

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Pedro Jorge Oliveira Alves

Desenvolvimento de um Sistema Ativo de
Gestão de Baterias para Aplicações de
Mobilidade Elétrica



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Pedro Jorge Oliveira Alves

Desenvolvimento de um Sistema Ativo de
Gestão de Baterias para Aplicações de
Mobilidade Elétrica

Dissertação de Mestrado
Mestre em Engenharia Eletrónica e de Computadores

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor João Luiz Afonso

DECLARAÇÃO

Pedro Jorge Oliveira Alves

Endereço eletrónico: a58737@dei.uminho.pt Telefone: +351910620279

Número do Bilhete de Identidade: 13947428

Título da Tese:

Desenvolvimento de um Sistema Ativo de Gestão de Baterias para Aplicações de Mobilidade Elétrica

Orientador:

Doutor João Luiz Afonso

Ano de conclusão: 2015

Tese 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: _____

"Tente não se tornar um homem de sucesso, mas sim um homem de valor."

Albert Einstein

"No início vai parecer difícil, mas tudo é difícil no início."

Miyamoto Musashi

Agradecimentos

A realização deste trabalho não teria sido possível sem o apoio e a contribuição de várias pessoas, às quais desejo transmitir os meus mais sinceros agradecimentos.

Ao Professor Doutor João Luiz Afonso, meu orientador nesta dissertação, pelo incentivo, compreensão, disponibilidade, cooperação e também pela oportunidade de realizar a componente prática deste trabalho no laboratório de Eletrónica de Potência.

Ao Engenheiro Vítor Monteiro, por todo o apoio, disponibilidade, compreensão, paciência e exigência ao longo deste projeto e também pelo bom exemplo de método de trabalho.

Aos restantes membros do laboratório de Eletrónica de Potência, Eng.º Delfim Pedrosa, Eng.º Bruno Exposto, Eng.º José Cunha e Doutor Gabriel Pinto pela disponibilidade e motivação no decorrer deste trabalho.

A todos os meus colegas e amigos, os alunos que realizaram a dissertação de mestrado no Laboratório de Eletrónica de Potência, especialmente à Ana Ferreira, Tiago Alves, Hélder Magalhães e António Araújo pelo excelente ambiente de trabalho, companheirismo e de boa disposição.

Aos técnicos das oficinas do Departamento de Eletrónica Industrial, por toda a ajuda, atenção e simpatia, não só durante a realização deste projeto mas também ao longo de todo o meu percurso académico.

Aos meus pais, Filomena e Pedro, e à minha irmã Ana, por todo o amor, paciência, aconselhamento, coragem e pelo apoio incondicional ao longo de todo o meu percurso académico.

Aos meus amigos, Aníbal, Ana Raquel, Luísa, Lurdes, Soraia, Filipa, José Eduardo, Neto, Cunhal e Mesquita por toda a força, companheirismo e incentivo ao longo do meu percurso académico.

A todas as pessoas não mencionadas, mas que me ajudaram durante o meu percurso académico.

Resumo

A mobilidade elétrica tem-se demonstrado uma área em grande crescimento e destaque, muito por causa dos problemas ambientais e energéticos. Atualmente há uma grande aposta no desenvolvimento da indústria de veículos elétricos, que usam como principal fonte de armazenamento de energia bancos de baterias ligadas em série. Como não existem baterias exatamente iguais, com o tempo, esse agrupamento de baterias apresenta desequilíbrios de tensão entre as mesmas. Por consequência, esses desequilíbrios causam um impacto negativo na capacidade de carga do banco de baterias e no tempo de vida útil de cada bateria.

Atualmente torna-se indispensável a utilização de um sistema de gestão de baterias, conhecido na literatura como *Battery Management System* (BMS). Este tipo de sistema visa melhorar o desempenho das baterias, i.e., fazer a monitorização de parâmetros, a proteção da bateria contra abusos de utilização, o controlo da carga e descarga, e principalmente, fazer o equilíbrio da carga entre as baterias do mesmo sistema. Em suma, um BMS tem como objetivo preservar a vida útil de cada bateria.

Inicialmente, nesta Dissertação de Mestrado, é apresentado o estado da arte relativo aos sistemas de gestão de baterias, onde são apresentados alguns exemplos de BMS existentes no mercado, bem como algumas topologias de equalização (passivas e ativas). Seguidamente são realizadas várias simulações computacionais, com recurso à ferramenta *PSIM*, para validar o princípio de funcionamento de algumas topologias ativas que utilizam condensadores como o elemento de transferência de energia. Posteriormente, é apresentado todo o desenvolvimento de hardware e software para a implementação da topologia ativa *switch matrix with capacitor*. Por fim, são apresentados os resultados experimentais da topologia implementada, juntamente com as conclusões do trabalho.

Palavras-Chave: Sistema de Gestão de Baterias, *Battery Management System* (BMS), Baterias, Veículo Elétrico, Mobilidade Elétrica, Equalização Ativa, Condensador.

Abstract

In the recent years, electric mobility has become a prominent issue with plenty of developments, mainly due to environmental and energy concerns. Nowadays, the electric vehicle industry is experiencing significant research and development using supply batteries banks connected in series as the main energy storage system. Since there are no exactly equal batteries, along the time this group of batteries will present voltage imbalances between them. These imbalances have a very negative impact on the battery pack capacity and individual battery lifetime.

In most battery applications it has become essential to use a battery management system (BMS). This type of system aim to improve battery performance, i.e., to monitor parameters, battery system protection against damages, control of charge and discharge processes and mainly ensure the balance between the batteries' capacity. Briefly, a BMS aims to preserve the lifetime of each battery.

Initially, this master dissertation presents the state of the art regarding battery management systems, where some examples of existing BMS on the market are presented, as well as some equalization passive and active topologies. Furtherly, various computer simulations are carried out using the PSIM tool to validate the operating principle of some active topologies that use capacitors as energy transfer element. Subsequently, the development of hardware and software for implementing the active topology switch matrix with capacitor is presented. Lastly, the experimental results of the implemented topology are presented together with the conclusions of the work.

Keywords: Battery Management System (BMS), Battery, Electric Vehicle, Electric Mobility, Active Equalization, Capacitor.

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xvii
Lista de Siglas e Acrónimos	xix
Nomenclatura	xxi
CAPÍTULO 1 Introdução	1
1.1. Sistemas de Gestão de Baterias.....	1
1.2. Enquadramento	2
1.3. Motivações.....	2
1.4. Objetivos.....	3
1.5. Organização da Dissertação	4
CAPÍTULO 2 Tecnologias dos Sistemas de Gestão de Baterias	5
2.1. Introdução	5
2.2. Sistemas de Gestão de Baterias.....	5
2.3. Exemplos de Sistemas de Gestão de Baterias	7
2.3.1. BMS da <i>Victron Energy</i>	9
2.3.2. BMS da <i>REC</i>	11
2.3.3. BMS da <i>Orion</i>	12
2.3.4. BMS da <i>Nuvation</i>	13
2.3.5. BMS da <i>123electric</i>	14
2.4. Baterias para Veículos Elétricos e Híbridos.....	15
2.4.1. Módulos de Baterias da <i>Saft</i>	16
2.4.2. Baterias da <i>WINA</i>	19
2.4.3. Módulos <i>XP</i> de Baterias da <i>Valence</i>	21
2.5. Comparação Entre Diferentes BMS Disponíveis no Mercado.....	23
2.6. Conclusões	24
CAPÍTULO 3 Sistemas de Gestão de Baterias	25
3.1. Introdução	25
3.2. Arquiteturas de BMS	25
3.2.1. Arquitetura BMS Centralizada	25
3.2.2. Arquitetura BMS Distribuída	26
3.3. Arquitetura e Funções do BMS para Veículos Elétricos.....	27
3.4. Métodos de Equalização	27
3.5. Método de Equalização Passivo.....	28
3.5.1. <i>Fixed Shunting Resistor</i>	28
3.5.2. <i>Switching Shunting Resistor</i>	29
3.6. Método de Equalização Ativo.....	30
3.6.1. <i>Switched Capacitor (SC)</i>	31
3.6.2. <i>Double-tiered Switched Capacitor (STSC)</i>	32
3.6.3. <i>Modularized Switched Capacitor (MSC)</i>	33
3.6.4. <i>Single Switched Capacitor (SSC)</i>	34
3.6.5. <i>Shared Transformer</i>	35
3.6.6. <i>Multiple Transformer</i>	35
3.6.7. <i>Switched Transformer</i>	36
3.6.8. <i>Buck or/and Boost Converter</i>	37
3.6.9. <i>Switch Matrix (SM)</i>	38
3.7. Conclusão.....	40
CAPÍTULO 4 Simulações de Topologias de Sistemas de Gestão de Baterias	41
4.1. Introdução	41
4.2. Modelo Equivalente da Bateria para Simulação	41
4.3. Topologias de Equalização	43
4.3.1. Simulação da Topologia <i>Switched Capacitor (SC)</i>	43
4.3.2. Simulação da Topologia <i>Double-tiered Switched Capacitor (DTSC)</i>	47

4.3.3.	Simulação da Topologia <i>Single Switched Capacitor</i> (SSC).....	49
4.3.4.	Simulação da Topologia <i>Switch Matrix with Capacitor</i> (SMwC).....	54
4.4.	Comparação Entre as Topologias Simuladas	59
4.5.	Conclusões	60
CAPÍTULO 5 Projeto e Implementação do Sistema BMS		63
5.1.	Introdução	63
5.2.	Circuito de Potência	63
5.2.1.	Circuito de <i>Driver</i> para os MOSFETs.....	63
5.2.2.	Placa BMS	70
5.2.3.	Placa do Condensador de Equalização	76
5.2.4.	Banco de Baterias para Equalização	77
5.3.	Sistema de Controlo	77
5.3.1.	Microcontrolador	77
5.3.2.	Placa de Interface Entre o DSP e o <i>Driver ADUM5230</i>	78
5.3.3.	Algoritmo de Controlo	80
5.3.4.	Placas para os Sensores de Tensão.....	83
5.4.	Protótipo do Sistema BMS Final.....	85
5.4.1.	Escolha do Interruptor Bidirecional Mais Adequado	86
5.4.2.	Aspeto do Sistema Final	89
5.5.	Conclusões	89
CAPÍTULO 6 Resultados Experimentais		91
6.1.	Introdução	91
6.2.	Validação da Topologia BMS Proposta	91
6.2.1.	Análise das Tensões e correntes no Condensador, nos Interruptores e nas Baterias	92
6.2.2.	Análise da Tensão e da Corrente no Condensador de Equalização	94
6.2.3.	Análise da Tensão no Condensador de Equalização e nas Baterias	95
6.3.	Equalização de Duas Baterias em Série	96
6.3.1.	Análise da Tensão no Interruptor Bidirecional	97
6.3.2.	Equalização com uma Frequência de Comutação de 25 kHz.....	97
6.3.3.	Equalização com uma Frequência de Comutação de 50 kHz.....	99
6.3.4.	Ciclo de Equalização Completo	101
6.4.	Conclusão.....	103
CAPÍTULO 7 Conclusões e Trabalho Futuro		105
7.1.	Conclusões	105
7.2.	Sugestões para Trabalho Futuro	108
Referências.....		111

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Diagrama de blocos do <i>AD7280</i> para a gestão e monitorização de baterias [10].	8
Figura 2.2 – BMS <i>Lyon Ion</i> da <i>Victron Energy</i> [11].	9
Figura 2.3 – BMS <i>Battery Balancer</i> da <i>Victron Energy</i> [12].	9
Figura 2.4 – Exemplo de utilizações para o BMS <i>Battery Balancer</i> : (a) Para duas baterias em série – 12 V; (b) Para quatro baterias em série – 48 V[13].	10
Figura 2.5 – Aplicação <i>Battery Balancer demo web-app</i> da <i>Victron Energy</i> [15].	10
Figura 2.6 – Aspeto exterior do <i>REC BMS 7-R</i> [16].	11
Figura 2.7 – Aspeto exterior do <i>REC Active BMS</i> [17].	12
Figura 2.8 – Aspeto exterior do <i>Orion BMS</i> : (a) <i>Junior</i> ; (b) <i>Standard Size</i> ; (c) <i>Extended Size</i> [18].	12
Figura 2.9 – Aspeto exterior do <i>Nuvation BMS</i> e interface com o utilizar para <i>tablet</i> [19].	13
Figura 2.10 - Esquema de ligações do <i>Nuvation BMS</i> a um banco de baterias de um VE [21].	14
Figura 2.11 – BMS123: (a) BMS central; (b) Módulo individual de BMS [22].	14
Figura 2.12 – Vários “ <i>BMS123 – CELL MODULE</i> ” integrados num banco de baterias de LiFePO4 [22].	15
Figura 2.13 – Módulo de baterias <i>Ion’Drive 630 V</i> [28].	17
Figura 2.14 – Módulo de baterias <i>NHE 10-100</i> [30].	17
Figura 2.15 – Relação entre capacidade de carga da bateria <i>NHE 10-100</i> com o número de ciclos [29].	18
Figura 2.16 – Relação da tensão com a capacidade da bateria <i>NHE 10-100</i> (%), para várias taxas de descarga diferentes [29].	19
Figura 2.17 – Baterias <i>WN-models</i> da <i>WINA</i> [31].	19
Figura 2.18 – Relação entre capacidade de carga da bateria <i>WN100AH</i> com número de ciclos [32].	20
Figura 2.19 – Relação da tensão com a capacidade da bateria <i>WN100AH</i> (%) para várias taxas de descarga diferentes [32].	20
Figura 2.20 – Bateria <i>U27-12XP</i> da <i>Valence</i> [33].	21
Figura 2.21 – <i>U-BMS-HV</i> : Sistema de Gestão de Baterias para <i>XP Battery Module</i> [35].	22
Figura 2.22 – Relação entre capacidade de carga da bateria <i>U27-12XP</i> com número de ciclos [34].	22
Figura 2.23 – Relação da tensão com a capacidade da bateria <i>U27-12XP</i> (%), para várias taxas de descarga diferentes [34].	23
Figura 3.1 – Arquitetura BMS Centralizada.	26
Figura 3.2 – Arquitetura BMS Distribuída.	26
Figura 3.3 – Topologias de Equalização.	28
Figura 3.4 – Circuito da topologia <i>fixed shunting resistor</i> para três baterias em série.	29
Figura 3.5 – Circuito da topologia <i>switching shunting resistor</i> para três baterias em série.	30
Figura 3.6 – Circuito da topologia <i>switched capacitor</i> para três baterias em série.	31
Figura 3.7 – Circuito da topologia <i>double-tiered switched capacitor</i> para três baterias em série.	32
Figura 3.8 – Circuito da topologia <i>modularized switched capacitor</i> para dois módulos de três baterias.	33
Figura 3.9 – Circuito da topologia <i>single switched capacitor</i> para três baterias em série.	34
Figura 3.10 – Circuito da topologia <i>shared transformer</i> para três baterias em série.	35

Figura 3.11 – Circuito da topologia <i>multiple transformer</i> para três baterias em série.	36
Figura 3.12 – Circuito da topologia <i>switched transformer</i> para três baterias em série.	37
Figura 3.13 – Circuito da topologia <i>buck-boost converter</i> para três baterias em série.	37
Figura 3.14 – Circuito da topologia <i>switch matrix with capacitor</i> para três baterias.	38
Figura 3.15 – Circuito da topologia <i>switch matrix</i> : (a) <i>with transformer</i> ; (b) <i>with DC/DC converter</i>	38
Figura 3.16 – Sentido da corrente: (a) Condensador a carregar; (b) Condensador a descarregar.	39
Figura 4.1 - Modelo simples da bateria utilizado nas simulações em <i>PSIM</i>	42
Figura 4.2 – Circuito da topologia <i>switched capacitor</i> em <i>PSIM</i>	43
Figura 4.3 – Tensões nas três baterias durante o período de equalização.	44
Figura 4.4 – Tensões nos condensadores durante o período de equalização.	45
Figura 4.5 – Correntes nas três baterias durante o período de equalização: (a) Baterias 1 e 3; (b) Bateria 2.	45
Figura 4.6 – Corrente nos condensadores durante o período de equalização.	46
Figura 4.7 – Tensões nas três baterias durante o período de equalização.	46
Figura 4.8 – Tensões nos condensadores durante o período de equalização.	47
Figura 4.9 – Circuito da topologia <i>double-tiered switched capacitor</i> em <i>PSIM</i>	47
Figura 4.10 – Tensões nas três baterias durante o período de equalização.	48
Figura 4.11 – Tensões nos condensadores durante o período de equalização: (a) Condensador C3; (b) Condensadores C1 e C2.	48
Figura 4.12 – Tensões nas três baterias durante o período de equalização.	49
Figura 4.13 – Tensões nos condensadores durante o período de equalização: (a) Condensador C3; (b) Condensadores C1 e C2.	49
Figura 4.14 – Interruptor bidirecional totalmente controlado com dois MOSFETs em série com o terminal <i>source</i> comum.	50
Figura 4.15 – Circuito da topologia <i>single switched capacitor</i> em <i>PSIM</i>	50
Figura 4.16 – Tensões nas três baterias durante o período de equalização.	51
Figura 4.17 – Tensão no condensador durante o período de equalização.	51
Figura 4.18 – Correntes nas três baterias durante o período de equalização.	52
Figura 4.19 – Tensões nas três baterias durante o período de equalização.	52
Figura 4.20 – Tensão nas três baterias e no condensador durante o período de equalização.	53
Figura 4.21 – Correntes nas três baterias e no condensador durante o período de equalização.	53
Figura 4.22 – Circuito em <i>PSIM</i> da topologia <i>Switch Matrix with Capacitor</i>	54
Figura 4.23 – Tensões nas três baterias durante o período de equalização.	55
Figura 4.24 – Tensão no condensador durante o período de equalização.	55
Figura 4.25 – Correntes nas três baterias durante o período de equalização.	55
Figura 4.26 – Corrente no condensador durante o período de equalização.	56
Figura 4.27 – Tensão no interruptor bidirecional superior da bateria 1.	56
Figura 4.28 – Tensões nas três baterias durante o período de equalização.	57
Figura 4.29 – Tensão no condensador e nas três baterias durante o período de equalização.	57
Figura 4.30 – Correntes nas baterias e no condensador durante o período de equalização.	57
Figura 4.31 – Tensão no condensador e nas três baterias durante o período de equalização.	58
Figura 4.32 – Tensões nas baterias e no condensador durante o período de equalização.	59

Figura 5.1 – Diagrama de blocos do <i>driver ADUM5230</i> da <i>Analog Devices</i> [56].....	64
Figura 5.2 – Esquema do circuito para o teste e validação do <i>driver ADUM5230</i>	65
Figura 5.3 – Montagem em <i>breadboard</i> do circuito para teste do <i>driver ADUM5230</i>	65
Figura 5.4 – Sinal da tensão de alimentação do <i>driver ADUM5230</i> : (a) Com condensador de cerâmica na entrada; (b) Com dois condensadores (cerâmica e eletrolítico) na entrada.	66
Figura 5.5 – Sinal de saída do <i>driver</i> sem qualquer componente ligado à saída.	66
Figura 5.6 – Sinal de saída do <i>driver</i> com condensadores à saída (frequência de 50 kHz e <i>duty-cycle</i> de 50%).	67
Figura 5.7 – (a) Sinal de entrada (CH2) e sinal de saída (CH1) do <i>driver</i> ; (b) Detalhe dos dois sinais.	67
Figura 5.8 – MOSFET <i>IXFQ50N50P3</i> da <i>IXYS</i> [57].	68
Figura 5.9 – Circuito de proteção de gate do MOSFET.	68
Figura 5.10 – Esquema do circuito para teste do acionamento do MOSFET a partir do <i>driver</i>	69
Figura 5.11 – Tensão entre <i>drain</i> e <i>source</i> (CH2) e sinal na <i>gate</i> (CH1) do MOSFET com uma corrente de 150 mA.	69
Figura 5.12 – Tensão entre <i>drain</i> e <i>source</i> (CH2) e sinal na <i>gate</i> (CH1) do MOSFET com uma corrente de 1 A.	70
Figura 5.13 – Esquema do circuito base da placa BMS.	71
Figura 5.14 – Interruptor bidirecional controlado com MOSFET do tipo N e ponte de díodos.	72
Figura 5.15 – Circuito em <i>veroboard</i> da placa BMS desenhada para a solução 1.	72
Figura 5.16 – Sentido da corrente quando conduz: (a) de A para B; (b) de B para A.	73
Figura 5.17 – Circuito em <i>PCB</i> da placa BMS (face superior) desenhada para a solução 1.	73
Figura 5.18 – Circuito em <i>PCB</i> da placa BMS (face inferior) desenhada para a solução 1.	74
Figura 5.19 – Interruptor bidirecional controlado com dois MOSFET do tipo N em série com terminal <i>source</i> comum.	74
Figura 5.20 – Circuito em <i>veroboard</i> da placa BMS desenhada para a solução 2.	74
Figura 5.21 – Sentido da corrente quando conduz: (a) de A para B; (b) de B para A.	75
Figura 5.22 – Circuito em <i>PCB</i> da placa BMS (face superior) desenhada para a solução 2.	75
Figura 5.23 – Circuito em <i>PCB</i> da placa BMS (face inferior) desenhada para a solução 2.	76
Figura 5.24 – Placa do condensador de equalização.	76
Figura 5.25 – Banco com três baterias de chumbo-ácido <i>WCG-U1</i> da <i>Power Mobility</i> em série.	77
Figura 5.26 – <i>C2000 Piccolo LaunchPad</i> da <i>Texas Instruments</i>	78
Figura 5.27 – Esquema de ligações do <i>integrado74HCT04</i>	79
Figura 5.28 – Placa de interface entre o DSP e o <i>driver ADUM5230</i>	80
Figura 5.29 – Fluxograma do algoritmo do sistema para a topologia proposta.	81
Figura 5.30 – Fluxograma do algoritmo de equalização para a topologia proposta.	82
Figura 5.31 – Fluxograma para a leitura dos ADC.	83
Figura 5.32 – Ligações do sensor <i>CYHVS025A</i> (esquema baseado em [63]).	84
Figura 5.33 – Placa para um sensor de tensão <i>CYHVS025A</i> (desenvolvida pelo GEPE).	85
Figura 5.34 – Esquema do protótipo final da topologia <i>switch matrix with capacitor</i>	86
Figura 5.35 – Circuito de teste para os interruptores bidirecionais.	86
Figura 5.36 – Teste ao interruptor da solução 1: tensão na fonte de alimentação (CH1) e tensão na resistência (CH2).	87

