120 graus, para sensores com saída de 3 níveis ($-V_{cc}$, 0 e V_{cc}).	40
Tabela 4.2 – Exemplo de sequência de comutação com modulação a 120 graus, para sensores com saída de 2 níveis (0 e V_{cc}).	40

Acrónimos e Siglas

Acrónimo / Sigla	Significado
VE	Veículo Elétrico
BLDC	<i>Brushless Direct Current</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
PI	Proporcional Integral
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
MOSFET	<i>Metal-oxide Semiconductor Field-effect Transistor</i>
PAS	<i>Pedal Assist System</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
RPM	Rotações por Minuto
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>

Nomenclatura

L_a, L_b, L_c	Indutância por fase nos enrolamentos do motor BLDC	H
R_a, R_b, R_c	Resistência por fase nos enrolamentos do motor BLDC	Ω
E_a, E_b, E_c	Força contraeletromotriz por fase nos enrolamentos do motor BLDC	V
ω_r	Velocidade de rotação elétrica	rad/s
ω_m	Velocidade de rotação mecânica	rpm
V_a, V_b, V_c	Tensão por fase	V
I_a, I_b, I_c	Corrente por fase	A
V_{ab}	Tensão composta entre as fases a e b	V
V_{bc}	Tensão composta entre as fases b e c	V
V_{ca}	Tensão composta entre as fases c e a	V
T	Binário	Nm
R	Resistência	Ω
f_{sw}	Frequência de comutação	Hz

Capítulo 1

Introdução

1.1 Bicicleta Elétrica

A bicicleta elétrica surge no âmbito da mobilidade elétrica e é um dos tipos de veículos elétricos cuja procura tem vindo a aumentar. Isto acontece devido a todas as vantagens que as bicicletas elétricas apresentam em diversas áreas, tendo a sua adoção impactos positivos não só a nível ambiental, mas também na atividade física do utilizador. Estas apresentam ainda pequenas dimensões contribuindo assim para o des congestionamento do trânsito e para facilitar o estacionamento.

1.1.1 Evolução da Bicicleta Convencional para Elétrica

A bicicleta convencional é um veículo barato, versátil e ecológico. No entanto, apresenta-se essencialmente como um meio de transporte ideal para curtas distâncias pois para distâncias mais longas ou para trajetos com subidas representa muito esforço e cansaço para o utilizador. Deste modo, começaram a ser desenvolvidas bicicletas elétricas, que têm como vantagem comparativamente às bicicletas convencionais a possibilidade de percorrer maiores distâncias com um menor esforço e um maior nível de prazer.

As bicicletas elétricas vieram resolver o grande problema das bicicletas convencionais como meio de transporte, tornando possível um utilizador deslocar-se para o seu local de trabalho e chegar sem estar exausto, reduzindo também a necessidade de se higienizar, mas continuando a contribuir para a atividade física regular do utilizador. Concluindo, a evolução da bicicleta convencional para elétrica veio alargar a utilidade das bicicletas como meio de transporte ativo [1].

1.1.2 Importância das Bicicletas Elétricas no Âmbito da Mobilidade Elétrica

O setor dos transportes é um dos principais consumidores de combustíveis fósseis e conseqüentemente é um dos maiores contribuidores para a emissão de gases de efeito de estufa para a atmosfera. Estes

gases têm consequências ambientais e para a saúde humana muito severas, provocando por exemplo poluição do ar e alterações climáticas.

Medidas têm sido tomadas um pouco por todo o mundo com o objetivo de reduzir estas emissões neste setor de forma a minimizar os impactos daí resultantes. Para este objetivo ser atingido é necessária uma mudança no paradigma da mobilidade, ou seja, são necessárias alternativas aos veículos dependentes de combustíveis fósseis. É neste contexto que surge o âmbito da mobilidade elétrica, que é visto como a chave para a mudança e que consiste na introdução de VE que são movidos a energia elétrica e independentes dos combustíveis fósseis, cumprindo deste modo o objetivo não só de reduzir, como eliminar completamente a dependência dos veículos dos combustíveis fósseis [2].

De referir que este objetivo só pode ser integralmente cumprido se a energia utilizada nos veículos elétricos tiver origem em infraestruturas energéticas produtoras de energias renováveis, setor onde também se tem verificado grandes evoluções nos últimos anos.

Para além das vantagens apresentadas anteriormente comparativamente à bicicleta convencional, a bicicleta elétrica está também inserida no âmbito da mobilidade elétrica, trazendo consigo todas as vantagens do ponto de vista ambiental de um VE.

1.1.3 Breve História da Bicicleta Elétrica

Apesar de parecer um tema bastante atual, devido à relevância que lhes têm sido dadas como meio de transporte mais recentemente, as bicicletas elétricas já têm alguns anos de história e desenvolvimento. Devido aos avanços tecnológicos, principalmente na área da eletrónica de potência, estas têm-se tornado cada vez mais completas e eficientes ao longo do tempo.

As primeiras bicicletas elétricas patenteadas apareceram ainda no final do século XIX. De seguida serão brevemente apresentadas algumas delas. No ano de 1895, *Ogden Bolton Jr.* patenteou o seu modelo de bicicleta elétrica (Figura 1.1). Esta bicicleta continha um motor CC de seis polos no interior do cubo da roda traseira alimentado por uma bateria de 10 V [3].

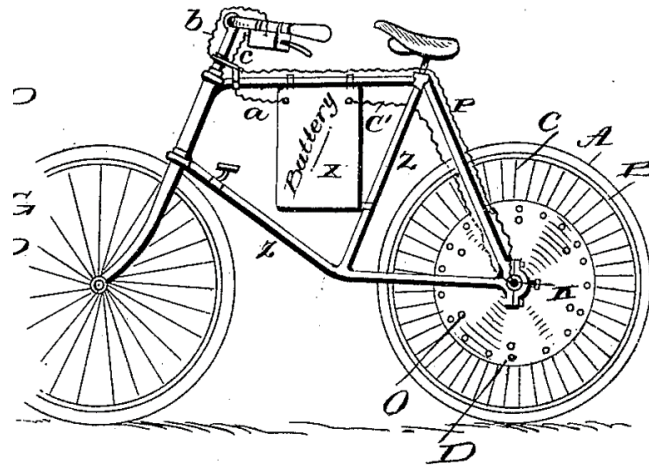


Figura 1.1 – Bicicleta elétrica patenteada por *Ogden Bolton Jr.* (imagem retirada de [3]).

Dois anos mais tarde, em 1897, *Hosea W. Libbey* apresentou o seu modelo, que era composto por dois motores agregados à pedaleira e alimentados por duas baterias (Figura 1.2) [4].

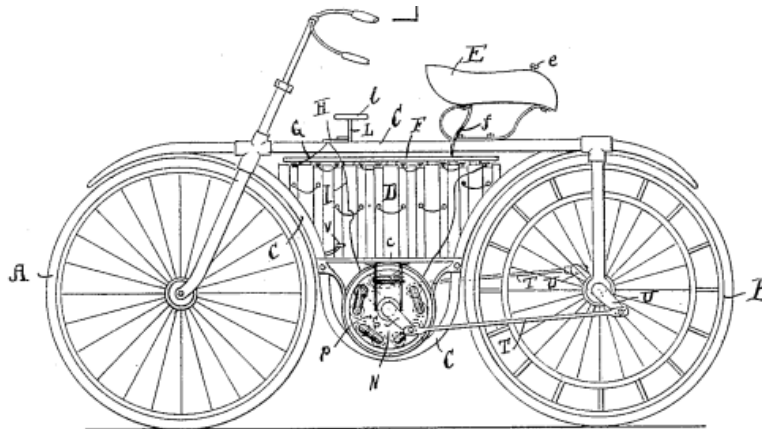


Figura 1.2 – Bicicleta elétrica patenteada por *Hosea W. Libbey* (imagem retirada de [4]).

No ano seguinte, em 1898, *Gordon J. Scott* patenteou um modelo de bicicleta elétrica peculiar e curioso. Neste modelo, o movimento da pedaleira acionava um gerador de energia e a energia elétrica produzida era utilizada para alimentar o motor localizado sobre a roda traseira (Figura 1.3), sendo a bateria substituída por este gerador como fornecedor de energia [5].

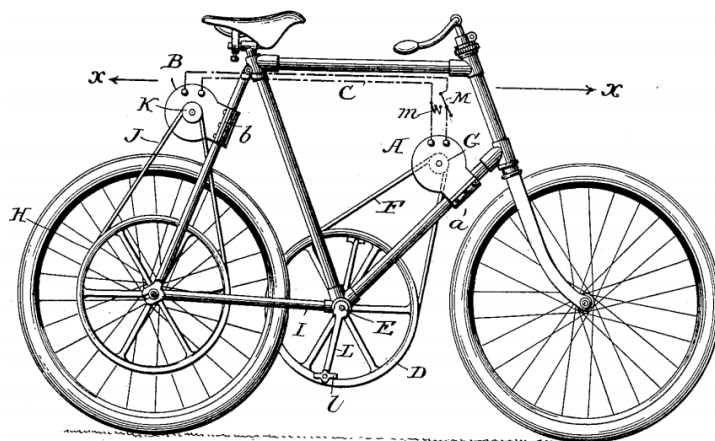


Figura 1.3 – Bicicleta elétrica patenteada por *Gordon J. Scott* (imagem retirada de [5]).

Mais tarde, em 1899, *John Schnepf* registou um novo modelo novamente distinto dos anteriores. Neste modelo, o motor estava situado por cima da roda traseira, e era a fricção e o atrito do motor com a roda que proporcionava o movimento, conforme ilustrado na Figura 1.4 [6].

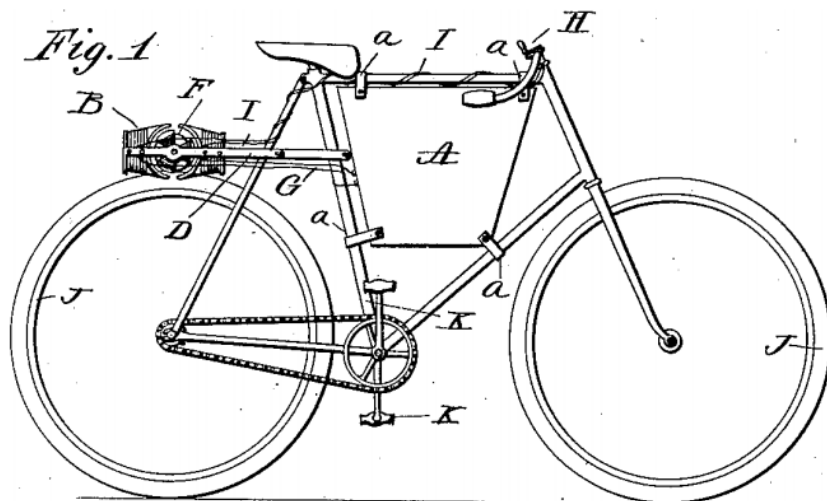


Figura 1.4 – Bicicleta elétrica patenteada por *John Schnepf* (imagem retirada de [6]).

Durante o século XX continuaram a surgir diferentes tipos de bicicletas elétricas com diferentes configurações, no entanto, as limitações tecnológicas principalmente nas áreas de eletrónica de potência e de armazenamento de energia limitaram também o alcance de um resultado realmente satisfatório. Apenas na década de 90 do século XX, com a expansão tecnológica das áreas referidas se deu também a expansão do mercado das bicicletas elétricas, com algumas marcas, principalmente de origem chinesa e japonesa, a apostarem neste mercado.

Mais recentemente, com a verdadeira explosão tecnológica atual, praticamente todas as marcas de bicicletas e até algumas marcas automóveis já lançaram os seus próprios modelos de bicicletas elétricas para o mercado [7]. Atualmente estas são utilizadas mais para fins de lazer, mas há o sentimento que

com o nível tecnológico atual é possível desenvolver soluções de mobilidade para colocar a bicicleta elétrica como um dos principais meios de transporte da sociedade e tirar partido de todas as vantagens que daí advêm.

1.1.4 O Mercado das Bicicletas Elétricas

O mercado das bicicletas elétricas encontra-se em constante expansão, tendo-se verificado um crescimento no número de vendas nos últimos anos a nível global. Na Figura 1.5, pode ser visto o número de vendas de bicicletas elétricas a nível mundial em 2016, por região [8].

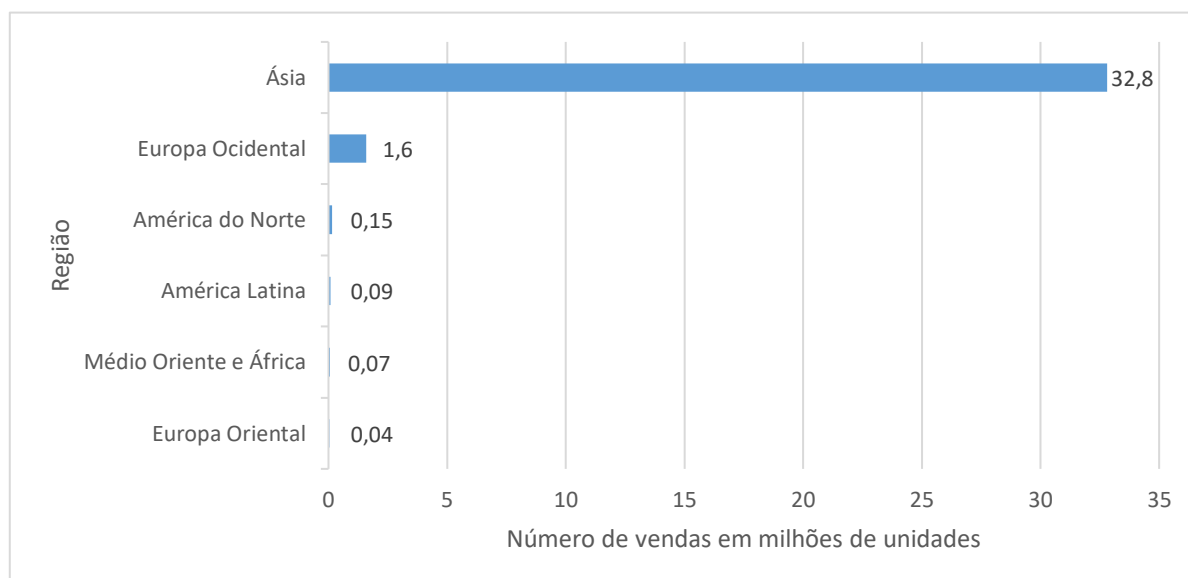


Figura 1.5 – Número de vendas de bicicletas elétricas a nível mundial em 2016, por região, em milhões de unidades (dados obtidos de [8]).

Pela análise do gráfico da Figura 1.5, verifica-se que, à exceção da Ásia e da Europa Ocidental, todas as restantes regiões do globo apresentam ainda índices de compra de bicicletas elétricas muito baixos. Estas são as regiões com o maior caminho a percorrer no que diz respeito à utilização de bicicletas elétricas e isto pode dever-se a diversos fatores, como por exemplo a maioria dos países destas regiões se encontrarem ainda em desenvolvimento ou existir falta de condições e de iniciativas governamentais de apoio à compra de bicicletas elétricas ou incapacidade económica para investir num veículo deste tipo. Estes números baixos de vendas são preocupantes pois, à semelhança do que acontecia na China, muitas vezes a solução encontrada nestes países são motociclos com motor a gasolina.

Continuando a análise do gráfico da Figura 1.5, facilmente se verifica a diferença abismal do número de vendas na Ásia comparativamente ao resto do Mundo. Esta diferença deve-se essencialmente à influência da China, que tem sido o líder do mercado das bicicletas elétricas a nível mundial nos últimos anos,

tanto a nível de vendas como produção e exportação. Na China, as vendas dispararam de 300 mil unidades vendidas em 2000 para quase 33 milhões em 2016 [8].

Este elevado número de vendas na China deve-se principalmente aos esforços e incentivos governamentais chineses de tornar a bicicleta elétrica o principal meio de transporte urbano do país e limpar das suas ruas os motociclos com motor a gasolina que, como já foi referido, trazem problemas para a saúde humana e para o meio ambiente. Os resultados começaram a ser alcançados em 2005, quando o número de vendas de bicicletas elétricas ultrapassou o número de vendas de motociclos com motor a gasolina [9].

Por fim, analisando agora a Europa ocidental, mais propriamente a União Europeia, verificou-se a venda de cerca de 1,6 milhões de unidades no ano de 2016. Estes números já vinham com tendência de subida, como se pode ver na Figura 1.6 [10].

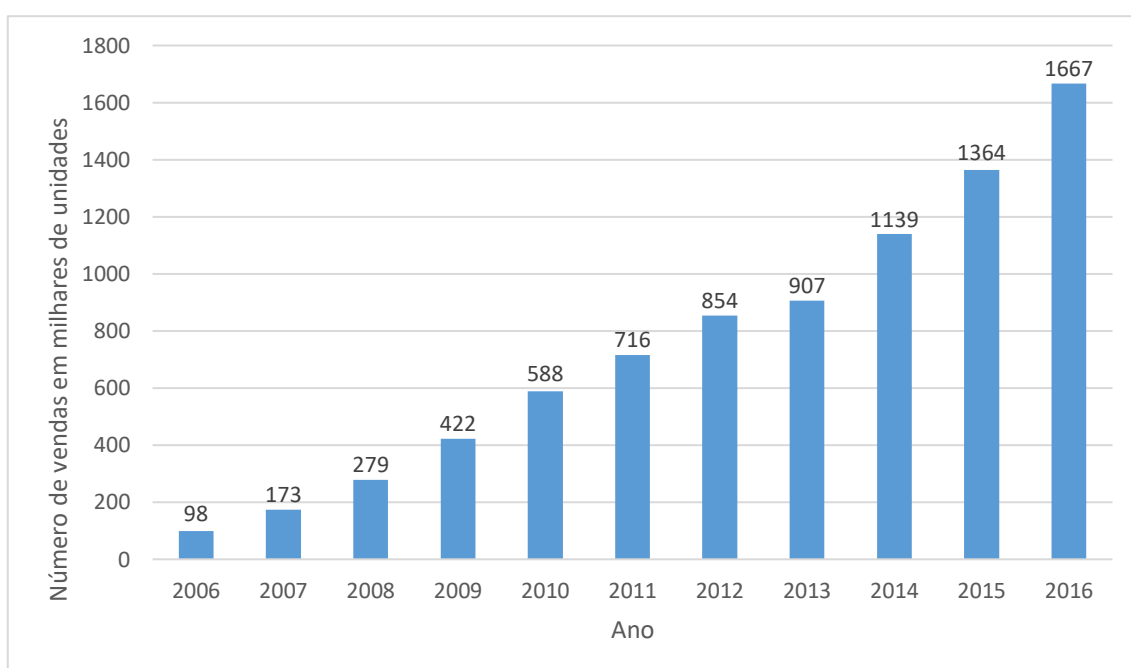


Figura 1.6 – Número de bicicletas elétricas vendidas na União Europeia entre 2006 e 2016, em milhares de unidades (dados obtidos de [10]).

Como se pode verificar analisando o gráfico da Figura 1.6, o mercado das bicicletas elétricas na União Europeia está em crescimento, verificando-se de ano para ano aumentos relevantes no número de vendas e uma evolução de aproximadamente 20% por ano.

Os países que mais contribuem para estes números são a Alemanha e a Holanda, com uma parcela conjunta correspondente a 52% do total de vendas na União Europeia no ano de 2016. A distribuição das percentagens de vendas pelos países nesse ano pode ser vista no gráfico da Figura 1.7 [10].

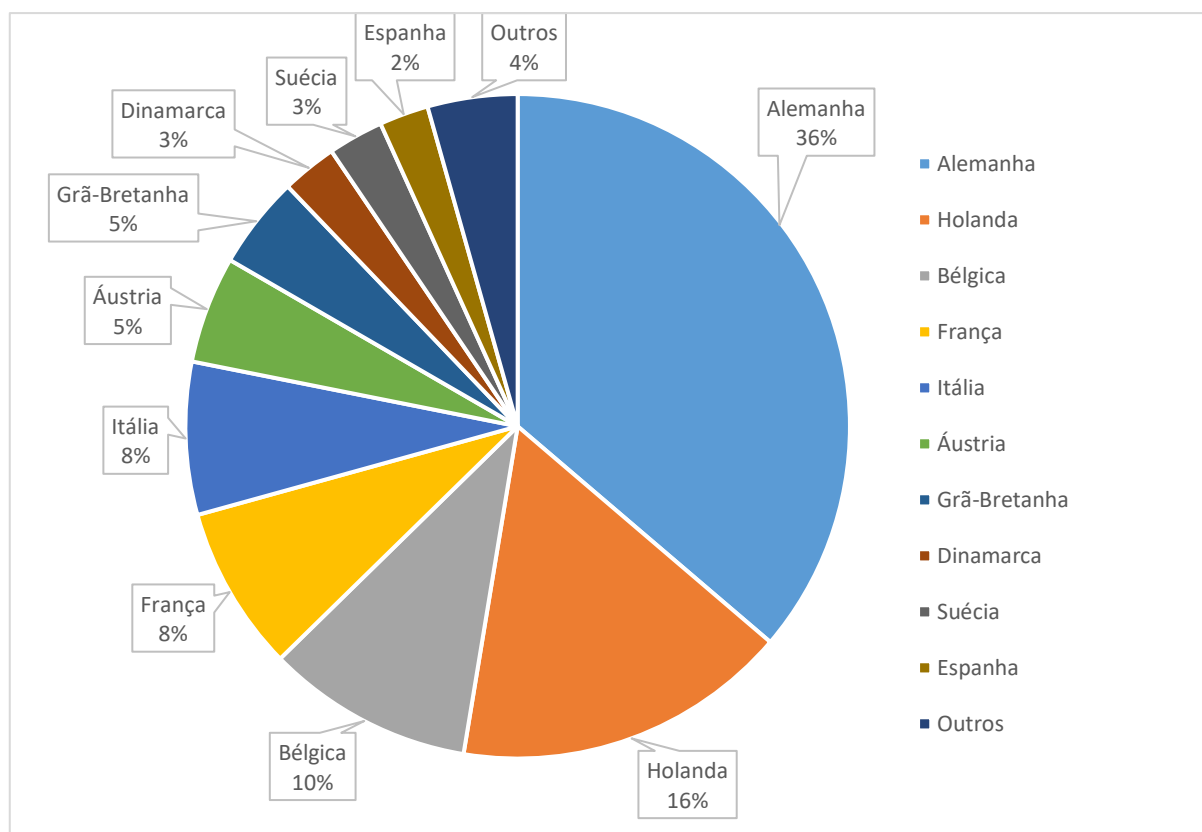


Figura 1.7 – Distribuição percentual das vendas de bicicletas elétricas na União Europeia por país, em 2016 (dados obtidos de [10]).

Seguido da Alemanha e da Holanda está a Bélgica, com 10% do total de vendas da União Europeia em 2016. Ainda mais relevante que essa percentagem foi o marco atingido pelos belgas em 2019, quando se tornaram o primeiro país europeu a vender mais bicicletas elétricas que convencionais. Segundo os especialistas, é esperado que mais países sigam este exemplo e atinjam estes números. Esta pesquisa mostrou ainda que dois terços destas bicicletas elétricas foram vendidas para mulheres e que a grande maioria destas bicicletas vendidas durante o ano de 2019 foram para pessoas na faixa etária entre os 40 e os 50 anos [11][12].

Portugal está representado no gráfico anterior na parcela referente a “Outros”, sendo a sua percentagem de vendas inferior a 1% do total da união europeia e tendo sido vendidas em Portugal cerca de 3000 bicicletas elétricas em 2016 [10]. Apesar deste número ser relativamente baixo quando comparado com outros países europeus, Portugal e os portugueses têm vindo a desenvolver uma cultura interessante em torno das bicicletas e das bicicletas elétricas.

Nas áreas urbanas, começam a aparecer cada vez mais centros de aluguer de bicicletas elétricas para uso da população, embora a maioria destes centros se destinem a fins turísticos e recreativos. Contudo, de modo a incentivar o seu uso como meio de transporte para fins utilitários, começam a surgir também

iniciativas inovadoras, como é o caso do projeto “GIRA”. Este projeto é o principal serviço de bicicletas partilhadas de Lisboa, que consiste em vários centros espalhados pela cidade onde o utilizador pode levantar ou entregar uma bicicleta em qualquer um deles, verificando na aplicação móvel do serviço a disponibilidade de cada centro em tempo real [13]. Iniciativas de apoio à compra de bicicletas e bicicletas elétricas para uso individual também já são normais, como é o caso do programa criado pela câmara municipal de Lisboa denominado “Programa de Apoio à Aquisição de Bicicleta”, onde a câmara pode financiar até 75% do valor de aquisição de uma bicicleta nova, dependendo do tipo [14][15]. Ainda de referir que ciclovias e áreas de apoio aos ciclistas têm sido construídas um pouco por todo o país de modo a incentivar a utilização da bicicleta de forma segura.

Quanto à produção de bicicletas, Portugal era em 2016 o terceiro maior produtor a nível europeu, com quase 2 milhões de unidades produzidas, apenas atrás de Itália e Alemanha. No entanto, a maioria destas são convencionais e são exportadas para outros mercados, principalmente europeus. No que diz respeito à produção de bicicletas elétricas, Portugal aparece apenas em décimo lugar no ranking europeu, com 20 mil unidades produzidas nesse ano, num mercado que é novamente dominado pela Alemanha com cerca de 350 mil bicicletas elétricas produzidas [10]. Este baixo número de bicicletas elétricas produzidas em Portugal é justificado pelo também baixo número de fabricantes nacionais.

A marca portuguesa Órbita, líder e referência histórica do setor de bicicletas em Portugal e responsável por várias iniciativas de *bike sharing* em Portugal (como é o caso do projeto “GIRA”) e em outros países europeus [16], foi durante muitos anos o único fabricante de bicicletas elétricas a nível nacional [17]. Apenas mais recentemente outras marcas portuguesas se começaram a atrever a lançar os seus modelos de bicicletas elétricas para o mercado, mercado esse que cada vez apresenta menos risco e se torna mais apetecível devido ao seu constante crescimento.

Um exemplo de uma dessas marcas é a BEEQ. Esta marca foi lançada em Junho de 2020 pela RTE Bikes, empresa sediada em Vila Nova de Gaia com mais de 20 anos de história na produção de bicicletas, mas que apenas agora começou a produzir bicicletas elétricas [18]. A BEEQ não tem lojas físicas próprias, centra o seu negócio *online* [19], possuindo apenas algumas lojas parceiras espalhadas pelo país, onde os clientes podem experimentar e levantar a sua bicicleta e onde são feitas as reparações necessárias. A marca possui 5 modelos de bicicletas elétricas no mercado e conta já com mais de 200 unidades vendidas [20].

Um dos modelos lançados pela marca BEEK é a *E800 Urban Motion*, desenhada para a cidade, apresenta um preço de 2099€ [21]. Este modelo pode ser visto na Figura 1.8.



Figura 1.8 – Bicicleta elétrica BEEK *E800 Urban Motion* (fonte da imagem [21]).

A nível de componentes eletrónicos, este modelo vem equipado com um motor *Brose Drive S Alu* de 250 W incorporado na pedaleira, sendo capaz de fornecer um binário de 90 Nm. Este motor apresenta ainda como características positivas o baixo nível de ruído e vibração quando em funcionamento e não oferece resistência ao pedalar quando desligado [22]. Este modelo vem também com um ecrã montado no guiador que permite ao utilizador escolher entre os quatro modos de assistência disponíveis e visualizar diferentes dados como o estado da bateria, autonomia restante, velocidade e distância percorrida. Para alimentar o motor e os restantes componentes eletrónicos, este modelo possui uma bateria de 36 V e 504 Wh integrada no quadro, que pode ser facilmente removida para ser carregada, mas também pode ser carregada montada na bicicleta. Dependendo dos modos de assistência utilizados, esta bateria proporciona uma autonomia que pode ir dos 40 km aos 100 km.

Como é possível concluir, tanto a nível de números de vendas como a nível da qualidade do produto, o mercado das bicicletas elétricas já evoluiu imenso. Com cada vez mais pessoas e governos consciencializados da importância e da relevância das bicicletas elétricas no mundo atual, esta tendência de evolução irá continuar a aumentar cada vez mais, como apontam alguns estudos. Num estudo apresentado por *F. E. Jamerson e E. Benjamim* [7], estima-se que em 2030 já se vendam mais de 100 milhões de bicicletas elétricas anualmente por todo o mundo, podendo este número chegar aos 180 milhões em 2050 (Figura 1.9).

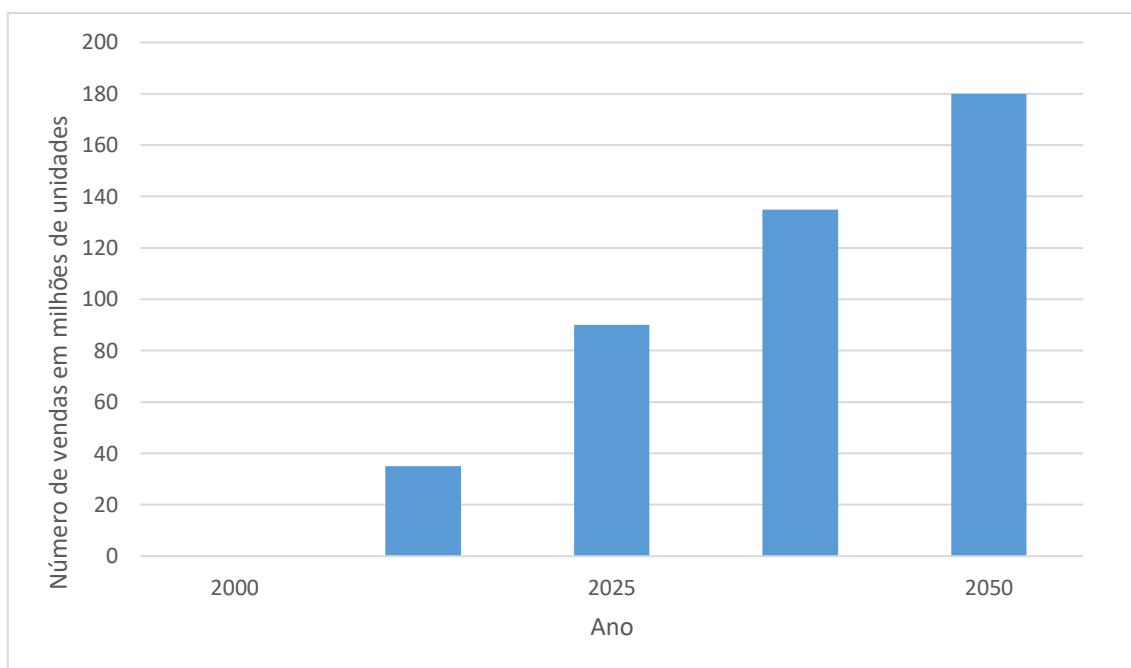


Figura 1.9 – Estimativa de vendas anuais de bicicletas elétricas mundialmente (dados obtidos de [7]).

1.2 Motivações

As bicicletas elétricas estão incluídas no âmbito da mobilidade elétrica e apresentam diversas vantagens em várias áreas problemáticas da sociedade atual, pelo que a sua adoção generalizada pode ter impactos muito positivos.

As bicicletas elétricas apresentam um enorme potencial como meio de transporte em áreas urbanas, onde, para além de contribuírem para a qualidade do meio ambiente e da saúde da população, contribuem ainda para o descongestionamento do tráfego e, quando usadas como substituto do automóvel, contribuem ainda para reduzir despesas de utilização e manutenção. Para além da questão ambiental, o potencial das bicicletas elétricas estende-se ainda à melhoria da saúde individual do utilizador, promovendo uma atividade física regular que se adequa a qualquer faixa etária, não exigindo o esforço associado a uma bicicleta convencional.

Devido às vantagens oferecidas pelas bicicletas elétricas, a sua utilização está a tornar-se cada vez mais atual e o seu mercado está em constante crescimento. Contudo, à semelhança do que acontece com os restantes tipos de VE, as bicicletas elétricas apresentam também desvantagens, e.g., em termos de eficiência e autonomia.

Assim, nesta dissertação pretende-se desenvolver uma bicicleta elétrica com soluções inovadoras de eletrônica de potência, que empregam tecnologias de componentes atuais, visando melhorar a eficiência energética, assim como propor novas funcionalidade de operação, incluindo travagem regenerativa.

A escolha do tema de dissertação consistiu em encontrar um tema atual, de interesse pessoal e onde fosse possível aplicar e aprofundar os conhecimentos obtidos ao longo do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Eletrônica Industrial e Computadores, principalmente na área de Eletrônica de Potência e Energia, tendo este tema preenchido todos os requisitos.

