

Universidade do Minho

Pedro Miguel Serôdio Basílio e Serôdio

**Desenvolvimento de um Conversor
CC-CC Bidirecional *Interleaved* para
Testes de Baterias de Lítio Ferro Fosfato
(LiFePO₄)**

Dissertação submetida na Universidade do Minho
para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Eletrónica e de Computadores

Trabalho realizado sob orientação do
Doutor Vítor Monteiro

Março de 2018

DECLARAÇÃO

Pedro Miguel Seródio Basílio e Seródio

Endereço eletrónico: a68568@alunos.uminho.pt

Título da Dissertação:

Desenvolvimento de um Conversor CC-CC Bidirecional *Interleaved* para Testes de Baterias de Lítio Ferro Fosfato (LiFePO₄)

Orientador:

Doutor Vítor Monteiro

Dissertação submetida na Universidade do Minho para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Eletrónica e de Computadores

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA
EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO,
QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____

“Tenho em mim todos os sonhos do mundo.”

Fernando Pessoa

Agradecimentos

Após finalizar mais uma etapa presente no meu percurso académico, não poderia deixar os meus sinceros agradecimentos a todos os que diretamente ou indiretamente ajudaram na contribuição para o sucesso ao longo deste percurso.

Em primeiro lugar, gostaria de desejar um especial agradecimento ao meu orientador, Doutor Vítor Monteiro, por todo o seu apoio, revisões, sugestões e conhecimento transmitido ao longo deste trabalho, que se mostrou sempre disponível desde o primeiro momento.

De seguida, quero também deixar um agradecimento especial ao Mestre Tiago Sousa por toda a disponibilidade e ajuda que me prestou ao longo da dissertação.

Agradeço também aos meus colegas e amigos presentes no laboratório pelo espírito de entreajuda e equipa, e conseqüentemente, pelo bom ambiente vivido no laboratório e também quero agradecer a todos os investigadores do GEPE, em particular o Engenheiro José Cunha e o Mestre Luís Barros.

E como os últimos são sempre os primeiros, gostaria de deixar um enorme agradecimento aos meus pais, ao meu irmão, à minha namorada, à minha família e aos meus amigos, pela força e apoio incondicional ao longo deste percurso.

Resumo

A presença da tecnologia através de dispositivos móveis na vida quotidiana dos cidadãos é, cada vez mais, imprescindível, apresentando notórias vantagens. Contudo, a evolução tecnológica dos dispositivos torna-os fortemente dependentes de fontes de energia. Consequentemente, torna-se imprescindível que, do ponto de vista tecnológico, estes sejam energeticamente eficientes, contribuindo também para maximizar a sua autonomia. Neste contexto, é de primordial importância o estudo e a caracterização de sistemas de alimentação baseados em baterias, nomeadamente, no que concerne aos processos de carga e descarga. No contexto desta dissertação são consideradas, em particular, as baterias do tipo Lítio Ferro Fosfato (LiFePO_4).

As baterias do tipo LiFePO_4 apresentam-se como uma das tecnologias de armazenamento de energia elétrica mais evoluídas no que diz respeito às baterias secundárias, principalmente, devido às suas variadas vantagens em comparação com outras tecnologias existentes. Posto isto, destacam-se aspetos como a durabilidade, reduzida taxa de autodescarga, não possuem efeito memória e não contêm materiais poluentes. Além disso, estão presentes em diversas áreas, como por exemplo, mobilidade elétrica, sistemas de armazenamento de energia e interface com dispositivos/sistemas de energias renováveis.

Assim, a finalidade desta dissertação consiste no desenvolvimento de um conversor bidirecional para testes de baterias de LiFePO_4 e, posteriormente, efetuar vários testes com o intuito de obter as curvas características de carga/descarga da mesma. Com o objetivo de efetuar vários ensaios à bateria de LiFePO_4 , foi desenvolvido um equipamento de eletrónica de potência que permite carregar e descarregar a bateria em estudo, com diferentes níveis de tensão e de corrente. Para visualizar a evolução das principais variáveis em análise, foi também desenvolvida uma aplicação gráfica que permite, em tempo real, efetuar a interface com o utilizador. O equipamento desenvolvido é composto por um conversor de eletrónica de potência do tipo CC-CC *buck-boost*, com topologia *interleaved*, sendo este controlado por um sistema baseado no *Digital Signal Processor TMS320F28027FPTT* da *Texas Instruments*.

Palavras-chave:

Baterias LiFePO_4 , *Buck-Boost*, Conversores CC-CC, *Interleaved*, Armazenamento de Energia, Curva Característica Carga/Descarga.

Abstract

The technologies' presence in citizens' everyday life, mainly in mobile form, is indubitably essential, presenting itself with numerous advantages. On the other hand, it comes with a large dependency, power sources. Therefore, to reduce these very same energy dependencies, it is imperative, from a technology point of view, that these devices become more energy efficient, maximizing the autonomy. With this taken in account it is extremely important to study and review the battery-based systems, mainly the processes of charging and discharging. On this dissertation's context is considered LiFePO₄ batteries, since they are one of the most promisor kind of batteries available in the market.

LiFePO₄ batteries are one of the most evolved ways of electric energy storing in secondary batteries, this being backed up by the numerous advantages in comparison to the other existent technologies. From which are highlighted the durability, the reduced self-discharging rate and the lack of memory effect as well as the nonexistence of polluting materials. Apart from that they are present in several areas such as smart grids, electric mobility and interface with renewable energy devices/systems.

The main focus of this dissertation is to implement a bidirectional charging and discharging system made for LiFePO₄ batteries, later performing a series of test to obtain charging and discharging characteristic curves. With the intuit of performing several tests to the LiFePO₄ battery, the development of a power electronics equipment based on a bidirectional CC-CC convertor was required, to allow charging and discharging the battery with different levels of current and voltage. To visualize the evolution of the main variables, a graphic application was developed allowing real time interface with the user. The developed equipment consists on a CC-CC buck-boost with interleaved topology power electronics converter, controlled by a DSP based system, Texas Instruments *TMS320F28027FPTT*.

Keywords: LiFePO₄ Batteries; CC-CC Converter, *Buck-Boost*, *Interleaved*, Electric Energy Storing, Charging/Discharging Characteristic Curve.

ÍNDICE

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract.....	ix
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas	xix
Acrónimos e Siglas	xxi
Capítulo 1 Introdução.....	1
1.1 O Papel das Baterias Secundárias nos Dias de Hoje.....	1
1.2 Enquadramento e Motivação	2
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Organização e Estrutura da Tese.....	4
Capítulo 2 Baterias Secundárias Eletroquímicas e Métodos de Carga e Descarga	7
2.1 Introdução.....	7
2.2 Baterias Eletroquímicas	7
2.2.1 Modelo Elétrico da Bateria	8
2.2.2 Principais Parâmetros da Bateria	9
2.3 Tecnologias de Baterias	13
2.3.1 Baterias de Chumbo-Ácido (Lead Acid).....	13
2.3.2 Baterias de Níquel-Cádmio (NiCd).....	14
2.3.3 Baterias de Níquel Hidreto Metálico (NiMH)	16
2.3.4 Baterias de Iões de Lítio (Li-ion).....	17
2.3.5 Baterias de Iões de Lítio Polímero (Li-Pol).....	19
2.3.6 Baterias de Iões de Lítio Ferro Fosfato (LiFePO ₄)	20
2.3.7 Comparação das Diferentes Tecnologias de Baterias	21
2.4 Fatores que Podem Influenciar o Desempenho das Baterias	23
2.5 Métodos de Carregamento de Baterias	23
2.5.1 Corrente Constante	24
2.5.2 Tensão Constante.....	24
2.5.3 Corrente Constante/Tensão Constante	25
2.5.4 Carga por Pulsos	26
2.5.5 Método Reflex	26
2.5.6 Comparação dos Métodos de Carga de Baterias.....	27
2.6 Métodos de Descarga de Baterias	27
2.6.1 Resistência Constante	27
2.6.2 Corrente Constante	27
2.6.3 Potência Constante	28
2.7 Conclusões	28
Capítulo 3 Topologias de Conversores para Carga e Descarga de Baterias	29
3.1 Introdução.....	29
3.2 Conversores CC-CC para Sistemas de Carga e Descarga de Baterias	29
3.2.1 Conversores Unidirecionais e Bidirecionais	29
3.2.2 Topologia Interleaved.....	30
3.3 Conversor CC-CC Unidirecional Buck.....	31
3.4 Conversor CC-CC Unidirecional Boost	32

3.5	Conversor CC–CC Bidirecional Buck–Boost.....	34
3.5.1	Funcionamento como Buck	34
3.5.2	Funcionamento como Boost	36
3.6	Conversor CC–CC Buck–Boost com Topologia Interleaved.....	37
3.6.1	Funcionamento como Buck	38
3.6.2	Funcionamento como Boost	40
3.7	Conclusões	42
Capítulo 4	Simulações Computacionais de um Conversor Bidirecional CC–CC Convencional e com Topologia Interleaved	43
4.1	Introdução	43
4.2	Modelo de Simulação do Sistema Bidirecional de Carga e Descarga de uma Bateria de LiFePO ₄	44
4.3	Sistema de Controlo Aplicado	46
4.4	Implementação do Sistema de Controlo Aplicado em PSIM.....	47
4.5	Simulação do Conversor CC-CC Buck-Boost Bidirecional	48
4.5.1	Simulação em Modo Buck.....	49
4.5.2	Simulação em Modo Boost.....	52
4.6	Simulação do Conversor CC-CC Buck-Boost Bidirecional com Configuração Interleaved	56
4.6.1	Simulação em Modo Buck.....	57
4.6.2	Simulação em Modo Boost.....	60
4.7	Conclusões	63
Capítulo 5	Implementação de um Sistema Bidirecional de Carga e Descarga de Baterias LiFePO ₄	65
5.1	Introdução	65
5.2	Integração do Sistema	66
5.3	Sistema de controlo.....	66
5.3.1	Sensor de Tensão	66
5.3.2	Sensor de Corrente.....	68
5.3.3	Sensor de Temperatura	70
5.3.4	Placa de Condicionamento de Sinal, Proteção e Comando.....	70
5.3.5	Placas de Driver	77
5.3.6	Microcontrolador	78
5.3.7	Fluxograma do código Fluxograma Implementado no DSP	78
5.4	Circuito de Potência.....	79
5.4.1	Semicondutores de Potência	79
5.4.2	Elementos Indutivos do Conversor CC-CC.....	80
5.4.3	Elementos Capacitivos do Conversor CC-CC	81
5.5	Bateria LiFePO ₄	82
5.6	Protocolo de Comunicação e Tratamento de Dados	83
5.7	Aplicação Criada com Interface Gráfica.....	84
5.7.1	Linguagem e Integrated Development Environment (IDE).....	84
5.7.2	Inicialização da Aplicação	86
5.7.3	Ligação à Porta Série	88
5.7.4	Aquisição de Dados, Visualização em Tempo Real e Criação de Ficheiros para os Dados.....	89
5.7.5	Fluxograma da Aplicação Final	90
5.8	Conclusões	91
Capítulo 6	Resultados Experimentais.....	93
6.1	Introdução	93
6.2	Validação do Sistema.....	94
6.3	Conversor CC–CC Bidirecional Buck–Boost com Topologia Interleaved.....	96
6.3.1	Funcionamento no Modo Buck	97

6.3.2	Funcionamento no Modo Boost.....	99
6.4	Interface Gráfica	101
6.5	Testes de Carga na Bateria.....	103
6.5.1	Corrente Constante	103
6.5.2	Tensão Constante.....	106
6.6	Testes de Descarga na Bateria	108
6.7	Resistência Interna	111
6.8	Auto Descarga	113
6.9	Conclusões	114
Capítulo 7	117
Conclusões	117
7.1	Conclusões	117
7.2	Sugestões para Trabalho Futuro.....	120
Lista de Referências	121

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Contributo da Energia Renovável no Consumo de Energia Primária em Portugal no ano 2015[5].....	2
Figura 1.2 – Contributo da Energia Renovável no Consumo de Energia Primária em Portugal no ano 2016[6].....	2
Figura 2.1 - Esquema das reações eletroquímicas numa bateria: (a) Processo de carga; (b) Processo de descarga.	8
Figura 2.2 - Modelo elétrico de Thévenin de uma bateria de LiFePO_4	9
Figura 2.3 – Bateria Ácido-Chumbo.	13
Figura 2.4 - Bateria de Níquel Hidreto Metálico.	16
Figura 2.5 - Bateria de Iões de lítio.....	17
Figura 2.6 - Baterias de Iões de Lítio Polímero (Li-Pol).	19
Figura 2.7 - Bateria de LiFePO_4	20
Figura 2.8 - Gráfico correspondente ao método de carga corrente-constante.	24
Figura 2.9 – Gráfico correspondente ao método de carga tensão-constante.	25
Figura 2.10 – Gráfico correspondente ao método de carga corrente constante-tensão constante.	25
Figura 2.11 – Gráfico correspondente ao método de carga por pulsos.	26
Figura 2.12 – Gráfico correspondente ao método de carga <i>Reflex</i>	26
Figura 3.1 – Número de fases num conversor CC–CC com topologia <i>interleaved</i>	30
Figura 3.2 – Conversor CC – CC <i>buck</i>	31
Figura 3.3 – Conversor CC – CC <i>buck</i> no estado <i>on</i>	32
Figura 3.4 – Conversor CC – CC <i>buck</i> no estado <i>off</i>	32
Figura 3.5 – Conversor CC – CC <i>boost</i>	33
Figura 3.6 – Conversor CC – CC <i>boost</i> no estado <i>on</i>	33
Figura 3.7 – Conversor CC–CC <i>boost</i> no estado <i>off</i>	34
Figura 3.8 – Conversor CC-CC bidirecional <i>buck-boost</i>	34
Figura 3.9 – Conversor CC–CC <i>buck-boost</i> a atuar como <i>buck</i> no modo <i>on</i>	35
Figura 3.10 – Corrente na bobina do conversor CC-CC <i>buck-boost</i> e na bateria com o conversor a atuar como <i>buck</i>	35
Figura 3.11 - Conversor CC–CC <i>buck-boost</i> a atuar como <i>buck</i> no modo <i>off</i>	36
Figura 3.13 – Conversor CC – CC <i>buck-boost</i> a atuar como <i>boost</i> no modo <i>on</i>	36
Figura 3.14 – Conversor CC – CC <i>buck-boost</i> a atuar como <i>boost</i> no modo <i>off</i>	37
Figura 3.15 – Conversor CC–CC <i>buck-boost</i> com topologia <i>interleaved</i>	38
Figura 3.16 – Conversor CC–CC <i>buck-boost</i> com topologia <i>interleaved</i> em modo <i>buck</i>	38
Figura 3.17 – Conversor CC-CC <i>buck-boost</i> com topologia <i>interleaved</i> em modo <i>buck</i> com <i>S1</i> ligado e <i>S3</i> desligado.	39
Figura 3.18 – Conversor CC-CC <i>buck-boost</i> com topologia <i>interleaved</i> em modo <i>buck</i> com <i>S3</i> ligado e <i>S1</i> desligado.	39
Figura 3.19 – Corrente na bateria com o conversor CC-CC <i>buck-boost</i> com topologia <i>interleaved</i> a funcionar como <i>buck</i>	39

Figura 3.20 – Corrente em cada bobina com o conversor CC-CC <i>buck-boost</i> com topologia <i>interleaved</i> a funcionar como <i>buck</i> .	40
Figura 3.21 – Conversor CC-CC <i>buck-boost</i> com topologia <i>interleaved</i> em modo <i>boost</i> .	40
Figura 3.22 – Conversor CC-CC <i>buck-boost</i> com topologia <i>interleaved</i> em modo <i>boost</i> com <i>S2</i> ligado e <i>S4</i> desligado.	41
Figura 3.23 – Conversor CC-CC <i>buck-boost</i> com topologia <i>interleaved</i> em modo <i>boost</i> com <i>S4</i> ligado e <i>S2</i> desligado.	41
Figura 3.24 – Corrente na bateria com o conversor CC-CC <i>buck-boost</i> com topologia <i>interleaved</i> a funcionar como <i>boost</i> .	41
Figura 3.25 – Corrente nas bobinas com o conversor CC-CC <i>buck-boost</i> com topologia <i>interleaved</i> a funcionar como <i>boost</i> .	42
Figura 4.1 – Modelo em PSIM do conversor CC-CC <i>buck-boost</i> .	44
Figura 4.2 – Modelo em PSIM do conversor CC-CC <i>buck-boost</i> com topologia <i>interleaved</i> .	45
Figura 4.3 – Funcionalidade do bloco C da ferramenta de trabalho PSIM.	45
Figura 4.4 – Circuito de controlo: (a) conversor CC-CC <i>buck-boost</i> e (b) conversor CC-CC <i>buck-boost</i> com topologia <i>interleaved</i> .	46
Figura 4.5 – Diagrama de blocos do controlo PI para corrente constante.	47
Figura 4.6 – Diagrama de blocos do controlo PI para tensão constante.	47
Figura 4.7 – Bloco C implementado na ferramenta PSIM.	47
Figura 4.8 – Sistema de controlo do conversor CC-CC <i>buck-boost</i> .	48
Figura 4.9 - Sistema de controlo do conversor CC-CC <i>buck-boost</i> com topologia <i>interleaved</i> .	48
Figura 4.10 – Modelo em PSIM do conversor CC-CC <i>buck-boost</i> .	49
Figura 4.11 – Simulação do carregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A.	49
Figura 4.12 – Comutações dos IGBTs em modo <i>buck</i> (<i>S1</i> e <i>S2</i>).	50
Figura 4.13 – Variáveis de saída ao longo de uma simulação do carregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A: (a) tensão e corrente na carga; (b) variável de carga e descarga; (c) variável de corrente e tensão constante.	51
Figura 4.14 – Variável de controlo de corrente e, posteriormente, de tensão.	51
Figura 4.15 – Carregamento da bateria com uma corrente de 20 A.	51
Figura 4.16 – Simulação do carregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A, sendo $L=0,667$ mH e $C=30$ μ F.	52
Figura 4.17 – Simulação do carregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A, sendo $L=0,667$ mH e $C=60$ μ F.	52
Figura 4.18 – Simulação do descarregamento de uma bateria com o método resistência constante.	53
Figura 4.19 – Simulação do descarregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A.	54
Figura 4.20 – Comutações dos IGBTs em modo <i>boost</i> (<i>S1</i> e <i>S2</i>).	54
Figura 4.21 – Variável de controlo de corrente constante.	54
Figura 4.22 – Variáveis de saída ao longo de uma simulação do descarregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A: (a) tensão e corrente na descarga; (b) variável de carga e descarga.	55
Figura 4.23 – Simulação do descarregamento de uma bateria com uma corrente de 15 A.	55
Figura 4.24 – Simulação do descarregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A, sendo $L=0,667$ mH e $C=30$ μ F.	56
Figura 4.25 – Simulação do descarregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A, sendo $L=0,667$ mH e $C=60$ μ F.	56
Figura 4.26 – Modelo em PSIM do conversor CC-CC <i>buck-boost</i> com topologia <i>interleaved</i> .	57
Figura 4.27 – Simulação do carregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A na bateria e 2,5 A em cada bobina.	57

Figura 4.28 – Simulação do carregamento de uma bateria com uma corrente 2,5 A em cada bobina com um desfasamento entre si de 180°.....	58
Figura 4.29 – Comutações dos IGBTs em modo <i>buck</i> (S_1 e S_3).....	58
Figura 4.30 – Variável de controlo de corrente e, posteriormente, de tensão.	59
Figura 4.31 – Variáveis de saída ao longo de uma simulação do carregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A: (a) tensão e corrente na carga; (b) variáveis de carga e descarga; (c) variáveis de corrente e tensão constante.....	59
Figura 4.32 – Simulação do carregamento de uma bateria com uma corrente de 2,5 A na bateria e 1,25 A em cada bobina.	60
Figura 4.33 Simulação do descarregamento de uma bateria com o método resistência constante.	60
Figura 4.34 – Simulação do descarregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A na bateria e 2,5 A em cada bobina.	61
Figura 4.35 – Simulação do descarregamento de uma bateria com uma corrente 2,5 A em cada bobina com um desfasamento entre si de 180°.....	61
Figura 4.36 – Comutações dos IGBTs em modo <i>boost</i> (S_2 e S_4).....	61
Figura 4.37 – Variável de controlo de corrente.....	62
Figura 4.38 – Variáveis de saída ao longo de uma simulação do descarregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A na bateria e 2,5 A em cada bobina: (a) valor da tensão e correntes na descarga; (b) variáveis de carga e descarga.	62
Figura 4.39 – Simulação do descarregamento de uma bateria com uma corrente de 10 A na bateria e 5 A em cada bobina.	62
Figura 5.1 – Diagrama de blocos do sistema de carga/descarga implementado.	65
Figura 5.2 – Sensor de tensão utilizado na bateria.....	67
Figura 5.3 – Esquemático elétrico do sensor de tensão utilizado na bateria.	67
Figura 5.4 – Sensor de tensão e respetiva placa de ligação.....	68
Figura 5.5 – Sensor de corrente utilizado na bateria.	69
Figura 5.6 – Esquemático elétrico do sensor de corrente utilizado na bateria.	69
Figura 5.7 – Sensor de corrente e respetiva placa de ligação.....	70
Figura 5.8 – Esquemático elétrico do sensor de temperatura <i>LM35</i>	70
Figura 5.9 – Circuito de condicionamento de sinal desenvolvido para os sensores de temperatura.	72
Figura 5.10 – Circuito de condicionamento de sinal desenvolvido para o sensor de tensão.....	73
Figura.5.11 – Circuito de condicionamento de sinal desenvolvido para o sensor de corrente.....	73
Figura 5.12 – Circuito comparador de janela implementado no erro.....	74
Figura 5.13 – Placa de condicionamento de sinal, proteção de erros e comando desenvolvida para o sistema de carga/descarga.	75
Figura 5.14 – Placa de condicionamento de sinal, proteção de erros e comando desenvolvida para o sistema de carga/descarga com o microcontrolador inserido.....	75
Figura 5.15 – Caixa onde estão presentes os botões de <i>reset</i> e <i>enable</i>	76
Figura 5.16 – Esquemático da PCB desenvolvida.	76
Figura 5.17 – <i>Layout</i> da PCB desenvolvida.....	77
Figura 5.18 – Placa de <i>drivers</i>	77
Figura 5.19 – Microcontrolador utilizado no sistema de carga/descarga [65].	78
Figura 5.20 – Fluxograma do código implementado no microcontrolador.....	79
Figura 5.21 – Módulo utilizado no sistema de carga/descarga implementado.....	80
Figura 5.22 – Módulos colocados no dissipador juntamente com os <i>drivers</i>	80
Figura 5.23 – Bobinas utilizadas no sistema de carga/descarga.	81

Figura 5.24 – Condensadores utilizados no conversor.....	81
Figura 5.25 – Bateria do tipo LiFePO ₄	82
Figura 5.26 – Função porta serie implementada na aplicação desenvolvida.	83
Figura 5.27 – Transferência do valor da corrente na bateria implementado na aplicação desenvolvida.	84
Figura 5.28 – Ambiente de trabalho do programa <i>QT Designer</i>	85
Figura 5.29 – Ambiente de trabalho da ferramenta <i>Spyder</i>	86
Figura 5.30 – Design final da interface gráfica.	86
Figura 5.31 – Importação de funções.	87
Figura 5.32 – Declaração das variáveis globais referentes aos ficheiros gerados anteriormente.	87
Figura 5.33 – Classe da janela de erro.	87
Figura 5.34 – Classe da janela principal.	87
Figura 5.35 – Janela de configuração da porta serie.	88
Figura 5.36 -Mensagem de erro.	88
Figura 5.37 – Configuração da porta serie.	88
Figura 5.38 – Leitura dos dados recebidos pela aplicação.	89
Figura 5.39 – Código para os valores aparecerem na interface.	89
Figura 5.40 – Inicialização e criação dos gráficos presentes na interface gráfica.	89
Figura 5.41 – Criação dos ficheiros de texto com os valores referentes aos sensores.	90
Figura 5.43 – Fluxograma correspondente a todas as etapas da aplicação gráfica.	90
Figura 6.1 – Comutação dos IGBTs <i>S1</i> e <i>S3</i> com um <i>duty cycle</i> de 50%.	94
Figura 6.2 - Comutação dos IGBTs <i>S1</i> e <i>S3</i> com um <i>duty cycle</i> de 25 %.....	95
Figura 6.3 - Comutação dos IGBTs <i>S1</i> e <i>S3</i> com um <i>duty cycle</i> de 75 %.....	95
Figura 6.4 – Resultado experimental: simulação de uma carga com uma corrente de 1 A.	96
Figura 6.5 – Resultado experimental: simulação de uma carga com ambas as correntes presentes em cada bobina.	96
Figura 6.6 – Bancada de testes com o conversor <i>buck-boost</i> com topologia <i>interleaved</i> a atuar como <i>buck</i>	97
Figura 6.7 – Resultado experimental das tensões de entrada e saída do conversor CC-CC.	98
Figura 6.8 – Resultado experimental com uma corrente de 10 A presente na bateria ao longo de uma carga.	98
Figura 6.9 – Resultado experimental com as correntes presentes em cada bobina desfasadas entre si 180° ao longo de uma carga.	98
Figura 6.10 – Bancada de testes com o conversor <i>buck-boost</i> com topologia <i>interleaved</i> a atuar como <i>boost</i>	99
Figura 6.11 – Resultado experimental das tensões de entrada e saída do conversor a atuar como <i>boost</i>	100
Figura 6.12 – Resultado experimental com uma corrente de 8 A presente na bateria durante a descarga.	100
Figura 6.13 – Resultado experimental com as correntes presente em cada uma das bobinas.	101
Figura 6.14 – Janela start/stop presente na interface gráfica desenvolvida.	102
Figura 6.15 – Resultado final da interface gráfica em funcionamento.	102
Figura 6.16 – Teste de carga efetuado a uma bateria de LiFePO ₄ com uma corrente de 10 A.	103
Figura 6.17 – Temperatura ambiente vs. Temperatura na bateria durante um teste de carga efetuado a uma bateria de LiFePO ₄ com uma corrente de 10 A.	104
Figura 6.18 – Potência presente na bateria LiFePO ₄ durante um teste de carga com uma corrente de 10 A.	105

Figura 6.19 – Eficiência do conversor durante um teste de carga efetuado numa bateria de LiFePO ₄ com uma corrente de 10 A.....	105
Figura 6.20 – Teste de carga efetuado a uma bateria de LiFePO ₄ desde uma corrente de 10 A através do método de carga tensão constante.....	106
Figura 6.21 – Temperatura ambiente vs. Temperatura na bateria durante um teste de carga efetuado a uma bateria de LiFePO ₄ desde uma corrente de 10 A através do método de carga tensão constante.	107
Figura 6.22 – Potência presente na bateria de LiFePO ₄ durante um teste de carga desde uma corrente de 10 A através do método de carga tensão constante.....	107
Figura 6.23 – Teste de descarga efetuado a uma bateria de LiFePO ₄ com uma corrente de 2 A.	108
Figura 6.24 – Teste de descarga efetuado a uma bateria de LiFePO ₄ com uma corrente de 4 A.....	109
Figura 6.25 - Teste de descarga efetuado a uma bateria de LiFePO ₄ com uma corrente de 8 A.....	109
Figura 6.26 – Temperatura ambiente vs. Temperatura na bateria durante um teste de descarga efetuado a uma bateria de LiFePO ₄ com uma corrente de 2 A.....	110
Figura 6.27 - Temperatura ambiente vs. Temperatura na bateria durante um teste de descarga efetuado a uma bateria de LiFePO ₄ com uma corrente de 4 A.....	110
Figura 6.28 - Temperatura ambiente vs. Temperatura na bateria durante um teste de descarga efetuado a uma bateria de LiFePO ₄ com uma corrente de 8 A.....	110
Figura 6.29 - Potência presente na bateria LiFePO ₄ durante um teste de descarga com uma corrente de 2 A.	111
Figura 6.30 – Potência presente na bateria LiFePO ₄ durante um teste de descarga com uma corrente de 4 A.	111
Figura 6.31 - Potência presente na bateria LiFePO ₄ durante um teste de descarga com uma corrente de 8 A.	111
Figura 6.32 – Resultado experimental da autodescarga presente em duas baterias distintas.	113

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Comparação entre os diferentes tipos de baterias.....	22
Tabela 2.2 - Comparação dos diferentes métodos de carga de baterias.....	27
Tabela 5.1 – Tabela com a gama de valores a utilizar na resistência primária do sensor.	67
Tabela 5.2 – Gama de valores para a resistência Rm.....	69
Tabela 5.3 – Principais características da bateria do tipo LiFePO ₄	82
Tabela 6.1 – Cargas resistivas utilizadas na descarga da bateria.	99

Acrónimos e Siglas

Acrónimo / Sigla	Significado
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>
DoD	<i>Depth of Discharge</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
INL	<i>Idaho National Laboratory</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LiFePO₄	Lítio Ferro Fosfato
Li-Ion	Iões de Lítio
Li-Pol	Polímero de iões de Lítio
NiCd	Níquel-Cádmio
NiMH	Níquel de Hidrato Metálico
OCV	<i>Open Circuit Voltage</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PI	Proporcional Integral
PWM	<i>Pulse width Modulation</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
SoC	<i>State of Charge</i>
SoH	<i>State of Health</i>
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>

UART

Universal Asynchronous Receiver Transmitter

Capítulo 1

Introdução

1.1 O Papel das Baterias Secundárias nos Dias de Hoje

Hoje em dia vive-se num mundo rodeado de diversas tecnologias, representando uma grande e indispensável vantagem para a humanidade, principalmente, porque permitem melhorar áreas como a saúde, indústria ou transportes [1]. Em contrapartida, esses avanços tecnológicos consomem recursos do nosso planeta que são limitados, como por exemplo, combustíveis fósseis. Segundo [2], a procura do carvão cresceu dez vezes mais do que a procura de energias renováveis na última década, assim como também houve um aumento da procura de petróleo e 87% do abastecimento de energia primária mundial é por combustíveis fósseis. A sua previsível escassez e o seu elevado e intensivo uso, implica a prática de preços cada vez mais elevados, assim como a contribuição para a poluição do meio ambiente. Exemplo disso são os lixos tóxicos ou a libertação de gases poluentes para a atmosfera, o que leva ao aumento do aquecimento global [3]. Devido a estes problemas, o ser humano vê-se forçado a encontrar alternativas de produção de energia elétrica, das quais se destacam as energias renováveis. Apesar de atualmente a fonte de energia mais utilizada ser resultante de combustíveis fósseis, surge, contudo, cada vez mais interesse e vontade de procurar outras alternativas [4]. As energias renováveis são uma solução muito interessante na substituição das fontes de energias tradicionais, pois provêm de recursos naturais e inesgotáveis e são produzidas de modo não poluente. De acordo com [5] e [6], verificam-se a produção anual de energia elétrica em Portugal no ano 2015 presente na Figura 1.1 e no ano 2016 na Figura 1.2. Como se pode observar de um ano para o outro existe um aumento na produção de energia elétrica através de energias renováveis, o que implica uma diminuição no uso de energias não renováveis.

Pela análise dos gráficos apresentados de seguida, a distribuição de energia passou por várias transformações e otimizações. Na maior parte das vezes, essas mudanças deveram-se ao facto do aumento das preocupações relacionadas com questões ambientais, reduzindo assim a produção de energia com base nos combustíveis fósseis. Atualmente, um dos fatores mais utilizados para avaliar o nível de desenvolvimento de um país é baseado no acesso da população a determinados serviços na área da saúde, educação, telecomunicações e

transporte de energia. No que diz respeito à qualidade e transporte da energia, este é um fator imprescindível devido a ser uma necessidade básica para grande parte das ações do ser humano [7].

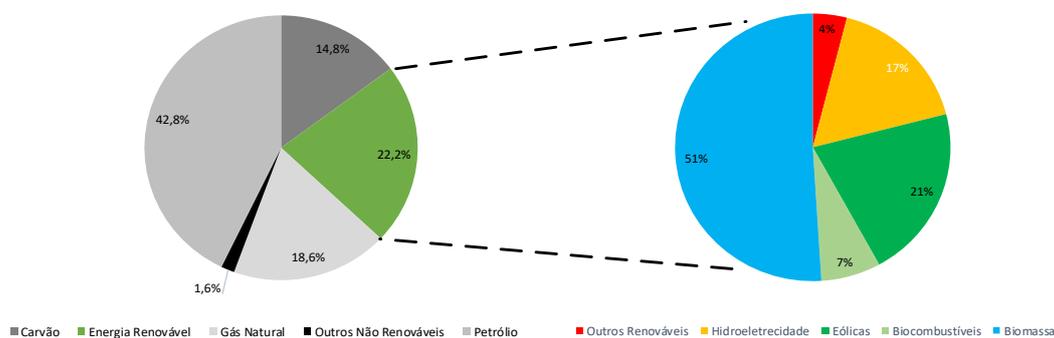


Figura 1.1 – Contributo da Energia Renovável no Consumo de Energia Primária em Portugal no ano 2015[5].

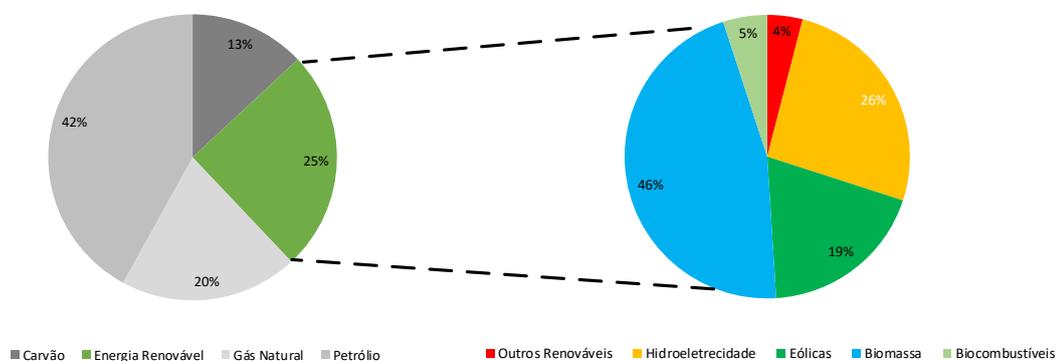


Figura 1.2 – Contributo da Energia Renovável no Consumo de Energia Primária em Portugal no ano 2016[6].

Nesta dissertação o tema principal refere-se às baterias secundárias (recarregáveis), mais precisamente à caracterização elétrica de baterias do tipo LiFePO_4 que cada vez mais são aplicadas em diversas áreas, nomeadamente em soluções de *smart grids* (rede inteligente, representada por novos conceitos e arquiteturas de distribuição de energia elétrica, que pretende ser mais segura e inteligente). No caso desta dissertação, o fluxo de energia elétrica caracteriza-se por ser de forma bidirecional. Exemplo deste tipo de aplicações é o caso dos veículos elétricos que podem ser suportados pelos modos *Vehicle-to-Grid* (V2G) e *Grid-to-Vehicle* (G2V) [8][9] e interface com dispositivos/sistemas de energias renováveis.

1.2 Enquadramento e Motivação

Na época atual, devido ao facto de grande parte da energia utilizada ser fornecida através de combustíveis fósseis, os níveis de poluição têm aumentado cada vez mais, assim como a sua escassez. Consequentemente, estes não só são prejudiciais para o meio ambiente como também o são para o ser humano. Posto isto, existe cada vez mais uma preocupação com o meio ambiente, que resulta na procura de novos sistemas de energia. Derivado a isto, surgem

as energias renováveis que não causam danos no meio ambiente. Por outro lado, tem havido um enorme interesse na área que diz respeito ao armazenamento de energia, encontrando tecnologias não poluentes, que cada vez mais são implementadas em áreas como a mobilidade elétrica ou em dispositivos eletrônicos portáteis. Derivado da enorme dependência de energia elétrica referente a estes dispositivos, é premente a necessidade de tornar a sua maior parte “independentes” da rede elétrica. Consequência desta necessidade é a criação e o desenvolvimento de novos e mais eficientes sistemas de carregamento e armazenamento de energia. Posteriormente, tendo em conta que cada vez mais os sistemas eletrônicos são portáteis, é intrínseco às suas características e funcionalidades a necessidade da incorporação de meios de suporte ao armazenamento de energia, principalmente, recorrendo a baterias eletroquímicas.

Atualmente, existem diversas tecnologias de baterias, das quais se destacam as baterias de LiFePO_4 . Esta bateria devido às suas vantagens, como por exemplo, o seu pequeno impacto ambiental, taxa de autodescarga reduzida, um rendimento e tempo de vida mais elevado e ausência do efeito de memória, destaca-se como uma das tecnologias de armazenamento de energia mais importantes e promissoras no mercado. Tal modo é refletido com grande relevo em áreas como a mobilidade elétrica e sistemas de armazenamento de energia, principalmente, para interface com fontes de energia renováveis [10].

Parte da eficiência, desempenho e longevidade do processo de um sistema que utiliza baterias, ou aumento dos mesmos, estão relacionados com os mecanismos e tecnologias de carga e descarga. Na conceção destes produtos, por vezes, não é dada muita ênfase à produção e realização dos carregadores, que são tão importantes quanto as baterias, pois, se estas não forem carregadas adequadamente podem sofrer danos ou uma diminuição do seu tempo de vida útil [11].

Deste modo, esta dissertação manifesta-se através da necessidade de entender melhor as tecnologias de baterias secundárias presentes no mercado, assim como algumas das suas vantagens e desvantagens, com maior relevo nas baterias do tipo LiFePO_4 . Por outro lado, é de igual importância a conceção de um sistema bidirecional de carga e descarga destinado a baterias do tipo LiFePO_4 com o intuito de perceber como estas se comportam ao longo de diferentes testes de carga e descarga.

1.3 Objetivos

O projeto elaborado para esta dissertação consiste na implementação de um sistema bidirecional de carga e descarga com base num conversor CC-CC. Este permite efetuar vários processos de carga e descarga a baterias do tipo LiFePO_4 com o intuito de as caracterizar. Por outro lado, também foi criada uma aplicação com interface gráfica que permite a aquisição e visualização dos dados em tempo real. De seguida, são apresentados os principais objetivos e tarefas para a realização do trabalho proposto ao longo da dissertação:

- Revisão das características de diferentes tipos de baterias assim como vantagens e desvantagens, métodos de carga e descarga;
- Estudo de métodos e mecanismos de carga e descarga das baterias;
- Análise do funcionamento, qualitativo e quantitativo, das diversas topologias de conversores CC-CC passíveis de serem aplicados a sistemas de carga e descarga de baterias;
- Estudo de métodos de controlo, e seus algoritmos, de corrente para conversores CC-CC;
- Projeto de um carregador bidirecional universal para baterias. Análise e simulação do sistema implementado com recurso ao software PSIM;
- Desenvolvimento de uma placa de condicionamento de sinal, proteção e comando;
- Implementação prática do sistema bidirecional de carga e descarga;
- Criação de uma aplicação com interface gráfica com o objetivo de visualizar e gravar os dados recolhidos em tempo real;
- Testes de caracterização da bateria e respetivas conclusões.

Para finalizar, com a elaboração desta dissertação pretende-se efetuar um estudo sobre o desempenho, assim como a obtenção e compreensão de certos parâmetros que dizem respeito às baterias LiFePO_4 . Tal é efetuado com o intuito de obter conclusões sobre a viabilidade desta tecnologia de baterias, enquanto meio de armazenamento de energia.

1.4 Organização e Estrutura da Tese

O presente trabalho é dividido em sete capítulos distintos.

No primeiro capítulo é efetuada uma introdução sobre o aumento na demanda e importância das baterias secundárias no mercado com a finalidade de diminuir a dependência sobre os combustíveis fósseis. No mesmo, são também explicados os objetivos assim como a organização e estrutura da presente dissertação.

Ao longo do segundo capítulo são abordados conceitos e métodos de utilização importantes no que diz respeito às baterias secundárias, como por exemplo, os seus métodos de carga ou descarga ou fatores que podem influenciar a sua eficiência.

Quanto ao terceiro capítulo são enunciadas as topologias de conversores CC-CC para carregamento e descarregamento de baterias com uma breve explicação do seu funcionamento assim como a introdução da topologia *interleaved* neste tipo de conversores.

Durante o quarto capítulo são expostos e explicados os resultados das simulações efetuadas aos conversores CC-CC *buck-boost* com topologia convencional e *interleaved* e seu respetivo controlo Proporcional Integral (PI).

No que diz respeito ao quinto capítulo é efetuada uma breve descrição sobre o sistema de controlo e potência que constituem o sistema de carga e descarga a implementar. Nisto também é explicado, com recurso a fluxogramas, o código implementado no DSP para o funcionamento do conversor, assim como também o funcionamento da aplicação desenvolvida com interface gráfica.

No sexto capítulo são expostos os resultados de validação do conversor e respetivas conclusões sobre os vários testes efetuados às baterias de LiFePO₄.

No sétimo e último capítulo são explicadas as conclusões referentes ao trabalho desenvolvido, assim como algumas perspetivas de trabalho futuro com o propósito de melhorar o sistema desenvolvido.

Capítulo 2

Baterias Secundárias Eletroquímicas e Métodos de Carga e Descarga

2.1 Introdução

No âmbito do desenvolvimento desta dissertação foi efetuado um estudo sobre formas de armazenamento de energia, especificamente, sobre baterias recarregáveis, onde são explicados alguns princípios básicos, como o seu modelo elétrico equivalente e respetivos parâmetros. De maneira a compreender melhor as diferentes tecnologias existentes no mercado, de seguida são enunciadas algumas informações acerca dos principais parâmetros que as caracterizam, assim como as principais vantagens e desvantagens sobre cada tipo. Posteriormente, são abordados os diferentes tipos de carga e descarga de baterias, com objetivo de identificar a que tipos de baterias é que melhor se adequam, assim como as diferenças e vantagens/desvantagens dos mesmos.

2.2 Baterias Eletroquímicas

Nos dias de hoje está-se perante uma ‘era’ em que é praticamente impossível a inexistência de interação do ser humano com equipamentos tecnológicos, como por exemplo um telemóvel, um computador, um carro ou mesmo equipamentos mais simples como um relógio ou um simples brinquedo eletrónico. Como é do conhecimento geral, todos estes equipamentos necessitam de uma bateria para poderem funcionar.

Uma bateria é um elemento que contém no seu interior um conjunto de células que podem estar ligadas em série ou em paralelo de acordo com as suas necessidades. Este dispositivo armazena energia química e posteriormente transforma-a em energia elétrica através de reações eletroquímicas [4].

De um modo geral, as baterias podem ser classificadas em dois tipos: primárias e secundárias. As baterias primárias são baterias que devido às suas características químicas não permitem a possibilidade de efetuar uma recarga. Por outro lado, nas baterias secundárias é possível efetuar uma recarga através de uma fonte de energia externa. De acordo com o escopo desta dissertação, apenas serão abordadas baterias secundárias.