Figura 5.37 – Teste ao interruptor da solução 1: tensão na fonte de alimentação (CH1) e tensão no interruptor (CH2) (ampliação com 500 mV/Div).....	87
Figura 5.38 – Teste ao interruptor da solução 2: tensão na fonte de alimentação (CH1) e tensão na resistência (CH2) (ampliação com 500 mV/Div).....	88
Figura 5.39 – Protótipo final do sistema BMS desenvolvido.....	89
Figura 6.1 – Circuito para validar o conceito de equalização da topologia de BMS.....	91
Figura 6.2 – Tensões nos interruptores bidirecionais S_1 (CH4) e S_2 (CH2) ($f_c = 50$ kHz).	92
Figura 6.3 – Tensão no condensador de equalização (CH2) e corrente na Bat_2 (CH3): (1) Condensador fornece energia; (2) Condensador recebe energia ($f_c = 25$ kHz).	93
Figura 6.4 – Tensão no condensador de equalização (CH2), corrente na Bat_1 (CH1) e corrente na Bat_2 (CH3): (1) Condensador fornece energia; (2) Condensador recebe energia ($f_c = 50$ kHz).....	93
Figura 6.5 – Tensão no condensador de equalização (CH2), corrente na Bat_2 (CH3) e tensão em S_2 (CH4): (1) Condensador fornece energia; (2) Condensador recebe energia ($f_c = 50$ kHz).	94
Figura 6.6 – Tensão no condensador de equalização (CH2), corrente na Bat_2 (CH3) e tensão em S_2 (CH4): (1) Condensador fornece energia; (2) Condensador recebe energia ($f_c = 10$ kHz).	94
Figura 6.7 – Tensão (CH3) e corrente (CH2) no condensador de equalização: (1) Condensador fornece energia; (2) Condensador recebe energia ($f_c = 25$ kHz).	95
Figura 6.8 – Tensão (CH3) no condensador de equalização e corrente na Bat_1 (CH2) e na Bat_2 (CH4): (a) $f_c = 25$ kHz; (b) $f_c = 50$ kHz.....	95
Figura 6.9 – Tensões no condensador de equalização (CH3), na Bat_1 (CH2) e na Bat_2 (CH4) ($f_c = 25$ kHz).....	96
Figura 6.10 – Circuito para equalização de duas baterias ligadas em série.	96
Figura 6.11 – Tensão no interruptor bidirecional S_1 (CH1) ($f_c = 10$ kHz).	97
Figura 6.12 – Tensões das baterias durante 10 horas de equalização ($f_c = 25$ kHz).	98
Figura 6.13 – Diferença de tensão entre baterias durante 10 horas de equalização.	98
Figura 6.14 – Tensões das baterias durante 10 horas de equalização ($f_c = 50$ kHz).	100
Figura 6.15 – Diferença de tensão entre baterias durante 10 horas de equalização.	100
Figura 6.16 – Tensões das baterias durante 24 horas de equalização ($f_c = 25$ kHz).	102
Figura 6.17 – Diferença de tensão entre baterias durante 24 horas de equalização com intervalo de 10 horas às 12 horas.	102

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Baterias utilizadas em diferentes tipos de VEs (baseado em [26]).....	16
Tabela 2.2 – Tecnologia de baterias e gamas de tensão e energia para vários tipos de veículos híbridos e/ou elétricos (baseada em [23] e [27]).....	16
Tabela 2.3 – Especificações do módulo de baterias <i>Ion’Drive 630 V</i> da <i>Saft</i> [28].	17
Tabela 2.4 – Especificações do módulo de baterias <i>NHE 10-100</i> da <i>Saft</i> [29].	18
Tabela 2.5 – Especificações da bateria <i>WN100AH</i> [32].	20
Tabela 2.6 – Especificações da bateria <i>U27-12XP</i> [34].	21
Tabela 2.7 – Comparação de seis BMS comercialmente disponíveis.	23
Tabela 3.1 – Arquiteturas e funções do BMS presente nos diferentes tipos de veículos elétricos [27].....	27
Tabela 4.1 - Especificações da bateria <i>WCG-UI</i> da <i>Power Mobility</i> [55].	42
Tabela 4.2 – Duração da equalização para diferentes condensadores e frequências de equalização.	58
Tabela 4.3 – Diferença de tensão entre a bateria 1 e bateria 3 ao fim de 5 segundos de simulação.	59
Tabela 4.4 – Quantidade de condensadores necessários para cada topologia que contenha n baterias.	60
Tabela 4.5 – Quantidade de interruptores necessários para cada topologia que contenha n baterias.	60
Tabela 6.1 – Diferença de tensão equalizada entre baterias por hora (ao longo de 10 horas).	99
Tabela 6.2 – Diferença de tensão equalizada entre baterias por hora (ao longo de 10 horas).	101
Tabela 6.3 – Diferença de tensão equalizada entre baterias por hora (ao longo de 24 horas).	103

Lista de Siglas e Acrónimos

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
CA	Corrente Alternada
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CC	Corrente Contínua
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
DOD	<i>Depth of Discharge</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
DTSC	<i>Double-tiered Switched Capacitor</i>
ESR	<i>Equivalent Series Resistance</i>
ESS	<i>Energy Storage System</i>
FC	<i>Fuel Cell</i>
GEPE	Grupo de Eletrônica de Potência e Energia
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
LEV	<i>Light Electric Vehicle</i>
LiPo	<i>Lithium Polymer</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
MSC	<i>Modularized Switched Capacitor</i>
NiCd	<i>Nickel Cadmium</i>
NiMH	<i>Nickel Metal Hydride</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SoC	<i>State of Charge</i>
SoH	<i>State of Health</i>
SC	<i>Switched Capacitor</i>
SMwC	<i>Switch Matrix with Capacitor</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SSC	<i>Single Switched Capacitor</i>
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>
VE	Veículo Elétrico

Nomenclatura

Símbolo	Significado	Unidade
f_C	Frequência de comutação	Hz
R_G	Resistência de <i>gate</i>	Ω
V_{Bat}	Tensão na bateria	V
ΔV_C	Variação da tensão no condensador	V
ΔV_x	Variação da tensão entre baterias	V

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1. Sistemas de Gestão de Baterias

O desenvolvimento de sistemas que utilizam baterias recarregáveis impulsionou fortemente a expansão da indústria das baterias. Atualmente, existem várias aplicações e sistemas elétricos que utilizam baterias recarregáveis, como por exemplo, computadores portáteis, telemóveis e veículos elétricos (VEs). Estas aplicações podem usar várias tecnologias de baterias, como chumbo-ácido, níquel-cadmio, lítio, entre outras.

Uma célula é a parte mais elementar de uma bateria e, conseqüentemente, uma bateria é composta por uma ou mais células. As baterias são afetadas por diversos fatores, um dos mais importantes a salientar é o desequilíbrio entre células. Pequenas variações nas características das células podem ser suficientes para produzir desequilíbrios nas tensões das células, e assim influenciar o desempenho da bateria. Estes desequilíbrios podem danificar as baterias, e podem até representar perigos para o utilizador, portanto, é necessária uma solução para este problema.

Os sistemas de gestão de baterias permitem desempenhar diversas funções paralelamente com a aplicação em que são inseridos. Dependendo do nível de complexidade do sistema de gestão de baterias, estes sistemas permitem monitorizar e controlar a carga/descarga, bem como equalizar e diagnosticar o banco de baterias (nesta dissertação um conjunto de baterias é denominado de banco de baterias). Além destas funções, os sistemas de gestão de baterias também protegem as baterias de possíveis danos de má utilização (por exemplo, sobrecorrentes e sobretensões) visando preservar a vida útil de cada bateria. Neste sentido, é imprescindível que as aplicações que utilizam bancos de baterias recarregáveis estejam equipadas com um sistema de gestão de baterias, que levem em consideração a tecnologia das baterias.

No caso dos VEs, um sistema de gestão de baterias contribui para uma melhor gestão da autonomia do veículo e para a preservação do banco de baterias. Este sistema também pode ser o responsável pela estimação do estado de carga das baterias e conseqüentemente sobre a autonomia do veículo, e pela transmissão de informação ao condutor do VE.

1.2. Enquadramento

Os problemas ambientais e energéticos são um dos principais fatores que contribuem para a aposta na mobilidade elétrica, particularmente, para o desenvolvimento de veículos elétricos (VEs). Além desses fatores, é também importante que as soluções tecnológicas desses VEs sejam eficientes, para que possa existir uma aposta efetiva no desenvolvimento dos mesmos. O componente chave de um VE é a bateria, a qual, não só determina a autonomia do veículo, mas também influencia o custo do VE e consequentemente a aposta efetiva nos mesmos [1]. Tipicamente, as baterias de um VE estão agrupadas em série e paralelo de forma a satisfazer as necessidades do VE a nível dos conversores de eletrónica de potência. Contudo, devido ao agrupamento das baterias, surgem desequilíbrios de tensão entre as baterias, representando uma grande ameaça para a vida útil do conjunto de baterias, uma vez que é prejudicada a capacidade de cada bateria e respetivo tempo de vida útil [2].

Hoje em dia, existe um grande interesse na exploração de novas tecnologias eletroquímicas para melhorar o desempenho da bateria. Contudo, independentemente da tecnologia das baterias, é indispensável utilizar um sistema de gestão de baterias, denominado na literatura por *Battery Management System* (BMS). Assim, o BMS é o elemento chave dos sistemas de armazenamento de energia para VEs, uma vez que realiza diversas tarefas, das quais a mais importante é o balanceamento de carga entre as diferentes baterias. Outras tarefas importantes realizadas pelo BMS estão relacionadas com a medição e controlo da tensão, corrente e temperatura das baterias, assim como a estimação do estado de carga (*State of charge* - SoC) e do estado de saúde (*State of Health* - SoH) [1]. Sem o sistema de balanceamento as tensões das baterias ficam desequilibradas ao longo do tempo, afetando diretamente a capacidade de armazenamento de energia de cada bateria.

1.3. Motivações

O tema desta dissertação está inserido na área da mobilidade elétrica, nomeadamente no desenvolvimento de um sistema de gestão de baterias (BMS - *Battery Management System*) para veículos elétricos (VEs), que é uma área que não só cativa o interesse pessoal mas também uma área de forte aposta em desenvolvimento na indústria automóvel. Cabe ainda ressaltar que a utilização de VEs contribui para a diminuição da

emissão de gases prejudiciais para a atmosfera e reduz a dependência do consumo de combustíveis fósseis.

Atualmente já existem soluções comercialmente disponíveis de BMSs, porém são soluções que maioritariamente realizam equalização passiva, e destinadas a baterias de lítio. Uma das motivações para este tema prende-se com a possibilidade de explorar novas técnicas de equalização ativa, assim como implementar uma solução com vista à redução de custos, e que possa ser associada a diferentes tipos de tecnologias de baterias.

As principais motivações desta dissertação são ter a possibilidade de adquirir conhecimento sobre BMSs e poder dar um contributo científico nesta área. A elaboração desta dissertação envolve a realização de trabalho de investigação, estudo do estado da arte e uma componente prática, o que constituem fortes motivações.

1.4. Objetivos

Esta dissertação pretende dar continuidade a uma linha de investigação já iniciada na área dos VEs no Grupo de Eletrónica de Potência e Energia (GEPE) da Universidade do Minho.

Com o intuito de expandir o leque de conhecimento e utilizar uma nova topologia, pretende-se implementar um sistema de gestão de baterias com uma topologia em que a transferência de energia é efetuada através de condensadores. Para alcançar este objetivo as principais tarefas são:

- Estudo do estado da arte sobre BMSs. Neste ponto é recolhida informação bibliográfica sobre BMSs, informações sobre as diferentes configurações e aplicações em VEs.
- Simulações das diversas configurações sobre BMSs. Depois do estudo sobre BMSs, são simuladas algumas configurações com recurso à ferramenta de simulação *PSIM*.
- Implementação de uma das configurações de BMS. Após a simulação e análise das diversas topologias de BMS, é escolhida uma configuração para implementar. A implementação é constituída por uma parte de hardware e outra de software.
- Obtenção de resultados experimentais. Feita a implementação e validado o seu funcionamento, são retirados e analisados os resultados experimentais.

1.5. Organização da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em sete capítulos que pretendem demonstrar as diferentes fases deste projeto.

O Capítulo 1 apresenta a introdução com uma breve identificação do problema e o enquadramento do tema. Também são descritas as motivações que levaram à realização desta dissertação bem como os seus objetivos.

No Capítulo 2, relativo ao estado da arte sobre sistemas de gestão de baterias, é explicado o conceito de BMS e a suas principais características. São também apresentados alguns exemplos de sistemas de gestão de baterias comercialmente disponíveis e módulos de baterias com BMS integrados para aplicações em veículos elétricos. Por fim é feita a comparação entre as soluções de BMS apresentadas.

O Capítulo 3, também relativo ao estado da arte, começa por apresentar os tipos de arquiteturas mais utilizadas em BMS. De seguida são descritas as topologias de equalização mais conhecidas na literatura. Existe um subcapítulo destinado a topologias de equalização passiva e outro subcapítulo destinado a topologias de equalização ativa, no qual é apresentada a topologia de equalização ativa implementada nesta dissertação.

No Capítulo 4 são apresentadas simulações computacionais. Inicialmente é dimensionado um modelo de bateria para ser utilizado na ferramenta de simulação. De seguida são simuladas quatro topologias de equalização ativa que utilizam condensadores como elemento equalizador. Uma das topologias escolhidas para simulação é a topologia proposta. As outras topologias simuladas foram escolhidas por terem um princípio de funcionamento semelhante à topologia proposta.

O Capítulo 5 descreve as etapas necessárias para a implementação do sistema de gestão de baterias proposto. É apresentado o dimensionamento do hardware utilizado no projeto. Também são descritos os algoritmos e respetivos fluxogramas para a programação em software do sistema de controlo.

Após o projeto e implementação do sistema, no Capítulo 6 são apresentados os resultados experimentais obtidos que validam o princípio de funcionamento da topologia proposta. Também são apresentados testes com a equalização de baterias.

Por fim, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões desta dissertação. Com base no trabalho desenvolvido são também sugeridas propostas de trabalho futuro com a finalidade de dar continuidade ao estudo de sistemas de gestão de baterias e otimização da topologia proposta.

CAPÍTULO 2

Tecnologias dos Sistemas de Gestão de Baterias

2.1. Introdução

A monitorização das baterias é fundamental para a maioria das aplicações que utilizam baterias recarregáveis. No caso dos veículos elétricos (VEs) o seu rendimento/autonomia e mesmo a sua segurança dependem do sistema de baterias [3]. A bateria não pode ser vista simplesmente como um elemento em que se pode descurar a sua manutenção [4]. O seu funcionamento deve ser gerido de modo a garantir o melhor rendimento possível, i.e., parâmetros como o estado de carga, temperatura, tensões e correntes de carga/descarga devem ser mantidos dentro dos parâmetros de segurança especificados pelo fabricante das baterias de modo a preservar a vida útil de cada bateria. Atualmente é utilizado um sistema de gestão de baterias conhecido na literatura como BMS (*Battery Management Systems*) para controlar esses parâmetros em sistemas que utilizem várias baterias.

Neste capítulo é apresentada em detalhe a definição de um BMS e são descritas as suas possíveis funcionalidades consoante o nível de complexidade desse sistema de gestão de baterias. Também são apresentadas algumas soluções comerciais de BMS disponíveis e alguns exemplos de módulos de baterias destinados a VEs. Por fim é apresentada uma comparação entre esses diferentes exemplos de soluções comerciais de BMS.

2.2. Sistemas de Gestão de Baterias

Geralmente, os BMS são responsáveis pela gestão e monitorização de um conjunto de baterias. Tal como referido anteriormente, estes sistemas são implementados com o objetivo de preservar a vida útil das baterias, equilibrar o estado de carga de cada célula individual da bateria e proteger contra sobrecorrentes, sobretensões e temperaturas excessivas. Basicamente, pretende-se retirar o melhor rendimento possível de cada bateria, mas sempre trabalhando em condições de segurança. Dependendo do tipo de bateria a que se destina o BMS, este deve ter os requisitos mínimos para ser capaz de corresponder às suas necessidades de proteção. Por exemplo, um BMS para uma bateria

de lítio deve ser capaz de a proteger contra excessos de temperatura, tensões e corrente para que esta não ultrapasse os limites de segurança durante a carga e a descarga da bateria [5].

No caso dos VEs, como o BMS é uma parte essencial e importante do veículo, os principais fabricantes de automóveis preferem projetar o seu próprio sistema de gestão de baterias. O sistema de gestão é conectado ao banco de baterias e ao carregador (em certos casos o BMS está integrado no carregador) [3].

Tal como referido, existem muitas variedades de BMSs com requisitos específicos dependendo da aplicação e do tipo de bateria utilizada. Para a maioria das aplicações que utilizam baterias, um BMS requer as seguintes funcionalidades [3]–[7]:

- Proteção das células da bateria – A segurança é o principal requisito de um BMS. Evita que as baterias funcionem fora dos limites recomendados pelo fabricante e protege o sistema de qualquer falha que possa ocorrer no banco de baterias. A proteção das células da bateria consiste: na aquisição de dados como a tensão, corrente e temperatura; análise dos dados recolhidos anteriormente para serem utilizados na determinação do estado de carga e estado de saúde da bateria; comunicação caso ocorra algum erro ou alguma falha seja detetada; controlar os componentes externos para manter as baterias dentro das condições recomendadas (por exemplo, controlar uma ventoinha para ajudar a evitar que as baterias atinjam uma temperatura acima do recomendado).
- Equalização da carga entre baterias – O equilíbrio entre baterias consiste na distribuição da carga de forma que as baterias fiquem com a mesma tensão (a equalização e alguns métodos de equalização são abordados no capítulo 3).
- Controlo do carregamento e descarregamento – Carregamentos mal efetuados são dos principais fatores que danificam a bateria. O BMS também deve fazer a gestão do carregamento da bateria para que esta se mantenha dentro das recomendações do fabricante. O controlo da carga e descarga está também relacionado com a equalização das baterias.
- Determinação do estado de saúde das baterias (*State of Health - SoH*) – Não existe nenhum método *standard* para o cálculo do SoH. O SoH representa o estado de saúde da bateria em comparação com uma bateria nova. Para a obtenção do SoH são necessários parâmetros como a tensão da bateria, a sua capacidade de carga, resistência interna e a taxa de auto-descarga.

- Determinação do estado de carga das baterias (*State of Charge* - SoC) – É necessário que o BMS determine o SoC para saber a capacidade restante da bateria ou baterias. No controlo da carga e descarga das baterias também é necessária a obtenção do SoC. O estado de carga pode ser obtido através da utilização de vários métodos, sendo o mais simples através da medição da tensão na bateria. Este método pode funcionar para baterias em que a capacidade e tensão estão linearmente relacionadas, tais como baterias de chumbo-ácido. No caso de baterias de lítio este método já não é eficaz.
- Histórico – O BMS pode ter a funcionalidade de guardar diversos parâmetros provenientes da monitorização. Este armazenamento de dados é útil para a determinação do estado de saúde da bateria e também para avaliar se as baterias foram sujeitas a abusos.
- Comunicação – A comunicação é necessária entre as baterias, BMS e o carregador. Também podem ser utilizadas interfaces de comunicação para fazer diagnósticos ou testes, e para que o utilizador possa alterar o parâmetros de controlo do BMS. A comunicação pode ser feita de diversas maneiras, como por exemplo, usando métodos de comunicação populares como *Wi-fi*, USB, RS-485, *Ethernet*, SPI (*Serial Peripheral Interface*) ou CAN-Bus (*Controller Area Network*). Uma comunicação por barramento pode reduzir de forma significativa o número de fios usados no BMS e também contribui para o aumento da flexibilidade na configuração do sistema [8].

2.3. Exemplos de Sistemas de Gestão de Baterias

Atualmente, o mercado de BMS encontra-se em expansão, muito por causa da evolução da tecnologia das baterias e das aplicações que as utilizam. Antes da escolha do BMS adequado para uma determinada aplicação, é preciso ter a noção que não existe no mercado nenhum padrão definido com as características que um BMS deve ter. Existem vários tipos de sistemas de gestão para baterias. No mercado, estes sistemas podem ser mais simples ou mais sofisticados, ou seja, um BMS mais simples só consegue monitorizar informações relativamente ao estado de cada bateria (informações como tensões, correntes e temperatura), enquanto um BMS mais sofisticado está projetado para proteger, equilibrar baterias e otimizar o seu desempenho. Alguns BMSs comercializáveis são projetados com a finalidade de tentarem servir para um uso geral, podendo serem

integrados em diferentes aplicações, enquanto outros BMSs são projetados para aplicações específicas [9].

Muitos destes equipamentos têm circuitos integrados como parte do BMS. Estes circuitos desempenham essencialmente funções de monitorização e proteção das células das baterias. Também utilizam protocolos de comunicação e interface para o controlo do sistema de balanceamento do BMS. Um exemplo deste tipo de circuitos integrados no mercado é o *AD7280A*, um circuito integrado da *Analog Devices*, que pode ser utilizado em aplicações de mobilidade elétrica, tais como bicicletas elétricas, veículos elétricos e veículos híbrido-elétricos. O diagrama de blocos do circuito integrado *AD7280A* disponibilizado no seu *datasheet* [10] está apresentado na Figura 2.1.

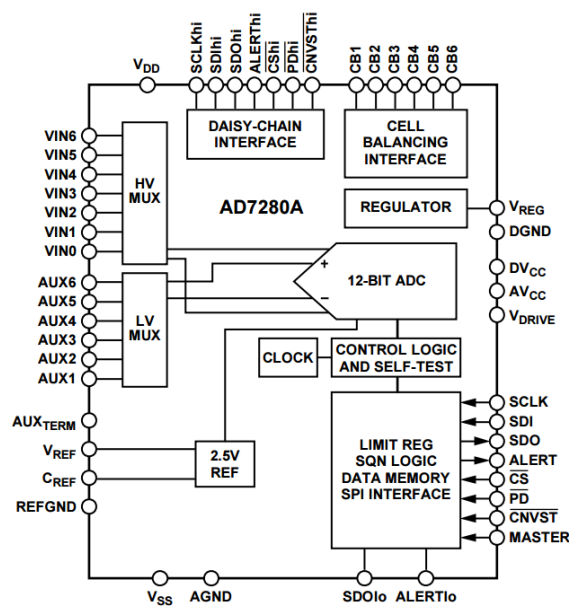


Figura 2.1 – Diagrama de blocos do *AD7280* para a gestão e monitorização de baterias [10].

Este circuito integrado é especialmente desenvolvido para monitorização de baterias de lítio e níquel. Para obter medições de temperaturas ou de diagnósticos do sistema, este integrado possui vários canais de ADC. Um único integrado pode proteger até 6 células, mas podem ser agrupados vários integrados em série para abranger um maior número de células (até 8 integrados em série não é necessário um isolamento individual). Cada entrada (VIN_x) do *AD7280A* admite tensões entre os 1 V e 5 V (com precisão máxima para cada célula de $\pm 1,6$ mV). É utilizado o protocolo SPI para fazer a comunicação com um microprocessador externo. O *AD7280A* tem um interface de equalização de células (*cell balancing interface*) destinado ao controlo de dispositivos de comutação externos, para gerir a equalização [10].