1.3 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação de mestrado é o desenvolvimento da parte elétrica de uma bicicleta elétrica recorrendo a tecnologias de eletrônica de potência cumprindo com os requisitos impostos pela lei para um veículo deste tipo. Para isso, ao longo desta dissertação vários objetivos são propostos:

- Estudo sobre o enquadramento legislativo de bicicletas elétricas;
- Estudo das bicicletas elétricas focando nas várias partes constituintes;
- Estudo de componentes de eletrônica de potência para as partes constituintes da bicicleta elétrica;
- Estudo dos circuitos de eletrônica de potência e sistemas de controlo e respetiva interligação;
- Realização de simulações dos circuitos de eletrônica de potência (e.g., controlo do motor);
- Realização de simulações dos sistemas de controlo;
- Implementação dos circuitos de eletrônica de potência;
- Implementação dos sistemas de controlo;
- Integração das soluções implementadas numa bicicleta;
- Validação experimental da bicicleta elétrica.

1.4 Organização e Estrutura da Dissertação

Nesta dissertação de mestrado será descrito o desenvolvimento de uma bicicleta elétrica, encontrando-se a mesma estruturada em 7 capítulos.

No capítulo 1, intitulado “Introdução”, é apresentada uma breve introdução sobre a bicicleta elétrica e as suas vantagens e de seguida é feita uma análise da sua história e do seu respetivo mercado a nível mundial. Neste capítulo são ainda indicados os objetivos e motivações que levaram ao desenvolvimento desta dissertação e é descrito como se encontra organizada a mesma.

No capítulo 2, intitulado “Bicicleta Elétrica”, é introduzida a definição de bicicleta elétrica e apresentada a legislação portuguesa e os requisitos impostos pela lei que um veículo deste tipo deve cumprir. De seguida, são descritos e analisados os diferentes componentes necessários para uma bicicleta elétrica, nomeadamente o motor elétrico, o controlador do motor, os sensores e a bateria.

No capítulo 3, intitulado “Definição do Sistema Proposto”, é realizada a escolha dos componentes a serem utilizados e é definida a proposta de solução a implementar.

No capítulo 4, intitulado “Simulações Computacionais do Sistema Proposto”, são definidos e descritos os circuitos de potência do motor e os seus respetivos sistemas de controlo que serão utilizados. São também apresentadas as simulações computacionais destes circuitos de potência e dos seus respetivos sistemas de controlo.

No capítulo 5, intitulado “Implementação do Sistema Proposto”, são apresentadas as implementações dos circuitos desenvolvidos em conjunto com os restantes componentes da bicicleta elétrica.

No capítulo 6, intitulado “Resultados Experimentais”, são apresentados e analisados os resultados experimentais obtidos.

No capítulo 7, intitulado “Conclusões e Sugestões de Trabalho Futuro”, são apresentadas as conclusões do trabalho realizado ao longo desta dissertação e ainda sugestões de trabalho futuro.

Capítulo 2

Bicicleta Elétrica

2.1 Introdução

No decorrer deste capítulo, inicialmente, é apresentada a legislação portuguesa referente às bicicletas elétricas com o objetivo de se perceber os requisitos que são necessários cumprir no desenvolvimento de um veículo deste tipo.

De seguida, são apresentados e analisados os componentes necessários incluir numa bicicleta elétrica tendo em conta também as exigências legais. Assim, são abordados os motores tipicamente usados nas bicicletas elétricas e de seguida alguns controladores para estes motores elétricos existentes no mercado. São também apresentados os tipos de sensores necessários para se efetuar o controlo do sistema em malha fechada e por fim são analisados os tipos de baterias mais utilizadas nestas bicicletas.

2.2 Legislação sobre Bicicletas Elétricas

A bicicleta elétrica é um tipo de veículo que se inclui na categoria dos velocípedes, mais propriamente nos velocípedes com motor. Qualquer pessoa pode conduzir um velocípede pois não é necessário qualquer tipo de habilitação. Por este motivo, e de forma a garantir a segurança rodoviária, a legislação relacionada com este tipo de veículos é bastante rigorosa e impõe alguns requisitos.

De acordo com a legislação portuguesa, presente no Artigo 112º do Decreto-lei nº72 de 2013, um *“velocípede com motor é o velocípede equipado com motor auxiliar com potência máxima contínua de 0,25 kW, cuja alimentação é reduzida progressivamente com o aumento da velocidade e interrompida se atingir a velocidade de 25 km/h, ou antes, se o condutor deixar de pedalar”* [23].

Por análise deste artigo é possível concluir que, para cumprir estas exigências legais, o desenvolvimento de uma bicicleta elétrica deve ter em conta que o motor elétrico só pode ter uma potência contínua máxima de 250 W, é necessário um sensor de velocidade e sensores de deteção de movimento e sentido de rotação da pedaleira. De referir ainda que, apesar de um veículo deste tipo não poder possuir

acelerador, pode possuir um botão de ajuda ao arranque que ativa o motor elétrico para facilitar o arranque e caminhar com a bicicleta pela mão.

Aqui foi analisada a legislação portuguesa, que é idêntica para toda a União Europeia. No entanto, é importante referir que as restantes partes do globo guiam-se pela sua própria legislação, que normalmente não é tão restritiva como a portuguesa e europeia.

2.3 Componentes Necessários para uma Bicicleta Elétrica

Para além do motor elétrico e dos vários sensores necessários para que a bicicleta elétrica cumpra os requisitos legais, existem ainda outros componentes essenciais para o seu funcionamento, sendo eles o controlador do motor e a bateria. De seguida, é feita uma análise a cada um destes principais componentes de uma bicicleta elétrica.

2.3.1 Motor Elétrico

O motor elétrico é uma máquina que tem como função principal transformar energia elétrica em energia mecânica. Estes motores são amplamente utilizados e estão presentes em várias áreas e nas mais diversas aplicações. De forma a satisfazer as necessidades dessas diversas áreas, existem diferentes tipos de motores, cada um com as suas características intrínsecas e as suas próprias vantagens e desvantagens, que os tornam mais ou menos indicados para determinada aplicação. Os motores elétricos podem ser classificados em dois grupos principais, os motores com escovas e sem escovas. Cada um destes grupos possui diferentes subgrupos que incluem os diferentes tipos de motores. Relativamente a tipos de motores passíveis de serem aplicados em VE, de destacar do grupo dos motores com escovas os motores de corrente contínua. Quanto aos motores sem escovas, os principais tipos são os motores de indução, os motores de relutância variável e os motores de ímanes permanentes [24].

Com o desenvolvimento da eletrónica de potência tornou-se possível alimentar os motores elétricos dinamicamente através de conversores eletrónicos, levando a um maior controlo dos motores e alargando a utilidade e aplicação de cada tipo de motor.

Quanto aos motores passíveis de serem aplicados em bicicletas elétricas, os mais utilizados são os motores com escovas de corrente contínua (motor CC) e os motores sem escovas de corrente contínua (motor BLDC), encontrando-se este último incluído no grupo dos motores de ímanes permanentes. Os motores CC são relativamente baratos quando comparados aos BLDC, mas são mais barulhentos, mais

pesados e requerem serviço de manutenção com alguma frequência. Já os motores BLDC são mais silenciosos, mais leves, mais pequenos e não necessitam de manutenção tão frequente. Contudo, a complexidade de controlo e o seu custo são desvantagens do motor BLDC [25]. O motor de indução também pode ser considerado uma boa alternativa para aplicar numa bicicleta elétrica mas também este apresenta algumas desvantagens relevantes, como por exemplo a existência de deslizamento entre o rotor e o estator, sendo superado pelos atributos do motor BLDC neste tipo de aplicação [26].

Para além da sua classificação por tipo, os motores são também classificados pela sua localização nas bicicletas elétricas. Normalmente, os motores estão localizados na roda da frente, na roda de trás ou na pedaleira (Figura 2.1). Se estiver numa das rodas é considerado um *Hub Motor* e se estiver na pedaleira é considerado um *Mid Drive Motor*.

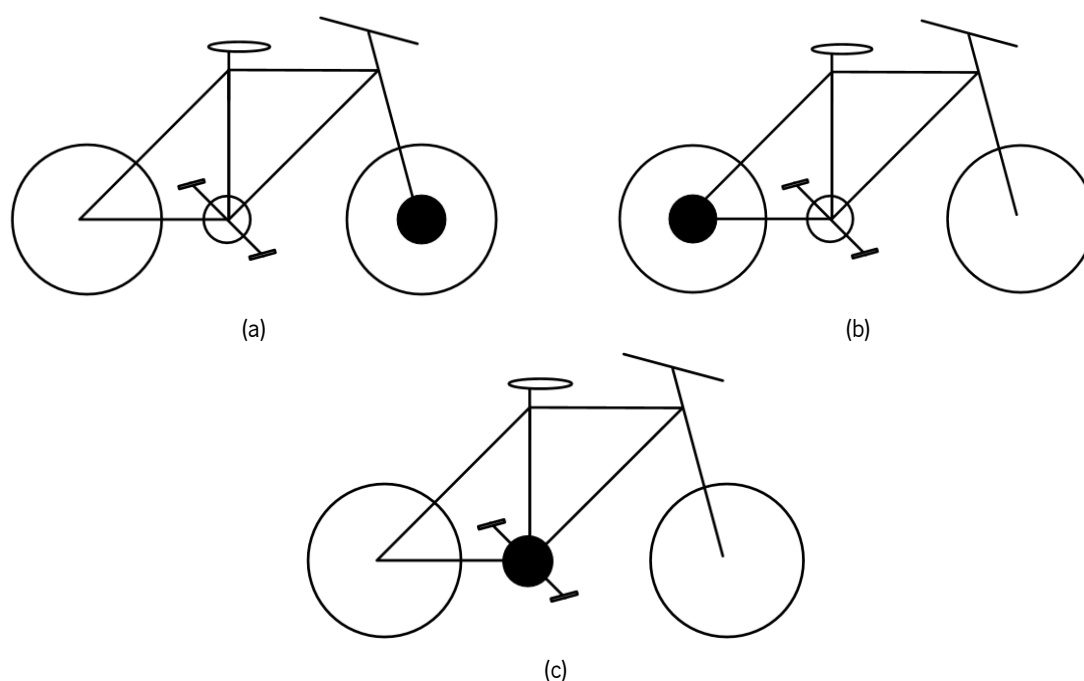


Figura 2.1 – Localização dos motores na bicicleta elétrica: (a) *Hub Motor* na roda da frente; (b) *Hub Motor* na roda de trás; (c) *Mid Drive Motor*.

Na Figura 2.1(a) está apresentada a situação *Hub Motor* com o motor na roda da frente, sendo esta a solução mais conveniente para manutenção, pois podem ser facilmente instalados e removidos. Comparado com o mesmo motor instalado na roda de trás, este na roda da frente cria um melhor equilíbrio de peso entre a frente e a traseira da bicicleta. Contudo, esta topologia pode levar a derrapagem da roda da frente em subidas ou terrenos escorregadios.

Ao contrário de um *Hub Motor* na roda da frente, um *Hub Motor* instalado na roda de trás (Figura 2.1(b)) não causa derrapagem. No entanto, esta topologia causa um desequilíbrio entre a frente e a traseira da bicicleta, colocando muito peso e pressão no pneu de trás.

Um *Mid Drive Motor* (Figura 2.1(c)) está localizado numa posição baixa e centrada na bicicleta elétrica, criando um melhor equilíbrio de peso. Visto o motor não estar nas rodas, removê-las torna-se também mais fácil. Comparado com um *Hub Motor* da mesma potência, um *Mid Drive Motor* é normalmente mais pequeno, pode ser integrado diretamente no quadro da bicicleta e possui melhor desempenho em subidas. Contudo, apesar de todas estas vantagens, um *Mid Drive Motor* para ser integrado numa bicicleta necessita de um quadro personalizado e estes são mais caros que os *Hub Motors* [25].

Comparação do Motor BLDC com Outros Tipos de Motores

Como foi referido anteriormente, os três tipos de motores mais utilizados em bicicletas elétricas são os motores CC com escovas, os motores BLDC e os motores de indução. No entanto, os motores BLDC são a principal escolha para equipar veículos deste tipo devido às suas características e vantagens que oferecem. Para uma melhor compreensão da relevância do motor BLDC quando comparado com os outros dois, de seguida são apresentadas duas tabelas, em que na primeira são comparadas as principais características do motor BLDC com as do motor CC (Tabela 2.1) e na segunda com as do motor de indução (Tabela 2.2) [26].

Tabela 2.1 – Comparação do motor BLDC com o motor CC (com dados obtidos em [26]).

Característica	Motor BLDC	Motor CC
Comutação	Comutação eletrónica baseada em sensores de efeito <i>Hall</i>	Comutação por escovas
Manutenção	Baixa manutenção devido à ausência de escovas	Manutenções periódicas principalmente devido à existência de escovas
Durabilidade	Longa	Curta
Relação Velocidade/Binário	Linear – Permite operação em todas as velocidades com carga nominal	Moderadamente linear – A velocidades elevadas, a fricção das escovas aumenta, reduzindo o binário útil
Eficiência	Alta – Sem queda de tensão nas escovas	Moderada – Queda de tensão nas escovas
Relação Potência de Saída/Tamanho do Motor	Alta – Tamanho reduzido devido a características térmicas superiores. O motor BLDC tem os enrolamentos no estator e a dissipação de calor é melhor	Moderada/baixa – O calor produzido pela armadura é dissipado no entreferro, aumentando a temperatura
Inércia do Rotor	Baixa, porque tem ímanes permanentes no rotor. Isto melhora a resposta dinâmica	Inércia do rotor mais alta, o que limita as características dinâmicas
Gama de Velocidade	Alta – Sem limitações mecânicas impostas pelas escovas ou pelo comutador	Baixa – Limitações mecânicas provocadas pelas escovas
Geração de Ruído Elétrico	Baixo	Alto – O arco elétrico gerado nas escovas produz ruído, causando interferência eletromagnética nos equipamentos próximos
Custo de Construção	Alto, pois possui ímanes permanentes	Baixo
Controlo	Caro e complexo	Barato e simples
Requisitos de Controlo	Um controlador é sempre necessário para manter o motor a rodar. O mesmo controlador pode ser usado para variar a velocidade	Para uma velocidade fixa não é preciso controlador. Este apenas é necessário para variar a velocidade

Tabela 2.2 – Comparação do motor BLDC com o motor de Indução (com dados obtidos em [26]).

Característica	Motor BLDC	Motor de Indução
Relação Velocidade/Binário	Linear – Permite operação em todas as velocidades com carga nominal	Não linear – Baixo binário a baixas velocidades
Relação Potência de Saída/Tamanho do Motor	Alta – Devido à existência de ímanes permanentes no rotor, tamanhos mais pequenos podem ser alcançados para uma dada potência de saída	Moderada – Devido a tanto o estator como o rotor terem enrolamentos, a potência de saída para um dado tamanho é menor que no BLDC
Inércia do Rotor	Baixa – Melhores características dinâmicas	Alta – Pobres características dinâmicas
Requisitos de Controlo	Um controlador é sempre necessário para manter o motor a rodar. O mesmo controlador pode ser usado para variar a velocidade	Para uma velocidade fixa não é preciso controlador. Este apenas é necessário para variar a velocidade
Deslizamento	Não existe deslizamento entre o estator e o rotor	O rotor roda a uma frequência mais baixa que o estator, existindo deslizamento. Este aumenta com a carga

2.3.2 Controlador do Motor

O controlador do motor é o elemento fulcral de uma bicicleta elétrica. Todos os componentes desta se encontram ligados ao controlador e em função das características do motor e das restantes funcionalidades da bicicleta, este pode ser mais ou menos complexo. Baseado nas informações provenientes dos sensores ou introduzidas pelo utilizador, o controlador é o responsável por controlar devidamente o motor.

Em alguns casos, os controladores podem ter botões ou potenciômetros, mas normalmente a interação com o utilizador é feita através de um ecrã montado no guiador que se encontra ligado ao controlador. Através deste ecrã, o utilizador pode interagir com o controlador, por exemplo indicando que quer ligar ou desligar o sistema elétrico da bicicleta ou definindo o nível de assistência pretendido. Por outro lado, este ecrã pode ser também utilizado para o controlador disponibilizar ao utilizador dados como a velocidade e a autonomia restante.

O controlador atua também para que uma bicicleta cumpra os requisitos legais, por exemplo desligando o motor elétrico quando a velocidade máxima permitida é atingida ou alimentando o motor elétrico apenas quando o utilizador começa a pedalar.

Para além destas funções de controlo, o controlador pode exercer ainda várias funções de proteção. Este pode oferecer proteção contra correntes e temperaturas elevadas, protegendo-se a si próprio e ao motor, e pode proteger também a bateria de forma a que esta não seja exposta a tensões demasiado altas ou baixas que prejudiquem o seu correto funcionamento [27].

Existem no mercado diversos controladores para aplicação em bicicletas elétricas, que podem ser adquiridos em conjunto com um *kit* de transformação de uma bicicleta convencional para elétrica ou individualmente. Na Figura 2.2 pode ser visto um exemplo de um controlador de um motor BLDC que pode ser aplicado numa bicicleta elétrica.



Figura 2.2 – Exemplo de um controlador de um motor BLDC e caixa de suporte do mesmo.

Caso se pretenda adquirir um controlador para um determinado motor, existem alguns aspetos a ter em consideração. Garantir que o controlador é apropriado para o tipo de motor e que as suas potências e tensões são correspondentes é essencial. É também importante ter em conta que o controlador deve ser compatível com os restantes componentes que se pretendem usar na bicicleta elétrica. Existem também no mercado controladores programáveis, que permitem ao utilizador ajustar os parâmetros do controlador à sua medida, por exemplo ajustando a potência fornecida pelo motor ou o binário [28].

2.3.3 Sensores

Para o correto e eficiente funcionamento de uma bicicleta elétrica é necessário o uso de sensores. São necessários sensores aplicados na pedaleira, sendo para este caso os sensores mais utilizados os de cadência ou os de binário. Os sensores de cadência são também utilizados como sensor de velocidade. São também necessários sensores de monitorização da posição do rotor do motor BLDC, sendo que para este caso os sensores mais utilizados são os sensores de efeito *Hall*.

2.3.3.1 Sensores de Cadência e Binário

São necessários sensores aplicados na pedaleira para adquirir informações que serão posteriormente utilizadas para definir a entrada em funcionamento do motor e que potência este deve fornecer em cada momento. Os dois tipos de sensores mais utilizados que podem ser aplicados na pedaleira de uma bicicleta elétrica são os de cadência e os de binário. A principal diferença entre eles é que o sensor de cadência mede apenas se o utilizador está a pedalar ou o quão rápido está a pedalar, e o sensor de binário mede o esforço que está realmente a ser feito pelo ciclista. Os sensores de cadência são também utilizados para monitorizar a velocidade da bicicleta.

O uso dos sensores de cadência em bicicletas já é antigo. O funcionamento deste tipo de sensor baseia-se num íman preso na parte móvel que se pretende medir e um sensor magnético fixo a detetar a passagem do íman. Estes podem ser úteis tanto em bicicletas elétricas como em convencionais e podem ser de três tipos:

- Sensor de velocidade, onde o íman é preso num raio da roda e o sensor magnético no quadro de forma a detetar a passagem do íman. Este tipo de sensor permite saber a velocidade e a distância percorrida com base no diâmetro da roda;
- Sensor de cadência, onde o íman é preso na pedaleira e o sensor magnético no quadro, novamente de forma a detetar a passagem do íman. Este tipo de sensor permite saber a frequência com que a pedaleira roda;
- Sensor de cadência e velocidade, que corresponde aos dois tipos anteriores utilizados em conjunto, permitindo saber os dados fornecidos por ambos [29].

No âmbito das bicicletas elétricas, o sensor de velocidade é útil para reduzir progressivamente a alimentação do motor com o aumento da velocidade e interromper essa alimentação se a velocidade de 25 km/h for atingida, conforme exige a legislação.

O sensor de cadência é útil pois deteta o movimento da pedaleira, o que permite impulsionar o arranque do motor elétrico e, baseado no modo de assistência escolhido, definir a potência que o motor deve fornecer. No entanto, esta potência não tem em conta o esforço realmente exercido pelo utilizador, podendo mesmo o ciclista não aplicar força nos pedais e apenas rodá-los livremente para receber a potência máxima. Isto pode tornar a assistência fornecida pelo motor irregular e pouco intuitiva [30].

Uma alternativa aos sensores de cadência são os sensores de binário. Estes medem a força que o utilizador está realmente a aplicar no pedal e a potência fornecida pelo motor é proporcional a essa força. Este sistema proporciona uma sensação mais semelhante a uma bicicleta convencional pois o ciclista sente realmente a tensão na corrente e pode desfrutar de uma ligação direta ao motor. Uma bicicleta elétrica baseada num sensor de binário normalmente exige mais esforço que uma baseada num sensor de cadência, levando a um aumento da autonomia. Este tipo de sensores tem como desvantagem serem mais caros que os sensores de cadência pois são sensores de extrema precisão.

Atualmente, algumas bicicletas elétricas vêm equipadas com os dois tipos de sensor operando perfeitamente em simultâneo, dando ao ciclista uma experiência extremamente intuitiva. Existem também bicicletas elétricas que possuem os dois tipos de sensor e permitem ao utilizador escolher qual deles quer usar para controlar o seu motor [31].

2.3.3.2 Sensores de Efeito *Hall*

O efeito de *Hall* foi descoberto em 1879 quando o *Dr. Edwin Hall* descobriu que quando um campo magnético se encontra na perpendicular relativamente à direção de uma corrente elétrica que flui numa face de uma placa metálica, surge uma diferença de potencial elétrico nas faces opostas dessa placa [32]. Na Figura 2.3 é ilustrado o princípio básico do efeito de *Hall*.

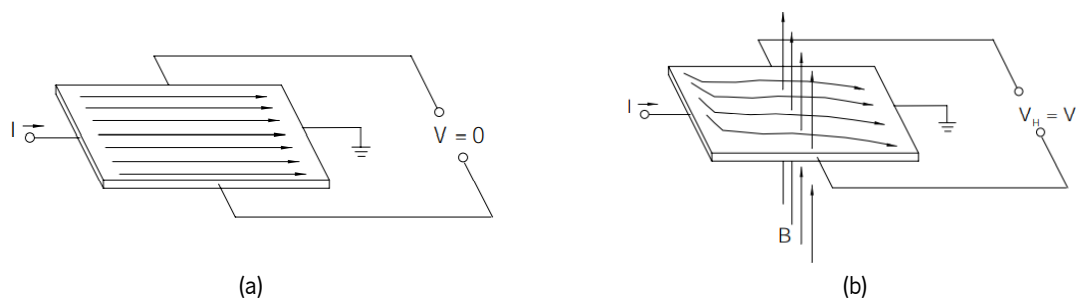


Figura 2.3 – Princípio de funcionamento do efeito de *Hall* (imagem retirada de [32]):
(a) Na ausência de campo magnético; (b) Na presença de campo magnético.

Quando não está presente nenhum campo magnético (Figura 2.3(a)), a distribuição da corrente é uniforme e não existe diferença de potencial na saída. Quando um campo magnético está presente (Figura 2.3(b)), uma força de *Lorentz* é exercida na corrente, que vai causar distúrbios na distribuição da corrente e originar uma diferença de potencial na saída. Esta diferença de potencial corresponde à tensão de *Hall*.

Apesar desta descoberta ter sido bem recebida na altura e as experiências de *Hall* terem sido um sucesso, nenhuma aplicação prática para esta descoberta foi encontrada por mais de 70 anos. Apenas na década de 50, com a evolução dos semicondutores, o efeito de *Hall* encontrou as suas primeiras aplicações. Atualmente, os sensores de efeito *Hall* já são usados nas mais diversas aplicações, sendo os motores BLDC uma das principais [32].

A comutação de um motor BLDC é controlada eletronicamente. Para que este rode, os enrolamentos do estator devem ser alimentados numa determinada sequência e para que essa sequência seja respeitada é necessário conhecer a posição do rotor. Esta posição é conhecida recorrendo a sensores de efeito *Hall* embutidos no estator do motor [26].

2.3.4 Bateria de Acumuladores

A bateria é um componente essencial e de extrema importância nas bicicletas elétricas. Este componente é responsável por alimentar não só o motor elétrico, mas também todo o sistema elétrico da bicicleta. Deste modo, é também de extrema importância escolher o tipo de bateria mais eficiente para este tipo de sistemas.

As baterias armazenam energia elétrica através das reações eletroquímicas que se processam no seu interior. De uma forma simplista, as baterias recebem energia elétrica, armazenam essa energia na forma química por um tempo teoricamente ilimitado e posteriormente devolvem-na, novamente na forma elétrica, quando solicitado. As baterias podem ser divididas em duas categorias, primárias ou secundárias. As primárias são as baterias não recarregáveis, sendo produzidas com a finalidade de serem utilizadas apenas uma vez. Já as secundárias são baterias produzidas para serem recarregadas um número finito de vezes. Por poderem ser reutilizadas, estas são as que apresentam mais vantagens, principalmente do ponto de vista ambiental, pois normalmente as baterias são compostas por elementos químicos tóxicos e prejudiciais para o meio ambiente. Independentemente da sua categoria, ambos os tipos de baterias devem ser devidamente reciclados quando o seu tempo de vida útil termina [33].

Relativamente às características das baterias a ter em conta aquando da sua escolha, a mais relevante é a capacidade de armazenamento de energia. Esta é normalmente definida pela corrente que a mesma pode fornecer durante um período de tempo (Ah) e pela tensão aos seus terminais (V). Tem-se ainda a capacidade nominal (*C-rate*), que representa a corrente contínua que a bateria é capaz de suportar durante o carregamento ou descarregamento. Considerando uma bateria de 10 Ah, se esta tiver um *C-rate* igual a 1 é capaz de alimentar um sistema com 10 A durante uma hora. Se a mesma bateria tiver um *C-rate* igual a 2, esta é capaz de alimentar um sistema com 20 A durante meia hora. Por outro lado, se a mesma bateria tiver um *C-rate* igual a 0,5, esta é capaz de alimentar um sistema com 5 A durante duas horas [34].

2.3.4.1 História das Baterias

A evolução de qualquer dispositivo é obviamente influenciada pela sua história e isto aplica-se também às baterias. No ano de 1800, *Alessandro Volta* anunciou a invenção da primeira bateria, nomeada pelo próprio de “*Pilha de Volta*” (Figura 2.4). Este dispositivo era capaz de produzir uma corrente elétrica constante e contínua e era formado por uma sequência alternada de discos de dois metais diferentes (zinco e prata), separados por pedaços de pano embebido numa solução de cloreto de sódio [35].



Figura 2.4 – Pilha de *Volta* (imagem retirada de [35]).

Esta invenção anunciada por *Volta* teve um impacto tremendo no desenvolvimento da ciência eletroquímica e deu origem a uma evolução relativamente rápida da história da bateria. Ainda no século IXX, esta evolução resultou na descoberta de vários sistemas eletroquímicos passíveis de serem

implementados em baterias. Destes sistemas, os mais relevantes e que ainda são utilizados atualmente são os baseados em chumbo ou níquel.

Baseados nestas descobertas, os principais tipos de baterias que ainda são utilizadas atualmente são as baterias de ácido-chumbo, níquel-cádmio e níquel hidreto-metálico, tendo esta última sido desenvolvida com o intuito de substituir as baterias de níquel-cádmio, principalmente devido à elevada toxicidade do cádmio. Apesar de ainda serem usadas em certas aplicações, de uma forma geral, todos estes tipos de baterias não foram capazes de satisfazer as exigências do desenvolvimento tecnológico nem são as soluções ideais para serem implementadas em veículos elétricos, como é o caso da bicicleta elétrica [35].

Impulsionada pelas necessidades de armazenamento de energia cada vez mais exigentes que se foram fazendo sentir ao longo dos anos em várias áreas, foram descobertas na década de 70 as baterias de lítio. Estas primeiras baterias de lítio eram do tipo primário, ou seja, não eram recarregáveis. Na década de 80, foram feitas tentativas de desenvolver baterias de lítio recarregáveis, mas não foram bem-sucedidas devido a problemas de segurança provocados pela instabilidade do lítio enquanto metal, especialmente durante o carregamento. A solução para as baterias de lítio recarregáveis passou pela substituição do lítio por íões de lítio. Apesar de apresentar uma menor densidade energética, os íões de lítio são seguros. Em 1991, a *Sony Corporation* comercializou a primeira bateria de íões de lítio recarregável, sendo o seu exemplo seguido por outros fabricantes. Desde então, as baterias baseadas em lítio têm liderado o mercado e novas topologias baseadas nesta tecnologia têm surgido na tentativa de encontrar soluções com melhor desempenho e eficiência. Um exemplo destas novas topologias são as baterias de polímero de lítio, que também têm ganho o seu espaço neste mercado.

As baterias de lítio apresentam várias vantagens quando comparadas com todas as outras tecnologias de baterias existentes no mercado. O lítio é o metal mais leve, tem o melhor potencial eletroquímico e fornece a maior densidade de energia por massa. Consequentemente, as baterias de lítio são também leves e apresentam uma grande densidade energética. Para além disto, apresentam ainda uma taxa de auto-descarga reduzida e uma baixa necessidade de manutenção, dispensando ainda ciclos periódicos de carga pois não apresentam efeito de memória.

Contudo, as baterias de lítio apresentam também algumas desvantagens que são importantes referir. Estas apresentam um custo de produção elevado e requerem circuitos de proteção para controlar e regular as tensões, as correntes e a temperatura da bateria. Há que ter em conta também que esta

tecnologia é relativamente nova e tem sido alvo de estudos com o objetivo de melhorar o seu desempenho. Apesar disto, este tipo de baterias domina o mercado das baterias e é a principal escolha para aplicações de mobilidade elétrica [36].

2.3.4.2 Comparação entre Diferentes Tipos de Baterias

Como já foi sendo abordado nas alíneas anteriores, atualmente estão disponíveis no mercado cinco tipos de baterias. Estes apresentam características distintas e as suas próprias vantagens e desvantagens [25], sendo necessário escolher que tipo de bateria se adequa melhor à aplicação pretendida.

De forma a resumir os parâmetros de cada tipo de bateria, de seguida é apresentada uma tabela (Tabela 2.3) onde são comparadas as principais características dos cinco principais tipos de baterias existentes no mercado.

Tabela 2.3 – Comparação entre diferentes tipos de baterias (com dados obtidos em [33]).

Tipo de Bateria	Características					
	Energia Específica (Wh/kg)	Densidade Energética (Wh/L)	Potência Específica (W/kg)	Ciclos de Vida	Eficiência Energética (%)	Custo de produção (€/kWh)
Ácido-Chumbo	35	100	180	1000	>80	50
Níquel-Cádmio	50-80	300	200	2000	75	205-250
Níquel Hidreto-Metálico	70-95	180-220	200-300	<3000	70	165-205
Iões de Lítio	118-250	200-400	200-430	2000	>95	125
Polímero de Lítio	130-225	200-250	260-450	>1200	-	125

2.4 Conclusões

Neste capítulo, inicialmente foi apresentada a legislação portuguesa referente às bicicletas elétricas. A partir daí, foram referidos os componentes principais necessários para o funcionamento de um veículo deste tipo e posteriormente esses componentes foram analisados individualmente.

Inicialmente foram analisados os tipos de motores, tendo sido dado ênfase aos motores CC com escovas, indução e BLDC por serem os mais usados neste tipo de aplicações. Depois de efetuadas comparações

entre eles, foi possível concluir que o motor BLDC é o que apresenta mais vantagens para aplicação numa bicicleta elétrica.

De seguida foram analisados os controladores do motor, tendo-se verificado que este é o componente fulcral da bicicleta elétrica, interligando todos os restantes componentes e que controla o seu bom funcionamento. Foram vistos também alguns cuidados a ter na escolha de um controlador deste tipo, de forma a que a incompatibilidade entre componentes não cause problemas.

A nível de sensores, foi visto que são necessários sensores para monitorizar a posição do motor, sendo os mais utilizados no caso do motor BLDC os sensores de efeito *Hall*. Para além desses, são necessários ainda sensores de controlo da pedaleira, sendo os mais utilizados para isso os sensores de cadência ou os sensores de binário, proporcionando cada um deles características distintas a uma bicicleta elétrica quando aplicados. Os sensores de cadência são ainda utilizados como sensor de velocidade.

Por fim foram analisadas as baterias, começando por uma análise sobre a sua história. De seguida, foi analisada cada tecnologia, tendo-se concluído que as baterias mais apropriadas são as de lítio. Apesar de apresentarem um preço elevado, estas são leves e apresentam uma grande densidade energética quando comparadas com as restantes tecnologias de baterias.

Capítulo 3

Sistemas de Eletrónica de Potência para Bicicletas Elétricas

3.1 Introdução

Como foi visto anteriormente, existem diversos tipos de bicicletas elétricas implementadas com diferentes soluções. As diferenças entre cada implementação residem principalmente nas topologias do motor e da bateria escolhidos. Depois de estudados os vários componentes necessários para uma bicicleta elétrica e os seus diferentes tipos, neste capítulo será definida a proposta de solução a implementar. Para isto, será apresentado um estudo de soluções no mercado tendo em vista a aquisição do motor e da bateria.