Reação Eletroquímica

As reações eletroquímicas são processos que ocorrem numa célula de uma bateria, que são compostas por um cátodo e um ânodo. Para que esta reação possa ser efetuada é necessário que o cátodo e o ânodo estejam ligados por um eletrólito condutor e que haja transferência de elétrons entre os mesmos, ou seja, um irá libertar os elétrons e outro irá absorvê-los [12]. A este processo dá-se o nome de reação oxidação–redução.

Como apresentado na Figura 2.1 a, o ânodo vai libertar os elétrons, dando origem ao processo de oxidação, enquanto o cátodo ao recebê-los irá dar origem ao processo de redução. Na Figura 2.1 b, o processo vai ser exatamente o contrário [4][12].

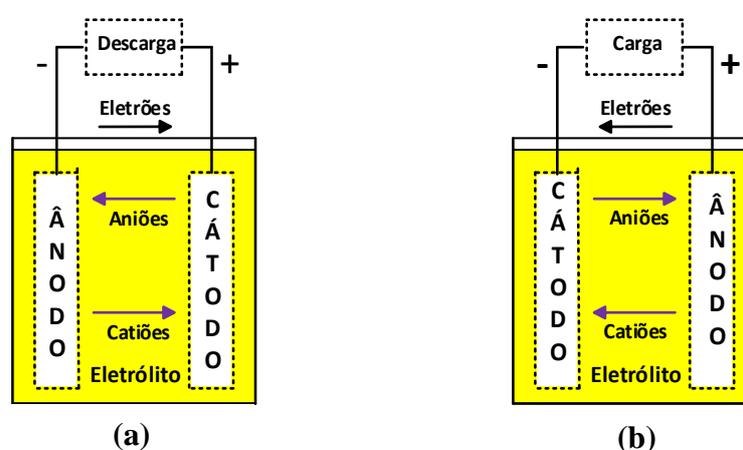


Figura 2.1 - Esquema das reações eletroquímicas numa bateria: (a) Processo de carga; (b) Processo de descarga.

2.2.1 Modelo Elétrico da Bateria

Relativamente à modelização das baterias, existem três exemplos diferentes de simulações que permitem compreender melhor o funcionamento de uma bateria: modelo eletroquímico, modelo matemático e modelo elétrico.

Ao longo desta dissertação será estudado o modelo elétrico de uma bateria, pois este modelo é muito importante no que diz respeito ao estudo do seu funcionamento elétrico. Por outro lado, o modelo eletroquímico visa o estudo de como é fornecida a energia nas reações eletroquímicas, enquanto que o modelo matemático faz uso de equações empíricas para prever o comportamento de certos parâmetros, como por exemplo a eficiência e a capacidade. De acordo com [13], os dois modelos anteriores são ainda caracterizados por possuírem gamas de imprecisão consideráveis (5-20% de erro). De entre os vários tipos de modelos elétricos será estudado o modelo elétrico de Thévenin, apresentado na Figura 2.2, visto ser um dos modelos mais utilizados no que diz respeito às baterias do tipo LiFePO_4 .

O modelo elétrico de Thévenin permite a análise do comportamento elétrico das baterias, prevendo a resposta da bateria em função de cargas transientes relativamente a um estado de carga (*State of Charge* – SoC), considerando a tensão em circuito aberto (*Open Circuit Voltage* – OCV). Para tal, é necessário efetuar um elevado número de testes pois esta análise depende de vários aspetos como o SoC, a taxa de carga e descarga e estado de saúde da bateria [14][15][16].

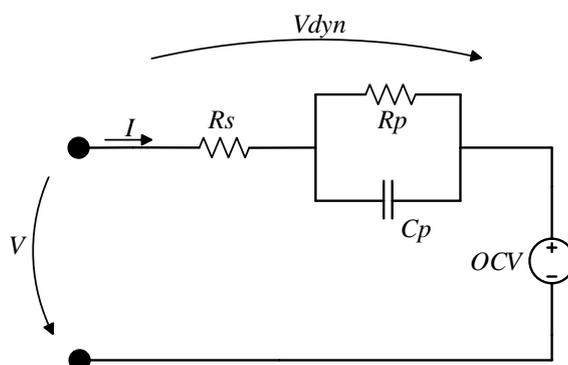


Figura 2.2 - Modelo elétrico de Thévenin de uma bateria de LiFePO₄.

O modelo elétrico de Thévenin é constituído por uma fonte de tensão OCV, que representa a tensão em circuito aberto, alimentando uma resistência R_s em série e uma malha RC ($R_p||C_p$). A tensão OCV demonstra a tensão em aberto da bateria que varia com certos parâmetros como SoC e temperatura. A resistência R_s representa a resistência interna de uma bateria, que é o motivo para a queda de tensão quando a bateria passa a fornecer corrente elétrica. A malha RC tem como objetivo a descrição do comportamento da bateria durante transitórios. Para finalizar, a tensão V representa a soma da tensão V_{dyn} e da fonte de tensão OCV [15][16].

2.2.2 Principais Parâmetros da Bateria

Vários termos são usados para a caracterização elétrica de uma bateria e o seu desempenho, sendo os termos mais comuns enunciados em seguida [17][18].

Capacidade

A capacidade é a carga elétrica total, ou também conhecido como fluxo de eletrões, com que uma bateria pode ser carregada ou descarregada sobre condições específicas. Este parâmetro tem como unidade Ampere-hora (Ah) [17]. Normalmente, a capacidade é medida em coulomb (C), mas no que diz respeito às baterias, Ah é a unidade a ser utilizada. Tal acontece, pois na área da eletricidade, a quantidade de energia é obtida normalmente em Watt-hora (Wh). Sendo assim, a capacidade pode ser obtida através da seguinte equação (2.1):

$$C = i * \Delta T \quad (2.1)$$

Neste caso resulta da multiplicação da corrente de descarga (Amperes) pelo respetivo tempo de descarga (horas). Também se pode obter a capacidade de energia da bateria em Wh pela equação (2.2), que resulta da multiplicação da capacidade da bateria em Ah pela tensão nominal da bateria [19]:

$$E = C * V \quad (2.2)$$

Na obtenção da capacidade, esta pode ser influenciada por vários parâmetros como por exemplo: temperatura da bateria, corrente de descarga, como for efetuado o processo de descarga, idade da bateria e o seu estado de carga (SoC) [20].

Taxa C

A taxa C ou *C-rate* é a medida da taxa à qual a bateria é carregada ou descarregada relativamente à sua capacidade máxima [17]. Por exemplo, ao descarregar uma bateria de 100 Ah a uma taxa de 1 C, significa que a bateria ficará totalmente descarregada em 1 hora com uma corrente de descarga de 100 A. Por outro lado, se se utilizar uma taxa de 2 C, significa que a bateria ficará totalmente descarregada em meia hora com uma corrente de descarga de 200 A. Para efetuar uma descarga mais lenta, aplica-se, por exemplo, uma taxa de 0,5 C em que a bateria ficará descarregada em 2 horas com uma corrente de descarga de 50 A [21].

Estado de Carga (*state of charge*, SoC) (%)

Um dos maiores problemas no que diz respeito à utilização de baterias é saber com precisão, o tempo que resta de energia à bateria sem ser preciso carregá-la. É derivado a isso que surge o estado de carga ou SoC. Este indica em percentagem, a quantidade de energia que a bateria possui, ou seja, a capacidade atual da bateria, relativamente à sua capacidade total como se observa na equação (2.3):

$$SoC = \frac{C_{atual}}{C_{total}} 100\% \quad (2.3)$$

Posto isto, para a bateria estar totalmente descarregada, o valor de SoC seria de 0% e o valor de 100% seria correspondente à bateria totalmente carregada. Este parâmetro também pode ser calculado através do integral da corrente ao longo do tempo apresentado na equação (2.4):

$$\Delta Soc = Soc(t) - Soc(t_0) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(t) dt \quad (2.4)$$

Na realização da equação anterior, o processo é bastante complexo no que diz respeito à obtenção de dados com precisão. No entanto, o SoC é essencial para o correto uso da bateria para não a danificar posteriormente [17].

Profundidade de Descarga (*Depth of Discharge, DoD*) (%)

A profundidade de descarga, ou DoD, é exatamente o oposto do estado de carga. Este indica a percentagem da capacidade total da bateria que foi descarregada como se verifica na equação (2.5):

$$DoD = 1 - SoC \quad (2.5)$$

Para descargas profundas, a bateria tem de ser descarregada com um DoD de pelo menos de 80% [17].

Tensão nominal

A tensão nominal da bateria resulta da multiplicação da tensão das células individuais pelo número de células dispostas em série [20]. É medida em volts (V) e é a tensão que se encontra aos terminais da bateria [18][19].

Tensão em Aberto (*Open Circuit Voltage (OCV)*)

A tensão em aberto é a tensão medida aos terminais da bateria quando se encontra em circuito aberto, ou seja, quando não é aplicada nenhuma carga aos seus terminais [18]. Este parâmetro também é conhecido como OCV e depende de fatores como o SoC e o efeito da temperatura. Na obtenção deste valor é preciso ter um certo cuidado pois se for medido pouco tempo depois de uma carga/descarga, o valor poderá ser errado. Assim, é necessário esperar algum tempo para a bateria estabilizar, podendo em alguns casos ter que repousar até 24 horas [20].

Tensão de Descarga Mínima (*Cut – Off Voltage*)

A tensão de descarga mínima é a tensão mínima permitida no uso da bateria e é através deste valor que se pode afirmar se a bateria se encontra descarregada. Este valor é sempre definido pelo fabricante [17].

Densidade de Energia

A densidade de energia de uma bateria, também conhecida como densidade de energia volumétrica, relaciona a energia com o volume de uma bateria [17].

Estado de Saúde (*State of Health (SoH)*)

O SoH consiste na relação percentual entre a condição atual da bateria e a condição ideal da mesma, ou seja, quando esta é nova. A bateria em condições ideais tem o valor de 100%, que

vai diminuindo ao longo do seu uso. Este é um parâmetro importante no que diz respeito à degradação da bateria e na estimação do restante tempo de vida [17].

Número de Ciclos

É o número de ciclos de carga/descarga, indicado pelo fabricante, que uma bateria consegue executar, sem que esta deixe de ter o desempenho esperado, ou seja, o desempenho de uma bateria nova [18]. Vários fatores, como a capacidade da bateria, temperatura, profundidade de descarga, idade, entre outros, podem modificar o número de ciclos de uma bateria [21].

Resistência Interna

É uma resistência que é caracterizada como a oposição ao fluxo de corrente dentro da bateria. Esta não possui um valor constante, ou seja, vai mudando ao longo de um processo de carga/descarga, sendo essa variação também influenciada pela temperatura, pois temperaturas frias causam reações eletroquímicas que tornam mais lenta e reduzem a mobilidade dos eletrólitos. Por outro lado, conforme a resistência interna da bateria aumenta, a eficiência vai diminuir [18][22].

AutoDescarga

Quando ocorre uma perda de carga na bateria sem que haja qualquer recetor ligado aos seus terminais, dá-se o nome de autodescarga. Este é um processo que não é instantâneo nem de curta duração, decorrendo ao longo do tempo e dependendo da idade da bateria e do material da mesma [20].

Efeito de Memória

O efeito de memória consiste na perda de capacidade de armazenamento de energia. Tal ocorre quando, por exemplo, o sistema de controlo ou supervisão indica que a bateria se encontra carregada e no próximo instante já se encontra com um aviso de bateria fraca. Este problema era muito comum em baterias recarregáveis há vários anos, como por exemplo, em baterias níquel-cádmio [23]. Atualmente, com as melhorias e o avanço da tecnologia na área, já existem baterias como a de íões de lítio, que não são afetadas pelo efeito de memória [24]. Este problema deve-se ao facto de esse tipo de baterias não serem descarregadas completamente, antes de ser novamente carregadas. No entanto, é possível extinguir esse efeito, efetuando uma descarga completa, até a tensão de *cut-off*, e voltar a carregar a mesma. Embora este processo seja apenas pontual, pode ser muito útil [23].

Eficiência

A eficiência da bateria é o rácio entre a energia armazenada e a energia devolvida. Como a energia resulta da multiplicação da potência pelo intervalo de tempo desse processo, procede-

se ao cálculo da potência média de carga e descarga para posteriormente calcular a eficiência. O ideal seria ter um rendimento de 100%, mas esse valor é sempre inferior e depende de bateria para bateria, da temperatura e SoC referente à bateria. [25].

2.3 Tecnologias de Baterias

No que diz respeito aos dispositivos de armazenamento de energia, em particular as baterias, estes constituem-se hoje em dia como uma área de grande interesse, nomeadamente ao nível da investigação, não só porque são utilizadas como principal sistema de alimentação de inúmeros dispositivos portáteis, mas também porque surgem novos campos de aplicação, como por exemplo os carros elétricos. Posto isto, as baterias secundárias (recarregáveis) têm sofrido um enorme crescimento no que se relaciona com a evolução tecnológica para atender a estas novas aplicações. No entanto, a saber, não existe nenhuma bateria no mercado que consiga satisfazer todos os requisitos impostos pelos diferentes campos de aplicação [23].

2.3.1 Baterias de Chumbo-Ácido (*Lead Acid*)

A bateria de ácido-chumbo começou com as pesquisas e invenções de *Raymond Gaston Planté* em 1860. Esta é constituída por um conjunto de células em série, cada uma com uma tensão de aproximadamente 2 V. Na Figura 2.3 é possível observar uma bateria deste tipo.



Figura 2.3 – Bateria Chumbo-Ácido.

Durante meados dos anos 1970, os pesquisadores desenvolveram uma bateria de chumbo sem necessidade de manutenção que poderia operar em qualquer posição. O eletrólito líquido foi transformado em separadores humedecidos e o invólucro foi selado. As válvulas de segurança foram adicionadas para permitir a ventilação do gás durante a carga e a descarga.

Estas baterias continuaram a ser melhoradas até serem concluídas por volta do ano 2000. A designação destas baterias deve-se à sua constituição, pois possuem o eletrólito de ácido sulfúrico e os elétrodos constituídos essencialmente por chumbo. Estas têm sido muito bem-

sucedidas no mercado por mais de um século. A sua produção e utilização continuam a crescer devido a novas aplicações relativamente ao armazenamento de energia. É muito comum em veículos, sistemas telefónicos, dispositivos de comunicação, sistemas de iluminação de emergência e equipamentos hospitalares. Esta tecnologia de baterias é quase sempre a mais barata para qualquer aplicação em que o peso pode ser desprezado [10][12].

Vantagens [10]:

- Bateria secundária de baixo custo em comparação com as outras baterias, de fácil construção;
- Disponível em variados tamanhos;
- Bom desempenho a altas e baixas temperaturas;
- Eficiência ronda os 70%;
- Fácil indicação do estado de carga;
- Boa aplicação de carga para aplicações de carga intermitente;
- Tecnologia confiável e bem compreendida;
- Baixa autodescarga quando comparadas com outras baterias.

Desvantagens [10][23]:

- Ciclos de vida relativamente baixos;
- Armazenamento a longo prazo, em condições de descarga, pode levar a polarização irreversível de eléctrodos (sulfatação);
- Difícil de fabricar em tamanhos muito pequenos;
- Em alguns modelos pode haver perigo de explosão;
- Baixa densidade de energia;
- Pode causar danos ambientais;
- Relativamente pesadas.

2.3.2 Baterias de Níquel–Cádmio (NiCd)

O desenvolvimento de baterias Níquel–Cádmio começou no início do século XX em paralelo com as baterias de Níquel-Ferro. Estas últimas tiveram um papel muito importante, principalmente no que diz respeito ao estudo de baterias de tração pois conseguiam atingir vários ciclos de carga/descarga. No entanto, depois da Segunda Guerra Mundial, começaram a perder espaço no mercado, principalmente devido à evolução do hidrogénio e a sua taxa de eficiência ser baixa.

As baterias de Níquel-Cádmio são capazes de fornecer grandes correntes por curtos instantes de tempo, permitindo grandes quantidades de potência. Consequentemente, ainda têm um papel importante no mercado, como por exemplo, em aplicações que requerem fontes de energia portáteis, mas também em baterias de tração e aplicações estacionárias [12].

A bateria de Níquel-Cádmio é a bateria com mais tempo de uso no mercado. Com isto, torna-se numa tecnologia já desenvolvida e madura. São constituídas por células que oferecem tensões médias de operação de 1,2 V, e apresentam várias vantagens sobre a bateria de Chumbo-Ácido: maior densidade de energia, maior número de ciclos de vida e podem ser armazenadas por longos períodos de tempo. No entanto, requer descargas completas periódicas, caso contrário a bateria pode vir a sofrer de efeito de memória e, com isso, vir a perder o seu desempenho e o seu tempo de vida. Para além da desvantagem do efeito de memória, quando são expostas a uma sobrecarga, pode haver o risco de explosão. Existe ainda outra desvantagem, a presença do cádmio, que é um dos seus principais componentes, isto porque é uma substância altamente tóxica, o que faz com que tenha de existir mais cuidado no seu uso. Para além disso, para a sua reciclagem, é preciso um processo bastante perigoso.

Assim, esta bateria é utilizada em aplicações que necessitem de um grande tempo de vida, alta corrente de descarga e preço baixo. As principais aplicações são telefones sem fio, *walkie-talkies*, equipamentos médicos, câmaras de vídeo profissionais e ferramentas elétricas [10][12][26].

Vantagens:

- O seu processo de carga é rápido e simples, mesmo quando esta não é utilizada por longos períodos;
- Permitem recargas a baixa temperatura;
- Elevado número de ciclos em relação a outras tecnologias;
- Elevada vida em condições de armazenamento, independentemente do estado de carga;
- Disponível em larga escala de tamanhos e desempenhos.

Desvantagens:

- Baixa densidade de energia, quando comparada com as baterias mais modernas;
- Sofre de efeito de memória;
- Contém metais tóxicos e não recicláveis;
- Taxa de autodescarga elevada.

2.3.3 Baterias de Níquel Hidreto Metálico (NiMH)

A bateria de NiMH, representada na Figura 2.4, é bastante similar à NiCd. Em relação a estas, substituiu-se o eletrodo negativo baseado em cádmio por um eletrodo de hidrogénio absorvente. Esta transformação faz com que baterias deste tipo sejam portadoras de uma maior capacidade (para um certo peso e volume) e permite também a eliminação do cádmio, prejudicial para o meio ambiente [12].



Figura 2.4 - Bateria de Níquel Hidreto Metálico.

Hoje em dia, estas baterias estão muito presentes no mercado pois encontram-se em todos os ramos tecnológicos, desde simples aparelhos portáteis a sistemas mais complexos como veículos elétricos híbridos. São também utilizadas em aplicações em que fatores ambientais e desempenho tenham um grande relevo.

Em relação à bateria de níquel-cádmio (NiCd), a bateria de NiMH possui aproximadamente o dobro de densidade de energia perante os mesmos valores de tensões. Desta maneira, a bateria de NiMH tornou-se um pilar no que diz respeito a baterias recarregáveis, apresentando grandes vantagens, quando comparadas com outros tipos de baterias secundárias, em características como a densidade de energia e ciclos de vida. São seguras e podem ser fabricadas em vários tamanhos e com grandes capacidades. Por outro lado, apresentam taxas de autodescarga elevadas, devido à reação direta entre o hidrogénio e o níquel. A compatibilidade do ferro com os eletrólitos de hidróxido de potássio usado nestas baterias faz com que seja criado ferro no interior, o que torna a bateria mais forte e com um melhor desempenho térmico.

Com todos os problemas ambientais que se está a atravessar, verifica-se já em vários países que o consumidor é aconselhado a usar as baterias de NiMH em vez das baterias de NiCd. Isto deve-se às razões já referidas acima acerca da preocupação com problemas ambientais, pois as baterias NiMH não são poluentes, ao contrário das NiCd [11][27][28].

Vantagens:

- 30-40% maior capacidade que a bateria NiCd;
- Menos propensa a efeito de memória que a bateria NiCd;
- Não contém substâncias tóxicas e não polui;
- Densidade de energia bastante elevada de 60 a 310 Wh/kg, dependendo do tamanho;
- A bateria pode sofrer descargas profundas sem sofrer danos;
- Não necessita de qualquer tipo de manutenção.

Desvantagens:

- Descargas profundas diminuem o seu tempo de vida;
- Necessita de um algoritmo complexo para a sua carga;
- Taxa de autodescarga elevada;
- Apresenta uma eficiência reduzida de 65%.

2.3.4 Baterias de Iões de Lítio (Li-ion)

O trabalho pioneiro com a bateria de lítio, apresentada na Figura 2.5, começou em 1912 sob estudos de G. N. Lewis, mas foi apenas no início dos anos 1970 que as primeiras baterias de lítio não-recarregáveis se tornaram comercialmente disponíveis. Várias tentativas foram efetuadas para desenvolver baterias de lítio recarregáveis na década de 1980, mas falharam devido a problemas de segurança. Devido à instabilidade inerente do metal de lítio, especialmente durante o carregamento, a investigação deslocou-se para uma bateria de lítio não metálica, usando íões de lítio. Embora tivessem ligeiramente menos densidade energética que o metal de lítio, as baterias de íões de lítio são seguras, desde que certas precauções sejam cumpridas ao carregar/descarregar. No início dos anos 90, a *Sony Corporation* comercializou a primeira bateria de Li-ion. Hoje em dia, este tipo de bateria apresenta o mais rápido e promissor crescimento no que diz respeito às baterias químicas e recarregáveis [29].



Figura 2.5 - Bateria de Iões de lítio.

A tecnologia sobre estas tem sido desenvolvida ao longo dos últimos vinte anos e o seu desempenho foi melhorado. Posto isto, hoje são usadas em produtos como telemóveis ou computadores, substituindo as baterias de NiMH [30].

Para garantir a segurança dos dispositivos móveis, são normalmente construídas com pacotes de células individuais que incluem dispositivos que protegem cada célula contra sobrecargas, sobre-descargas, sobrecorrente e temperaturas altas, nos quais são necessários novos dispositivos eletrónicos para minimizar o tempo de carregamento. Para tal, devem ser desenvolvidos carregadores que efetuem o carregamento de um modo mais rápido [31].

As baterias de Li-ion destacam-se então no mercado devido ao número de vantagens que estas apresentam, como por exemplo elevada densidade de energia, baixa resistência interna, ausência de efeito de memória e ciclo de vida bastante superior em relação às outras tecnologias. Contudo, este tipo de baterias possui desvantagens. Isto porque as subcargas levam à diminuição drástica dos ciclos de vida e as sobrecargas excessivas provocam sobreaquecimento que, para além de poderem causar danos irreparáveis, podem originar incêndios ou até mesmo explosões, que colocam em risco a própria vida do utilizador final. Por outro lado, devido a ter um grande impacto no mercado, faz com que o seu preço seja bastante elevado [10][24][32][33][34].

Vantagens:

- Densidade de energia elevada;
- Taxa de autodescarga relativamente baixa;
- Não precisa de manutenção, as células estão seladas e não é necessária nenhuma descarga periódica;
- Não sofre do problema do efeito de memória;
- Elevado tempo de vida;
- Opera numa elevada gama de temperaturas;
- Alta eficiência energética.

Desvantagens:

- Necessidade de um BMS (Sistema de Gestão de Baterias – *Battery Management System*) – tem como objetivo garantir uma utilização ótima da bateria, reduzindo riscos de danos e garantir o maior tempo de vida possível [35];
- Preço elevado relativamente às outras baterias;
- Degrada-se a altas temperaturas;
- Perda de capacidade ou fugas térmicas quando exposta a sobrecargas.

2.3.5 Baterias de Iões de Lítio Polímero (Li-Pol)

No ano de 1997, uma empresa chamada *Ultralife* anunciou a primeira bateria de Lítio-Polímero (Li-Pol) para o computador mais fino da época, que pertencia à marca *Mitsubishi*. Na Figura 2.6 encontra-se representada uma bateria do tipo Li-Pol.



Figura 2.6 - Baterias de Iões de Lítio Polímero (Li-Pol).

Estas baterias têm o mesmo desempenho que as baterias de Li-ion, como por exemplo a alta densidade de energia, mas uma grande melhoria foi implementada em relação à bateria anterior, que foi o seu aspeto fino. Esta melhoria foi muito importante em várias áreas, como as comunicações portáteis (por exemplo, os telemóveis), ou os computadores portáteis, pois é muito importante o dimensionamento das peças e é crucial que estas ocupem o menor espaço possível. Por outro lado, também foram melhoradas no que diz respeito à segurança, comparada com a bateria de Li-ion, pois não há perigo de explosão devido a sobrecargas. Como todas as baterias, esta também possui desvantagens, mas as suas elevadas vantagens tornam esta bateria como uma das melhores opções nas áreas dos dispositivos eletrónicos portáteis [10][24][36][37].

Vantagens:

- Mesmo desempenho que as características das baterias de Li-ion, mas num formato muito mais leve;
- Flexíveis, os fabricantes não são limitados por formatos padrões da célula;
- Baixa espessura que facilita a associação em série e/ou paralelo;
- São mais seguras que as de Li-ion, sendo mais resistentes a sobrecargas.

Desvantagens:

- Custo elevado;
- Necessidade de BMS – tem como objetivo garantir uma utilização ótima da bateria, reduzindo riscos de danos e garantir o maior tempo de vida possível [35];
- Neste tipo de baterias uma sobrecarga ou sobreaquecimento pode resultar em fogo;

- Comparadas com as outras baterias de lítio o seu tempo de vida é mais pequeno e o custo de produção é maior.

2.3.6 Baterias de Iões de Lítio Ferro Fosfato (LiFePO₄)

No final dos anos 90, a necessidade das baterias de iões de lítio como baterias recarregáveis era indispensável, pois estas eram dotadas de inúmeras vantagens relativamente às outras tecnologias no mercado. Devido a isso, os investigadores dedicavam o seu estudo às baterias de Li-ion, de maneira a melhorar e otimizar este tipo de baterias. As baterias de LiFePO₄ resultam então da necessidade de melhorar essa tecnologia. Em 1997, Goodenough, Akshaya Padhi e outros colaboradores descobriram o fosfato como material de cátodo para baterias recarregáveis [37].

A bateria de LiFePO₄, apresentada na Figura 2.7, é a tecnologia de baterias mais recente no mercado e apresenta um elevado desempenho e qualidade. Esta tecnologia reúne várias vantagens como durabilidade/fiabilidade, taxa de autodescarga reduzida, maior número de ciclos de vida e rendimento mais elevado.



Figura 2.7 - Bateria de LiFePO₄.

A segurança numa bateria também é um aspeto crucial a ter em conta na escolha da mesma. Quando usadas em grandes tamanhos, o risco/falha de segurança é maior quando comparada com tamanhos mais pequenos, como por exemplo nos veículos elétricos. Perante essa necessidade surge o fosfato como material de cátodo, que vem tornar as baterias LiFePO₄ muito seguras. Sendo assim, podem operar a altas temperaturas, continuando a ser estáveis. Tais factos tornaram esta tecnologia como a mais segura no mercado. Outra grande vantagem são os materiais e químicos que a constituem, que não são poluentes e são recicláveis.

Hoje em dia, estas baterias são implementadas em inúmeras e diferentes áreas de aplicação, devido a uma ampla gama de características e à variedade de diferentes tamanhos e formatos

de baterias que podem ser produzidas. Exemplos de aplicação são qualquer tipo de carros elétricos, ferramentas de potência, comandos, armazenamento de energia eólica e equipamentos solares, equipamentos médicos e equipamentos portáteis como computadores ou câmaras digitais [38][39].

Vantagens:

- Segurança, durabilidade e fiabilidade;
- Taxa de autodescarga reduzida;
- Não são poluentes e contêm materiais recicláveis;
- Rendimento mais elevado;
- Maior ciclo de vida;
- Não são afetadas pelo efeito de memória;
- Boa estabilidade térmica;
- Fica carregada em menos tempo em comparação com outras baterias;

Desvantagens:

- Necessidade de BMS – tem como objetivo garantir uma utilização ótima da bateria, reduzindo riscos de danos e garantir o maior tempo de vida possível [35];
- São mais caras em comparação com as outras tecnologias de baterias.

2.3.7 Comparação das Diferentes Tecnologias de Baterias

Na Tabela 2.1 é possível identificar algumas distinções entre as diversas baterias enunciadas anteriormente.

Tabela 2.1 – Comparação entre os diferentes tipos de baterias [10][12][26][28][37][38][39].

Características	Tipos de baterias					
	<i>Lead-Acid</i>	NiCd	NiMH	Li-ion	Li-Pol	LiFePO ₄
Tensão Nominal (V)	2	1,25	1,25	3,6	3,6	3,2
Energia Específica (Wh/Kg)	30-50	40-80	60-120	90-160	150-170	90-120
Densidade de Energia (Wh/dm ³)	8-16	45-150	60-310	110-280	200-300	220
Potência Específica (W/Kg)	180-300	150-350	150-400	230-1000	350-1800	2000-4500
Resistência Interna (mΩ)	<100	100-200	200-300	150-250		<1
Ciclos de Vida	400-600	600-1200	600-1500	300-2100	500-2100	>2000
AutoDescarga (%/mês)	3-5	10-20	2-3	5-10	1-10	<3
Temperatura de operação (°C)	-20 a 60	-40 a 60	-10 a 45	-25-50	-20-60	-20-60
Custo	Baixo	Elevado	Elevado	Elevado	Elevado	Elevado
Material Poluente	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
Eficiência (%)	70-92	70-90	65	94	97	92
Efeito de Memória	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
Risco de sobreaquecimento	Muito Reduzido	Reduzido	Médio	Alto	Médio	Médio
Efeito da Temperatura nos Ciclos de Vida	Baixo	Muito Alto	Médio	Médio	Médio	Médio
Cargas Rápidas	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Manutenção	3-6 meses	1-2 meses	Não necessita	Não necessita	Não necessita	Não necessita

2.4 Fatores que Podem Influenciar o Desempenho das Baterias

Num sistema de carga e descarga de baterias é imperioso saber o que pode ou não influenciar o desempenho de uma bateria. De acordo com [10], são referenciados de seguida alguns fatores que podem influenciar o desempenho de uma bateria:

- Valor da corrente de carga e descarga;
- Método de carga e descarga utilizado;
- Temperatura na bateria durante a carga e descarga;
- Ciclos de vidas;
- Tipo de carga e descarga (contínuo ou descontínuo);
- Idade da bateria e condições de armazenamento.

2.5 Métodos de Carregamento de Baterias

O armazenamento de energia tem sido um dos ramos de maior investigação nos últimos anos, uma vez que inúmeras aplicações na engenharia necessitam de uma fonte de energia para alimentar o seu sistema. Desde o século XIX que as baterias elétricas estão presentes na maioria dos dispositivos elétricos e eletrónicos e são indispensáveis aos mesmos, visto que, sem elas, estes não funcionam.

Devido à utilização mais ou menos frequente deste tipo de dispositivos, ao fim de algum tempo a bateria fica totalmente descarregada. Consequentemente, é necessário um equipamento eletrónico capaz de fornecer uma tensão de alimentação durante períodos prolongados, ou que seja capaz de carregar totalmente a bateria num curto período de tempo com alta eficiência sem a danificar. Para isso, é necessário encontrar o melhor método de carga, assim como aquele que melhor se adequa a cada tipo de bateria, pois o carregamento não é um processo simples, atendendo a fatores como eficiência, tempo de carga e segurança. Posto isto, para carregar uma bateria é necessário utilizar algoritmos que implementem a técnica pretendida para o carregamento e que verifiquem o SoC da mesma.

De seguida, são apresentados os métodos de carregamento de baterias mais comuns, sendo importante saber que não existem métodos ideais ou métodos que possam ser aplicados a qualquer tipo de bateria [40].

2.5.1 Corrente Constante

Este método consiste em carregar a bateria com uma fonte de corrente constante até que a tensão limite (em carga) da bateria seja atingida. No entanto, a sobrecarga da bateria irá resultar na degradação da vida da mesma. Quanto menor for a intensidade de corrente aplicada, maior será o tempo de carregamento da bateria. Por outro lado, a aplicação de uma elevada intensidade de corrente faz com que a temperatura interna da bateria aumente, podendo assim levá-la ao estado de sobrecarga e/ou diminuir a eficiência do processo de carga. De maneira a obter uma melhor compreensão, na Figura 2.8 está presente o gráfico correspondente a este tipo de carga ao longo do tempo.

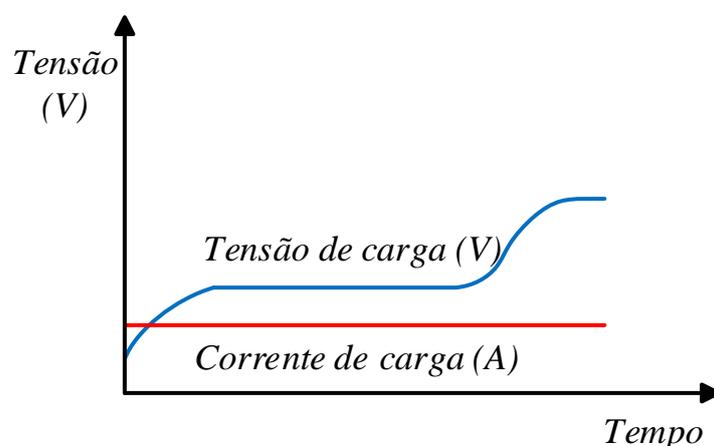


Figura 2.8 - Gráfico correspondente ao método de carga corrente-constante.

Os carregadores de corrente constante são relativamente baratos e simples de desenvolver, pois não são considerados como carregadores tecnologicamente avançados e dependem do utilizador para começar e terminar a carga. Apesar de serem de simples design, esta técnica não otimiza o desempenho da bateria e, ao carregar a baixas correntes, faz com que haja formação de dendrites (formação ou solidificação mineral que se assemelha aos ramos de uma árvore) na bateria. Isto prejudica o funcionamento da bateria, podendo diminuir o número de ciclos de carga/descarga da mesma [40][41][42].

2.5.2 Tensão Constante

Este método baseia-se em aplicar uma tensão constante aos terminais da bateria. A corrente diminui progressivamente até que a bateria fique totalmente carregada, como se verifica na Figura 2.9 [40]. Quando a bateria é exposta a correntes mais elevadas, a temperatura interna vai aumentar, o que provoca a degradação da vida da bateria. Consequentemente, convém diminuir a corrente para não danificar a bateria. Para esse efeito, mantendo a tensão da bateria sempre constante, permite controlar a temperatura interna [41][42].

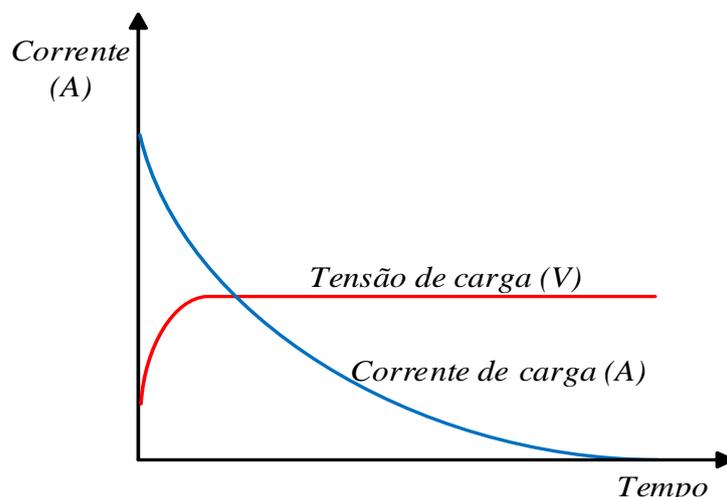


Figura 2.9 – Gráfico correspondente ao método de carga tensão-constante.

2.5.3 Corrente Constante/Tensão Constante

Este método, numa primeira fase, permite carregar a bateria com uma fonte de corrente constante, até que a tensão limite (em carga) da bateria seja atingida. Posteriormente, a tensão mantém-se constante e, à medida que o SoC da bateria aumenta, a corrente diminui progressivamente até um determinado valor aproximadamente zero, a partir do qual se considera que a bateria está totalmente carregada [40][43]. Na Figura 2.10 encontra-se o gráfico referente a este método.

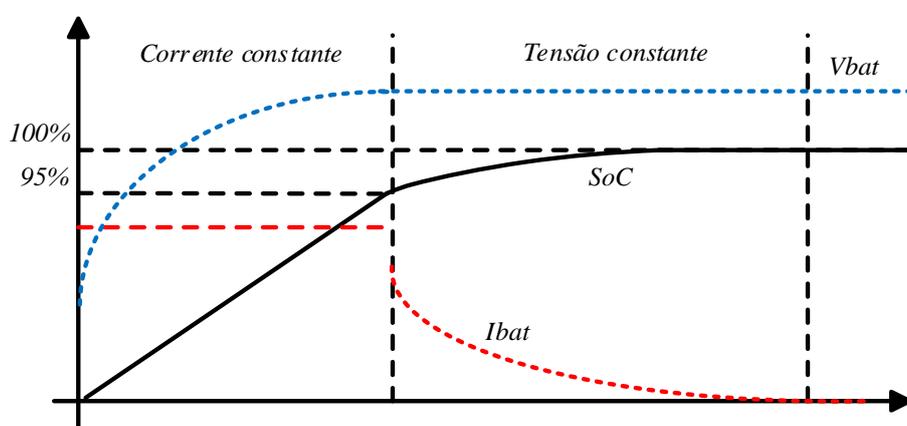


Figura 2.10 – Gráfico correspondente ao método de carga corrente constante-tensão constante.

Tipicamente, as baterias de Li-ion, e em particular as baterias de LiFePO_4 , são carregadas de acordo com este método. A sua principal desvantagem é o tempo de carga. De acordo com a Figura 2.10, cerca de 95% da carga total da bateria deve-se apenas à primeira fase de carga (corrente constante), que é concluída num espaço de tempo substancialmente inferior quando comparado com o método *standard* (corrente constante).

2.5.4 Carga por Pulsos

Este método, exibido na Figura 2.11, foi desenvolvido mais recentemente, consistindo em aplicar à bateria pulsos de corrente periodicamente, permitindo um tempo de relaxe no processo de carga. Este surgiu de modo a permitir o devido tempo para as reações químicas que ocorrem na bateria, permitindo que esta seja carregada uniformemente. Consequentemente, faz com que a formação de dendrites no interior da bateria seja neutralizada, permitindo que o crescimento da temperatura na bateria seja mais lento, diminuindo o risco de sobrecarga e aumentando o tempo de vida da mesma [40][44].

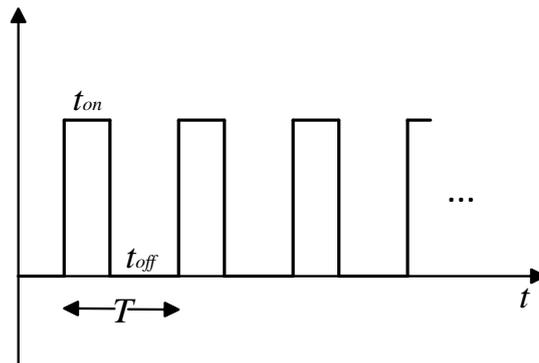


Figura 2.11 – Gráfico correspondente ao método de carga por pulsos.

2.5.5 Método *Reflex*

O método de carga *Reflex* é um melhoramento do método por pulsos e encontra-se exposto na Figura 2.12. Este consiste em adicionar ao método de carga por impulsos um pequeno período de descarga no período de descanso. A parte de descarga faz com que o processo de estabilização das reações químicas seja mais rápido, que é bastante benéfico para todo o processo de carga e para a saúde da bateria [40][45].

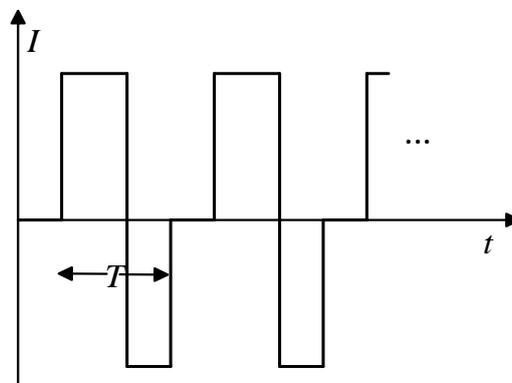


Figura 2.12 – Gráfico correspondente ao método de carga *Reflex*.

2.5.6 Comparação dos Métodos de Carga de Baterias

Na Tabela 2.2 estão apresentadas as principais vantagens e desvantagens dos diferentes métodos de carregamento.

Tabela 2.2 - Comparação dos diferentes métodos de carga de baterias.

Método de carga	Vantagens	Desvantagens
Corrente constante	O limite e controlo de corrente previne sobrecargas na bateria durante a fase inicial de carga.	Pode existir uma sobrecarga na bateria durante a fase final de carga.
Tensão constante	O limite e controlo de tensão previne sobretensões na bateria na fase final de carga.	No início da carga, a corrente pode atingir valores elevados.
Corrente constante/ Tensão constante	Limita a tensão e a corrente.	Tempo do processo de carga é muito demorado.
Carga por pulsos e método <i>reflex</i>	Reduz o efeito de polarização de modo a prevenir o aumento da temperatura na bateria.	Requer um sistema de controlo bastante complexo.

2.6 Métodos de Descarga de Baterias

Uma vez estudados os diferentes métodos de carga de uma bateria, é de igual importância saber como e quais métodos se devem utilizar com o intuito de descarregar a mesma sem prejudicar o seu funcionamento. A descarga de uma bateria depende do DoD e termina quando a bateria atinge o seu ponto de tensão mínimo. Em todos os tipos de descarga é necessário ter muito cuidado para não deixar a bateria passar a sua tensão mínima de maneira a não causar nenhum dano [10].

2.6.1 Resistência Constante

Este método permite descarregar a bateria através de uma carga com resistência constante. Visto que não é utilizado nenhum tipo de controlo para a corrente, esta vai diminuir proporcionalmente, durante a descarga, conforme a tensão na bateria também vai diminuindo [10].

2.6.2 Corrente Constante

Este método consiste em efetuar a descarga da bateria a uma corrente constante. Este é efetuado até a bateria atingir o seu valor mínimo ou o DoD pretendido [10].

2.6.3 Potência Constante

Como o próprio nome indica, este caso baseia-se em ligar uma carga com potência constante na bateria. Assim como os anteriores, o processo de descarga é terminado quando a bateria atinge o seu valor mínimo de tensão [10].

2.7 Conclusões

De modo a desenvolver um sistema de carga e descarga de baterias surge a necessidade de compreender um pouco melhor as mesmas. Posto isto, neste capítulo foram abordados vários aspetos que envolvem as baterias com o intuito de não só proporcionar uma melhor compreensão, mas também como o saber utilizar.