De seguida estão apresentados alguns exemplos de BMS existentes e comercialmente disponíveis.

2.3.1. BMS da *Victron Energy*

A *Victron Energy* comercializa alguns sistemas de gestão e monitorização de baterias.

O “*lynx ion*”, apresentado na Figura 2.2, é um BMS destinado a baterias de iões de lítio de 24 V / 180 Ah. Este sistema de gestão de baterias permite controlar o carregamento e descarregamento do sistema e fazer o equilíbrio entre células. O “*lynx ion*” destina-se também à proteção das baterias contra sobrecargas e esgotamento. Este modelo utiliza uma comunicação feita através do protocolo CAN-Bus. Este dispositivo destina-se a um máximo de duas baterias em série ou oito baterias em paralelo [11].



Figura 2.2 – BMS *Lynx Ion* da *Victron Energy* [11].

Outro exemplo de um sistema de gestão de baterias comercializado pela *Victron Energy* é o “*battery balancer*”, apresentado na Figura 2.3. Este BMS permite equalizar duas baterias de 12 V em série (Figura 2.4 (a)) [12].



Figura 2.3 – BMS *Battery Balancer* da *Victron Energy* [12].

De acordo com o *datasheet* [13], supondo que a tensão normal do sistema de baterias é de 24 V, quando é detetado um aumento de tensão para mais de 27 V, o dispositivo liga-se e faz a comparação entre as duas baterias em série. De seguida o BMS

irá consumir, a partir da bateria mais carregada, uma corrente até 1 A. Isto irá garantir que as duas baterias converjam para o mesmo estado de carga.

É possível a associação em paralelo de vários “*battery balancer*”. Por exemplo, caso se pretenda utilizar um banco de baterias com 48 V serão necessários três dispositivos (Figura 2.4 (b)).

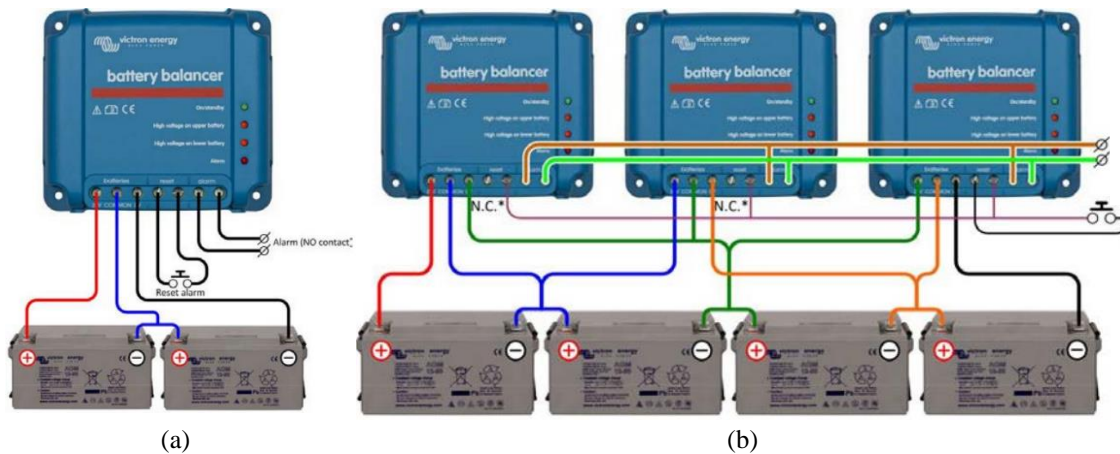


Figura 2.4 – Exemplo de utilizações para o BMS *Battery Balancer*:
 (a) Para duas baterias em série – 12 V; (b) Para quatro baterias em série – 48 V [13].

Este BMS também está associado a uma aplicação web que pode ser utilizada num PC, telemóvel ou *tablet*. Esta aplicação é um *demo* que simula o funcionamento do “*battery balancer*”. O utilizador pode modificar a tensão de uma das baterias e quando o sistema detetar uma variação de tensão superior ao valor definido, o programa faz a equalização das baterias [14]. Na Figura 2.5 pode ser observada a interface desta aplicação.

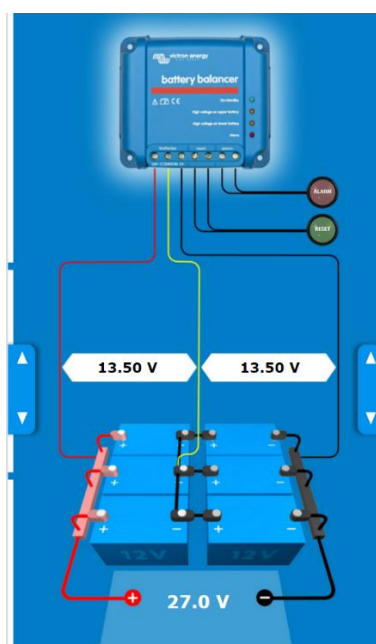


Figura 2.5 – Aplicação *Battery Balancer demo web-app* da *Victron Energy* [15].

2.3.2. BMS da REC

A REC é uma empresa que se dedica à pesquisa e desenvolvimento de aplicações eletrónicas para VEs e híbridos-eléctricos. A empresa foca-se essencialmente em desenvolver sistemas de gestão de baterias. Esta possui diferentes configurações de BMS, dependendo da aplicação a que se destina, incluindo o desenvolvimento de software de fácil utilização (*user friendly*). São apresentados de seguida dois exemplos de produtos comercializados pela REC, o *REC BMS 7-R* e o *REC Active BMS*.

O “REC BMS 7-R” (Figura 2.6) é destinado a baterias de Li-PO, LiFePO₄, LiFeYPO₄ e LiCoO. Cada sistema deste tipo pode estar ligado entre 4 a 14 células em série e permite obter o SoC e o SoH, medir a resistência interna de cada célula, fazer a medição das tensões individuais de cada célula e proteger cada célula de sobretensões ou subtensões. Tem também sensores para controlar a temperatura o que permite prevenir que a temperatura das baterias se afaste das condições normais de funcionamento. A comunicação é feita através do protocolo RS-485. A equalização deste BMS é passiva. A maioria dos BMS desenvolvidos por esta empresa têm como base métodos de equalização passivos [16].



Figura 2.6 – Aspetto exterior do *REC BMS 7-R* [16].

Em janeiro de 2015 foi lançado o “REC Active BMS” (Figura 2.7), também destinado para a gestão do mesmo tipo de baterias do “REC BMS 7-R”. Cada sistema de gestão deste modelo pode ser conectado a 4 células ligadas em série e possui sensores digitais para a medição da temperatura. Este BMS tem dois protocolos de comunicação: RS-485 e CAN-Bus. Para além de ter várias características em comum com o “REC BMS 7-R”, o “REC Active BMS” difere no método de equalização. A equalização deste BMS é ativa. Através da utilização de um conversor *flyback* a transferência de energia é bidirecional (do banco para a bateria ou da bateria para o banco)[17].

Figura 2.7 – Aspetto exterior do *REC Active BMS* [17].

2.3.3. BMS da *Orion*

Este BMS foi desenvolvido para ser integrado em VEs, para proteção, monitorização e gestão das baterias. Essencialmente são desenvolvidos para baterias com tecnologia de iões de lítio. Existem três versões do *Orion BMS* para fazer a gestão de diferentes números de células: *Junior*, *Standard Size* e *Extendend Size*. A *Orion BMS Junior* suporta entre 1 a 16 células em série, a *Orion BMS Standard Size* suporta até 108 células em série (aceita associações de 12 em 12 células em série) e a *Orion BMS Extendend Size* normalmente é utilizada para sistemas com mais de 120 células em série e suporta até 180 células em série (mais uma vez só é possível associar incrementos de 12 baterias em série ao BMS) [18].

O método de equalização deste BMS é o método passivo. Além da equalização, este sistema também permite estimar o SoH e o SoC, calcular o limite de corrente de carga e de descarga, fazer a proteção de tensões e correntes, assim como efetuar uma gestão térmica. A comunicação utilizada é através do protocolo CAN-Bus. Utiliza uma arquitetura centralizada. Também é fornecido o software que regista e exhibe dados em tempo real e também o software para a programação do BMS [18].

Figura 2.8 – Aspetto exterior do *Orion BMS*: (a) *Junior*; (b) *Standard Size*; (c) *Extended Size* [18].

2.3.4. BMS da *Nuvation*

Este tipo de sistemas de gestão de baterias é destinado para várias aplicações, como por exemplo VEs, aplicações militares e sistemas robóticos. O “*Nuvation BMS*” (Figura 2.9) pode ser aplicado em vários tipos de baterias, tais como lítio, chumbo-ácido, níquel e outras. Cada BMS consegue suportar até 12 ou 16 baterias (dependendo do modelo do “*Nuvation BMS*”). A comunicação pode ser feita através de *Ethernet*, CAN-Bus e RS-485. Faz a monitorização de temperatura, tensão e corrente e é responsável também pela prevenção de eventuais danos. A equalização deste BMS utiliza o método de equalização passivo [19], [20].



Figura 2.9 – Aspeto exterior do *Nuvation BMS* e interface com o utilizar para *tablet* [19].

Este BMS é dividido em três módulos: O *Stack Controller* (responsável pelo controlo e pelas comunicações), o *Cell Interface* (conecta-se às baterias e é o responsável pela monitorização e equalização) e o *Power Interface* (responsável pela alimentação de todo o sistema e também de toda a eletrónica de potência). O *Nuvation BMS* também tem a opção de comunicar com um interface utilizado num *tablet* para a consulta de gráficos com diagnósticos do sistema e de cada célula, temperaturas, correntes consumidas, SoC, SoH, monitorização da equalização e outras opções [19].

Na Figura 2.10 está apresentado um esquema de ligações fornecido pelo fabricante deste tipo de BMS com um banco de baterias de um VE.

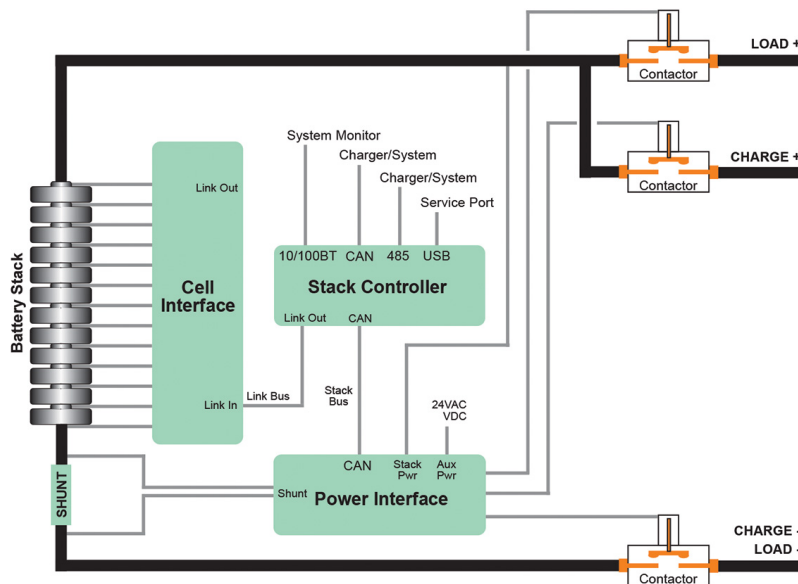


Figura 2.10 - Esquema de ligações do *Nuvation BMS* a um banco de baterias de um VE [21].

2.3.5. BMS da *123electric*

Também existem módulos individuais para monitorizar e equilibrar a tensão em todas as células que compõem uma bateria. Estes módulos são destinados a baterias de LiFePO₄. Cada bateria deverá ter o seu módulo BMS individual. Por sua vez estes módulos são conectados a um BMS central responsável pelo controlo de todas as operações que os módulos individuais vão executar. Na Figura 2.11 está apresentado um BMS central e um módulo individual de BMS (não estão à escala real).

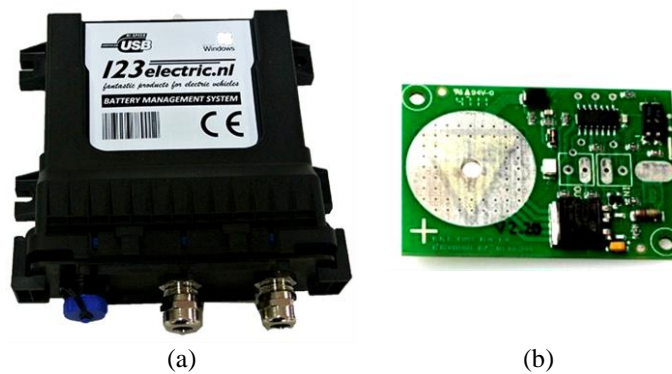


Figura 2.11 – BMS123: (a) BMS central; (b) Módulo individual de BMS [22].

Na Figura 2.12 estão apresentados vários *BMS123 Cell Module*, módulos individuais de sistemas de gestão de baterias da *123electric* [22], integrados num banco de baterias de LiFePO₄, utilizadas numa moto-quatro elétrica. Para além de cada bateria possuir um módulo individual, a ligação entre estes é simples.

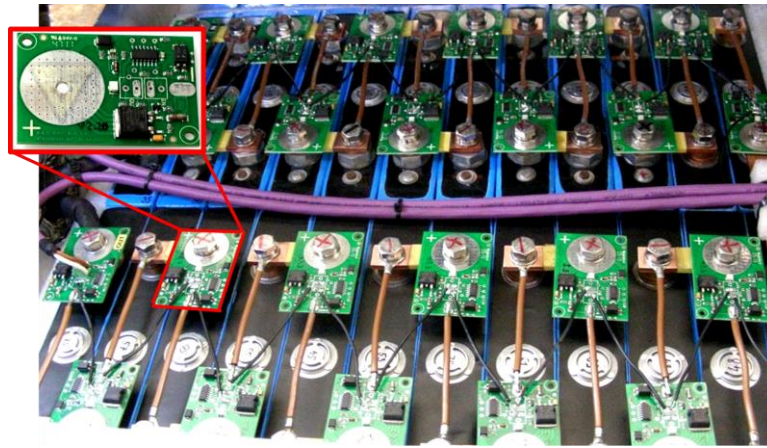


Figura 2.12 – Vários “BMS123 – CELL MODULE” integrados num banco de baterias de LiFePO4 [22].

2.4. Baterias para Veículos Elétricos e Híbridos

Os veículos com capacidade de propulsão elétrica veem o seu desempenho e eficiência dependentes dos seus sistemas de armazenamento de energia [23]. Hoje em dia, os sistemas de armazenamento de energia mais utilizados em VEs e híbridos elétricos (HEV) para fornecer energia aos motores elétricos são as baterias eletroquímicas. Este tipo de veículos exige baterias com determinadas características elétricas, segurança e, do ponto de vista económico, baterias de menor preço possível (desde que sejam respeitadas as condições anteriores). Para aplicações de VEs, as características das baterias necessitam de cumprir os seguintes requisitos [23]–[25]:

- Garantir a autonomia desejada, i.e., capacidade de armazenamento suficiente de forma a permitir percorrer distâncias equiparáveis a veículos com motor de combustão interna;
- A vida útil da bateria deve tentar acompanhar de um modo geral a durabilidade do resto dos componentes;
- Fornecer elevada potência para cumprir com os requisitos de arranque e aceleração do motor do VE;
- Aceitar recuperação de energia elétrica através da travagem regenerativa;
- Aceitar carregamentos rápidos para a conveniência do condutor, por isso a sua taxa de carregamento terá de ser elevada;
- Garantir resistência e tolerância a abusos, de forma a manter a bateria em segurança quando esta está sob condições extremas como sobrecargas ou curto-circuitos por exemplo.

Na Tabela 2.1 são apresentados alguns modelos de VEs e respetiva tecnologia de baterias usada.

Tabela 2.1 – Baterias utilizadas em diferentes tipos de VEs (baseado em [26]).

Fabricante	País	Modelo	Tecnologia das Baterias
<i>Toyota</i>	Japão	<i>Prius</i>	NiMH
<i>Chrysler</i>	USA	<i>Chrysler 200C EV</i>	Li-Ion
<i>Honda</i>	Japão	<i>Civic, Insight</i>	NiMH
<i>BMW</i>	Alemanha	<i>X6</i>	NiMH
<i>Tesla</i>	USA	<i>Roadster (2009)</i>	Li-Ion
<i>Ford</i>	USA	<i>Escape, Fusion, MKZ HEV</i>	NiMH
<i>GM</i>	USA	<i>Chevy-Volt</i>	Li-Ion
<i>Mitsubishi</i>	Japão	<i>iMiEV (2010)</i>	Li-Ion
<i>Ford</i>	USA	<i>Escape PHEV</i>	Li-Ion

Nos subcapítulos seguintes estão apresentados alguns exemplos de baterias que podem ser utilizadas em VEs e HEVs. A Tabela 2.2 baseada em [23] e [27], apresenta o tipo de tecnologia de baterias e as gamas de tensão e energia do banco de baterias para os vários tipos de VEs e híbridos elétricos. Como cada veículo requer baterias com determinadas características, podem ser feitas associações em série e/ou paralelo das baterias para corresponderem às necessidades da aplicação pretendida.

Tabela 2.2 – Tecnologia de baterias e gamas de tensão e energia para vários tipos de veículos híbridos e/ou elétricos (baseada em [23] e [27]).

Tipo de Veículo	Tecnologia das Baterias	Tensão (V)	Energia (kWh)
LEV	Pb, Ni	12 a 48	1 a 2
BEV	Li, Ni	200 a 500	25 a 75
<i>Micro HEV</i>	Pb	12 a 37	0,5
<i>Mild HEV</i>	Li, Ni	42 a 200	1
<i>Full HEV</i>	Li, Ni	300 a 500	2 a 5
<i>Plug-in HEV</i>	Li, Ni	300 a 500	5 a 20

2.4.1. Módulos de Baterias da Saft

A Saft é uma empresa que desenvolve módulos de baterias de diferentes tecnologias para várias aplicações, entre as quais veículos elétricos, híbridos e *Plug-in HEV*. De seguida são apresentados dois exemplos de módulos produzidos por este fabricante: *Ion'Drive 630 V* e *NHE 10-100*.

O módulo *Ion'Drive 630 V*, representado na Figura 2.13, possui baterias desenvolvidas com tecnologia de Li-Ion [28].



Figura 2.13 – Módulo de baterias *Ion'Drive 630 V* [28].

Este módulo de baterias vem equipado com um sistema de gestão de baterias, que inclui monitorização de parâmetros, equalização, sensores (tensão, corrente e temperatura) e proteções. Também tem um sistema de refrigeração líquido (*cooling*). A comunicação do BMS é feita através do protocolo CAN-Bus. As especificações deste módulo de baterias estão apresentadas na Tabela 2.3 [28].

Tabela 2.3 – Especificações do módulo de baterias *Ion'Drive 630 V* da Saft [28].

Características	Valor Nominal	Unidade
Tensão	633	V
Capacidade de carga	41	Ah
Dimensões	1950 x 600 x 300	mm
Peso	315	kg

O módulo de baterias *NHE 10-100* utiliza baterias com a tecnologia de NiMH [29]. Na Figura 2.14 está representado um exemplo deste tipo de módulos de baterias.



Figura 2.14 – Módulo de baterias *NHE 10-100* [30].

Estes módulos de baterias têm como características serem totalmente recicláveis, resistentes a abusos, livres de manutenção, selados, seguros e, tal como o módulo anterior, também têm um sistema de refrigeração líquido (*cooling*). No seu *datasheet* [29] não é especificado se este tipo de módulos tem BMS ou não. As especificações do módulo de baterias *NHE 10-100* estão apresentadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Especificações do módulo de baterias *NHE 10-100* da *Saft* [29].

Características	Valor Nominal	Unidade
Tensão	12	V
Capacidade de Carga	100	Ah
Energia Específica	66	Wh / kg
Densidade Energética	137	Wh / l
Potência Específica	150	W / kg
Densidade de Potência	310	W / l
Temperatura de Funcionamento	-20 a +40	°C
Temperatura de Armazenamento	0 a +30	°C
Dimensões	195 x 390 x 120	mm
Peso	18,6	kg

Na Figura 2.15 é possível observar a relação entre a capacidade percentual de carga da bateria com o número de ciclos. Esta relação foi obtida considerando uma taxa de descarga de $C/3$ e em cada ciclo a bateria foi descarregada 80% em relação à capacidade nominal.

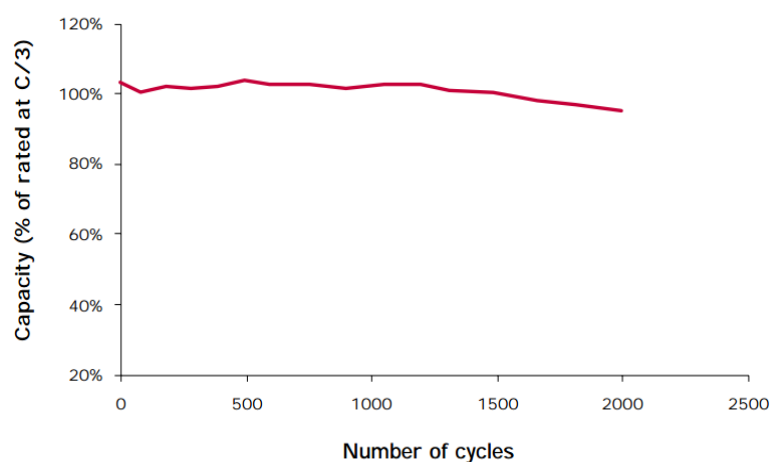


Figura 2.15 – Relação entre capacidade de carga da bateria *NHE 10-100* com o número de ciclos [29].

A relação entre a tensão e a profundidade de descarga da bateria (com uma temperatura ambiente de +23 °C) para diferentes taxas de descarga (C/3, C e 1,5C) está apresentada no gráfico da Figura 2.16.

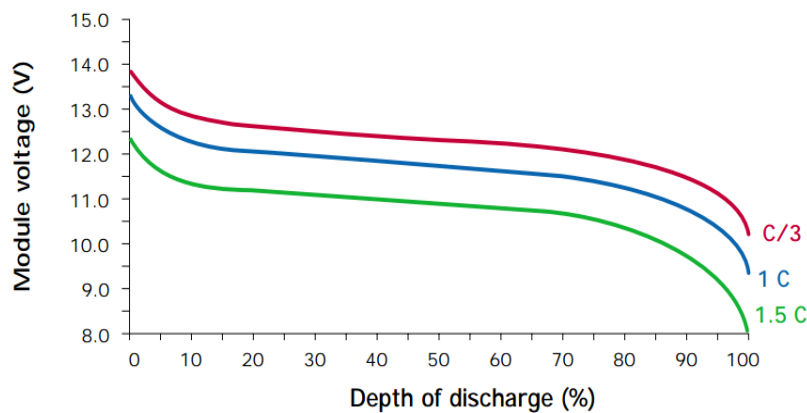


Figura 2.16 – Relação da tensão com a capacidade da bateria *NHE 10-100* (%), para várias taxas de descarga diferentes [29].