3.2 Análise de Soluções no Mercado

O objeto de estudo desta análise foram as ofertas dos principais fabricantes e lojas da área, portuguesas ou com ligação comercial a Portugal. Com a necessidade de adquirir o motor e a bateria, esta análise tornou-se muito relevante para saber que ofertas existiam no mercado e quais eram possíveis comprar em Portugal.

Tornou-se relevante também para avaliar o custo-benefício das várias soluções, tendo em conta o estudo realizado anteriormente sobre os vários tipos de componentes e as suas vantagens e desvantagens. Como foi possível concluir com este estudo realizado anteriormente, as baterias baseadas em tecnologias de lítio e os motores BLDC são os que oferecem mais vantagens e são os mais utilizados atualmente, tendo sido comprovado isso mesmo nesta análise de soluções no mercado, onde praticamente todas as soluções encontradas se baseavam nestas tecnologias.

Nesta análise foi tida também em conta a possibilidade de aquisição de um *kit* de transformação completo, em vez da aquisição de um motor e uma bateria individualmente, de forma a avaliar também o custo-benefício dos *kits*, mesmo descartando alguns dos restantes componentes. Foi ainda tida em conta a legislação portuguesa, que define que um veículo deste tipo não pode ter um motor com potência superior a 250 W.

O resultado desta análise e as ofertas de cada loja ou fabricante visados nesta pesquisa podem ser vistos na íntegra no anexo.

3.3 Seleção dos Componentes

Depois de compilada a maioria da oferta disponível no mercado, passou-se à fase de seleção dos componentes. Depois de analisados os vários componentes e os seus preços, concluiu-se que seria interessante, por vários motivos que serão explicados de seguida, em vez de adquirir um motor e uma bateria individualmente, adquirir um *kit* de transformação completo.

Um dos motivos que levou a tomar esta decisão foi tornar possível analisar o sistema a funcionar antes de aplicar os componentes e sistemas desenvolvidos neste projeto, e assim ter um termo de comparação com o resultado obtido. Aliado a este motivo está o custo dos componentes. Concluiu-se com a análise do mercado efetuada, que na maioria dos casos era mais vantajoso financeiramente adquirir um *kit* completo que um motor e uma bateria individualmente. Para além disso, se não se optasse por adquirir um *kit* completo, seria necessário depois adquirir mais alguns componentes essenciais para o funcionamento de uma bicicleta elétrica, como por exemplo o sensor da pedaleira e as manetes de travão com corte de energia. Por fim, a opção por um *kit* tornou-se ainda vantajosa pois simplificou o processo de compra, no sentido em que apenas se lidou com um fornecedor e foi possível comprar tudo de uma vez.

Depois de decidido que seria comprado um *kit*, faltava decidir a configuração pretendida. Como foi analisado anteriormente, a configuração *Mid Drive Motor* é a que apresenta mais vantagens. Por outro lado, é também a mais dispendiosa e, para além disso, havia ainda risco de incompatibilidade do motor com o quadro da bicicleta fornecida para o projeto e maior grau de dificuldade na implementação e teste deste tipo de configuração. Deste modo, optou-se por uma configuração *Hub Motor*.

O *Hub Motor* pode ser instalado na roda da frente ou na de trás. Apesar de um *Hub Motor* na roda da frente ser de mais fácil acesso e manutenção, o que poderia simplificar a implementação e a fase de testes deste projeto, esta configuração apresenta algumas desvantagens em relação a um *Hub Motor* na roda de trás. Deste modo, apesar de mais complexa, optou-se pela configuração *Hub Motor* na roda de trás.

Relativamente à bateria, como se trata de um componente extremamente dispendioso, optou-se por uma bateria atual mais vulgar que vinha incluída no *kit* sobre o qual recaiu a compra. Considerou-se que uma

bateria melhor não acrescentava nada ao normal desenvolvimento do projeto, que é apenas um protótipo, e como não tem como finalidade ser comercializado a sua autonomia final não é muito relevante.

Tendo em conta todos estes critérios de seleção referidos, na Tabela 3.1 são apresentados os *kits* de transformação encontrados na análise de soluções no mercado considerados mais interessantes para utilização neste projeto.

Tabela 3.1 – *Kits* de transformação encontrados mais interessantes.

Loja	Produto	Descrição	Preço
<i>Volt Store</i>	<i>Kit</i> Traseiro https://voltstore.pt/loja/kits/kit-light-250w-quadro-fechado/	Motor 250 W - 36 V, bateria 10.4 Ah tipo tubo com fixação na furação da grade do bidão, sensor PAS, controlador, display.	702 €
<i>Bicicleta Clássica</i>	<i>Kit</i> Traseiro https://www.bicicletaclassica.pt/pt/componentes/sistema-eletrico/kit-eletricos/kit-lcd5-bft-36v-9ah.html	Motor 250 W - 36 V instalado num aro, bateria (várias opções), controlador, display, sensor PAS, acelerador, manetes de travão com corte de energia.	Min 572 €
<i>Sanel Kit</i>	<i>Kit</i> Traseiro https://www.sanelkit.com/product-page/kit-motor-traseiro-36v-250w	Motor 250 W - 36 V instalado num aro, controlador, display, acelerador, sensor PAS, bateria (várias opções).	Min 610 €
<i>Biclas</i>	<i>Kit</i> Traseiro http://www.biclas.com/info/Kit-eletrico-Traseiro-ou-Dianteiro-250W-Bateria-116Ah-Display-digital-2090.html	Motor 250 W - 36 V, controlador, sensor PAS, display, bateria 11.6 Ah tipo tubo com fixação na furação da grade do bidão.	629.99 €

3.4 Componentes Eletrónicos Escolhidos

Tendo em conta o que foi descrito anteriormente e os *kits* encontrados mais interessantes, o *kit* de transformação escolhido foi o *Kit Platinum LCD5*, fornecido pela loja *Bicicleta Clássica*. Os componentes do mesmo são da marca espanhola *Ciclotek*. Quando comparado com as outras opções, este *kit* é dos mais em conta e dos mais completos. Para além disso, a escolha recaiu sobre este *kit* também pela facilidade de comunicação com a loja *Bicicleta Clássica*, que desde logo se disponibilizou a esclarecer todas as dúvidas e se mostrou flexível para ir de encontro às necessidades do projeto.

Este *kit* conta com um *Hub Motor* para a roda de trás de 250 W e 36 V e uma bateria tipo bidão de 11 Ah e também 36 V. Para além destes, o *kit* conta ainda com os restantes componentes necessários para o funcionamento de uma bicicleta elétrica. A totalidade dos componentes incluídos neste *kit* podem ser vistos na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Componentes incluídos no *kit* adquirido.

Depois de recebido o *kit*, passou-se à instalação do mesmo. A bicicleta fornecida para este projeto é apresentada na Figura 3.2, no estado em que se encontrava no laboratório antes de ser usada neste projeto. Esta já tinha sido utilizada em projetos anteriores, encontrando-se com alguns componentes mecânicos em falta que tiveram de ser instalados, e alguns componentes eletrónicos de projetos anteriores instalados que tiveram de ser removidos.



Figura 3.2 – Bicicleta fornecida para o projeto.

Depois de instalados os componentes mecânicos em falta, foram instalados os novos componentes eletrônicos adquiridos. Depois de tudo instalado, procedeu-se à afinação dos sistemas de travagem e transmissão, e realizou-se uma verificação geral da integridade e segurança da bicicleta. O resultado obtido no final desta fase pode ser visto na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Bicicleta com o novo *kit* instalado.

Nesta fase, com a instalação do *kit*, a bicicleta já funcionava integralmente como uma bicicleta elétrica. Foi testada e encontrava-se totalmente funcional.

3.5 Proposta de Solução a Implementar

A proposta de solução a implementar neste projeto é o desenvolvimento de um controlador para ser substituído pelo controlador que vinha incluído no *kit*. Este controlador contemplará tanto a parte de potência como a de controlo.

Depois de montado e testado o funcionamento do *kit* na bicicleta, rapidamente se percebeu que o mesmo não estava em total conformidade com a legislação portuguesa para uma bicicleta elétrica.

Em primeiro lugar, verificou-se que o *kit* vinha equipado com acelerador, tornando possível ao utilizador tirar partido da potência máxima do motor sem qualquer uso dos pedais, algo que não é permitido por lei. Depois verificou-se ainda que a velocidade máxima que era possível atingir com o auxílio do motor elétrico era superior aos 25 km/h permitidos por lei, sendo sensivelmente superior a 30 km/h.

Para além das inconformidades legais, o controlador original não apresentava também nenhum método de travagem regenerativa.

Pretende-se com a proposta de solução a implementar desenvolver um controlador com tecnologia própria, que possibilite circular com a bicicleta nas estradas portuguesas em total conformidade com a legislação nacional e estudar ainda a possibilidade de implementação de algum método de travagem regenerativa de modo a melhorar a eficiência da bicicleta.

3.6 Conclusões

Neste capítulo é definida a proposta de solução a implementar neste projeto. Com a necessidade de aquisição de um motor e uma bateria, inicialmente é feita uma compilação das soluções existentes no mercado e são referidos os critérios de seleção dos componentes. De seguida são apresentados os componentes adquiridos e a bicicleta usada neste projeto, sendo ainda apresentado o aspeto da bicicleta no final desta fase, com os componentes adquiridos já instalados.

Por fim, é definida a proposta de solução a implementar, que consiste no desenvolvimento de um novo controlador para ser substituído pelo controlador adquirido. Este controlador contemplará tanto a parte de potência como a de controlo. O objetivo é que a bicicleta elétrica desenvolvida cumpra todos os requisitos legais para circular nas estradas portuguesas.

Capítulo 4

Simulações Computacionais do Sistema Proposto

4.1 Introdução

Depois de definido que será utilizado um motor BLDC e uma bateria de lítio na realização deste trabalho, neste capítulo serão analisadas as topologias e técnicas de comutação e controlo do motor previamente escolhido. Para além disso, serão ainda apresentadas as simulações realizadas na sequência desta análise.

4.2 Motor BLDC

Como foi visto anteriormente, o motor BLDC é o que mais vantagens apresenta para ser aplicado numa bicicleta elétrica. Este é um motor sem escovas síncrono, ou seja, o campo magnético gerado pelo estator gira à mesma velocidade que o rotor, não existindo deslizamento. Apesar de exigir um controlo caro e complexo, este pode ser totalmente controlado eletronicamente.

O estator de um motor BLDC é constituído por lâminas de aço empilhadas, com os enrolamentos colocados nas ranhuras que são axialmente cortadas ao longo da periferia interna. Apesar deste se assemelhar a um motor de indução, os enrolamentos são distribuídos de forma diferente. A maioria dos motores BLDC têm três enrolamentos de estator ligados em estrela. Cada um destes enrolamentos é construído com várias bobinas interligadas de maneira a formar um enrolamento e é distribuído pela periferia do estator para formar um número par de polos. Existem dois tipos de enrolamentos de estator que visam obter diferentes formas de força contra eletromotriz: trapezoidal e sinusoidal. Esta variação é obtida com base na forma de interligação das bobinas nos enrolamentos do estator. Para uma força contra eletromotriz trapezoidal, a corrente que atravessa os enrolamentos do estator terá uma forma de onda quadrada enquanto que para uma força contra eletromotriz sinusoidal a corrente terá também uma forma de onda sinusoidal.

O rotor de um motor BLDC é feito de ímanes permanentes, podendo variar de dois a oito pares de polos. Baseado na densidade de campo magnético pretendida, é escolhido o material magnético apropriado

para o rotor. Tradicionalmente, ímãs de ferrite são os usados na construção dos ímãs permanentes. Esta é uma boa solução para aplicações de baixo custo pois são baratos, mas têm como desvantagem terem uma baixa densidade magnética. Com o avançar da tecnologia, outros materiais magnéticos estão a ganhar popularidade, nomeadamente samário de cobalto e neodímio de ferro e boro. Estes são mais caros que a ferrite mas apresentam uma densidade magnética maior, permitindo uma maior robustez, maior eficiência e maior binário [26][37].

4.2.1 Princípio de Funcionamento do Motor BLDC

A comutação do motor BLDC é controlada eletronicamente. Para que este funcione corretamente os enrolamentos do estator devem ser energizados segundo uma sequência. Deste modo, é fundamental saber a posição do rotor do motor em cada momento, de forma a saber qual enrolamento deve ser energizado de seguida. Como foi visto anteriormente, esta posição do rotor é obtida através dos sensores de efeito *Hall* incorporados no estator do motor. A maioria dos motores BLDC têm três sensores de efeito *Hall*.

Quando os polos magnéticos do rotor passam perto dos sensores, estes emitem um sinal de saída alto ou baixo, indicando que o polo norte ou sul do enrolamento está a passar perto dos sensores. Com base na combinação dos sinais dos três sensores, pode ser determinada a sequência exata de comutação.

Baseado na posição física dos sensores de efeito *Hall* no estator, existem duas possibilidades para a saída. Os sensores podem apresentar um desfasamento de 60 graus ou 120 graus elétricos entre si. Baseado neste desfasamento, o fabricante define a sequência de comutação que deve ser seguida.

A cada 60 graus elétricos de uma rotação, um dos sensores de efeito *Hall* muda de estado e a alimentação das fases deve ser atualizada. Deste modo, são necessários seis passos para completar um ciclo elétrico. Contudo, um ciclo elétrico pode não corresponder a um ciclo mecânico do motor. O número de ciclos elétricos necessários para completar um ciclo mecânico é determinado pelos pares de polos do rotor. Assim, o número de ciclos elétricos a dividir por um ciclo mecânico é igual ao número de pares de polos [26].

Nos gráficos da Figura 4.1 são apresentadas as forças contraeletromotrizes e as correntes de fase em cada estado do motor em função do estado dos sensores de efeito *Hall* para melhor se compreender a sua relação. É ainda apresentado o binário resultante do motor.

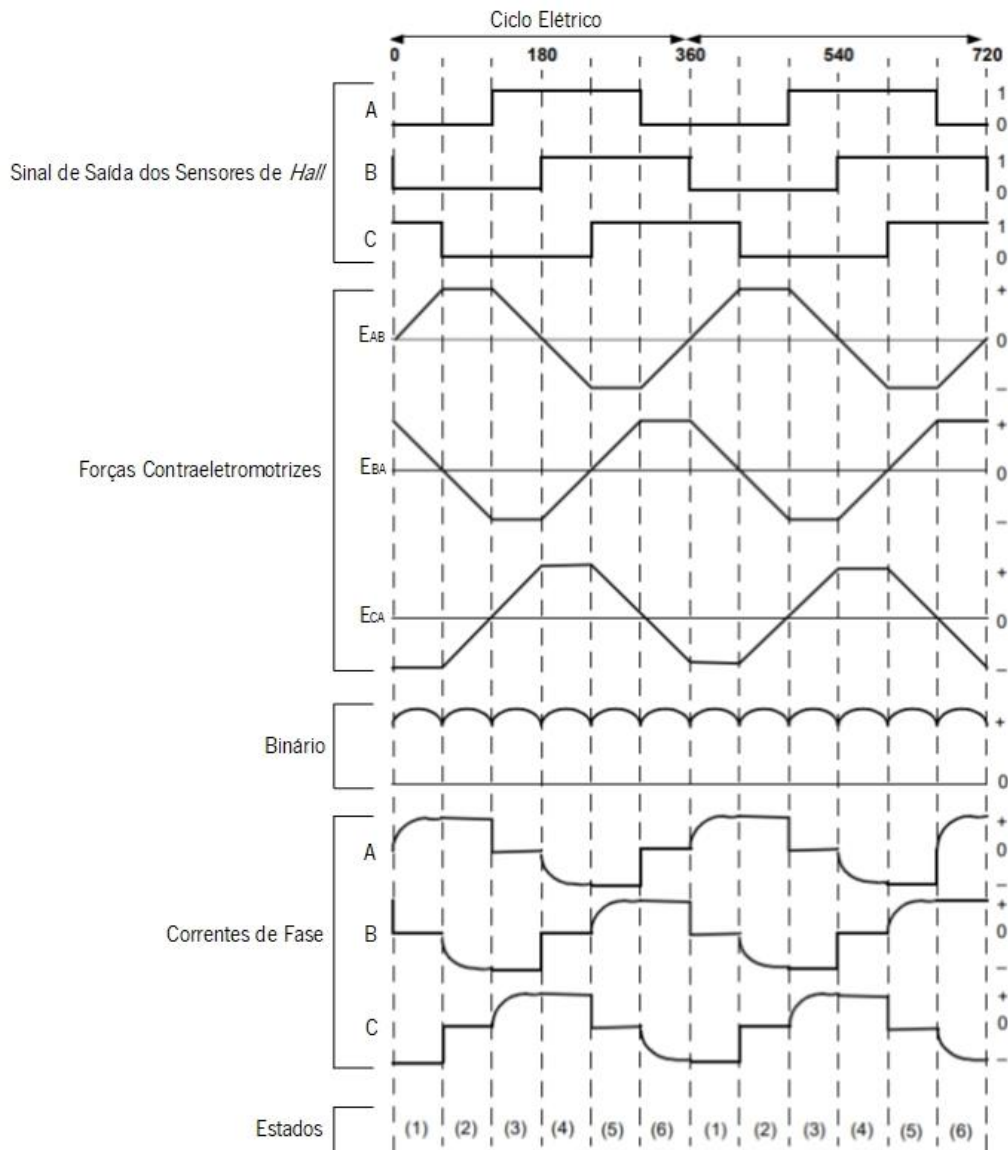


Figura 4.1 – Relação entre os sinais de saída dos sensores de efeito *Hall* e a força contra-eletromotriz, o binário e a corrente de fase em cada estado.

Como é possível verificar, respeitando a sequência de comutação é possível obter um binário quase constante. No entanto, este nunca será linear pois apresenta um *ripple* de comutação a cada 60 graus elétricos devido às transições de corrente não serem instantâneas.

A Figura 4.2 mostra o sentido da corrente nos enrolamentos do motor em cada um dos seis estados da figura anterior, de acordo com a posição fornecida pelos sensores de efeito *Hall*.

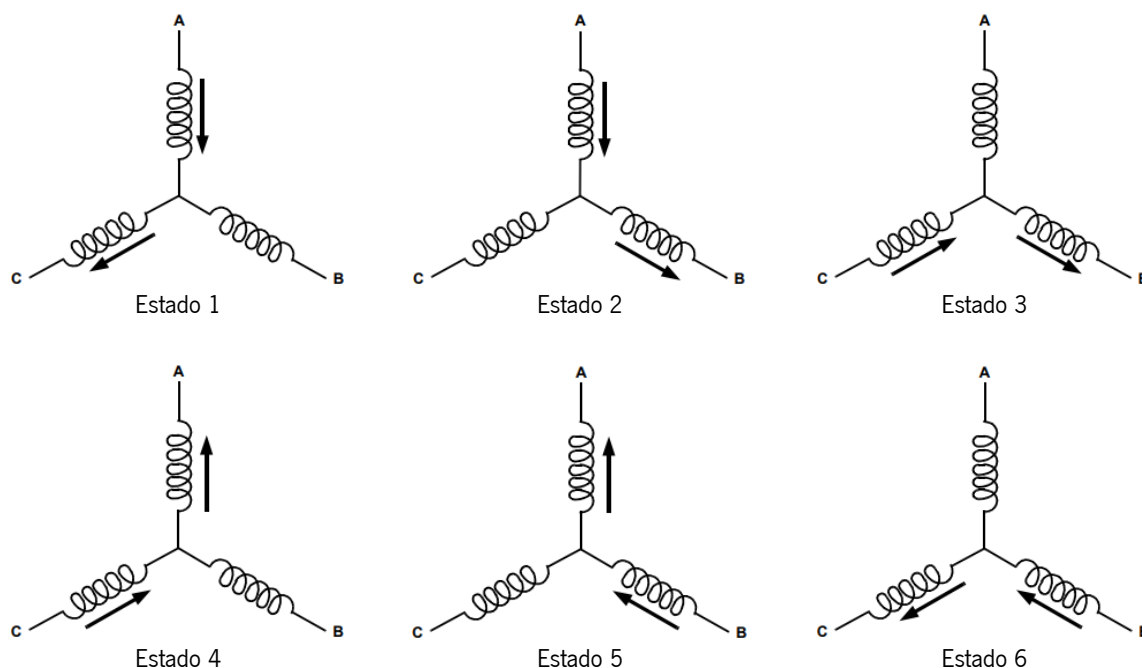


Figura 4.2 – Sentido da corrente nos enrolamentos em cada estado.

4.2.2 Modelos Elétrico e Matemático do Motor BLDC

O modelo elétrico equivalente de um motor BLDC pode ser representado por três fases ligadas em estrela. Cada fase é constituída por uma fonte de tensão, que representa a força contraelectromotriz, e por uma indutância em série com uma resistência, que representam o enrolamento do motor e as perdas associadas ao mesmo. Este modelo elétrico pode ser visto na Figura 4.3, onde L_a , L_b e L_c correspondem à indutância por fase, R_a , R_b e R_c correspondem à resistência, e E_a , E_b e E_c correspondem às forças contraeletromotrizes geradas por fase do motor BLDC [37].

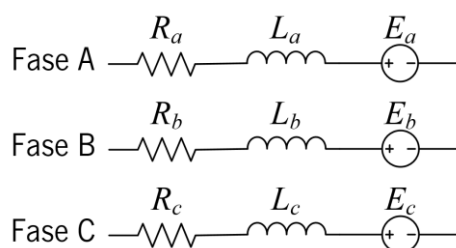


Figura 4.3 – Modelo elétrico do motor BLDC.

Este modelo do motor BLDC pode ser analisado ao pormenor matematicamente [37][38]. Partindo da equação geral de um motor síncrono de ímanes permanentes, o modelo matemático do motor BLDC trifásico pode ser representado pelas equações (4.1).

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & L_{ba} & L_{ca} \\ L_{ab} & L_b & L_{cb} \\ L_{ac} & L_{bc} & L_c \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Como o sistema é ligado em estrela sem neutro, a soma das três correntes é igual a zero:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (4.2)$$

Assumindo que as indutâncias de fase são independentes da posição do rotor e que o sistema é equilibrado, tem-se as equações:

$$L_a + L_b + L_c = L \quad (4.3)$$

$$L_{ab} + L_{ac} + L_{ba} + L_{bc} + L_{ca} + L_{cb} = M$$

Assumindo ainda que as resistências de fase são iguais, obtém-se:

$$R_a + R_b + R_c = R \quad (4.4)$$

Aplicando as equações (4.2), (4.3) e (4.4), a equação inicial (4.1) pode ser reduzida a:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

A equação anterior (4.5) pode ainda ser simplificada, obtendo-se (4.6):

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Quando uma corrente atravessa um enrolamento do motor, a energia é dissipada sob a forma de calor pela resistência do enrolamento, e é gerada uma força contraelectromotriz de sinal contrário à da tensão aplicada, como é perceptível analisando o modelo elétrico equivalente do motor na Figura 4.3. A potência absorvida por cada enrolamento é igual ao produto entre a força contraelectromotriz de cada fase (E_x) e a corrente de fase (i_x). De modo a satisfazer a lei da conservação da energia, esta potência absorvida é convertida em energia mecânica, que é dada pelo produto do binário produzido (T) com a velocidade angular (ω_r). Assim, obtém-se a equação (4.7):

$$E_x i_x = T \omega_r \quad (4.7)$$

Quando o motor tem mais de uma fase, aplica-se o princípio da conservação de energia para todas as fases. Para as três fases do motor BLDC, chega-se à equação (4.8):

$$T \omega_r = E_a i_a + E_b i_b + E_c i_c \quad (4.8)$$

Modificando a equação (4.8), o binário produzido pelo motor pode ser calculado através da equação (4.9):

$$T = \frac{E_a i_a + E_b i_b + E_c i_c}{\omega_r} \quad (4.9)$$

4.2.3 Conversores de Eletrónica de Potência para Motores BLDC

Os conversores de potência necessários para controlar os motores BLDC e garantir que a sua sequência de comutação é respeitada são os inversores, também denominados por conversores CC-CA. Como o próprio nome indica, estes têm como objetivo transformar uma tensão ou corrente contínua numa tensão ou corrente alternada periódica, com amplitude e frequência controlada.

Conforme a grandeza física que se pretende transformar, estes possuem um barramento CC composto por elementos armazenadores de tensão ou elementos armazenadores de corrente. Dependendo do tipo de elementos armazenadores de energia, os inversores são denominados por inversor fonte de tensão, se a tensão de entrada for constante, ou por inversor fonte de corrente, se a corrente de entrada for constante. Nesta dissertação, será utilizado um inversor fonte de tensão e o elemento armazenador de tensão, que permitirá uma tensão constante no barramento CC, será a bateria.

Existem alguns tipos de inversores fonte de tensão passíveis de serem aplicados no controlo de um motor BLDC, sendo que o que será utilizado nesta dissertação é o inversor trifásico.

O inversor trifásico fonte de tensão é constituído por uma fonte de tensão no barramento CC e por seis semicondutores, normalmente MOSFET ou IGBT, que incluem os respetivos díodos de *freewheeling*. Na Figura 4.4 está representado o esquema de ligação entre o inversor trifásico e o motor BLDC

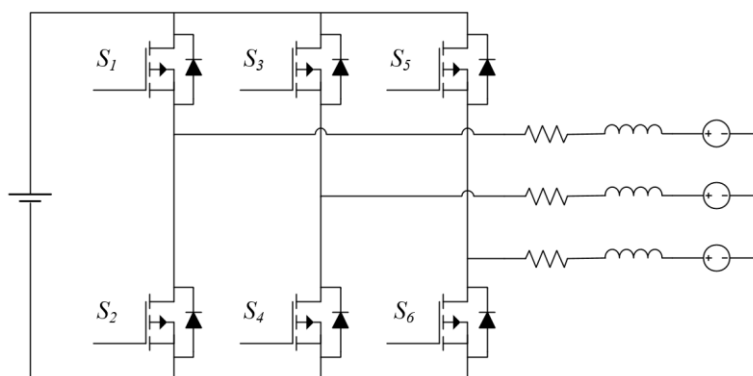


Figura 4.4 – Esquema de ligação entre o inversor trifásico e o modelo do motor BLDC.

Os semicondutores são utilizados para controlar a comutação dos estados de alimentação dos enrolamentos do estator. Independentemente da técnica de modulação usada no controlo do inversor, é necessário que dois semicondutores do mesmo braço do inversor nunca estejam ativos em simultâneo, de modo a garantir que a fonte não é curto-circuitada [26][39].

4.2.4 Técnicas de Modulação para Inversores Trifásicos

As técnicas de modulação para inversores trifásicos são utilizadas para controlar o funcionamento do inversor e consequentemente o do próprio motor. Estas são usadas para modelar a tensão contínua do barramento CC numa tensão alternada com a amplitude e frequência pretendidas.

Mediante as características da tensão alternada pretendida, a modulação para inversores trifásicos pode ser do tipo: onda quadrada, SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*) ou SVPWM (*Space Vector Pulse Width Modulation*). Como o motor utilizado será alimentado com tensões trapezoidais, a técnica utilizada será a modulação de onda quadrada, que é também a técnica mais simples para controlar um inversor trifásico.

Esta técnica pode ser implementada de duas formas distintas ao nível dos sinais aplicados aos semicondutores, podendo ser utilizada a modulação de onda quadrada a 180 graus e a modulação de onda quadrada a 120 graus. Para ambos os tipos de modulação existe um total de seis estados por ciclo e cada um deles tem a duração de 60 graus.

No entanto, na modulação de onda quadrada a 180 graus, cada semicondutor está ativo durante 180 graus e em cada estado estão ativos três dos seis semicondutores e são alimentados os três enrolamentos do estator.

Já na modulação de onda quadrada a 120 graus, que será a modulação utilizada, cada semicondutor está ativo durante 120 graus e em cada estado apenas dois dos seis semicondutores estão ativos (um da parte superior e um da parte inferior), limitando assim a condução de corrente a dois dos três enrolamentos [26][39].

Na Tabela 4.1 e Tabela 4.2 são apresentados dois exemplos de uma possível sequência de estados utilizando a modulação de onda quadrada a 120 graus. Estas demonstram que semicondutores estão ativos em cada estado baseado nos sinais lidos nos sensores de efeito *Hall*. Dependendo do tipo de sensores de efeito *Hall*, estes sinais podem tomar valores de $-V_{cc}$, 0 e V_{cc} ou apenas 0 e V_{cc} .

Tabela 4.1 – Exemplo de sequência de comutação com modulação a 120 graus, para sensores com saída de 3 níveis ($-V_{cc}$, 0 e V_{cc}).

Estado	S1	S2	S3	S4	S5	S6	HA	HB	HC
1	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	1	0	-1
2	ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	1	-1	0
3	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	ON	0	1	-1
4	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	-1	1	0
5	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	0	-1	1
6	OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF	-1	0	1

Tabela 4.2 – Exemplo de sequência de comutação com modulação a 120 graus, para sensores com saída de 2 níveis (0 e V_{cc}).

Estado	S1	S2	S3	S4	S5	S6	HA	HB	HC
1	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	1	0	0
2	ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	1	0	1
3	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	ON	1	1	0
4	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	0	1	0
5	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	0	0	1
6	OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF	0	1	1

Nos esquemáticos da Figura 4.5 é possível ver quais dos três enrolamentos são alimentados em cada estado da tabela anterior.

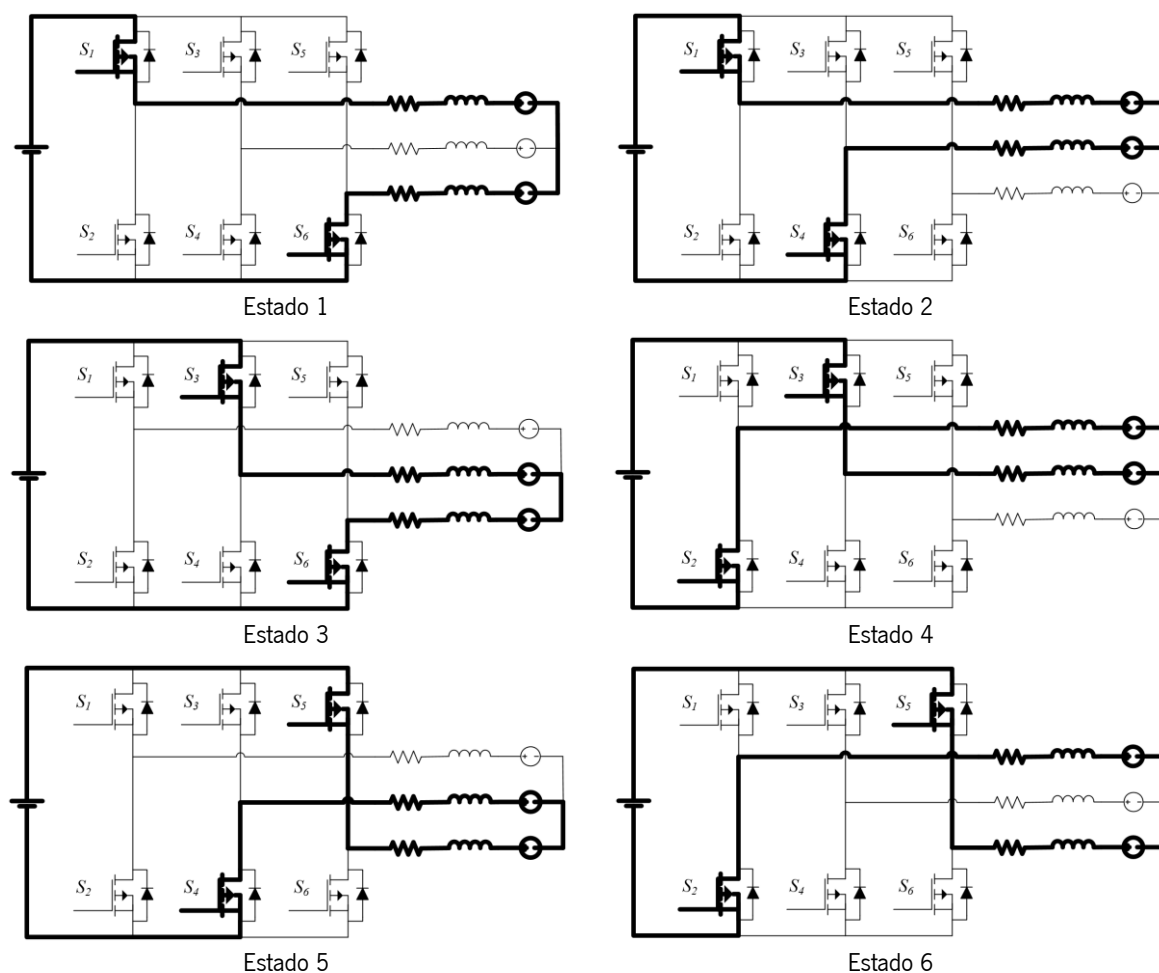


Figura 4.5 – Estados de excitação dos enrolamentos do motor BLDC.