Em primeiro lugar foram estudados os modelos equivalentes de uma bateria existentes, assim como as principais características de uma bateria. Posteriormente, foi efetuado um breve estudo sobre as baterias existentes atualmente no mercado, onde foi possível averiguar as suas vantagens e desvantagens, assim como fatores que podem influenciar o seu desempenho. Através desta análise é possível afirmar que a tecnologia das baterias de LiFePO_4 é a que possui mais vantagens em comparação com as outras alternativas. Posto isto, a bateria a ser usada em estudo é a bateria de LiFePO_4 .

Após efetuar-se um estudo sobre as baterias existentes, surge a necessidade de estudar qual o melhor modelo de análise a aplicar sobre a bateria em estudo. Como se pretende estudar o seu comportamento durante processos de carga e descarga, considerou-se que o que melhor se adequava era o modelo elétrico. Visto que o projeto a ser desenvolvido se baseia num conversor de carga e descarga de baterias, é primordial saber os métodos de descarga e carga existentes. Depois de um estudo sobre os mesmos, conclui-se que para as baterias de LiFePO_4 aplica-se o método de carga corrente constante seguido de tensão constante. Relativamente à descarga, é possível aplicar qualquer método estudado, porém neste caso é aplicado o método de corrente constante.

Capítulo 3

Topologias de Conversores para Carga e Descarga de Baterias

3.1 Introdução

Consolidado o estado da arte sobre as baterias, neste capítulo é efetuado um estudo pormenorizado sobre as diferentes topologias de conversores CC-CC bidirecionais com o objetivo de efetuar processos de carga e descarga a baterias. Posto isto, são apresentados os seus diferentes modelos existentes juntamente com o seu modo de funcionamento e, posteriormente, são também estudados os diferentes métodos de controlo de corrente de modo a utilizar valores de corrente constante tanto na carga como na descarga. A topologia vai ser escolhida de maneira a satisfazer um conversor CC-CC bidirecional que se comporte como um *step-down* na carga e um *step-up* na descarga.

3.2 Conversores CC-CC para Sistemas de Carga e Descarga de Baterias

Ao desenvolver um carregador de uma bateria é necessário ter vários aspetos em consideração. Além dos requisitos necessários, os objetivos comuns são reduzir o tamanho, peso e custo e melhorar a sua eficiência. Tradicionalmente, na maioria dos sistemas eletrónicos são utilizadas fontes de alimentação CC. No entanto, com os avanços tecnológicos, as fontes de alimentação lineares foram substituídas por fontes de alimentação comutadas. Estas por sua vez são muito mais pequenas e muito mais eficientes em comparação com as fontes de alimentação lineares. Consequentemente, surgiram os conversores CC-CC que se baseiam no uso de semicondutores de potência controláveis e de componentes passivos, como as bobinas ou condensadores, que armazenam energia elétrica [46].

3.2.1 Conversores Unidirecionais e Bidirecionais

Em qualquer topologia de conversor existem duas formas de classificar o modo de operação: unidirecional e bidirecional. No caso de um conversor unidirecional, este apenas permite fluir

a corrente num único sentido, como é o caso dos conversores *buck* ou *boost*. Por outro lado, nos conversores bidirecionais o fluxo da corrente é efetuado em ambos os sentidos, como é o caso do conversor *buck-boost* [47]. Uma vez que o sistema que se pretende desenvolver tem como objetivo efetuar a carga e descarga de uma bateria, é necessário o uso de um conversor bidirecional.

3.2.2 Topologia *Interleaved*

A topologia *interleaved* baseia-se na conexão de conversores CC-CC em paralelo, como se pode observar na Figura 3.1, sendo aplicado um desfaseamento aos sinais de *Pulse Width Modulation* (PWM) enviados aos semicondutores. Este desfaseamento faz com que o *ripple* do sinal aplicado à saída seja menor [48][49].

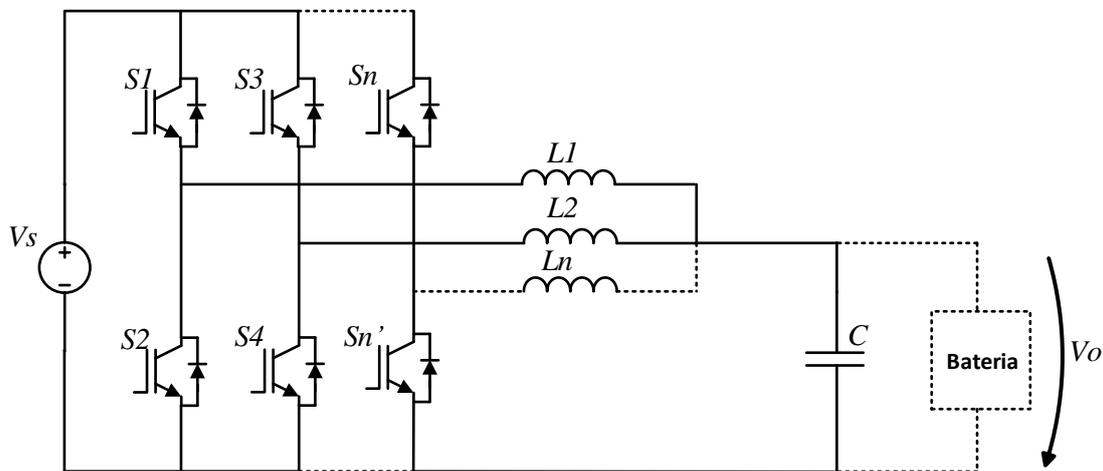


Figura 3.1 – Número de fases num conversor CC-CC com topologia *interleaved*.

O desfaseamento é realizado com base no número de conversores utilizados, sendo que é calculado através da equação (3.1):

$$\frac{2\pi}{n}, \quad (3.1)$$

sendo n o número de conversores em paralelo. Na figura anterior V_s demonstra a tensão de entrada, enquanto que V_o se refere à tensão de saída. Esta técnica é muito utilizada em circuitos com valores elevados de corrente na entrada, pois este valor é dividido entre os vários semicondutores e respetivas bobinas e condensadores. Tal facto proporciona um menor aquecimento sobre os mesmos e, com isso, um maior rendimento, visto que as perdas vão ser menores. Por outro lado, como a corrente é dividida, estes componentes não precisam de possuir valores tão elevados para suportar a corrente, proporcionando o uso de componentes mais pequenos e mais baratos e diminuindo também o *ripple* da corrente.

No que diz respeito ao controlo na topologia *interleaved*, este vai ser um pouco mais complexo devido ao elevado número de semicondutores, mas não diferenciando muito da topologia normal visto que apenas é necessário efetuar adicionalmente o desfasamento entre as fases [50].

3.3 Conversor CC–CC Unidirecional *Buck*

O conversor CC-CC *buck*, também conhecido como *step-down*, como o próprio nome indica atua como um abaixador de tensão, ou seja, gera na sua saída uma tensão inferior à da entrada. Esta topologia é não isolada e apenas funciona numa direção. Na Figura 3.2 está representado o conversor *buck*.

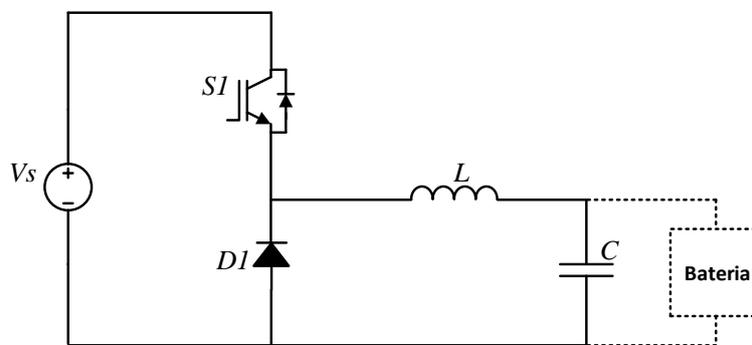
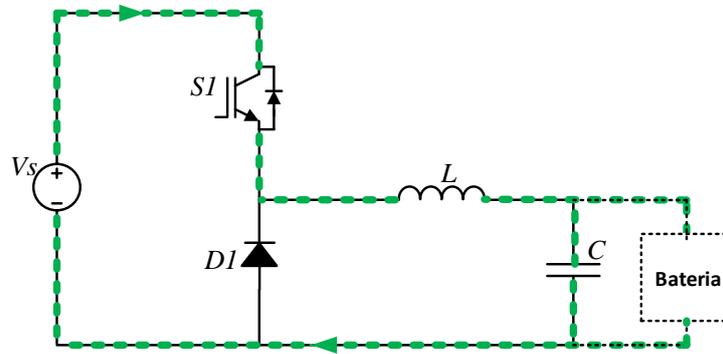


Figura 3.2 – Conversor CC–CC *buck*.

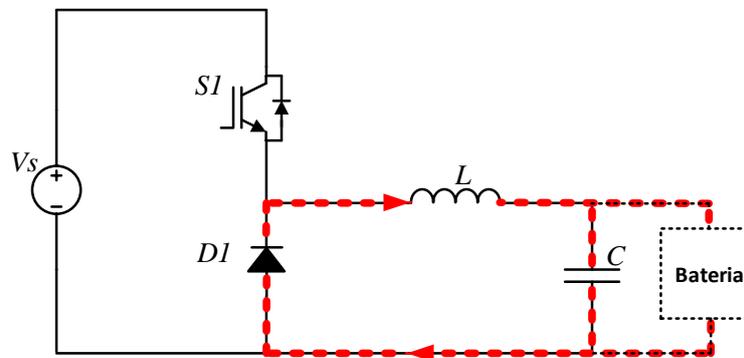
Como se pode verificar este conversor consiste numa fonte de tensão de entrada V_s , um semicondutor SI , um díodo DI , um filtro indutivo L , um filtro capacitivo C e uma bateria. Este conversor possui dois estados diferentes de funcionamento [46][51][52]:

- Estado *on*: o interruptor SI encontra-se ligado, em que a corrente flui pelo mesmo e o díodo DI encontra-se inversamente polarizado;
- Estado *off*: o interruptor SI encontra-se desligado e a corrente flui pelo díodo DI que se encontra diretamente polarizado.

Através da Figura 3.3 pode observar-se o primeiro caso de funcionamento do conversor CC-CC.


 Figura 3.3 – Conversor CC-CC *buck* no estado *on*.

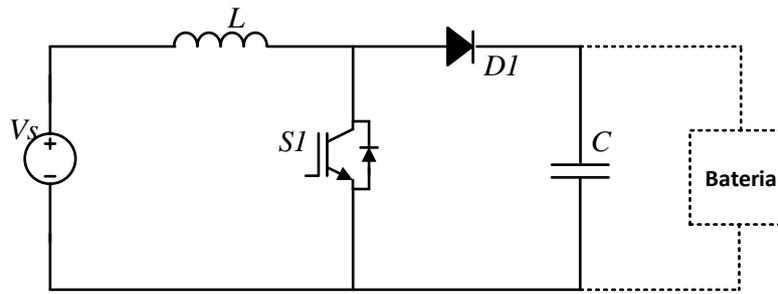
Como se verifica na figura, a corrente flui através do semicondutor *SI* que se encontra ligado e o diódo *DI* não conduz. Neste caso a corrente flui da fonte para a carga através da bobina. Consequentemente, a bobina encontra-se a armazenar a energia e a tensão aos seus terminais é positiva. Na Figura 3.4 verifica-se o funcionamento do conversor em questão no estado *off*.


 Figura 3.4 – Conversor CC-CC *buck* no estado *off*.

No estado *off* o semicondutor *SI* encontra-se desligado, fazendo com que a corrente previamente armazenada na bobina flua através do diódo *DI* para a bateria. Com base nisso, a bobina e o condensador estão a alimentar a carga, logo, ao contrário do caso anterior a tensão aos terminais da bobina passa a ser negativa.

3.4 Conversor CC-CC Unidirecional *Boost*

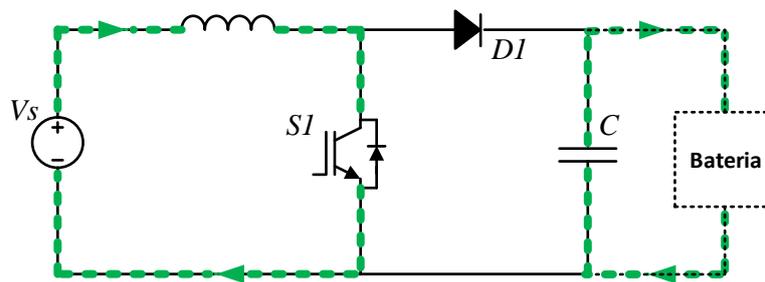
O conversor CC-CC *boost*, também conhecido como *step-up*, atua como um elevador de tensão, ou seja, gera na saída uma tensão superior à existente na entrada. Tal como a topologia anterior, esta é não isolada e apenas funciona numa direção. Através da Figura 3.5 pode examinar-se o conversor *boost*.

Figura 3.5 – Conversor CC-CC *boost*.

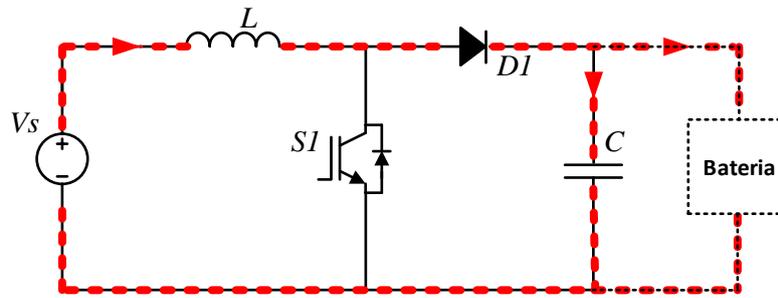
Através da análise do conversor verifica-se que este contém os mesmos componentes que o conversor anterior, com a diferença que estes se encontram organizados de maneira diferente. De seguida são ilustrados os seus dois estados de funcionamento [46][51][52]:

- Estado *on*: o semicondutor *SI* encontra-se ligado e o díodo *DI* está inversamente polarizado;
- Estado *off*: o semicondutor *SI* encontra-se desligado e o díodo *DI* está diretamente polarizado.

Na Figura 3.6 é possível observar como flui a corrente quando o semicondutor *SI* é ligado.

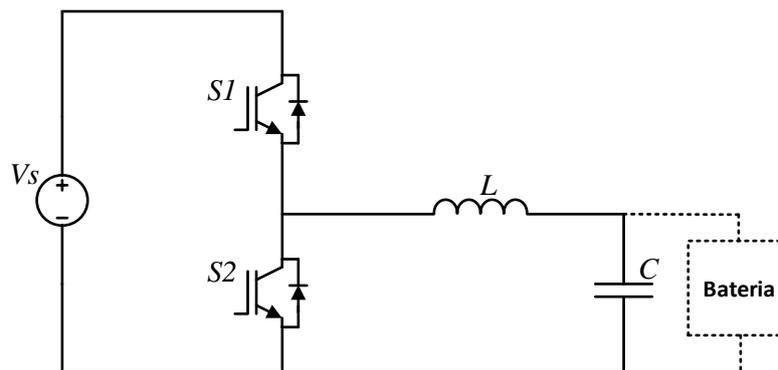
Figura 3.6 – Conversor CC-CC *boost* no estado *on*.

Ao analisar o circuito anterior constata-se que ao ligar o semicondutor *SI*, o díodo *DI* fica inversamente polarizado, fazendo com que a corrente não flua da fonte para a bateria. Quando tal acontece, a bateria passa a ser alimentada somente pelo condensador. Como a bobina se encontra num circuito fechado, esta armazena energia e a sua tensão aos terminais é positiva. Por outro lado, quando o semicondutor *SI* é desligado, este deixa de conduzir e, por sua vez, o díodo *DI* começa a conduzir, ficando diretamente polarizado, como se observa na Figura 3.7. Neste caso, a bobina liberta a energia armazenada anteriormente, alimentando a carga juntamente com a fonte de alimentação. O condensador que se encontra em paralelo com a carga vai carregar.


 Figura 3.7 – Conversor CC-CC *boost* no estado *off*.

3.5 Conversor CC-CC Bidirecional *Buck-Boost*

O conversor CC-CC *buck-boost* resulta basicamente na combinação dos conversores *buck* e *boost* estudados anteriormente. Com isto, passa-se a ter um conversor bidirecional, ou seja, que opera em ambos os sentidos. Como o projeto a implementar é um sistema de carga e descarga de baterias, este torna-se adequado pois num modo de funcionamento permite efetuar a carga da bateria e no outro permite efetuar a descarga da mesma. Na Figura 3.8 é possível verificar um esquemático do conversor.


 Figura 3.8 – Conversor CC-CC bidirecional *buck-boost*.

Pela análise do conversor anterior constata-se que este é constituído por uma fonte V_s , dois semicondutores $S1$ e $S2$, um filtro indutivo L , um filtro capacitivo C e uma bateria. Ao contrário dos conversores *buck* e *boost*, este contém dois semicondutores de maneira a ser possível o controlo para funcionar em ambos os modos [53].

3.5.1 Funcionamento como *Buck*

Neste conversor, a atuação como *buck* implica que o semicondutor $S2$ esteja sempre desligado, e assim possuindo um funcionamento idêntico ao conversor CC-CC unidirecional *buck*. Como o semicondutor $S1$ é controlado, este circuito contém dois estados de funcionamento [46][51][53]:

- Estado *on*: o semicondutor *S1* encontra-se ligado e o díodo em antiparalelo do semicondutor *S2* se encontra inversamente polarizado;
- Estado *off*: o semicondutor *S1* encontra-se desligado e o díodo em antiparalelo do semicondutor *S2* se encontra diretamente polarizado.

Na Figura 3.9 está representado o comportamento do conversor como *buck* no modo *on*.

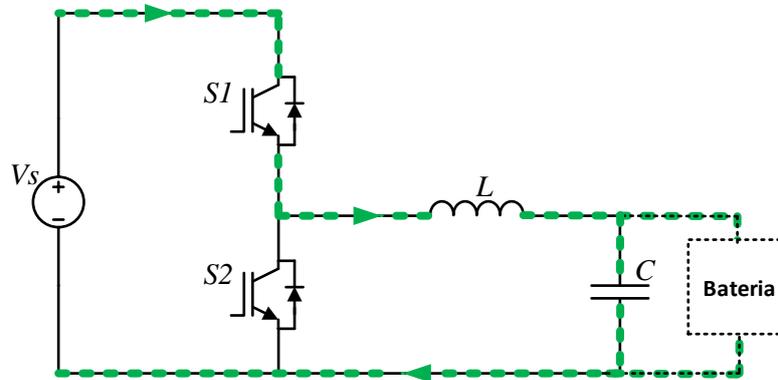


Figura 3.9 – Conversor CC-CC *buck-boost* a atuar como *buck* no modo *on*.

Como se pode analisar, a corrente flui da fonte V_s para a bateria e para o condensador através do semicondutor *S1*, sendo que o díodo em antiparalelo do semicondutor *S2* não conduz. Neste caso a bobina permanece a armazenar energia. Ao utilizar o conversor como *buck*, o valor da corrente na bobina vai ser igual ao valor presente na bateria, como se pode verificar na Figura 3.10.

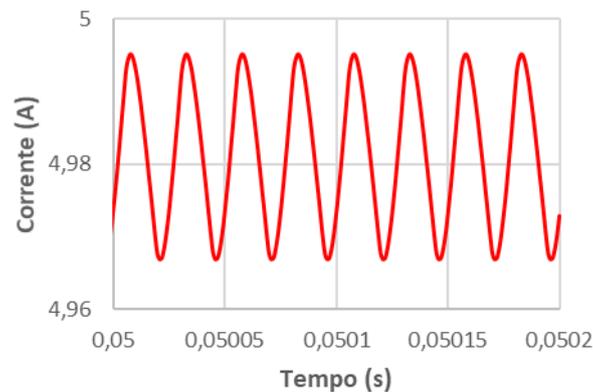
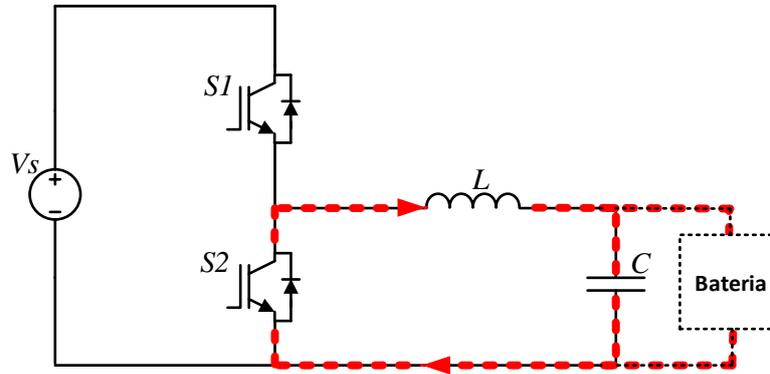


Figura 3.10 – Corrente na bobina do conversor CC-CC *buck-boost* e na bateria com o conversor a atuar como *buck*.

Através da Figura 3.11 é perceptível o comportamento do conversor como *buck* no modo *off*.


 Figura 3.11 - Conversor CC-CC *buck-boost* a atuar como *buck* no modo *off*.

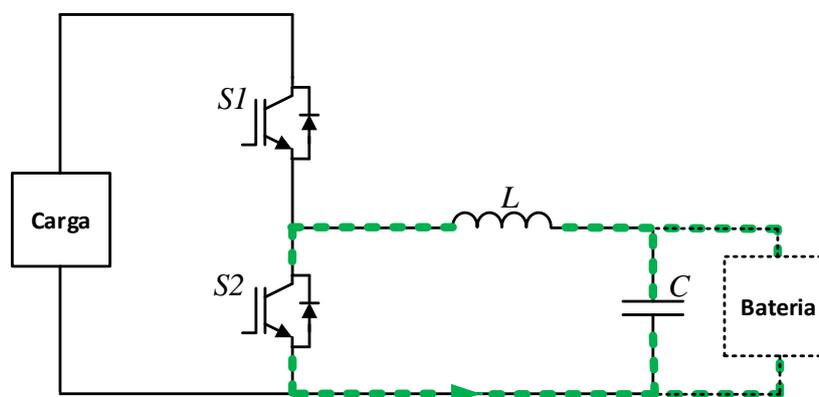
Neste caso o semicondutor *S1* está desligado, sendo que a bateria não é alimentada pela fonte V_s mas sim pelo condensador e pela bobina que se encontram em condução através do díodo antiparalelo do semicondutor *S2*, que permanece diretamente polarizado.

3.5.2 Funcionamento como *Boost*

Relativamente à atuação do conversor CC-CC como *boost*, o semicondutor *S1* permanece sempre desligado enquanto que o semicondutor *S2* pode ser ligado ou desligado. Posto isto, ao atuar como *boost* o conversor possui dois estados [46][51][53]:

- Estado *on*: o semicondutor *S2* encontra-se ligado e o díodo antiparalelo do semicondutor *S1* está inversamente polarizado.
- Estado *off*: o semicondutor *S2* encontra-se desligado e o díodo antiparalelo do semicondutor *S1* está diretamente polarizado.

De maneira a facilitar a compreensão do circuito, na Figura 3.12 é ilustrado o funcionamento no modo *on*.


 Figura 3.12 – Conversor CC-CC *buck-boost* a atuar como *boost* no modo *on*.

Como se pode analisar, ao ligar o semicondutor *S2*, o díodo antiparalelo de *S1* fica inversamente polarizado, sendo que a corrente flui através de *S2* e a bateria é alimentada pelo

condensador. Assim como no modo *buck*, quando o respetivo semicondutor é ligado, a corrente na bateria tem o mesmo valor que na carga. Por outro lado, ao desligar o semicondutor *S2*, o díodo antiparalelo do semicondutor *S1* fica diretamente polarizado e a corrente flui através do mesmo desde a bateria até à carga e condensador, como apresenta a Figura 3.13.

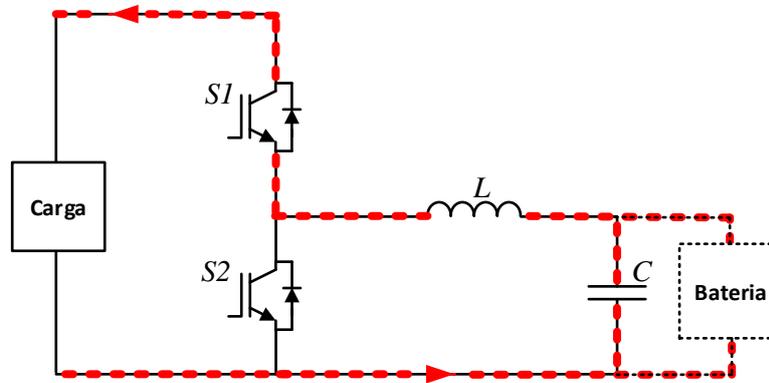
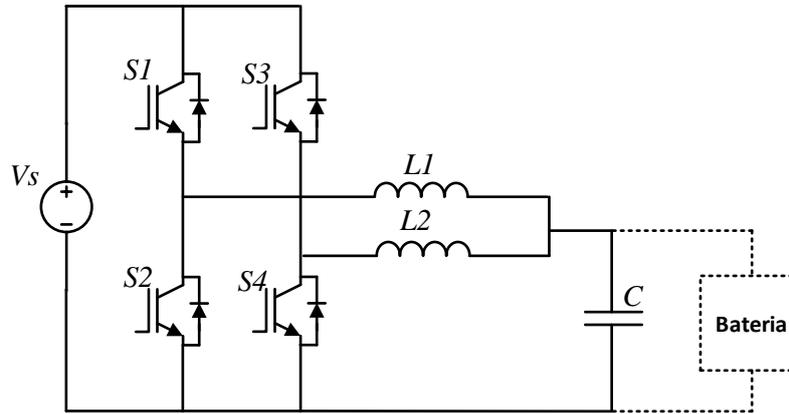


Figura 3.13 – Conversor CC-CC *buck-boost* a atuar como *boost* no modo *off*.

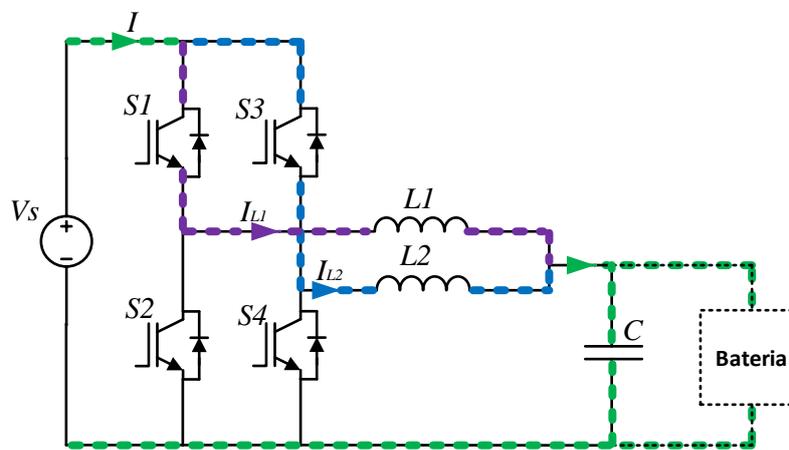
3.6 Conversor CC-CC *Buck-Boost* com Topologia *Interleaved*

Para o desenvolvimento do sistema de carga e descarga foi tido em consideração o sobreaquecimento dos componentes do conversor devido à corrente que passa nos mesmos, o peso e tamanho, assim como a diminuição do *ripple* da corrente de saída. Posto isto, foi estudada a topologia *interleaved*. Como referido anteriormente, esta consiste em ter dois ou mais conversores em paralelo e, conseqüentemente, é mais eficiente. Neste caso vão ser usados dois conversores CC-CC *buck-boost* em paralelo, sendo que o novo conversor passa a possuir quatro semicondutores e duas bobinas. Com base nisto, tanto na descarga como na carga vão ser utilizados dois semicondutores que recebem sinais de PWM desfasados 180°. Por sua vez, o valor da corrente que passa em cada bobina e em cada semicondutor corresponde a metade do valor na bateria [54]. Através da Figura 3.14 observa-se o conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved*.


 Figura 3.14 – Conversor CC–CC *buck-boost* com topologia *interleaved*.

3.6.1 Funcionamento como *Buck*

O conversor com topologia *interleaved* ao atuar como *buck* (abaixador de tensão) necessita da atuação dos seus dois semicondutores $S1$ e $S3$. Este modo representa o carregamento da bateria, pelo que a corrente flui da fonte para a bateria. Os respetivos semicondutores são comutados através do envio de sinais de PWM que se encontram desfasados entre si 180° [54]. Na Figura 3.15 está representado o percurso que a corrente efetua desde a fonte até a bateria, passando pelos semicondutores $S1$ e $S3$, enquanto que $S2$ e $S4$ se encontram desligados.


 Figura 3.15 – Conversor CC–CC *buck-boost* com topologia *interleaved* em modo *buck*.

No entanto, é de salvaguardar que ambos os semicondutores $S1$ e $S3$ não comutam ao mesmo tempo, pois como referido anteriormente comutam desfasados entre si 180° . Posto isto, a Figura 3.16 indica o caminho da corrente no instante em que $S1$ se encontra ligado e $S3$ se encontra desligado. Por outro lado, no caso de ser $S1$ a estar desligado e $S3$ ligado o percurso da corrente é exatamente igual, à exceção de que passa em $S3$ e no díodo antiparalelo do semicondutor $S2$ como se pode observar na Figura 3.17.

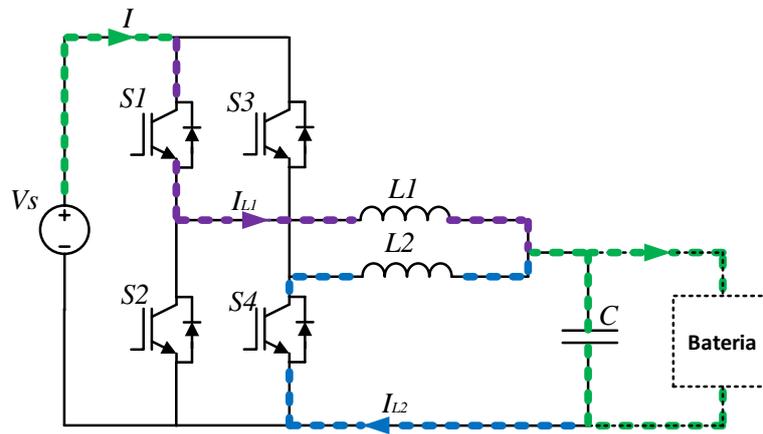


Figura 3.16 – Conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved* em modo *buck* com S_1 ligado e S_3 desligado.

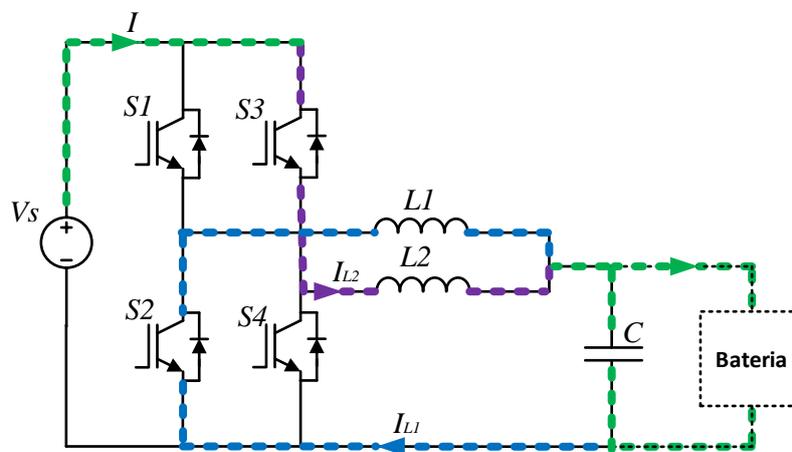


Figura 3.17 – Conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved* em modo *buck* com S_3 ligado e S_1 desligado.

No conversor CC-CC *buck-boost* no modo *buck* a corrente na bateria é igual à soma das correntes em cada bobina que se encontram desfasadas 180°, como demonstram a Figura 3.18 e a Figura 3.19.

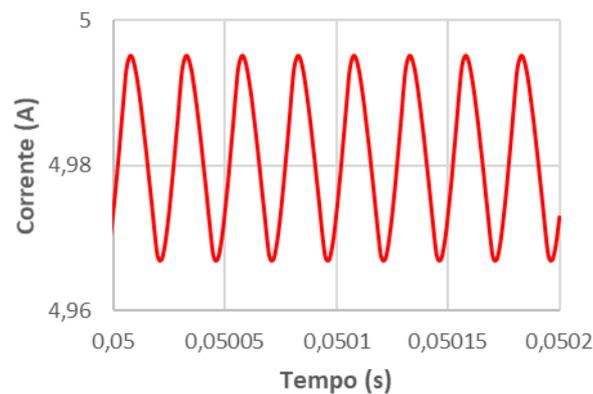


Figura 3.18 – Corrente na bateria com o conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved* a funcionar como *buck*.

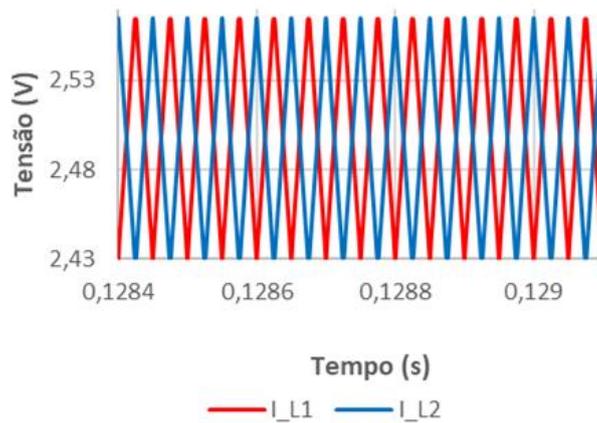


Figura 3.19 – Corrente em cada bobina com o conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved* a funcionar como *buck*.

3.6.2 Funcionamento como *Boost*

Para o conversor com topologia *interleaved* atuar como *boost* (elevador de tensão), é necessário que os semicondutores $S2$ e $S4$ se encontrem ligados, enquanto que $S1$ e $S3$ permanecem desligados. Os semicondutores são ativados através de sinais de PWM que se encontram desfasados entre si 180° . Neste modo é representada a descarga da bateria, em que a corrente flui da bateria até uma carga [54]. Na Figura 3.20 está representado o percurso que a corrente efetua desde a bateria até à carga pelos díodos antiparalelos dos semicondutores $S1$ e $S3$, enquanto que os semicondutores $S2$ e $S4$ se encontram ligados.

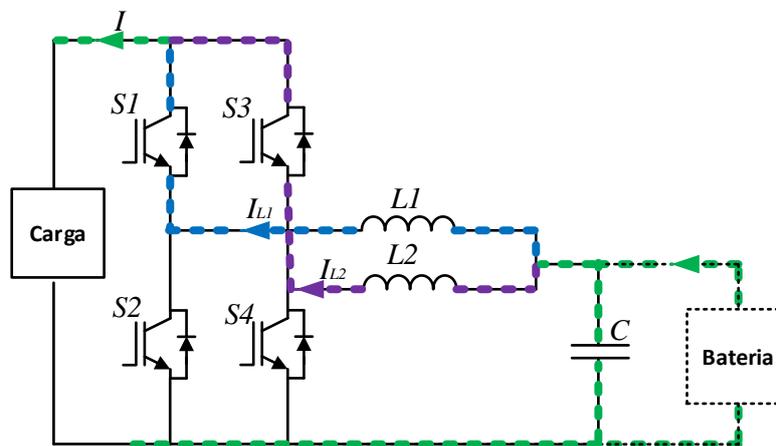


Figura 3.20 – Conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved* em modo *boost*.

Neste modo de operação os semicondutores $S2$ e $S4$ não podem estar ligados ao mesmo tempo, mas sim a comutar entre eles com um desfasamento de 180° . Posto isto na Figura 3.21 é possível analisar o caminho que a corrente percorre no instante em que $S2$ se encontra ligado e $S4$ desligado. Por outro lado, na Figura 3.22 é possível verificar o caso restante em que $S4$ está ligado e $S2$ desligado.

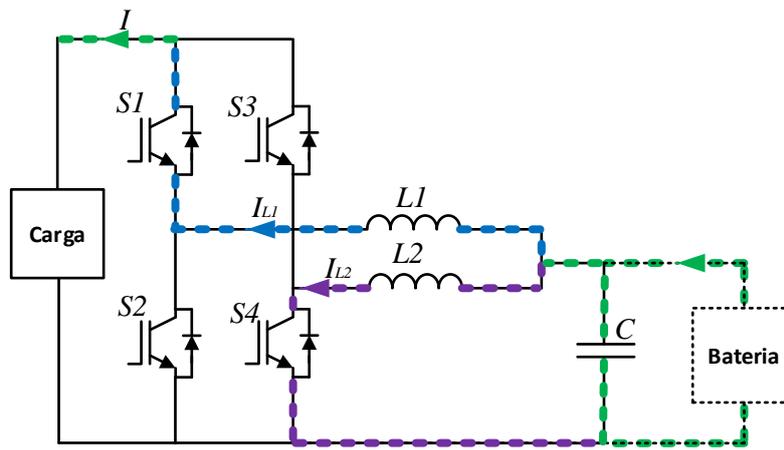


Figura 3.21 – Conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved* em modo *boost* com S2 ligado e S4 desligado.

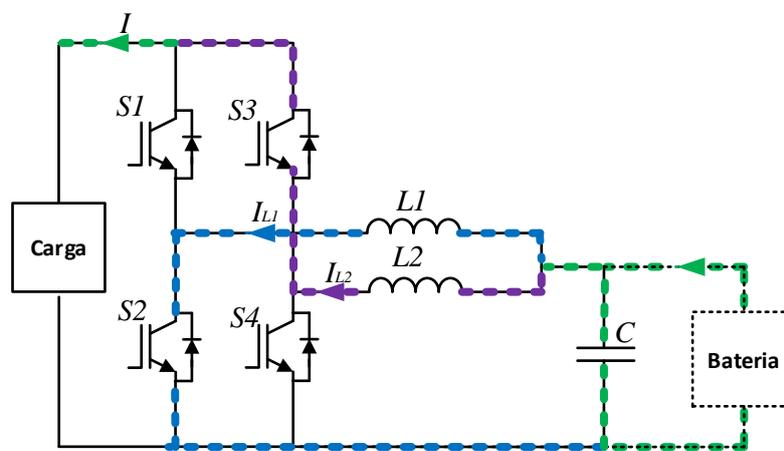


Figura 3.22 – Conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved* em modo *boost* com S4 ligado e S2 desligado.

Também neste modo de funcionamento a corrente na bateria é igual à soma das correntes em cada bobina que se encontram desfasadas 180° como demonstram as Figura 3.23 e Figura 3.24. Porém, neste caso a corrente apresenta um valor negativo por ser no sentido contrário, ou seja da bateria para a carga.

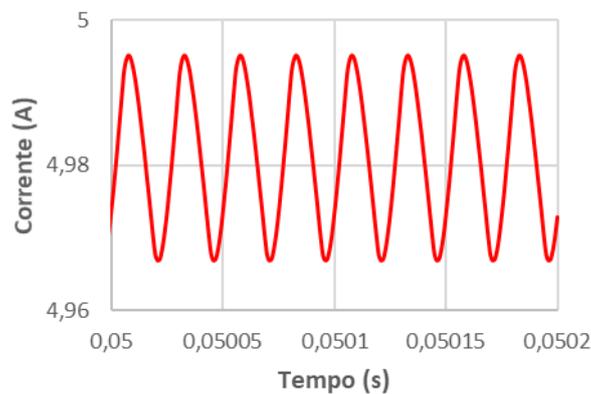


Figura 3.23 – Corrente na bateria com o conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved* a funcionar como *boost*.

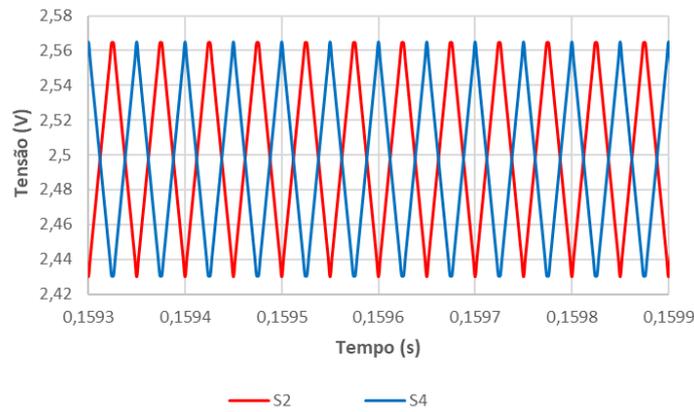


Figura 3.24 – Corrente nas bobinas com o conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved* a funcionar como *boost*.

3.7 Conclusões

Derivado às necessidades anteriormente explicadas, neste capítulo foram estudadas diversas topologias de conversores CC-CC para carregamento e descarregamento de baterias. Posteriormente foram tidos diversos aspetos como o tamanho e custo dos componentes assim como a eficiência do próprio conversor e derivado a isso foi estudado mesmo conversor com topologia *interleaved*.

Devido às características do sistema a implementar, surge a necessidade de utilizar um conversor CC-CC que se comporte como *step-down* na carga, de maneira a baixar a tensão da fonte de alimentação para a bateria, e como um *step-up* na descarga em que é necessário elevar a tensão. Caso esta necessidade seja avaliada de modo independente, pode afirmar-se que as satisfações das premissas das condições de carga podem ser estritamente cumpridas através da utilização de um conversor CC-CC designado por *buck*, enquanto que as condições impostas pelo sistema no período de descarga da bateria podem ser satisfeitas através de uma configuração *boost*.

Em resumo, durante um período de operação como carga é necessário um conversor que baixe a tensão de saída face à da entrada, ao passo que no período de descarga existe a necessidade de elevar a tensão de saída do conversor para além dos valores de entrada. Ambas as situações podem ser satisfeitas através de um único conversor, que possua em simultâneo, características de *step-down* e *step-up*.

Com a conclusão do estudo, o circuito que satisfaz estas condições é designado de conversor *buck-boost* com topologia *interleaved*, que é caracterizado por poder ser utilizado como conversor bidirecional e ainda permitir a redução da corrente suportada pelos semicondutores de potência e bobinas.

Capítulo 4

Simulações Computacionais de um Conversor Bidirecional CC–CC Convencional e com Topologia *Interleaved*

4.1 Introdução

Atualmente, qualquer projeto de desenvolvimento na área de eletrônica de potência requer a utilização de uma ferramenta de simulação computacional. Estas têm como principal objetivo a previsão do comportamento que o sistema/projeto irá ter em determinadas condições. Assim, é possível testar várias topologias, assim como diversos componentes, de modo a verificar qual será mais vantajosa e testar também todo o sistema de modo a ver se funciona corretamente. Com isto, é possível impedir eventuais erros que possam acontecer posteriormente na validação experimental.

Neste capítulo são apresentadas as simulações computacionais, efetuadas na ferramenta *PSIM*, necessárias para a compreensão e estudo do sistema a ser implementado nesta dissertação acerca de um conversor CC-CC *buck-boost* bidirecional com a topologia *interleaved*.