2.4.2. Baterias da WINA

Os modelos de baterias da WINA utilizam uma tecnologia de LiFePO4 [31]. Este tipo de baterias é adequado para aplicações de tração, incluindo VEs. Na Figura 2.17 estão apresentadas baterias deste modelo. Este modelo não tem efeito de memória, por isso pode ser recarregada independentemente do seu estado de descarga. Também tem a vantagem de usar uma tecnologia segura. Através da associação em série ou paralelo de várias baterias é possível obter as especificações necessárias para a aplicação pretendida. Esta bateria não tem BMS associada mas, por exemplo, o BMS descrito no subcapítulo 2.3.5 pode ser aplicado a um banco de baterias deste tipo. As especificações da bateria *WN100AH* pertencente ao modelo *WN-models* estão apresentadas na Tabela 2.5.



Figura 2.17 – Baterias *WN-models* da WINA [31].

Tabela 2.5 – Especificações da bateria *WN100AH* [32].

Especificações	Valor Nominal	Unidade
Tensão	3,2	V
Capacidade de carga	100	Ah
Resistência interna	1	mΩ
Corrente de Carregamento	33,3	A
Corrente de Descarregamento	33,3	A
Ciclos de vida	>2000	
Temperatura de Funcionamento	-20 a +60	°C
Temperatura de Armazenamento	-20 a +45	°C
Dimensões	36 x 230 x 218	mm
Peso	3,36	kg

A Figura 2.18 apresenta a relação entre a capacidade de carga percentual da bateria com o número de ciclos. Na Figura 2.19 está apresentada a relação entre a tensão e a profundidade de descarga da bateria para diferentes taxas de descarga.

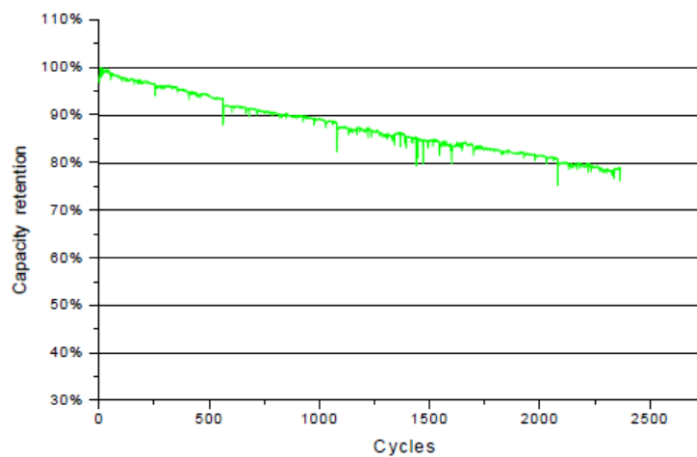


Figura 2.18 – Relação entre capacidade de carga da bateria *WN100AH* com número de ciclos [32].

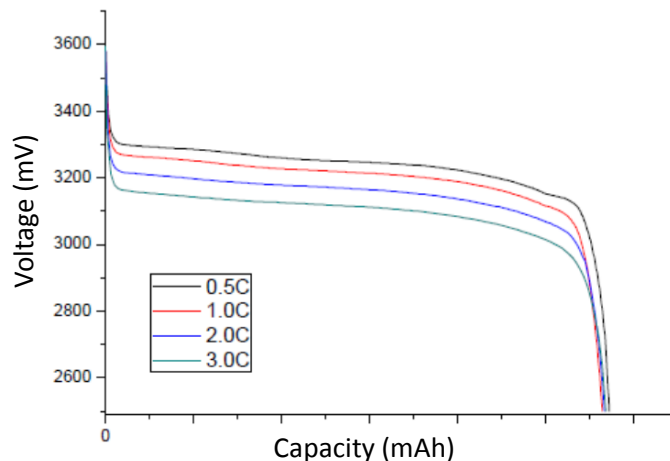


Figura 2.19 – Relação da tensão com a capacidade da bateria *WN100AH* (%) para várias taxas de descarga diferentes [32].

2.4.3. Módulos XP de Baterias da Valence

A Valence desenvolveu módulos de baterias destinadas a várias aplicações e entre as quais a exploração dessas baterias em veículos híbridos e/ou elétricos. O *XP Battery Module* foi desenvolvido com tecnologia de LiFeMgPO_4 . Na Figura 2.20 está apresentado um exemplo de modelo de bateria pertencente à série *XP Battery Module*, o modelo *U27-12XP* [33].



Figura 2.20 – Bateria *U27-12XP* da Valence [33].

As dimensões destas baterias assemelham-se com as baterias de chumbo-ácido, o que se torna vantajoso para muitas aplicações. Pelo *datasheet* [34] estas baterias destinam-se a aplicações entre os 12 V e os 700 V. As especificações da bateria *U27-12XP* podem ser consultadas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Especificações da bateria *U27-12XP* [34].

Especificações	Valor Nominal	Unidade
Tensão	12,8	V
Capacidade de Carga	138	Ah
Tensão Máxima de Carregamento	14,6	V
Corrente de Carregamento	55	A
Tempo de Carregamento	2,5	h
Corrente de Descarregamento	150	A
Corrente de Descarregamento (30 sec)	300	A
Tensão Mínima de Descarregamento	10	V
Dimensões	306 x 172 x 225	mm
Peso	19,5	kg
Temperatura de Funcionamento	-10 a +50	°C
Temperatura de Armazenamento	-40 a +50	°C
Resistência Interna	5	mΩ
Densidade Energética	148	Wh / l
Energia Específica	91	Wh / kg

Estas baterias têm dois tipos de sistemas de gestão: um BMS interno e outro externo. O BMS interno trata da gestão e da equalização entre as células de uma bateria enquanto o módulo BMS externo (Figura 2.21) faz a gestão e a equalização do banco de baterias (controla a equalização de uma bateria para outra). De acordo com o *datasheet* do BMS [35], este é capaz de fazer a monitorização, medir temperaturas, tensões, correntes e determinar o estado de carga. Um único módulo BMS pode fazer a gestão de várias baterias. A comunicação utilizada para o controlo e gestão é através do protocolo CAN-Bus para comunicações externas e o protocolo RS-485 para comunicações entre módulos.



Figura 2.21 – *U-BMS-HV*: Sistema de Gestão de Baterias para *XP Battery Module* [35].

Os seguintes gráficos foram retirados do *datasheet* da bateria. A relação entre a capacidade percentual de carga da bateria com o número de ciclos da bateria (taxa de carga e descarga de C/2 e temperatura ambiente de 23 °C) está apresentada na Figura 2.22. Na Figura 2.23 pode ser observada, para várias taxas de descarga, a relação entre a tensão e a capacidade da bateria (temperatura ambiente de 23 °C).

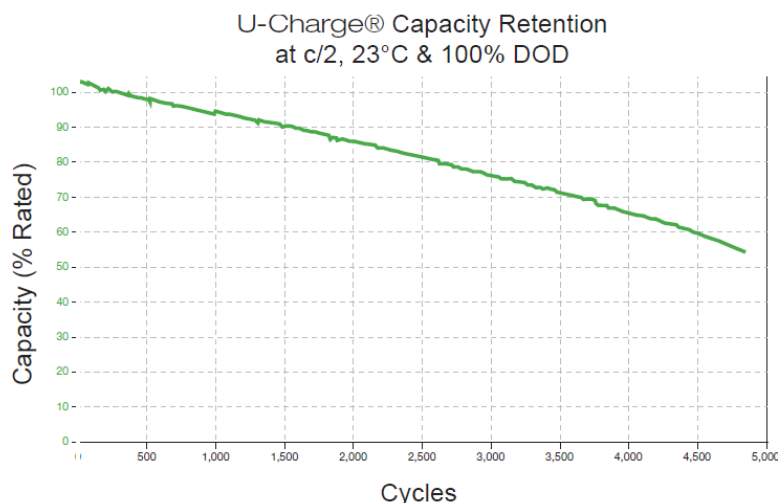


Figura 2.22 – Relação entre capacidade de carga da bateria *U27-12XP* com número de ciclos [34].

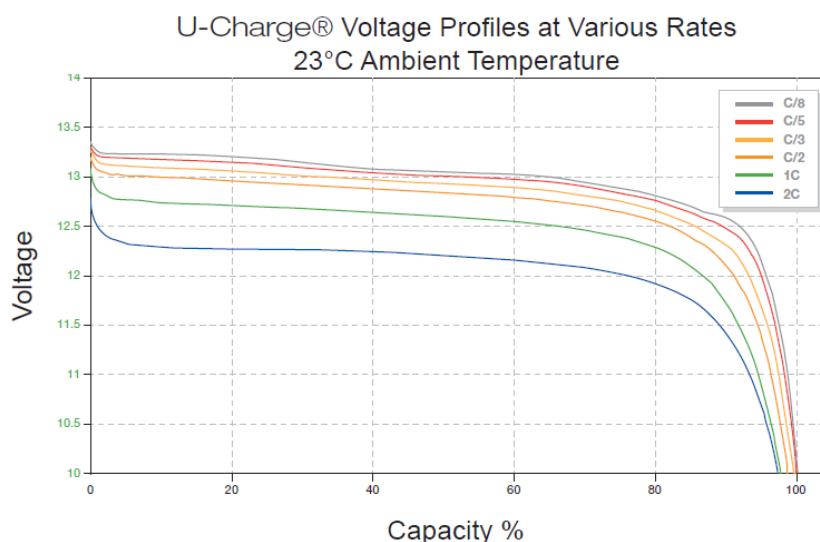


Figura 2.23 – Relação da tensão com a capacidade da bateria *U27-12XP* (%), para várias taxas de descarga diferentes [34].

2.5. Comparação Entre Diferentes BMS Disponíveis no Mercado

Das soluções apresentadas anteriormente, a Tabela 2.7 apresenta a comparação entre algumas dessas soluções.

Tabela 2.7 – Comparação de seis BMS comercialmente disponíveis.

		BMS				
		<i>Lyon ion</i>	REC 7-R	REC Active	<i>Orion</i>	<i>Nuvation</i>
Nº de células		1 a 2	4 a 14	4	5 a 180	16
Comunicação		CAN	RS-485	RS-485 e CAN	CAN	CAN
Equalização		Passiva	Passiva	Ativa	Passiva	Passiva
Determina SoH		-	Sim	Sim	Sim	Sim
Determina SoC		-	Sim	Sim	Sim	Sim
Tipo de Proteções	Sobrecargas	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
	Curto-Circuitos	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
	Sobretensões	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
	Controlo de Temperatura	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
	Limita correntes de carga e descarga	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Tecnologias de Baterias Compatíveis		LiFePO4	Li-PO, LiFePO4, LiFeYPO4, LiCoO2 e LiMnNiCo	Li-PO, LiFePO4, LiFeYPO4, LiCoO2 e LiMnNiCo	LiPO, LiFePO4, LiCoO2	Li-PO, LiFePO4, LiCoO2 e Lead-Acid

A comparação passa por analisar o número de células que cada BMS pode equalizar, bem como o tipo de comunicação e equalização. Também é comparado se o BMS determina parâmetros como o SoC e o SoH e ainda que tipo de proteções possui. Por fim são apresentados quais são os principais tipos de tecnologias de baterias que são compatíveis com os respetivos BMS. Alguns dos parâmetros da tabela não estão preenchidos devido à falta de informação por parte dos fabricantes.

2.6. Conclusões

Neste capítulo começou-se por introduzir os sistemas de gestão de baterias e posteriormente foram descritos alguns dos principais requisitos que constituem um BMS. Existe uma grande variedade de BMS no mercado, entre os quais sistemas de gestão destinados a baterias específicas, BMS que podem ser adaptados a vários tipos de bancos de baterias, outros divididos em partes (como o caso do *Nuvation BMS*) e módulos individuais para cada bateria que efetuam algumas funções de BMS. A maioria dos equipamentos existentes no mercado utilizam o método de equalização passiva e uma grande parte destina-se a baterias de lítio. Já começam a surgir BMS com equalização ativa (por exemplo, o caso do modelo *REC Active BMS*), mas é uma área que ainda está em desenvolvimento e é possível explorar as suas capacidades.

Foram também apresentadas de um modo geral as características necessárias de baterias para aplicar em VEs e foram apresentados alguns exemplos de módulos de baterias. Destes exemplos demonstrados, além de terem a segurança como vantagem, alguns também possuem sistemas de gestão (internos ou externos).

CAPÍTULO 3

Sistemas de Gestão de Baterias

3.1. Introdução

A utilização de sistemas de gestão de baterias, conhecidos na literatura como BMS (*Battery Management System*) torna-se cada vez mais indispensável devido à evolução das baterias e das suas aplicações. Muitos sistemas que utilizam baterias, como por exemplo, aplicações industriais, redes de armazenamento de energia em baterias e veículos elétricos dependem da forma escolhida para implementar o seu BMS, não só para garantir o seu funcionamento dentro de condições de segurança, mas também porque as baterias e o seu sistema de gestão influenciam significativamente o preço da aplicação.

Atualmente são conhecidas várias topologias de balanceamento de baterias. Neste capítulo abordam-se algumas arquiteturas existentes de BMS e também são apresentadas algumas topologias de equalização passivas e ativas.

3.2. Arquiteturas de BMS

Atualmente existem diferentes arquiteturas de BMS que dependem do número de baterias utilizadas e das necessidades do sistema. As arquiteturas de BMS podem ser divididas em duas categorias principais: arquitetura BMS centralizada e arquitetura BMS distribuída [6], [27], [36], [37].

3.2.1. Arquitetura BMS Centralizada

Numa arquitetura BMS centralizada todas as baterias do sistema estão conectadas ao mesmo módulo central BMS, ou seja, existe apenas um único controlador responsável por comandar e monitorizar todas as funções do BMS. Na Figura 3.1 está representado um exemplo de uma arquitetura centralizada. Uma arquitetura BMS centralizada apresenta algumas vantagens: É mais compacta e mais económica, pois apenas necessita de um sistema de gestão. Esta arquitetura só é uma boa opção caso o sistema tenha poucas baterias. A complexidade aumenta à medida que o número de baterias do sistema também aumenta, i.e., como todas as baterias estão ligadas diretamente ao mesmo BMS, isto requerá inúmeros “portos” para fazer essas conexões. Isto traduz-se numa limitação de

hardware e de capacidade de processamento do controlador. Caso o sistema pretendido contiver um grande número de baterias, esta arquitetura não é considerada uma boa opção [6], [27], [36]–[38].

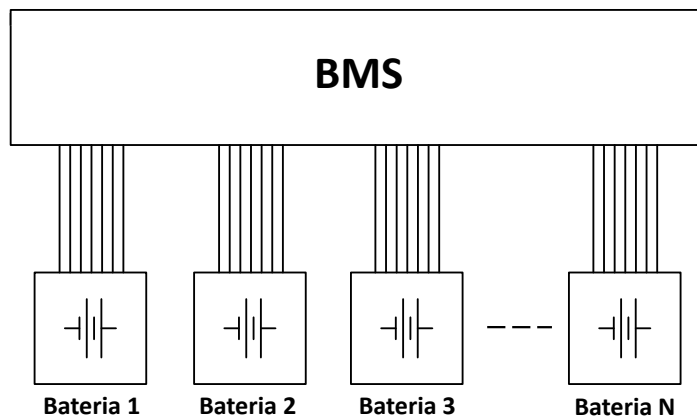


Figura 3.1 – Arquitetura BMS Centralizada.

3.2.2. Arquitetura BMS Distribuída

Numa arquitetura BMS distribuída há dois tipos diferentes de BMS: *master* BMS e o *slave* BMS. Para cada bateria ou banco de baterias existe um *slave* BMS. Cada *slave* BMS é responsável por controlar os processos de carga e descarga, monitorizar e tratar do processo de equalização do banco (ou bateria) que está associado. Todos os *slave* BMS estão conectados ao *master* BMS, que gere e comanda quais as baterias que deverão ser equalizadas e é também o responsável pela comunicação com o utilizador. Na literatura esta arquitetura é aconselhada para aplicações com um número elevado de baterias, porém comparativamente com a arquitetura BMS centralizada, esta apresenta um maior custo de implementação [6], [27], [36]–[38].

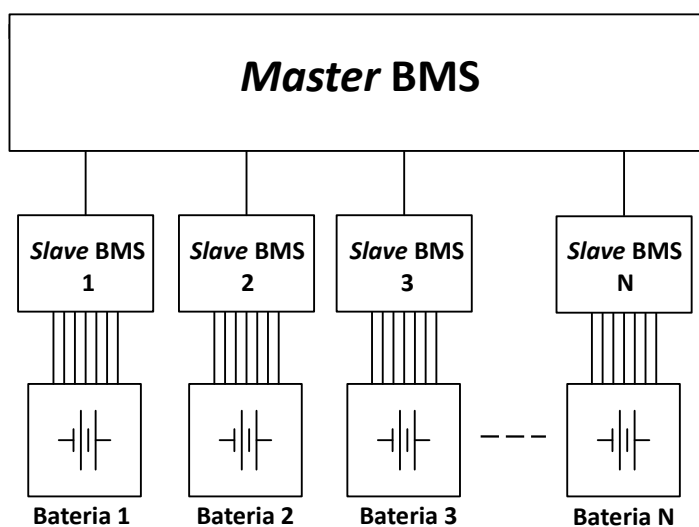


Figura 3.2 – Arquitetura BMS Distribuída.

3.3. Arquitetura e Funções do BMS para Veículos Elétricos

Na Tabela 3.1 são apresentadas algumas funções típicas de sistemas de gestão de baterias para algumas categorias de VEs, e o tipo de arquitetura utilizada.

Tabela 3.1 – Arquiteturas e funções do BMS presente nos diferentes tipos de veículos elétricos [27].

Arquitetura	Funções típicas do BMS	Tipo de Veículo
Centralizada	Monitorização, controlo	LEV
Distribuída	Monitorização, medições, cálculos, comunicações, equalização	BEV
Centralizada	Monitorização, medições, cálculos, comunicações, equalização	<i>Micro</i> HEV
Centralizada ou Distribuída	Monitorização, medições, cálculos, comunicações, equalização	<i>Mild</i> HEV
Centralizada ou Distribuída	Monitorização, medições, cálculos, comunicações, equalização	<i>Full</i> HEV
Distribuída	Monitorização, medições, cálculos, comunicações, equalização	<i>Plug-in</i> HEV

3.4. Métodos de Equalização

A equalização num sistema de baterias é um assunto bastante importante no que toca à vida útil das baterias. Sem um sistema de equalização, ao longo do tempo as tensões entre baterias vão-se afastar. Os desequilíbrios podem advir de causas internas e/ou externas à bateria [2], [39]. No mundo real, um fabricante não consegue produzir duas baterias totalmente iguais, isto é, existem variações na impedância interna e na capacidade de uma bateria para a outra. Por exemplo, num sistema com n baterias em série estas diferenças podem comprometer o funcionamento do sistema de baterias e também a vida útil das mesmas [2], [40], [41].

Esses desequilíbrios podem ser prejudiciais durante a carga ou a descarga das baterias. Ao existirem baterias desequilibradas, durante o processo de carregamento algumas baterias atingem mais rapidamente o valor máximo de carga (dado pelo fabricante) enquanto outras ainda estão a carregar. Assim, se o processo de carregamento não for interrompido, as baterias que já atingiram o valor máximo de carga podem sofrer sobrecargas. Durante o processo de descarga acontece o mesmo, algumas baterias atingem mais rapidamente o valor de descarga (dado pelo fabricante) do que outras. Isso pode levar a uma redução de vida útil das baterias.

O tipo de bateria utilizado influencia na escolha de uma solução para este problema. Por exemplo, as baterias de chumbo-ácido e níquel podem ser expostas a condições de sobrecarga sem sofrer danos permanentes [2], [42], [43]. No caso das baterias de íões de lítio, a equalização é fundamental pois não são tão tolerantes a sobrecargas [2], [42], [43]. Já existem vários métodos para efetuar a equalização de baterias. Nos subcapítulos 3.5 e 3.6 são descritos alguns métodos de equalização passivos e ativos (Figura 3.3). Os métodos de balanceamento passivos removem o excesso de carga da bateria mais carregada através de um elemento passivo até que o valor corresponda com a bateria de menos carga. Os métodos de balanceamento ativos removem a carga da bateria mais carregada e entregam à bateria com menos carga, até que esta esteja equilibrada. Para implementar as várias topologias ativas, podem ser utilizados condensadores, componentes indutivos ou conversores.

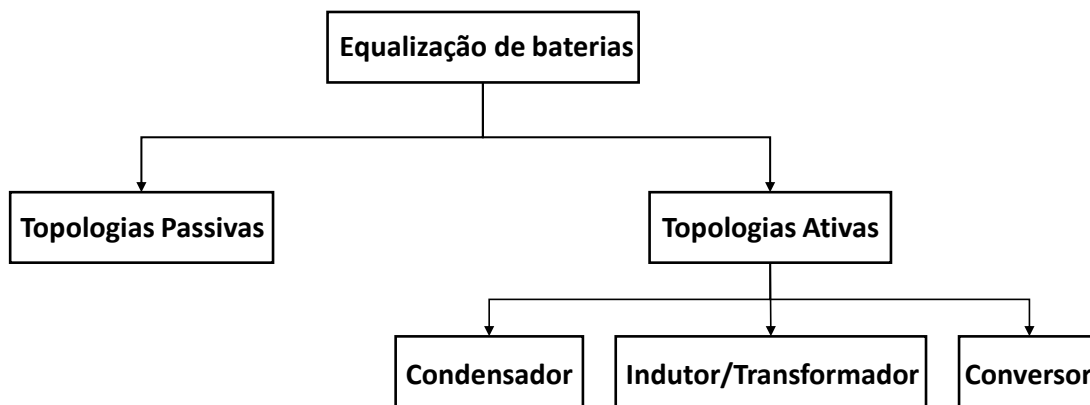


Figura 3.3 – Topologias de Equalização.

3.5. Método de Equalização Passivo

Na literatura, as topologias de equalização passivas são consideradas simples de implementar [2], [44]. Tal como referido anteriormente, o princípio de funcionamento deste método de equalização consiste em dissipar a energia das baterias mais carregadas através de um elemento passivo (resistência), e aguardar até que todas as baterias do sistema atinjam o mesmo estado de carga ou até alcançarem um valor predefinido [2][44][45]. Esta dissipação de energia representa a maior desvantagem das topologias de equalização passivas. De seguida serão apresentadas duas topologias de equalização passivas: *fixed shunting resistor* e *switching shunting resistor*.