4.3 Travagem Regenerativa

Métodos de travagem regenerativa melhoram a eficiência de qualquer tipo de VE. Estes métodos permitem que durante as travagens mecânicas a energia que geralmente é dissipada como calor seja reaproveitada para carregar a bateria do veículo. Assim, com os avanços tecnológicos nas baterias e condensadores, utilizando processos de travagem regenerativa, é possível aproveitar melhor a energia, levando a uma melhor eficiência energética e conseqüentemente a um maior alcance do veículo [40].

No motor BLDC, a travagem regenerativa pode ser obtida quando o motor funciona como gerador. Este processo consiste em redirecionar a corrente produzida pelos enrolamentos do motor de volta para a bateria. Assim, sem a integração de hardware adicional e utilizando as técnicas de controlo apropriadas, recorrendo ao mesmo inversor trifásico usado para controlar o motor é possível recarregar as baterias. Comutando apenas os semicondutores da parte inferior do inversor e deixando os da parte superior desligados, é possível obter um circuito de *step-up* para cada fase do motor, que tem como objetivo

e elevar a tensão gerada pelo motor e posteriormente direcionar a energia gerada para as baterias, carregando-as [40][41].

Recorrendo aos sinais provenientes dos sensores de efeito *Hall* presentes no motor, é aplicado ao MOSFET inferior de cada braço um sinal PWM de *duty cycle* variável. Este valor de *duty cycle* está diretamente relacionado com o binário de travagem que será produzido pelo motor BLDC.

Na Figura 4.6 são apresentados os dois modos de operação do inversor trifásico durante o processo de travagem regenerativa para o estado 2 da sequência de comutação previamente apresentada, sendo que o processo é análogo para os restantes estados. Na Figura 4.6(a), o semicondutor da parte inferior encontra-se ligado, e a corrente flui nos enrolamentos a e b, acumulando energia nos mesmos. Na Figura 4.6(b), todos os semicondutores são desligados e a corrente flui dos enrolamentos com energia acumulada para a bateria, carregando-a [41][42].

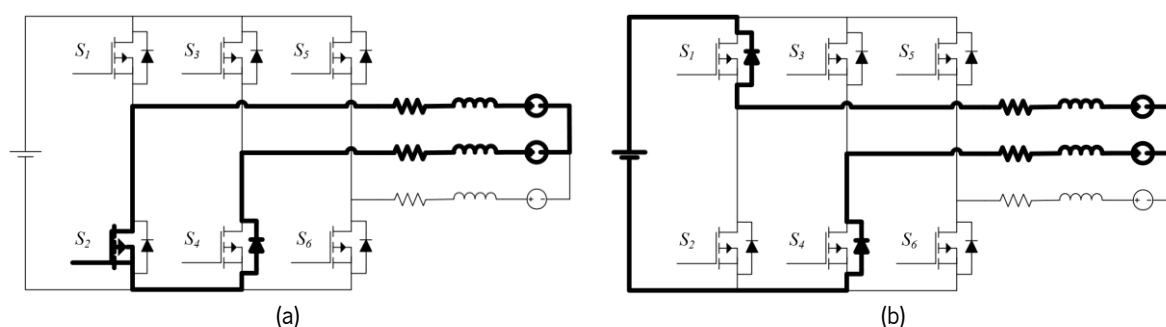


Figura 4.6 – Modos de operação do inversor durante o processo de travagem regenerativa para o estado 2 da sequência de comutação previamente apresentada.

Apesar do estudo destes métodos de travagem regenerativa aqui apresentados e os mesmos ainda terem sido simulados com sucesso, infelizmente, depois de estudado o motor que será usado, verificou-se que estes métodos de travagem regenerativa não são aplicáveis no mesmo. Por outro lado, a impossibilidade de aplicação destes métodos traz também algumas vantagens.

Estes métodos de travagem regenerativa implicam que, quando a bicicleta está em movimento e o motor não é alimentado, este rode para funcionar como gerador. Tal não acontece no motor utilizado. Este apresenta um mecanismo de roda livre, ou seja, quando a bicicleta está em movimento e o motor não é alimentado, o rotor gira em conjunto com o estator sobre algum tipo de rolamento que existe entre o rotor e o veio da roda da bicicleta, impossibilitando o funcionamento deste motor como gerador.

Apesar de não ser possível aplicar travagem regenerativa nesta configuração, considerou-se que a mesma traz algumas vantagens relevantes. Apesar da autonomia ser fixa e nunca ser regenerada, esta

configuração permite utilizar a bicicleta elétrica como uma bicicleta convencional a qualquer momento, pois quando a parte elétrica é desligada, a bicicleta roda livremente e o utilizador não tem de fazer o esforço extra para compensar a inércia do motor, algo que não acontece em bicicletas elétricas com travagem regenerativa.

Para além disto, o facto de não se implementar travagem regenerativa contribui também para o arrefecimento do sistema e para aumentar a sua longevidade, pois um motor a operar como gerador também se desgasta e aquece.

4.4 Simulações do Sistema de Controlo do Motor BLDC

A simulação de um sistema é uma fase muito importante no desenvolvimento de qualquer projeto eletrónico. Esta fase permite comparar facilmente diferentes abordagens, validar os elementos integrantes do projeto e, principalmente, detetar eventuais erros prematuramente, podendo assim os mesmos serem corrigidos antes de serem implementados.

Para o desenvolvimento do controlador da bicicleta elétrica, a ferramenta de simulação utilizada foi o PSIM. Esta ferramenta é um simulador robusto, intuitivo e de fácil utilização. Permite a utilização de diversos blocos funcionais que modelam diferentes componentes, como é o caso do motor BLDC e do bloco C, que permite a implementação de software na mesma linguagem de programação que será utilizada na realização deste projeto.

Assim, ao longo deste subcapítulo são apresentadas as simulações efetuadas para validação dos conceitos apresentados previamente.

4.4.1 Circuito de Potência

O circuito de potência do sistema a desenvolver é constituído por um conversor de potência, a bateria e o motor. Como visto previamente, o conversor de potência que será utilizado é o inversor trifásico, constituído por 6 semicondutores. Neste modelo de simulação, os semicondutores utilizados foram MOSFET. Para simular a bateria, foi adicionada uma fonte de tensão contínua. Para representar o motor BLDC, foi utilizado o bloco disponível no simulador PSIM que simula este tipo de motor, denominado BDCM (*Brushless DC Machine*). O circuito de potência é apresentado na Figura 4.7.

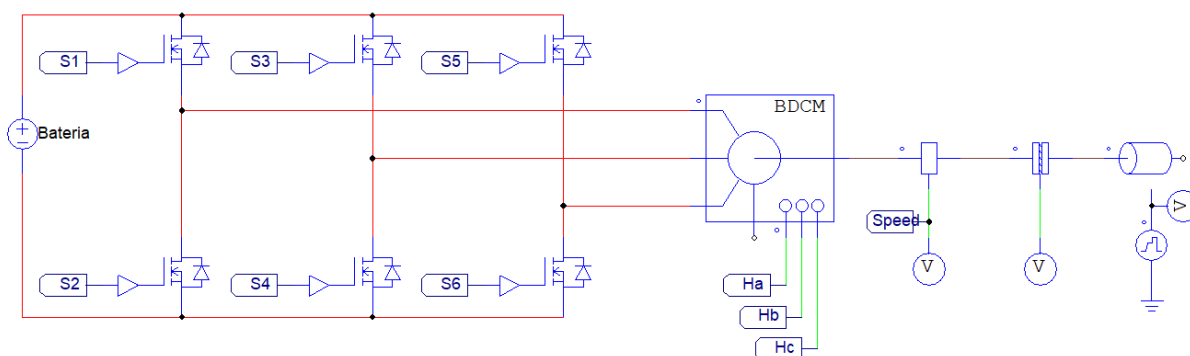


Figura 4.7 – Circuito de potência implementado para simulações computacionais.

Para além dos componentes já referidos, na Figura 4.7 podem ser vistos ainda as saídas dos 3 sensores de efeito *Hall* do motor, um sensor de velocidade, um sensor de binário e uma carga.

4.4.2 Circuito de Controlo

O circuito de controlo implementado para simulação do sistema consiste num bloco C com 6 entradas e 6 saídas. 3 das entradas são os sinais dos sensores de efeito *Hall* e as restantes 3 serão utilizadas para implementação do controlo de velocidade. No bloco C foi implementada por software a sequência de comutação do motor e posteriormente o controlo de velocidade. As 6 saídas correspondem aos sinais de comando das *gates* dos MOSFET do inversor trifásico. O circuito de controlo é apresentado na Figura 4.8.

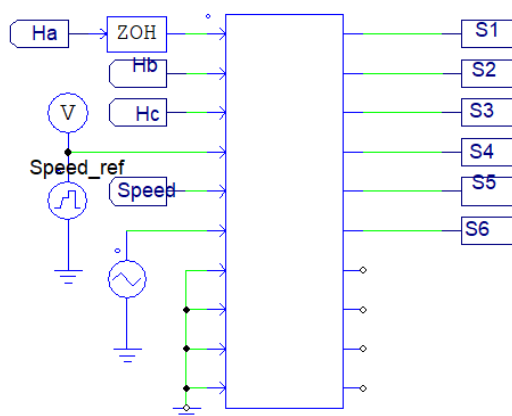


Figura 4.8 – Circuito de controlo implementado para simulações computacionais.

4.4.3 Resultados de Simulação

Nesta secção são apresentados os resultados de simulação para os circuitos previamente descritos. Inicialmente são apresentados os resultados de simulação sem nenhum tipo de controlo, apenas aplicando a sequência de comutação de acordo com as saídas dos sensores de efeito *Hall*, de forma a

validar que o motor funciona corretamente. De seguida, são apresentados resultados com o controlo de velocidade que se pretende implementar. Por fim, são adicionadas cargas de forma a analisar o comportamento e resposta do sistema às mesmas.

4.4.3.1 Resultados com o Motor em Vazio sem Controlo de Velocidade

Esta simulação tem como objetivo aplicar a sequência de comutação do motor em função da saída dos sensores de efeito *Hall* e desta forma validar que o motor funciona corretamente. Pretende-se analisar os sinais dos sensores de efeito *Hall*, os sinais de comando das *gates* dos MOSFET e as formas de onda das tensões e correntes no motor.

Na Figura 4.9 são apresentados os três sinais provenientes dos sensores de efeito *Hall*. Como é possível verificar, os sensores de efeito *Hall* do modelo do motor BLDC do PSIM apresentam uma saída de 3 níveis ($-V_{cc}$, 0 e V_{cc}). Esta será a única vez que os mesmos serão apresentados ao longo deste capítulo de simulações, pois para todas as simulações os sinais serão idênticos. O único parâmetro que irá variar nestes sinais é a sua frequência, que será tanto maior quanto maior for a velocidade do motor.

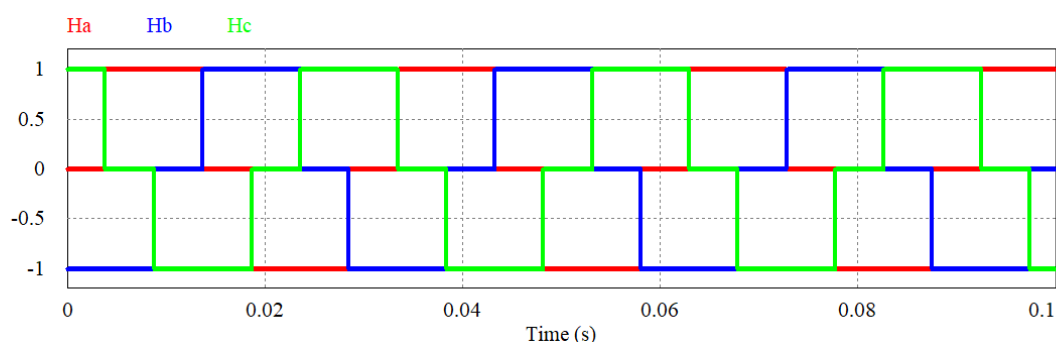


Figura 4.9 – Sinais de saída dos sensores de efeito *Hall* do motor BLDC.

De seguida, são apresentados os sinais de comando das *gates* dos MOSFET em função dos sinais provenientes dos sensores de efeito *Hall*, aplicando a sequência de comutação. A Figura 4.10 mostra os sinais de comando dos MOSFET da parte superior do inversor trifásico. A Figura 4.11 mostra os sinais de comando dos MOSFET da parte inferior do inversor trifásico.

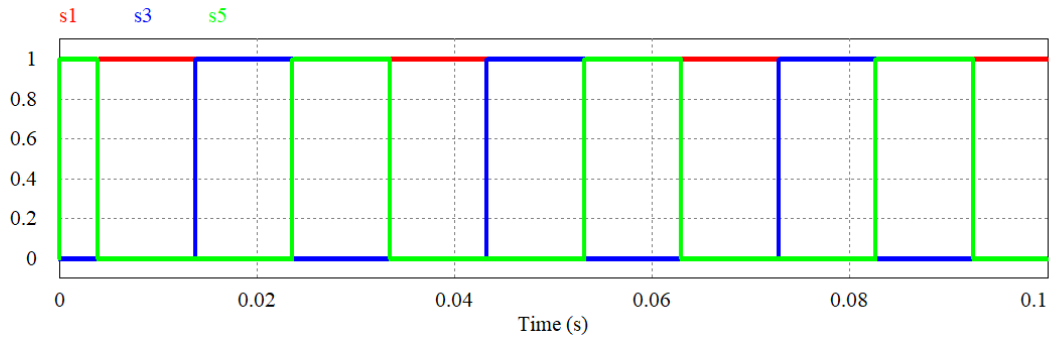


Figura 4.10 – Sinais de comando dos MOSFET da parte superior do inversor.

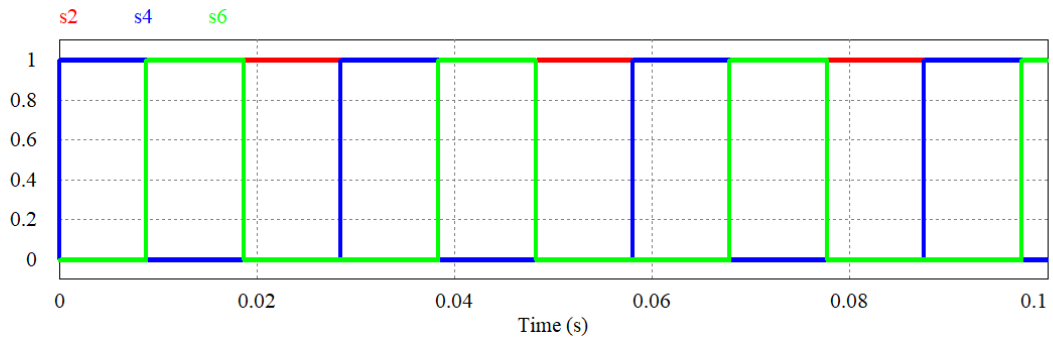


Figura 4.11 – Sinais de comando dos MOSFET da parte inferior do inversor.

As formas de onda das tensões compostas aplicadas ao motor em vazio são apresentadas na Figura 4.12. Esta simulação permite analisar as tensões trapezoidais aplicadas aos terminais do motor BLDC.

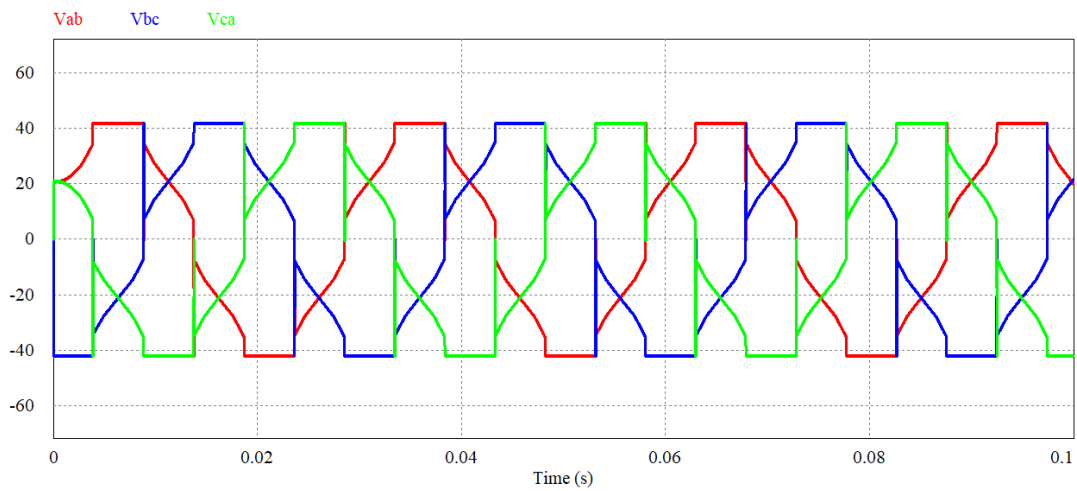


Figura 4.12 – Tensões compostas aplicadas ao motor BLDC em vazio.

Na Figura 4.13 são apresentadas as formas de onda das correntes consumidas pelo motor em vazio. Como se pode verificar, a forma de onda de cada fase é praticamente quadrada, formando o conjunto das 3 fases uma onda quase linear. Deste modo, o binário produzido pelo motor é praticamente constante.

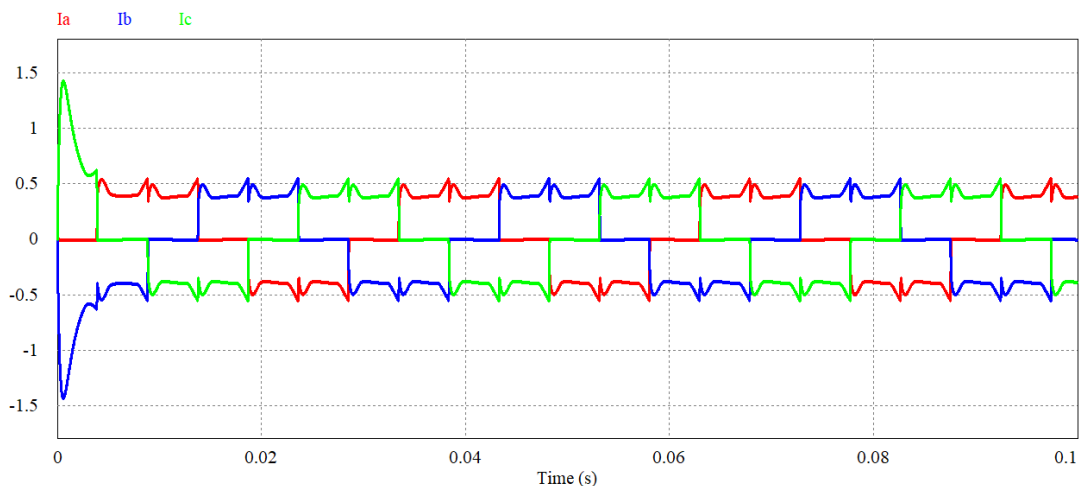


Figura 4.13 – Correntes consumidas pelo motor BLDC em vazio.

Nas simulações foi utilizada uma fonte ideal de tensão de 42 V, que é o valor da tensão da bateria totalmente carregada. Na Figura 4.14, é apresentada a velocidade do motor para as condições em que foram efetuadas estas simulações. Como ainda não foi implementado nenhum tipo de controle, este valor de velocidade representa a velocidade máxima que o modelo do motor BLDC do PSIM consegue atingir para este valor de tensão.

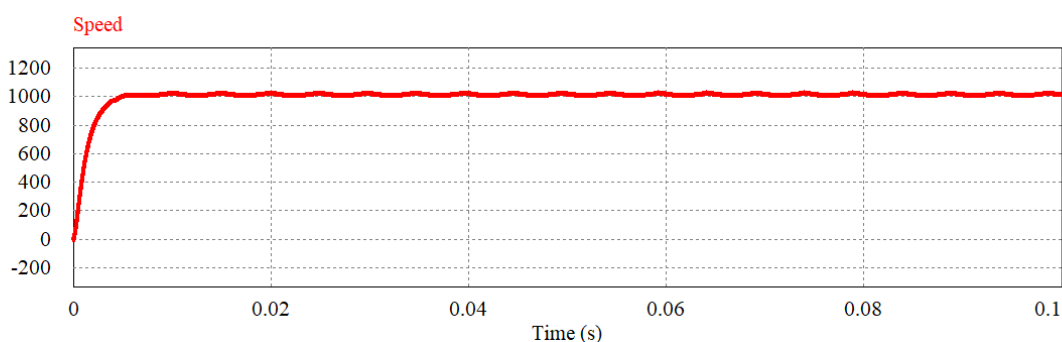


Figura 4.14 – Velocidade do Motor BLDC.

Com esta simulação foi possível validar o sistema de controle. Verificou-se que os parâmetros analisados foram de encontro ao esperado e que o motor funcionava corretamente. De seguida, será implementado o controle de velocidade.

4.4.3.2 Resultados com o Motor em Vazio com Controle de Velocidade

Depois de obtidos os resultados esperados na simulação anterior, tendo como base a mesma, passou-se à implementação do controle de velocidade.

No trabalho prático, pretende-se implementar um controle de velocidade que permita ao utilizador variar linearmente a velocidade de referência através de um potenciômetro. No entanto, para efeitos desta

simulação, foram utilizados apenas 3 valores de velocidade de referência. Desta forma torna-se mais intuitivo analisar as alterações provocadas pelas transições entre estes 3 valores. Para além disso, sabe-se que se o controlo de velocidade funcionar para estes 3 valores de velocidade de referência funcionará também para uma variação linear da mesma.

Para simular o controlo de velocidade foi utilizada uma fonte de tensão com 3 níveis de tensão, que correspondem aos 3 valores de velocidade de referência. Cada valor de tensão ao ser utilizado como referência de velocidade, é subtraído à velocidade atual do motor, sendo assim obtido o erro da velocidade. Este erro é processado por um controlador PI implementado por software no bloco C, de onde resulta a referência do valor de *duty cycle* a aplicar nos MOSFET do inversor trifásico. Na Figura 4.15 é apresentado o diagrama de blocos do controlador PI implementado por software.

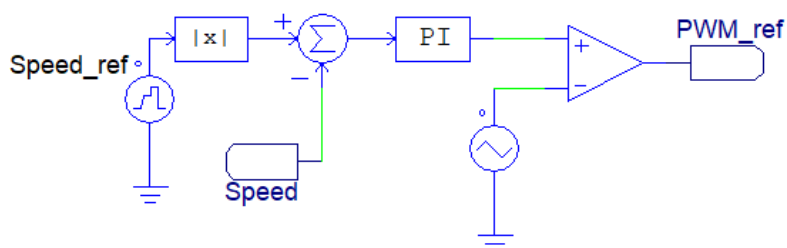


Figura 4.15 – Diagrama de blocos do controlador PI.

Recorrendo a este processo, a Figura 4.16 mostra o comportamento da velocidade atual em função dos 3 valores de velocidade de referência, verificando-se o seu esperado funcionamento. Os valores de velocidade de referência utilizados foram 200 rpm para o período de simulação de 0 a 0.2 segundos, 500 rpm de 0.2 a 0.4 segundos e 900 rpm de 0.4 a 0.6 segundos. Estes valores e respetivos intervalos de tempo foram mantidos nos restantes resultados de simulação apresentados.

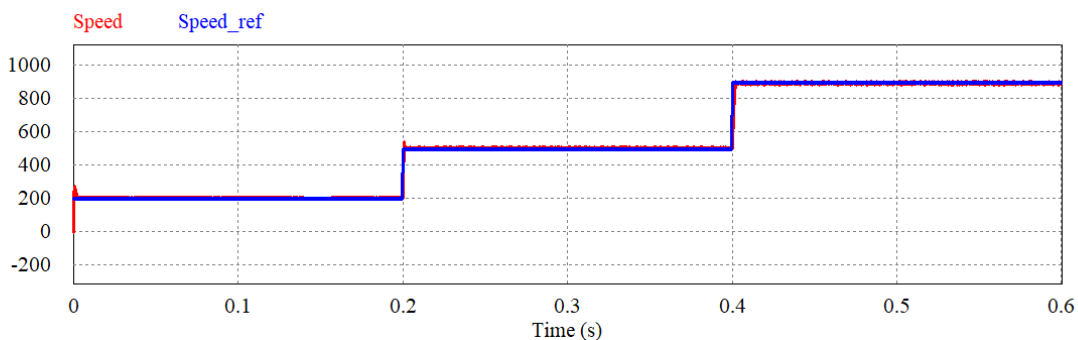


Figura 4.16 – Velocidade de referência e velocidade atual do motor BLDC.

O controlo de velocidade baseia-se no controlo da tensão aplicada aos terminais do motor BLDC. Para controlar esta tensão é modulada a largura de pulso dos sinais de comando dos MOSFET da parte

superior do inversor trifásico. Apesar de se poder aplicar os mesmos sinais modulados aos MOSFET da parte de baixo, seria uma redundância, levando a um desgaste e aquecimento desnecessários. Esta modulação tem como referência o valor do *duty cycle* resultante do controlador PI.

Na Figura 4.17 podem ser vistos os sinais de comando dos MOSFET da parte superior do inversor, modulados pelo controlador PI, para as 3 velocidades. Foi aumentado um pequeno segmento do sinal para ser perceptível a modulação efetuada. Na Figura 4.18 são apresentados os sinais de comando dos MOSFET da parte inferior do inversor, sem modulação, para as 3 velocidades.

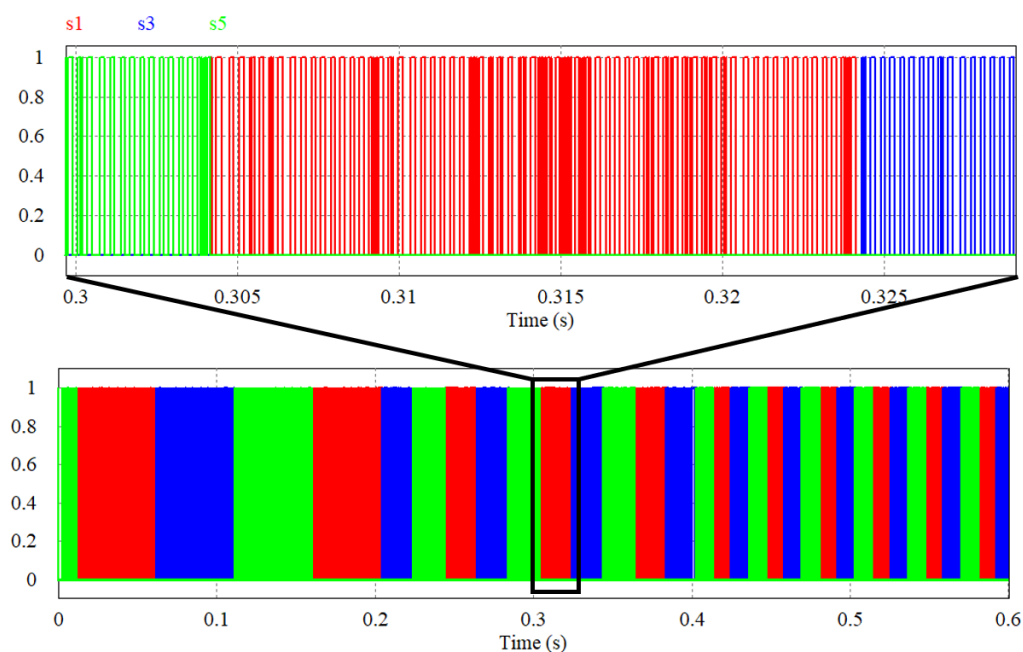


Figura 4.17 – Sinais de comando dos MOSFET da parte superior do inversor com controlo de velocidade.

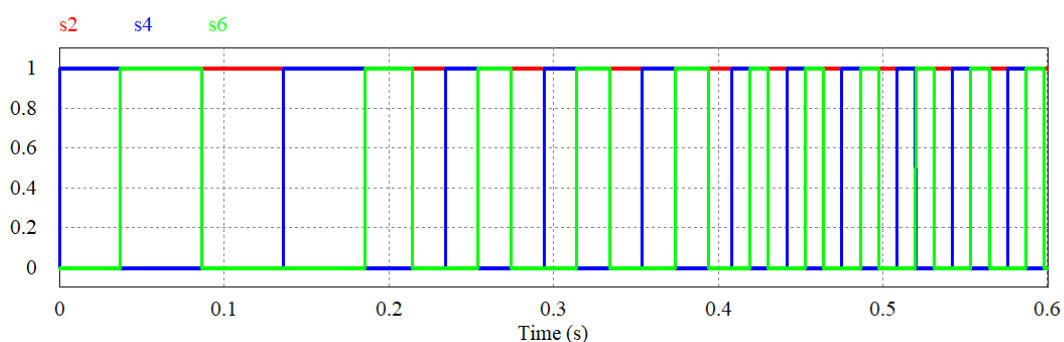


Figura 4.18 – Sinais de comando dos MOSFET da parte inferior do inversor com controlo de velocidade.

Na Figura 4.19 são apresentadas as formas de onda das tensões compostas fornecidas ao motor BLDC para as 3 velocidades.

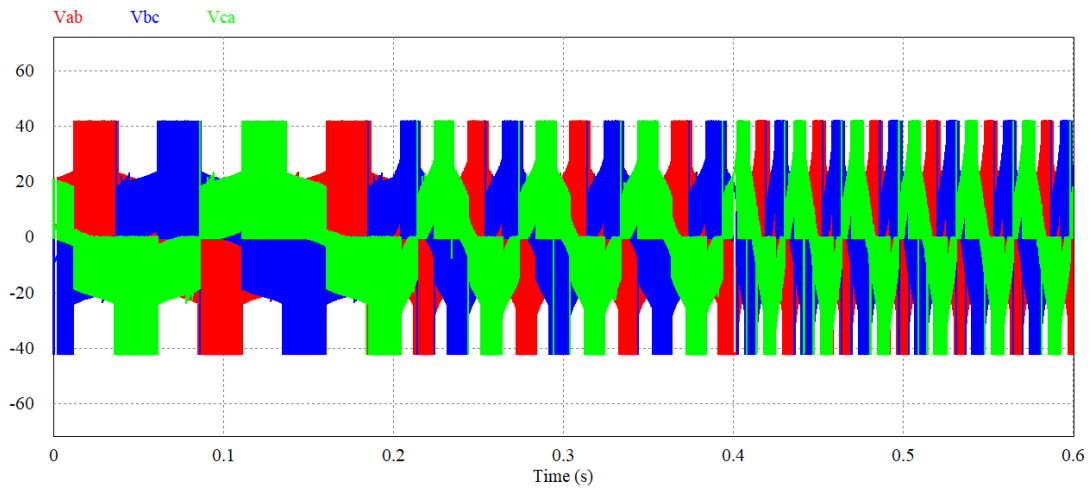


Figura 4.19 – Tensões compostas aplicadas ao motor BLDC com controle de velocidade.

Na Figura 4.20 são apresentadas as formas de onda das correntes de fase consumidas pelo motor BLDC para as 3 velocidades. Os picos de corrente ocorrem na mudança da referência de velocidade. Como seria de esperar, quanto maior a velocidade, ligeiramente maiores as amplitudes das correntes de fase. Quando o motor for colocado em carga, espera-se que estas amplitudes aumentem consideravelmente.

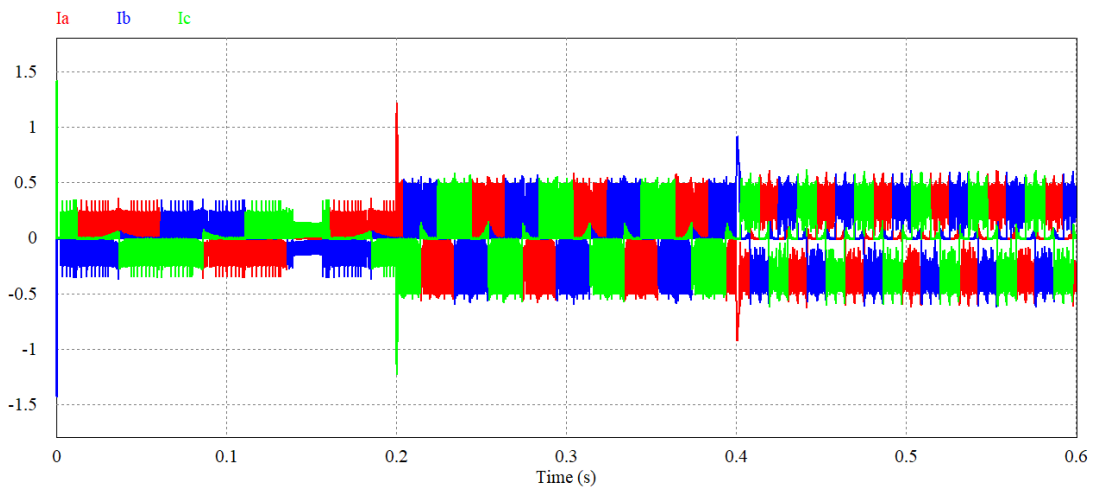


Figura 4.20 – Correntes consumidas pelo motor BLDC com controle de velocidade.

Após a validação do sistema de controle de velocidade do controlador do motor BLDC a funcionar em vazio, de seguida é analisado o comportamento do mesmo em carga.