O programa de simulações *PSIM*, desenvolvido pela *Powersim inc.*, contém imensas características necessárias para uma rigorosa simulação, tais como:

- Permite visualizar a evolução das variáveis ao longo do tempo inseridas no sistema;
- Possui uma biblioteca com um vasto número de componentes;
- Contém também sistemas de controlo, alguns dos quais possibilitando o uso de linguagem C de forma a criar os algoritmos necessários para o funcionamento do projeto em questão.

O sistema a ser estudado neste capítulo tem como finalidade a carga/descarga de uma bateria. Consequentemente, este será composto por um conversor CC-CC bidirecional que funciona como *boost* num sentido e como *buck* no sentido inverso. Para o controlo de corrente e tensão em ambos os casos é utilizado o controlo PI através das equações (4.1)(4.2)(4.3)(4.4)(4.5):

$$e = (I_{ref_{bat}} - I_{bat}) \quad (4.1)$$

$$sum_{ec} = sum_{ec} + e \quad (4.2)$$

$$Mp = Kp * e \quad (4.3)$$

$$Mi = Ki * Ts * sum_{ec} \quad (4.4)$$

$$Ref = Mp * Mi \quad (4.5)$$

4.2 Modelo de Simulação do Sistema Bidirecional de Carga e Descarga de uma Bateria de LiFePO₄

Para uma explicação mais detalhada do modelo de simulação desenvolvido com a ferramenta *PSIM*, dividiu-se o modelo em duas partes distintas. Em primeiro lugar é explicada a parte de potência e em segundo a parte de controlo. Na Figura 4.1 e na Figura 4.2 pode visualizar-se a parte de potência do modelo de simulação. Como o objetivo é a implementação de um sistema bidirecional de carga e descarga, foi necessária a escolha de um conversor CC-CC bidirecional. Depois de estudadas várias topologias, a melhor opção foi a utilização de um conversor CC-CC *buck-boost* bidirecional, apresentado na Figura 4.1. Devido a certos aspetos, como a necessidade de reduzir o peso, o tamanho e custo dos componentes de um conversor, assim como também melhorar a sua eficiência, reduzir as perdas nas suas comutações ou o sobreaquecimento destes ao longo do seu funcionamento, surge a necessidade de testar e implementar novas topologias de conversores nesta área. Consequentemente, na Figura 4.2, pode ver-se um conversor CC-CC *buck-boost* bidirecional em que é aplicada uma topologia chamada *interleaved*. Ambos os conversores foram testados e estudados com o objetivo de escolher qual seria o que melhor se adequava às necessidades deste projeto.

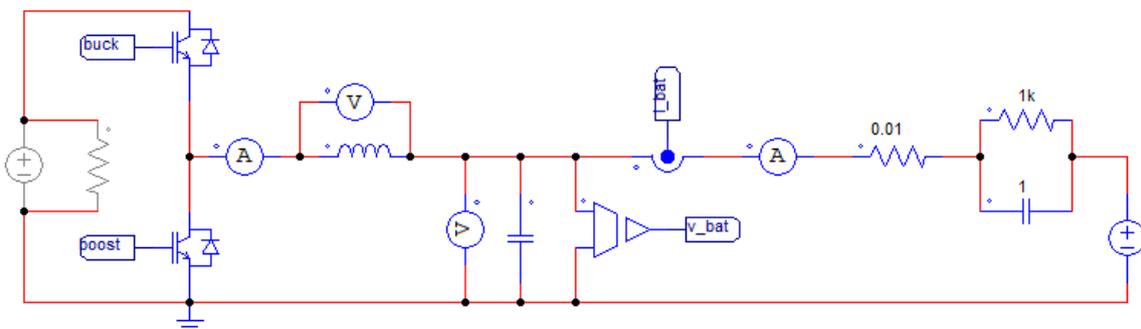


Figura 4.1 – Modelo em *PSIM* do conversor CC-CC *buck-boost*.

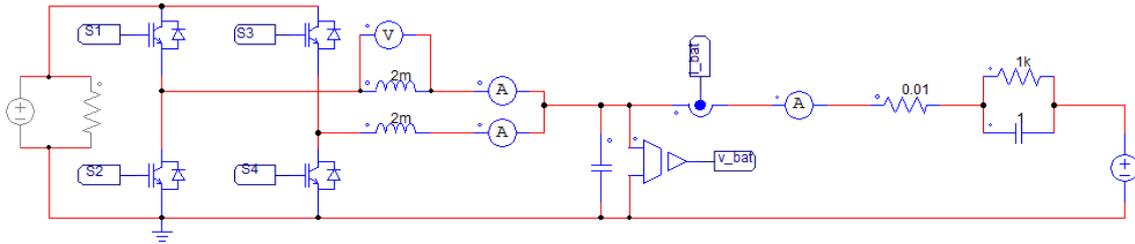


Figura 4.2 – Modelo em *PSIM* do conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved*.

Como a ferramenta de simulação *PSIM* v9.1 não contém nenhum modelo da bateria LiFePO₄, foi necessária a utilização de um modelo equivalente desta mesma. Visto que o seu uso é imprescindível neste tipo de simulação, foi utilizado o seu modelo elétrico de Thévenin. Este permite obter um estudo exigente e prever o comportamento da bateria ao longo dos testes e, portanto, é o que melhor se adequa neste contexto. Na Figura 2.2 é exibido o modelo simplificado de uma bateria LiFePO₄. Este modelo, como já foi referido no estado da arte, é composto por uma fonte de tensão que representa a tensão em circuito aberto da bateria, uma resistência série que representa a resistência interna da bateria e uma malha RC que tem como finalidade emular o comportamento da bateria durante transitórios.

Em segundo lugar pode visualizar-se a parte de controlo. Na Figura 4.3 é possível averiguar uma funcionalidade do *PSIM*, bloco C, que simula o modo de funcionamento do microprocessador utilizado na implementação prática. Este bloco permite a escrita em linguagem C e pode conter várias entradas e saídas.

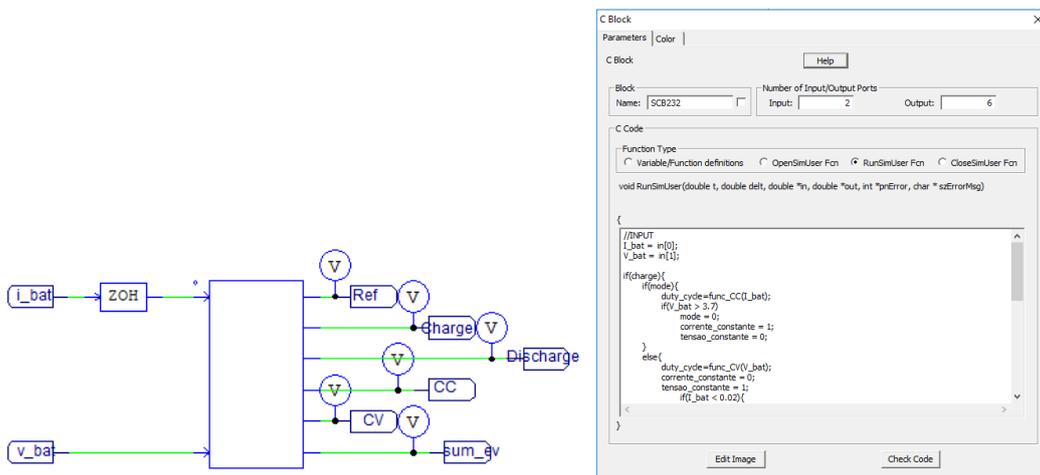


Figura 4.3 – Funcionalidade do bloco C da ferramenta de trabalho *PSIM*.

Na Figura 4.4 estão esquematizados os circuitos de controlo de ambos os conversores CC-CC *buck-boost* simulados, no qual se pode constatar os seus sinais triangulares, comparadores e lógica combinacional de maneira a obter os sinais de PWM para o bom funcionamento dos

Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBTs) do conversor CC-CC *buck-boost* e do conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved*.

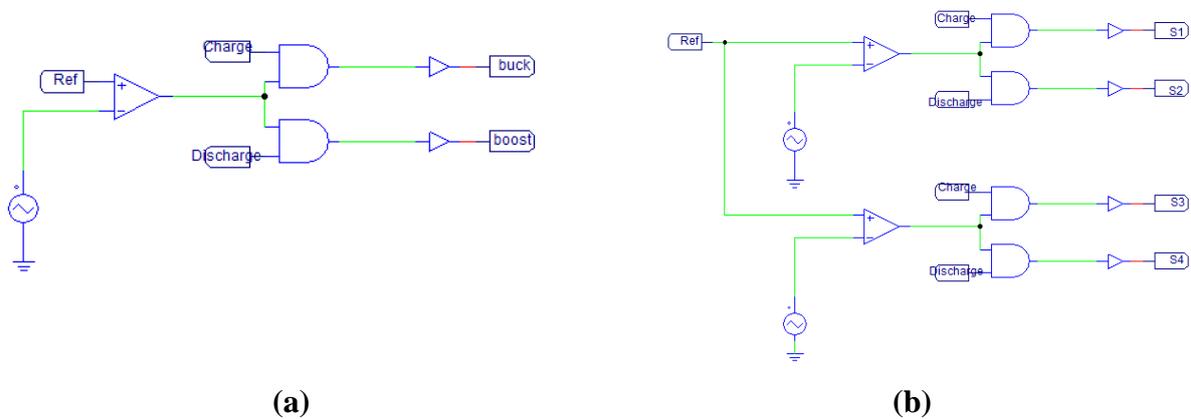


Figura 4.4 – Circuito de controlo: (a) conversor CC-CC *buck-boost* e (b) conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved*.

4.3 Sistema de Controlo Aplicado

O conversor CC-CC utilizado nas simulações é utilizado como interface entre uma fonte de alimentação e uma bateria LiFePO₄ durante o seu carregamento e, na descarga, entre a mesma e uma carga resistiva. De maneira a controlar a intensidade de corrente com que se carrega ou descarrega a bateria é necessária a utilização de uma técnica de controlo. Além disso, esta permite a comutação correta entre os semicondutores na passagem de corrente e determina quais estão ligados e desligados consoante o seu modo de operação. Depois de estudadas as diversas técnicas de controlo de corrente no estado da arte, com base nas necessidades deste projeto, conclui-se que a que melhor se adapta é a técnica de controlo digital PI. Esta técnica foi então implementada em linguagem *C* no bloco *C* do PSIM com uma frequência de amostragem de 40 kHz e uma frequência de comutação de 20 kHz. Esta ferramenta, juntamente com os respetivos comparadores e referências, gera os sinais de PWM necessários para o funcionamento do conversor.

Como cada bateria tem o seu modo de carregamento, verificou-se que a técnica de carga de uma bateria de LiFePO₄ seria o método de corrente constante seguido de tensão constante. Este método é dividido em duas fases. A primeira fase consiste em carregar a bateria com uma fonte de corrente constante até que a tensão limite (em carga) da bateria seja atingida. Numa segunda fase, a tensão mantém-se constante e, à medida que o estado de carga da bateria aumenta, a corrente diminui progressivamente até um determinado valor, a partir do qual se considera que a bateria está totalmente carregada. Posto isto, foram utilizadas duas

técnicas de controlo PI: uma para o estágio de corrente constante, Figura 4.5, e outra para o estágio de tensão constante, Figura 4.6.

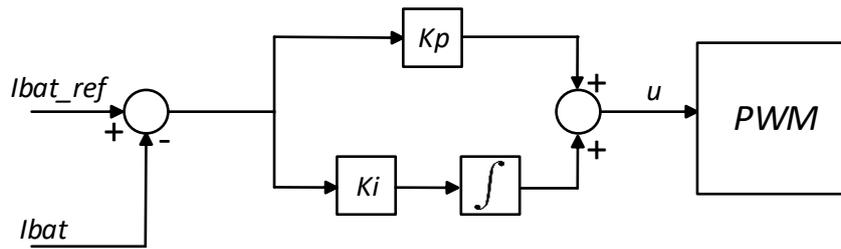


Figura 4.5 – Diagrama de blocos do controlo PI para corrente constante.

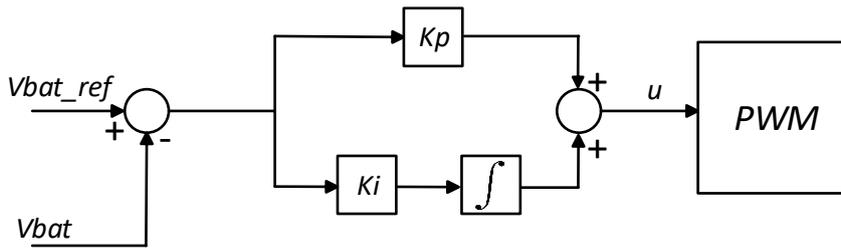


Figura 4.6 – Diagrama de blocos do controlo PI para tensão constante.

4.4 Implementação do Sistema de Controlo Aplicado em *PSIM*

Como referido anteriormente, para a implementação dos algoritmos de controlo foi utilizado um bloco C da ferramenta de trabalho *PSIM*, ilustrado na Figura 4.7.

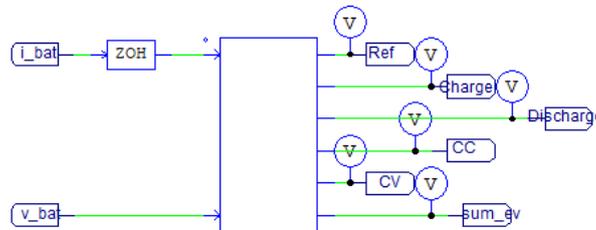


Figura 4.7 – Bloco C implementado na ferramenta *PSIM*.

Este bloco tem como entradas os valores dos sensores de tensão e corrente na bateria e como saídas variáveis que permitem saber se a bateria está a carregar ou descarregar e, no caso de carga, se está na fase de corrente constante ou tensão constante. Os valores dos sensores, após serem lidos, geram um sinal de comando através do controlo PI, que é uma das variáveis de saída. De seguida, o valor desta variável é recebido por um comparador que tem como outra entrada um sinal triangular. Estes sinais são comparados entre si e são gerados os sinais de PWM que acionam os IGBTs, como se pode verificar na Figura 4.8 e na Figura 4.9.

O sistema de controlo referente ao conversor CC-CC *buck-boost* está presente na Figura 4.8. Como se pode verificar, este é muito mais simples que o sistema de controlo do conversor

CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved* ilustrado na Figura 4.9. Isto deve-se ao facto de o conversor com a topologia *interleaved* ter o dobro dos semicondutores e bobinas da topologia convencional. No caso da Figura 4.8, se o conversor atuar como *buck* vai ser gerado um PWM que ativará o semiconductor S_1 e, no caso de *boost*, o semiconductor S_2 . Por outro lado, na Figura 4.9, o conversor com topologia *interleaved* necessita do dobro de sinais de PWM, visto que tem o dobro dos semicondutores. Estes são gerados aos pares, garantindo que no modo *buck* sejam ativados os semicondutores S_1 e S_3 e no modo *boost* S_2 e S_4 . Em ambos os casos os sinais de PWM são gerados com um desfasamento de 180° , garantindo que não se encontram ligados semicondutores do mesmo braço ao mesmo tempo.

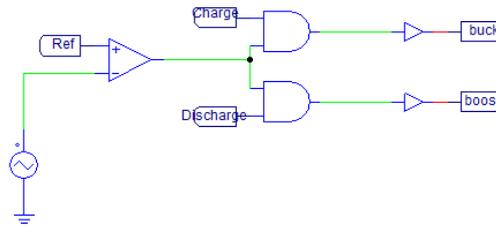


Figura 4.8 – Sistema de controlo do conversor CC-CC *buck-boost*.

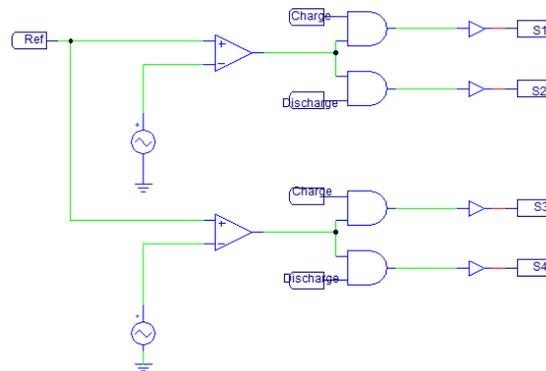


Figura 4.9 - Sistema de controlo do conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved*.

4.5 Simulação do Conversor CC-CC *Buck-Boost* Bidirecional

O conversor CC-CC *buck-boost*, sendo um circuito bidirecional, permite que a energia flua em dois sentidos, sendo uma mais-valia para este projeto visto que é essencial efetuar vários testes de carga e descarga a baterias de LiFePO_4 .

Na Figura 4.10 está apresentado o esquemático do conversor em causa simulado em *PSIM*. Este é constituído por uma fonte de tensão de 10 V, dois IGBTs, uma bobina de 2 mH e um condensador de 30 μF . Relativamente à aquisição de dados, este conversor contém dois sensores, nomeadamente um sensor de tensão e um sensor de corrente. Para este conversor foram simulados os seus dois modos de operação, sendo utilizado o modo *buck* na carga da bateria e o modo *boost* na descarga da mesma. Em ambos os casos foi usada a técnica de

controlo digital PI para o controlo da corrente e da tensão, com uma frequência de comutação fixa de 20 kHz.

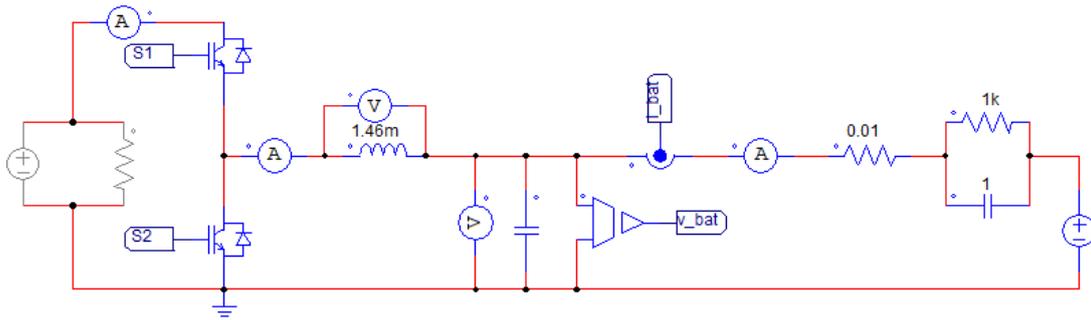


Figura 4.10 – Modelo em *PSIM* do conversor CC-CC *buck-boost*.

4.5.1 Simulação em Modo *Buck*

Nesta simulação, o valor de corrente escolhido foi de 5 A. Através do controlo utilizado, o valor da corrente mantém-se sempre igual ao valor inicial escolhido durante a carga. De seguida, no modo de tensão constante, esta também vai manter-se com o mesmo valor até que a bateria fique totalmente carregada. Neste modo de funcionamento a bateria vai carregar através de uma fonte de alimentação com 10 V e o IGBT ativo é o *S1*, enquanto que o *S2* permanece desligado. Com isto, a corrente vai fluir da fonte para a bateria. A Figura 4.11 constata que o carregamento é efetuado de forma correta, carregando com uma corrente constante até a tensão na bateria atingir 3,7 V, o seu valor máximo de carga, e de seguida a tensão mantém-se constante, pelo que a bateria continua a carregar até a corrente ser nula.

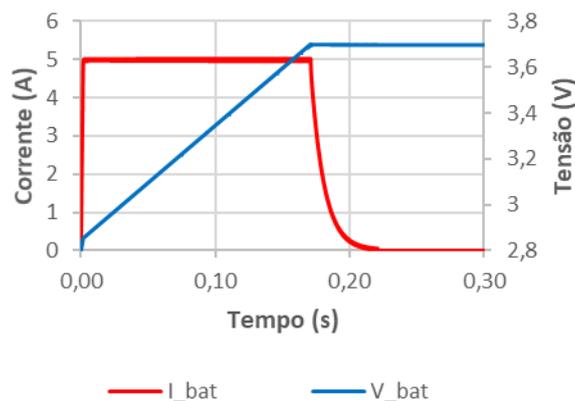


Figura 4.11 – Simulação do carregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A.

Na Figura 4.12 pode observar-se ao pormenor as comutações dos IGBTs *S1* e *S2* ao longo do carregamento da bateria. Como é de esperar, através da observação das comutações dos IGBTs ao longo da carga, apenas *S1* se encontra ligado, enquanto que *S2* permanece sempre desligado.

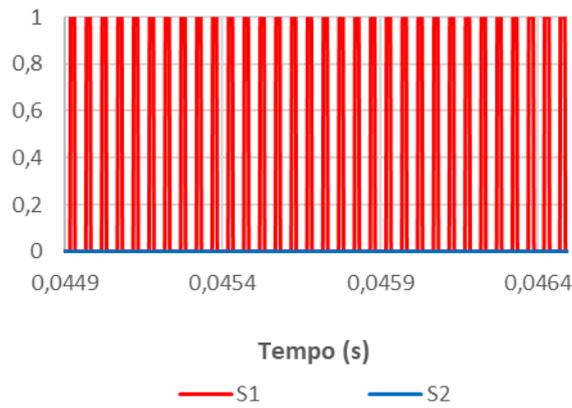


Figura 4.12 – Comutações dos IGBTs em modo *buck* (S_1 e S_2).

De maneira a verificar quais as variáveis que são possíveis de obter com a simulação, a Figura 4.13 atesta que a bateria se encontra no modo de carga ou descarga e, posteriormente, se esta estiver a carregar também é possível identificar quando se encontra com corrente constante e com tensão constante.

Visto que o controlo utilizado é muito importante para o bom funcionamento do conversor, a Figura 4.14 permite estudar o comportamento da variável de controlo de corrente, i.e., a saída do controlador PI e, de seguida, de tensão ao longo do tempo com o intuito de perceber se a carga está a ser efetuada corretamente.

Através da Figura 4.14 é perceptível que o controlo funciona de maneira correta, visto que este nunca satura nem possui oscilações significativas. Por outro lado, também é nítido quando o controlo passa de corrente constante para tensão constante. Para demonstrar que com esta simulação é possível usar qualquer valor de corrente, na Figura 4.15 é usada uma corrente quatro vezes maior que a anterior, de valor 20 A. Como se pode observar, o tempo de carregamento da bateria é muito menor, visto que a escala de tempo utilizada foi a mesma.

Relativamente aos componentes que constituem o conversor, é possível averiguar na Figura 4.16 que o *ripple* da corrente aumenta com a diminuição do valor de indutância da bobina. Ou seja, quanto maior o seu valor, menor vai ser o seu *ripple*. Esta simulação foi obtida com uma bobina de 0,667 mH, um terço do valor utilizado nas simulações anteriores. Porém, consegue-se diminuir este valor de *ripple* através dos ajustes dos ganhos do controlo PI ou através do aumento do valor do filtro capacitivo, bem como através do aumento da frequência de comutação aplicada aos IGBTs.

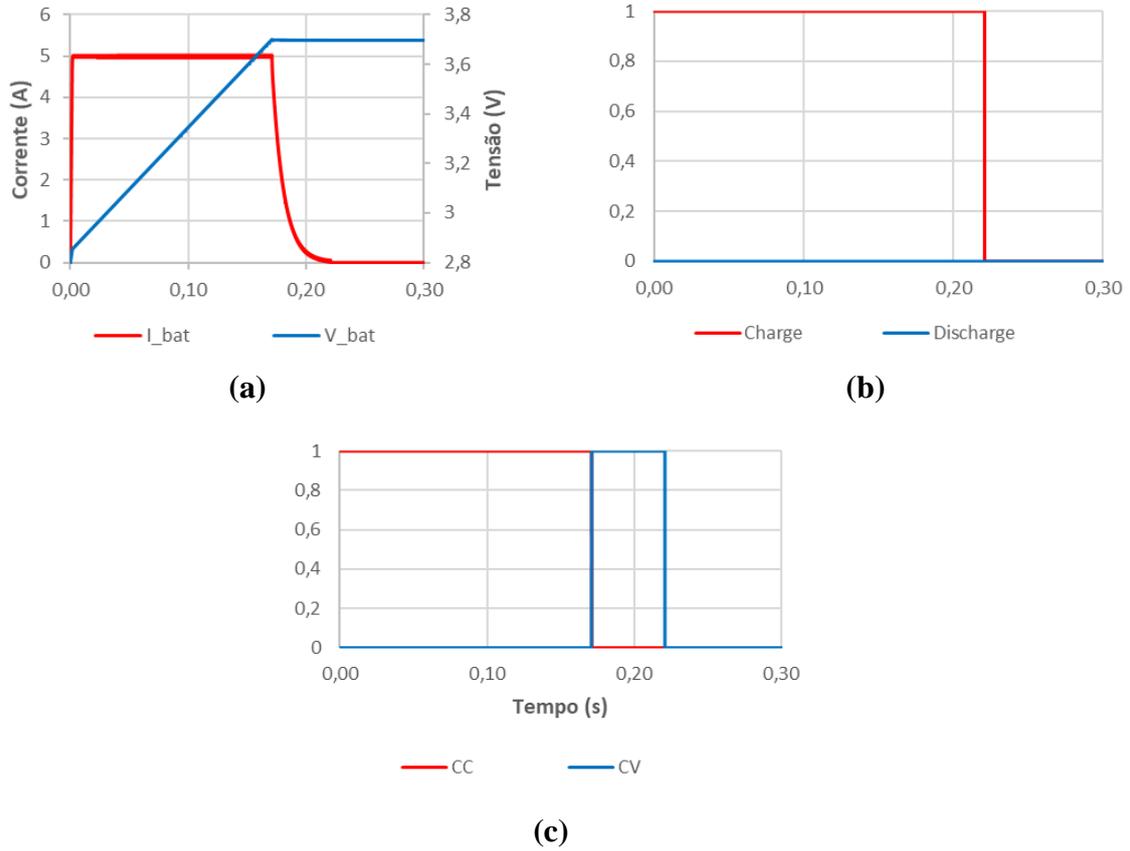


Figura 4.13 – Variáveis de saída ao longo de uma simulação do carregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A: (a) tensão e corrente na carga; (b) variável de carga e descarga; (c) variável de corrente e tensão constante.

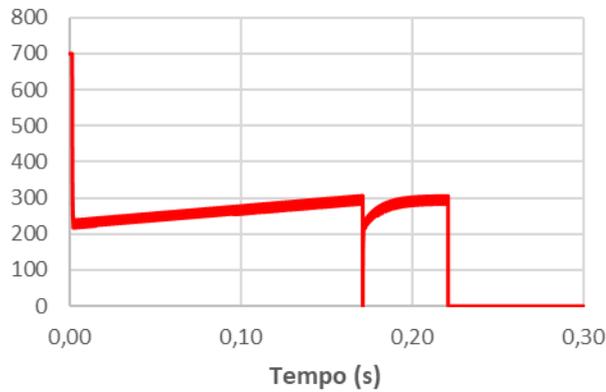


Figura 4.14 – Variável de controlo de corrente e, posteriormente, de tensão.

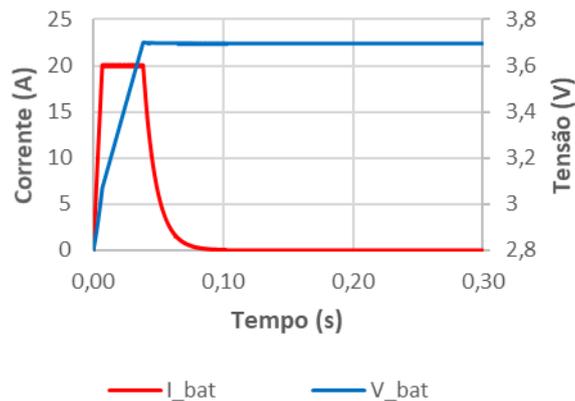


Figura 4.15 – Carregamento da bateria com uma corrente de 20 A.

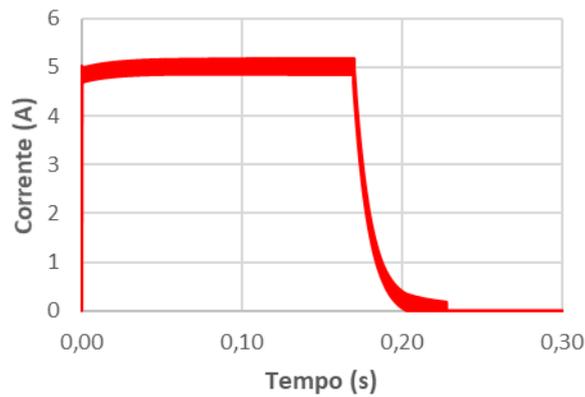


Figura 4.16 – Simulação do carregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A, sendo $L=0,667$ mH e $C=30$ μ F.

Por outro lado, através da Figura 4.17 apura-se que o *ripple* da corrente melhora um pouco com o valor anterior da bobina, mas substituindo o valor do condensador para o dobro (60 μ F).

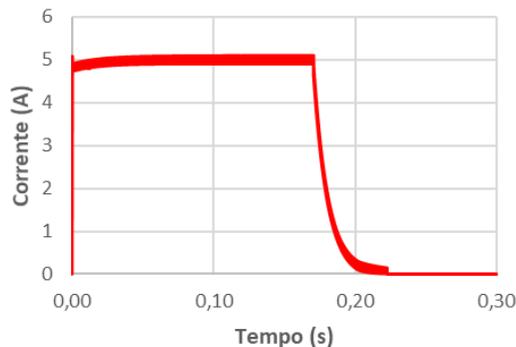


Figura 4.17 – Simulação do carregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A, sendo $L=0,667$ mH e $C=60$ μ F.

4.5.2 Simulação em Modo *Boost*

Este modo de funcionamento simula a descarga da bateria. Consequentemente, o IGBT que se encontra a comutar é o $S2$, enquanto que o $S1$ se encontra desligado e, ao contrário do modo *buck*, a corrente flui da bateria para uma carga. Mais uma vez é previamente escolhido o valor da corrente, que neste caso foi igual a 5 A. Através do controlo PI, esta vai manter-se inalterável durante toda a descarga. Porém, é necessário ter em atenção um fenómeno que ocorre neste circuito no modo de funcionamento *boost*. Esta situação deriva do facto de que a partir do momento em que se liga uma carga resistiva ao circuito, este fica imediatamente a conduzir corrente, mesmo com o controlo dos IGBTs desligado. Tal acontece devido à ocorrência da passagem de corrente através do diodo que se encontra em paralelo com o IGBT $S1$. A próxima simulação demonstra que embora com ambos os IGBTs desligados, existe uma corrente no circuito como se observa na Figura 4.18. O valor dessa corrente vai depender exclusivamente do valor da resistência e do valor da tensão aos terminais da bateria.

Consequentemente, através da lei de Ohm é possível determinar a corrente que passará no circuito.

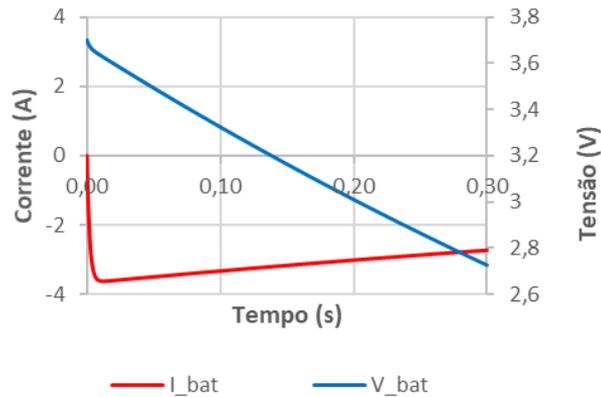


Figura 4.18 – Simulação do descarregamento de uma bateria com o método de resistência constante.

De modo a perceber o valor de corrente inicial que passa na bateria é efetuada a lei de Ohm com os valores reais. Nesta simulação foi assumido que a bateria estava carregada, logo possuía uma tensão aos seus terminais de 3,7 V. Ao ser utilizada uma carga de 1 Ω , através da equação (4.6) é possível calcular a corrente:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{3,7}{1} = 3,7 \text{ A} \quad (4.6)$$

Como se pode observar na simulação anterior, este é o valor inicial da corrente de descarga. Estudado este caso, é necessário perceber o porquê de durante o processo de descarga a corrente diminuir e não se manter constante. Ao longo do estado da arte foram também estudados os métodos de descarga de baterias. Após finalizado esse estudo, é perceptível que neste caso se encontra aplicado o método de descarga através de resistência constante. Neste método é aplicada uma corrente inicial, porém, este valor vai diminuir consoante a diminuição do valor da tensão aos terminais da bateria. Tal feito deve-se ao facto de não ser aplicado nenhum controlo, pois ambos os IGBTs estão desligados.

O trabalho desta dissertação baseia-se num sistema de carga e descarga de baterias, logo optou-se por aplicar outro método de descarga, corrente constante, através de um controlo PI que permite aplicar diferentes valores constantes de corrente de modo a obter um processo de descarga mais rápido ou mais lento. Posto isto, na Figura 4.19 verifica-se que a descarga se efetua da forma esperada, ou seja, a bateria vai descarregar com uma corrente constante até atingir o seu nível de tensão mínimo de 2,8 V.

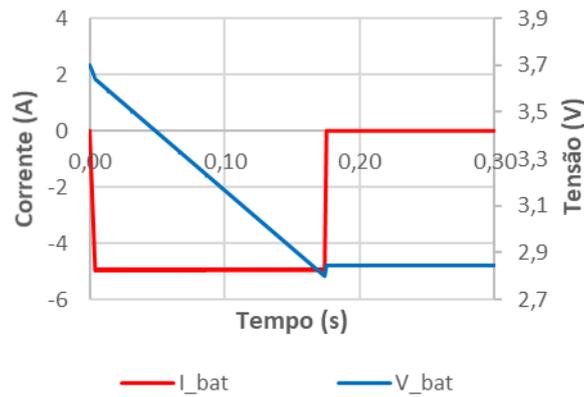


Figura 4.19 – Simulação do descarregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A.

Na Figura 4.20 pode observar-se a comutação do IGBT S_2 durante o processo de descarga.

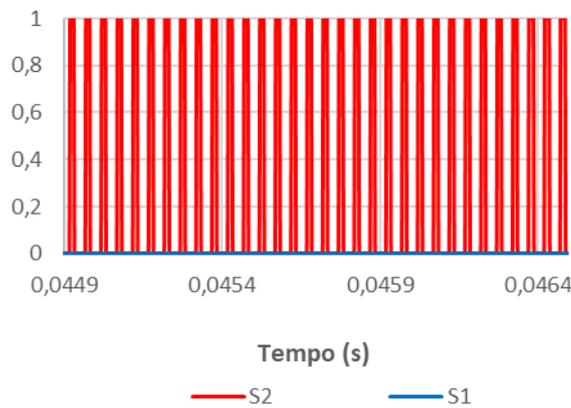


Figura 4.20 – Comutações dos IGBTs em modo *boost* (S_1 e S_2).

Como era de esperar, no caso de o conversor atuar como *boost*, a atuação dos IGBTs vai ser contrária ao do modo *buck*, sendo que neste caso S_2 se encontra ligado e S_1 desligado. Como explicado anteriormente, também foi estudada a variável de controlo de corrente ao longo da descarga da bateria, sendo que esta pode ser observada através da Figura 4.21.

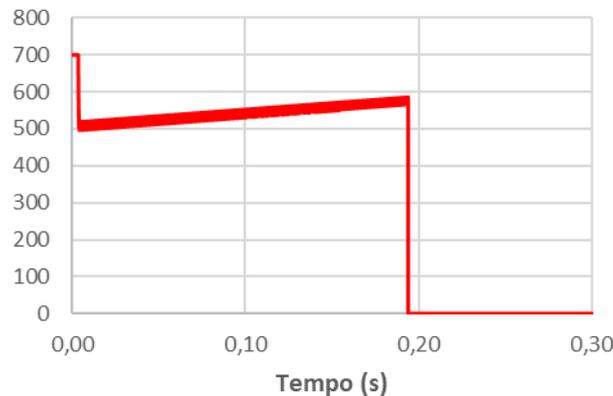


Figura 4.21 – Variável de controlo de corrente constante.

Através da análise da figura anterior verifica-se que o comportamento desta variável na descarga vai ser idêntico ao comportamento da mesma no caso de corrente constante no modo *buck*, visto que o controlo PI é o mesmo e os ganhos K_p e K_i contêm valores idênticos. Para

demonstrar as variáveis de saída que é possível obter com a simulação, a Figura 4.22 ilustra se a bateria se encontra no modo de carga ou descarga.

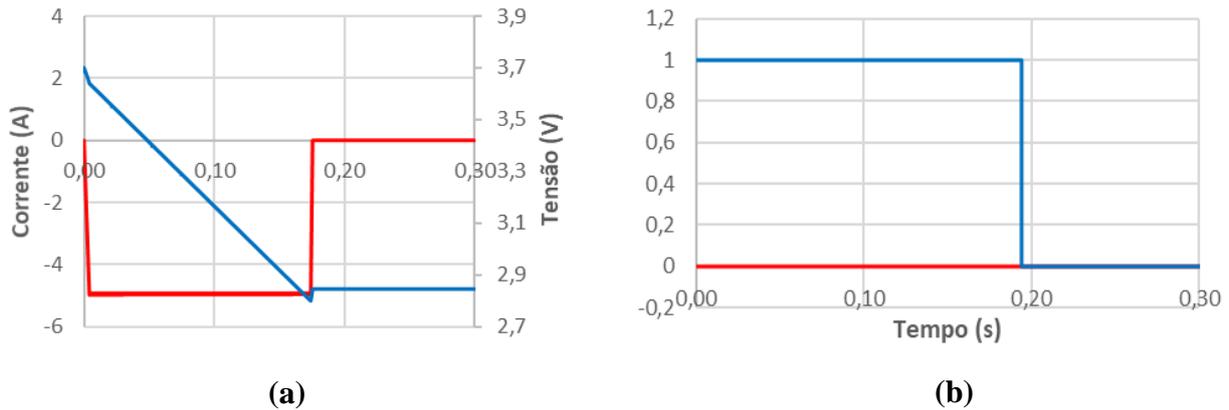


Figura 4.22 – Variáveis de saída ao longo de uma simulação do descarregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A: (a) tensão e corrente na descarga; (b) variável de carga e descarga.

De seguida, é apresentada na Figura 4.23 uma simulação com uma corrente três vezes maior que a anterior, de valor 15 A. Como expectável, o tempo de descarga da bateria é muito menor.

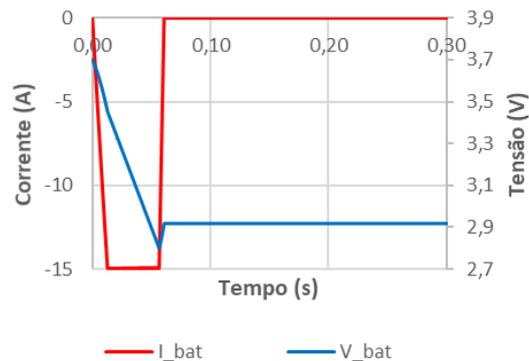


Figura 4.23 – Simulação do descarregamento de uma bateria com uma corrente de 15 A.

No modo *boost* foi também simulada a descarga com diferentes valores dos componentes do conversor de maneira a perceber a influência de cada um. Consequentemente, através da Figura 4.24 é possível identificar que o *ripple* da corrente vai aumentar com a diminuição do valor de indutância da bobina, tal como aconteceu na simulação no modo *buck*. Com isto pode tirar-se as mesmas conclusões, ou seja, ao diminuir o valor da bobina o *ripple* da corrente irá aumentar. Esta simulação foi obtida com uma bobina de 0,667 mH, um terço do valor utilizado nas simulações anteriores. Para além de modificar o valor da bobina, também é possível diminuir o valor de *ripple* através dos ajustes dos ganhos do controlo PI ou através do aumento do valor do filtro capacitivo, bem como pelo aumento da frequência de comutação dos IGBTs.

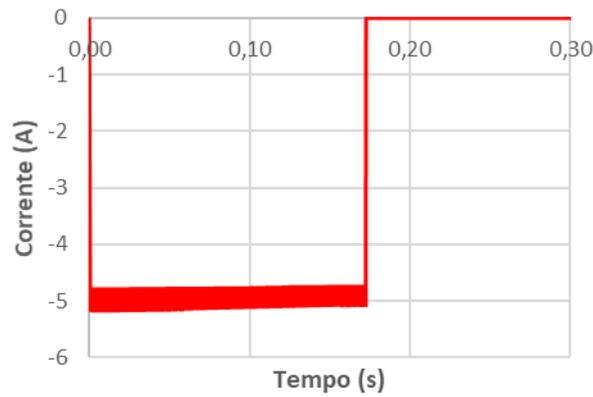


Figura 4.24 – Simulação do descarregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A, sendo $L=0,667$ mH e $C=30$ μ F.

De maneira a testar o efeito da alteração do valor do condensador, foi realizado posteriormente um teste com um condensador de 60 μ F, constatando-se que o *ripple* melhora um pouco, como mostra a Figura 4.25.

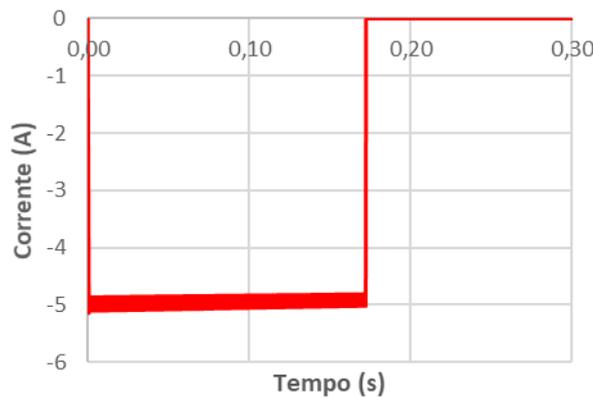


Figura 4.25 – Simulação do descarregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A, sendo $L=0,667$ mH e $C=60$ μ F.

Como esperado, aumentando o valor do condensador o valor do *ripple* vai melhorar um pouco. Após finalizar o estudo do comportamento do *ripple*, através de simulações com diferentes valores de componentes constituintes do conversor, conclui-se que o valor do *ripple* muda consoante os valores capacitivos e indutivos utilizados, de modo que não serão efetuados estes testes com o conversor CC-CC *buck-boost* com configuração *interleaved*, visto que os resultados serão os mesmos.