3.5.1. Fixed Shunting Resistor

A topologia de equalização passiva *fixed shunting resistor* está representada na Figura 3.4 [2], [41], [44], [45]. Nesta topologia é colocada em paralelo com cada bateria

uma resistência. Para que a tensão das baterias seja equilibrada, o valor de cada resistência terá de ser o mesmo de maneira a que a bateria com a maior tensão dissipe mais energia do que uma bateria com menor tensão [2], [41], [44], [45]. Como não é possível controlar a energia dissipada nem escolher quais as baterias que deverão dissipar energia, esta topologia não tem sistema de controlo.

Como vantagens pode-se dizer que esta topologia além da sua simplicidade também tem um baixo custo de implementação. Como desvantagens, desperdiça energia durante a dissipação e, devido a essa dissipação, necessita de uma gestão térmica mais rigorosa.

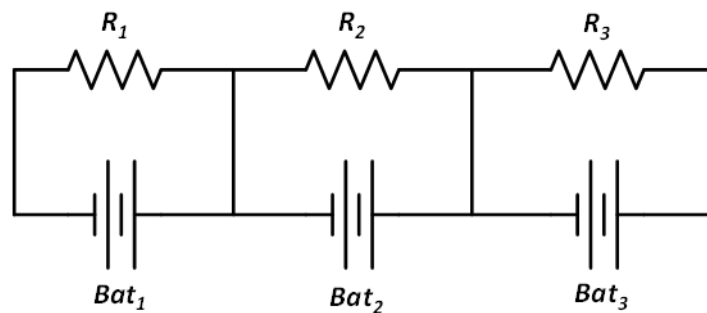


Figura 3.4 – Circuito da topologia *fixed shunting resistor* para três baterias em série.

3.5.2. *Switching Shunting Resistor*

Na Figura 3.5 está representado o circuito da topologia *switching shunting resistor*[2], [41], [43]–[45]. A configuração desta topologia apresenta algumas semelhanças com a topologia anterior (*fixed shunting resistor*), mas para além das resistências em paralelo com as baterias, utiliza também um interruptor controlado em série com cada resistência. Esta topologia tem dois modos de funcionamento: modo contínuo e modo de deteção.

No modo contínuo, existe apenas um sinal *on/off* que controla todos os interruptores. O sinal de controlo só é ligado a *on* quando as baterias estão a carregar. Quanto maior a tensão numa bateria, menor será a sua corrente de carga, de modo a “esperar” que as outras baterias estejam recarregadas. Assim as baterias que atingirem primeiro a tensão de fim de carga não serão sobrecarregadas. Uma das vantagens do modo contínuo é não necessitar de um controlo complexo [2], [43].

No modo de deteção é necessário monitorizar o estado de carga das baterias. Sabendo o estado de carga de cada bateria, o sistema de controlo irá avaliar se existe desequilíbrio entre as baterias e poderá determinar se as resistências de dissipação de energia deverão ser conectadas ou não às baterias correspondentes [2], [43].

Esta topologia apresenta maior eficiência relativamente à topologia *fixed shunting resistor*, pois permite uma melhor gestão das baterias. A sua implementação é mais complexa e dispendiosa, uma vez que necessita de semicondutores controlados, de monitorizar alguns parâmetros e de recorrer a um microcontrolador.

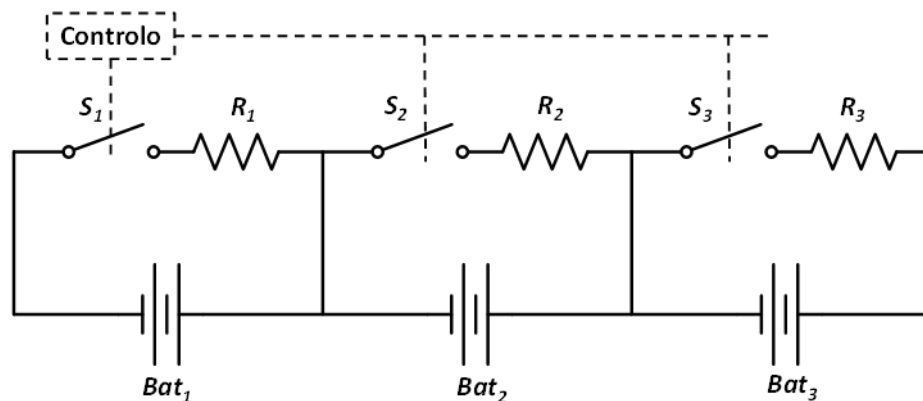


Figura 3.5 – Circuito da topologia *switching shunting resistor* para três baterias em série.

3.6. Método de Equalização Ativo

O princípio de funcionamento do método de equalização ativo baseia-se na transferência de energia entre baterias, com auxílio a componentes ativos [2], [46]. Na literatura [2], [41], [43], [45]–[49] existem várias topologias de equalização ativa baseados em: condensadores, indutâncias/ transformadores e conversores.

As topologias de equalização ativa baseadas em condensadores (ou *shuttling capacitors cell balancing*), utilizam condensadores como elementos externos de armazenamento de energia, para transportar a energia entre as baterias, de modo a realizar o equilíbrio de carga das mesmas. Atualmente, as mais relevantes podem ser categorizadas em cinco topologias diferentes: *Switched capacitor (SC)*, *double-tiered switched capacitor (DTSC)*, *single switched capacitor (SSC)*, *modularized switched capacitor (MSC)* [46] e mais recentemente *switch matrix with capacitor (SMwC)* [47].

As topologias de equalização ativas baseadas em indutâncias ou transformadores utilizam esses componentes para transferir a energia de uma bateria (ou de um grupo de baterias) para outra bateria (ou grupos de baterias). O tempo de equalização é menor comparando com as topologias baseadas em condensadores, mas o custo dos transformadores é elevado, o que constitui uma desvantagem [2]. As topologias *shared transformer*, *multiple transformer* e *switched transformer* são alguns exemplos de topologias baseadas em transformadores.

As topologias de equalização ativas baseadas em conversores, são caracterizadas por terem um controlo total do processo de equalização [2]. Estas topologias têm como

desvantagens a sua complexidade e custo de implementação. Estes conversores podem ser isolados ou não isolados, e podem ser programados para transferir energia de forma bidirecional entre baterias [50]. Como exemplos de conversores utilizados neste tipo de topologias temos: *Cúk converter*, *buck or/and boost converter*, *flyback converter*, *ramp converter*, *full-bridge converter* e *quasi-Resonant converter*.

3.6.1. *Switched Capacitor (SC)*

A topologia de equalização ativa *switched capacitor* está representada na Figura 3.6. O seu princípio de funcionamento consiste na transferência de energia entre baterias adjacentes através de condensadores. Esta topologia necessita de um condensador para cada duas baterias, isto é, para n baterias são necessários $n-1$ condensadores.

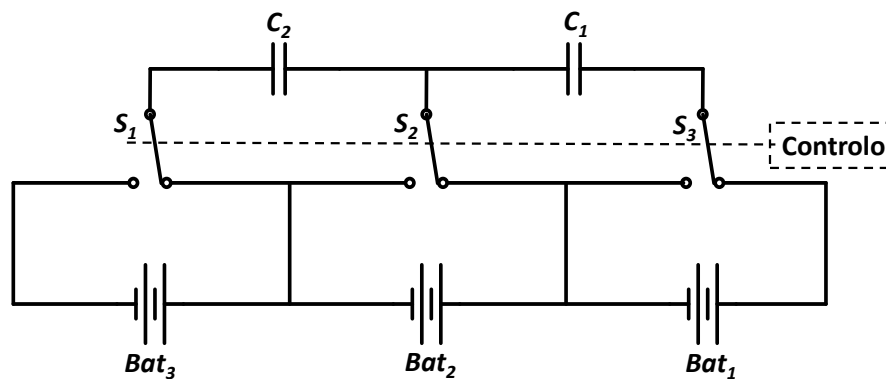


Figura 3.6 – Circuito da topologia *switched capacitor* para três baterias em série.

Através da comutação dos interruptores bidirecionais, as baterias com maior tensão irão carregar os condensadores que por sua vez descarregam a sua energia nas baterias de menor tensão.

Na literatura [48], [51], [52], o sistema de controlo desta topologia é considerado como simples de implementar, pois são apenas necessários dois sinais de controlo em oposição de fase, sem necessidade de medir o estado de carga de cada bateria. Estes sinais comutam os interruptores bidirecionais sincronamente a uma dada frequência. É necessário considerar sempre um pequeno período de tempo de espera (*dead-time*) entre cada transição de modo a evitar curto circuitos. Como é utilizada uma estratégia de controlo simples, a tensão de equalização vai depender do estado de carga das baterias adjacentes e por isso não é possível definir um valor padrão para a tensão de equalização. Esta topologia pode funcionar durante o carregamento e durante a descarga das baterias (com baixas correntes) pois consegue operar com elevada eficiência [48].

Como neste método a transferência de energia está dependente da diferença de tensão entre as baterias, caso seja aplicado em baterias em que uma elevada variação do estado de carga não corresponda a uma elevada variação na tensão, este método não terá tanta eficiência. Outra desvantagem deste método é o facto de ter um tempo de equalização longo, principalmente, quando as baterias desequilibradas se encontrem em lados opostos do banco de baterias.

3.6.2. *Double-tiered Switched Capacitor* (STSC)

A topologia de equalização *double-tiered switched capacitor*, representada na Figura 3.7, é uma derivação da topologia *switched capacitor*. Este novo método utiliza dois “níveis” de condensadores para a transferência de energia, i.e., um condensador por cada duas baterias. Para equilibrar um sistema com n baterias, esta topologia requer n condensadores e $2n$ interruptores [48], [49], [53].

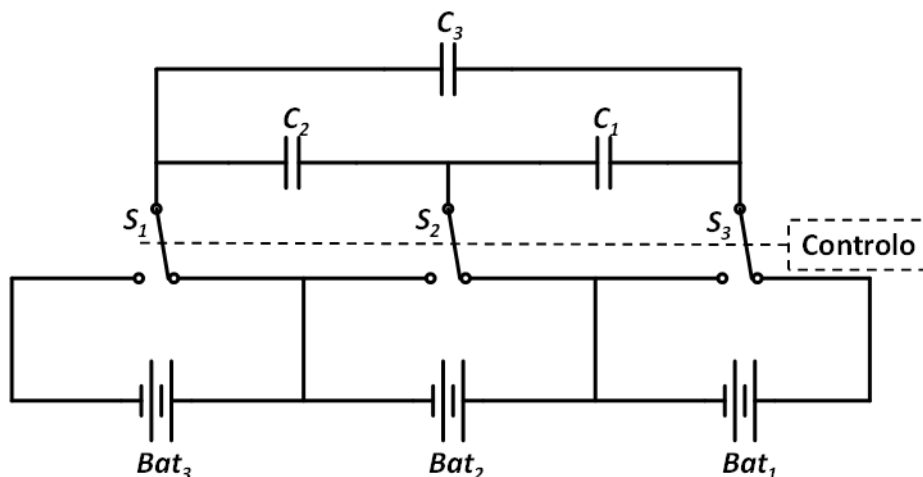


Figura 3.7 – Circuito da topologia *double-tiered switched capacitor* para três baterias em série.

Quanto ao sistema de controlo, também é semelhante ao controlo da topologia *switched capacitor*. Utilizam-se dois sinais de controlo, em oposição de fase, que comutam os interruptores bidirecionais a uma dada frequência. Como segurança, para evitar curto circuitos nas baterias, é necessário um tempo morto (*dead-time*) entre as comutações dos interruptores bidirecionais.

Com a adição de uma nova camada de condensadores haverá uma redução significativa no tempo de equalização (aproximadamente para metade). Consequentemente a transferência de energia entre baterias mais distantes será mais rápida [49], [53]. A tensão de equalização das baterias também depende das tensões entre baterias adjacentes, por isso não pode ser definido um valor padrão pelo utilizador. Esta

topologia pode estar em funcionamento durante a carga e descarga das baterias e operar com elevada eficiência.

3.6.3. Modularized Switched Capacitor (MSC)

Outra topologia que deriva do método *switched capacitor* é a topologia *modularized switched capacitor* [2], [48]. Esta agrupa as baterias em módulos, onde cada módulo deverá ter o mesmo número de baterias, tal como mostra o exemplo da Figura 3.8, dois módulos com três baterias cada. Dentro de cada módulo de baterias existe um sistema de equalização de baterias individual. Para o módulo que contém as baterias Bat₁, Bat₂ e Bat₃, o sistema de equalização é constituído pelos condensadores C₁ e C₂ e pelos interruptores bidirecionais S₁, S₂ e S₃, e para o módulo que contém as baterias Bat₄, Bat₅ e Bat₆, o sistema de equalização é constituído pelos condensadores C₃ e C₄ e pelos interruptores bidirecionais S₄, S₅ e S₆. De seguida, para equalizar as tensões entre módulos é adicionado outro sistema de equalização em paralelo (condensador C₅ e interruptores bidirecionais S₇ e S₈) [48].

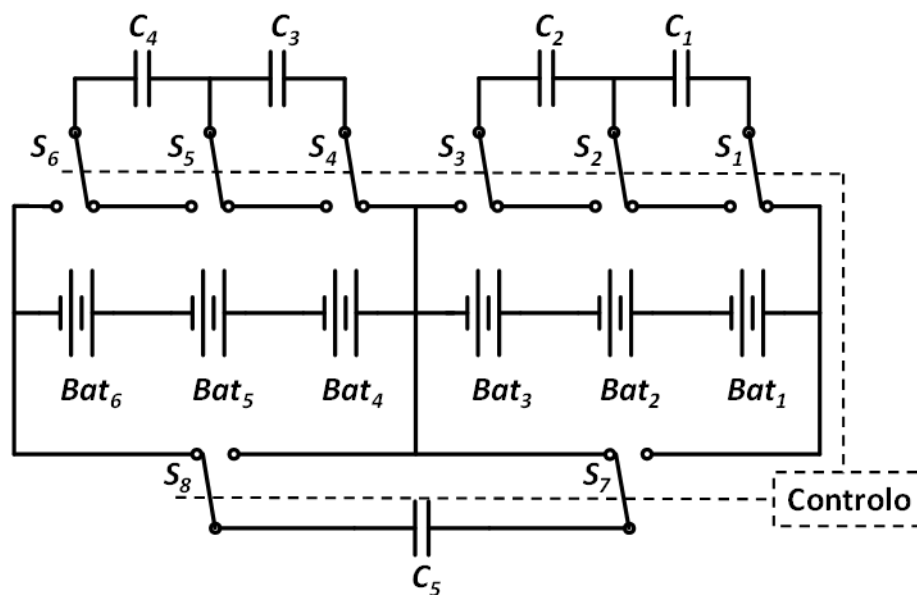


Figura 3.8 – Circuito da topologia *modularized switched capacitor* para dois módulos de três baterias.

Para equalizar n baterias são requeridos $n-1$ condensadores com uma tensão equivalente à tensão de um módulo, $2n+4$ interruptores bidirecionais e um condensador (com tensão equivalente à tensão de dois módulos) para cada dois módulos. Esta topologia terá um tempo de equalização reduzido, mas em contrapartida o número de condensadores de equalização será maior. Com o aumento do número de interruptores bidirecionais e de condensadores de equalização, as perdas serão maiores e o custo do

sistema de equalização também aumentará significativamente, o que constitui uma desvantagem para a topologia MSC [2], [48], [54].

3.6.4. *Single Switched Capacitor* (SSC)

A topologia *single switched capacitor*, uma topologia de equalização ativa também baseada em condensadores, apenas utiliza um condensador de equalização (Figura 3.9) [46], [48], [53]. Para equalizar n baterias, além de ser constituída apenas por um condensador, esta topologia requer também $n+5$ interruptores bidirecionais.

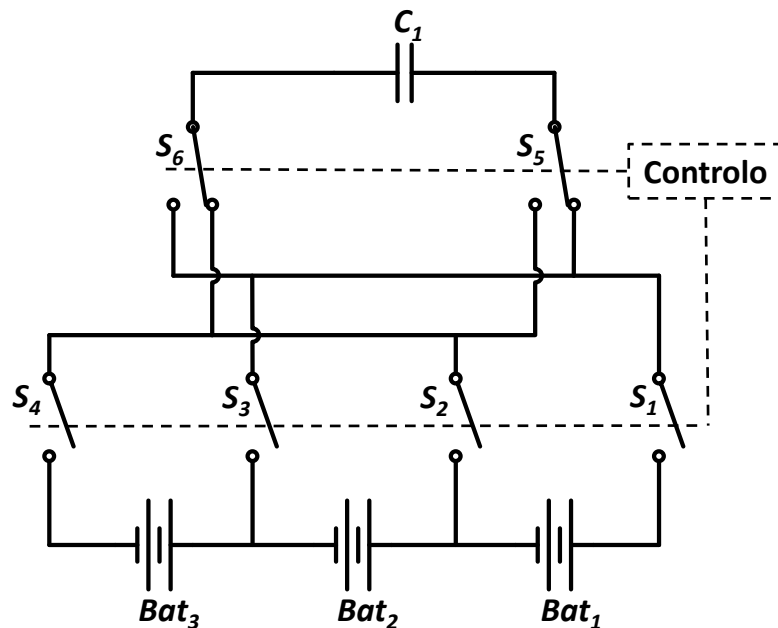


Figura 3.9 – Circuito da topologia *single switched capacitor* para três baterias em série.

Para o sistema de controlo podem ser utilizadas várias estratégias, umas mais simples e outras com um nível de complexidade mais elevado. Uma estratégia de controlo simples, por exemplo, passa por conectar o condensador de equalização a uma bateria de cada vez, até que estas estejam equalizadas. O tempo de duração de equalização desta estratégia iria depender do número de baterias do sistema e da posição em que se encontravam as baterias com diferentes estados de carga. Por outro lado, se a estratégia de controlo utilizada for mais trabalhada, o tempo de equalização poderá sofrer uma redução significativa tal como as estratégias de controlo propostas em [46] e [48]. Por exemplo, monitorizando as baterias, é possível saber o estado de carga de cada bateria. Assim, se o condensador de equalização for conectado entre a bateria com maior tensão e a bateria com menor tensão, o tempo de equalização será reduzido, comparativamente com a solução apresentada anteriormente. Esta topologia de equalização é vantajosa, pois permite equalizar baterias, independentemente da sua posição no circuito. Normalmente

a topologia *single swtched capacitor* só é utilizada para equalizar mais de quatro baterias, devido ao seu tamanho e custo de implementação [46].

3.6.5. Shared Transformer

Na Figura 3.10 está representado o circuito da topologia *shared transformer*. Para equalizar n baterias, nesta topologia é utilizado um transformador com um único núcleo magnético e com n secundários (um secundário para cada bateria) [2], [42], [43], [47], [50].

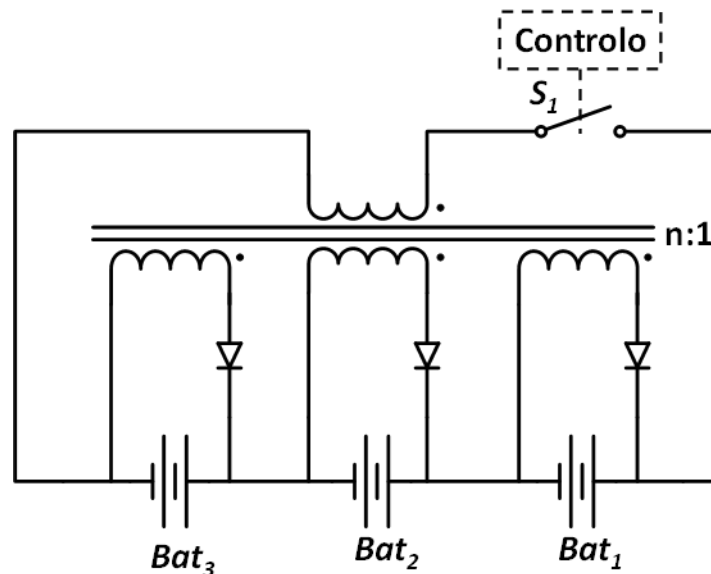


Figura 3.10 – Circuito da topologia *shared transformer* para três baterias em série.

O princípio de funcionamento desta topologia consiste em extrair energia a partir do conjunto de baterias através do primário e entregar individualmente a cada bateria pelos secundários. Como todos os secundários têm o mesmo número de espiras e partilham o mesmo núcleo, as suas tensões serão iguais, assim as correntes de equalização em cada bateria vão depender da tensão em cada uma delas. Por outras palavras, as baterias com maior carga receberão menos energia e as baterias com menor carga receberão mais energia, fazendo assim com que as baterias sejam equalizadas [42], [50].

A robustez e o tempo de equalização são duas fortes vantagens desta topologia. Por outro lado, a complexidade e o custo de implementação traduzem-se em desvantagens. O transformador utilizado terá de ser dimensionado consoante o número de baterias, o que torna esta topologia pouco flexível se se pretender adicionar mais baterias ao sistema.

3.6.6. Multiple Transformer

A topologia *multiple transformer*, representada na Figura 3.11, é uma variação da topologia anterior *shared transformer*. Para equalizar n baterias, são necessários n

transformadores iguais. Os enrolamentos do lado primário são ligados em paralelo ao conjunto das baterias e cada secundário é ligado a uma bateria diferente [2], [42], [50].

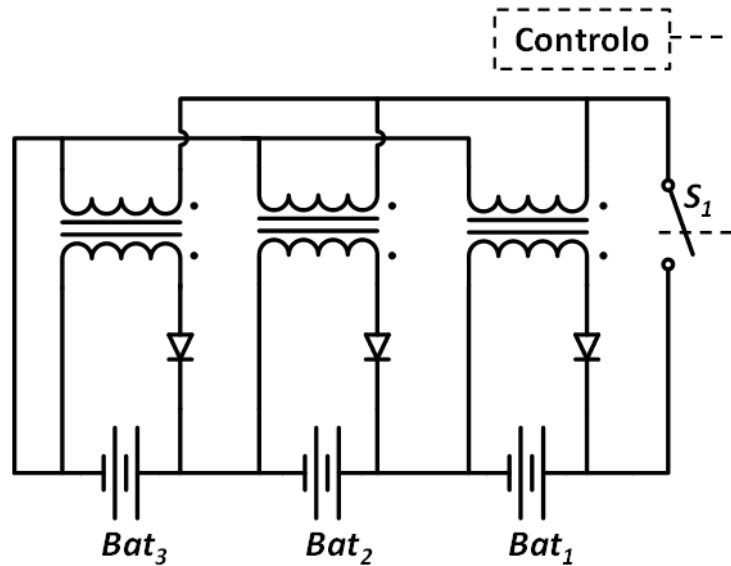


Figura 3.11 – Circuito da topologia *multiple transformer* para três baterias em série.

Esta topologia também apresenta robustez e um tempo de equalização reduzido. Como são utilizados vários transformadores (cada um com o seu núcleo magnético) em vez de um transformador com múltiplos secundários, há mais facilidade em adicionar mais baterias ao sistema [42].