4.4.3.3 Resultados com o Motor em Carga com Controlo de Velocidade

Após a validação do correto funcionamento do motor em vazio e do algoritmo de controlo de velocidade, de seguida serão apresentados resultados de simulação para o motor em carga.

Para isso foi utilizada uma carga mecânica externamente controlada, disponível no PSIM. Esta carga mecânica quando ligada ao motor permite simular diversos níveis de carga mecânica durante a simulação. Estes níveis de carga são definidos por uma fonte de tensão ligada ao sinal de controlo da carga mecânica. O valor de tensão desta fonte é proporcional ao valor de carga mecânica produzida.

Com o aumento da carga, para um determinado valor de tensão, a velocidade máxima que um motor BLDC consegue alcançar diminui. Deste modo, para esta simulação surgiu a necessidade de aumentar o valor da fonte de tensão do motor ou de reduzir as velocidades que vêm sido utilizadas. De forma a manter as velocidades coerentes, optou-se por aumentar o valor da fonte de tensão. Para o modelo de simulação do motor BLDC do PSIM atingir as velocidades pretendidas com as cargas a simular foi necessário aumentar esta tensão para os 350 V. Com o motor real e as velocidades necessárias reais, tal não acontecerá.

As formas de onda dos sinais de comando dos MOSFET e das tensões compostas são idênticas sem e com carga, apenas variam ligeiramente a sua modulação pois com carga existem mais oscilações de velocidade. Desta forma, como estas formas de onda já foram apresentadas previamente, não é relevante fazê-lo novamente. Nesta simulação, é relevante observar a resposta da velocidade em função da velocidade de referência e as correntes de fase. De seguida, são apresentadas estas formas de onda para três valores diferentes de carga, 1 Nm, 2 Nm e 3 Nm. Para 1 Nm de carga, a velocidade em função da velocidade de referência é apresentada na Figura 4.21. A corrente de fase é apresentada na Figura 4.22.

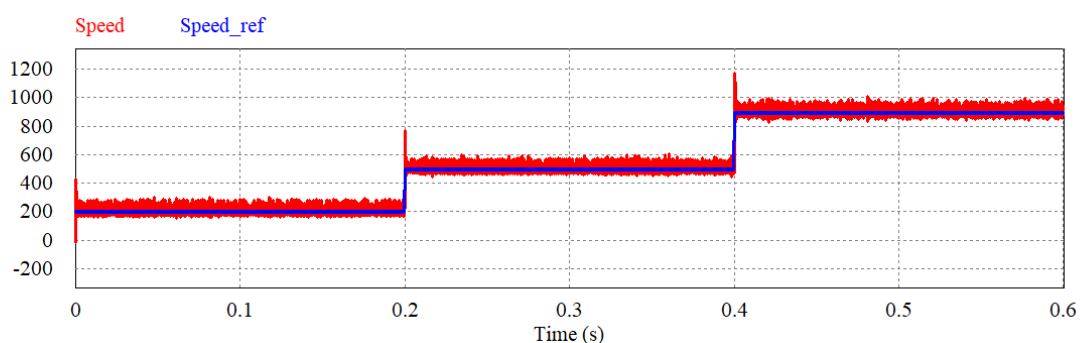


Figura 4.21 – Velocidade de referência e velocidade atual do motor BLDC com controlo de velocidade e uma carga de 1 Nm.

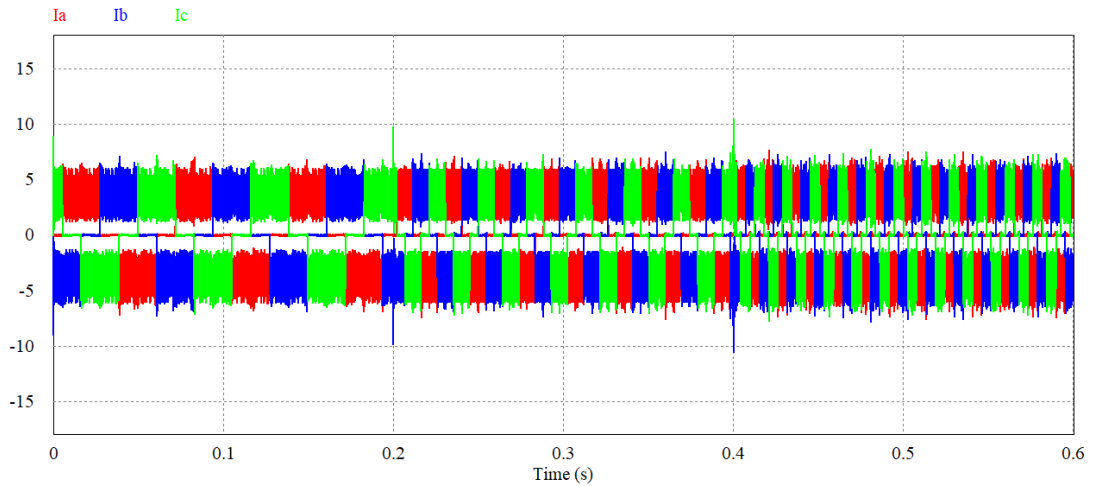


Figura 4.22 – Correntes consumidas pelo motor BLDC com controle de velocidade e uma carga de 1 Nm.

Para 2 Nm de carga, a velocidade em função da velocidade de referência é apresentada na Figura 4.23.

A corrente de fase é apresentada na Figura 4.24.

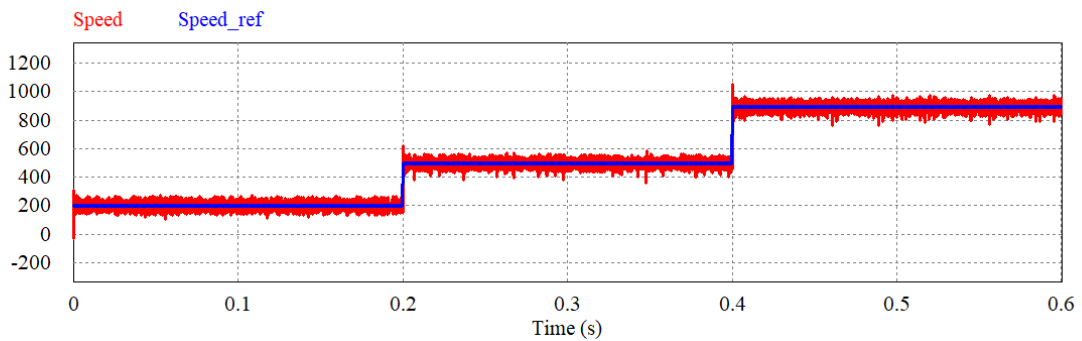


Figura 4.23 – Velocidade de referência e velocidade atual do motor BLDC com controle de velocidade e uma carga de 2 Nm.

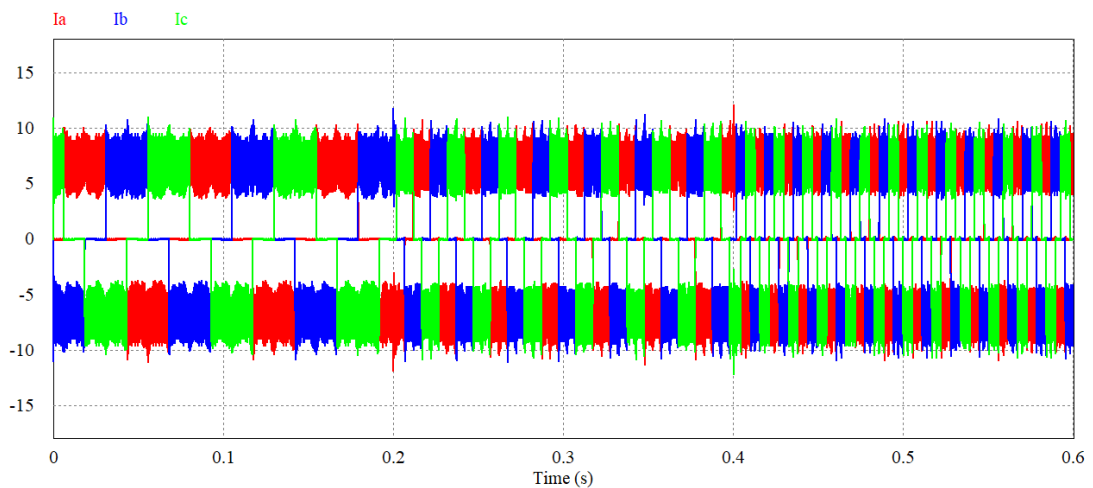


Figura 4.24 – Correntes consumidas pelo motor BLDC com controle de velocidade e uma carga de 2 Nm.

Para 3 Nm de carga, a velocidade em função da velocidade de referência é apresentada na Figura 4.25.

A corrente de fase é apresentada na Figura 4.26.

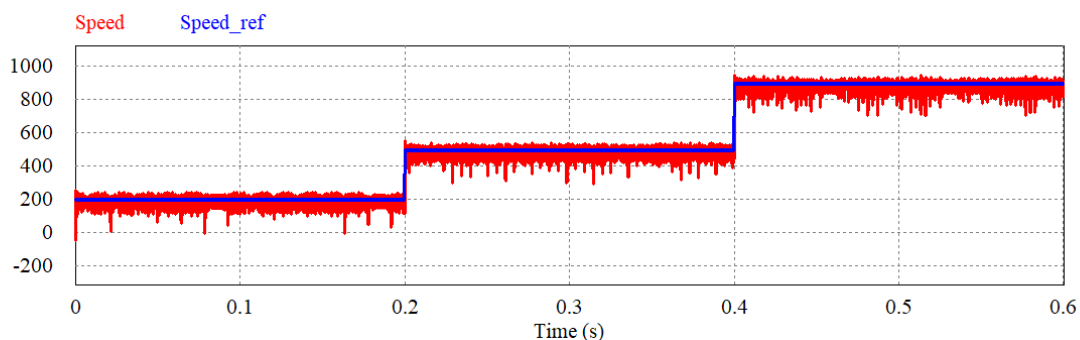


Figura 4.25 – Velocidade de referência e velocidade atual do motor BLDC com controlo de velocidade e uma carga de 3 Nm.

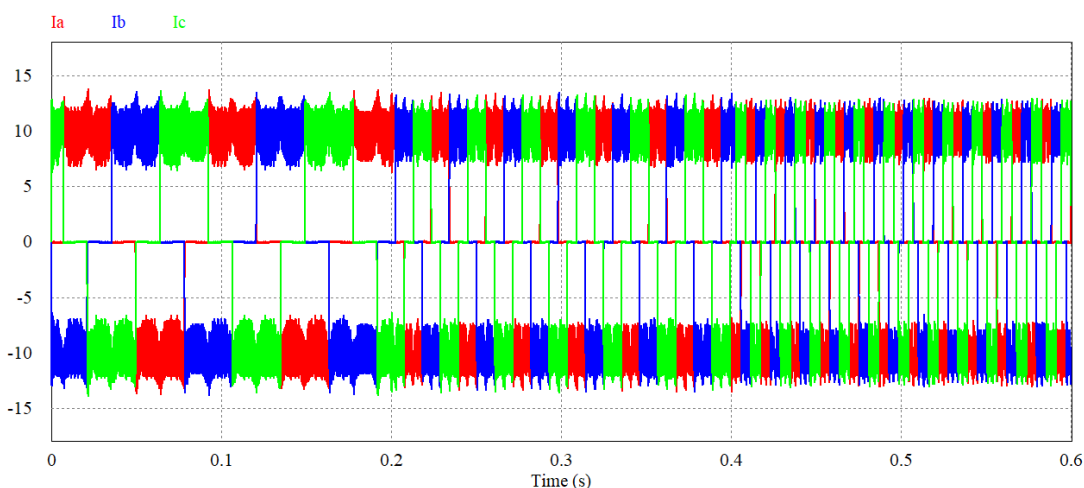


Figura 4.26 – Correntes consumidas pelo motor BLDC com controlo de velocidade e uma carga de 3 Nm.

Como é possível concluir, com o aumento da carga, apesar de com mais oscilações, a velocidade continua a acompanhar a referência e as correntes de fase aumentam, como seria de esperar.

4.5 Conclusões

Neste capítulo, inicialmente foi analisado ao pormenor o motor BLDC. Foi visto o seu princípio de funcionamento e o seu modelo elétrico e matemático. De seguida, foi analisado o conversor de potência necessário ao seu controlo, que será o inversor trifásico, e foram ainda analisadas técnicas de comutação para este inversor. Por fim, foram ainda estudadas técnicas de travagem regenerativa para aplicar neste motor, mas infelizmente verificou-se que as mesmas não são passíveis de aplicar no motor utilizado em específico, oferecendo o mesmo outras vantagens.

De seguida, foram apresentados os modelos de simulação utilizados para os circuitos de potência e controlo que se pretendem implementar na bicicleta elétrica, e os resultados de simulação obtidos a partir dos mesmos. Estes resultados foram divididos em três partes, inicialmente foram apresentados

resultados de simulação sem nenhum tipo de controlo, apenas aplicando a sequência de comutação de acordo com as saídas dos sensores de efeito *Hall*, de forma a validar que o motor funcionava corretamente. De seguida, foram apresentados resultados com o controlo de velocidade que se pretende implementar. Por fim, foram adicionadas diferentes cargas ao motor de forma a analisar o comportamento e resposta do sistema às mesmas.

As simulações realizadas e apresentadas neste capítulo foram essenciais para validar os sistemas de controlo que serão aplicados no desenvolvimento da bicicleta elétrica.

Capítulo 5

Implementação do Sistema Proposto

5.1 Introdução

Neste capítulo, inicialmente é apresentado o circuito desenvolvido para testar o circuito de potência do controlador, para o qual foi desenvolvido uma PCB. De seguida, é apresentado o circuito de controlo. Aqui é apresentado o microcontrolador utilizado e são apresentados também os componentes que integram a bicicleta elétrica, de forma a se perceber a sua função e o seu princípio de funcionamento, e para ficarem esclarecidas as funcionalidades que estão presentes na versão final. Por fim, é apresentada a versão final do controlador desenvolvido, para o qual foi desenvolvido uma nova PCB, que incorpora o circuito de potência e de controlo.

5.2 Circuito de Eletrónica de Potência do Controlador

Como referido anteriormente, será utilizado um inversor trifásico para controlar o motor. Como um dos principais objetivos do desenvolvimento do controlador é que este seja compacto, com dimensões semelhantes ao controlador original e a outros controladores comerciais, optou-se desde logo por adquirir o inversor trifásico num circuito integrado, diminuindo assim consideravelmente o tamanho do inversor quando comparado com a utilização de seis semicondutores e seis circuitos de *drive* para as *gates* individualmente.

Deste modo, foi utilizado o inversor trifásico *FNA41060* da *ON Semiconductor*. Este CI suporta até 600 V de entrada e consegue fornecer até 10 A. Possui circuitos de *drive* para as *gates*, que necessitam de uma alimentação tipicamente de 15 V. Para além disso, tem ainda alguns mecanismos de proteção, como deteção de *under-voltages* no circuito de *drive* das *gates*, proteção contra curto-circuitos, possui um pino para reportar estes problemas e é possível também monitorizar a temperatura do IC [43]. Na Figura 5.1(a) é possível ver o aspeto físico deste CI e na Figura 5.1(b) o seu diagrama de blocos interno.

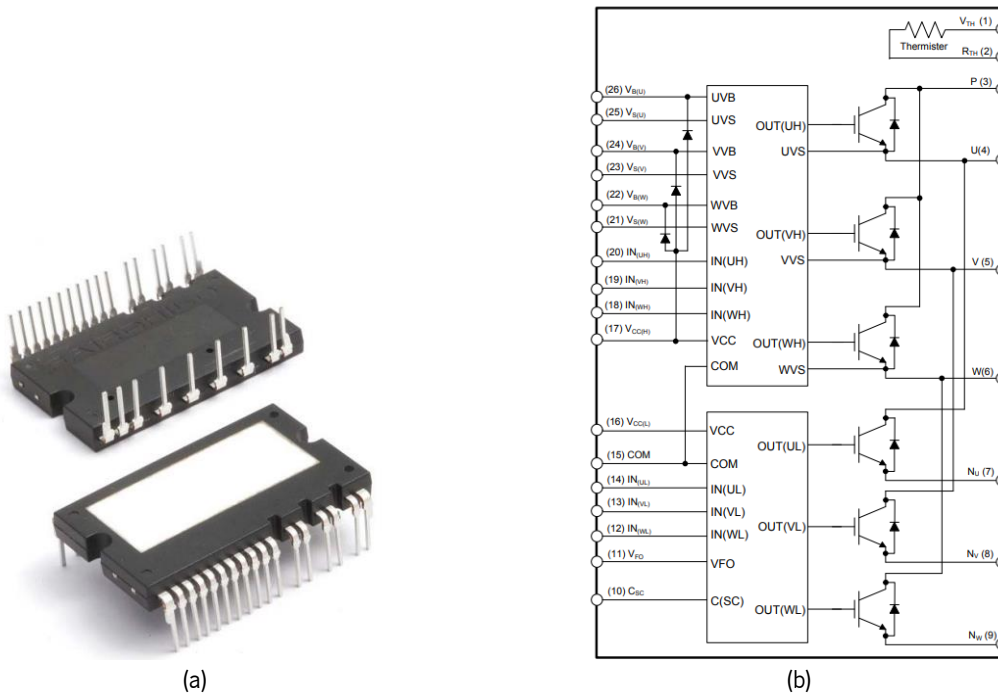


Figura 5.1 – CI FNA41060: (a) Aspeto físico; (b) Diagrama de bloco interno [43].

Para o teste do CI foi montado o circuito de aplicação típico [43], tentando-se manter o equilíbrio entre as recomendações do fabricante e os componentes que existiam disponíveis no laboratório. Devido à configuração dos pinos do CI que impossibilitam a sua instalação numa *breadboard* ou *veroboard*, foi desenhada uma PCB para o teste deste circuito de potência.

Foram experimentadas duas ferramentas de desenho de PCBs, o PADS e o *Altium Designer*, acabando por ser feito o desenho no *Altium Designer* devido a ter sido considerada uma ferramenta mais intuitiva. De seguida, é apresentado o desenho da PCB na ferramenta utilizada (Figura 5.2).

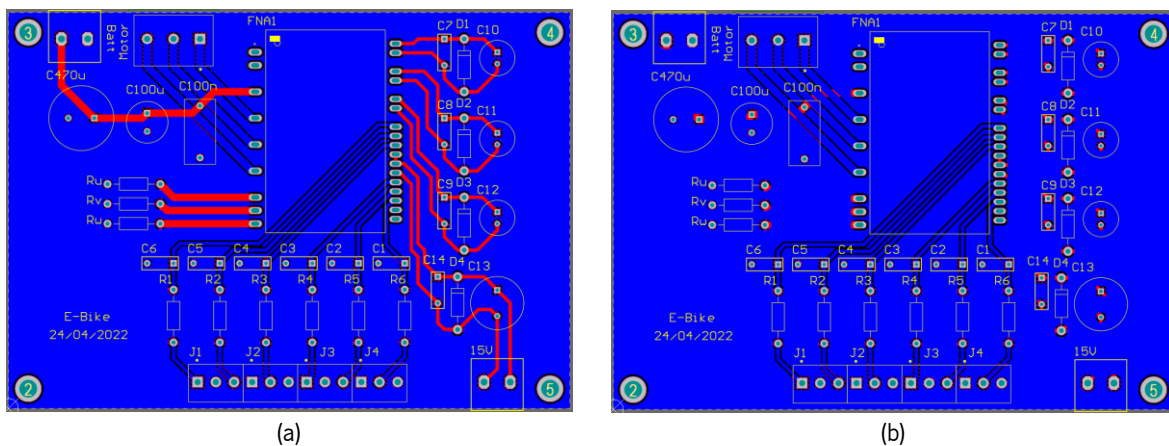


Figura 5.2 – Desenho da PCB de teste do circuito de potência: (a) *Top view*, (b) *Bottom view*.

Depois de finalizado o desenho, procedeu-se à impressão da PCB. Na Figura 5.3 é possível ver a PCB impressa.

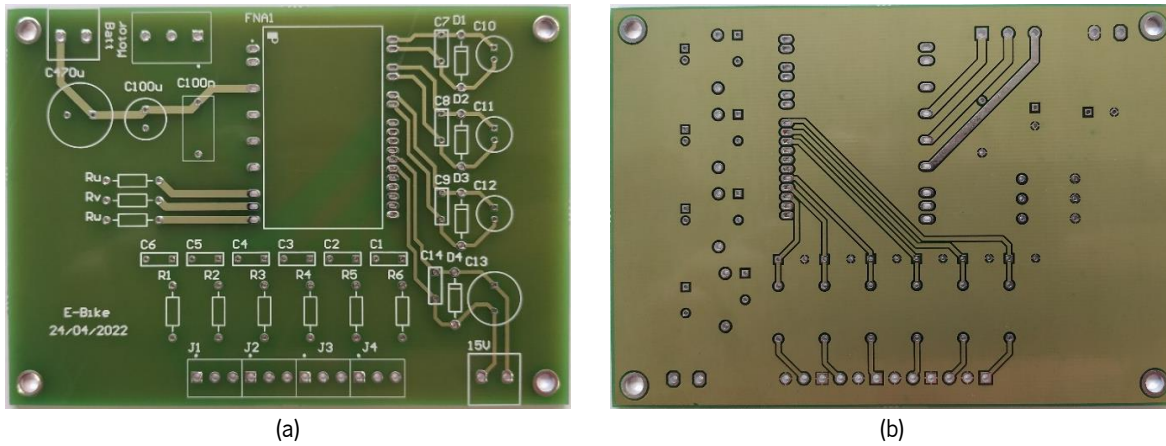


Figura 5.3 – PCB de teste do circuito de potência impressa: (a) *Top view*; (b) *Bottom view*.

De seguida, realizou-se a solda dos componentes. Na Figura 5.4 é apresentado o resultado final depois dos componentes soldados.

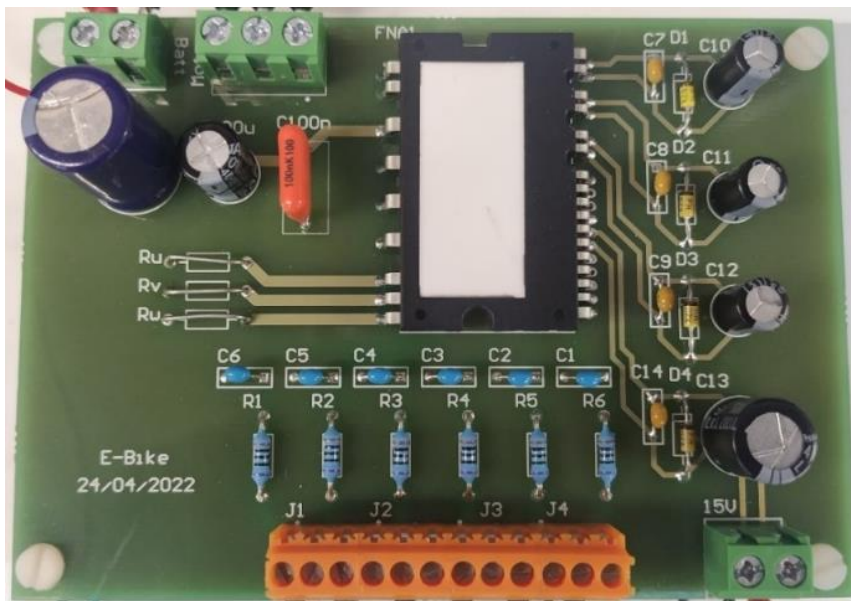


Figura 5.4 – PCB de teste do circuito de potência soldada.

Para o teste e validação desta placa, foi ligada uma fonte de alimentação de 36 V para simular a bateria e outra fonte de alimentação de 15 V para alimentar o circuito de *drive* das *gates*. De seguida, alimentaram-se as *gates* com sinais cuja saída era previamente conhecida, e verificando-se que a saída era igual ao esperado, verificou-se que o circuito de potência funcionava corretamente.

5.3 Circuito de Controlo do Controlador

Depois de validado o circuito de potência, foi necessário começar a implementar o controlo. De seguida, será apresentada a plataforma digital utilizada e os restantes componentes essenciais para o funcionamento controlado da bicicleta elétrica.

5.3.1 Plataforma Digital de Controlo

Para efetuar todo o processamento necessário para controlar a bicicleta elétrica, foi utilizada uma plataforma digital baseada num DSP da *Texas Instruments* com a referência *TMS320F28027*. Toda a programação do DSP foi efetuada no ambiente de programação *Code Composer Studio*, que permite a compilação do código desenvolvido e fazer *debug* do sistema em tempo real. Na Figura 5.5 é possível ver uma imagem do microcontrolador utilizado no sistema de controlo da bicicleta elétrica.



Figura 5.5 – DSP *TMS320F28027* da *Texas Instruments*.

Este microcontrolador utilizado possui um processador de 32 bits com um *clock* interno de 60 MHz, 7 canais ADC de 12 bits, 12 kB de memória RAM, 32 kB de memória flash e 4 canais de PWM de alta resolução [44]. Apesar deste microcontrolador ser o mais limitado da sua gama, tem a grande vantagem de ser também o mais pequeno e concluiu-se que os seus recursos seriam suficientes para o controlo de todo o sistema. Na Figura 5.6 pode ver-se o diagrama de blocos do microcontrolador utilizado.

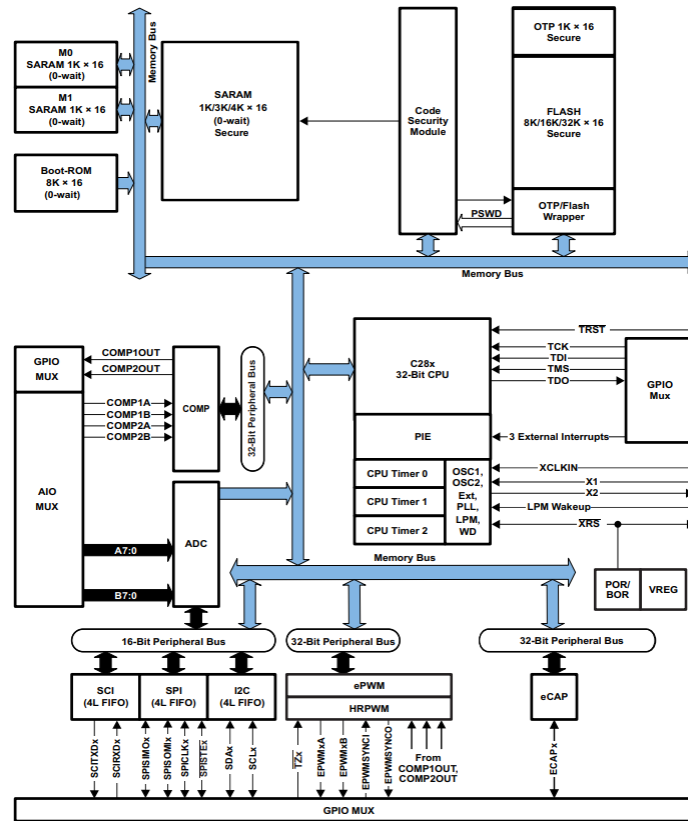


Figura 5.6 – Diagrama de blocos do DSP *TMS320F28027* [44].

5.3.2 Sensores de Efeito *Hall*

Depois de validado o circuito de potência, o objetivo foi colocar o motor em movimento (Figura 5.7). Para isso, foi necessário efetuar a leitura dos sensores de efeito *Hall* presentes no motor da bicicleta elétrica, de forma a se conhecer a posição do rotor e ser possível respeitar a sequência de comutação das fases já apresentada anteriormente.



Figura 5.7 – Motor utilizado já instalado na roda.

Estes sensores são alimentados com 3,3 V. A sua saída é em coletor aberto, sendo necessário colocar uma resistência de *pull-up* à saída, e apresenta apenas dois valores possíveis, valor lógico baixo e alto, definido pela tensão de *pull-up*. Na Figura 5.8 podem ver-se as ligações para este circuito.

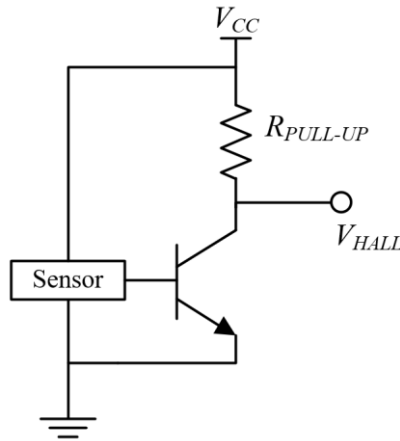


Figura 5.8 – Circuito de condicionamento de sinal para os sensores de efeito *Hall*.

Posteriormente, a saída dos sensores foi ligada diretamente ao DSP e foi utilizada a resistência de *pull-up* interna do microcontrolador para efetuar as leituras. Baseado nas leituras efetuadas, foi implementada por software a sequência de comutação necessária ao funcionamento do motor.

5.3.3 Sensor de Velocidade

Para além dos 3 sensores de efeito *Hall*, o motor vem ainda equipado com um sensor de velocidade. Tal como a saída dos sensores de efeito *Hall*, a saída deste sensor é também em coletor aberto, sendo necessário colocar uma resistência de *pull-up* à saída, e apresenta apenas dois valores possíveis, valor lógico baixo e alto. A saída deste sensor consiste num pulso a cada rotação do motor.

Novamente, a saída deste sensor foi ligada diretamente ao DSP e foi utilizada a resistência de *pull-up* interna do microcontrolador para efetuar as leituras. Recorrendo a uma interrupção externa e a um *timer*, foi possível conhecer o tempo entre cada rotação, e conhecendo o perímetro da roda, foi possível calcular a velocidade atual da bicicleta.

5.3.4 Potenciômetro

O controlo implementado neste sistema foi o controlo de velocidade. Conhecida a velocidade atual da bicicleta, pode ser definida uma referência de velocidade que a bicicleta tentará igualar com recurso a

um controlador proporcional integral implementado por software. Neste controlador PI foram implementados ganhos dinâmicos de forma a estes compensarem as variações de tensão da bateria.

Apesar de a velocidade máxima permitida para uma bicicleta elétrica ser de 25 km/h, por questões de segurança do hardware, a referência de velocidade foi programada para variar entre os 5 km/h e os 15 km/h. Esta referência de velocidade pode ser ajustada pelo utilizador recorrendo a um potenciômetro instalado no guiador, simulando a funcionalidade de *cruise-control*. Na Figura 5.9 pode ser visto o potenciômetro em questão.



Figura 5.9 – Potenciômetro de ajuste da referência de velocidade.

Foi utilizado um potenciômetro de 1 k Ω que já existia no laboratório, com um condensador de 10 nF para filtragem de ruídos. Este circuito pode ser visto na Figura 5.10.

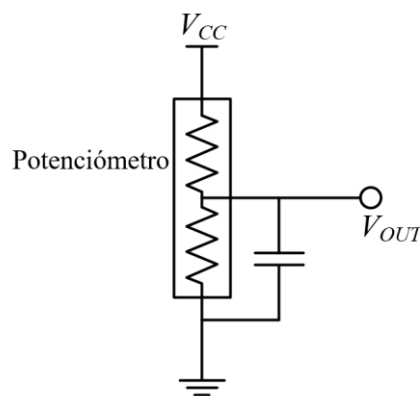


Figura 5.10 – Circuito de condicionamento de sinal do potenciômetro.

A saída do potenciômetro é ligada a um canal de ADC do DSP, onde foi implementada por software uma função para variar linearmente a referência de velocidade em função do valor lido pelo ADC.

Foi ainda implementada uma função de *soft start* para o PWM, que incrementa gradualmente o valor do PWM até este chegar ao valor exigido pelo controlador PI para a velocidade atual igualar a velocidade de referência. Esta função verificou-se muito importante pois possibilita um arranque mais suave, reduzindo

ao mesmo tempo os valores das correntes no arranque, e levando assim também a uma menor temperatura e maior durabilidade do hardware.

5.3.5 Sensor da Pedaleira

O sensor da pedaleira é um sensor de extrema importância para garantir a conformidade da bicicleta elétrica com a legislação em vigor. Como é sabido, o motor elétrico só pode funcionar se o utilizador estiver a pedalar. Assim, é este sensor que deteta se o utilizador está a pedalar, e é possível ainda saber se o utilizador está a pedalar para trás ou para a frente por análise do sinal de saída. Este sensor veio incluído no *kit* adquirido do fabricante *Ciclotek* e pode ser visto na Figura 5.11.



Figura 5.11 – Sensor da pedaleira.

O sensor é alimentado com 3,3 V, e a sua saída apresenta apenas dois níveis possíveis, nível lógico baixo e alto, neste caso 3,3 V. Se a pedaleira estiver parada, a saída do sensor será constante, podendo apresentar o nível lógico alto ou baixo. Se a pedaleira estiver a rodar, a saída do sensor será um conjunto de transições, que podem ser vistas como onda quadrada. Se estiver a rodar para trás, a onda quadrada formada terá um *duty cycle* de aproximadamente 25%, enquanto se a pedaleira estiver a rodar para a frente terá um *duty cycle* de aproximadamente 50%. Estas percentagens têm de ser consideradas aproximadas pois a velocidade de rotação da pedaleira não é constante. Na Figura 5.12 são exemplificadas as possíveis saídas do sensor.