4.6 Simulação do Conversor CC-CC *Buck-Boost* Bidirecional com Configuração *Interleaved*

Este conversor consiste basicamente em ter dois conversores *buck-boost* bidirecionais em paralelo, passando assim a ser constituído por quatro semicondutores e duas bobinas. Consequentemente, o valor da corrente que passa em cada bobina será metade do valor presente na bateria. Visto que este conversor é requerido para o mesmo efeito que o anterior,

os testes de seguida apresentados serão os mesmos utilizados no conversor com a topologia convencional de maneira a entender melhor o seu funcionamento. Na Figura 4.26 pode ver-se o esquemático do conversor simulado em *PSIM*. Este é igualmente constituído por uma fonte de tensão contínua de 10 V, quatro IGBTs, duas bobinas de 2 mH e um condensador de 30 μ F. A aquisição de dados deste circuito é composta por dois sensores, um de tensão e outro de corrente, ambos presentes na bateria. Assim como o conversor anterior, este foi simulado em dois modos de operação, nomeadamente o modo *buck* na carga da bateria e o modo *boost* na descarga da mesma. Ambos foram simulados com a técnica de controlo digital PI para o controlo de corrente e tensão com uma frequência de comutação fixa de 20 kHz.

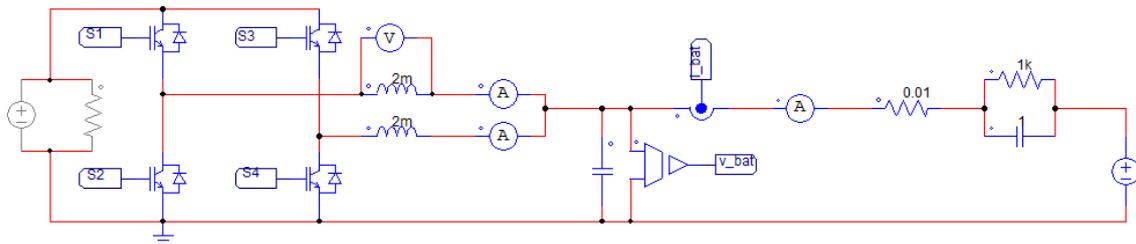


Figura 4.26 – Modelo em *PSIM* do conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved*.

4.6.1 Simulação em Modo *Buck*

Para esta simulação foi escolhido como valor de corrente de carga de 5 A. Com a topologia *interleaved* a corrente é dividida em metade pelas duas bobinas, ou seja 2,5 A, resultando assim no total de 5 A na bateria. Como verificado anteriormente, através do controlo PI é possível manter o valor da corrente (e posteriormente tensão) constante ao longo do tempo. Para que este conversor funcione corretamente como *buck*, os IGBTs *S1* e *S3* terão de estar ativos enquanto que *S2* e *S4* terão de estar desativados. A fonte de alimentação utilizada para carregar a bateria tem 10 V. Na Figura 4.27 pode-se ver que o carregamento é feito de maneira similar ao conversor CC-CC *buck-boost* convencional, visto que a técnica de carregamento da bateria utilizada foi a mesma.

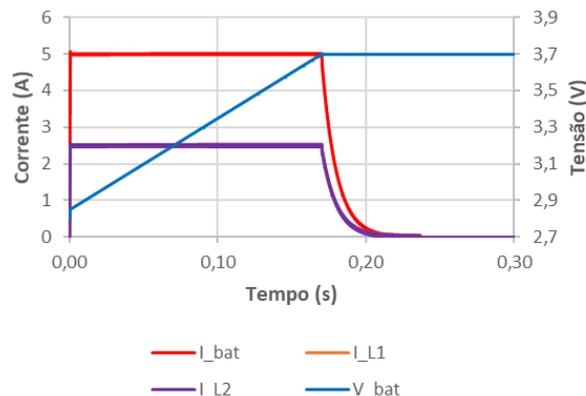


Figura 4.27 – Simulação do carregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A na bateria e 2,5 A em cada bobina.

Como esperado, as correntes nas bobinas encontram-se desfasadas 180° e possuem um valor médio de 2,5 A, como se pode analisar na Figura 4.28.

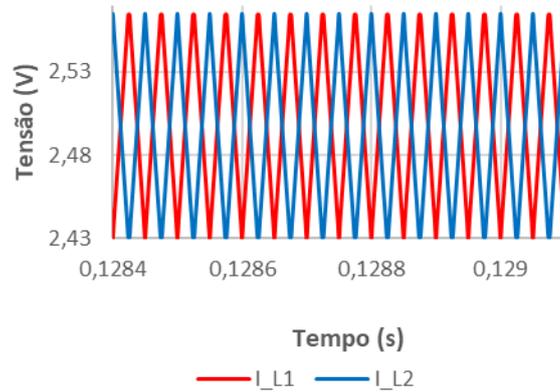


Figura 4.28 – Simulação do carregamento de uma bateria com uma corrente 2,5 A em cada bobina com um desfasamento entre si de 180°.

Devido ao desfasamento de 180° na condução dos semicondutores $S1$ e $S3$ e do filtro capacitivo, o *ripple* da corrente na bateria é menor. Ao longo de uma carga, através da Figura 4.29 é possível ilustrar em pormenor as comutações dos IGBTs $S1$ e $S3$.

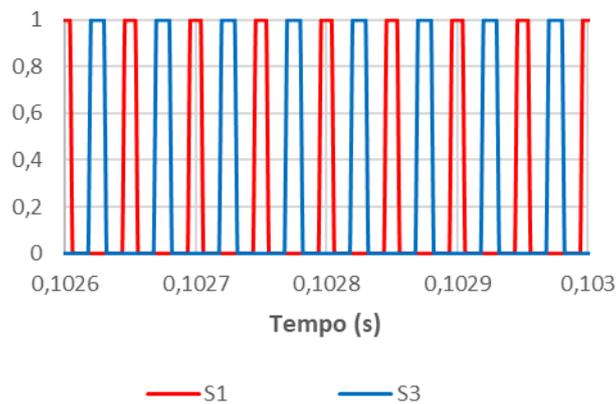


Figura 4.29 – Comutações dos IGBTs em modo *buck* ($S1$ e $S3$).

Através da análise da figura anterior pode concluir-se que, ao atuar como *buck*, este conversor apenas terá ligados os IGBTs $S1$ e $S3$. Consequentemente, $S2$ e $S4$ encontram-se desligados. No que diz respeito ao controlo no modo de carregamento de baterias, a Figura 4.30 demonstra o comportamento da variável de controlo como corrente constante-tensão constante. Desta maneira, pode concluir-se que o comportamento é semelhante ao conversor CC-CC *buck-boost* convencional.

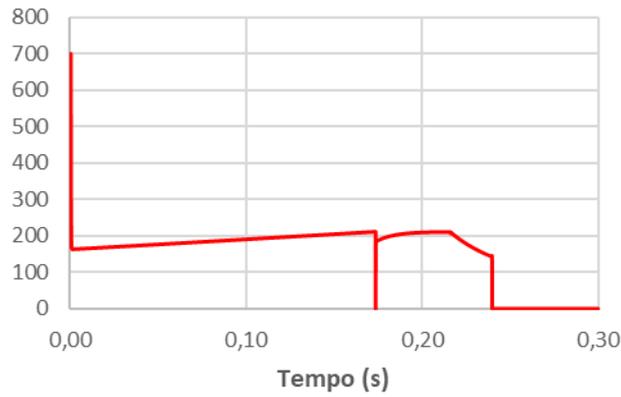


Figura 4.30 – Variável de controle de corrente e, posteriormente, de tensão.

Como na simulação do conversor anterior, é possível constatar-se através da Figura 4.31 se a bateria se encontra no modo de carga ou descarga e, no caso de carga, identificar quando atua com corrente constante ou tensão constante na carga.

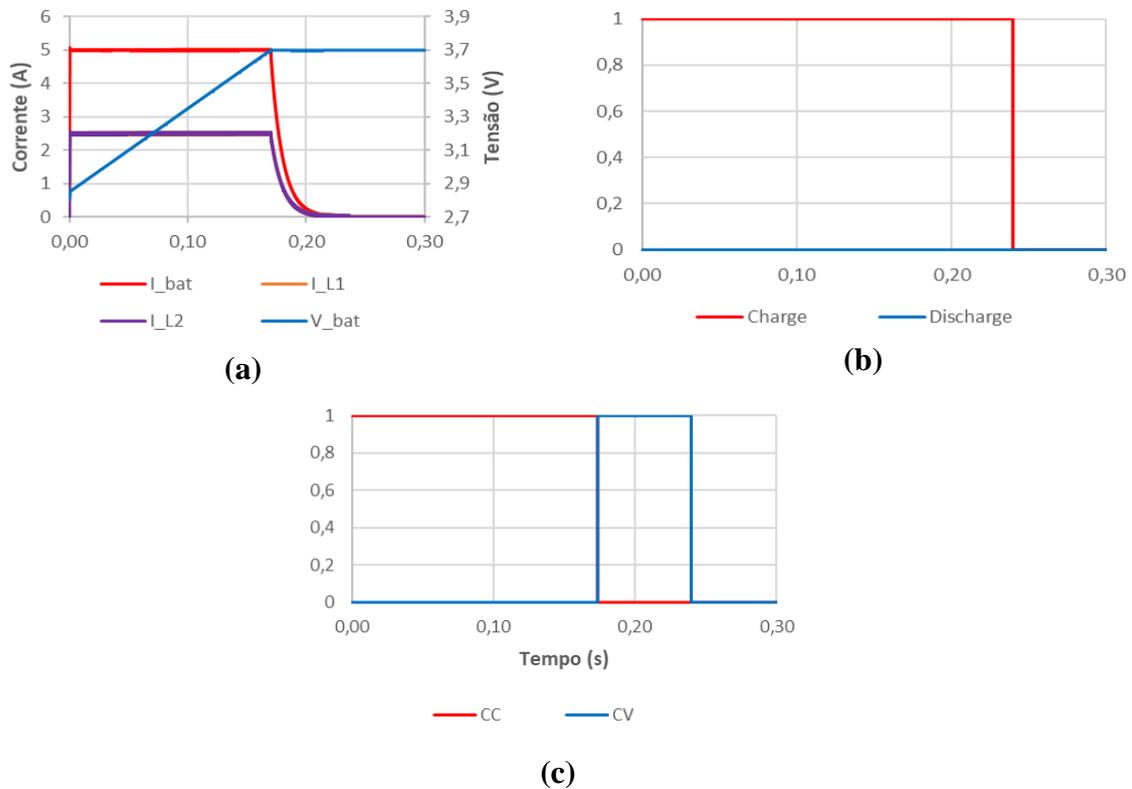


Figura 4.31 – Variáveis de saída ao longo de uma simulação do carregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A: (a) tensão e corrente na carga; (b) variáveis de carga e descarga; (c) variáveis de corrente e tensão constante.

De modo a demonstrar que esta simulação pode usar qualquer valor de corrente, na Figura 4.32 é usada uma corrente com o valor de 2,5 A. Como se pode examinar, o tempo de carregamento da bateria é bastante maior.

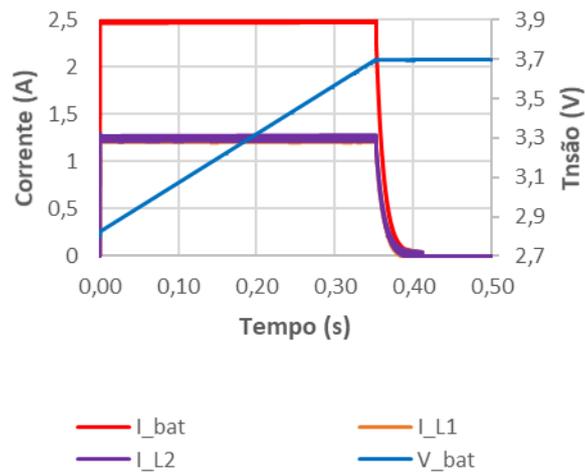


Figura 4.32 – Simulação do carregamento de uma bateria com uma corrente de 2,5 A na bateria e 1,25 A em cada bobina.

4.6.2 Simulação em Modo *Boost*

Neste modo de funcionamento, com a topologia *interleaved* vai acontecer exatamente o mesmo que foi explicado no modo *boost* com a topologia convencional. O único aspeto diferente é que a corrente na bateria vai ser dividida em metade pelas duas bobinas devido à condução dos IGBTs *S2* e *S4* e respetivos díodos em paralelo dos IGBTs *S1* e *S3*. Na Figura 4.33 é possível observar o sucedido.



Figura 4.33 Simulação do descarregamento de uma bateria com o método resistência constante.

Verificado este caso, são ligados os IGBTs *S2* e *S4* e a bateria começa a descarregar com uma corrente constante de 5 A. Na Figura 4.34 é possível apurar que a descarga se efetua da maneira esperada, ou seja, a bateria vai descarregar com uma corrente constante até atingir o seu nível de tensão mínimo de 2,8 V.

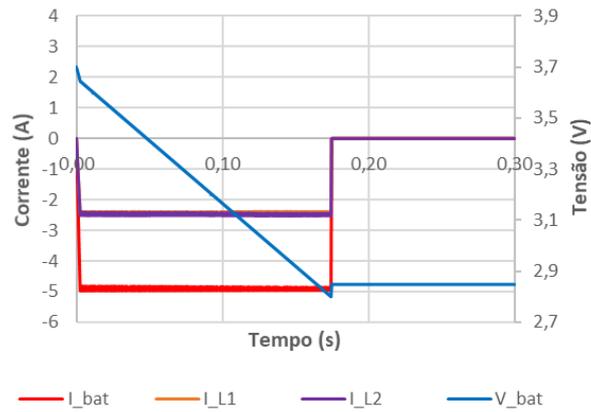


Figura 4.34 – Simulação do descarregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A na bateria e 2,5 A em cada bobina.

Como esperado, as correntes nas bobinas encontram-se desfasadas 180° e possuem um valor médio de 2,5 A, como se confirma na Figura 4.35.

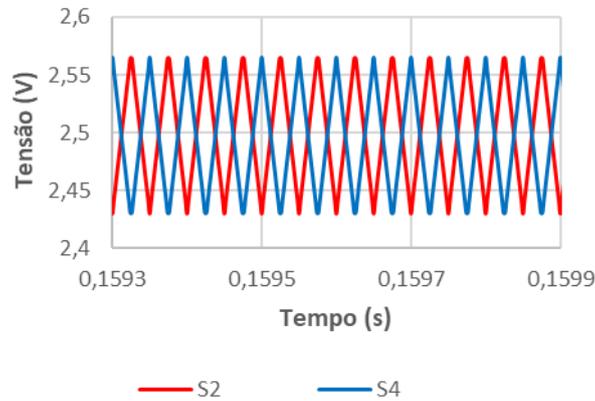


Figura 4.35 – Simulação do descarregamento de uma bateria com uma corrente 2,5 A em cada bobina com um desfasamento entre si de 180°.

Ao longo de uma descarga, através da Figura 4.36 é possível observar a comutação dos IGBTs *S2* e *S4* enquanto que *S1* e *S3* estão desligados.

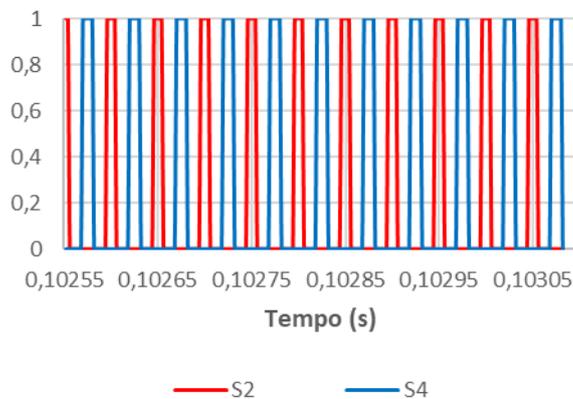


Figura 4.36 – Comutações dos IGBTs em modo *boost* (*S2* e *S4*).

No que diz respeito ao controlo no modo de descarregamento de baterias, a Figura 4.37 demonstra o comportamento da variável de controlo como corrente constante. Desta maneira

pode-se concluir que o comportamento é igual ao conversor CC-CC *buck-boost* convencional no modo *boost*.

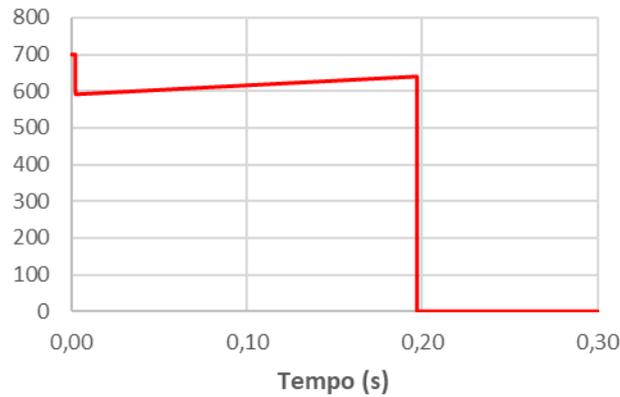


Figura 4.37 – Variável de controlo de corrente.

De maneira a indicar as variáveis que são possíveis obter com a simulação, através da Figura 4.38 é perceptível se a bateria se encontra no modo de carga ou descarga.

À semelhança dos casos anteriores, é efetuada uma simulação de descarga na Figura 4.39 com uma corrente duas vezes maior que a anterior, de valor 10 A. Como se pode observar, o tempo de descarga da bateria é menor.

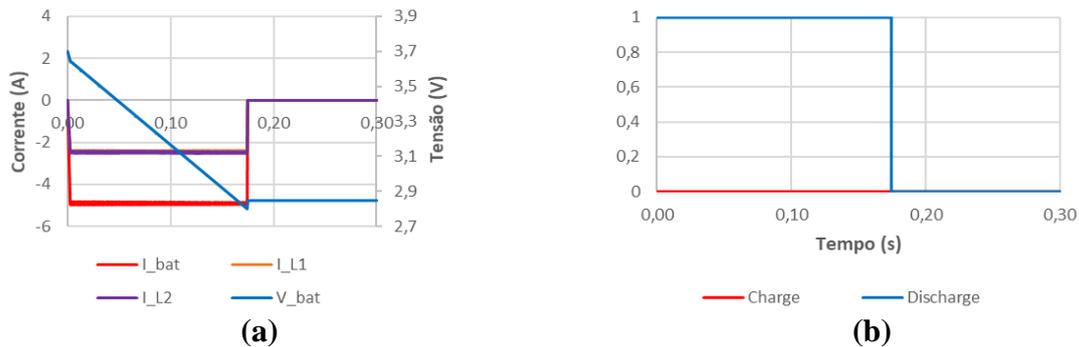


Figura 4.38 – Variáveis de saída ao longo de uma simulação do descarregamento de uma bateria com uma corrente de 5 A na bateria e 2,5 A em cada bobina: (a) valor da tensão e correntes na descarga; (b) variáveis de carga e descarga.

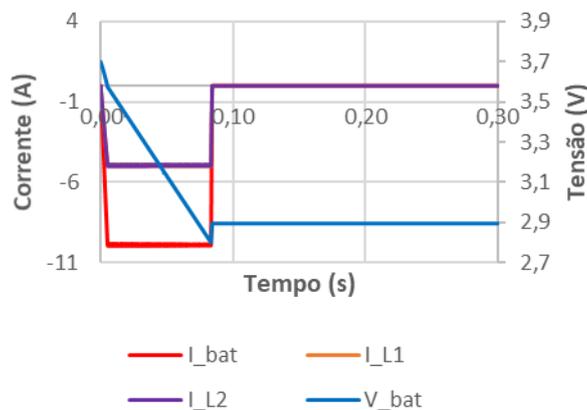


Figura 4.39 – Simulação do descarregamento de uma bateria com uma corrente de 10 A na bateria e 5 A em cada bobina.

4.7 Conclusões

No presente capítulo foi abordada uma breve descrição do programa de simulação computacional *PSIM*, onde foram simulados os diversos circuitos. Deste modo, foram simuladas duas topologias de conversores CC-CC: *buck-boost* e *buck-boost* com topologia *interleaved* e o sistema de controlo referente a cada uma, que tanto permite a escolha do valor da corrente a carregar e descarregar como também gera os sinais de PWM necessários para o funcionamento dos mesmos. A implementação destes conversores em ambiente de simulação permite o estudo e uma melhor compreensão de como funciona o sistema completo. Deste modo, consegue perceber-se como os conversores, a bateria e o sistema de controlo interagem entre si de maneira ao projeto funcionar na prática, prevenindo assim alguns erros que poderiam acontecer.

As simulações dos diferentes conversores em estudo presentes neste capítulo tiveram como objetivo a validação das mesmas, assim como o sistema de controlo escolhido. Durante estas simulações foram estudados os seus dois modos de funcionamento, o modo *buck* e o modo *boost*. Com a ajuda do modelo utilizado para simular a bateria, ambos os conversores apresentaram ser boas escolhas no que diz respeito a este tipo de projetos, pois os resultados que apresentaram foram de encontro com o esperado. Pôde-se verificar que também em ambos os conversores a bateria era carregada e descarregada da forma correta. Através destas simulações consegue-se também entender um pouco melhor os conversores utilizados.

Com as simulações finalizadas foi possível perceber que no conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved* o *ripple* da corrente na bateria é menor que no conversor CC-CC *buck-boost* convencional, o que permite efetuar a carga e descarga das baterias de uma forma mais rigorosa. Por outro lado, o sistema de controlo na topologia *interleaved* é um pouco mais complexo que a convencional, visto ter que controlar o dobro dos semicondutores. No entanto, o seu controlo continua a ser do mesmo grau de dificuldade que a topologia convencional, visto ser apenas necessário duplicar as referências, desfasando-as 180°.

Em suma, apesar de ambos terem um bom funcionamento e comportarem-se da maneira prevista, conclui-se que o conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved* é a escolha mais indicada no que diz respeito ao conversor CC-CC usado para a realização de testes de carga e descarga a baterias de LiFePO₄.

Capítulo 5

Implementação de um Sistema Bidirecional de Carga e Descarga de Baterias LiFePO₄

5.1 Introdução

Neste capítulo é descrito a implementação do sistema bidirecional de carga e descarga de baterias LiFePO₄. A implementação deste sistema pode ser dividida em três partes: parte de controlo, parte de potência e aplicação com interface gráfica. Na parte referente ao sistema de controlo são apresentados a placa de condicionamento de sinal, comando e proteção que foi desenvolvida para este projeto, os sensores utilizados, as placas de *driver* já existente no Grupo de Eletrónica de Potência e Energia (GEPE) da Universidade do Minho e o microcontrolador utilizado. De seguida, no que diz respeito ao sistema de potência, é apresentada a topologia do conversor CC-CC bidirecional *buck-boost* com configuração *interleaved*, assim como uma descrição dos componentes que o constituem. Para finalizar, será explicado como é efetuada a aquisição de dados em tempo real e como funciona a aplicação desenvolvida com interface gráfica criada. Na Figura 5.1 é exposto um esquema de forma a compreender o sistema total.

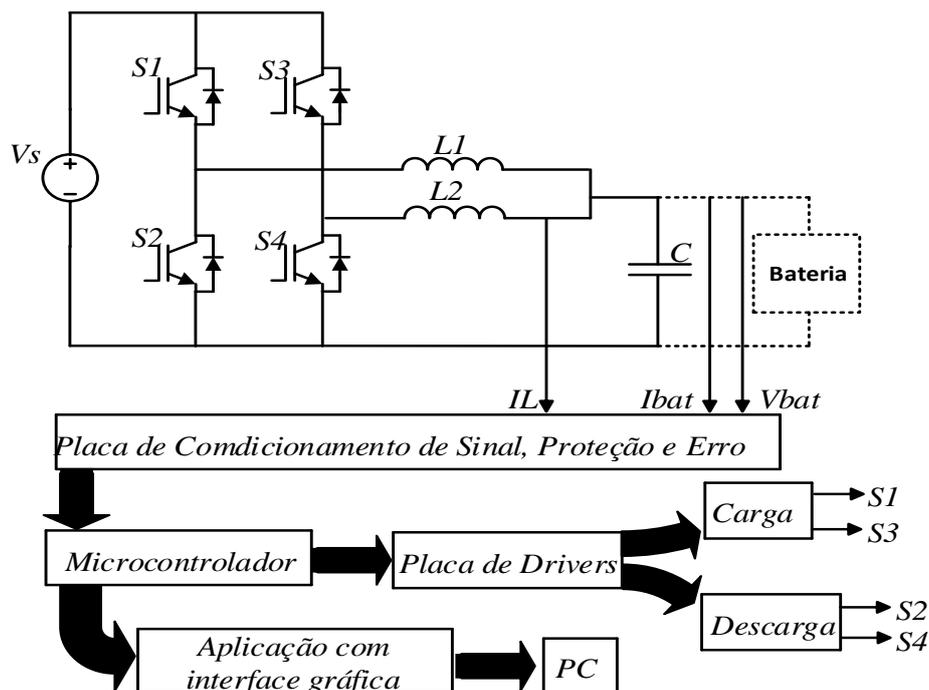


Figura 5.1 – Diagrama de blocos do sistema de carga/descarga implementado.

5.2 Integração do Sistema

O circuito de potência, que se baseia num conversor *buck-boost* com configuração *interleaved*, permite efetuar diferentes cargas e descargas a uma bateria através dos seus dois modos de funcionamento: *buck* e *boost*. Inicialmente, o valor da corrente e da tensão aos terminais da bateria são adquiridos por dois sensores e, para além desses, são usados mais dois sensores com o intuito de medir a temperatura ambiente e a temperatura na bateria. Posteriormente, os dados são enviados para o *Analogue to Digital Convertors* (ADCs) presentes no DSP através da placa de condicionamento de sinal que até serem enviados para o mesmo passam por um circuito de condicionamento de sinal de maneira a adaptar a gama de valores para um intervalo apropriado. De seguida, existem circuitos de deteção de erros que permitem ao sistema operar apenas dentro das gamas estabelecidas, caso contrário o sistema desliga-se. Para além disso, existe ainda uma caixa exterior à placa que contém um botão de pressão de *reset* e um botão *on/off* de *enable*, um referente ao erro e outro ao *enable*. Deste modo, se não existir nenhum erro, os dados são adquiridos pelo microcontrolador que enviará os sinais de PWM necessários para os *drivers* com o objetivo de o conversor CC-CC ser utilizado como *boost* ou como *buck*. Para finalizar, ao mesmo tempo que o sistema se encontra em funcionamento, foi criada uma aplicação que gera ficheiros de texto distintos numa pasta no computador com os dados recebidos pelos sensores em tempo real e é também usada uma interface gráfica de modo a dinamizar e compreender mais facilmente a variação destas variáveis ao longo do tempo.

5.3 Sistema de controlo

Neste item vão ser abordados todos os elementos que fazem parte do sistema de controlo. Este é responsável por garantir que todo o sistema funciona de maneira correta, assim como escolher em que modo é que este vai operar. Também é responsável pela comunicação entre o microcontrolador e a aplicação desenvolvida. Em primeiro lugar é explicada a parte de hardware de controlo, como os sensores de tensão, corrente e temperatura, a placa de condicionamento de sinal, proteção e comando e as placas de *driver* e de seguida é explicado o microcontrolador utilizado, assim como o algoritmo implementado no mesmo.

5.3.1 Sensor de Tensão

Com o intuito de saber se a bateria se encontra totalmente carregada ou descarregada torna-se imperativo saber a tensão aos seus terminais. Tal foi feito com recurso a um sensor de tensão

de efeito de Hall com a referência *CYHVS025A*, do fabricante *Chen Yang*. Na Figura 5.2 é possível observar o sensor.



Figura 5.2 – Sensor de tensão utilizado na bateria.

Na Figura 5.3 é possível observar o esquema elétrico do sensor de tensão, em que R_m é a resistência de medida, R_i é a resistência no primário, I_p é a corrente no primário e I_s a corrente no secundário.

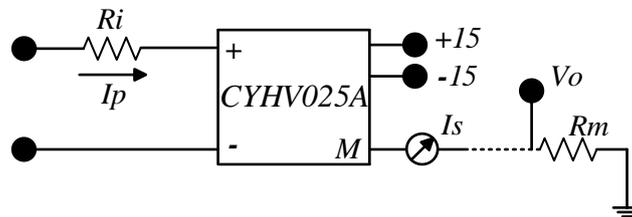


Figura 5.3 – Esquemático elétrico do sensor de tensão utilizado na bateria.

Este sensor permite medir tensões alternadas e contínuas com uma gama máxima de 1 kV, sendo que neste caso é utilizado para medir uma tensão contínua. A tensão presente no primário, através da resistência R_i , é convertida para corrente, I_p . Esta deve ter um valor máximo de 10 mA e de seguida deve-se escolher a gama de tensão a usar. Neste caso, visto que a bateria tem uma tensão máxima de 3,7 V, foi utilizada uma resistência de 1 k Ω que permite trabalhar até 10 V como se observa na equação (5.1):

$$V_n = R_i * I_n = 1 \text{ K}\Omega * 10 \text{ mA} = 10 \text{ V} \tag{5.1}$$

Este valor da resistência foi retirado através da Tabela 5.1 presente no *datasheet* [55].

Tabela 5.1 – Tabela com a gama de valores a utilizar na resistência primária do sensor.

Tensão na entrada (V)	Ri (k Ω)
10	1
50	5
100	10
200	20
300	30
400	40
500	50

Na saída do sensor (lado secundário) obtém-se uma corrente com uma razão de transformação de 2500:1000. Também no lado secundário se encontra uma resistência R_m cuja função é voltar a converter a corrente em tensão de maneira a que este valor possa ser lido pelos ADCs do microcontrolador. O valor desta resistência deve estar numa gama entre 100 Ω e 350 Ω , que é indicado no *datasheet* e calculado perante a gama de tensões que se pretende medir [55]. De seguida são apresentadas as equações (5.2) e (5.3) necessárias para determinar o valor de R_m .

$$I_s = 25 * 10 \text{ m} = 25 \text{ mA} \quad (5.2)$$

$$R_m = \frac{V_m}{i_s} = \frac{3}{25 \text{ m} * \sqrt{2}} = 212 \Omega \quad (5.3)$$

Como demonstrado, o valor obtido para a resistência R_m foi de 212 Ω , no entanto, foi usado um valor de 220 Ω pois era o valor mais próximo existente no GEPE. Para realizar a ligação do sensor de tensão entre a bateria e a placa de condicionamento de sinal foi utilizada uma placa, existente no GEPE, como se pode examinar na Figura 5.4. Para alimentar esta placa foi usada uma tensão de $\pm 15 \text{ V}$.



Figura 5.4 – Sensor de tensão e respetiva placa de ligação.

5.3.2 Sensor de Corrente

O sistema implementado recorre a um controlo de corrente com o objetivo de escolher um valor adequado com que se pretende carregar ou descarregar a bateria. Consequentemente, foi utilizado um sensor de corrente com efeito de Hall, da empresa *LEM*, com a referência *LA 55-P* com o intuito de obter uma boa medição da corrente presente na bateria. Através da Figura 5.5 é possível observar o sensor.



Figura 5.5 – Sensor de corrente utilizado na bateria.

Este sensor permite medir correntes CC e CA, podendo medir uma corrente nominal de 50 A. No entanto, este apenas trabalhará com corrente contínua, sendo que num sentido vai medir a corrente de carga e no outro a corrente de descarga. Na Figura 5.6 é mostrado o esquema elétrico do sensor, que permite perceber um pouco melhor o seu funcionamento.

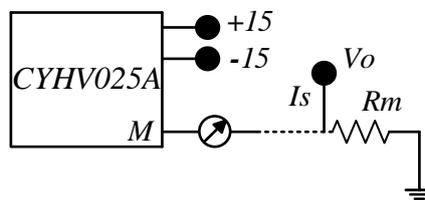


Figura 5.6 – Esquemático elétrico do sensor de corrente utilizado na bateria.

Como se verifica, o sensor é alimentado com uma tensão de ± 15 V, onde I_s que representa a corrente no secundário e R_m a resistência de medida. Na saída do sensor (lado secundário) obtém-se uma corrente com uma razão de transformação de 1000:1. Com base nisto, foi escolhido um valor máximo de corrente de 50 A no lado primário que através da equação (5.4) vai possuir 50 mA no lado secundário.

$$I_s = \frac{I_p}{1000} = \frac{50}{1000} = 50 \text{ mA} \tag{5.4}$$

Para a escolha da resistência R_m foram ponderados vários aspetos como se analisa na Tabela 5.2 [56].

Tabela 5.2 – Gama de valores para a resistência R_m .

Resistência de Medida (R_M)		$T_A = 70 \text{ }^\circ\text{C}$		$T_A = 85 \text{ }^\circ\text{C}$		
		R_M mín	R_M máx	R_M mín	R_M máx	
$\pm 12 \text{ V}$	$\pm 50A_{\text{máx}}$	10	100	60	95	Ω
	$\pm 70A_{\text{máx}}$	10	50	60	60	Ω
$\pm 15 \text{ V}$	$\pm 50A_{\text{máx}}$	50	160	135	155	Ω
	$\pm 70A_{\text{máx}}$	50	90	135	135	Ω

Visto que o sensor foi alimentado com $\pm 15V$ e foi definido para uma corrente máxima de 50 A com uma temperatura máxima de 70°C, a gama da resistência de medida passa a ser entre 50 Ω e 160 Ω .

Para interligar o sensor de corrente entre a bateria e a placa de condicionamento de sinal foi utilizada uma placa existente no GEPE, como se pode examinar na Figura 5.7.



Figura 5.7 – Sensor de corrente e respetiva placa de ligação.

5.3.3 Sensor de Temperatura

Com o intuito de perceber o comportamento da temperatura na bateria com o decorrer dos vários testes de cargas/descargas efetuados, é necessário a implementação de um sensor que meça o mesmo. Consequentemente, foram utilizados dois sensores, da marca *Texas Instruments*, com a referência *LM35*. Um dos sensores foi colocado na bateria e outro ficou a medir a temperatura ambiente de maneira a perceber se a bateria aumentava de temperatura em relação ao meio ambiente. Foi definido também um valor máximo de 40°C para a bateria com o intuito de atingindo essa temperatura, o sistema é desligado. O sensor *LM35* apresenta uma resolução de 10 mV/°C e possui uma escala entre -55°C e 150°C [57]. Na Figura 5.8 é possível observar o seu esquema elétrico.

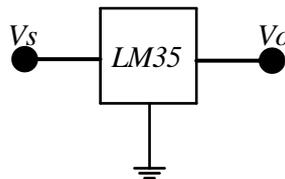


Figura 5.8 – Esquemático elétrico do sensor de temperatura *LM35*.

5.3.4 Placa de Condicionamento de Sinal, Proteção e Comando

Qualquer sistema de eletrónica de potência possui variáveis de entrada, nomeadamente tensões e correntes adquiridas pelos respetivos sensores. No entanto, os sinais de saída dos sensores nem sempre são adequados a uma correta legibilidade por parte dos ADCs de um microcontrolador. Como tal, para efetuar esta adequação são utilizados circuitos de condicionamento de sinal capazes de, por exemplo, somar um *offset*, amplificar ou atenuar o

sinal adquirido. Para além disso, os sinais de saída dos sensores podem servir para estabelecer um circuito de proteção contra sobretensões e sobrecorrentes, no caso dos sensores previamente referidos. Este mecanismo pode ser implementado com comparadores de janela, acionando um sinal de erro que por sua vez desabilitará a operação do conversor de potência.

De modo a integrar os circuitos de condicionamento de sinal, proteção e comando, bem como possibilitar a conexão do microcontrolador e fornecer a alimentação necessária ao funcionamento dos sensores, foi desenvolvida uma placa única especialmente designada para esta dissertação, primando assim por uma maior compactação do sistema. Esta placa possui entradas correspondentes aos sinais de saída dos sensores e possui saídas que dizem respeito aos sinais de PWM a serem enviados aos *drivers* dos semicondutores de potência. De referir que a placa é alimentada com uma tensão bipolar de ± 15 V e possui os reguladores lineares de tensão *LM7805* e *LM1117* de modo a estabelecer as tensões de 5 V e 3,3 V, respetivamente, necessárias à alimentação do microcontrolador e dos sensores de temperatura [58][59].

5.3.4.1 Condicionamento de Sinal

O sistema desenvolvido possui quatro sinais provenientes de sensores: tensão na bateria, corrente na bateria, temperatura na bateria e temperatura ambiente. De modo a aumentar a impedância de entrada do sistema de aquisição, cada um dos sinais de saída dos quatro sensores servem de entrada a um seguidor de tensão.

Em relação aos sensores de temperatura, o sinal de saída dos mesmos é obtido em tensão. No entanto, a saída do sensor de tensão é obtida em corrente, pelo que é necessária a adição de uma resistência de modo a converter a corrente de saída numa tensão legível pelo respetivo ADC. No entanto, uma vez que existe uma gama definida para a resistência de saída do sensor de tensão, são utilizadas duas resistências em série de forma a estabelecer um divisor de tensão, tornando mais flexível o dimensionamento dos elementos do circuito a jusante. Como tal, para o sensor de tensão foram utilizadas resistências de medida de valores 30 Ω e 220 Ω . Também o sensor de corrente possui um sinal de saída sob a forma de corrente, pelo que se seguiu o mesmo procedimento, sendo usadas resistências de 51 Ω e 18 Ω . Estas resistências foram dimensionadas tendo em conta que os ADCs do microcontrolador *TMS320F28027* apenas permitem leituras de tensões compreendidas entre 0 V e 3,3 V.

Em relação aos sensores de temperatura e de tensão na bateria, uma vez que apenas operam com tensões de saída positivas, não é necessário somar qualquer *offset*. No entanto, uma vez

que o sensor de corrente na bateria lida com correntes quer positivas quer negativas, representando a carga e a descarga da mesma, o seu sinal de saída tomará valores positivos e negativos. Como tal, de modo a poderem ser lidos pelo ADC do microcontrolador, é necessário somar um *offset* à tensão da resistência de medida. Para tal, utilizou-se uma montagem somadora não-inversora a jusante do seguidor de tensão. Esta montagem possui um ganho de 1,4 e um *offset* de 1,5 V. De modo a obter-se um valor de tensão estável para somar o *offset* com precisão, foi utilizada uma referência de tensão de 2,5 V da *Linear Technology* com a referência *LT1009* [60].

Para além da adequação do sinal de saída dos sensores aos ADCs do microcontrolador, é efetuada uma filtragem passa-baixo de modo a atenuar ruído de alta frequência passível de prejudicar as corretas leituras dos sensores. Para isso é utilizado um filtro RC de primeira ordem com frequência de corte de 1,6 kHz, onde $R = 1 \text{ k}\Omega$ e $C = 100 \text{ nF}$. Adicionalmente foi utilizado um díodo de *zener* com tensão nominal de 4,3 V entre o filtro passa-baixo e a entrada do ADC, permitindo a proteção deste contra tensões elevadas, bem como tensões negativas.

Posto isto, a Figura 5.9 demonstra o circuito de condicionamento de sinal implementado para os sensores de temperatura, onde se pode constatar que é constituído pelo seguidor de tensão, filtro passa-baixo e díodo de *zener*. Uma vez que se desenvolveu uma placa genérica, foram deixados dois espaços para resistências entre o sinal de saída dos sensores de temperatura e o seguidor de tensão, pelo que neste caso foi efetuado um *shunt* à primeira resistência, ficando a segunda em aberto, visto que a saída destes sensores é dada em tensão.

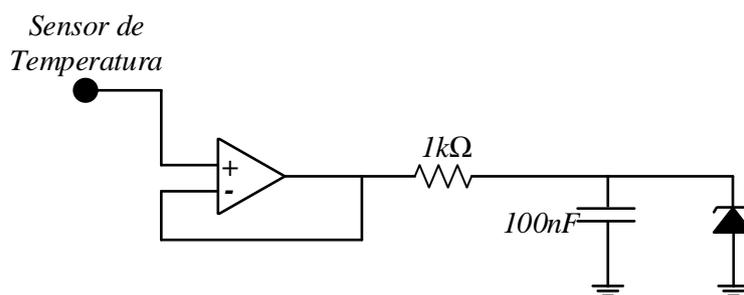


Figura 5.9 – Circuito de condicionamento de sinal desenvolvido para os sensores de temperatura.

Na Figura 5.10 pode ver-se o circuito de condicionamento de sinal implementado para o sensor de tensão, onde se pode ver as resistências de medida, o seguidor de tensão, o filtro passa-baixo e o díodo de *zener*.

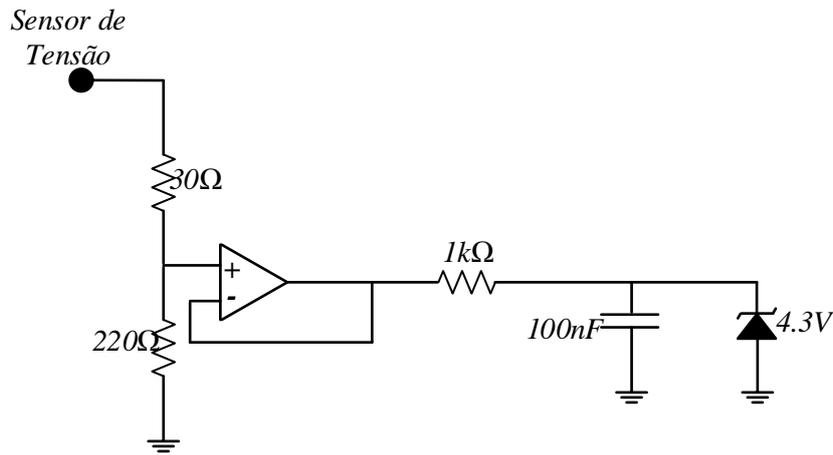


Figura 5.10 – Circuito de condicionamento de sinal desenvolvido para o sensor de tensão.

A Figura.5.11 ilustra o circuito análogo implementado para o sensor de corrente. Como referido previamente, para além dos constituintes do circuito do sensor de tensão, este circuito possui ainda um amplificador somador não-inversor devido à leitura de correntes na bateria em ambos os sentidos.

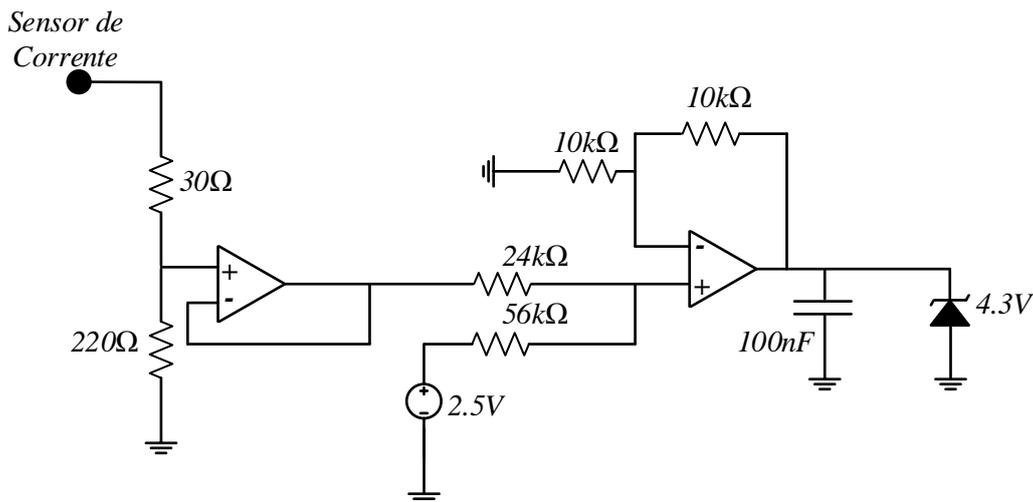


Figura.5.11 – Circuito de condicionamento de sinal desenvolvido para o sensor de corrente.