3.6.7. *Switched Transformer*

Na Figura 3.12 está representado o circuito da topologia de equalização ativa *switched transformer*. Esta topologia necessita de um transformador e de $n+6$ interruptores para equalizar n baterias em série [2], [42], [50].

O lado primário do transformador é ligado ao conjunto das baterias, e o secundário é ligado a uma configuração de interruptores controlados pelo sistema de controlo. Para a equalização, o sistema de controlo irá detetar qual a bateria com menor tensão e ligar os interruptores responsáveis por conectar o transformador a essa bateria. Esta topologia consegue equalizar baterias de forma rápida. Como desvantagens desta topologia temos a sua complexidade de implementação e baixa eficiência devido às perdas por comutação nos interruptores [2], [42], [43].

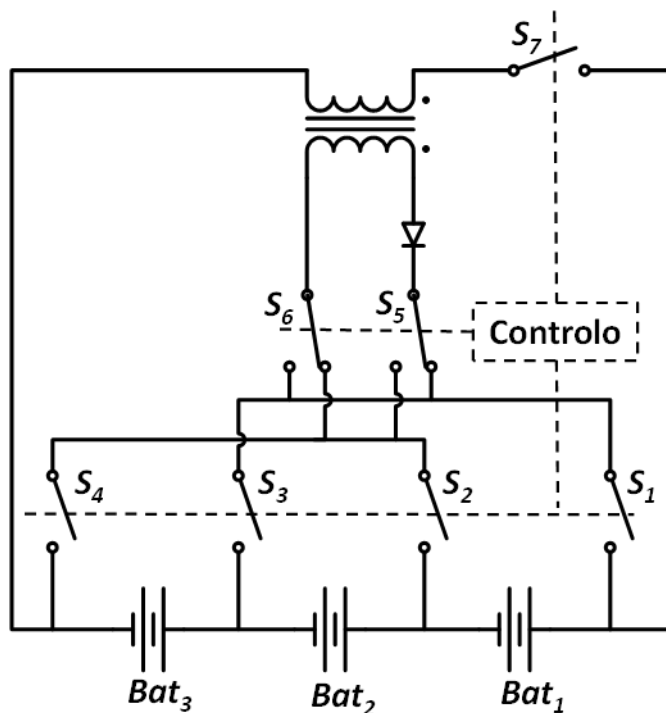


Figura 3.12 – Circuito da topologia *switched transformer* para três baterias em série.

3.6.8. Buck or/and Boost Converter

Os conversores *step-up*, *step down* e *step-up-down* são também utilizados em sistemas de gestão de baterias [2], [43], [50]. Atualmente já existem várias topologias de equalização, como por exemplo a utilização de um conversor *buck-boost* (Figura 3.13) para remover o excesso de energia da bateria mais carregada e transferir para as baterias com menor energia[2], [50]. Este tipo de topologia de balanceamento baseado em conversores exige um sistema de controlo complexo e tem um custo elevado de implementação [2], [50].

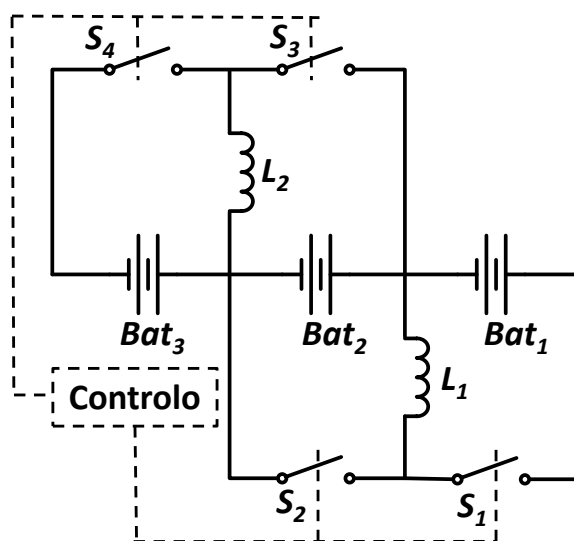


Figura 3.13 – Circuito da topologia *buck-boost converter* para três baterias em série.

3.6.9. Switch Matrix (SM)

A topologia *switch matrix* pode ser implementada de três formas diferentes: utilizando condensadores (*switch matrix with capacitor* - SMwC), utilizando transformadores (*switch matrix with transformer* - SMwT) ou utilizando conversores CC/CC (*switch matrix with DC/DC converter* - SMwDC/DC) [47]. Na Figura 3.14 está representada a topologia SMwC. Para equalizar n baterias, esta topologia necessita de um condensador de equalização e de uma matriz de $2n$ interruptores bidirecionais.

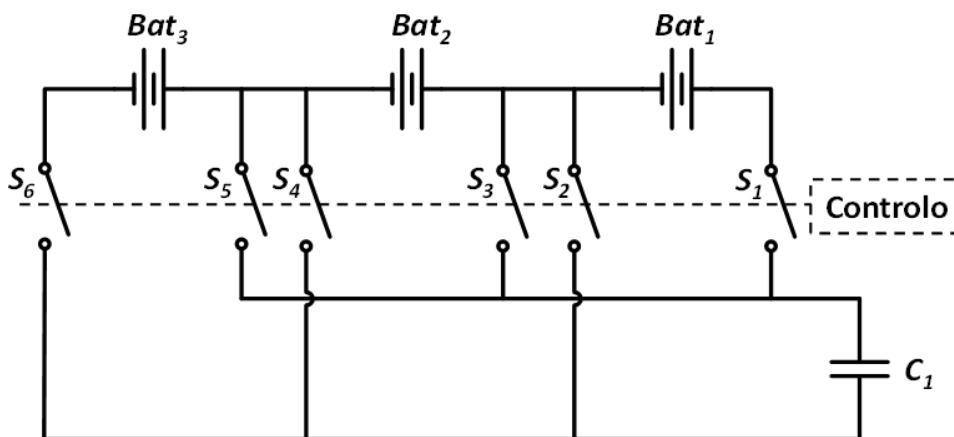


Figura 3.14 – Circuito da topologia *switch matrix with capacitor* para três baterias.

O número de interruptores bidirecionais para as topologias SMwT (Figura 3.15 (a)) e SMwDC/DC (Figura 3.15 (b)) é o mesmo que a topologia SMwC, só é alterado o elemento de equalização (transformador ou conversor CC/CC).

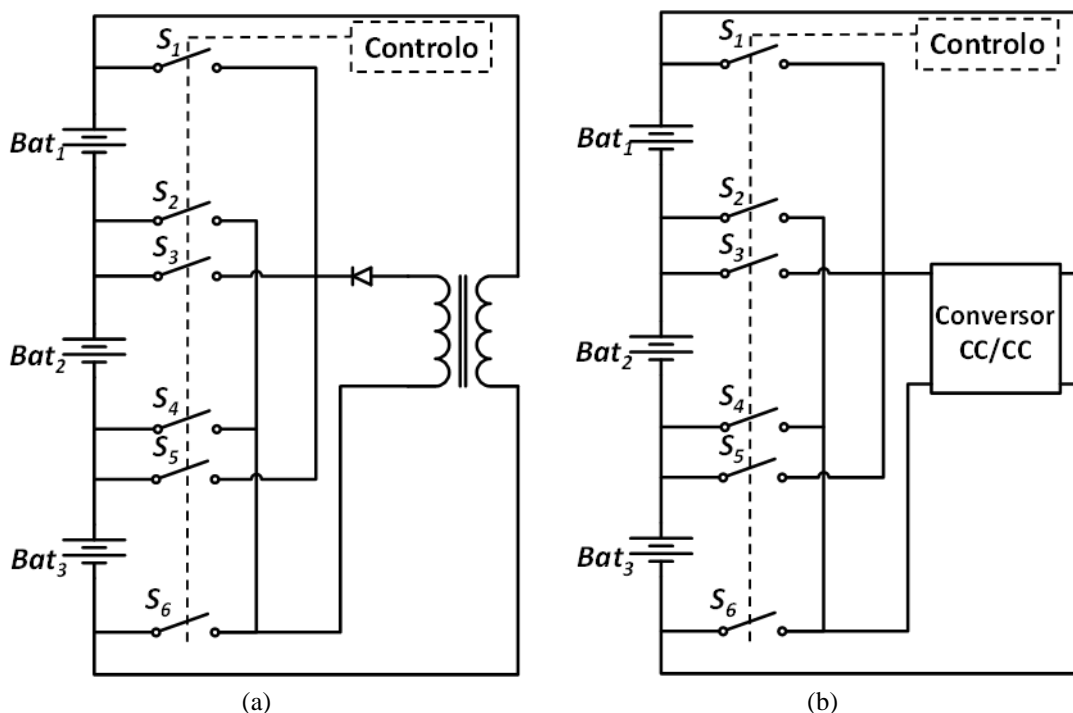


Figura 3.15 – Circuito da topologia *switch matrix*: (a) *with transformer*; (b) *with DC/DC converter*.

Focando a topologia *switch matrix with capacitor*, de seguida é explicado o seu funcionamento. O controlo desta topologia tem uma base de implementação simples. Consiste em medir o estado de carga de cada bateria e conectar o condensador entre as baterias com maior diferença. Por exemplo, imaginemos um sistema composto por três baterias desequilibradas em que $V_{bat1} = 12,5 \text{ V}$, $V_{bat2} = 12 \text{ V}$, $V_{bat3} = 11,5 \text{ V}$. O sistema de controlo irá calcular a média da tensão das três baterias e decidir qual a bateria com maior tensão e qual a bateria com menor tensão. O condensador é então conectado à bateria 1 para ser carregado, e de seguida é conectado à bateria 3 que é a bateria com menor tensão. O processo repete-se até que as tensões das baterias sejam equalizadas. Neste exemplo, a bateria 2 não entra no processo de equalização pois a sua tensão é igual à média de tensão entre as três baterias para facilitar a explicação. Na Figura 3.16 estão indicados os sentidos das correntes quando o condensador está a carregar através da bateria 1 e quando o condensador está a descarregar na bateria 3.

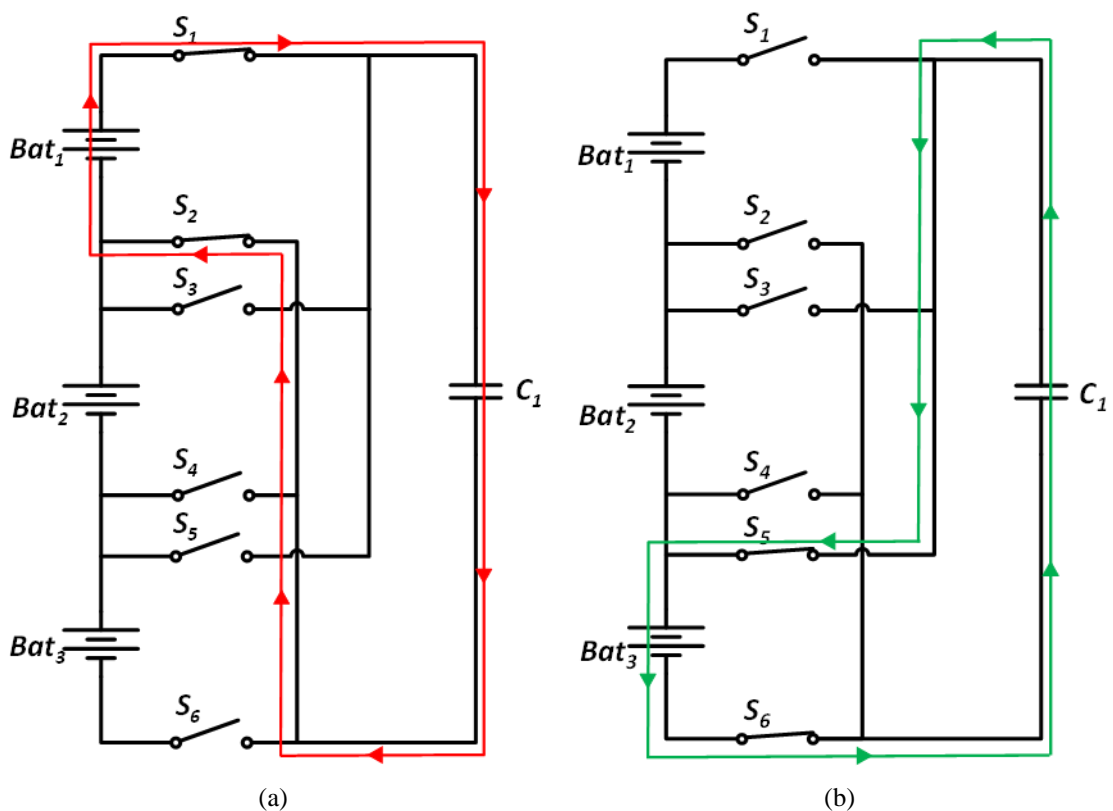


Figura 3.16 – Sentido da corrente: (a) Condensador a carregar; (b) Condensador a descarregar.

A topologia *switch matrix* também permite uma equalização seletiva de qualquer bateria [47]. Esta topologia apresenta uma redução significativa no tempo de equalização, e no caso da topologia *switch matrix with capacitor* apresenta também uma redução no custo, pois apenas necessita de um elemento de equalização (condensador) [47]. Se for necessário acrescentar mais baterias ao circuito, pode ser feito de forma simples.

3.7. Conclusão

Neste capítulo estão apresentadas diferentes topologias de BMS. A arquitetura BMS centralizada é mais simples de implementar relativamente à arquitetura BMS distribuída. Para sistemas com poucas baterias, deve-se optar pela arquitetura centralizada, e caso o número de baterias seja elevado, escolhe-se a arquitetura distribuída, pois é mais flexível.

Os métodos de equalização podem ser ativos ou passivos. A equalização passiva tem como vantagens a sua simplicidade e um menor custo de implementação comparativamente com a equalização ativa. A necessidade de um sistema rigoroso para gerir a temperatura e a dissipação de energia constituem desvantagens para este método. Dentro do método ativo, as topologias que apresentam maior facilidade de implementação são as topologias baseadas em condensadores, não só pelo sistema de controlo, mas também por permitirem uma equalização contínua e serem menos dispendiosas. As topologias que utilizam mais do que um condensador têm a desvantagem de só poder equalizar baterias adjacentes, enquanto as topologias que utilizam apenas um condensador têm a versatilidade de equalizar baterias independentemente da sua posição no sistema. A topologia *single switched capacitor* é utilizada para equalizar mais do que cinco baterias devido ao seu tamanho e custo de implementação. Por sua vez, para equalizar menos de cinco baterias poderá ser utilizada a topologia *switch matrix with capacitor* pois apresenta menos interruptores que a topologia *single switched capacitor*.

Quanto às topologias de equalização baseadas em transformadores, têm um custo de implementação maior e são mais complexas, mas apresentam tempos de equalização inferiores.

CAPÍTULO 4

Simulações de Topologias de Sistemas de Gestão de Baterias

4.1. Introdução

Hoje em dia, a utilização de ferramentas de simulação computacional é fundamental para o desenvolvimento de aplicações na área da eletrônica. Assim, antes da implementação prática da topologia de BMS (*Battery Management System*) proposta, e do respetivo sistema de controlo digital, foram realizadas várias simulações computacionais de modo a testar e validar detalhadamente o seu funcionamento e desempenho. O software utilizado para a realização das simulações computacionais nesta dissertação foi o *PSIM* (*Powersim Inc.*). Esta ferramenta permite a simulação de circuitos de eletrônica de potência e a simulação do sistema de controlo digital com recurso a um bloco de programação em linguagem C. Estas simulações têm como objetivo validar os conceitos de algumas topologias de BMS e comparar qual a mais vantajosa para a implementação num sistema de baterias de um veículo elétrico (VE).

Como apresentado no capítulo 3, relativo ao estado da arte, na literatura estão identificadas diversas topologias de BMS. Tendo em conta que esta lista é bastante abrangente, no âmbito deste capítulo apenas são apresentadas e comparadas simulações das topologias ativas de BMS consideradas mais relevantes. Com base no estudo prévio do estado da arte, também é apresentado o modelo equivalente da bateria, e o seu dimensionamento, utilizado para a simulação no software *PSIM*.

4.2. Modelo Equivalente da Bateria para Simulação

Como na versão do *PSIM* adquirida pelo GEPE não existe nenhum modelo para a simulação de baterias, foi necessário desenvolver um modelo equivalente da bateria para ser possível simular as diferentes topologias de BMS. O modelo utilizado para as simulações foi o modelo simples da bateria, apresentado na Figura 4.1 e foi escolhido porque apenas será simulado o estado de carga nas baterias (*State of Charge* - SoC). Este modelo é constituído por uma fonte de tensão constante (que representa a tensão de corte

da bateria), por uma resistência (equivalente à resistência interna da bateria), e por um condensador (que modela a variação de tensão aos terminais da bateria) [51].

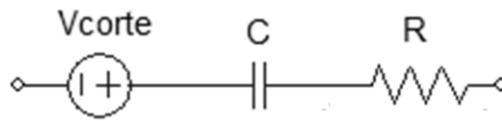


Figura 4.1 - Modelo simples da bateria utilizado nas simulações em *PSIM*.

Para determinar o valor do condensador, foram utilizados como referência os dados do *datasheet* da bateria *WCG-UI* da *Power Mobility* [55] existente no GEPE. Na Tabela 4.1 estão representadas as principais especificações da bateria.

Tabela 4.1 - Especificações da bateria *WCG-UI* da *Power Mobility* [55].

Características	Valor Nominal	Unidade
Tensão	12	V
Capacidade (20 horas)	33	Ah
Corrente máxima de carga	6,5	A
Tensão máxima de carga	14,16	V
Corrente máxima de descarga (60 sec)	245	A
Impedância interna	7,33	mΩ
Peso	12,11	kg
Dimensões	19,58 x 13,16 x 18,26	mm

Com base na tabela, foi considerada uma tensão máxima da bateria igual a 14,16 V e tensão de corte igual a 10 V. Recorrendo à equação (4.1) é possível obter o valor do condensador a utilizar na simulação computacional. Nesta equação, C representa o condensador, Q representa a carga e ΔV representa a variação de tensão aos terminais da bateria. O valor do condensador é obtido através da divisão da carga (capacidade da bateria em Amperes hora) pela variação de tensão aos terminais da bateria. Substituindo os valores na equação (4.1) obtemos o valor do condensador para o modelo da bateria:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \quad (4.1)$$

$$C = \frac{33 \times 3600}{14,16 - 10} = 28,558 \text{ kF}$$

Para a simulação, o valor obtido para o condensador a usar é de 28,558 kF. Porém, este valor de capacidade é demasiado elevado o que se traduz em tempos de simulação

demasiado elevados [51]. Para efeitos de simulação, utilizou-se uma relação de 1 para 100000, i.e., o valor do condensador nas simulações é 100000 vezes menor do que o calculado. Isto significa que 1 hora corresponde a 0,036 segundos de simulação. Assim, o valor do condensador utilizado na bateria para simulação das topologias é aproximadamente de 0,29 F.

4.3. Topologias de Equalização

Para simulação, escolheram-se quatro topologias de equalização de entre as apresentadas no capítulo 3. Para além da topologia proposta para implementação, foram escolhidas topologias de equalização ativas em que a transferência de energia é efetuada através de condensadores (*switched capacitor*, *double-tiered switched capacitor* e *single switched capacitor*). Optou-se pela simulação destas topologias de equalização pois o princípio de funcionamento aproxima-se mais da solução proposta. Os seus sistemas de controlo são relativamente simples e de fácil implementação. Nestas topologias também é possível adicionar ou remover baterias, apenas com algumas simples alterações.

Como todas as simulações contêm pelo menos um condensador de equalização, foi ligado em série a cada condensador uma resistência que corresponde à sua resistência série equivalente (*Equivalent Series Resistance* - ESR). Tal como proposto em [49], foi atribuído um valor padrão à resistência de ESR para todas as simulações. O valor selecionado foi de 0,1 Ω .

4.3.1. Simulação da Topologia *Switched Capacitor* (SC)

Na Figura 4.2 está representado o esquemático da topologia de equalização ativa *switched capacitor*.

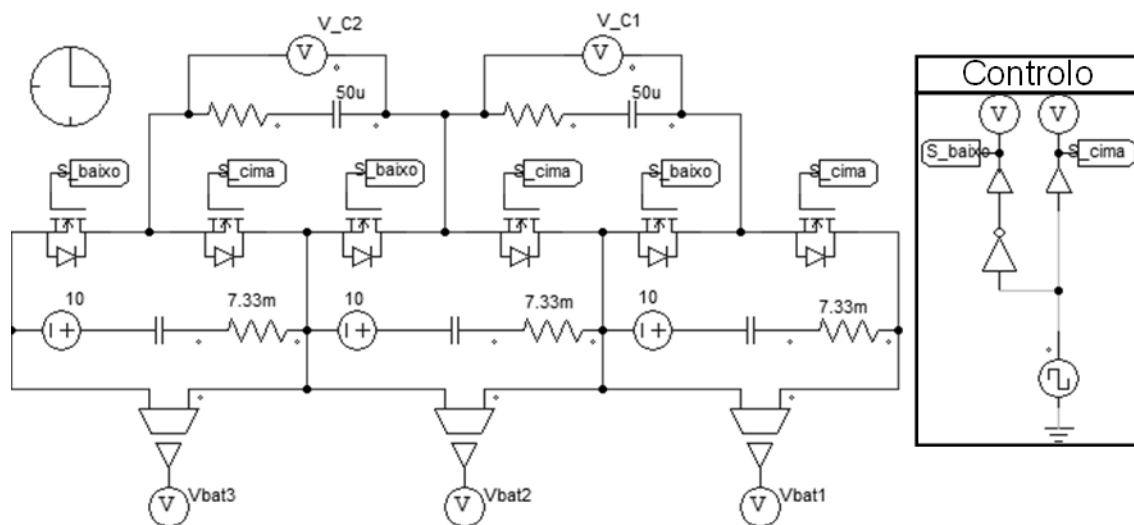


Figura 4.2 – Circuito da topologia *switched capacitor* em PSIM.

Como se pode verificar, foram utilizadas três baterias e dois condensadores de equalização de $50 \mu\text{F}$ cada. O princípio de funcionamento desta topologia consiste em transferir energia entre baterias adjacentes, ou seja, só há transferência de energia entre bateria 1 e a bateria 2, e entre a bateria 2 e bateria 3. Para o sistema de controlo são utilizados dois sinais de PWM com 180° de defasamento e com um *duty-cycle* de 50%. Na simulação foi utilizada uma fonte de tensão de onda quadrada ligada a duas saídas. Estas saídas correspondem aos dois sinais de PWM na simulação. Uma destas saídas está ligada a uma porta lógica *NOT* para garantir assim o defasamento de 180° entre os dois sinais de PWM. Relativamente às tensões das baterias, V_{bat1} , V_{bat2} e V_{bat3} correspondem às tensões na bateria 1, bateria 2 e bateria 3, respetivamente.