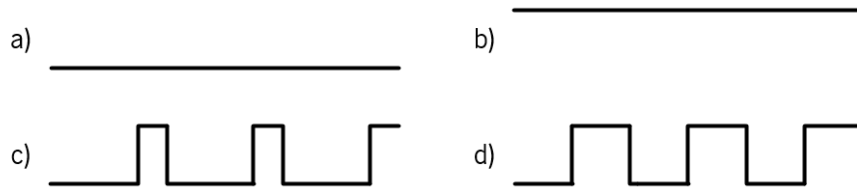


Figura 5.12 – Possíveis saídas do sensor da pedaleira: (a) e (b) Com a pedaleira parada; (c) Com a pedaleira a rodar para trás; (d) Com a pedaleira a rodar para a frente.

A análise e gestão da saída do sensor é feita por software, com recurso a duas interrupções externas e um *timer*, garantindo que o motor elétrico apenas funciona se a pedaleira estiver a rodar para frente.

5.3.6 Manetes de Travão com Sensor de Travagem

O sensor de travagem é um sensor de extrema importância para garantir a segurança do utilizador. A função deste sensor é garantir que as comutações do motor são imediatamente desligadas quando o travão é pressionado, de forma ao funcionamento do motor não comprometer a travagem em segurança. As manetes de travão equipadas com este sensor vieram incluídas no *kit* adquirido do fabricante *Ciclotek* e podem ser vistas na Figura 5.13.



Figura 5.13 – Manetes de travão com sensor de travagem.

Os dois sensores são ligados em paralelo, partilhando a mesma saída e estão normalmente abertos. São ligados à massa e a saída está normalmente com o nível lógico alto graças a uma resistência de *pull-up*. Quando pressionados, o circuito fecha e a saída passa para o nível lógico baixo. Na Figura 5.14 pode ser visto o esquema de ligação destes sensores.

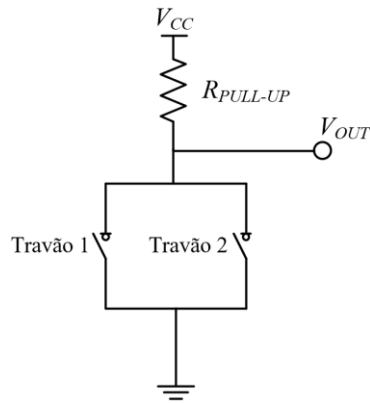


Figura 5.14 – Circuito de condicionamento de sinal dos travões.

A saída deste sensor é ligada diretamente ao DSP e é utilizada a resistência de *pull-up* interna do microcontrolador para efetuar a deteção de travagem. Quando esta travagem é detetada, as comutações do motor são imediatamente desligadas.

5.3.7 Botão de Ajuda ao Arranque

Como já foi referido, uma bicicleta elétrica não pode possuir acelerador. O *kit* adquirido do fabricante *Ciclotek* vinha equipado com ele. Deste modo, de forma a reutilizar esse componente e a adicionar novas funcionalidades ao produto desenvolvido, esse acelerador foi adaptado a um botão de ajuda ao arranque. Este pode ser visto na Figura 5.15. Este botão, para além de auxiliar no arranque, pode ainda ser utilizado para caminhar com a bicicleta pela mão.



Figura 5.15 – Acelerador convertido a botão de ajuda ao arranque.

Este componente é alimentado com 3,3 V, e a sua saída variável passou a ser utilizada apenas com dois níveis lógicos, alto e baixo, ou seja, pressionado e não pressionado. Esta saída é ligada ao DSP.

Independentemente do estado do sensor da pedaleira e da velocidade de referência definida no potenciômetro, quando pressionado este botão é definida uma referência de velocidade constante de 5 km/h, que é a velocidade média a que um adulto caminha, e são iniciadas as comutações do motor. Quando o botão deixa de ser pressionado, a velocidade de referência volta a ser definida pelo potenciômetro e só é dada continuidade à alimentação do motor se o utilizador estiver a pedalar.

5.3.8 Sensor de Tensão

O sensor de tensão é importante para garantir que a bateria não trabalha abaixo da tensão mínima permitida e garantir deste modo o seu bom funcionamento e durabilidade.

Para medir a tensão das baterias utilizou-se um divisor resistivo em paralelo com o barramento CC. Utilizou-se ainda um condensador em paralelo com a resistência de baixo do divisor para filtragem de ruídos. Desta forma, é possível obter a tensão instantânea das baterias de maneira simples e eficaz, reduzindo a complexidade do sistema e tornando-o mais barato. Na Figura 5.16 pode ser visto o circuito utilizado.

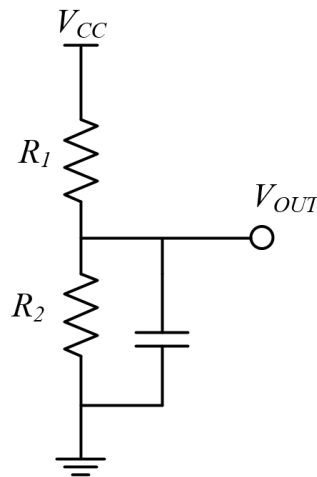


Figura 5.16 – Circuito de condicionamento de sinal do divisor resistivo.

O divisor resistivo deve ser dimensionado de forma a que o ponto médio do divisor nunca ultrapasse os 3,3 V para poder ser lido diretamente pelo DSP. Deste modo, assumiu-se que $V_{OUT} = 3,3 \text{ V}$ e $V_{CC} = 43 \text{ V}$, que é um valor um pouco superior à tensão da bateria totalmente carregada. Atribuindo um valor a R_1 , é possível calcular R_2 pela equação (5.1).

$$V_{OUT} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.1)$$

O ponto médio do divisor resistivo é ligado diretamente ao ADC do DSP e desta forma é possível saber quando a tensão na bateria chega ao mínimo permitido e quando o sistema deve ser desligado.

Para além do divisor resistivo, instalou-se ainda um monitor de carga digital com voltímetro no guiador, da marca Geekcreit, ligado em paralelo com o barramento CC, de forma a informar ao utilizador a percentagem de carga e tensão da bateria em tempo real. Na Figura 5.17 pode visualizar-se esse monitor.



Figura 5.17 – Monitor de carga digital com voltímetro.

5.3.9 Sensor de Temperatura

Como referido anteriormente, o circuito integrado do inversor utilizado possui uma resistência térmica interna, sendo possível monitorizar a temperatura desta resistência com a implementação do condicionamento de sinal necessário.

A temperatura de junção operacional máxima do CI é de 150 °C [43]. Sabe-se que a temperatura do encapsulamento e da respetiva resistência térmica será um pouco inferior à temperatura de junção. Deste modo, tendo em conta que a PCB onde está inserido o CI ficará numa caixa fechada sem circulação de ar, de modo a garantir a integridade e longevidade não só do CI, mas de todos os componentes envolventes, definiu-se como temperatura máxima de operação do sistema quando a temperatura medida na resistência térmica atinge os 90 °C.

Quando a resistência térmica se encontra a 90 °C, a sua resistência é de 4 k Ω [43]. Desta forma, recorrendo a um divisor resistivo igual ao da Figura 5.16, onde R1 é a resistência térmica interna do CI, foi possível efetuar o condicionamento de sinal necessário para implementar o sensor de temperatura.

O divisor resistivo é alimentado com 3,3 V, sabe-se que para as condições pretendidas $R1 = 4 \text{ k}\Omega$ e $R2$ foi calculado através da equação (5.1) para um valor de V_{OUT} definido. Esta saída é posteriormente lida num canal de ADC do DSP, e quando o valor lido ultrapassa o valor de V_{OUT} definido significa que o valor da resistência térmica baixou dos 4 k Ω e conseqüentemente a temperatura ultrapassou os 90 °C. Quando isto se verifica, as comutações do motor são desligadas e apenas são restabelecidas quando a temperatura baixar novamente dos 90 °C.

5.3.10 Reguladores de Tensão

No desenvolvimento da bicicleta elétrica, para além da tensão da bateria, que é de 36 V, eram necessários ainda mais dois níveis de tensão. Eram necessários 15 V para alimentação do circuito de *drive* das *gates* e ainda 3,3 V para alimentação da placa de controlo e dos vários sensores usados neste projeto.

Na fase de testes, estes níveis de tensão foram obtidos recorrendo a duas fontes de alimentação externas, mas de forma a tornar o sistema desenvolvido apenas dependente da bateria, foi necessária a utilização de dois conversores CC-CC.

Deste modo, foram utilizados dois reguladores comutados. Foi escolhido este tipo de conversores pois apresentam uma grande eficiência, não necessitando de dissipador. Apresentam ainda um tamanho reduzido, ideal para aplicação neste projeto. Para além disso, têm a capacidade de manter uma tensão de saída fixa desde que a tensão de entrada se mantenha no intervalo admissível, ideal para compensar as variações de tensão da bateria.

Para obtenção dos 15 V, foi adquirido o *TSR 0.6-48150W* da *Traco Power* [45]. Este conversor não isolado admite tensões de entrada entre os 20 V e os 72 V, garantindo para esta gama de valores uma tensão de saída fixa de 15 V. Consegue fornecer uma corrente de saída de até 600 mA e tem uma eficiência de até 94 %. Apresenta ainda algumas funcionalidades como proteção contra curto-circuitos e sobretensões. Na Figura 5.18 pode ser visto este conversor.

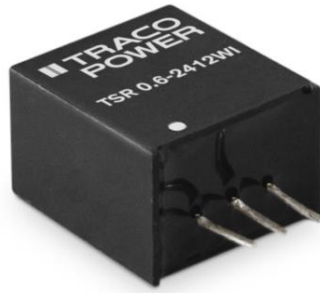


Figura 5.18 – Conversor TSR 0.6-48150WI da *Traco Power*.

Para obtenção dos 3,3 V, foi utilizado o *OKI-78SR-3.3/1.5-W36-C* da *Murata Power Solutions* [46]. Este modelo já existia no laboratório e foi utilizado pois cumpria todos os requisitos necessários. O mesmo pode ser visto na Figura 5.19.

Este conversor não isolado admite tensões de entrada entre os 7 V e os 36 V, garantindo para esta gama de valores uma tensão de saída fixa de 3,3 V. Visto que a tensão da bateria carregada é superior à tensão máxima de entrada admitida pelo conversor, a sua entrada foi ligada à saída de 15 V do *TSR 0.6-48150WI*. Consegue fornecer uma corrente de saída de até 1.5 A e tem uma eficiência tipicamente de 85.5 %. Apresenta ainda funcionalidades de proteção incluindo proteção contra curto-circuitos.



Figura 5.19 – Conversor *OKI-78SR-3.3/1.5-W36-C* da *Murata Power Solutions*.

5.4 Versão Final do Controlador Desenvolvido

Depois de interligados todos os componentes previamente apresentados, a bicicleta estava a funcionar com todas as funcionalidades implementadas. O aspeto do projeto desenvolvido no final da versão inicial pode ser visto na Figura 5.20.

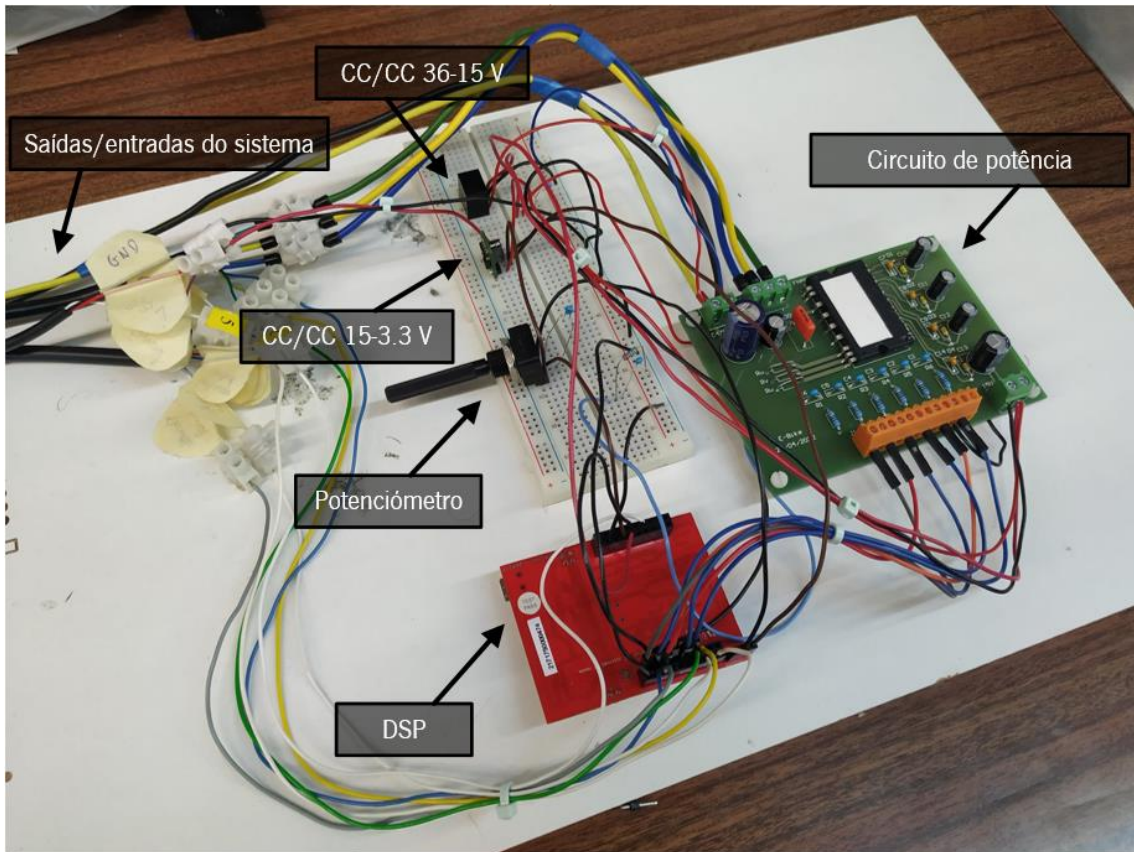
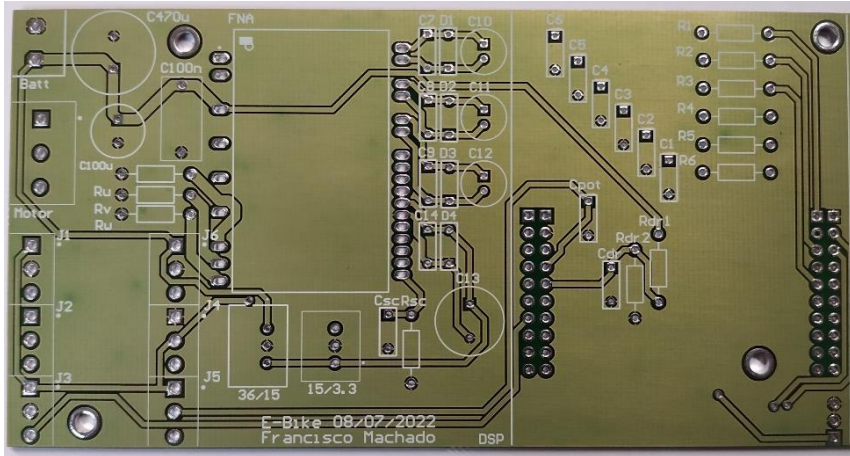


Figura 5.20 – Projeto desenvolvido no final da versão inicial.

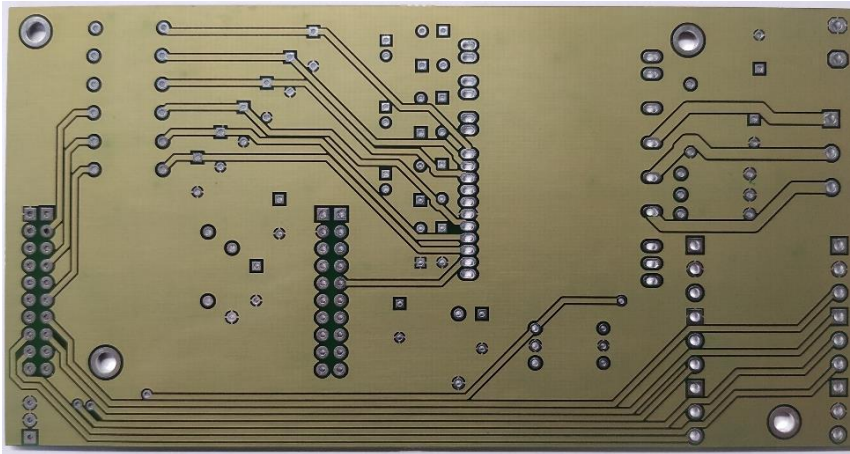
Como se pode verificar, apesar de funcional, faltava colocar a montagem móvel e compacta, de forma a poder ser acoplada na bicicleta. Um dos objetivos que se tentou seguir ao longo do desenvolvimento, foi manter o controlador o mais pequeno possível, de forma a poder ser colocado dentro da caixa onde vinha o controlador original adquirido no *kit*. Esta caixa e o controlador original podem ser vistos na Figura 5.21.



Figura 5.21 – Controlador original e respetiva caixa de armazenamento.



(a)



(b)

Figura 5.23 – Versão final da PCB impressa: (a) *Top view*, (b) *Bottom view*.

De seguida, realizou-se a solda dos componentes. Na Figura 5.24 é apresentado o resultado final depois dos componentes soldados.

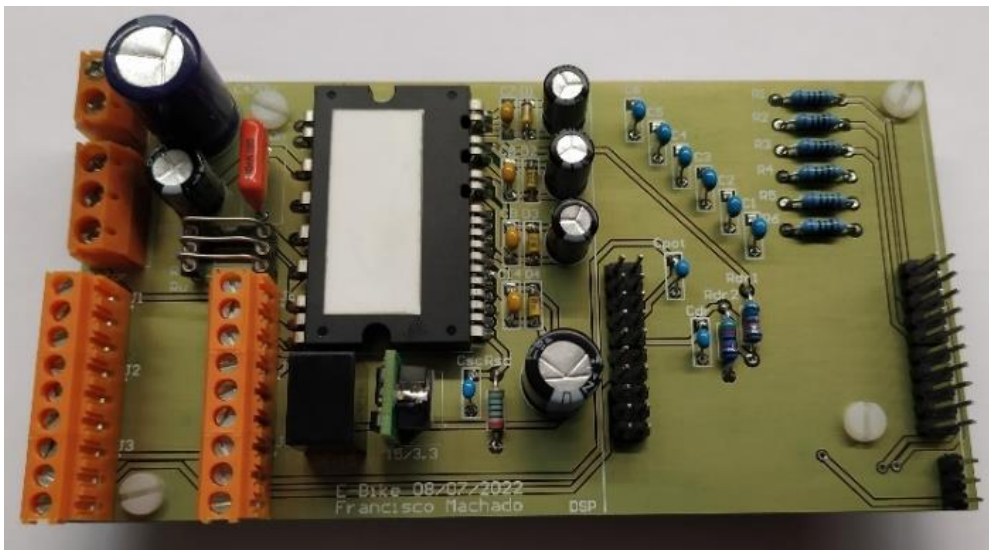


Figura 5.24 – Versão final da PCB soldada.

Por fim, foi encaixado o microcontrolador, tendo-se obtido o resultado apresentado na Figura 5.25.

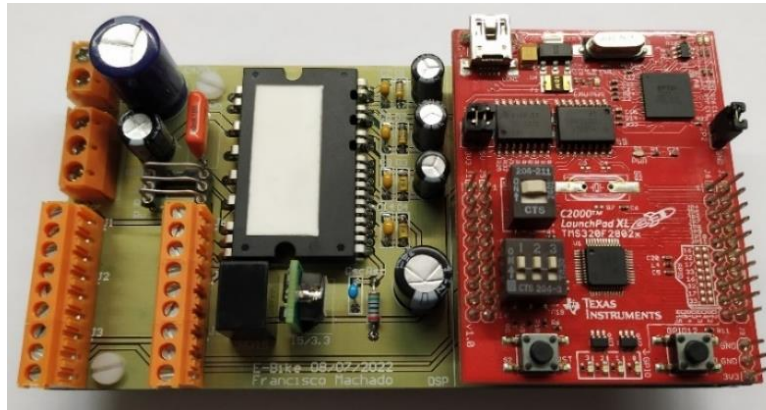


Figura 5.25 – Versão final da PCB.

Para efetuar as ligações da PCB com os restantes componentes, foi adquirido um conjunto de conectores iguais aos originais de forma à bicicleta ficar com todas as ligações iguais às ligações do *kit* original. Desta forma, as ligações ficaram devidamente impermeabilizadas e não foi necessário alterar nada do *kit* original, ou seja, a qualquer momento é possível repor os componentes do *kit* que não são utilizados. Na Figura 5.26 é possível ver a PCB com os conectores adquiridos ligados.

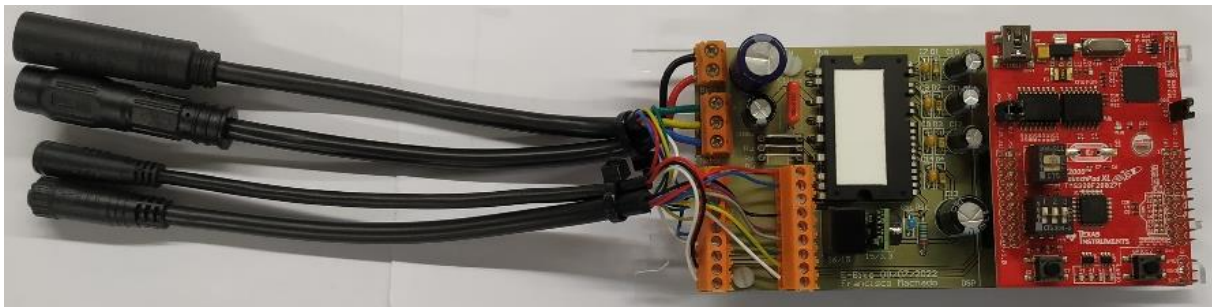


Figura 5.26 – PCB com os conectores ligados.

Nesta fase, foi também acoplado um dissipador de calor ao CI do inversor trifásico, reaproveitando um que já existia no laboratório, e foi ainda instalado um fusível de lâmina no cabo de alimentação do sistema. Estes componentes podem ser vistos na Figura 5.27, com a PCB pronta a ser instalada.

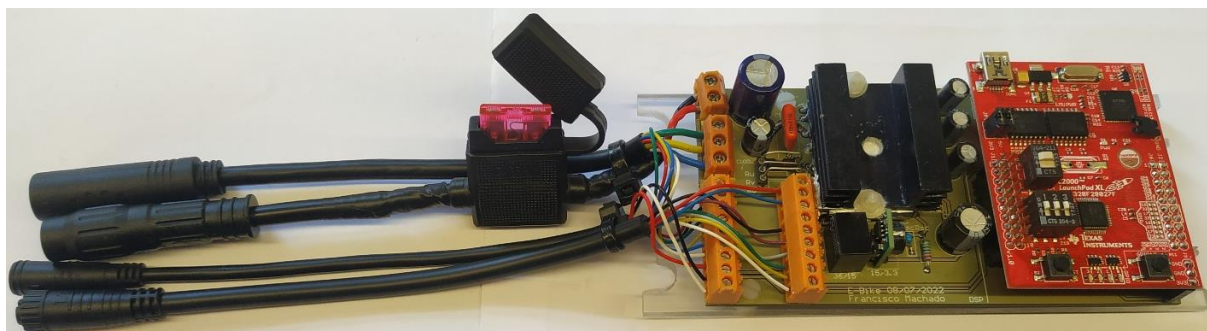


Figura 5.27 – PCB pronta a ser instalada.

Por fim, a nova PCB foi testada, e verificando-se o seu correto funcionamento, foi instalada na caixa. Para isso, foram desenvolvidas duas barras de acrílico que fixam a PCB na caixa quando esta é fechada, não necessitando de mais nenhum tipo de fixação. Estas barras podem ser vistas na Figura 5.28, com a PCB pronta a ser fechada na caixa.

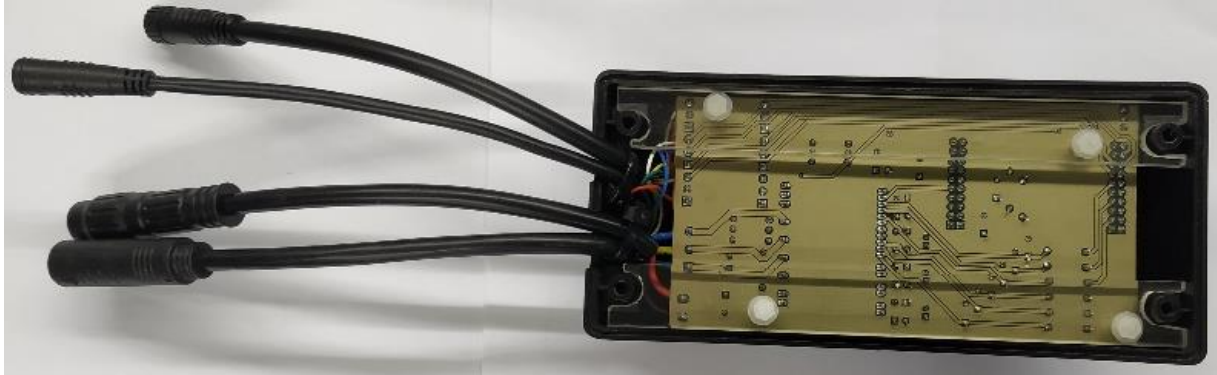


Figura 5.28 – PCB no interior da caixa.

Na Figura 5.29 pode ver-se o aspeto da caixa já instalada na bicicleta, com a PCB no seu interior, e com as ligações já efetuadas.

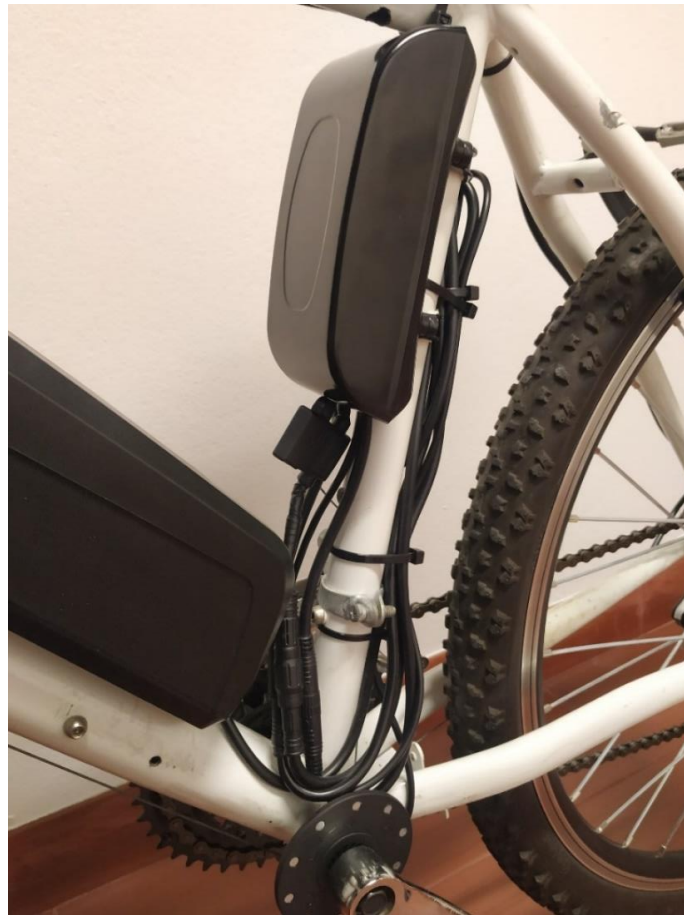


Figura 5.29 – Caixa com a PCB instalada na bicicleta.

Para esta versão final, os componentes de interface com o utilizador (monitor de carga e potenciómetro) foram instalados numa caixa e esta foi fixada no guiador. Na Figura 5.30 pode ser vista uma foto do aspeto desta caixa instalada na bicicleta. Também para ligação destes componentes foi adquirido um conector igual ao que ligava o LCD do *kit* original, sendo assim reaproveitada essa ligação. Assim, também esta ligação ficou devidamente impermeabilizada e não foi necessário alterar nada do *kit* original nem passar novos cabos.



Figura 5.30 – Caixa de interface com o utilizador.

Na Figura 5.31 e Figura 5.32 são apresentadas duas vistas onde é possível ver o aspeto final da bicicleta com os componentes todos instalados e ligados. Foram ainda impressos novos autocolantes para colar na bicicleta e na caixa de suporte do controlador desenvolvido. Nesta fase, a bicicleta elétrica encontrava-se totalmente funcional com todas as funcionalidades até aqui descritas implementadas.



Figura 5.31 – Aspeto final da bicicleta elétrica (vista 1).



Figura 5.32 – Aspeto final da bicicleta elétrica (vista 2).

5.5 Conclusões

Ao longo deste capítulo foi descrita a implementação dos elementos constituintes da bicicleta elétrica, designadamente o circuito de potência e o sistema de controlo do controlador, e ainda os restantes componentes essenciais para o funcionamento controlado da bicicleta elétrica.

Inicialmente foi descrito o circuito de potência, onde se usou um circuito integrado com o inversor trifásico. Para o teste deste circuito foi desenvolvida uma PCB. De seguida, foi apresentada a plataforma digital de controlo utilizada, e os restantes componentes utilizados no controlo da bicicleta elétrica. Foram ainda apresentados os 2 reguladores comutados necessários para corresponder aos níveis de tensão exigidos pelo sistema. Por fim, foi apresentado o resultado final obtido com o desenvolvimento de uma nova PCB.

Para a implementação do sistema desenvolvido foi necessária ainda a aprendizagem de ferramentas de desenho de PCBs, bem como a aprendizagem de métodos de soldadura de componentes.

Na Figura 5.33 pode ser vista uma foto da bancada de trabalho, capturada na fase de implementação e testes do sistema.

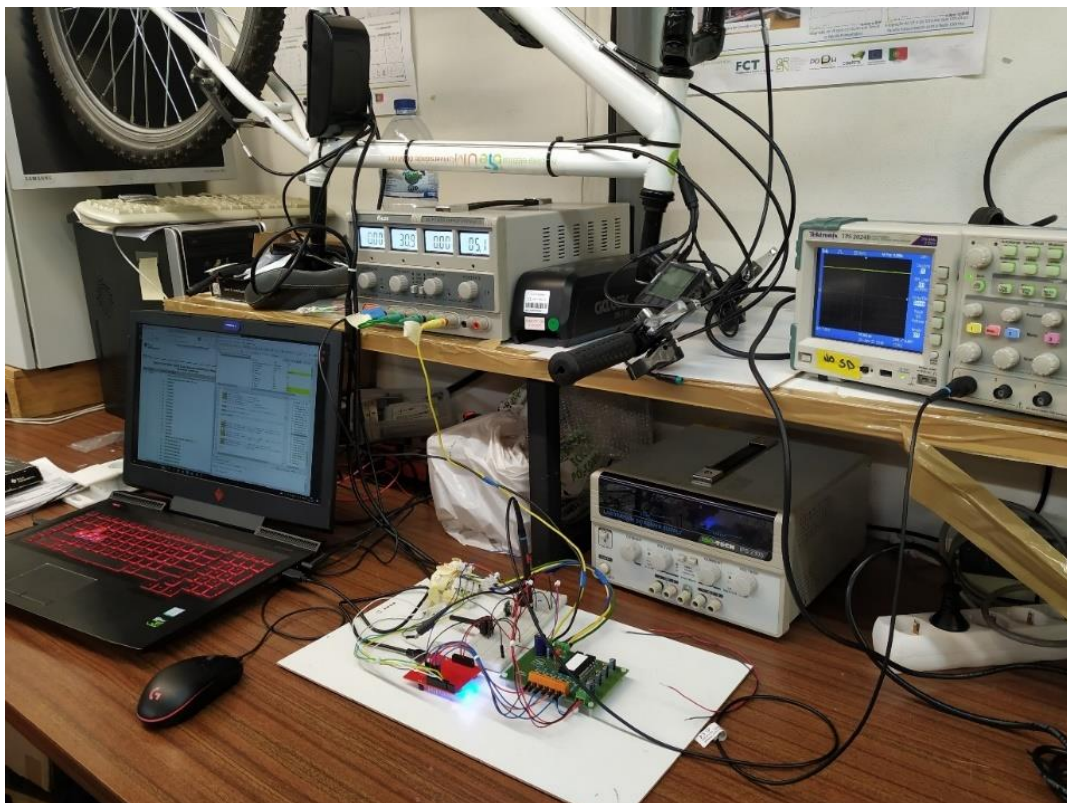


Figura 5.33 – Bancada de trabalho.