5.3.4.2 Proteção e Comando

Como referido, a proteção contra sobretensões e sobrecorrentes pode ser cumprida recorrendo a comparadores de janela. Como tal, foi implementado um circuito comparador de janela para cada sinal de ADC, sendo utilizado o circuito integrado *LM339* da *Texas Instruments* [61]. Este componente tem a vantagem de possuir as suas saídas em coletor aberto, permitindo a ligação de duas ou mais saídas numa saída única, sendo necessário utilizar uma resistência de *pull-up* para estabelecer o valor de tensão pretendido para o nível lógico alto. Assim que o resultado de uma das comparações for negativo, a saída comum passará a nível lógico baixo, permitindo interromper a operação do conversor, como será

analisado adiante. Assim sendo, foi definido para a tensão aos terminais da bateria o intervalo de operação entre 2,8 V e 3,7 V, sendo desencadeado um sinal de erro caso esta tensão possua um valor abaixo do limite inferior ou acima do limite superior estabelecido. Para a corrente da bateria, foi definido o intervalo de operação entre -50 A e 50 A, optando-se por limitar a carga e a descarga da bateria no mesmo valor de corrente. Em relação aos sensores de temperatura, definiu-se um valor máximo de 40 °C. A Figura 5.12 ilustra um dos circuitos comparadores de janela implementados.

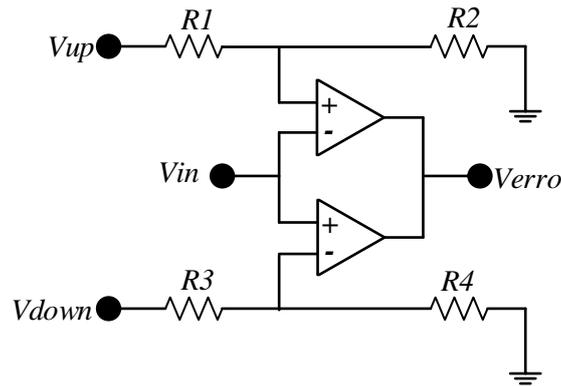


Figura 5.12 – Circuito comparador de janela implementado no erro.

Posto isto, torna-se necessário implementar um circuito capaz de interpretar o sinal de erro resultante dos comparadores de janela e habilitar ou desabilitar a operação do conversor de potência. De modo a evitar o acionamento indevido do sistema após a ocorrência de um erro, foi implementado um circuito que memoriza o estado, recorrendo a um *NE555* [62]. Para isso, utilizou-se na entrada de *reset* o sinal de erro e na entrada de *trigger* um sinal externo de *reset* ao erro, implementado por um botão de pressão, de forma a ser acionado pelo utilizador para novo arranque da operação do conversor após a ocorrência de um erro. Esta montagem permite a operação do *NE555* como *flip-flop set e reset*.

Após memorizado o erro, o sinal de saída do *NE555* é utilizado num circuito combinacional constituído por portas lógicas *AND*, sendo este sinal utilizado em conjunto com as saídas de PWM do microcontrolador que por sua vez servirão de sinais de entrada do circuito de *driver*. Para além dos sinais referidos, é também utilizado um sinal de *enable* controlado pelo utilizador através de um botão *on/off*, permitindo acionar ou desabilitar as comutações do conversor. Existe também um sinal de erro oriundo da placa de *driver*, pelo que todos estes sinais deverão encontrar-se a nível lógico alto para permitir as comutações do conversor. De modo a sinalizar a inexistência de erros, foi utilizado um *Light Emitting Diode (LED)* verde. De referir que os sinais de PWM do microcontrolador possuem lógica *Transistor-Transistor Logic (TTL)* de 3,3 V, pelo que necessitam de ser convertidos para lógica *Complementary*

Metal-Oxide Semiconductor (CMOS) de 15 V para serem corretamente processados pelas portas lógicas, bem como pelos circuitos de driver. Para este efeito foi utilizado o circuito integrado *CD4504* [63]. Concluindo, através da Figura 5.13 é possível a observação da placa de condicionamento de sinal, proteção e comando final.

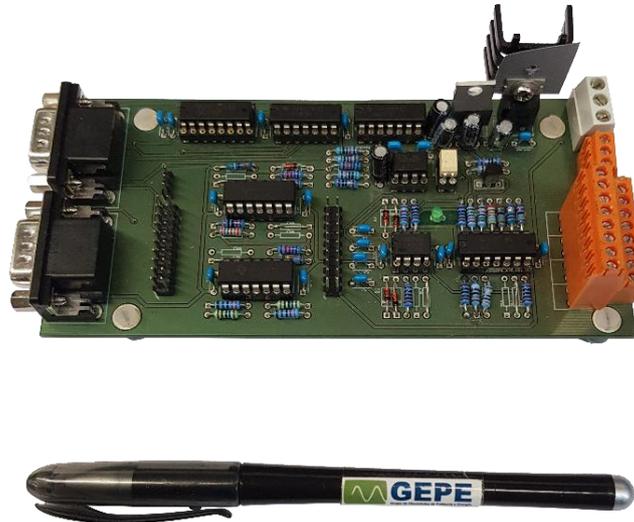


Figura 5.13 – Placa de condicionamento de sinal, proteção de erros e comando desenvolvida para o sistema de carga/descarga.

Como se pode verificar a placa contém um suporte para inserir o microcontrolador, como se constata na Figura 5.14.



Figura 5.14 – Placa de condicionamento de sinal, proteção de erros e comando desenvolvida para o sistema de carga/descarga com o microcontrolador inserido.

Por último, é mostrado através da Figura 5.15 a caixa utilizada para ligar à placa anterior com o botão de pressão de *reset* e o botão de *enable on/off*.



Figura 5.15 – Caixa onde estão presentes os botões de *reset* e *enable*.

5.3.4.3 Esquemático e Design da Placa de Condicionamento de Sinal, Proteção e Comando

De modo a desenhar a placa foi necessário um programa que permitisse o desenho do esquemático e posteriormente o *layout* da *Printed Circuit Board* (PCB). Para tal, foi usado o programa *PADS PCB Design Software* da *Mentor Graphics*. Uma vez explicada a placa de condicionamento de sinal, proteção e comando, através da Figura 5.16 é possível observar o esquemático da mesma desenhado no *PADS Logic* com o intuito de perceber melhor os circuitos que a constituem.

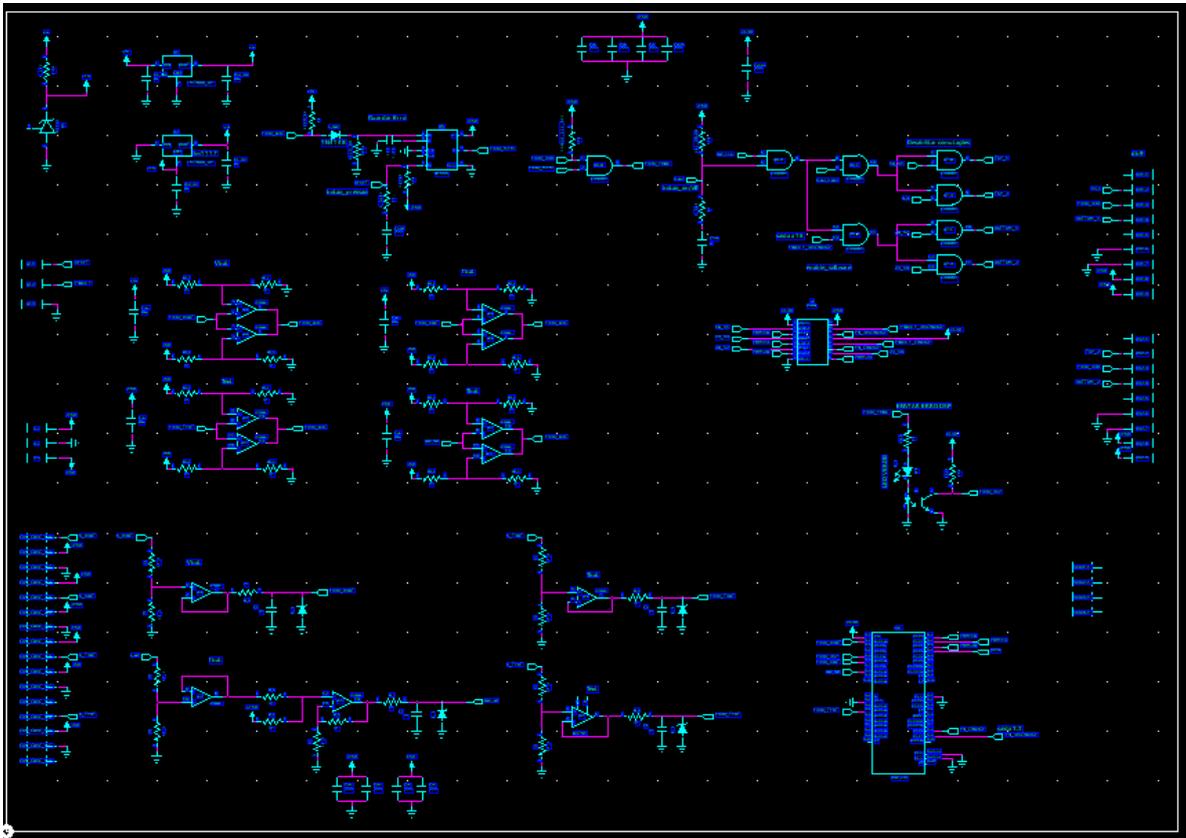


Figura 5.16 – Esquemático da PCB desenvolvida.

Posteriormente, após a conclusão do esquemático passou-se a desenhar o layout da placa pelo PADS *Layout* como se verifica na Figura 5.17.

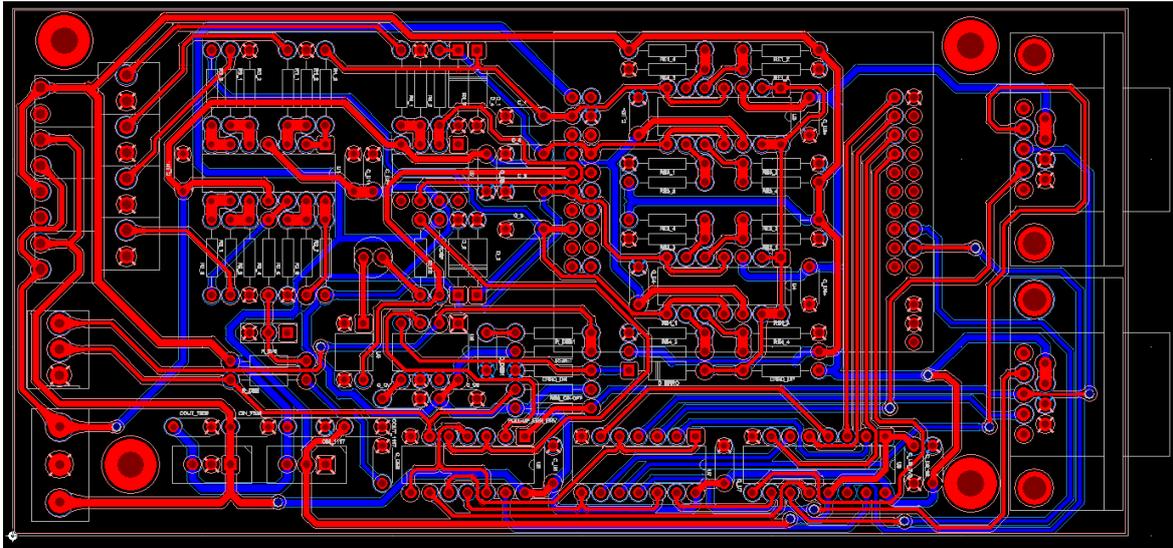


Figura 5.17 – *Layout* da PCB desenvolvida.

Como referido anteriormente, no desenho da PCB foi tido em conta o espaço que esta iria ocupar, por isso, esta foi feita de maneira a compactar ao máximo os componentes existentes.

5.3.5 Placas de *Driver*

De modo a garantir o funcionamento do conversor CC-CC, os seus semicondutores necessitam de receber os sinais de comando necessários para a ativação dos mesmos. Tal é efetuado através da placa de *driver*, que serve de interface entre a placa de comando e os IGBTs. Posto isto, foi usada como interface o *driver*, do fabricante *Semikron*, com a referência *SKHI22AH4R*. Este driver é alimentado com +15 V e possui uma frequência máxima de comutação de 50 kHz [64]. Cada placa permite controlar um braço de dois IGBTs de forma independente. Posto isto, foram necessárias duas placas de drivers de maneira a controlar os quatro IGBTs do conversor *buck-boost* com configuração *interleaved*. Na Figura 5.18 encontra-se presente uma das placas de *driver* utilizada e sua respetiva placa de interface desenvolvida pelo GEPE.



Figura 5.18 – Placa de *drivers*.

De modo a ligar o driver teve que ser efetuado o estudo da placa com o intuito de escolher os valores certos dos componentes e, posteriormente soldar os componentes que se encontram na mesma.

5.3.6 Microcontrolador

Para o sistema funcionar de forma correta foi necessário o uso de um microcontrolador, neste caso um DSP, do fabricante *Texas Instruments*, com a referência *TMS320F28027*. Este DSP permite que o conversor atue nos seus diferentes modos, através da comutação dos seus respetivos IGBTs. Este também permite enviar os valores recolhidos pelos sensores por porta série através da aplicação criada para efetuar o controlo de corrente e tensão. Este microcontrolador possui um processador de 32 bits com um *clock* interno de 60 MHz, 12 KB de memória *Random Access Memory* (RAM), 32 KB de memória *flash* e 7 canais de ADC [65]. Na Figura 5.19 é mostrado o microcontrolador utilizado, assim como uma descrição dos seus componentes.

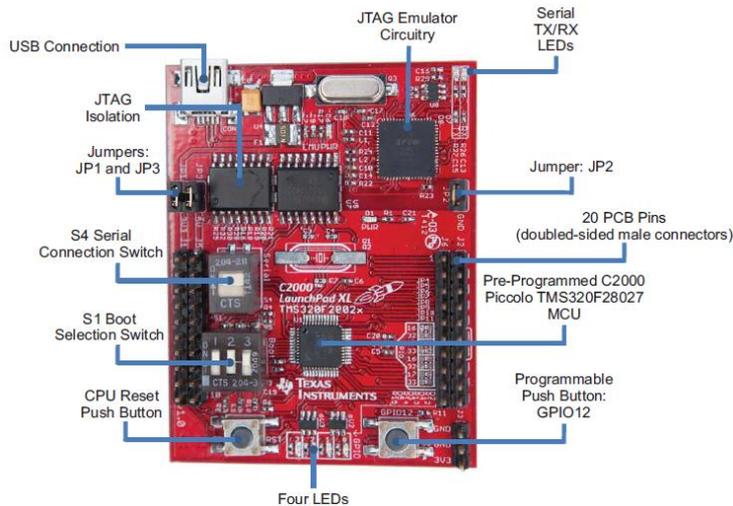


Figura 5.19 – Microcontrolador utilizado no sistema de carga/descarga [65].

Nesta dissertação foram utilizados quatro ADCs, dois para a temperatura, um para a corrente e outro para a tensão e um sinal de PWM para cada um dos IGBTs que constituem o sistema de carga/descarga.

5.3.7 Fluxograma do código Fluxograma Implementado no DSP

Com o intuito de perceber o código implementado no DSP é exibido na Figura 5.20 um fluxograma do mesmo.

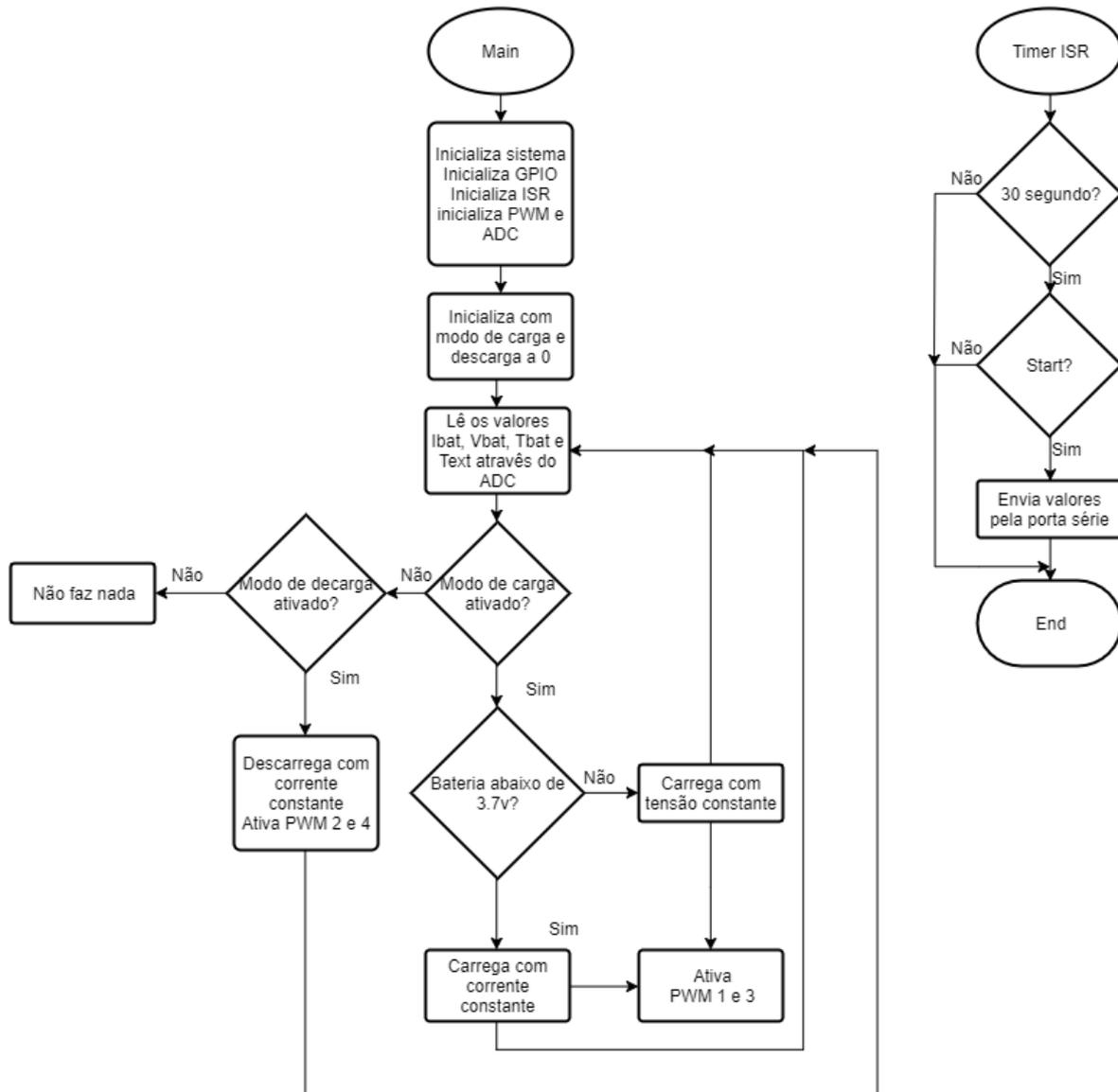


Figura 5.20 – Fluxograma do código implementado no microcontrolador.

5.4 Circuito de Potência

De seguida são apresentados os componentes que compõem o conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved* referentes à parte de potência.

5.4.1 Semicondutores de Potência

Os IGBTs usados no conversor são constituídos por dois módulos, um para cada braço, fabricados pela *Semikron*, com a referência *SKM 100GBI76D*. Cada módulo contém um braço com dois IGBTs e respetivos díodos em antiparalelo. Estes suportam uma tensão máxima coletor emissor de 1700 V e uma corrente de coletor máxima de 125 A a uma temperatura de 25 °C [66]. Visto que o conversor CC-CC *buck-boost* com topologia

interleaved contém dois braços, cada um com dois IGBTs, foi necessária a utilização de dois módulos. Na Figura 5.21 pode ver-se o módulo utilizado no conversor.

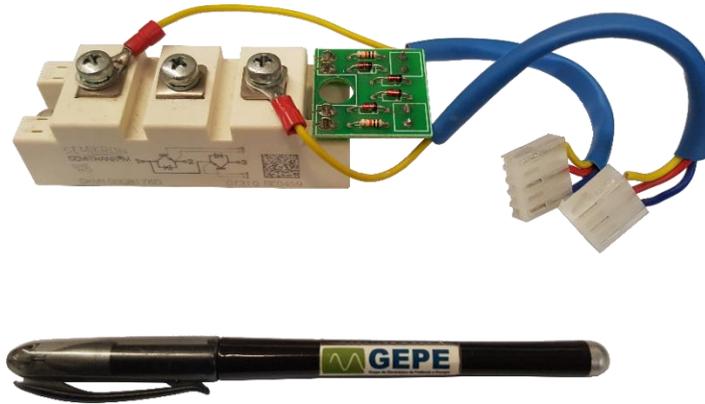


Figura 5.21 – Módulo utilizado no sistema de carga/descarga implementado.

De forma a aumentar a eficiência do conversor e reduzir as suas perdas devido ao sobreaquecimento dos módulos, estes foram colocados num dissipador, como se pode averiguar na Figura 5.22.



Figura 5.22 – Módulos colocados no dissipador juntamente com os drivers.

5.4.2 Elementos Indutivos do Conversor CC-CC

Apesar de inicialmente o conversor ter sido simulado com duas bobinas de 2 mH, na prática foram usadas duas bobinas de acoplamento mútuo existentes no GEPE. O acoplamento mútuo permite aumentar o valor de indutância total das bobinas em relação ao seu valor de indutância própria. Uma delas tem o valor de 2,09 mH e a outra o valor de 1,59 mH. Na Figura 5.23 pode-se ver as duas bobinas utilizadas.

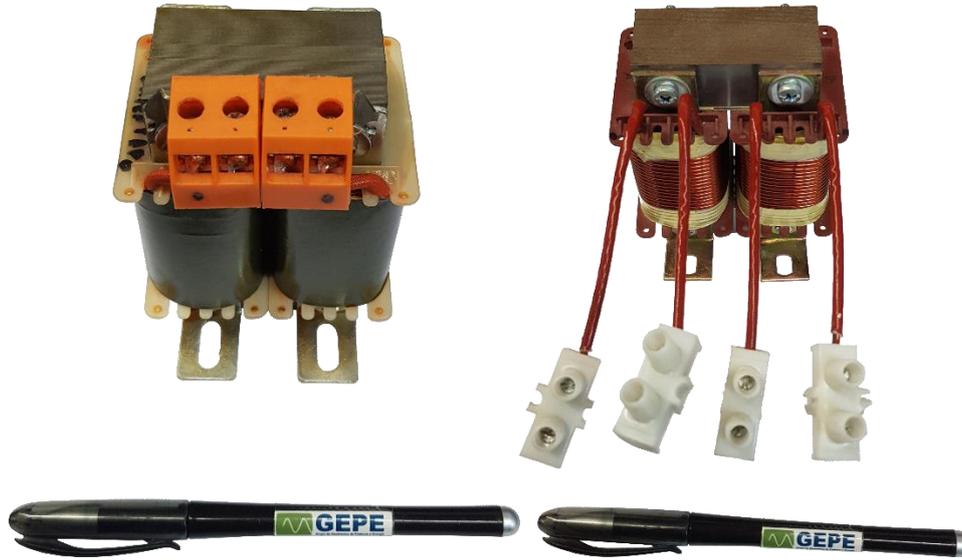


Figura 5.23 – Bobinas utilizadas no sistema de carga/descarga.

5.4.3 Elementos Capacitivos do Conversor CC-CC

No que diz respeito aos elementos capacitivos utilizados em paralelo com a bateria, foram utilizados dois condensadores inseridos numa placa existente no GEPE. Foi utilizado um condensador eletrolítico de 10000 μF em paralelo com um condensador de filme de 10 μF , perfazendo uma capacidade total de 10010 μF . O condensador eletrolítico foi utilizado com o intuito de se obter uma elevada capacidade, permitindo diminuir o *ripple* da corrente extraída ou injetada na bateria. Por outro lado, o condensador de filme foi utilizado de modo a colmatar a relativamente elevada resistência interna do condensador eletrolítico, pelo que a ligação em paralelo faz com que a resistência interna do conjunto seja inferior à resistência interna do condensador de menor resistência. Esta abordagem permite a obtenção de uma melhor resposta em frequência do filtro capacitivo, uma vez que o conversor opera com uma frequência de 20 kHz. Através Figura 5.24 da é perceptível a placa com os dois condensadores.

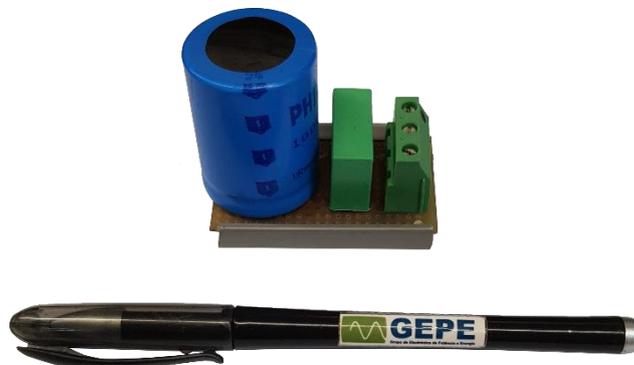


Figura 5.24 – Condensadores utilizados no conversor.

5.5 Bateria LiFePO₄

Como referido anteriormente, o tipo de bateria que vai ser testado nesta dissertação é a bateria LiFePO₄ de 100 Ah. De maneira a implementar o sistema de carga/descarga sobre a bateria é imperioso obter o máximo de informação sobre a mesma. De acordo com o *datasheet* desta bateria [67], é mostrada a Tabela 5.3 de maneira a evidenciar os aspetos e características de funcionamento mais importantes. Na Figura 5.25 é mostrada a bateria utilizada.

Tabela 5.3 – Principais características da bateria do tipo LiFePO₄.

Bateria	LiFePO ₄
Tensão Nominal	3,2 V
Capacidade Nominal	100 Ah
Tensão máxima por célula	3,8 V
Tensão mínima por célula	2,5 V
Tensão de operação	2,8 V a 3,7 V
Corrente de descarga ótima 0.3 C	< 33 A
Corrente de descarga máxima 3 C	300 A
Pico máximo na corrente de descarga 5 C, < 15 segundos	< 500 A
Corrente de carga ótima 0.3 C	< 33 A
Corrente máxima de carga 1 C	100 A
Resistência interna	< 1 mΩ
Ciclos de vida (80 % DoD a 0.3 C)	> 2000 ciclos
Taxa de autodescarga (% por mês)	< 3%
Temperatura de operação na carga	0 a 45°C
Temperatura de operação na descarga	-25 a 55°C
Pressão atmosférica	86 a 106 kPa
Dimensões largura x comprimento x altura(mm)	36 x 230 x 218
Peso (tolerância ±50 g)	3,35 kg



Figura 5.25 – Bateria do tipo LiFePO₄.

5.6 Protocolo de Comunicação e Tratamento de Dados

Durante a conceção deste sistema de carga e descarga de baterias surgiu uma necessidade de obter os dados adquiridos pelos sensores com o intuito de ser feito um estudo sobre como estes se desenvolviam ao longo do tempo. Deste modo, é criada uma aplicação que guarda os dados recebidos pelo microcontrolador em ficheiros de texto *.txt* específicos no computador numa pasta à escolha pelo utilizador. De tal modo, esta aplicação permite receber os dados enviados pelo DSP e posteriormente analisa-los em tempo real através de uma interface gráfica.

A maneira mais simples e eficaz de aplicar a comunicação entre o DSP e a aplicação efetuada foi através do protocolo *Universal UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter)* existente no microcontrolador [68]. Uma vez inicializada a comunicação, é necessário tratar os valores recebidos pelo DSP dos sensores de maneira a serem enviados para a aplicação. Através da Figura 5.26 é possível observar a função da porta série existente no programa *Code Composer Studio*, da *Texas Instruments*.

```

__interrupt void timer_ISR(void){
    processing = 1;

    if(++PrintCount == 1200000){
        if(start==1){

```

Figura 5.26 – Função porta serie implementada na aplicação desenvolvida.

O valor escolhido para enviar os dados em tempo real foi de 30 em 30 segundos. Como o valor escolhido para a frequência de amostragem foi de 40 kHz, a este valor foi multiplicado 30 s, obtendo assim os 1200000 ciclos que se podem verificar na função anterior. Aproveitando o facto de se ter uma variável que incrementa a cada amostragem, essa mesma é utilizada para calcular os 30 segundos passados. De maneira a perceber como são tratados os valores com o intuito de serem enviados, através da Figura 5.27 é possível observar o excerto de código referente a *Ibat* (variável definida para a corrente na bateria). É de salvaguardar que apenas é mostrada esta variável pois todas as outras são tratadas da mesma maneira.

```

if(ibat<0){
    ibat*=-1;
    val[0]='-';
}
else val[0]='+';
val[1] = ((int)ibat/10) + 48;
val[2] = ((int)ibat%10) + 48;
val[3] = '.';
val[4] = (int)((ibat - (int)ibat)*10) + 48;
val[5] = ((int)((ibat - (int)ibat)*100)%10) + 48;
val[6] = 0;
scia_msg(val);

```

Figura 5.27 – Transferência do valor da corrente na bateria implementado na aplicação desenvolvida.

Em primeiro lugar foi criado um vetor com sete posições de memória de maneira para colocar o valor recebido até duas casas decimais de precisão. De seguida é verificado se o valor é positivo ou negativo atribuindo o respetivo sinal no primeiro elemento do vetor. Consecutivamente, no segundo elemento do vetor é assumindo que qualquer valor não passa dos noventa e nove, sendo feita a divisão por dez de modo a obter o algarismo das dezenas. Também é somado o número quarenta e oito para que seja enviado o valor '0' em *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII) e não a sua representação como inteiro. Relativamente ao terceiro elemento do vetor, é feito o mesmo que em val [2], à exceção que é aplicado o resto da divisão com o objetivo de achar o valor das unidades. Como se pode verificar na posição val [3] é apenas enviado o carácter '.' para separar os números inteiros dos decimais. No que diz respeito a val [4] é subtraído ao valor total a sua componente inteira deixando apenas a parte decimal, multiplicando esse valor por dez e, de seguida, é efetuado um *cast* para inteiro de modo a ficar com o algarismo referente à decima e por último convertido para ASCII. Como seguimento, na posição val [5] é efetuado o mesmo, à exceção que neste caso é multiplicado com cem e aplicado o resto da divisão por dez com o intuito de obter o algarismo das centésimas. Finalizando, na última posição é enviado um carácter nulo de modo a indicar o fim do vetor de caracteres a ser enviado.

5.7 Aplicação Criada com Interface Gráfica

Neste item é explicado todo o processo de funcionamento da aplicação com interface gráfica desenvolvida.

5.7.1 Linguagem e *Integrated Development Environment* (IDE)

Ao surgir a ideia de criar uma aplicação, o primeiro obstáculo com que se depara baseia-se na escolha da linguagem. Após uma extensa análise sobre as possíveis linguagens de programação a ser utilizadas, chegou-se à conclusão que seria melhor uma linguagem de alto nível. Tal facto deve-se à abstração de vários procedimentos que teriam de ser levados em

conta utilizando uma linguagem de mais baixo nível como é o caso de C++. Outra grande vantagem que foi levada em consideração foi a expansão de conhecimentos em outras áreas da programação. Concluindo, a linguagem escolhida foi o *Python*.

Numa primeira fase, é necessário a utilização de um software que permite construir a estética das diferentes janelas sem qualquer dependência de código. Com isto, refere-se o desenho das próprias janelas e inclusão de todos os objetos existentes na mesma. A ferramenta utilizada foi o *Qt Designer*, do fabricante *QT Company*. Na Figura 5.28 é possível ilustrar o seu ambiente de trabalho.

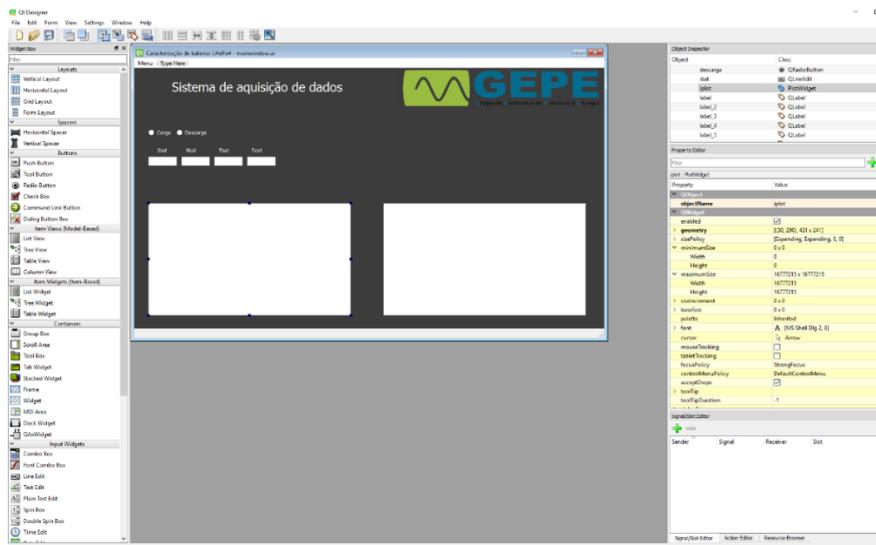


Figura 5.28 – Ambiente de trabalho do programa *Qt Designer*.

Efetuada o *design* da interface surgiu a necessidade da conversão do ficheiro de extensão *.ui* gerado pelo *Qt Designer* para um ficheiro de extensão *.py* com o objetivo de converter o código em *python*. Esta conversão foi feita na linha de comando do *Windows* após a instalação do *pyuic5*.

Por último, foi imprescindível a utilização de um IDE que permitisse a escrita do código na linguagem de alto nível utilizada. O programa escolhido com o *Spyder IDE*, licenciado pelo MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). Através da Figura 5.29 é ilustrado com o ambiente de trabalho da ferramenta de trabalho *Spyder*.

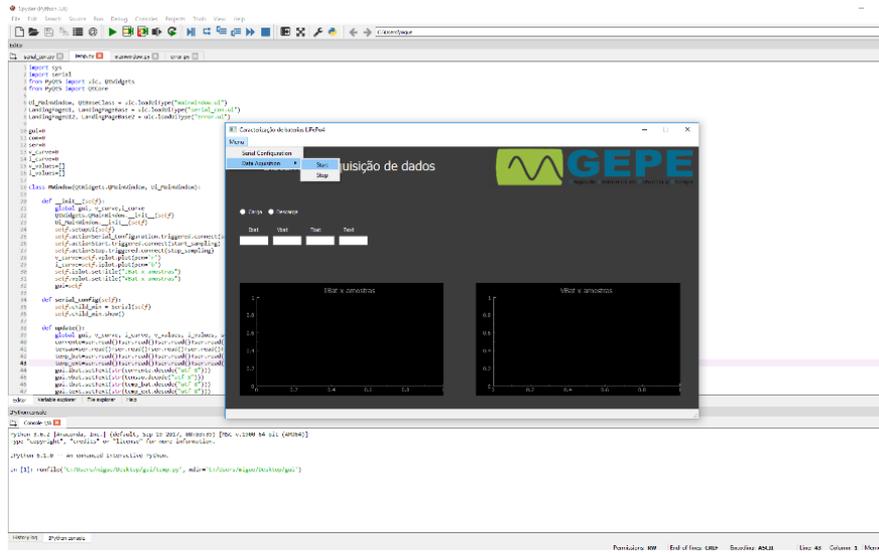


Figura 5.29 – Ambiente de trabalho da ferramenta Spyder.

5.7.2 Inicialização da Aplicação

Como referido anteriormente, foi criado um *design* para a aplicação através de um software próprio. A Figura 5.30 ilustra o resultado final desse *design*.



Figura 5.30 – *Design* final da interface gráfica.

Após finalizar o *design* da aplicação e sua respetiva conversão, foi criado um ficheiro *python* para albergar todos os outros ficheiros gerados pela conversão. A criação do novo ficheiro deve-se à maior facilidade e compreensão do trabalho desenvolvido, assim como permitir alterações à parte do *design* sem perder qualquer tipo de código desenvolvido.

O primeiro passo a seguir é a inclusão de módulos com funções que irão ser utilizadas para a realização dos vários objetivos da aplicação, como por exemplo o *sys*, o *serial* e o *PyQt5*, como ilustra na Figura 5.31.

```
import sys
import serial
from PyQt5 import uic, QtWidgets
from PyQt5 import QtCore
```

Figura 5.31 – Importação de funções.

Posteriormente foram criadas variáveis globais com referências aos ficheiros gerados anteriormente automaticamente e outras inerentes ao bom funcionamento do programa, como se pode verificar na Figura 5.32.

```
Ui_MainWindow, QtBaseClass = uic.loadUiType("mainwindow.ui")
LandingPageUI, LandingPageBase = uic.loadUiType("serial_con.ui")
LandingPageUI2, LandingPageBase2 = uic.loadUiType("error.ui")

gui=0
com=0
ser=0
v_curve=0
i_curve=0
v_values=[]
i_values=[]
```

Figura 5.32 – Declaração das variáveis globais referentes aos ficheiros gerados anteriormente.

De seguida foram instanciadas várias classes e definições, cada uma representando as diferentes janelas e as funções de amostragem respetivas. Na Figura 5.33 é possível ver um exemplo de uma classe que neste caso representa a janela do erro.

```
class NConnected(LandingPageBase2, LandingPageUI2):

    def __init__(self, parent=None):
        LandingPageBase2.__init__(self, parent)
        self.setupUi(self)

    def start_sampling():
        timer.start(30000)
```

Figura 5.33 – Classe da janela de erro.

Quando a aplicação é inicializada, esta chama a janela principal que se encontra na classe *Mwindow* e configura o *timer* para a amostragem do sinal, Figura 5.34.

```
if __name__ == "__main__":
    app=QtWidgets.QApplication.instance()
    if not app:
        app = QtWidgets.QApplication(sys.argv)
    window = Mwindow()
    window.show()
    timer=QtCore.QTimer()
    timer.timeout.connect(Mwindow.update)
    sys.exit(app.exec_())
```

Figura 5.34 – Classe da janela principal.

Ao ser inicializada, a janela principal coloca todos os objetos configurados de acordo com o *QT Designer*, podendo o utilizador usufruir de todas as suas funções.

5.7.3 Ligação à Porta Série

Uma das principais funções da janela principal é a conexão da porta serie. Esta é criada através de uma nova janela onde é possível fazer a inserção de dados para a configuração da mesma como o *baudrate* e a porta COM. Na Figura 5.35 constata-se a janela resultante da interface gráfica.

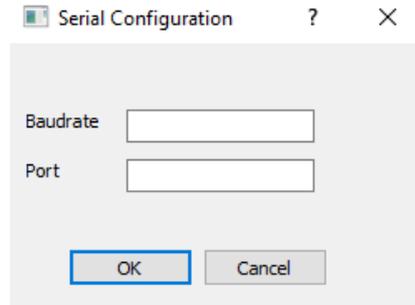


Figura 5.35 – Janela de configuração da porta serie.

No caso de o utilizador inserir dados incorretos é visualizada uma mensagem de erro e eliminados os dados de *baudrate* e porta COM previamente inseridos, como ilustra a Figura 5.36.

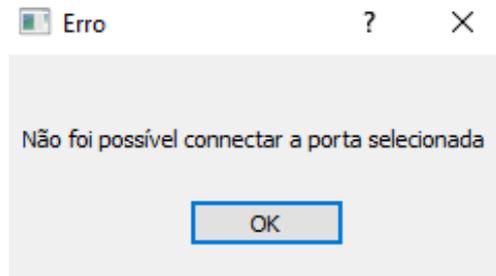


Figura 5.36 - Mensagem de erro.

De maneira a perceber como foi executada a porta serie, é mostrado através da Figura 5.37 um excerto de código referente ao mesmo.

```
def configure(self):
    global ser, com
    ser=serial.Serial()
    ser.baudrate = int(str(com.baudrate.text()))
    ser.port = str(com.comport.text())
    try:
        ser.open()
    except serial.SerialException as e:
        ser.baudrate = 9600
        ser.port = None
        self.connection_refused()

def connection_refused(self):
    self.child_win = NConnected(self)
    self.child_win.show()
```

Figura 5.37 – Configuração da porta serie.

Neste excerto é configurada a porta serie com os valores inseridos nos campos específicos da janela explicada anteriormente. Caso a porta não consiga ser aberta, é criada uma exceção que repõe os valores de origem no *baudrate* e na porta COM e inicializa a janela de erro.

5.7.4 Aquisição de Dados, Visualização em Tempo Real e Criação de Ficheiros para os Dados

Uma das principais funções da aplicação criada baseia-se no início e fim da amostragem. Entende-se por amostragem a utilização da interrupção do timer que através da ligação à porta serie recebe valores enviados pelo DSP. Estes valores são posteriormente visualizados pelo utilizador na interface sendo também adicionados a um vetor que mostra a sua evolução temporal. Por ultimo, os valores enviados pelo DSP são guardados em ficheiros de texto diferentes. Na Figura 5.38 é exibido uma porção do código que demonstra como os dados são recebidos pela porta serie.

```
corrente=ser.read()+ser.read()+ser.read()+ser.read()+ser.read()+ser.read()
tensao=ser.read()+ser.read()+ser.read()+ser.read()+ser.read()+ser.read()
temp_bat=ser.read()+ser.read()+ser.read()+ser.read()+ser.read()+ser.read()
temp_ext=ser.read()+ser.read()+ser.read()+ser.read()+ser.read()+ser.read()
```

Figura 5.38 – Leitura dos dados recebidos pela aplicação.

A partir da Figura 5.39 é explicado como os valores recebidos são mostrados na interface.

```
gui.ibat.setText(str(corrente.decode("utf-8")))
gui.vbat.setText(str(tensao.decode("utf-8")))
gui.tbat.setText(str(temp_bat.decode("utf-8")))
gui.text.setText(str(temp_ext.decode("utf-8")))
v_values.append(float(tensao.decode("utf-8")))
```

Figura 5.39 – Código para os valores aparecerem na interface.

Na Figura 5.40 é possível constatar o pedaço de código referente à criação e atualização dos gráficos da corrente *vs.* amostras e tensão *vs.* amostra em tempo real.

```
v_values.append(float(tensao.decode("utf-8")))
i_values.append(float(corrente.decode("utf-8")))
v_curve.setData(v_values)
i_curve.setData(i_values)
```

Figura 5.40 – Inicialização e criação dos gráficos presentes na interface gráfica.