Na primeira simulação foram atribuídos valores de tensão diferentes para as três baterias, em que $V_{bat1} = 12,5 \text{ V}$, $V_{bat2} = 12 \text{ V}$ e $V_{bat3} = 11,5 \text{ V}$. A tensão nas baterias durante a equalização está representada na Figura 4.3, utilizando uma frequência de comutação de 25 kHz. No final da simulação observa-se que as tensões nas três baterias foram equalizadas, todas as baterias têm 12 V. A tensão na bateria 2 não se altera pois, apesar de nesta topologia a energia ser transferida entre baterias adjacentes, as diferenças de tensão entre a bateria 1 e a bateria 2 e entre a bateria 2 e a bateria 3 são iguais. Tendo em atenção que estão a ser utilizadas baterias ideais, a transferência de energia total da bateria 2 será nula, visto que a energia que recebe é igual à energia que fornece.

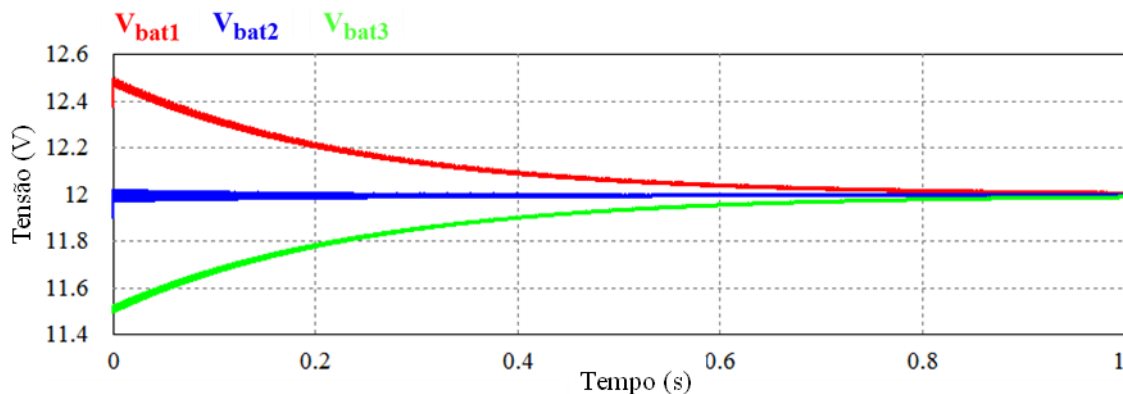


Figura 4.3 – Tensões nas três baterias durante o período de equalização.

Analisando as tensões nos condensadores, na Figura 4.4, verificamos que as suas tensões variam ao longo do tempo dependendo da diferença de tensão entre baterias. A tensão no condensador $C1$ (V_{C1}) está entre a tensão da bateria 1 e a tensão da bateria 2, e a tensão do condensador $C2$ (V_{C2}) varia entre a tensão da bateria 2 e a tensão da bateria 3.

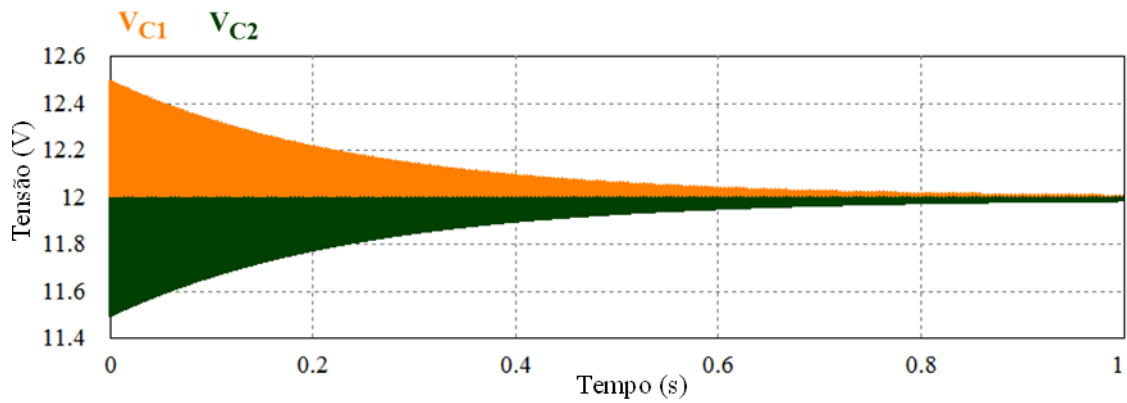


Figura 4.4 – Tensões nos condensadores durante o período de equalização.

Através da observação da corrente nas baterias (Figura 4.5), é possível confirmar que a bateria 1 só fornece energia e a bateria 3 só recebe energia (Figura 4.5 (a)). Também se verifica que a bateria 2 recebe e fornece energia, sendo o seu valor médio de corrente igual a zero (Figura 4.5 (b)). A corrente que a bateria 1 fornece é igual à corrente que a bateria 2 recebe, e a corrente que a bateria 2 fornece é igual à corrente que a bateria 3 recebe.

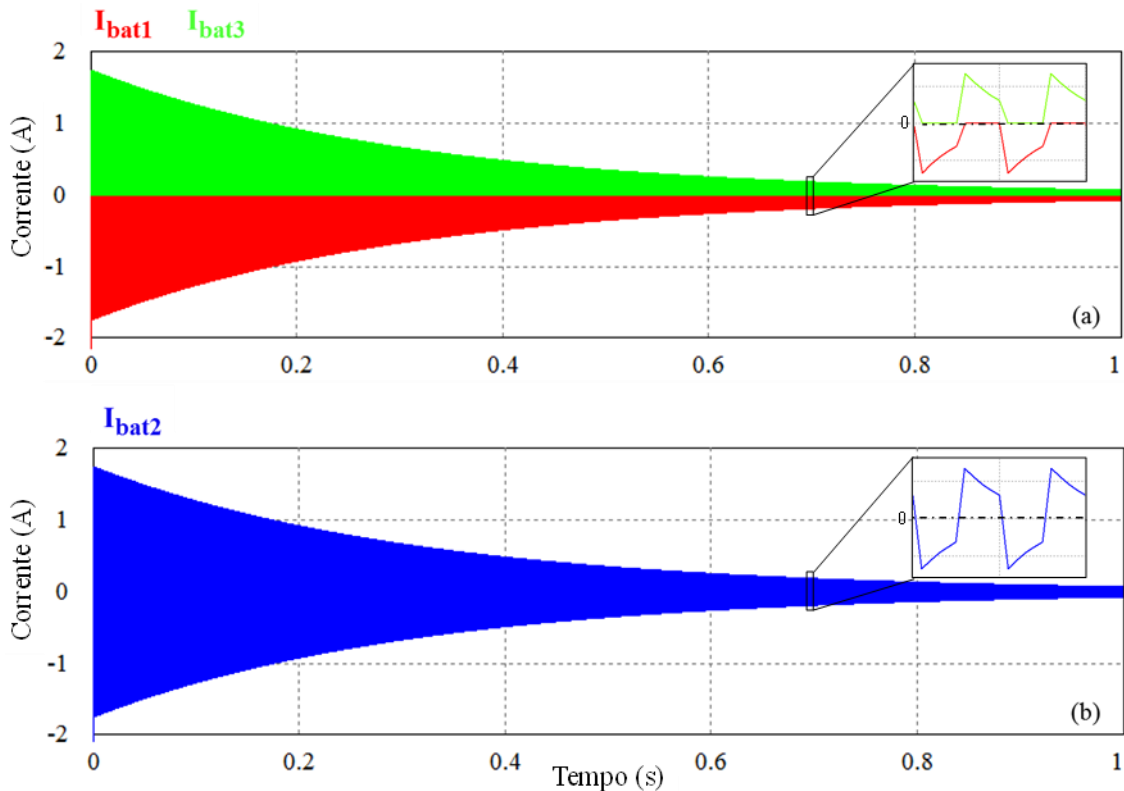


Figura 4.5 – Correntes nas três baterias durante o período de equalização:
(a) Baterias 1 e 3; (b) Bateria 2.

Na Figura 4.6, onde está apresentada a corrente nos dois condensadores de equalização, observa-se que a corrente é igual nos dois condensadores, pois transferem a mesma energia entre baterias.

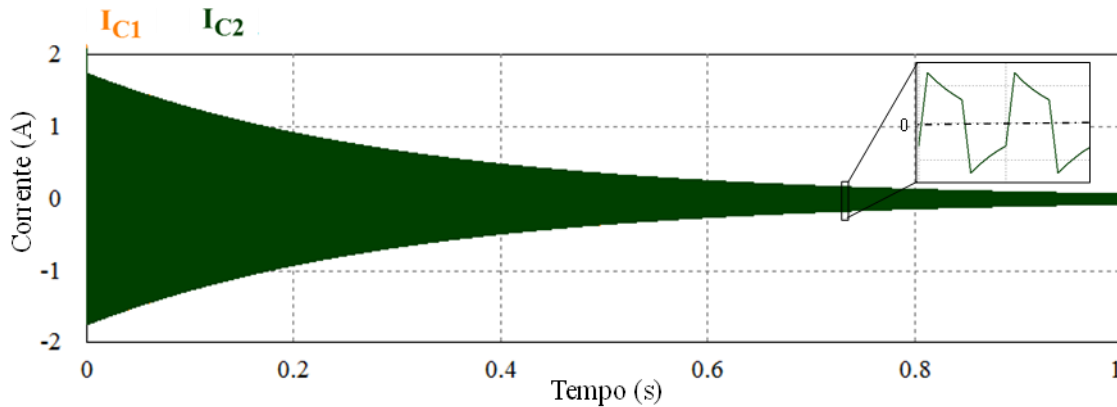


Figura 4.6 – Corrente nos condensadores durante o período de equalização.

Na segunda simulação foram alterados os valores das baterias. Duas baterias têm o mesmo valor e outra tem um valor de tensão superior às outras duas ($V_{bat1} = 12,5 \text{ V}$; $V_{bat2} = 11,5 \text{ V}$; $V_{bat3} = 11,5 \text{ V}$). Analisando a Figura 4.7 verifica-se que as tensões das baterias são equalizadas. A tensão na bateria 2 não é sempre igual à tensão na bateria 3 pois a equalização é feita de forma sequencial.

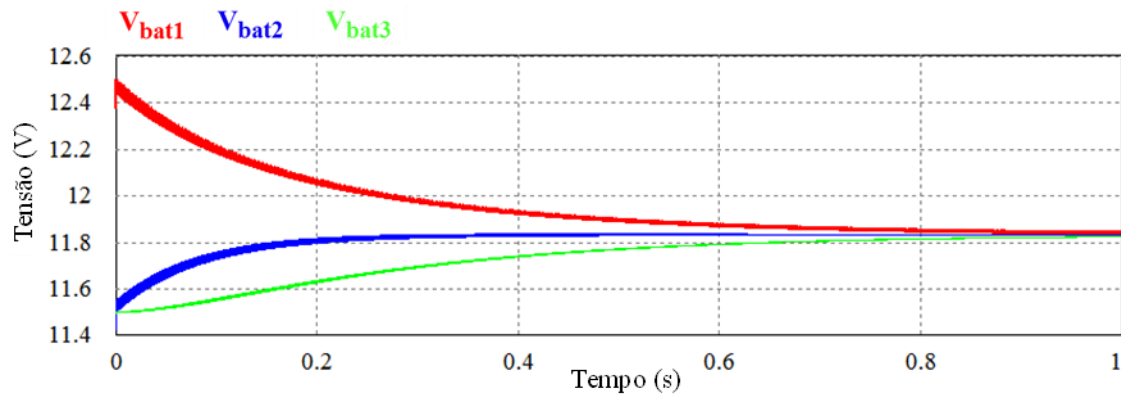


Figura 4.7 – Tensões nas três baterias durante o período de equalização.

Observando a tensão nos condensadores de equalização (Figura 4.8), verifica-se que são diferentes. Ao longo do tempo de simulação, a tensão no condensador C1 varia entre a tensão da bateria 1 e a tensão da bateria 2, que é maior do que a tensão no condensador C2 (V_{C2} varia entre as tensões da bateria 2 e 3).

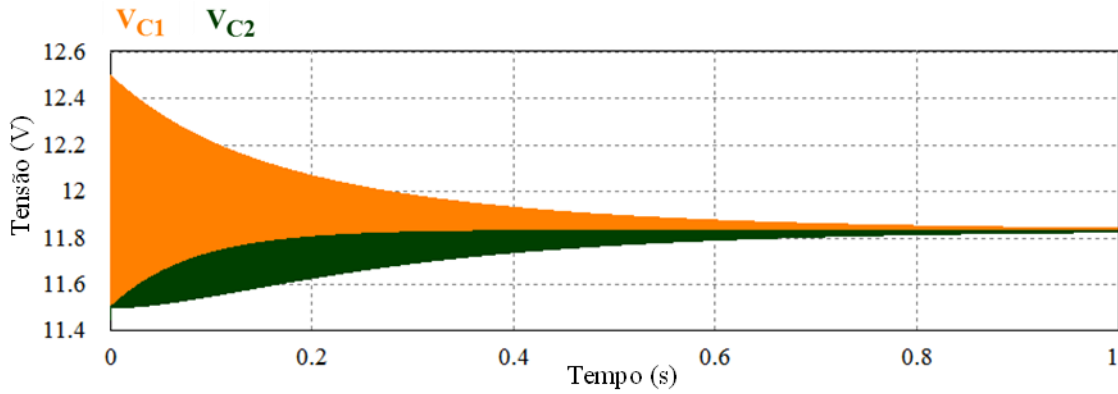


Figura 4.8 – Tensões nos condensadores durante o período de equalização.

4.3.2. Simulação da Topologia *Double-tiered Switched Capacitor* (DTSC)

Na Figura 4.9 está representado o esquemático da topologia *double-tiered switched capacitor* modelado em *PSIM*. Relativamente à topologia anterior, também se utilizam três baterias e a mesma frequência de comutação (25 kHz) na simulação. Para além dos dois condensadores de equalização de 50 μF , foi adicionado em paralelo com estes dois, um terceiro condensador com o mesmo valor de capacidade. O sistema de controlo também é idêntico à topologia *switched capacitor*, i.e., são utilizados dois sinais de PWM com 180° de defasamento e com um *duty-cycle* de 50%.

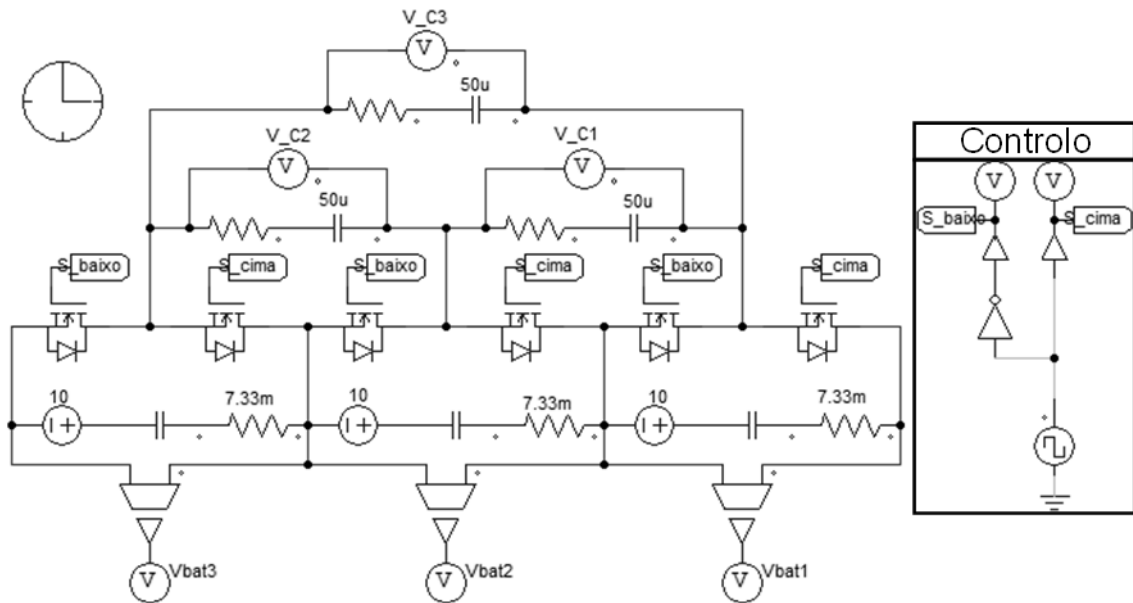


Figura 4.9 – Circuito da topologia *double-tiered switched capacitor* em *PSIM*.

Na primeira simulação foram atribuídos valores de tensão diferentes para as três baterias ($V_{bat1} = 12,5 \text{ V}$; $V_{bat2} = 12 \text{ V}$; $V_{bat3} = 11,5 \text{ V}$). Na Figura 4.10, onde é apresentada a evolução da tensão nas três baterias ao longo do tempo, é possível verificar que para as mesmas condições, a equalização demorou menos tempo comparativamente com a simulação da topologia condensadores comutados.

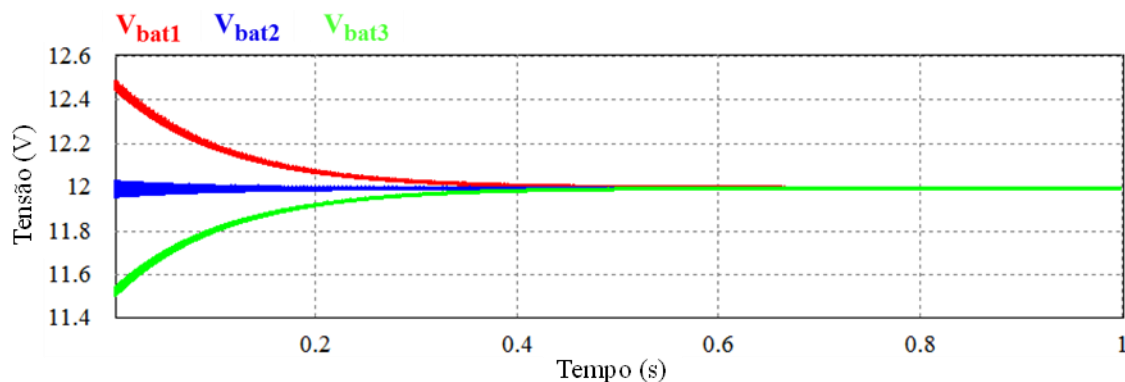


Figura 4.10 – Tensões nas três baterias durante o período de equalização.

Olhando para a tensão nos condensadores (Figura 4.11) de equalização, verifica-se que tal como na topologia anterior, a tensão do condensador C1 varia entre a tensão da bateria 1 e da bateria 2 e a tensão do condensador C2 varia entre a tensão da bateria 2 e a tensão da bateria 3 (Figura 4.11 (b)). A tensão do condensador C3 (Figura 4.11 (a)) corresponde à soma da tensão nos condensadores C1 e C2.

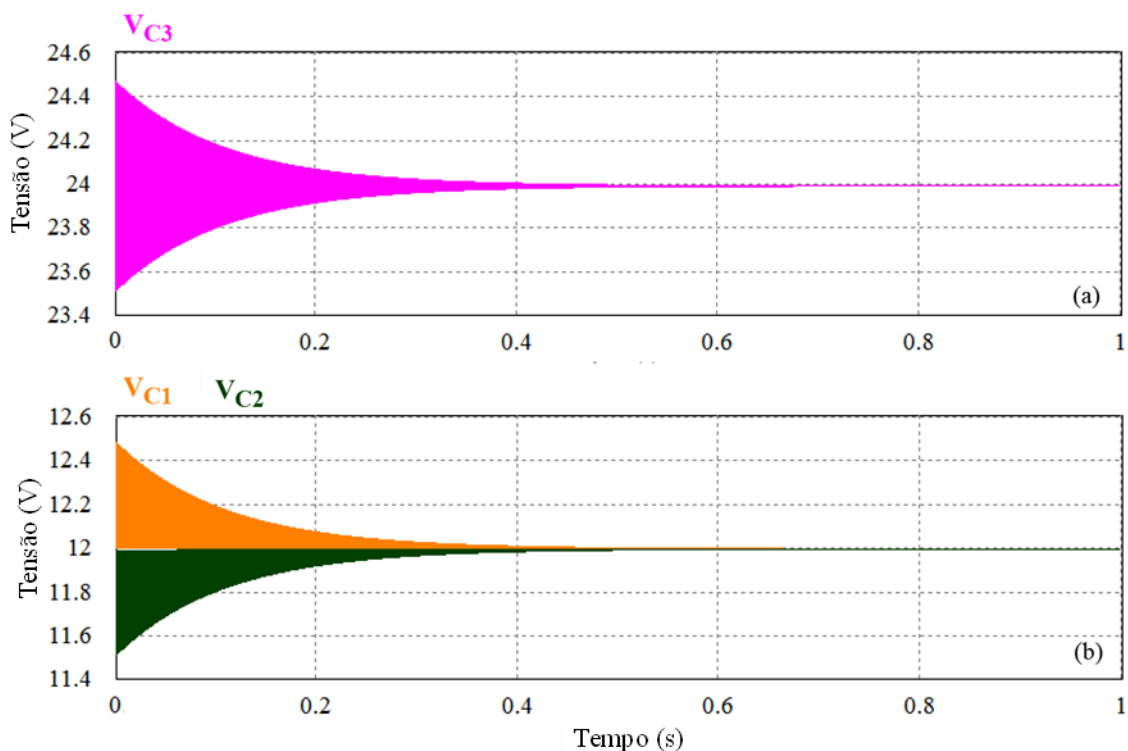


Figura 4.11 – Tensões nos condensadores durante o período de equalização:
 (a) Condensador C3; (b) Condensadores C1 e C2.

Na segunda simulação, inicialmente, a bateria 1 tem 12,5 V e a bateria 2 e a bateria 3 têm ambas a mesma tensão de 11,5 V. As tensões das três baterias, representadas na Figura 4.12, são equalizadas em menos tempo comparativamente à topologia de condensadores comutados.