Capítulo 6

Resultados Experimentais

6.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais do sistema desenvolvido para a bicicleta elétrica. Todos os resultados aqui apresentados foram obtidos com alimentação da bateria. Inicialmente, são apresentados os resultados experimentais do ensaio do motor BLDC em vazio para várias velocidades. De seguida, são apresentados resultados experimentais do ensaio do motor em carga. Por fim, são ainda apresentados resultados experimentais dos principais componentes de controlo utilizados.

6.2 Ensaio do Motor em Vazio

Como já foi referido, o controlo implementado foi o controlo de velocidade. Desta forma, inicialmente serão apresentados resultados que apenas são relevantes apresentar uma vez, pois a variação de velocidade apenas afetará a sua frequência, ou seja, quanto maior a velocidade, maior a sua frequência. Estes resultados são os sinais de saída dos sensores de efeito *Hall* e os sinais de comando dos IGBT. A velocidade escolhida para estes resultados foi de 8 km/h.

Na Figura 6.1 é apresentado os sinais de saída dos sensores de efeito *Hall*. A sequência destes foi importante para validar a sequência de comutação do motor e é a partir da leitura dos mesmos que é conhecido que fases do motor devem ser alimentadas.

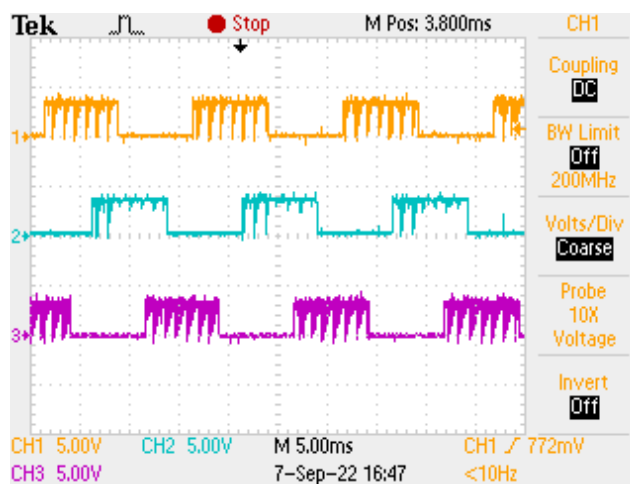


Figura 6.1 – Sinais de saída dos sensores de efeito *Hall* (5 V/div.).

De seguida, são apresentados os sinais de comando dos IGBT, gerados pelo microcontrolador. Na Figura 6.2 é possível visualizar os sinais de comando da parte superior do inversor, com a modulação PWM resultante do controlador PI implementado. Foi aumentada uma parte deste sinal, para se perceber a forma de onda da modulação efetuada. Tendo em conta que a frequência de comutação (f_{sw}) máxima para o PWM permitida pelo inversor é de 20 kHz [43], foi escolhida uma frequência de 15 kHz para este sinal. O *duty cycle* do PWM aplicado aumenta se se pretender aumentar a velocidade, ou diminui se se pretender uma diminuição da mesma. Na Figura 6.3 são apresentados os sinais de comando da parte inferior do inversor, sem modulação.

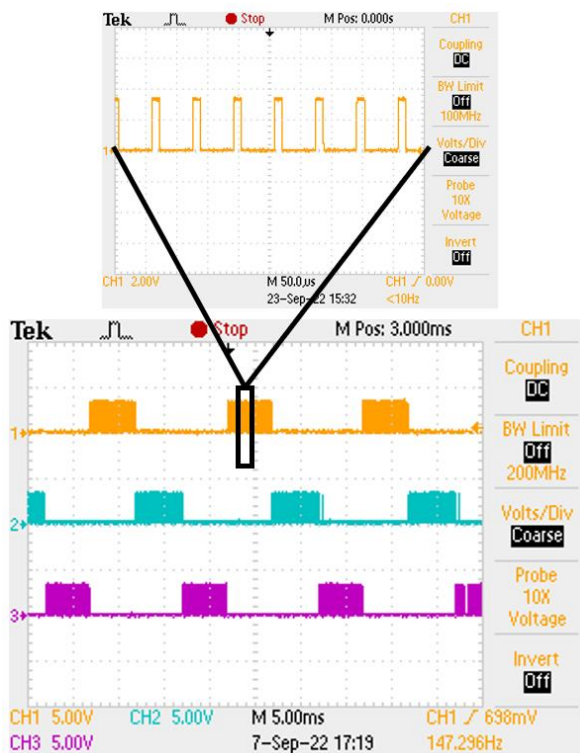


Figura 6.2 – Sinais de comando dos IGBT da parte superior do inversor (5 V/div.).

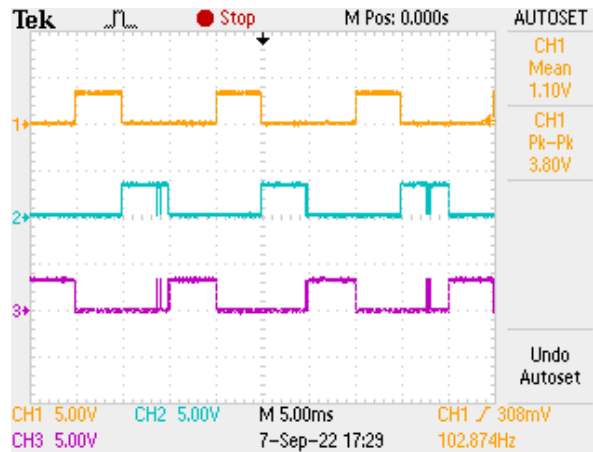


Figura 6.3 – Sinais de comando dos IGBT da parte inferior do inversor (5 V/div.).

Como já foi referido, os resultados até aqui apresentados apenas variam a sua frequência com a variação da velocidade. De seguida será feito um comparativo de resultados que interessam ver as suas alterações para diferentes referências de velocidades. As velocidades escolhidas para esta comparação foram 8 km/h, 14 km/h e 20 km/h, não sendo utilizado nenhum auxílio dos pedais.

Para cada uma destas referências de velocidade, inicialmente é apresentada uma imagem retirada do modo *debug* do *Code Composer Studio* para comprovar que a velocidade atual da bicicleta é igual à velocidade de referência.

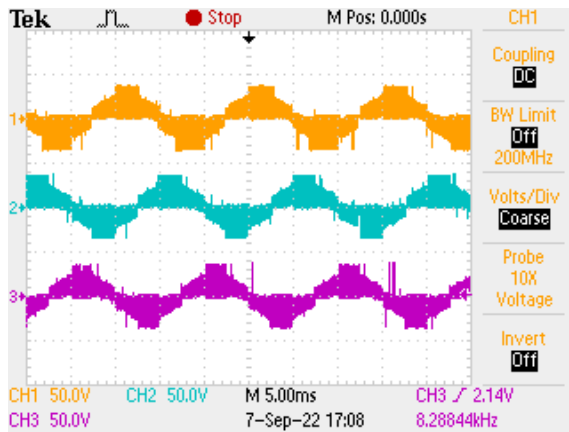
De seguida, são apresentadas as tensões compostas e ainda a tensão da bateria em conjunto com a tensão composta *ab* para servir de referência.

Por fim, são apresentadas as correntes de fase e ainda a corrente da bateria em conjunto com a corrente da fase *a* para servir de referência. Como nestes resultados em vazio a corrente da bateria é baixa, para uma melhor visualização desta corrente foi aumentada a sua escala.

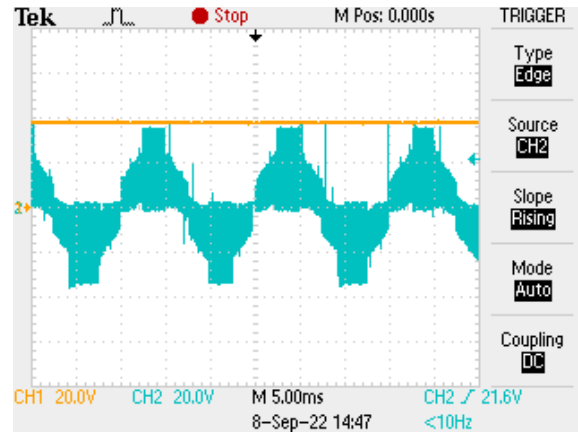
Deste modo, na Figura 6.4 é possível analisar estes parâmetros para uma velocidade de referência de 8 km/h, na Figura 6.5 para 14 km/h e por fim na Figura 6.6 para 20 km/h. Para esta apresentação de resultados, foram mantidas iguais as escalas de leitura utilizadas para as diferentes velocidades.

Expression	Type	Value
(x)- speed_atual	float	8.02423763
(x)- speed_ref	float	8.0

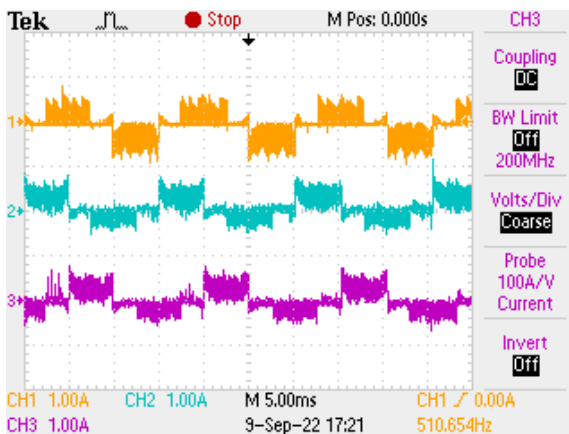
(a)



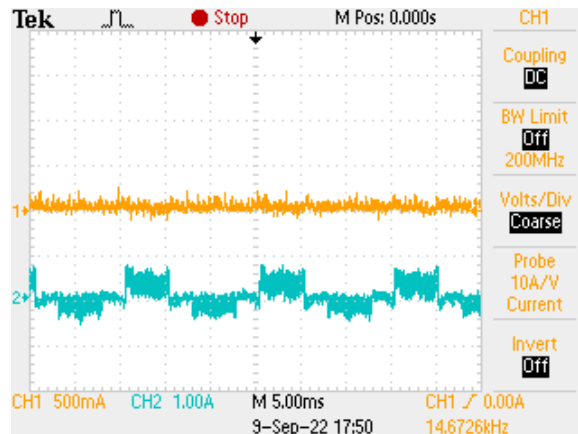
(b)



(c)



(d)

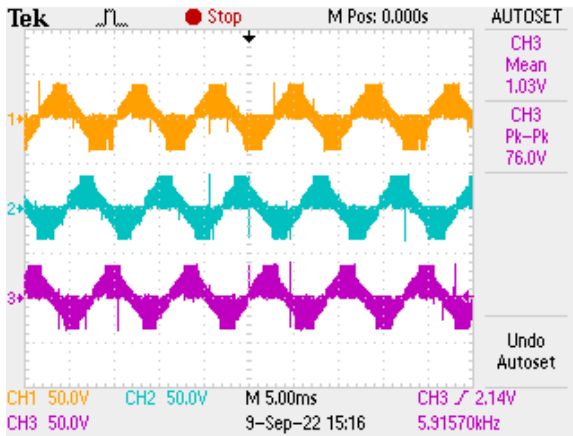


(e)

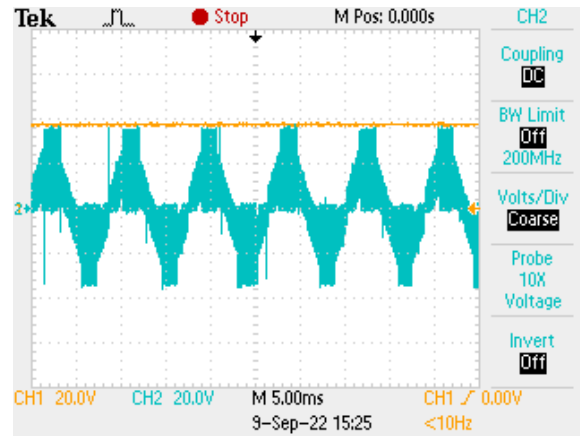
Figura 6.4 – Resultados experimentais para uma velocidade de 8 km/h: (a) Imagem retirada do modo *debug* do *Code Composer Studio*; (b) Tensões compostas *ab*, *bc* e *ca* (50 V/div.); (c) Tensão na bateria e tensão composta *ab* (20 V/div.); (d) Correntes nas fases *a*, *b*, e *c* (1 A/div.); (e) Corrente na bateria (500 mA/div.) e corrente da fase *a* (1 A/div.).

Expression	Type	Value
(x)= speed_atual	float	14.0295124
(x)= speed_ref	float	14.0

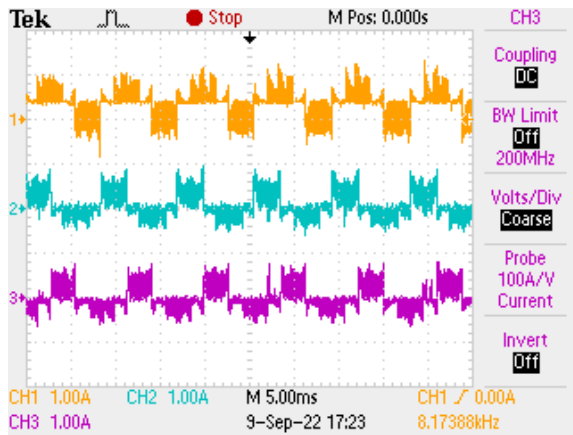
(a)



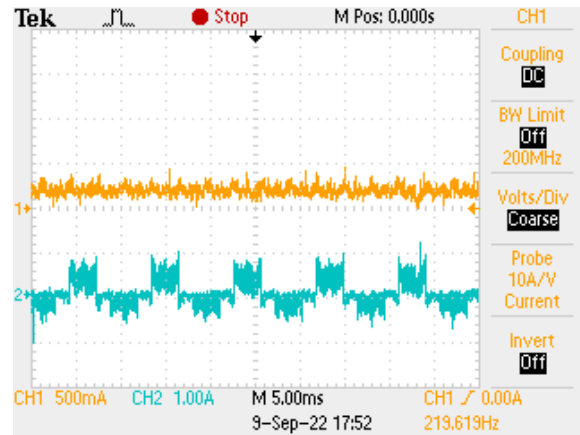
(b)



(c)



(d)

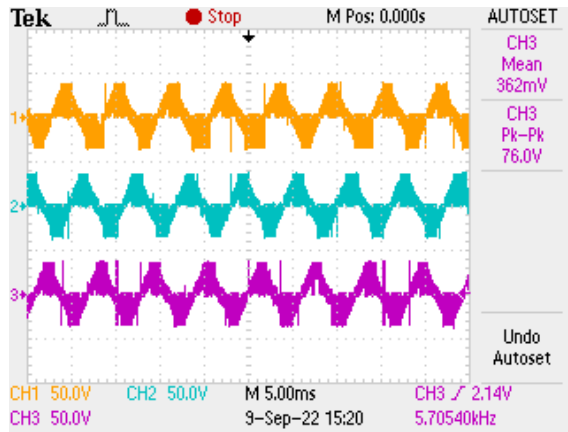


(e)

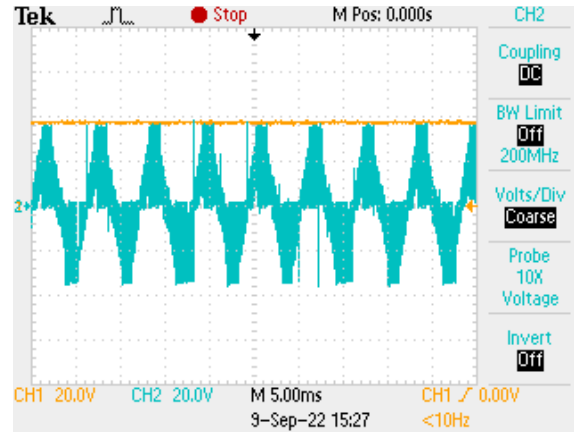
Figura 6.5 – Resultados experimentais para uma velocidade de 14 km/h: (a) Imagem retirada do modo *debug* do *Code Composer Studio*; (b) Tensões compostas *ab*, *bc* e *ca* (50 V/div.); (c) Tensão na bateria e tensão composta *ab* (20 V/div.); (d) Correntes nas fases *a*, *b*, e *c* (1 A/div.); (e) Corrente na bateria (500 mA/div.) e corrente da fase *a* (1 A/div.).

Expression	Type	Value
(*)= speed_atual	float	20.0000019
(*)= speed_ref	float	20.0

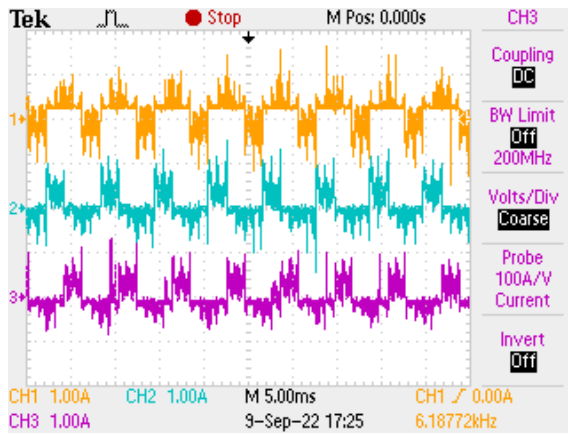
(a)



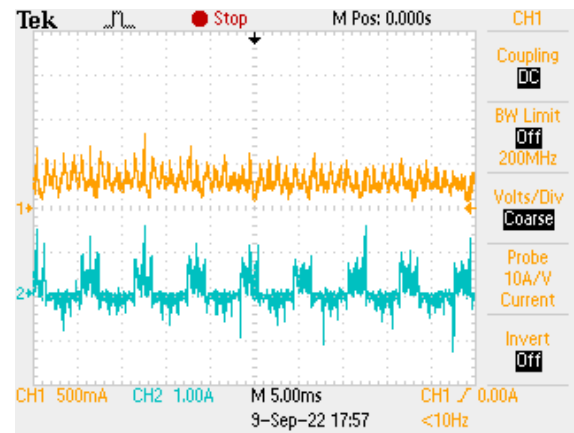
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 6.6 – Resultados experimentais para uma velocidade de 20 km/h: (a) Imagem retirada do modo *debug* do *Code Composer Studio*; (b) Tensões compostas *ab*, *bc* e *ca* (50 V/div.); (c) Tensão na bateria e tensão composta *ab* (20 V/div.); (d) Correntes nas fases *a*, *b*, e *c* (1 A/div.); (e) Corrente na bateria (500 mA/div.) e corrente da fase *a* (1 A/div.).

Por análise destes resultados, verifica-se que o controlo de velocidade funciona como o esperado, e a velocidade acompanha a referência definida. É possível também visualizar as formas de onda trapezoidais das tensões compostas. Quanto à tensão da bateria, como seria de esperar, mantém-se constante. As amplitudes das correntes de fase aumentam com o aumento da velocidade, tal como a corrente da bateria. Ainda assim, verifica-se que com o motor em vazio, as amplitudes destas correntes são em geral baixas. Com o motor em carga, espera-se que estas aumentem consideravelmente. Estes resultados foram obtidos em regime permanente. Para o regime transitório, até a velocidade igualar a

referência, verificou-se que as amplitudes das correntes são ligeiramente maiores que em regime permanente, como seria de esperar.

6.3 Ensaio do Motor em Carga

Aqui serão apresentados resultados experimentais do motor BLDC em carga. Estes resultados de seguida apresentados foram obtidos em condições reais com a bicicleta a circular num caminho ligeiramente a subir e sem nenhum auxílio dos pedais, sendo utilizado o acelerador para ativar as comutações do motor. Na Figura 6.7 é possível observar a montagem realizada para obtenção destes resultados. Para obter resultados com diferentes valores de carga, recorreu-se a dois utilizadores com diferentes massas, um com aproximadamente 65 kg e outro com aproximadamente 95 kg.



Figura 6.7 – Montagem realizada para obtenção de resultados em carga.

Apesar de nos resultados em vazio se terem utilizados velocidades superiores a 15 km/h, como referido anteriormente, para o protótipo final e para obtenção destes resultados em carga limitou-se a velocidade a 15 km/h para garantir a segurança do hardware. Desta forma, foram obtidos resultados para 8 km/h e 14 km/h.

Os resultados que são relevantes observar neste ensaio são as correntes de fase e a corrente na bateria. Todos os restantes resultados apresentados previamente no ensaio do motor em vazio são idênticos com carga. Sabendo que as correntes nas três fases são idênticas, de forma a simplificar a montagem

efetuada para obtenção destes resultados, mediu-se apenas a corrente de uma delas, neste caso a da fase *a*.

Desta forma, na Figura 6.8 é possível observar as formas de onda da corrente da bateria e da fase *a* para uma velocidade de 8 km/h para os dois valores de carga.

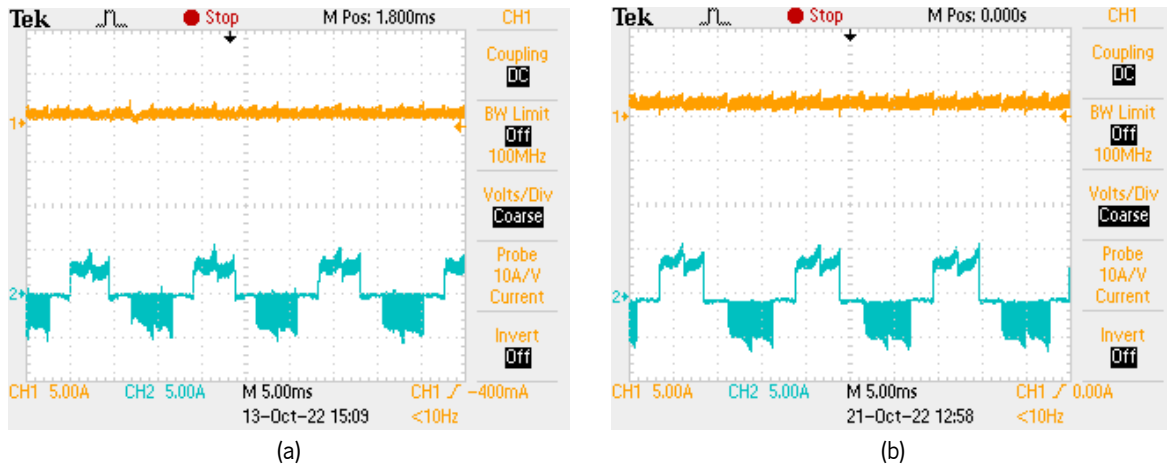


Figura 6.8 – Resultados experimentais para uma velocidade de 8 km/h: (a) Corrente na bateria e corrente na fase *a* (5 A/div.) para utilizador de 65 kg; (b) Corrente na bateria e corrente na fase *a* (5 A/div.) para utilizador de 95 kg.

Na Figura 6.9 é possível visualizar as mesmas formas de onda para uma velocidade de 14 km/h. Para além do aumento esperado da amplitude das correntes, verificou-se também um aumento considerável do *ripple* na corrente da bateria. Desta forma, na Figura 6.9(a), para um utilizador de 65 kg, é apresentada a corrente da bateria com acoplamento AC para uma melhor perceção deste *ripple* existente. Na Figura 6.9(b), para um utilizador de 95 kg, é retomado o acoplamento CC para visualização da amplitude da corrente na bateria em conjunto com o *ripple*.

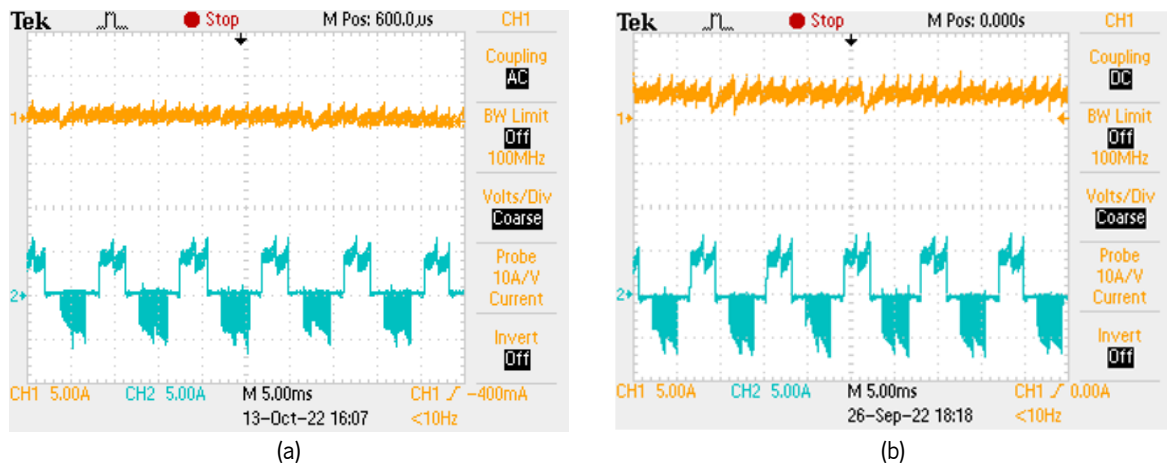


Figura 6.9 – Resultados experimentais para uma velocidade de 14 km/h: (a) Corrente na bateria (com acoplamento AC) e corrente na fase *a* (5 A/div.) para utilizador de 65 kg; (b) Corrente na bateria e corrente na fase *a* (5 A/div.) para utilizador de 95 kg.

Apesar de se ter optado por apresentar a corrente na bateria com acoplamento AC para o utilizador de 65 kg para se visualizar melhor o *ripple*, verificou-se que, tal como esperado, a sua amplitude era ligeiramente inferior à amplitude para o utilizador de 95 kg.

Por análise destes resultados, como referido anteriormente e como seria de esperar, é possível concluir que as correntes aumentam consideravelmente com o aumento da velocidade e com o aumento da carga. Verificou-se também um aumento considerável do *ripple* na corrente da bateria com o aumento da velocidade. Estes resultados foram obtidos em regime permanente. Para o regime transitório, até a velocidade igualar a referência, verificou-se que as amplitudes das correntes são maiores que em regime permanente, como seria de esperar.

6.4 Ensaio dos Componentes de Controlo

Aqui serão apresentados resultados experimentais dos componentes mais importantes para o funcionamento controlado da bicicleta elétrica. Estes são o sensor de velocidade, o sensor da pedaleira, o sensor de travagem e o sensor de tensão.

Na Figura 6.10 é possível ver o sinal de saída do sensor de velocidade para uma velocidade de 8 km/h. Como foi explicado previamente, cada pulso negativo do sinal representa uma rotação completa da roda e é através deste sinal, mais propriamente através do tempo entre cada pulso, que é calculada a velocidade atual da bicicleta por software.



Figura 6.10 – Sinal de saída do sensor de velocidade (2 V/div.).

De seguida são apresentados os sinais de saída do sensor da pedaleira. Na Figura 6.11(a) é possível ver o sinal de saída quando a mesma está a rodar para a frente, apresentando um *duty cycle* de aproximadamente 50%. Na Figura 6.11(b) é possível ver o sinal de saída quando a pedaleira está a rodar

para trás, com um *duty cycle* de aproximadamente 25%. Quando este sinal de saída é fixo, com nível lógico alto ou baixo, a pedaleira está parada.

Como também já foi referido, a análise deste sinal é feita por software e só são iniciadas as comutações do motor quando o sinal lido neste sensor é idêntico ao apresentado na Figura 6.11(a).

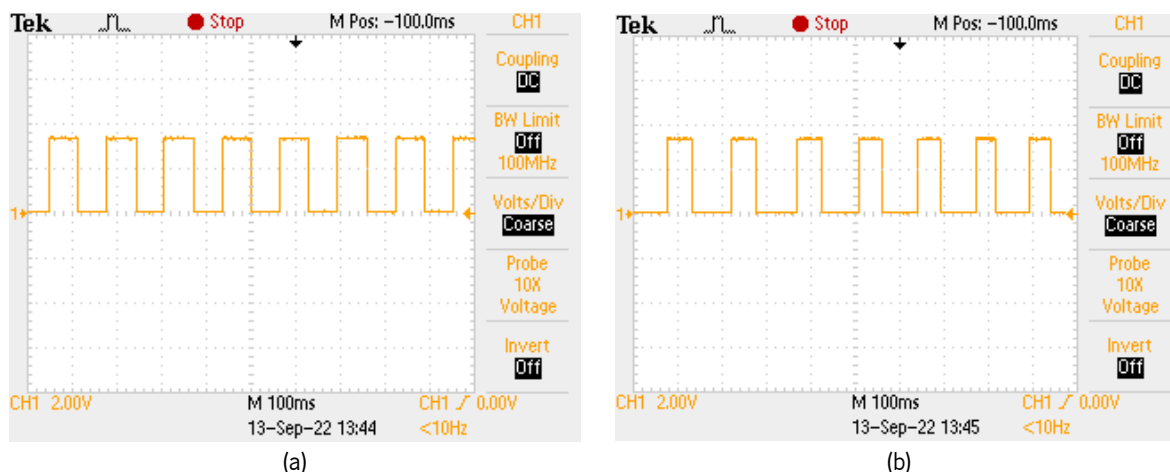


Figura 6.11 – Sinais de saída do sensor da pedaleira: (a) Quando a pedaleira está rodar para a frente (2 V/div.); (b) Quando a pedaleira está a rodar para trás (2 V/div.).

De seguida é apresentado o sensor de travagem. Como já foi referido, a saída deste sensor apresenta normalmente o nível lógico um, e quando uma ou as duas manetes de travão são pressionadas, a saída deste sensor passa para o nível lógico zero. Na Figura 6.12 é apresentado o sinal de saída deste sensor em conjunto com a tensão composta *ab*, de forma a comprovar que a alimentação do motor é desligada quando é detetada uma travagem.

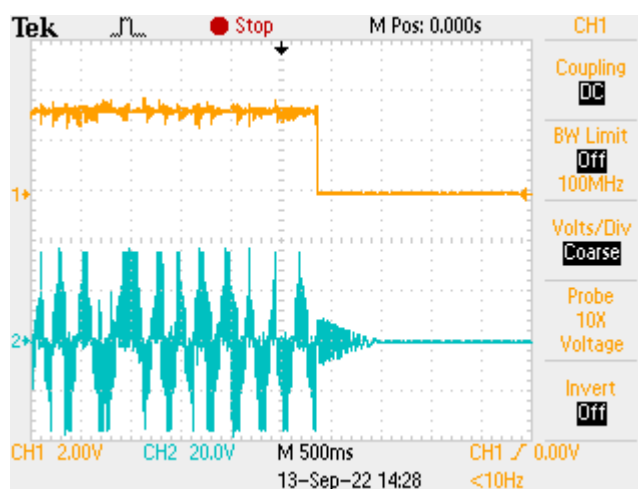


Figura 6.12 – Resposta da tensão composta *ab* (20 V/div.) ao acionamento dos travões (2 V/div.).

Por fim, é demonstrado o funcionamento do sensor de tensão. Como já foi referido, este sensor é importante para garantir que a bateria não trabalha abaixo da tensão mínima permitida. Esta tensão mínima foi definida para os 32 V. Para este sensor foi utilizado um divisor resistivo.

Para demonstração do funcionamento deste sensor, a bateria foi substituída por uma fonte de alimentação, sendo assim mais fácil variar a tensão de alimentação do sistema. Na Figura 6.13 é possível ver a tensão na alimentação e a tensão composta *ab*. Como se pode verificar, quando a tensão de alimentação baixa dos 32 V, o sistema é desligado.

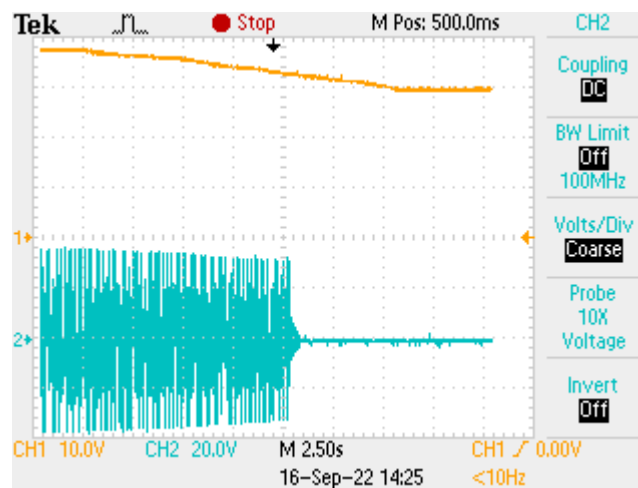


Figura 6.13 – Resposta da tensão composta *ab* (20 V/div) à diminuição da tensão de alimentação (10 V/div).

6.5 Conclusões

Ao longo deste capítulo foram apresentados os resultados experimentais do sistema desenvolvido. Inicialmente foram apresentados resultados experimentais com o sistema em vazio. Foi apresentada a saída dos sensores de efeito *Hall* e os sinais de comando dos semicondutores. De seguida, foi demonstrado o funcionamento do controlo de velocidade e foram apresentados resultados das tensões compostas e da bateria e ainda das correntes de fase e da bateria para várias velocidades.

De seguida, foram apresentados resultados dos testes em carga, onde foram apresentadas essencialmente as correntes de fase e da bateria, visto os outros parâmetros já analisados sem carga não variarem significativamente com a inclusão de uma carga.