Para finalizar, a criação de ficheiros de texto para guardar em tempo real cada variável recebida pela interface pode ser vista através da Figura 5.41.

```

file_ibat = open('ibat.txt', 'a')
file_ibat.write(str(corrente.decode("utf-8"))+'\n')
file_ibat.close()
file_vbat_med = open('vbat.txt', 'a')
file_vbat_med.write(str(tensao.decode("utf-8"))+'\n')
file_vbat_med.close()
file_tbat = open('tbat.txt', 'a')
file_tbat.write(str(temp_bat.decode("utf-8"))+'\n')
file_text = open('text.txt', 'a')
file_text.close()
file_text.write(str(temp_ext.decode("utf-8"))+'\n')
file_text.close()
    
```

Figura 5.41 – Criação dos ficheiros de texto com os valores referentes aos sensores.

5.7.5 Fluxograma da Aplicação Final

Finalizada a aplicação de seguida são ilustrados os diferentes fluxogramas que constituem a mesma através da Figura 5.42.

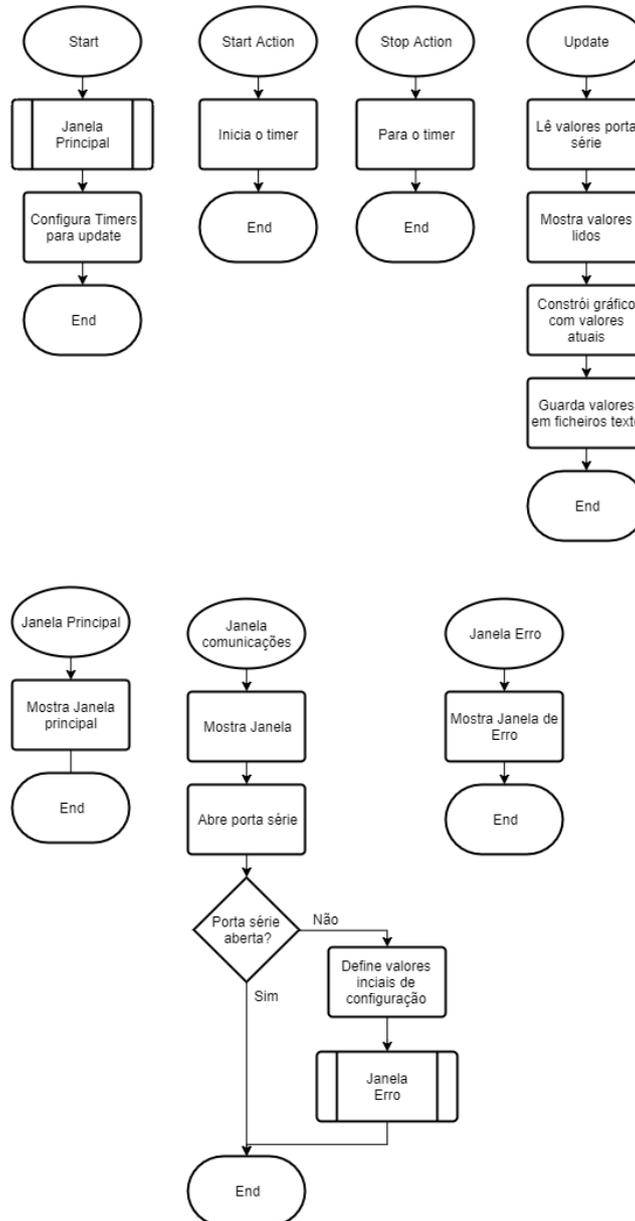


Figura 5.42 – Fluxograma correspondente a todas as etapas da aplicação gráfica.

5.8 Conclusões

No presente capítulo foi descrito o desenvolvimento de um sistema bidirecional de carga e descarga de baterias LiFePO₄. Com o objetivo de existir uma melhor compreensão sobre o sistema implementado, este foi dividido em três partes distintas: parte de controlo, parte de potência e aplicação com interface gráfica.

No sistema de controlo referente ao conversor CC-CC utilizado foi feito um breve esclarecimento sobre os sensores utilizados, assim como o microcontrolador, placa de condicionamento de sinal, proteção de erros e comando e placa de circuito de *drivers*. As placas utilizadas foram estudadas e dimensionadas consoante as necessidades exigidas pelo projeto, sendo que estas já se encontravam desenhadas e impressas, mas sem componente nenhum inserido, à exceção da placa de condicionamento de sinal, proteção e erro que foi desenvolvida de raiz.

No que diz respeito à parte correspondente ao sistema de potência, foram descritos todos os componentes que constituem o conversor bidirecional CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved* e foi efetuado um breve estudo sobre as principais características da bateria a utilizar.

Por último, foi explicado com pormenor a criação e desenvolvimento de uma aplicação com interface gráfica de maneira a completar o sistema implementado. No que diz respeito à interface gráfica, esta permite a introdução dos dados requerentes à porta série e visualizar os valores lidos pelos sensores e dois gráficos referentes à corrente e à tensão na bateria em tempo real. Esta aplicação também permite a criação de ficheiros de texto onde são guardados os valores dos distintos sensores usados para posteriormente serem exportados para ferramenta de trabalho *Microsoft Excel* para serem visualizados através de gráficos.

Capítulo 6

Resultados Experimentais

6.1 Introdução

No presente capítulo são apresentados e explicados os resultados experimentais obtidos ao longo dos testes do sistema de carga e descarga implementado para baterias de LiFePO_4 . Estes resultados podem ser divididos em duas partes distintas: a validação do conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved* nos seus dois modos de funcionamento e posteriormente a realização de testes de carga e descarga em baterias de LiFePO_4 , extraindo dessa maneira vários dados obtidos para posteriores conclusões. Estes são explicados de seguida por ordem pelo qual foram executados.

Depois de validada a placa de condicionamento, proteção e comando e as duas placas de *driver* seguiu-se então à validação do conversor CC-CC. De modo a validar o conversor, foram efetuados testes nos seus dois modos de funcionamento: *buck* e *boost*. Numa primeira fase a bateria foi substituída por uma carga resistiva de maneira a não danificar a própria. Durante os primeiros ensaios também foram testadas as técnicas de controlo de corrente através dos algoritmos de controlo PI implementados no DSP. Com o intuito de visualizar a corrente e as tensões presentes no circuito foi utilizado um osciloscópio, do fabricante *Tektronix*, que permite obter os dados das simulações presentes no seu ecrã e posteriormente guardá-los de maneira a conseguir observar os mesmos num computador.

Após concluída a validação do conversor e dos algoritmos de controlo, procedeu-se à realização dos testes de carga e descarga sobre baterias de LiFePO_4 com diferentes valores de corrente. Ao longo destes testes, os dados da corrente, tensão e temperatura presentes na bateria foram recolhidos pelos sensores e através da porta serie enviados em tempo real para o computador. Estes dados foram guardados em ficheiros de texto numa pasta a designar pelo utilizador que, posteriormente, são importados para a ferramenta *Microsoft Excel* com o intuito de poder visualizar a recolha desses dados e recorrer a gráficos de modo a perceber o seu comportamento ao longo do tempo.

6.2 Validação do Sistema

Antes de testar o conversor CC-CC foi imperativo realizar a validação da placa de condicionamento de sinal, proteção e comando e posteriormente as placas de circuito de *driver*. No que diz respeito à parte do condicionamento de sinal foi testado se os valores reais e os valores lidos pelo DSP eram iguais.

Numa primeira fase, foram efetuados vários testes respetivos à proteção de erros, aplicando valores de tensão e corrente superiores aos limitados anteriormente com o intuito de verificar se os erros eram ativados por software e/ou hardware e o circuito era desativado. Para finalizar a validação da placa foi testada a parte referente ao comando. Nesta foram ativados os modos de carga e descarga pelo DSP para verificar se este validava de maneira correta os sinais de PWM, que através das placas de circuito de *driver* são enviados para os IGBTs. Finalizando os testes à placa de condicionamento, proteção e comando, também é perceptível que esta se encontra no devido funcionamento enquanto que o *LED* presente na mesma se encontra ligado. Este é desligado através da origem de algum erro.

De seguida, procedeu-se à validação da placa de circuito de *driver* de modo a averiguar se os IGBTs eram ligados corretamente nos diferentes modos de funcionamento do conversor CC-CC *buck-boost*. Visto que este foi implementado com a topologia *interleaved* foram necessários quatro sinais de PWM de modo a ativar dois semicondutores no modo de carga e outros dois no modo de descarga. Como ainda não se sabia se estes sinais eram enviados corretamente para os dois módulos de IGBTs, estes foram testados em aberto de maneira a não causar nenhum dano aos mesmos. A Figura 6.1 ilustra dois sinais de PWM gerados pelo DSP com um *duty cycle* de 50% no modo de carga.



Figura 6.1 – Comutação dos IGBTs *S1* e *S3* com um *duty cycle* de 50%.

Consequentemente, os IGBTs *S1* e *S3* encontram-se ativados enquanto *S2* e *S4* estão desativados. Como se pode verificar, os dois sinais de comando encontram-se desfasados

180°, possuem uma tensão de 3,3 V e uma frequência de comutação de 20 kHz. De forma a perceber as comutações dos semicondutores ao longo do processo de carga ou descarga são mostrados de seguida na Figura 6.2 e na Figura 6.3 dois exemplos em que os IGBTs se encontram com um *duty cycle* menor que 50 % (25 %) e um *duty cycle* maior que 50 % (75 %), respetivamente. Para ambos os casos a frequência é de 20 kHz.

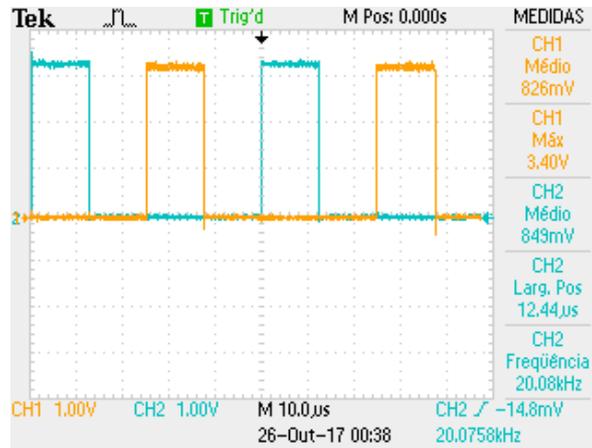


Figura 6.2 - Comutação dos IGBTs *S1* e *S3* com um *duty cycle* de 25 %.

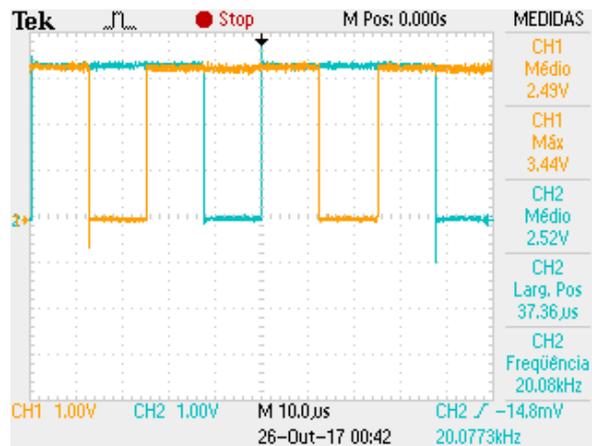


Figura 6.3 - Comutação dos IGBTs *S1* e *S3* com um *duty cycle* de 75 %.

Estes testes também foram efetuados aos IGBTs *S2* e *S4* simulando o modo de descarga, porém não foram exibidas imagens porque são análogas ao modo de carga, à exceção que *S2* e *S4* estão ativados e *S1* e *S3* desativados. Depois de validadas as placas de *driver*, o conversor foi ligado a uma carga resistiva, de 2 Ω, de maneira a atestar o seu funcionamento, substituindo a bateria e impedindo assim danos na mesma. De modo a validar o sistema foi escolhido através do DSP uma corrente de referência de 1 A, onde a corrente real pode ser visualizada através Figura 6.4. Como se verifica, a corrente tem um *ripple* baixo, na ordem 0,3 A.

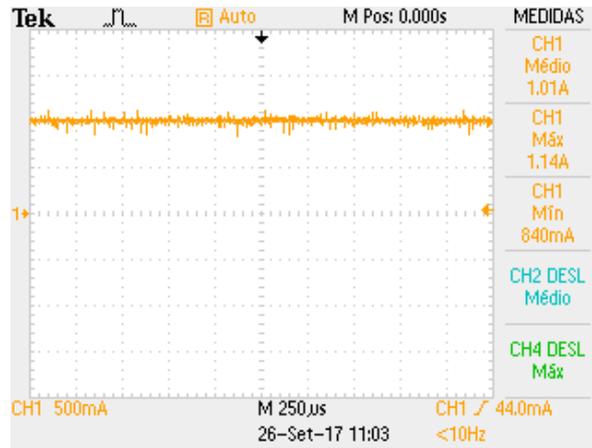


Figura 6.4 – Resultado experimental: simulação de uma carga com uma corrente de 1 A.

A Figura 6.5 ilustra as correntes que passam em cada bobina. Através da sua observação atesta-se que as correntes presentes em cada bobina encontram-se desfasadas 180° como previsto nas simulações. Neste teste também foi possível validar o sistema de controlo PI, visto que lhe foi pedido uma corrente de 1 A e ambas as correntes encontram-se não só desfasadas 180° entre si, mas também com um valor médio perto de 0,5 A. O motivo pelo qual o valor da corrente não é exatamente o mesmo em cada bobina deve-se ao facto de estas conterem valores diferentes de indutância. É de salvaguardar que posteriormente foram efetuados mais testes com outros valores de corrente de maneira a perceber se o sistema respondia como previsto, no entanto, aqui apenas foi mostrada um resultado para o valor de 1 A.

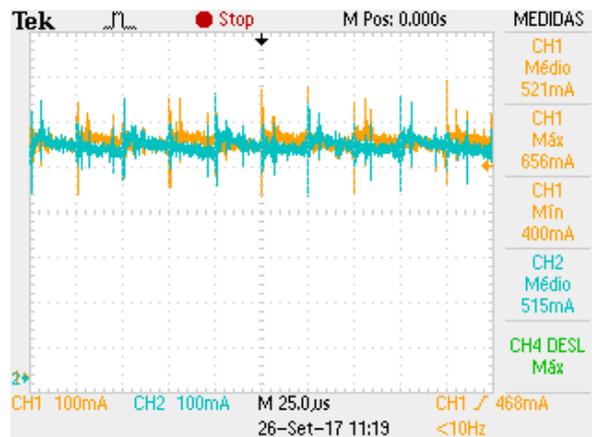


Figura 6.5 – Resultado experimental: simulação de uma carga com ambas as correntes presentes em cada bobina.

6.3 Conversor CC–CC Bidirecional *Buck–Boost* com Topologia *Interleaved*

Após terminar a validação do conversor, procedeu-se finalmente aos testes efetuados à bateria. Como foi referido várias vezes ao longo desta dissertação, o conversor usado para

obter os resultados práticos possui dois modos de operação: *buck* e *boost*. De seguida são explicados como se procedeu na prática e o funcionamento do conversor de modo a carregar e descarregar a bateria. É de proferir que apenas foi usado um sensor de corrente, tal como nas simulações computacionais e o valor desta é positivo no modo *buck* e negativo no modo *boost*. Também são mostradas imagens de maneira a ilustrar e compreender melhor o ambiente de trabalho em ambos os casos.

6.3.1 Funcionamento no Modo *Buck*

No modo *buck* a bateria vai ser carregada, logo o sentido de corrente efetua-se da fonte de alimentação para a bateria. Consequentemente, foram então efetuados vários testes de carga a baterias de LiFePO₄ com o intuito de observar e estudar graficamente o desenvolvimento da sua carga e perceber se esta é efetuada como previsto no capítulo 4. De maneira a compreender como foi ligado e conectado todo o circuito envolvente, a Figura 6.6 ilustra a bancada de testes laboratoriais relativos à carga da bateria.

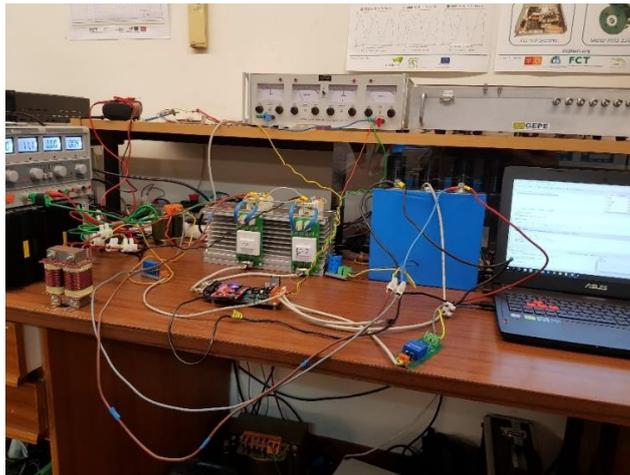


Figura 6.6 – Bancada de testes com o conversor *buck-boost* com topologia *interleaved* a atuar como *buck*.

Depois de exibida a bancada de testes é importante expor o comportamento das tensões e correntes ao longo dos testes efetuados. Como o teste com maior duração temporal foi uma carga de corrente constante com o valor de 10 A, as formas de onda expostas de seguida serão correspondentes a esse teste. Na Figura 6.7 é possível verificar o comportamento das tensões de entrada e saída do conversor a atuar como *step-down*.

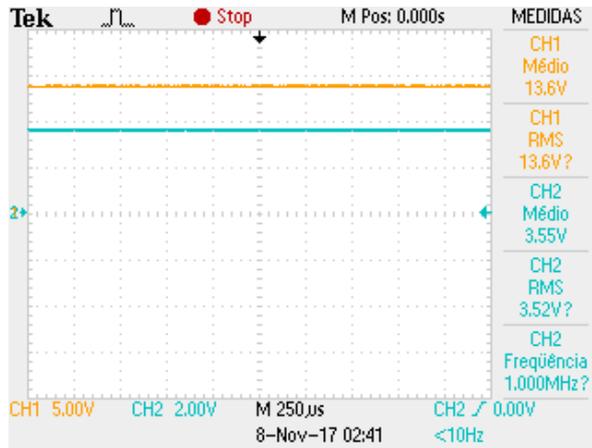


Figura 6.7 – Resultado experimental das tensões de entrada e saída do conversor CC–CC.

O presente conversor opera como abaixador de tensão de 13,6 V presentes na entrada (fonte de alimentação) para uma saída (bateria) com 3,55 V. De maneira a verificar como se comporta a corrente durante o teste de corrente constante, é possível observar na Figura 6.8 e na Figura 6.9 a corrente total presente na bateria e a corrente que passa em cada bobina, respetivamente.

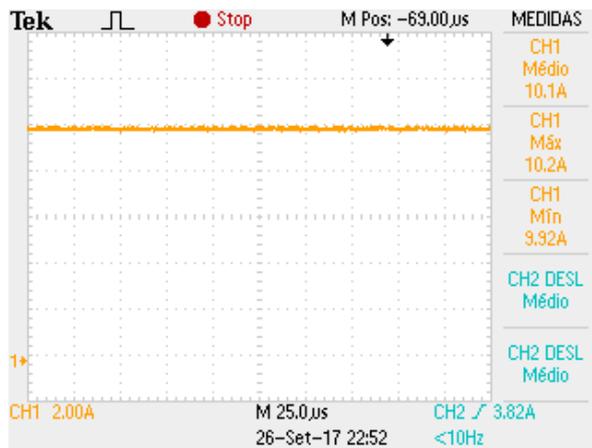


Figura 6.8 – Resultado experimental com uma corrente de 10 A presente na bateria ao longo de uma carga.

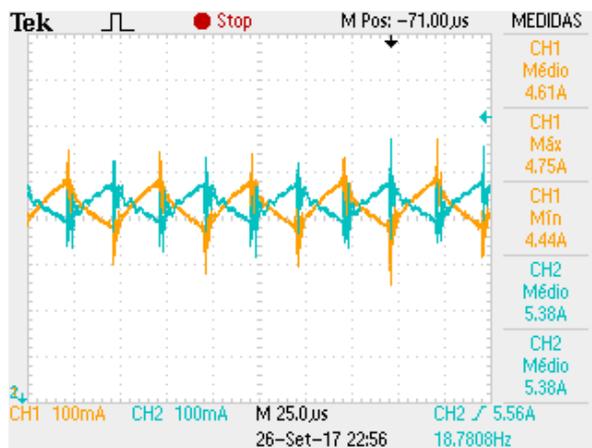


Figura 6.9 – Resultado experimental com as correntes presentes em cada bobina desfasadas entre si 180° ao longo de uma carga.

Analisando os gráficos é perceptível que a corrente na bateria apresenta um *ripple* bastante baixo, visto que para 10 A o seu valor é de 0,3 A. Por outro lado, também se consegue observar que as correntes nas bobinas se encontram desfasadas entre si 180° com um valor médio a rondar os 5 A, porém este valor não é exatamente igual em cada uma devido ao uso de bobinas com diferentes valores de indutância.

6.3.2 Funcionamento no Modo *Boost*

O presente modo de funcionamento *boost* executa a descarga da bateria. Posto isto, a corrente vai fluir da bateria para a carga resistiva utilizada. Durante os vários testes de descarga efetuados houve uma especial atenção às cargas resistivas efetuadas com o objetivo a que estas não sobreaquecessem. Todas as resistências utilizadas possuem um valor de 4 Ω e uma potência máxima de 50 W na presença de um dissipador. De maneira a obter os diversos valores utilizados na carga resistiva, estas foram utilizadas em paralelo. Consequentemente, para os diferentes valores da corrente foram usados os seguintes valores de resistências presentes na Tabela 6.1:

Tabela 6.1 – Cargas resistivas utilizadas na descarga da bateria.

Corrente (A)	Resistência (Ω)	Número de resistências utilizadas em paralelo	Potência em cada resistência (W)
2	2	2	4
4	2	2	16
8	1	4	16

Na Figura 6.10 é possível observar a bancada de testes laboratoriais com o conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved* a atuar como *boost*.



Figura 6.10 – Bancada de testes com o conversor *buck-boost* com topologia *interleaved* a atuar como *boost*.

Neste modo foram efetuados vários testes às baterias, porém apenas vão ser mostrados os resultados para uma descarga feita com 8 A. Através da Figura 6.11 observar-se o comportamento das tensões de entrada e saída do conversor CC-CC a atuar como *step-up*.

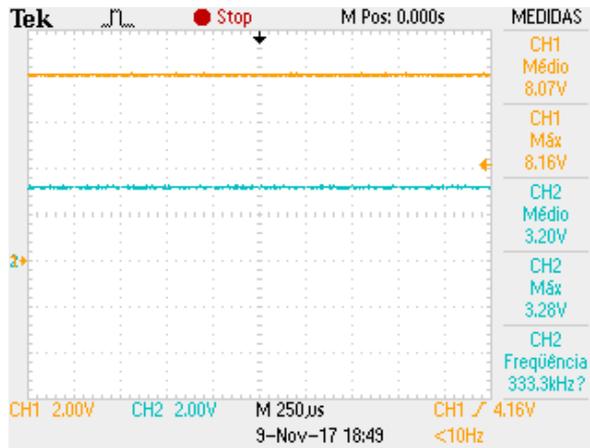


Figura 6.11 – Resultado experimental das tensões de entrada e saída do conversor a atuar como *boost*.

O conversor encontra-se a funcionar como um aumentador de tensão visto que possui um valor de tensão à entrada (bateria) de 3,2 V e à saída (carga resistiva) de 8 V. Para este teste foi solicitada uma corrente através do DSP de 8 A. De maneira a perceber como se comporta a corrente, a Figura 6.12 e a Figura 6.13 apresentam a corrente na bateria e a corrente em cada uma das bobinas, respetivamente.

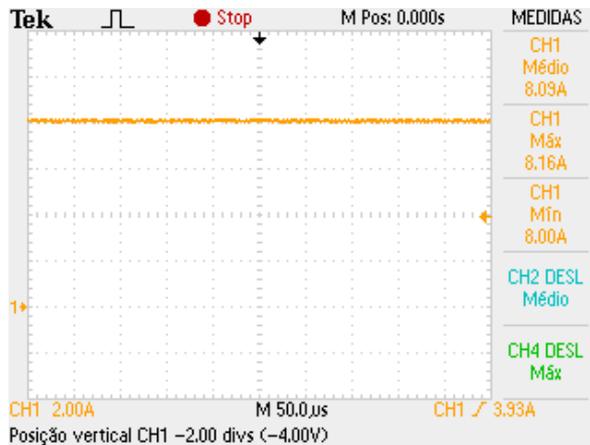


Figura 6.12 – Resultado experimental com uma corrente de 8 A presente na bateria durante a descarga.

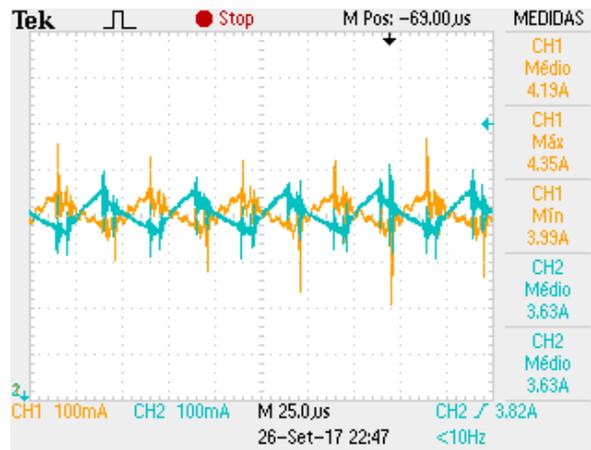


Figura 6.13 – Resultado experimental com as correntes presentes em cada uma das bobinas.

Como previsível, a corrente presente na bateria apresenta um *ripple* pequeno com um valor de 0,16 A para 8 A. Por outro lado, é possível perceber que as correntes nas bobinas se encontram desfasadas entre si 180° e rondam os 4 A.

6.4 Interface Gráfica

Uma vez que os testes já foram iniciados e estes apresentam resultados muito extensivos foi criada uma interface gráfica que permite observar os valores adquiridos pelos sensores de tensão, corrente e temperaturas em tempo real. Além disso, foi efetuada a colocação de dois gráficos na interface que permitem exibir o valor da corrente e tensão ao longo do tempo. Tal é efetuado com o intuito de perceber se os processos de carga e descarga se encontram como o esperado. Além disso são criados, numa pasta a designar pelo utilizador, ficheiros de texto para guardar o valor existente em cada sensor do sistema com o intuito de, após finalizados os testes, transformar esses valores em gráficos, através da ferramenta *Microsoft Excel*. Em primeiro lugar, a Figura 5.30 apresenta o aspeto final da interface gráfica.

Como explicado anteriormente, uma vez iniciada, a interface gráfica antes de começar a aquisição de dados pede ao utilizador para definir o valor de *baudrate* utilizado na comunicação da porta serie e qual a porta COM que se encontra ligado ao microcontrolador, como se pode observar na Figura 5.35.

No caso de o utilizador inserir dados incorretos é visualizada uma mensagem de erro como se confirma na Figura 5.36.

A partir do momento em que o utilizador insere os dados certos encontra-se com a opção de começar ou parar a aquisição de dados. Como expectável, ao iniciar a aplicação, começa a

aquisição de dados e quando se pretender parar a aquisição de dados, tem de se dirigir à mesma janela e efetuar *stop*, como se verifica na Figura 6.14.



Figura 6.14 – Janela *start/stop* presente na interface gráfica desenvolvida.

Explicado a inicialização da aplicação, através da Figura 6.15 é possível mostrar o comportamento da interface durante uma descarga com 2 A. Como é visualizado, consegue-se extrair as informações mais importantes do funcionamento do sistema de carga/descarga em tempo real, tais como: se o sistema se encontra no modo de carga ou descarga, os valores da aquisição de dados em tempo real com um tempo de aquisição a definir pelo utilizador e dois gráficos que permitem ilustrar o comportamento da corrente e tensão em tempo real.



Figura 6.15 – Resultado final da interface gráfica em funcionamento.

6.5 Testes de Carga na Bateria

Como já referido anteriormente, depois de estudados os métodos de carga de baterias no estado da arte, concluiu-se que o método referente à bateria LiFePO_4 é corrente constante - tensão constante. Consequentemente, neste subcapítulo são exibidos os dados obtidos durante os processos de carga e as conclusões retiradas sobre os mesmos. Com o intuito de obter uma melhor compreensão, a carga da bateria foi dividida em duas partes: corrente constante e posteriormente tensão constante.

6.5.1 Corrente Constante

Inicialmente, antes de efetuar o processo de carga da bateria LiFePO_4 , é necessário a escolha de um valor para a corrente. Esta é efetuada através do programa *Code Composer Studio* em tempo real. Posteriormente, este valor é enviado de imediato ao DSP que através do controlo PI gera e envia os sinais de PWM necessários para a ativação dos IGBTs *S1* e *S3*. A bateria de LiFePO_4 utilizada nestes testes é de 100 Ah, ou seja, para esta ser carregada numa hora são necessários usar 100 A. Posto isto, este teste foi efetuado com uma taxa de carga de C/10, ou seja, 10 A, o que significa que o processo de carga possui um tempo próximo de dez horas. Como estes processos são muito demorados, o carregamento efetuado é iniciado com uma bateria com 3,3 V, 0,1 V a mais que a sua tensão nominal de 3,2 V. O processo de carga pode ser estudado através da Figura 6.16 que retrata o comportamento da corrente e da tensão na bateria ao longo do tempo, respetivamente.

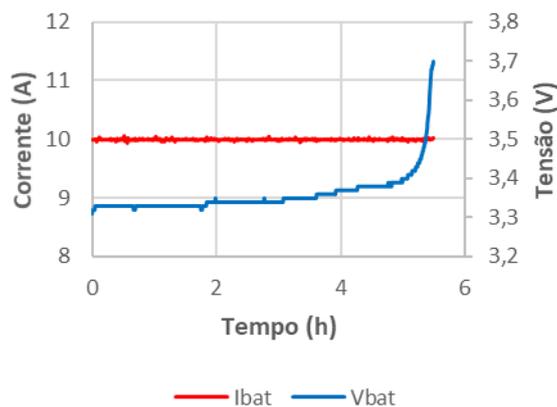


Figura 6.16 – Teste de carga efetuado a uma bateria de LiFePO_4 com uma corrente de 10 A.

Como se pode verificar, o teste efetuado possui um tempo de aproximadamente cinco horas e meia. Com base no estudo efetuado sobre os métodos de carregamento das baterias e através das simulações, o processo de carga foi de acordo com o expectável. Inicialmente é utilizada uma corrente constante de 10 A para carregar a bateria até que atinja o seu valor máximo de tensão de operação de 3,7 V [67]. Como expectável, ao longo do processo de carga o SoC da

bateria foi aumentando. Posteriormente, o sistema implementado ao verificar que a bateria atingiu o valor de 3,7 V faz com que o processo de carregamento com corrente constante seja parado, e conseqüentemente, o processo de carga com tensão constante seja iniciado. Também é possível reparar que a tensão aumenta aos degraus. Tal feito não ocorre na realidade e neste caso deve-se ao facto de os valores serem lidos apenas com duas casas decimais. Nos próximos testes que envolvam a tensão vai se observar a mesma situação, porém não é referido nada pois já foi explicado neste item.

Com o intuito de obter o máximo de dados sobre a bateria, durante este teste foi estudado o comportamento da temperatura na mesma, como ilustra a Figura 6.17. Posto isto, foram usados dois sensores de temperatura que medem a temperatura no meio ambiente e na bateria. Tal foi efetuado com o propósito de verificar se existe alguma discrepância ao longo do carregamento.

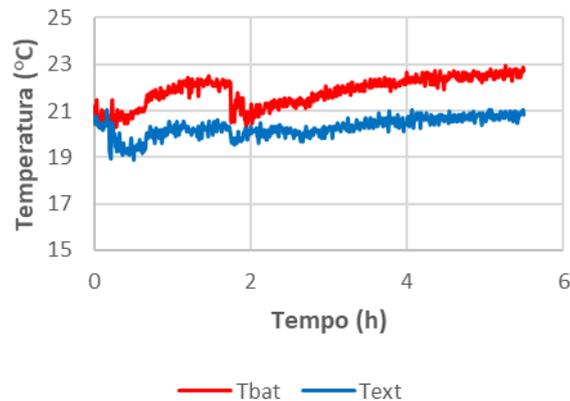


Figura 6.17 – Temperatura ambiente vs. Temperatura na bateria durante um teste de carga efetuado a uma bateria de LiFePO_4 com uma corrente de 10 A.

Ao longo do teste efetuado existe um ligeiro aumento em ambas as temperaturas devido ao aumento da temperatura no laboratório e não pelo processo de carga. Com isto, é possível entender que durante um carregamento completo com uma taxa de C/10 a bateria não sofre qualquer aumento de temperatura. Ao longo do mesmo teste também se extraiu informação referente à potência na bateria e como esta se desenvolve ao longo do tempo, exposto na Figura 6.18.

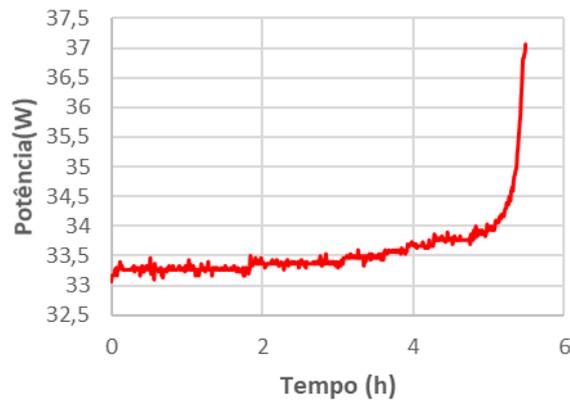


Figura 6.18 – Potência presente na bateria LiFePO₄ durante um teste de carga com uma corrente de 10 A.

Através da análise ao gráfico anterior, conclui-se que a potência aumenta proporcionalmente com o aumento da tensão aos terminais na bateria devido ao facto de a corrente se manter constante e com isto esta descreve um comportamento idêntico ao da tensão.

Por último foi recolhida a informação referente à eficiência do conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved* a atuar como *buck* com o método de corrente constante na Figura 6.19. Tal foi possível através da seguinte equação (6.1):

$$E = \frac{P_{entrada}}{P_{saída}} \quad (6.1)$$

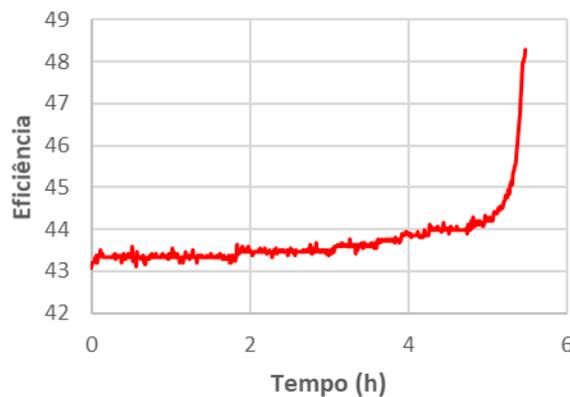


Figura 6.19 – Eficiência do conversor durante um teste de carga efetuado numa bateria de LiFePO₄ com uma corrente de 10 A.

Mais uma vez o comportamento da eficiência é idêntico ao da tensão e potência na bateria. Enquanto que a potência de saída aumenta com a tensão da bateria, a potência de entrada do conversor mantém-se sempre constante ao longo do tempo. Este valor foi calculado através da fonte de alimentação, que possuía uma tensão de 13,4 V e uma corrente de 5,71 A, originando uma potência de 76,5 W.

6.5.2 Tensão Constante

Uma vez que a bateria possui aos seus terminais uma tensão de 3,7 V, o carregamento por corrente constante é parado, dando início ao carregamento por tensão constante. Neste método a tensão da bateria mantém-se constante ao longo do carregamento com 3,7 V aos terminais da bateria, enquanto o valor da corrente vai diminuindo. Consequentemente, a bateria fica totalmente carregada quando o valor de corrente chega a zero. Na Figura 6.20 é perceptível a evolução da tensão e da corrente ao longo do tempo durante o teste de carregamento efetuado, respetivamente. É de enaltecer que este teste vem no seguimento do anterior, visto que o método de carga de uma bateria de LiFePO_4 é corrente constante - tensão constante.

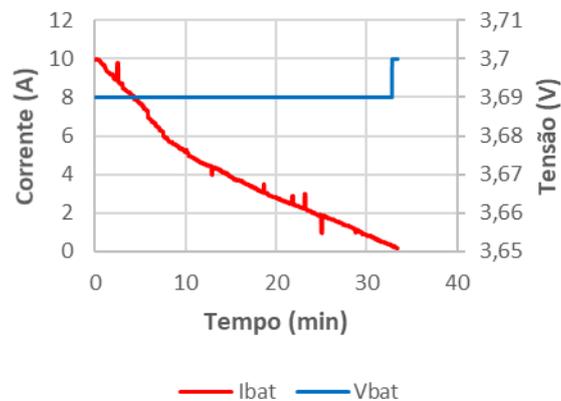


Figura 6.20 – Teste de carga efetuado a uma bateria de LiFePO_4 desde uma corrente de 10 A através do método de carga tensão constante.

A tensão manteve sempre um valor constante enquanto a corrente foi diminuindo, tal como esperado. Este teste demorou cerca de trinta e três minutos. Este tipo de carga efetuada através de tensão constante nunca vai ser igual de bateria para bateria, podendo em algumas demorar até várias horas e em outras ser um processo rápido. Tal não acontece quando é aplicado o método de corrente constante, em que é possível estimar o tempo de carga para diferentes tipos de corrente constante. Derivado ao facto de este teste vir no seguimento do processo de carga apresentado anteriormente, neste também são exibidos o comportamento da temperatura e a potência ao longo do tempo. Em primeiro lugar, através da Figura 6.21 é possível verificar a temperatura ambiente e a temperatura presente na bateria.

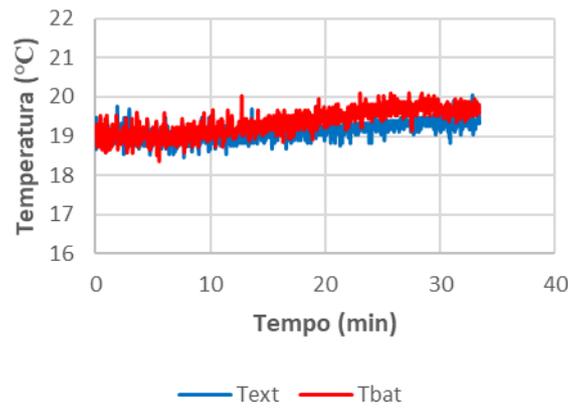


Figura 6.21 – Temperatura ambiente vs. Temperatura na bateria durante um teste de carga efetuado a uma bateria de LiFePO_4 desde uma corrente de 10 A através do método de carga tensão constante.

Como concluído anteriormente, a temperatura na bateria em relação ao ambiente mantém-se igual ao longo do processo de carga. Isto deve-se ao facto de a bateria não sofrer um aumento de temperatura para uma taxa de carga de $C/10$. De seguida, é ilustrada a potência na bateria ao longo de um carregamento com tensão constante, como se pode observar na Figura 6.22. A potência descreve uma linha semelhante ao da tensão constante, visto que a corrente se mantém sempre constante. Com base no facto de apenas ter sido utilizado um sensor de corrente na bateria e nenhum na fonte, no caso de tensão constante não é possível calcular a eficiência do conversor CC-CC utilizado devido a insuficiência de dados. Tal acontece, pois a fonte de alimentação fornece uma tensão constante de 13 V mas não é possível verificar o decréscimo da corrente que esta vai debitando ao longo do tempo, ao contrário do caso de corrente constante em que ambos os valores da tensão e da corrente fornecidos pela fonte que eram constantes.

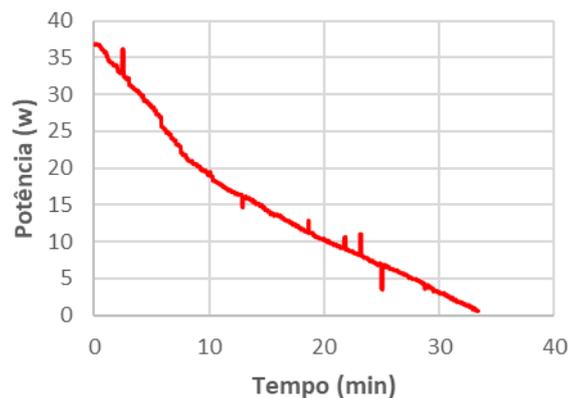


Figura 6.22 – Potência presente na bateria de LiFePO_4 durante um teste de carga desde uma corrente de 10 A através do método de carga tensão constante.

6.6 Testes de Descarga na Bateria

Inicialmente, é de referir que durante o processo de descarga o conversor CC-CC *buck-boost* utilizado atua como *boost*. Para a descarga da bateria foi escolhido o método de corrente constante. Ao contrário do modo de carregamento, esta bateria não tem um método de descarga próprio, pelo que também poderiam ser usados os métodos de potência constante e resistência constante. Como citado anteriormente, tanto em testes de carga como descarga é necessário despender várias horas devido à bateria possuir uma capacidade de 100 Ah. Com isto, durante o processo de descarga através de corrente constante foram efetuados três testes não completos com os seguintes valores de corrente: 2 A, 4 A e 8 A. Estes foram efetuados com o intuito de entender como a bateria reage ao longo dos mesmos, assim como também para obter a resistência interna com várias correntes de descarga.

Através do estudo do funcionamento do conversor CC-CC como *boost* efetuado no capítulo 4, é expectável que assim que a carga resistiva seja ligada ao conversor, este comece a conduzir imediatamente. Tal acontece derivado ao facto de no instante em inicial (enquanto os IGBTs estão desligados) a corrente fluir através dos díodos em antiparalelo dos semicondutores *S2* e *S4*. Consequentemente, a bateria encontra-se a ser descarregada através do método de descarga resistência constante. Assim que o modo de descarga é ativado através do DSP, os IGBTs *S2* e *S4* são ligados e é escolhido um valor de corrente para efetuar o processo de descarga com corrente constante. De seguida são exibidos os três testes de descarga efetuados. Na Figura 6.23 pode ver-se a corrente e a tensão na bateria com um valor de corrente de descarga de 2 A.

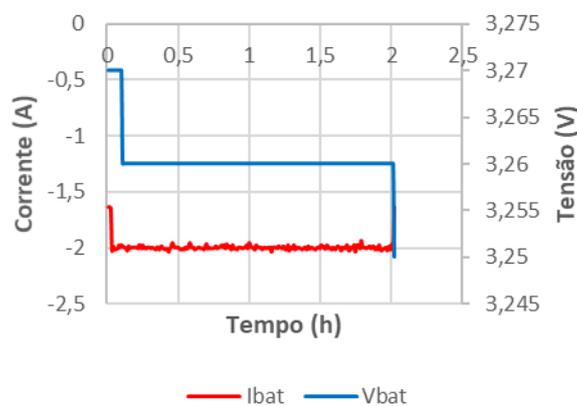


Figura 6.23 – Teste de descarga efetuado a uma bateria de LiFePO₄ com uma corrente de 2 A.

O teste efetuado demorou cerca de duas horas e foi efetuado como o esperado. É perceptível que enquanto os IGBTs se encontram desligados flui uma corrente de 1,6 A, enquanto que, ao serem ligados os semicondutores *S2* e *S4*, o conversor começa a conduzir uma corrente constante com o valor pedido de 2 A.

No segundo teste de descarga efetuado, é possível observar na Figura 6.24 a corrente de descarga de 4 A e a tensão na bateria.

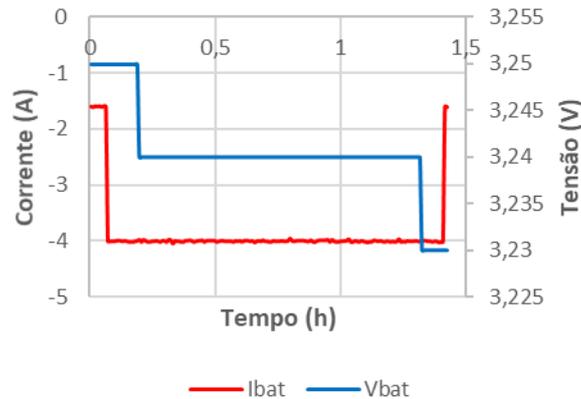


Figura 6.24 – Teste de descarga efetuado a uma bateria de LiFePO_4 com uma corrente de 4 A.

Finalizado o teste, é verifica-se que este demorou cerca de hora e meia. Assim como o anterior, foi efetuada uma descarga com uma corrente constante de 4 A, sendo que com os semicondutores inicialmente desligados o conversor encontra-se a conduzir uma corrente de aproximadamente 1,6 A. Ao serem ligados os IGBTs correspondentes à descarga, passa a fluir a corrente desejada com o valor de 4 A. Na Figura 6.25 é apresentada a corrente e a tensão do último teste de descarga efetuado, respetivamente, com uma corrente constante de 8 A.

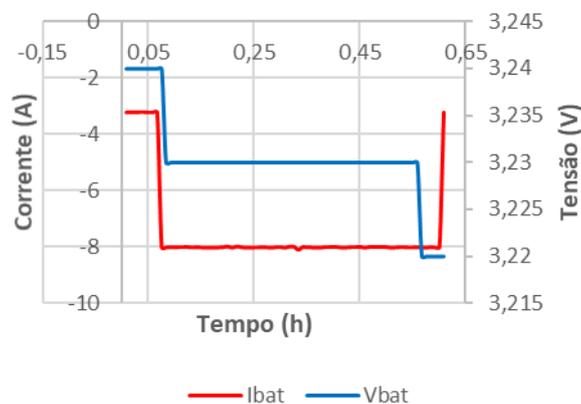


Figura 6.25 - Teste de descarga efetuado a uma bateria de LiFePO_4 com uma corrente de 8 A.

Como se pode constatar com a observação do gráfico, o teste foi realizado em cerca de trinta e cinco minutos com uma corrente constante de 8 A. Enquanto que os IGBTs se encontravam desligados fluíu uma corrente de 3,24 A.

Ao longo dos três processos de carga exibidos, a tensão na bateria desce cerca de 0,1 V. Concluindo, de forma expectável, ao aumentar o valor da corrente de descarga, a tensão na bateria diminui mais rápido.

De seguida é estudado o comportamento da temperatura na bateria ao longo dos testes de descarga efetuados. De maneira a verificar se existe um aumento da mesma são mostradas na Figura 6.26 as temperaturas para uma corrente de 2 A, na Figura 6.27 para 4 A e na Figura 6.28 para 8 A, respetivamente.

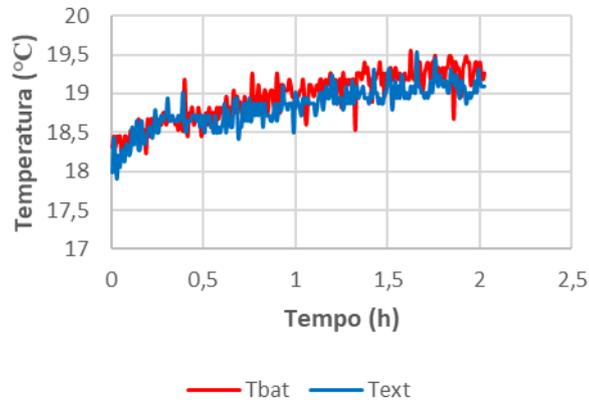


Figura 6.26 – Temperatura ambiente vs. Temperatura na bateria durante um teste de descarga efetuado a uma bateria de LiFePO₄ com uma corrente de 2 A.

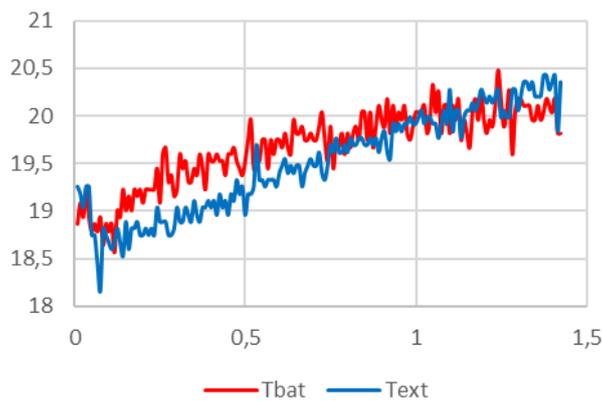


Figura 6.27 - Temperatura ambiente vs. Temperatura na bateria durante um teste de descarga efetuado a uma bateria de LiFePO₄ com uma corrente de 4 A.

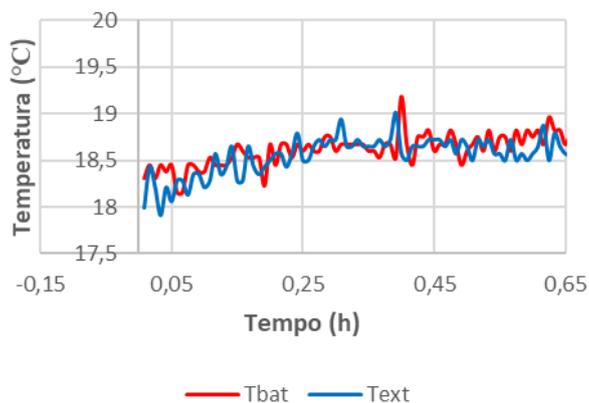


Figura 6.28 - Temperatura ambiente vs. Temperatura na bateria durante um teste de descarga efetuado a uma bateria de LiFePO₄ com uma corrente de 8 A.

Em ambos os casos a temperatura não aumenta. Concluindo assim que em uma descarga até com 8 A, a temperatura mantém-se constante na bateria. Para finalizar, são expostos de

seguida na Figura 6.29, na Figura 6.30 e na Figura 6.31 a potência na bateria para os processos de descarga de 2 A, 4 A e 8 A, respetivamente.

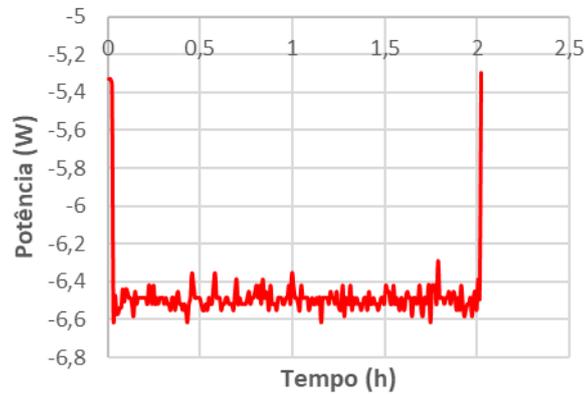


Figura 6.29 - Potência presente na bateria LiFePO₄ durante um teste de descarga com uma corrente de 2 A.

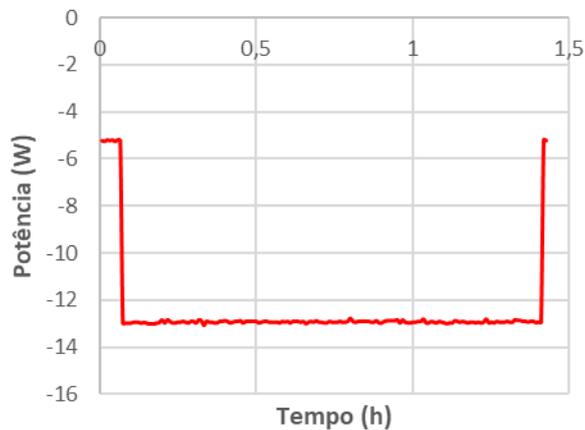


Figura 6.30 – Potência presente na bateria LiFePO₄ durante um teste de descarga com uma corrente de 4 A.

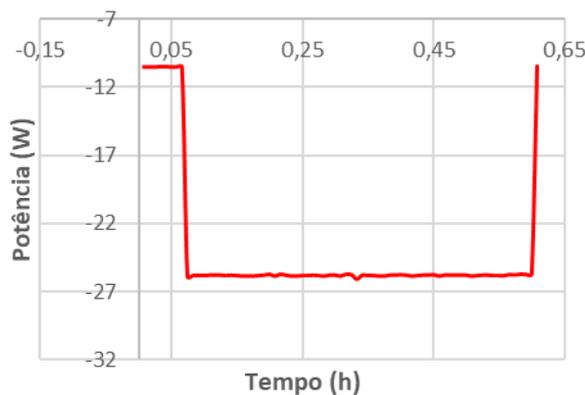


Figura 6.31 - Potência presente na bateria LiFePO₄ durante um teste de descarga com uma corrente de 8 A.

Tal como previsto quanto maior a corrente de descarga, maior a potência. Derivado do facto de a corrente ser constante, o gráfico correspondente à potência é semelhante ao da corrente.

6.7 Resistência Interna

Um dos parâmetros mais importantes sobre a bateria é a resistência interna. Tal deve-se ao facto de esta ser uma característica interna da mesma e que geralmente possui valores

diferentes de bateria para bateria e varia com o SoC. Segundo o *datasheet* [67], uma bateria de LiFePO_4 não possui um valor certo no que diz respeito à resistência interna, sendo que este pode variar entre vários valores abaixo ou igual a $1 \text{ m}\Omega$ quando esta se encontra como nova. Por outro lado, este parâmetro também é importante devido ao facto de aumentar com o tempo de uso da bateria, produzindo uma diminuição da sua eficiência [18]. Visto que cada bateria tem o seu valor de resistência interna e que este fator é derivado a vários aspetos, foram efetuados três testes de descarga com correntes diferentes citadas anteriormente, com o objetivo de determinar a resistência interna e tentar perceber em que estado é que se encontra a bateria.

Em primeiro lugar foi necessário estudar um método que permitisse o cálculo da resistência interna de uma bateria. Foram estudados vários processos sobre o mesmo, nomeadamente um recente, que foi desenvolvido pelo *Idaho National Laboratory* (INL) que descreve uma caixa que permite medir a resistência interna de uma bateria. Esta aplica à bateria em estudo um sinal que consiste em ondas sinusoidais que, posteriormente, recebe o resultado da resposta onde é analisada a sua impedância [69]. O problema destes testes é que necessitam de hardware e algoritmos muito complexos, pelo que exigiria um estudo profundo e extenso sobre a matéria em causa. Posto isto, foram pesquisados outros processos mais simples, porém estes não são tão favoráveis como o anterior. Através do estudo de [70], foi usado um método com base na lei de Ohm que pode ser observado através da equação (6.2):

$$R_i = \frac{E - V_{ab}}{I} \quad (6.2)$$

Em que R_i é a resistência interna da bateria, E é a tensão da bateria em aberto, V_{ab} é a tensão da bateria com uma determinada carga e I é a corrente com a respetiva carga.

De seguida são ilustrados os testes efetuados para uma descarga com 2 A, 4 A e 8 A, respetivamente:

- Teste 1

$$R_i = \frac{3.263 \text{ V} - 3.259 \text{ V}}{2 \text{ A}} = 1.5 \text{ m}\Omega$$

- Teste 2

$$R_i = \frac{3.247 \text{ V} - 3.239 \text{ V}}{4 \text{ A}} = 2 \text{ m}\Omega$$

- Teste 3

$$R_i = \frac{3.241 \text{ V} - 3.229 \text{ V}}{8 \text{ A}} = 1.5 \text{ m}\Omega$$

Uma vez analisados os testes, é possível concluir que os valores da resistência interna na bateria de LiFePO_4 em teste não variam consideravelmente e não ultrapassam muito o valor

máximo definido pelo *datasheet* da mesma. Com base no facto de a bateria já não ser nova pode-se concluir que esta se encontra num bom estado, visto que a sua resistência interna não sofreu um aumento muito significativo.

6.8 AutoDescarga

Como o objetivo de uma bateria secundária é poder usar a mesma sem estar a ser carregada, é importante saber se esta possui uma taxa de autodescarga elevada. De maneira a efetuar um estudo sobre este tópico, foi medida a tensão em aberto durante 43 dias em duas baterias de LiFePO_4 com o intuito de entender a sua evolução como se verifica na Figura 6.32.

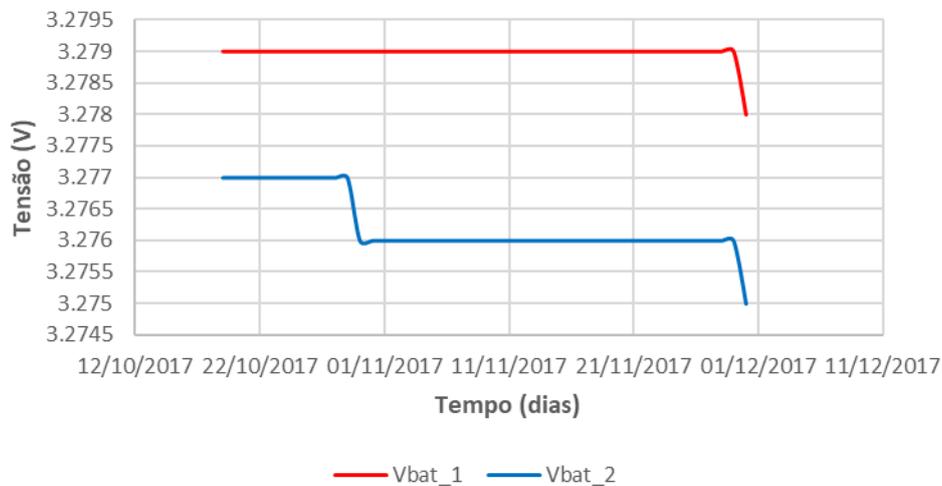


Figura 6.32 – Resultado experimental da autodescarga presente em duas baterias distintas.

De acordo com o *datasheet* da bateria [67], a sua autodescarga por mês apresenta uma taxa inferior a 3%. O intervalo entre a tensão mínima (2,8 V) e máxima (3,7 V) numa bateria de LiFePO_4 é de 0,9 V, sendo que 3% desse valor é cerca de 0,027 V. Através da análise do gráfico constata-se que a primeira bateria em cerca de quarenta e um dias apresentou uma queda de 0,001 V, o que representa uma taxa de autodescarga de 0,111%, enquanto a segunda bateria após ter uma queda de 0,001 V no décimo terceiro dia, apenas apresentou uma queda de 0,001 V nos seguintes 31 dias. Ou seja, a segunda bateria apresentou uma taxa de autodescarga de 0,111 % num mês. Posto isto, é possível concluir que a bateria 1 se apresenta em melhor estado que a segunda pois necessitou de mais dias para ter a mesma queda que a segunda. Por outro lado, ambas as baterias apresentam-se em bom estado com uma taxa de autodescarga dentro da gama estipulada no *datasheet* [67].

6.9 Conclusões

No presente capítulo foram apresentados os resultados laboratoriais efetuados ao implementado, assim como testes de carga e descarga efetuados a uma bateria do tipo LiFePO_4 .

Inicialmente, foi efetuada a validação da placa de condicionamento de sinal, a placa de circuito de *driver* e por último o conversor CC-CC *buck-boost* com a topologia *interleaved*. De maneira a validar o conversor sem danificar a bateria, primeiramente este foi testado com uma carga resistiva. Após a verificação do seu bom funcionamento foi ligada a bateria de modo a efetuar os vários testes. Como esperado, o conversor apresentou um funcionamento idêntico ao obtido através das simulações, assim como o código implementado no DSP respetivo ao controlo aplicado foi o mesmo utilizado para efetuar as simulações, à exceção que apenas foi preciso mudar os valores dos ganhos K_p e K_i .

Com a intenção de existir uma melhor compreensão sobre o comportamento da tensão e corrente na bateria durante os processos variados testes efetuados por parte do utilizador, foi criada uma aplicação com interface gráfica. Através desta é possível observar os dados recolhidos pelos sensores em tempo real com um tempo de amostragem a ser escolhido. Também se pode analisar os seguintes dois gráficos: tensão na bateria *vs.* amostras e corrente na bateria *vs.* amostras. Aparte da interface gráfica, a aplicação guarda os valores recolhidos pelos sensores, em tempo real, em ficheiros de texto distintos. Estes valores são posteriormente copiados para o programa *Microsoft Excel* com o intuito de visualizar os dados recolhidos através de gráficos.

Durante os testes efetuados à bateria, o conversor CC-CC atuou nos seus dois modos de operação. Durante a carga da bateria este atuou como *buck* e o método de carregamento escolhido foi corrente constante - tensão constante. Por outro lado, na descarga o conversor CC-CC atuou como *boost* e o método de descarga escolhido foi corrente constante. Em ambos os métodos anteriores foi usado um controlo PI.

Os processos de carga efetuados na bateria foram obtidos como esperado. Nestes a bateria é inicialmente carregada com uma corrente constante até atingir uma tensão aos seus terminais de 3,7 V. Quanto esta é atingida, o método de corrente constante é interrompido e inicia-se o método de tensão constante. Neste último método, a bateria carrega com uma tensão constante e o processo de carga é parado quando a corrente na bateria atinge o valor zero. Nos testes de carga também foram recolhidos os dados da temperatura e da potência ao longo do processo. Infelizmente, devido não foi possível efetuar testes completos pois estes

necessitavam de longos períodos de tempo. No entanto, foi carregada uma bateria a partir da sua tensão nominal e foi possível observar os dois métodos de carga aplicados e como a bateria reage aos mesmos, que era o pretendido.

Os testes de descarga aplicados à bateria também foram de acordo com o esperado, como se tinha previsto nas simulações. Nesta parte foram mostrados três testes de descarga com valores distintos: 2 A, 4 A e 8 A. Em ambos os três testes a descarga é efetuada com uma corrente constante enquanto que a tensão da bateria vai diminuindo. Assim como na carga, também foi estudado o comportamento da temperatura e da potência na bateria ao longo dos mesmos. Através destes testes também foi calculada a resistência interna presente na bateria para cada um deles. Com os valores obtidos apercebe-se que a bateria não se encontra num estado muito deteriorado. Como previsível, tanto na carga e na descarga, quanto maior o valor da corrente aplicada à bateria menor vai ser o seu tempo de carga ou descarga.

Posteriormente, foi efetuado um teste sobre a taxa de autodescarga nas baterias de LiFePO_4 . Este foi composto pela medição da tensão das baterias em aberto durante um período de 43 dias, concluindo assim que as baterias em causa apresentam uma taxa de autodescarga que se encontra no intervalo estipulado pelo fabricante. Com base nisto, é possível afirmar que as baterias em teste encontram-se em bom estado.

Capítulo 7

Conclusões

7.1 Conclusões

Na sociedade moderna cada vez mais se usufrui de vários tipos de tecnologias em diversas áreas como a educação, saúde ou transporte. Consequentemente, é necessário encontrar um meio de alimentação para esses produtos ou serviços funcionarem. Atualmente, é utilizado na sua grande maioria combustíveis fósseis que, derivado ao facto de serem recursos limitados e a sua utilização constituir uma grande ameaça para o meio ambiente, devido à poluição, surge a necessidade de encontrar recursos não poluentes. Posto isto, cada vez mais existe uma demanda e uma preocupação com a procura e uso de energias renováveis. Contudo, existe um enorme número de equipamentos eletrónicos portáteis que necessitam de uma bateria que por sua vez não sejam poluentes. É derivado a isso, que esta dissertação de mestrado se baseia numa melhor compreensão sobre as baterias de LiFePO_4 e na conceção de um dispositivo eficiente que permita efetuar cargas e descargas. Com base nisso surge o tema desta dissertação que visa a implementação de um sistema bidirecional de carga e descarga de baterias do tipo LiFePO_4 com o intuito de obter uma caracterização sobre a mesma.

Numa fase inicial, através do capítulo 2 foi elaborada uma revisão sobre os diferentes tipos de baterias secundárias existentes no mercado. Com base nesse estudo conclui-se que o tipo de bateria a ser utilizado neste projeto é o que apresenta não só menos perigo para o meio ambiente, como também um maior número de vantagens comparado com as outras tecnologias. Posteriormente foi efetuada uma análise aos vários modelos de simulação de uma bateria de LiFePO_4 , no qual foi utilizado o modelo elétrico de uma bateria pois é o que melhor se adequa a compreender o seu comportamento elétrico. Como se pretende efetuar vários processos de carga e descarga à bateria em questão, é imperativo saber que método se deve aplicar à mesma no caso de uma carga e uma descarga. Após o estudo, conclui-se que, relativamente à carga, o método a ser usado neste tipo de bateria é corrente constante-tensão constante e, no que diz respeito à descarga, é possível aplicar qualquer tipo de método estudado, embora neste caso seja aplicado corrente constante.

Finalizado o estudo das baterias, no capítulo 3 que é efetuado o estudo e análise da topologia de conversor CC-CC a ser aplicado no carregador a desenvolver. Como se pretende efetuar a carga e descarga, é necessário que o conversor a utilizar seja bidirecional, ou seja, funcione em dois sentidos. Neste estudo foi tido em conta a implementação de um sistema de carga e descarga eficiente e económico, sendo que foi também estudada uma topologia chamada *interleaved*. Esta utiliza o dobro dos componentes em relação às topologias convencionais, mas por outro lado estes não precisam de suportar correntes tão grandes, logo serão mais leves e baratos. Posto isto, foi efetuada uma análise às diversas topologias de conversores CC-CC para carga e descarga de baterias. Neste capítulo foram abordados e explicados os vários tipos de conversores CC-CC e o escolhido foi o conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved*.

De seguida, no capítulo 4 foi usada uma ferramenta de simulação computacional de maneira a atestar o funcionamento do sistema de eletrónica de potência e o seu controlo. Neste ponto, foi simulado o sistema completo a implementar, desde o circuito de potência, o código no microcontrolador e o sistema de controlo relativamente ao conversor CC-CC *buck-boost* e CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved*. Com base nas simulações efetuadas, conclui-se que a melhor escolha trata-se do conversor com topologia *interleaved* devido ao facto de este apresentar um *ripple* menor na corrente e não necessitar de componentes tão grandes e caros que suportem correntes mais elevadas.

O capítulo 5 é dedicado a apresentar e explicar todos os elementos constituintes do sistema de carga e descarga a implementar. Numa primeira fase é esclarecido todo o sistema de controlo presente no carregador, desde a parte de *hardware* presente na placa de condicionamento de sinal, proteção e comando até à parte de software presente no microcontrolador que recorre ao controlo PI para carregar a bateria com uma corrente constante-tensão constante e descarregar a mesma com uma corrente constante. Relativamente ao circuito de potência, são expostos todos os componentes que integram o conversor e finalmente é explicado como foi desenvolvida uma aplicação com interface gráfica e o seu propósito no sistema.

Por último, no capítulo 6 são exibidos os resultados experimentais referentes ao sistema de carga e descarga desenvolvido. Primeiramente, foi dado ênfase à validação dos componentes do carregador, desde a placa de *driver* e condicionamento de sinal, proteção e comando ao conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved*. Posteriormente, com o conversor já validado foi explicado o seu funcionamento nos seus dois modos: *buck* e *boost*. De seguida recorreu-se a processos de carga e descarga sobre a bateria com o intuito de entender como

variava a tensão aos seus terminais e tirar conclusões sobre os testes efetuados. Relativamente à carga na bateria, foi efetuado um teste com uma corrente de 10 A para o caso de corrente constante e, posteriormente, tensão constante. Nestes, foi averiguado como aumentava a tensão na mesma, assim como o comportamento da sua temperatura em relação com o meio ambiente, a potência e eficiência do seu processo de carga. Relativamente ao processo de descarga, foram efetuados três testes com valores de corrente de 2 A, 4 A e 8 A. Nestes foram tidos em consideração os mesmos aspetos que no processo de carga, à exceção da eficiência do processo de descarga. Para finalizar, através destes testes foi retirada a resistência interna na bateria e foi efetuado um teste de autodescarga a duas baterias com o intuito de perceber como a sua tensão variava ao longo de quarenta e três dias.

A recolha dos dados foi efetuada com base numa aplicação que guarda os dados da corrente, tensão e temperatura na bateria ao longo dos testes efetuados para mais tarde ser possível obter uma análise dos mesmos. Concluindo, foi possível atestar o funcionamento do conversor CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved*, assim como também as técnicas de carga e descarga efetuados pelo mesmo, pois tanto o seu funcionamento como os resultados obtidos sobre os testes foram de acordo com o esperado. Assim sendo, pode constatar-se que o balanço do trabalho efetuado foi bastante positivo.

A nível pessoal, o trabalho desenvolvido permitiu adquirir competências no âmbito de revisão bibliográfica, nomeadamente acerca de tecnologias de baterias e topologias de conversores CC-CC, permitindo também aprimorar competências no que diz respeito a simulações computacionais e aguçar o espírito crítico em relação às diferentes topologias de conversores estudadas. Para além disso, foi desenvolvida uma habilidade significativa no dimensionamento de circuitos de condicionamento de sinal e desenho de PCBs, sendo que na presente dissertação foi desenvolvida uma PCB única visando ocupar a menor área possível e simultaneamente englobar todas as funcionalidades requeridas para o bom funcionamento do protótipo. Por fim, esta dissertação permitiu também aumentar o leque de conhecimento de linguagens de programação, visto que o controlo do conversor foi implementado em C++ e a aplicação com interface gráfica foi implementada com base na linguagem *python*, a qual requereu uma aprendizagem do zero ao longo do trabalho.

7.2 Sugestões para Trabalho Futuro

O projeto desenvolvido ao longo desta dissertação permitiu a validação de um sistema de carga e descarga de baterias do tipo LiFePO_4 que se baseia num conversor bidirecional CC-CC *buck-boost* com topologia *interleaved* com recurso a uma aplicação com interface gráfica. No entanto, existem determinados aspetos que se devem melhorar com o intuito de aumentar o desempenho e eficiência do sistema.

Inicialmente, é necessário fazer a migração do código implementado no microcontrolador *TMS320F28027* da *Texas Instruments* para o microcontrolador *TMS320F28335* também da *Texas Instruments*. Tal é feito derivado à segunda placa possuir uma memória bastante superior à utilizada, não dificultando a escrita do código por problemas de memória cheia. Seria também efetuada uma otimização ao código implementado no microcontrolador de maneira a ocupar o menos espaço possível e por sua vez ser mais eficiente. Por outro lado, o microcontrolador *TMS320F28335* também possui uma maior capacidade de processamento de dados e um maior número de canais de ADC. Posto isto, seria muito útil para o sistema usufruir de um acréscimo de sensores. Para além de mais dois sensores de corrente, a incluir em cada bobina do conversor, seriam também acrescentados dois sensores, um de tensão e outro de corrente, na fonte de alimentação com o objetivo de calcular o rendimento do sistema ao efetuar diferentes cargas e descargas à bateria. Derivado ao aumento do número de sensores a implementar no sistema, seria necessário refazer a placa de condicionamento de sinal, proteção e comando de modo a suportar mais ADCs. Outra sugestão seria implementar novos algoritmos no código do microcontrolador para efetuar uma obtenção de outras características mais complexas da bateria de LiFePO_4 .

No que diz respeito à aplicação com interface gráfica desenvolvida, seria implementado um novo sistema na mesma que permita ao utilizador controlar todo o sistema sem recorrer à ferramenta *Code Composer Studio*. Com isto, seria possível através da interface gráfica ativar e desativar os modos de carga e descarga e poder controlar o valor da corrente na bateria.

Por último, seriam aplicadas novas técnicas de carga e descarga ao sistema desenvolvido com o intuito de este suportar outras tecnologias de baterias.

Lista de Referências

- [1] B. Meyerson, “Top 10 emerging technologies of 2015,” 2015. [Online]. Available: <https://www.weforum.org/agenda/2015/03/top-10-emerging-technologies-of-2015-2/>. [Accessed: 15-Nov-2017]
- [2] M. D. Bartels, “Aumenta consumo mundial de combustíveis fósseis,” 2013. [Online]. Available: <http://www.dw.com/pt-br/aumenta-consumo-mundial-de-combustiveis-fosseis/a-16654031>. [Accessed: 15-Nov-2017]
- [3] Robert A. Huggins, *Advanced batteries: Materials Science Aspects*. New York: Springer Science & Business Media., 2008. DOI: 10.1007/978-0-387-76424-5.
- [4] I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas, and V. Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 6–7, pp.1513–1522, 2009. DOI: 10.1016/j.rser.2008.09.028.
- [5] DGEG, “Renováveis - estatísticas rápidas - nº 147,” 2017 [Online]. Available: <http://www.apren.pt/contents/publicationsothers/estatisticas-rapidas--renovaveis-janeiro-2017-dgeg.pdf>
- [6] DGEG, “Renováveis - estatísticas rápidas - nº 157,” 2017 [Online]. Available: <http://www.apren.pt/contents/publicationsothers/estatisticas-rapidas--renovaveis-novembro-2017-dgeg.pdf>
- [7] J. Jung, “Armazenamento de Energia em Smart Grids” (Master Thesis), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- [8] K. W. Hu and C. M. Liaw, “On a bidirectional adapter with G2B charging and B2X emergency discharging functions,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 1, pp.243–257, 2014. DOI: 10.1109/TIE.2013.2245618.
- [9] V. M. Péres, M. V. B. Campos, and . T. Iian., “Smart Grid: Uma Possibilidade Para a Distribuição Elétrica Brasileira,” vol. 1, p.13, 2014 [Online]. Available: <http://www2.ifma.edu.br/revistainnover/Nova/index.php/inicio/article/download/52/34>
- [10] D. Linden and T. B. Reddy, *Handbook of Batteries*, 3rd Edition. New York: McGraw-Hill Companies, Inc, 2002. ISBN: 0-07-135978-8
- [11] STA - Sistemas e Tecnologia Aplicada, “Manual das Baterias Recarregáveis, Pilhas e Carregadores” [Online]. Available: www.sta-eletronica.com.br/resources/downloads/manual.pdf
- [12] H. A. Kiehne, *Battery Technology Handbook*, 2nd Editio. Renningen-Malsheim, Germany: Marcel Dekker Inc., 2003.
- [13] R. C. Kroeze and P. T. Krein, “Electrical Battery Model for Use in Dynamic Electric Vehicle Simulations,” *Power Electron. Spec. Conf.*, pp.1336–1342, 2008 [Online]. DOI: 10.1109/PESC.2008.4592119.
- [14] C. M. D. Porciuncula, “Aplicação de Modelos Elétricos de Bateria na Predição do Tempo de Vida de Dispositivos Móveis,” Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2012.
- [15] M. A. Roscher, J. Assfalg, and O. S. Bohlen, “Detection of utilizable capacity deterioration in battery systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 1, pp.98–103, 2011. DOI: 10.1109/TVT.2010.2090370.
- [16] S. M. Lukic and A. Emadi, “Charging ahead: The development of adequate energy storage systems in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles,” *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 2, no. 4, pp.22–31, 2008. DOI: 10.1109/MIE.2008.930361.

- [17] K. Young, C. Wang, L. Y. Wang, and K. Strunz, “Electric Vehicle Battery Technologies - Chap 2,” in *Power Electronics and Power Systems*, R. Garcia-Valle and J.A. Peças Lopes (eds.), Ed. Springer, 2013, p.325 [Online]. DOI: 10.1007/978-1-4614-0134-6_2.
- [18] MIT, “A Guide to Understanding Battery Specifications,” 2008 [Online]. Available: http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf
- [19] “Components of PV Systems,” [Online]. Available: https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/solar_energy_section_19_3_3.pdf
- [20] Bosch, “Manual De Baterias Bosch,” São Paulo, 2007 [Online]. Available: http://br.bosch-automotive.com/media/parts/download_2/baterias/Manual_de_Baterias_Bosch_6_008_FP1728_04_2007.pdf
- [21] Energizer, “Nickel Metal Hydride (NiMH),” 2010 [Online]. Available: http://data.energizer.com/pdfs/nickelmetalhydride_appman.pdf
- [22] Energizer, “Battery Internal Resistance,” 2005 [Online]. Available: <http://data.energizer.com/pdfs/batteryir.pdf>
- [23] T. R. Crompton, *Battery Reference Book*, 3rd Editio. Newnes, 2000.
- [24] “Is Lithium-ion the Ideal Battery?,” *Battery University Group*. [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/index.php/learn/archive/is_lithium_ion_the_ideal_battery. [Accessed: 10-Jan-2017]
- [25] J. W. Stevens and G. P. Corey, “A study of lead-acid battery efficiency near top-of-charge and the impact on PV system design,” *Photovolt. Spec. Conf. 1996, Conf. Rec. Twenty Fifth IEEE*, pp.1485–1488, 1996. DOI: 10.1109/PVSC.1996.564417.
- [26] “What’s the Best Battery?,” *Battery University Group*. [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/archive/whats_the_best_battery. [Accessed: 30-Jan-2017]
- [27] J. Tarabay and N. Karami, “Nickel Metal Hydride Battery: Structure, Chemical Reaction, and Circuit Model,” in *IEEE 2015 Third International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAECE)*, 2015, pp.22–26. DOI: 10.1109/TAECE.2015.7113594.
- [28] “BU-203: Nickel-based Batteries,” *Battery University Group*. [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/nickel_based_batteries. [Accessed: 04-Feb-2017]
- [29] A. Manthiram, “Phospho-olivine cathodes for lithium-ion batteries,” *Electrochem. Soc. Interface*, vol. 18, no. 1, pp.44–47, 2009 [Online]. Available: https://www.electrochem.org/dl/interface/spr/spr09/spr09_p05.pdf
- [30] K. Vitols, “Efficiency of LiFePO₄ battery and charger with passive balancing,” in *Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering, AIEEE 2015 - Proceedings of the 2015 IEEE 3rd Workshop*, 2015. DOI: 10.1109/AIEEE.2015.7367295.
- [31] J. Lopez, M. Gonzalez, J. C. Viera, and C. Blanco, “Fast-charge in lithium-ion batteries for portable applications,” *INTELEC 2004. 26th Annu. Int. Telecommun. Energy Conf.*, pp.19–24, 2004. DOI: 10.1109/INTLEC.2004.1401439.
- [32] A. Emadi, *Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives*. Taylor and Francis, 2005.
- [33] D. I. Stroe, M. Swierczynski, A. I. Stroe, R. Laerke, P. C. Kjaer, and R. Teodorescu, “Degradation Behavior of Lithium-Ion Batteries Based on Lifetime Models and Field Measured Frequency Regulation Mission Profile,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 6, pp.5009–5018, 2016. DOI: 10.1109/TIA.2016.2597120.
- [34] J. Larminie and J. Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*. John Wiley & Sons, Ltd, 2003 [Online]. DOI: 10.1002/0470090707.
- [35] D. Magalhães, “O que é o BMS?” [Online]. Available: https://paginas.fe.up.pt/~ee05223/?page_id=122. [Accessed: 08-Feb-2017]
- [36] M. Chen and G. A. Rincón-Mora, “Accurate electrical battery model capable of predicting

- runtime and I-V performance,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 21, no. 2, pp.504–511, 2006. DOI: 10.1109/TEC.2006.874229.
- [37] J. Wang, Z. Sun, and X. Wei, “Performance and characteristic research in LiFePO₄ battery for electric vehicle applications,” *5th IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC '09*, vol. 4, no. 1, pp.1657–1661, 2009. DOI: 10.1109/VPPC.2009.5289664.
- [38] “Types of Lithium-ion,” *Battery University Group*. [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion. [Accessed: 30-Jan-2017]
- [39] M. Oswal, J. Paul, and R. Zhao, “A Comparative Study of Lithium-Ion Batteries.,” *Univ. South Calif.*, p.31, 2010 [Online]. Available: http://www-scf.usc.edu/~rzhao/LFP_study.pdf
- [40] C.-C. H. C.-C. Hua and M.-Y. L. M.-Y. Lin, “A study of charging control of lead-acid battery for electric vehicles,” *ISIE'2000. Proc. 2000 IEEE Int. Symp. Ind. Electron. (Cat. No.00TH8543)*, vol. 1, pp.135–140, 2000. DOI: 10.1109/ISIE.2000.930500.
- [41] I. C&D Technologies, “Charging of valve regulated lead acid batteries,” 1995 [Online]. Available: https://www.cdtechno.com/pdf/ref/41_2128_0212.pdf
- [42] Panasonic, “Charging Methods: Methods of Charging the Valve-Regulated Lead-Acid Battery For,” 2005 [Online]. Available: <http://industrial.panasonic.com/cdbs/www-data/pdf/ACD4000/ACD4000PE4.pdf>
- [43] R. Baroody, “Evaluation of Rapid Electric Battery Charging Techniques,” University of Nevada, Las Vegas, 2005.
- [44] B. Nguyen, “Advanced Battery Charging Techniques: Pulse-Charging in Large-Scale Applications – Design of Divide and Conquer Technique for High-Capacity Batteries,” *Multinatl. Monit.*, vol. 23, no. 10/11, p.16, 2002 [Online]. DOI: 10.1007/SpringerReference_61977.
- [45] S. Y. Fan, G. K. Chang, and S. Y. Tseng, “A reflex charger realized by multi-interleaved buck-boost converters,” *Proc. 2011 6th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl. ICIEA 2011*, pp.1215–1220, 2011. DOI: 10.1109/ICIEA.2011.5975771.
- [46] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design.*, 3rd ed. JOHN WILEY & SONS, INC., 2003. DOI: 10.3103/S1068371208100015.
- [47] V. Monteiro, H. Gonçalves, J. C. Ferreira, and J. L. Afonso, “Batteries Charging Systems for Electric and Plug-In Hybrid Electric Vehicles,” *New Adv. Veh. Technol. Automot. Eng.*, pp.149–168, 2012. DOI: 10.5772/45791.
- [48] E. Arango, C. A. Ramos-paja, J. Calvente, R. Giral, and S. Serna, “Asymmetrical Interleaved DC/DC Switching Converters for Photovoltaic and Fuel Cell Applications—Part 1: Circuit Generation, Analysis and Design,” pp.4590–4623, 2012. DOI: 10.3390/en5114590.
- [49] S. Banerjee, S. Member, A. Ghosh, S. Member, and N. Rana, “Design and Fabrication of Closed Loop Two-Phase Interleaved Boost Converter with Type-III Controller,” pp.3331–3336, 2016. DOI: 10.1109/IECON.2016.7793377.
- [50] G. Valbuena and E. Mojica-nava, “Digital Control for an Interleaved Boost Converter in a DC Microgrid,” *Robot. Autom. (CCRA), IEEE Colomb. Conf.*, vol. 111, no. 1, pp.1–6. DOI: 10.1109/CCRA.2016.7811406.
- [51] Muhammad H. Rashid, *Power electronics handbook: devices, circuits and applications.*, 3rd ed. Elsevier, 2011. DOI: 10.1016/B978-0-12-382036-5.00034-3.
- [52] J. a Pomilio, “Topologias Básicas de Conversores CC-CC Não-Isolados” [Online]. Available: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/FILES/CAP1.pdf>
- [53] D. C. Erb, O. C. Onar, and A. Khaligh, “Bi-Directional Charging Topologies for Plug-in Hybrid Electric Vehicles,” *Appl. Power Electron. Conf. Expo. (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annu. IEEE*, pp.2066–2072, 2010. DOI: 10.1109/APEC.2010.5433520.

- [54] S.-H. B. and C.-Y. Bong-Yeon Choil, Soon-Ryung Lee, Jong-Young Leel, “Design of Soft-Switching Interleaved Buck and Boost Converter for vehicle application,” *Transp. Electrif. Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2016 IEEE Conf. Expo*, pp.290–295, 2016. DOI: 10.1109/ITEC-AP.2016.7512965.
- [55] ChenYang, “Hall Effect Voltage Sensor CYHVS025A,” 2016 [Online]. Available: <http://www.hallsensors.de/CYHVS025A.pdf>
- [56] LEM Components, “Current Transducer LA 55-P” [Online]. Available: http://www.lem.com/docs/products/la_55-p_e.pdf
- [57] T. Instruments, “LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors,” 2000 [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>
- [58] ST, “L78xx L78xxC,” 2007 [Online]. Available: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/206450/STMICROELECTRONICS/L7805CV.html>
- [59] T. Instruments, “LM1117 800-mA Low-Dropout Linear Regulator,” 2016 [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1117.pdf>
- [60] L. Technology, “LT1009 Series 2.5V Reference” [Online]. Available: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1009ff.pdf>
- [61] T. Instruments, “LMx39x , LM2901xx Quad Differential Comparators,” 2015 [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm139a.pdf>
- [62] T. Instruments, “xx555 Precision Timers,” 2014 [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne555.pdf>
- [63] T. Instruments, “CD4504B Types,” 2004 [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd4504b.pdf>
- [64] Semikron, “SKHI 21/22,” 2008 [Online]. Available: <https://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-datasheet-skhi-22-a-b-r-15012521/>
- [65] T. Instruments, “TMS320F2802x Piccolo™ Microcontrollers,” 2016 [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28027.pdf>
- [66] Semikron, “SKM 100GB176D,” 2010 [Online]. Available: <https://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-datasheet-skm100gb176d-22890855/>
- [67] GWL Power, “The summary of the technical specification for WN-models of LiFePO4 cells,” 2012 [Online]. Available: <http://gwl-power.tumblr.com/post/32601710468/the-summary-of-the-technical-specification>
- [68] T. Instruments, “Picolo Serial Communications Interface (SCI) Reference Guide,” 2009 [Online]. Available: https://mil.ufl.edu/3744/docs/TI_DSP/TI-docs/spru566i.pdf
- [69] B. Schweber, “Advanced System Measures Battery Impedance While in Use,” 2017. [Online]. Available: <http://www.powerelectronics.com/power-management/advanced-system-measures-battery-impedance-while-use>. [Accessed: 24-Nov-2017]
- [70] H.-G. Schweiger *et al.*, “Comparison of Several Methods for Determining the Internal Resistance of Lithium Ion Cells,” *Sensors*, no. 10, pp.5604–5625, 2010. DOI: 10.3390/s100605604.