Por fim, foram analisados os principais componentes utilizados no controlo da bicicleta, onde foram analisados o sensor de velocidade, o sensor da pedaleira, o sensor de travagem e por fim o sensor de tensão.

Capítulo 7

Conclusão

7.1 Conclusões

Ao longo desta dissertação foi apresentado e descrito o desenvolvimento dos sistemas de tração e controlo de uma bicicleta elétrica. Inicialmente foi apresentada a relevância das bicicletas elétricas no mundo atual. De seguida, foi feita uma breve introdução sobre a história das mesmas para se perceber o seu desenvolvimento ao longo do tempo, e foi ainda apresentado o mercado em constante crescimento deste tipo de veículos elétricos.

No capítulo 2, inicialmente foi apresentada a legislação portuguesa referente às bicicletas elétricas. A partir daí, foram referidos os componentes principais necessários para o funcionamento de um veículo deste tipo e posteriormente esses componentes foram analisados individualmente. Foram analisados os tipos de motores, tendo sido dado ênfase aos motores CC com escovas, indução e BLDC por serem os mais usados neste tipo de aplicações. Depois de efetuadas comparações entre eles, foi possível concluir que o motor BLDC é o que apresenta mais vantagens para aplicação numa bicicleta elétrica. De seguida, foram analisados os controladores do motor, tendo-se verificado que este é o componente fulcral da bicicleta elétrica, interligando todos os restantes componentes e que controla o seu bom funcionamento. A nível de sensores, foi visto que são necessários sensores para monitorizar a posição do motor, sendo os mais utilizados no caso do motor BLDC os sensores de efeito *Hall*. Para além desses, são necessários ainda sensores de controlo da pedaleira, sendo os mais utilizados para isso os sensores de cadência ou os sensores de binário, proporcionando cada um deles características distintas a uma bicicleta elétrica quando aplicados. Os sensores de cadência são ainda utilizados como sensor de velocidade. Por fim foram analisadas as baterias, começando por uma análise sobre a sua história. De seguida, foi analisada cada tecnologia, tendo-se concluído que as baterias mais apropriadas são as de iões de lítio. Apesar de apresentarem um preço elevado, estas são leves e apresentam uma grande densidade energética quando comparadas com as restantes tecnologias de baterias.

No capítulo 3, foi definida a proposta de solução a implementar neste projeto. Com a necessidade de aquisição de um motor e uma bateria, inicialmente foi feita uma compilação das soluções existentes no

mercado e foram referidos os critérios de seleção dos componentes. De seguida, foram apresentados os componentes adquiridos e a bicicleta usada neste projeto, sendo ainda apresentado o aspeto da bicicleta no final desta fase, com os componentes adquiridos já instalados. Por fim, foi definida a proposta de solução a implementar, que consistiu no desenvolvimento de um novo controlador, com tecnologia própria, para ser substituído pelo controlador adquirido. Este controlador contempla tanto a parte de potência como a de controlo. O objetivo foi que a bicicleta elétrica desenvolvida cumprisse todos os requisitos legais para circular nas estradas portuguesas.

No capítulo 4, inicialmente foi analisado ao pormenor o motor BLDC. Foi visto o seu princípio de funcionamento e o seu modelo elétrico e matemático. De seguida, foi analisado o conversor de potência necessário ao seu controlo, onde foi escolhido o inversor trifásico, e foram ainda analisadas técnicas de comutação para este inversor. Por fim, foram ainda estudadas técnicas de travagem regenerativa para aplicar neste motor, mas infelizmente verificou-se que as mesmas não são passíveis de aplicar no motor utilizado em específico, oferecendo o mesmo outras vantagens. De seguida, foram apresentados os modelos de simulação utilizados para os circuitos de potência e controlo que se pretendiam implementar na bicicleta elétrica, e os resultados de simulação obtidos a partir dos mesmos. Estes resultados foram divididos em três partes, inicialmente foram apresentados resultados de simulação sem nenhum tipo de controlo, apenas aplicando a sequência de comutação de acordo com as saídas dos sensores de efeito *Hall*, de forma a validar que o motor funcionava corretamente. De seguida, foram apresentados resultados com o controlo de velocidade que se pretendia implementar. Por fim, foram adicionadas diferentes cargas ao motor de forma a analisar o comportamento e resposta do sistema às mesmas. As simulações realizadas e apresentadas neste capítulo foram essenciais para validar os sistemas de controlo que serão aplicados no desenvolvimento da bicicleta elétrica.

No capítulo 5 foi descrita a implementação dos elementos constituintes da bicicleta elétrica, designadamente o circuito de potência e o sistema de controlo do controlador, e ainda os restantes componentes essenciais para o funcionamento controlado da bicicleta elétrica. Inicialmente foi descrito o circuito de potência, onde se usou um circuito integrado com o inversor trifásico. Para o teste deste circuito foi desenvolvida uma PCB. De seguida, foi apresentada a plataforma digital de controlo utilizada, e os restantes componentes utilizados no controlo da bicicleta elétrica. Foram ainda apresentados os 2 reguladores comutados necessários para corresponder aos níveis de tensão exigidos pelo sistema. Por fim, foi apresentado o resultado final obtido com o desenvolvimento de uma nova PCB, que incorporou todo o sistema.

No capítulo 6 foram apresentados os resultados experimentais do sistema desenvolvido. Inicialmente foram apresentados resultados experimentais com o sistema em vazio. Foi apresentada a saída dos sensores de efeito *Hall* e os sinais de comando dos semicondutores. De seguida, foi demonstrado o funcionamento do controlo de velocidade e foram apresentados resultados das tensões compostas e da bateria, e ainda das correntes de fase e da bateria para várias velocidades. De seguida, foram apresentados resultados dos testes em carga, onde foram apresentadas essencialmente as correntes de fase e da bateria, visto os outros parâmetros já analisados sem carga não variarem significativamente com a inclusão de uma carga. Por fim, foram analisados os principais componentes utilizados no controlo da bicicleta, onde foram analisados o sensor de velocidade, o sensor da pedaleira, o sensor de travagem e por fim o sensor de tensão.

Depois de resumido o trabalho desenvolvido ao longo deste projeto, de seguida são apresentadas as principais conclusões obtidas com a realização deste trabalho de dissertação de mestrado, no qual se tratou do desenvolvimento dos sistemas de tração e controlo para uma bicicleta elétrica:

- As bicicletas elétricas são veículos em constante desenvolvimento, estando o seu desenvolvimento associado ao desenvolvimento de outras áreas, principalmente das áreas da eletrónica de potência e das baterias, que permite que as bicicletas elétricas sejam veículos cada vez mais eficientes e viáveis. Desta forma, este tipo de veículos é visto como uma boa alternativa aos veículos com motor de combustão como meio de transporte.
- Apesar da legislação muito restrita para este tipo de veículos, uma bicicleta elétrica pode ser projetada para priorizar o menor esforço do utilizador ou uma maior autonomia. As diferenças entre ambas as projeções residem no tipo de sensor de pedaleira (binário ou cadência) e controlo utilizados. Para a adoção da bicicleta elétrica como meio de transporte, considerou-se importante priorizar o menor esforço do utilizador, tendo sido o presente trabalho desenvolvido nesse sentido e tendo sido utilizado um sensor de cadência e o controlo de velocidade.
- Com a análise de soluções no mercado efetuada, foi possível concluir que a oferta a nível de componentes para bicicletas elétricas ainda é algo limitada, existindo apenas uma boa variedade de produtos a nível de baterias. Para além disso, não existe propriamente nenhum modelo para a descrição dos componentes à venda, ficando um pouco ao critério de cada vendedor a descrição dos mesmos. Esta descrição é muitas vezes insuficiente e complica o processo de compra, como foi o caso nesta dissertação, onde foi necessário um contacto direto com o vendedor para garantir que se

adquiria o pretendido. Também, os componentes encontrados não vêm devidamente documentados. Concluiu-se ainda que uma boa parte dos produtos encontrados à venda em Portugal não vão de encontro com a legislação em vigor. Em suma, com o aumento da procura por estes componentes para bicicletas elétricas, claramente este mercado precisa de ser reestruturado e normalizado.

- Quanto ao trabalho prático realizado, relativamente à parte de controlo, uma das partes mais trabalhosas foi descobrir o princípio de funcionamento dos vários componentes do *kit* adquirido, pois o mesmo não veio acompanhado de um *datasheet* nem foi possível obter um. Depois de descoberto o princípio de funcionamento dos componentes, foi ainda necessário realizar o condicionamento de sinal e desenvolver o software para correta leitura dos seus sinais de saída. Para além dos componentes do *kit* adquirido, foram ainda utilizados outros componentes e funcionalidades, que foram descritos ao longo desta dissertação, sendo necessário interligar todo o software desenvolvido para cada componente e funcionalidade de forma a garantir o funcionamento totalmente controlado da bicicleta.
- Relativamente à parte de tração, aquando da fase de implementação e testes em vazio, o sistema teve um bom desempenho, mas na fase final do desenvolvimento deste projeto, na fase de testes em carga, houve a perceção que o sistema não estaria preparado para velocidades até 25 km/h, principalmente devido às elevadas correntes, sendo necessário reavaliar a velocidade máxima permitida para o protótipo desenvolvido.
- Inicialmente, o ruído introduzido no sistema pelo funcionamento do motor afetou um pouco o desenvolvimento e funcionamento do sistema, principalmente da parte de controlo, mas recorrendo a hardware ou software, tudo foi resolvido. Os resultados obtidos também foram um pouco afetados por este ruído, mas todos foram de encontro ao esperado.
- Apesar disto, na execução deste trabalho de dissertação de mestrado, foi possível concluir com êxito os objetivos propostos, tendo sido implementados com sucesso todos os algoritmos e funcionalidades pretendidas.

7.2 Sugestões de Trabalho Futuro

Na execução deste projeto foi implementada uma versão final do controlador, e verificou-se o correto funcionamento do mesmo em conjunto com os restantes componentes. Contudo, tendo em vista otimizar

o sistema e aperfeiçoar o desempenho do mesmo, existem alguns aspetos que podem ser melhorados. Desta forma, como trabalho futuro, recomenda-se os seguintes desenvolvimentos:

- Estudo e experimentação de outras formas de controlo para além do controlo de velocidade implementado, de forma a comparar os seus desempenhos.
- Otimização dos algoritmos de controlo do motor e estudo e implementação de um controlo de corrente para operar em conjunto com o controlo de temperatura já implementado, de forma a garantir a segurança do hardware para velocidades até 25 km/h.
- Estudo dos ruídos introduzidos pelo funcionamento do motor no sistema, de modo a reduzir o seu impacto, e melhorar o condicionamento de sinal dos sensores, de modo a reduzir os níveis de ruído presentes nos valores medidos e assim melhorar a performance dos algoritmos de controlo implementados.
- Reduzir o tamanho da placa desenvolvida, recorrendo a componentes SMD e utilizando um microprocessador em vez de um microcontrolador completo, tendo como objetivo tornar a placa idêntica aos controladores de bicicletas elétricas comerciais.
- Estudo, desenvolvimento e implementação de algum método de reaproveitamento da energia cinética da bicicleta elétrica durante as travagens e descidas, dada a impossibilidade de implementação do método de travagem regenerativa apresentado nesta dissertação;
- Desenvolvimento de uma nova interface gráfica de forma ao utilizador, para além de ter acesso ao estado de carga da bateria e poder definir a referência de velocidade pretendida, ter ainda acesso a diversos dados como por exemplo distância percorrida, velocidade média e instantânea, autonomia e data e hora.

Lista de Referências

- [1] B. C. Langford, C. R. Cherry, D. R. Bassett, E. C. Fitzhugh, and N. Dhakal, "Comparing physical activity of pedal-assist electric bikes with walking and conventional bicycles," *J. Transp. Heal.*, vol. 6, no. June, pp. 463–473, 2017, doi: 10.1016/j.jth.2017.06.002. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jth.2017.06.002>
- [2] M. E. Biresselioglu, M. Demirbag Kaplan, and B. K. Yilmaz, "Electric mobility in Europe: A comprehensive review of motivators and barriers in decision making processes," *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 109, no. January, pp. 1–13, 2018, doi: 10.1016/j.tra.2018.01.017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.01.017>
- [3] O. J. Bolton, "Electrical Bike Patent," *United States Pat. Off.*, pp. 1–5, 1895.
- [4] H. W. Libbey, "Electrical Bike Patent," *United States Pat. Off.*, pp. 1–3, 1967.
- [5] G. J. Scott, "Electrical Bike Patent," *United States Pat. Off.*, pp. 1–3, 1898.
- [6] J. Schnepf, "Electrical Bike Patent," *United States Pat. Off.*, pp. 1–6, 1899.
- [7] F. E. Jamerson and E. Benjamin, "Worldwide electric powered two wheel market," *World Electr. Veh. J.*, vol. 5, no. 2, pp. 269–275, 2012, doi: 10.3390/wevj5020269.
- [8] Statista, "Worldwide sales of electric bicycles in 2016, by region," 2016. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/255658/worldwide-sales-of-electric-bicycles-by-region/>. [Accessed: 19-Dec-2020]
- [9] R. Yi, C. C. Hang, Y. Wang, and R. Ma, "The role of government in an emerging disruptive innovation: The case of E-bikes in China," *Disruptive Innov. Chinese Indian Businesses Strateg. Implic. Local Entrep. Glob. Incumbents*, pp. 50–67, 2013, doi: 10.4324/9780203387542.
- [10] CONEBI, "European Bicycle Market 2017 Edition," 2017 [Online]. Available: <http://www.conebi.eu/facts-and-figures/>
- [11] Bike Europe, "Belgian Market: Over 50 Percent of All Bikes Sold Are Electric Ones," 2020. [Online]. Available: https://www.bike-eu.com/sales-trends/nieuws/2020/01/belgian-market-over-50-percent-of-all-bikes-sold-are-electric-ones-10137186?utm_source=Vakmedianet&utm_medium=email&utm_campaign=20200114-bikeeurope-std&tid=TIDP1894487X3AB62330221B4CD0B31F75CCEE10D761YI. [Accessed: 19-Dec-2020]
- [12] Revista Bicicleta, "Na Bélgica, foram vendidas mais bicicletas elétricas do que convencionais em 2019," 2020. [Online]. Available: <https://revistabicicleta.com/e-bike/na-belgica-foram-vendidas-mais-bicicletas-eletricas-do-que-convencionais-em-2019/>. [Accessed: 19-Dec-2020]
- [13] "Gira. Bicicletas de Lisboa." [Online]. Available: <https://www.gira-bicicletasdelisboa.pt/>. [Accessed: 19-Dec-2020]
- [14] "Programa de apoio à aquisição de bicicletas." [Online]. Available: <https://www.lisboa.pt/programa-de-apoio-aquisicao-de-bicicletas>. [Accessed: 19-Dec-2020]
- [15] Observador, "Lisboa apoia compra de bicicletas convencionais por residentes, estudantes e trabalhadores," 2020. [Online]. Available: <https://observador.pt/2020/07/15/lisboa-apoia-compra-de-bicicletas-convencionais-por-residentes-estudantes-e-trabalhadores/>. [Accessed: 19-Dec-2020]
- [16] Diário de notícias, "A marca portuguesa que toda a gente quer ter," 2018. [Online]. Available: <https://www.dn.pt/1864/a-marca-portuguesa-que-toda-a-gente-quer-ter-9847029.html>. [Accessed: 19-

- Dec-2020]
- [17] Observador, “Órbita, As Bicicletas Portuguesas De Outros Planetas,” 2017. [Online]. Available: <https://observador.pt/2017/04/15/orbita-as-bicicletas-portuguesas-de-outros-planetas/>. [Accessed: 19-Dec-2020]
- [18] NiT, “Esta marca nacional vende bicicletas elétricas feitas em Portugal,” 2020. [Online]. Available: <https://www.nit.pt/fora-de-casa/na-cidade/esta-marca-nacional-vende-bicicletas-eletricas-feitas-em-portugal>. [Accessed: 19-Dec-2020]
- [19] BEEQ, “BEEQ website.” [Online]. Available: <https://www.beeq-bicycles.com/>. [Accessed: 19-Dec-2020]
- [20] NiT, “Beeq: as bicicletas elétricas portuguesas que a pandemia não parou,” 2020. [Online]. Available: <https://www.nit.pt/fora-de-casa/na-cidade/beeq-bicicletas-eletricas-portuguesas-que-pandemia-nao-parou>. [Accessed: 19-Dec-2020]
- [21] BEEQ, “BEEQ E800 Urban Motion.” [Online]. Available: <https://www.beeq-bicycles.com/product/urban-motion/1>. [Accessed: 19-Dec-2020]
- [22] E-Mountainbike Magazine, “Brose Drive S Alu in Review,” 2020. [Online]. Available: <https://ebike-mtb.com/en/brose-drive-s-alu-2019-review/>. [Accessed: 19-Dec-2020]
- [23] Assembleia da República, “Lei n.º 72/2013,” pp. 5446–5499, 2013 [Online]. Available: <https://dre.pt/application/conteudo/499526>
- [24] K. T. Chau, C. C. Chan, and C. Liu, “Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, pp. 2246–2257, 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.918403.
- [25] N. B. Hung and O. Lim, “A review of history, development, design and research of electric bicycles,” *Appl. Energy*, vol. 260, no. November 2019, p. 114323, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114323. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114323>
- [26] P. Yedamale, “AN885 - Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals,” *Microsh. Technol. Inc.*, pp. 1–20, 2003.
- [27] Elecycle, “What you need to know about electric bike controller,” 2019. [Online]. Available: <https://www.elecycles.com/blog/post/what-you-need-to-know-about-electric-bike-controller/>. [Accessed: 04-Jan-2021]
- [28] Power Watcher, “Electric Bike Controller - Wich One to Choose?” [Online]. Available: <https://powerwatcher.net/e-bike-controllers/>. [Accessed: 04-Jan-2021]
- [29] Live Science, “Cadence Sensors: What Are They And How Do They Work,” 2013. [Online]. Available: <https://www.livescience.com/40064-cadence-sensors.html>. [Accessed: 04-Jan-2021]
- [30] JuicedBikes, “E-Bike Pedal Sensors.” [Online]. Available: <https://www.juicedbikes.com/pages/torque-vs-cadence-sensors>. [Accessed: 04-Jan-2021]
- [31] Evelo Electric Bicycles, “What is the Difference Between a Cadence Sensor and a Torque Sensor on an Electric Bike?” [Online]. Available: <https://evelo.com/blogs/learn/what-is-the-difference-between-a-cadence-sensor-and-a-torque-sensor-on-an-electric-bike>. [Accessed: 04-Jan-2021]
- [32] Honeywell Inc., “Hall Effect Sensing and Application,” *Micro Switch Sens. Control*, p. 0 [Online]. Available: https://sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=47847
- [33] S. F. Tie and C. W. Tan, “A review of energy sources and energy management system in electric vehicles,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 20, pp. 82–102, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.11.077. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.077>
- [34] R. Pergher, “Estimativa do Estado de Saúde de Baterias Chumbo-Ácido Seladas Aplicadas em Sistemas de Emergência de Elevadores,” *Trab. Conclusão do Curso Eng. Control. e Automação da Univ. Fed. do Rio*

- Gd. do Sul*, 2018.
- [35] B. Scrosati, "History of lithium batteries," *J. Solid State Electrochem.*, vol. 15, no. 7–8, pp. 1623–1630, 2011, doi: 10.1007/s10008-011-1386-8.
- [36] Battery University, "What's the Best Battery?," 2017. [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/archive/whats_the_best_battery. [Accessed: 04-Jan-2020]
- [37] U. Neethu and V. R. Jisha, "Speed Control of Brushless DC Motor: A Comparative Study," *PEDES 2012 - IEEE Int. Conf. Power Electron. Drives Energy Syst.*, pp. 1–5, 2012, doi: 10.1109/PEDES.2012.6484349.
- [38] M. Mahmud, S. M. A. Motakabber, A. H. M. Zahirul Alam, and A. N. Nordin, "Adaptive PID Controller Using for Speed Control of the BLDC Motor," *IEEE Int. Conf. Semicond. Electron. Proceedings, ICSE*, vol. 2020-July, pp. 168–171, 2020, doi: 10.1109/ICSE49846.2020.9166883.
- [39] R. J. F. Araújo, "Desenvolvimento de uma Bicicleta Elétrica," *Diss. na Univ. do Minho*, 2012.
- [40] X. Nian, F. Peng, and H. Zhang, "Regenerative Braking System of Electric Vehicle Driven by Brushless DC Motor," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 10, pp. 5798–5808, 2014, doi: 10.1109/TIE.2014.2300059.
- [41] P. B. Bobba and K. R. Rajagopal, "Compact Regenerative Braking Scheme for a PM BLDC Motor Driven Electric Two-Wheeler," *2010 Jt. Int. Conf. Power Electron. Drives Energy Syst. PEDES 2010 2010 Power India*, pp. 1–5, 2010, doi: 10.1109/PEDES.2010.5712566.
- [42] J. A. de S. Pereira, "Estudo e Implementação de Técnicas de Controlo para um Motor BLDC de uma Bicicleta Elétrica," *Diss. na Univ. do Minho*, 2017.
- [43] O. Semiconductor, "FNA41060/FNA41060B2 Motion SPM 45 Series." 2017.
- [44] T. Instruments, "TMS320F2802x Piccolo™ Microcontrollers." 2019.
- [45] T. Power, "TSR 0.6WI Series." 2021.
- [46] M. P. Solutions, "OKI-78SR Series." 2021.

Anexo

Análise de Mercado Efetuada

Nas seguintes tabelas é apresentado o resultado da análise de mercado efetuada para a compra dos componentes e as ofertas de cada loja ou fabricante visados nesta pesquisa. As informações presentes nas tabelas foram utilizadas para conhecer as ofertas existentes no mercado e foram obtidas nos sites das lojas. Desta forma, podem existir inconsistências nos dados apresentados de loja para loja, pois nem todas as lojas fornecem os mesmos dados. Os links e os preços apresentados foram consultados em novembro de 2021.

Volt Store Link		
Produto	Descrição	Preço final
Motor		
Motor Dianteiro EBMFP Link	250 W – 36 V – 2.2 kg	178.35 €
Motor Traseiro EBMTTP Link	250 W – 36 V – 2.2 kg	178.35 €
Bateria		
Bateria tipo tubo SAMSUNG Link	250 W – 36 V – 3.6 kg - 11.6 Ah: aprox. 85 km	361.62 €
	250 W – 36 V – 3.6 kg – 14 Ah: aprox. 100 km	413.28 €
	500 W – 48 V – 3.4 kg – 11.6 Ah: aprox. 85 km	369 €
Bateria Preta Fina com Luz Link	250 W – 36 V – 3 kg - 11.6 Ah: aprox. 85 km	338.25 €
	250 W – 36 V – 3 kg – 14.5 Ah: aprox. 100 km	461.25 €
	500 W – 48 V – 3 kg – 11.6 Ah: aprox. 85 km	477.24 €
Bateria tipo tubo LG Link	500 W – 48 V – 4 kg – 16 Ah: aprox. 120 km	559.65 €
Kit		
Kit Traseiro ou Dianteiro Link	Motor EBMFP ou EBMTTP, Sensor PAS, Controlador	221.4 €

Solaremobility Link		
Produto	Descrição	Preço final
Bateria (Fotona Mobility)		
Bateria de aperto no quadro/espigão selim Link	36 V – 5 kg – 16 Ah: até 70 km	425 €
	36 V – 5 kg – 19.2 Ah: até 70 km	549 €
	48 V – 5 kg – 12.8 Ah: até 70 km	449 €
Bateria de aperto no suporte de bidão Link	36 V – 5 kg – 16 Ah: até 70 km	445 €
	36 V – 5 kg – 19.2 Ah: até 70 km	569 €
	48 V – 5 kg – 12.8 Ah: até 70 km	469 €
Bateria traseira para aperto na cremalheira Link	36 V – 5 kg – 16 Ah: até 70 km	469 €
	36 V – 5 kg – 19.2 Ah: até 70 km	593 €
	48 V – 5 kg – 12.8 Ah: até 70 km	493 €
Bateria triangular para abraçar no quadro (grande autonomia, não especificada) Link	Várias versões	Min. 653 €
Kit		
<i>Kit</i> com bateria de aperto no suporte de bidão Link	Motor 250 W – 36 V, Bateria (várias versões, min. 36 V – 9.6 Ah: até 35 km), Jante com motor instalado, Travões, Sensor PAS, LCD multifunções	Min. 467 €
<i>Kit</i> com bateria de aperto no quadro/espigão do selim Link	Motor 250 W – 36 V, Bateria (várias versões, min. 36 V – 9.6 Ah: até 35 km), Jante com motor instalado (Só até 20 polegadas), Travões, Sensor PAS, LCD multifunções	Min. 475 €
<i>Kit</i> com bateria traseira de aperto na cremalheira Link	Motor 250 W – 36 V, Bateria (várias versões, min. 36 V – 9.6 Ah: até 35 km), Jante com motor instalado, Travões, Sensor PAS, LCD multifunções	Min. 448 €
<i>Kit</i> com bateria triangular para abraçar no quadro Link	Motor 250 W – 36 V, Bateria (várias versões, min. 36 V – 32 Ah: até 115 km), Jante com motor instalado, Travões, Sensor PAS, LCD multifunções	Min. 878 €

BeElectric Link		
Produto	Descrição	Preço final
Bateria (Bosch)		
Bateria de suporte traseiro		
Power Pack Rack (Linha Clássica)	400 Wh – 36 V – 11 Ah – 2.6 kg Link	557.12 €
Power Pack Rack (Linha Platinum)	300 Wh – 36 V – 8.2 Ah – 2.6 kg Link	484.77 €
	400 Wh – 36 V – 11 Ah – 2.6 kg Link	619.13 €
	500 Wh – 36 V – 13.4 Ah – 2.7 kg Link	794.85 €
Power Pack Rack (Linha Anthracite)	300 Wh – 36 V – 8.2 Ah – 2.6 kg Link	505.43 €
	400 Wh – 36 V – 11 Ah – 2.6 kg Link	639.81 €
	500 Wh – 36 V – 13.4 Ah – 2.7 kg Link	815.53 €
Bateria de suporte no quadro		
Power Pack in Frame (preta/branca) (Linha Clássica)	400 Wh – 36 V – 11 Ah Link	536.44 €
Power Pack in Frame (Linha Platinum)	400 Wh – 36 V – 11 Ah – 2.5 kg Link	608.80 €
	500 Wh – 36 V – 13.4 Ah – 2.6 kg Link	784.52 €
Power Pack in Frame (Linha Anthracite)	300 Wh – 36 V – 8.2 Ah – 2.5 kg Link	484.77 €
	400 Wh – 36 V – 11 Ah – 2.5 kg Link	619.13 €
	500 Wh – 36 V – 13.4 Ah – 2.6 kg Link	794.85 €
Power Tube in Frame (vertical/horizontal)	500 Wh – 36 V – 13.4 Ah Link	795 €

Bicicleta Clássica Link		
Produto	Descrição	Preço final
Bateria		
Bateria FT 11 Ah (indicada para aperto no suporte de bidão) Link	36 V – 3.25 kg - 11 Ah: aprox. 80 km	325 €
Bateria FT 16 Ah (indicada para aperto no suporte de bidão) Link	36 V – 3.25 kg – 16 Ah: aprox. 110 km	439 €
Kit		
<i>Kit</i> Motor Central CTX Link	Motor 250 W – 36 V c/ sensor de binário, PAS e velocidade, Bateria (pedido de informação enviado sobre se está incluída a bateria – c/ bateria para porta-bagagem 850 €), LCD multifunções, Restantes componentes mecânicos da pedaleira	545 €
<i>Kit</i> Platinum LCD5 (dianteiro ou traseiro)	Motor 36 V instalado numa roda dianteira ou traseira, Bateria FT (indicada para suporte de bidão) 9 Ah: até 65 km, Controlador, LCD multifunções Link	572 €
	Motor 36 V instalado numa roda dianteira ou traseira, Bateria BT (indicada para suporte de bidão) 9 Ah: até 65 km, Controlador, LCD multifunções Link	590 €
	Motor 36 V instalado numa roda dianteira ou traseira, Bateria CK com luz (indicada para suporte traseiro) 11 Ah: até 65 km, Controlador, LCD multifunções Link	619 €
<i>Kit</i> Platinum LED3 Link	Motor 36 V – 250 W para instalar na roda dianteira ou traseira, Acelerador, Controlador, Sensor PAS, LCD multifunções (Bateria não incluída)	380 €

E-BikeLovers Link		
Produto	Descrição	Preço final
Bateria (Bosch)		
Bateria de suporte traseiro		
Power Pack Rack (Linha Anthracite) Link	400 Wh – 36 V – 11 Ah – 2.6 kg	639 €
Bateria de suporte no quadro		
Power Pack in Frame (Linha Anthracite) Link	500 Wh – 36 V – 13.4 Ah – 2.6 kg	760 €
Power Tube in Frame (vertical/horizontal)	500 Wh – 36 V – 13.4 Ah Link	780 €
	625 Wh – 36 V Link	929 €

iBike Elétricas Link		
Produto	Descrição	Preço final
Bateria		
Bateria Link	36 V - 14 Ah (precisa de condicionamento)	181.59 €
Bateria Green Cell Link	36 V – 3 kg – 10.4 Ah	174.95 €
Bateria Green Cell Link	36 V – 3.2 kg – 13 Ah	253.14 €
Bateria MXS Link	36 V – 20 Ah – Carregador USB (outras versões mais caras disponíveis)	378.99 €
Kit		
<i>Kit</i> Motor C-FUNN Link	Motor 250 W – 24 V, Controlador, Acelerador	79.99 €
<i>Kit</i> Motor Link	Motor 250 W – 36 V, Controlador, Acelerador	112.99 €
<i>Kit</i> Dianteiro (com motor e bateria integrados no cubo da roda) Link	Motor 240 W – 36 V, Bateria (idêntico ao <i>kit</i> vendido pela HybridCycles)	320 €

Hollandbikeshop Link		
Produto	Descrição	Preço final
Motor		
Muitos motores Link	Vasta gama de marcas e modelos de motores para cubos de roda ou centrais	Min. 253 €
Bateria		
Muitas baterias Link	Vasta gama de marcas e modelos de baterias	Min 303 €

SanelKit Link		
Produto	Descrição	Preço final
Bateria		
Bateria 36 V Link	Bateria 36 V – Suporte quadro	340 €
Bateria 48 V Link	Bateria 48 V – Suporte quadro	395 €
Kit		
<i>Kit</i> motor frontal Link	Motor 250 W – 36 V instalado num aro, Controlador, Display, Acelerador, Sensor PAS, Bateria (várias opções)	Min 595 €
<i>Kit</i> motor traseiro Link	Motor 250 W – 36 V instalado num aro, Controlador, Display, Acelerador, Sensor PAS, Bateria (várias opções)	Min 610 €

Santiagobikes Link		
Produto	Descrição	Preço final
Kit Link		
<i>Kit</i> Traseiro ou Dianteiro 250 W	Motor 250 W – 36 V – 2.2 kg dianteiro ou traseiro, Controlador, Sensor PAS	Desde 550 €
<i>Kit</i> Central 250 W	Motor 250 W – 36 V – 2.2 kg, Controlador, Sensor PAS, Conjunto Crank, Travões	

Probikeshop Link		
Produto	Descrição	Preço final
Bateria		
Muitas baterias Link	Vasta gama de modelos de baterias Bosch e Shimano	Min. 427,90 €

Deporvillage Link		
Produto	Descrição	Preço final
Bateria		
Algumas baterias Link	Algumas baterias marca Shimano e Vision, na sua maioria desenvolvidas para modelos de bicicletas específicos	Min. 549 €

Biclas Link		
Produto	Descrição	Preço final
Bateria (Bosch)		
Bateria de suporte traseiro		
Power Pack Rack (Linha Anthracite)	400 Wh – 36 V – 11 Ah – 2.6 kg Link	499.99 €
	500 Wh – 36 V – 13.4 Ah – 2.7 kg Link	699.99 €
Bateria de suporte no quadro		
Power Pack in Frame (Linha Anthracite) Link	500 Wh – 36 V – 13.4 Ah – 2.6 kg	759.99 €
Power Tube in Frame (vertical/horizontal)	500 Wh – 36 V – 13.4 Ah Link	799.99 €
	625 Wh – 36 V – 16.7 Ah Link	919.99 €
Kit		
<i>Kit</i> Traseiro ou Dianteiro Link	Motor 250 W – 36 V – 2.2 kg dianteiro ou traseiro, Controlador, Sensor PAS, Display, Bateria tipo tubo 11.6 Ah	629.99 €

HybridCycles Link		
Produto	Descrição	Preço final
Kit		
<i>Kit</i> Dianteiro (com motor e bateria integrados no cubo da roda) Link	Motor 36 V – 240 W, Bateria 36 V – 3.2 Ah: aprox. 50 km, Controlador, Restantes acessórios (conectividade Bluetooth)	350 €