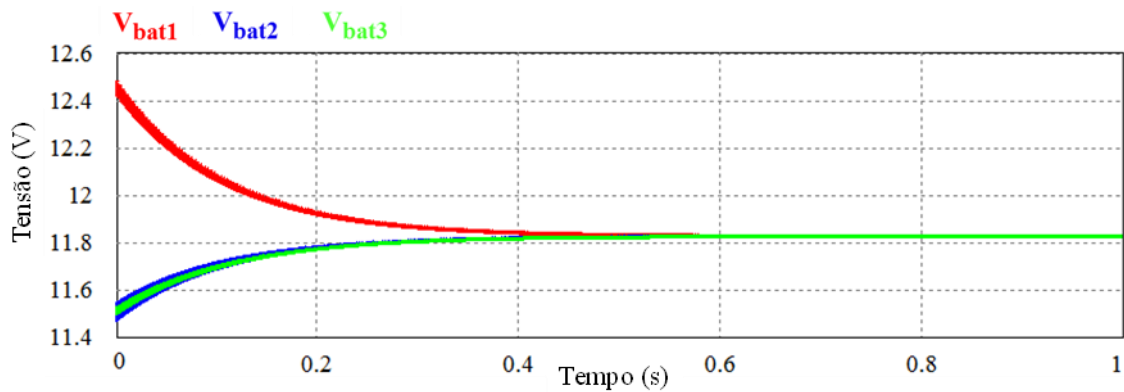
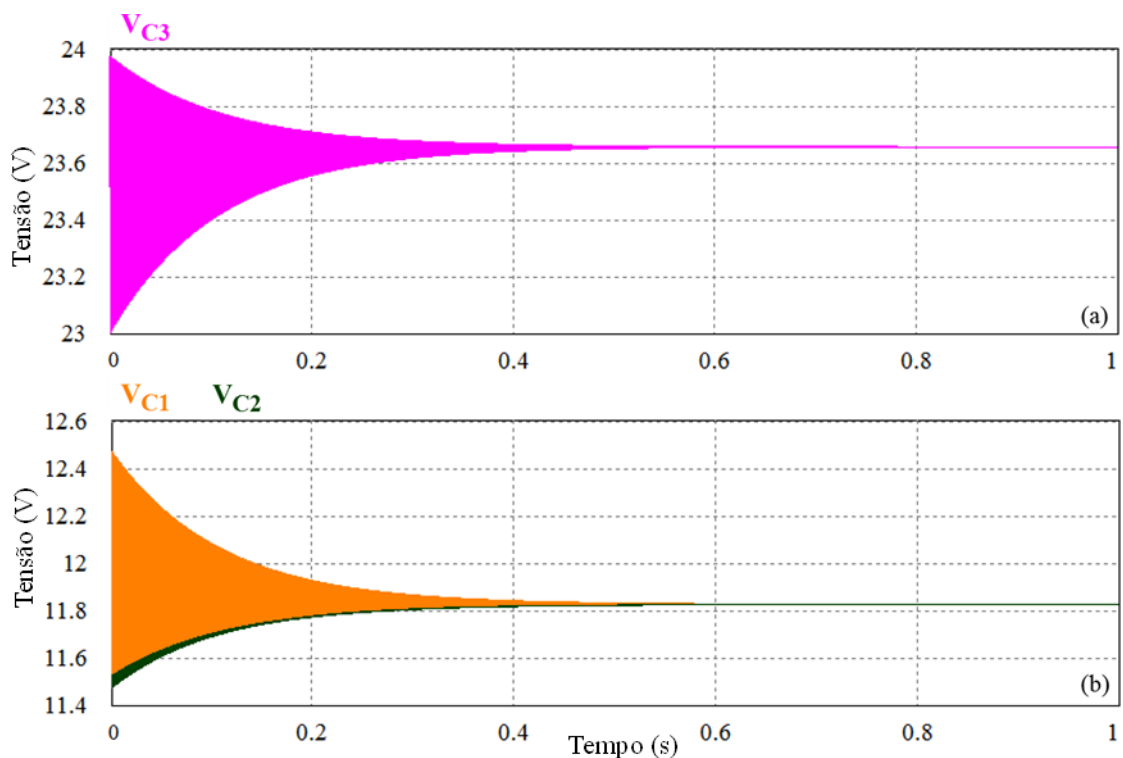


Figura 4.12 – Tensões nas três baterias durante o período de equalização.

Pela Figura 4.13 estão apresentadas as tensões nos condensadores C1, C2 e C3 ao longo do período de equalização. As tensões dos condensadores C1 e C2 são diferentes, pois cada condensador equaliza diferenças de tensão distintas (Figura 4.13 (a)). Uma vez mais se verifica que a tensão em C3 é igual à soma das tensões dos condensadores C1 e C2 (Figura 4.13 (b)).


 Figura 4.13 – Tensões nos condensadores durante o período de equalização:
 (a) Condensador C3; (b) Condensadores C1 e C2.

4.3.3. Simulação da Topologia *Single Switched Capacitor* (SSC)

A topologia *single switched capacitor* também foi simulada com o software *PSIM*. Tal como nas simulações anteriores, são utilizadas três baterias e uma frequência de comutação de 25 kHz. O condensador de equalização é de 50 μF . Para o sistema de

controlo recorreu-se a um bloco C (funcionalidade do *PSIM*) para a programação do algoritmo de equalização.

O princípio de funcionamento básico desta topologia passa por medir as tensões das baterias para saber qual a que tem maior tensão e qual a com menor tensão. De seguida o condensador é conectado a essas duas baterias para dar início ao processo de equalização.

Relativamente às topologias simuladas anteriormente, em que não é necessário controlar a condução dos interruptores bidirecionais nos dois sentidos, nesta topologia é fundamental controlar o sentido de condução dos interruptores bidirecionais. Assim, já não é possível usar apenas um MOSFET como interruptor bidirecional, pois não é possível controlar o díodo antiparalelo que este semiconductor tem. Uma das soluções propostas na literatura [46][48] passa por utilizar dois MOSFETs em série com o terminal *source* comum a funcionar como interruptores bidirecionais, como apresentado na Figura 4.14. A principal desvantagem desta topologia é relativa à necessidade de utilizar semicondutores a dobrar.

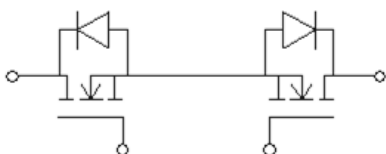


Figura 4.14 – Interruptor bidirecional totalmente controlado com dois MOSFETs em série com o terminal *source* comum.

Assim, o esquemático da topologia *single switched capacitor* em *PSIM* está representado na Figura 4.15.

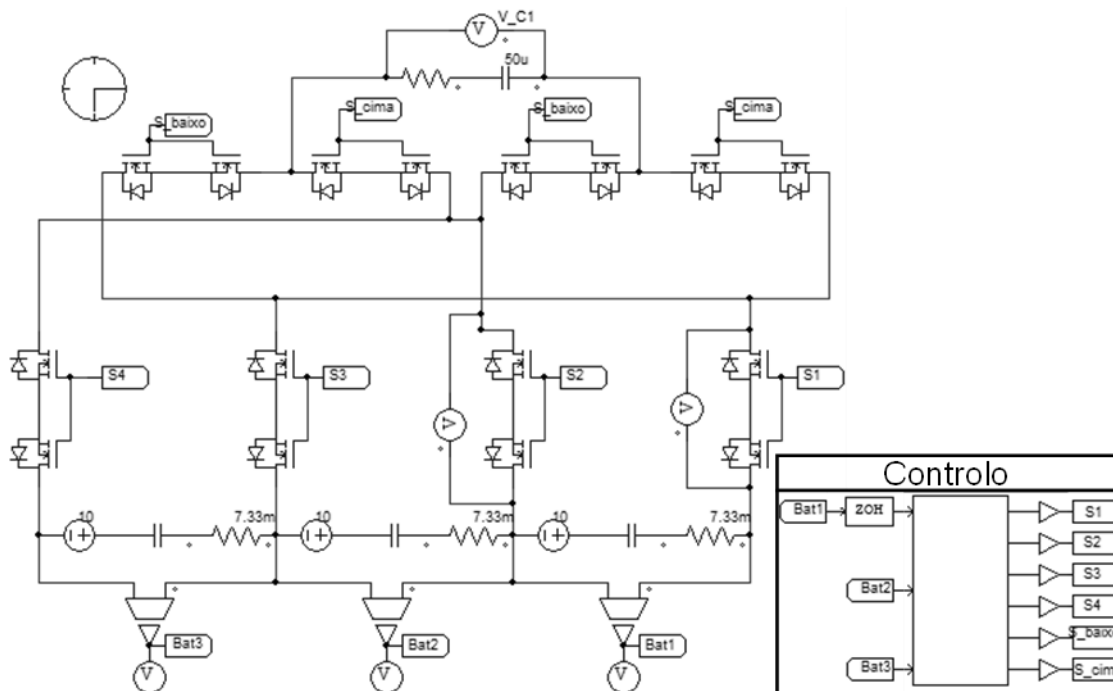


Figura 4.15 – Circuito da topologia *single switched capacitor* em *PSIM*.

Na primeira simulação foram atribuídos os seguintes valores de tensão às baterias: $V_{bat1} = 12,5 \text{ V}$, $V_{bat2} = 12 \text{ V}$ e $V_{bat3} = 11,5 \text{ V}$. Pela análise das tensões nas baterias ao longo do tempo de equalização (Figura 4.16) é possível verificar que só ocorre troca de energia entre a bateria 1 e a bateria 3. A bateria 2 mantém a mesma tensão ($V_{bat2} = 12 \text{ V}$) pois a tensão da bateria 2 é igual à média das tensões das três baterias e por isso o algoritmo de controlo não inclui essa bateria no processo de equalização.

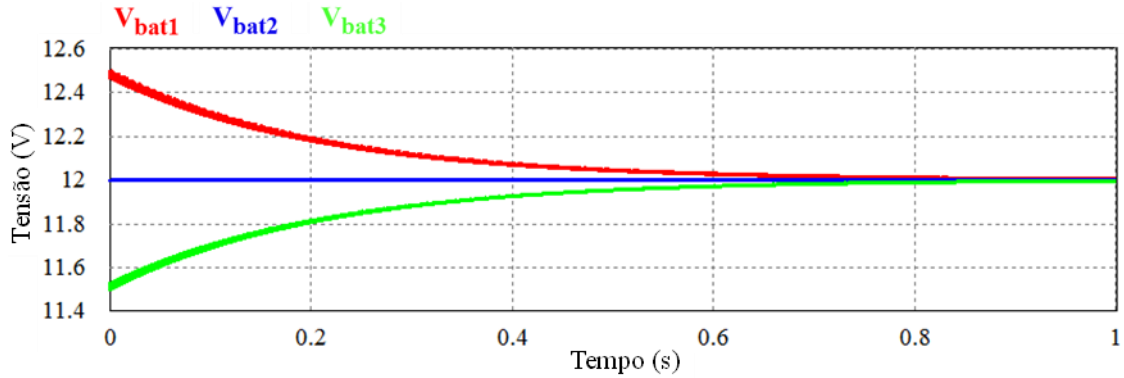


Figura 4.16 – Tensões nas três baterias durante o período de equalização.

Olhando para a tensão no condensador de equalização, apresentada na Figura 4.17, verifica-se que a sua tensão varia entre a tensão da bateria 1 e a tensão da bateria 3 ao longo do tempo, até ser concluído o processo de equalização.

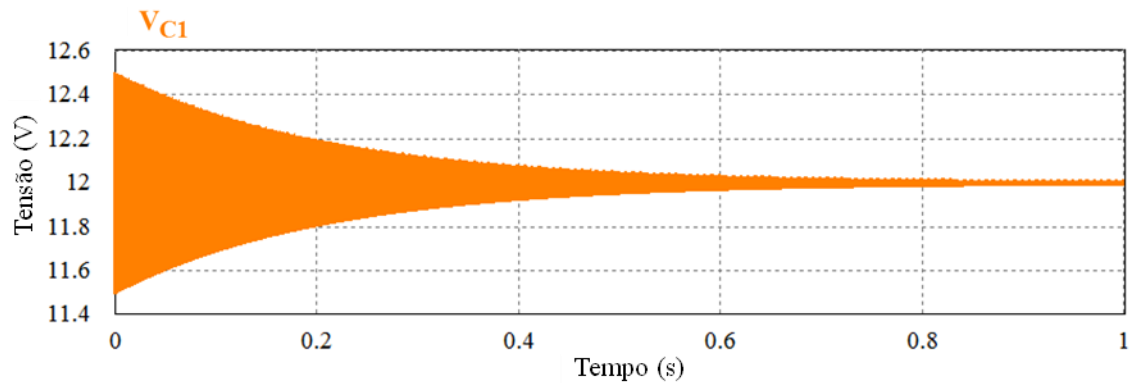


Figura 4.17 – Tensão no condensador durante o período de equalização.

Pela análise das correntes nas baterias na Figura 4.18, é possível confirmar que só há troca de energia entre a bateria 1 e a bateria 3. Pela análise da figura em detalhe, é de notar que a bateria 1 só fornece energia e a bateria 3 só recebe energia. Como para este caso a bateria 2 não entra no processo de equalização, a sua corrente é zero.

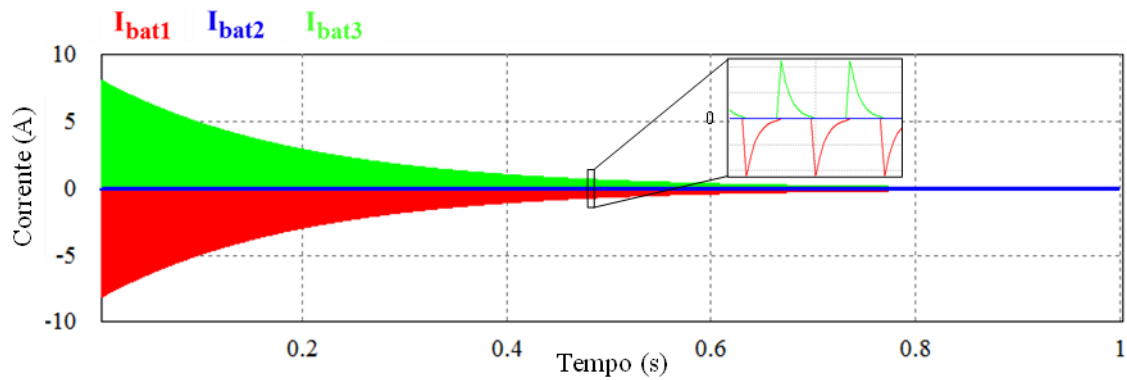


Figura 4.18 – Correntes nas três baterias durante o período de equalização.

Na segunda simulação foram alterados os valores das baterias. Duas baterias têm o mesmo valor e outra tem um valor de tensão superior às outras duas ($V_{bat1} = 12,5$ V; $V_{bat2} = 11,5$ V; $V_{bat3} = 11,5$ V). Na Figura 4.19 estão representadas as tensões das três baterias ao longo do tempo de equalização, e como se pode observar no final as baterias são equalizadas. A tensão da bateria 2 e bateria 3 são equalizadas alternadamente, mas mantêm-se sempre próximas.

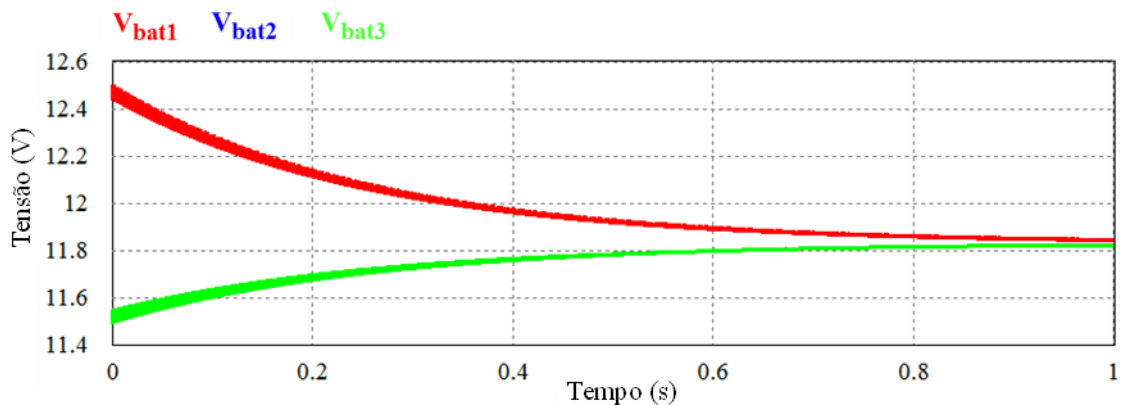


Figura 4.19 – Tensões nas três baterias durante o período de equalização.

Na Figura 4.20 está apresentada a tensão no condensador de equalização juntamente com a tensão das três baterias. É possível verificar que o condensador C1 só está conectado a uma bateria de cada vez. Por exemplo, carrega a partir da bateria 1 (que é a bateria com maior tensão) e descarrega na bateria 2, volta a carregar a partir da bateria 1 e descarrega na bateria 3, e assim sucessivamente até ao final do processo de equalização. Na análise em detalhe também se verifica que a bateria 2 e a bateria 3 são equalizadas alternadamente.

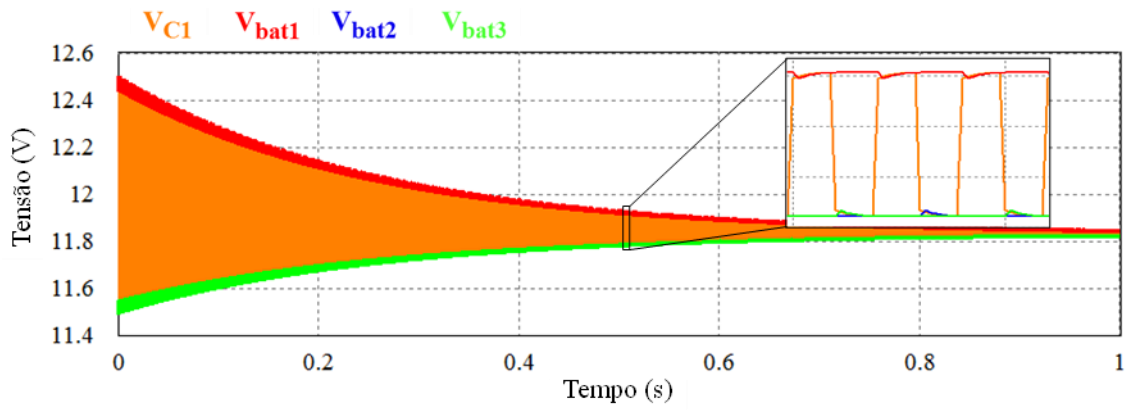


Figura 4.20 – Tensão nas três baterias e no condensador durante o período de equalização.

Com a análise das correntes no condensador de equalização e nas baterias (Figura 4.21), também é possível confirmar que o condensador de equalização nunca se conecta a mais de uma bateria ao mesmo tempo. A corrente só é diferente de zero numa bateria de cada vez, enquanto que o condensador está sempre a receber e a fornecer energia.

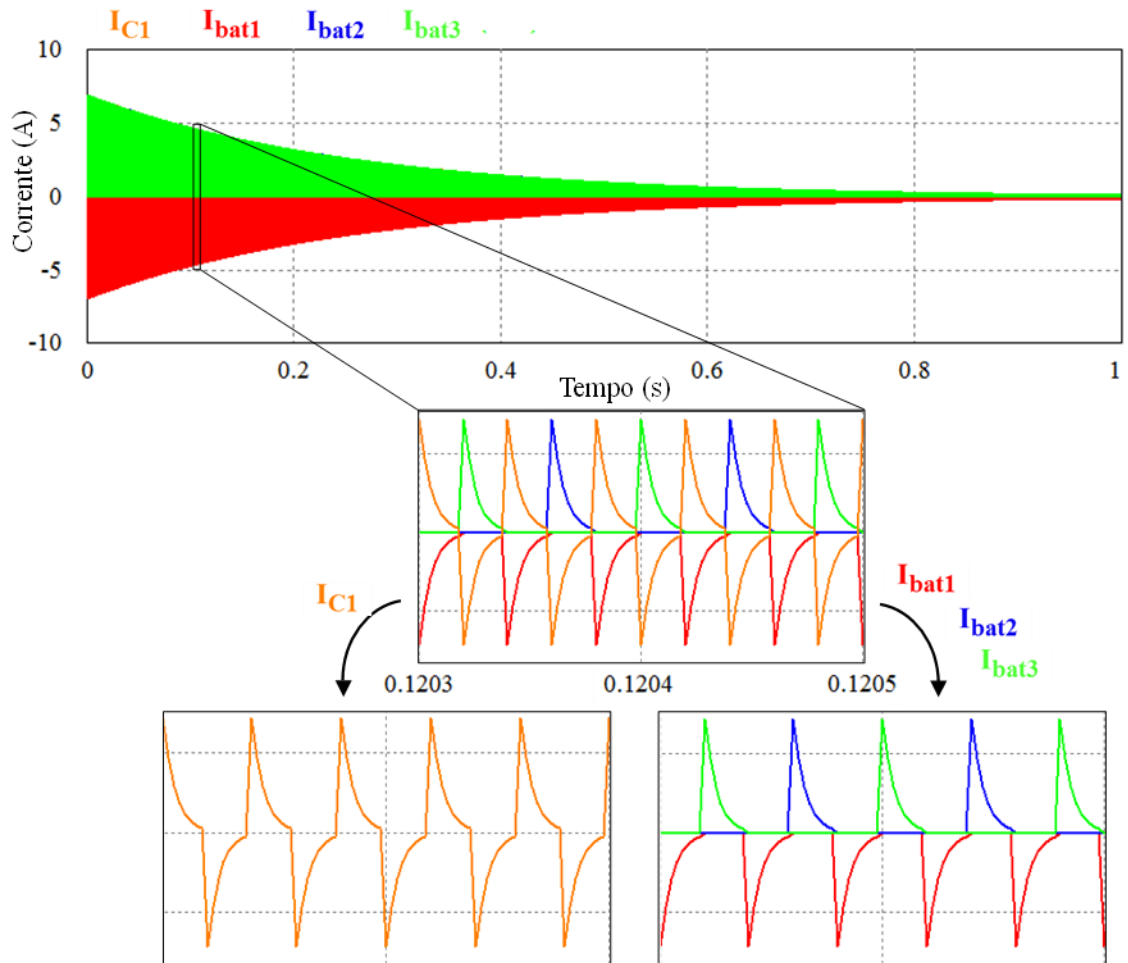


Figura 4.21 – Correntes nas três baterias e no condensador durante o período de equalização.

4.3.4. Simulação da Topologia *Switch Matrix with Capacitor* (SMwC)

Na Figura 4.22 está representado o circuito da topologia proposta, identificada nesta dissertação como *switch matrix with capacitor*. Como esta topologia é a proposta para implementação nesta dissertação, serão efetuadas mais simulações com o intuito de conhecer melhor esta topologia para além das simulações nas mesmas condições que as topologias anteriores.

Na simulação são utilizadas três baterias. Para o sistema de controlo será utilizado um bloco C do *PSIM* para programar o algoritmo de equalização, e tal como na topologia anterior, cada interruptor bidirecional é composto por dois MOSFETs em série com o terminal *source* comum. Após a leitura das tensões em cada bateria, o algoritmo de controlo calcula se a tensão difere de uma bateria para a outra. Caso as tensões entre duas baterias sejam diferentes, são enviados os sinais de comando para os respetivos interruptores comutarem e iniciarem a equalização.

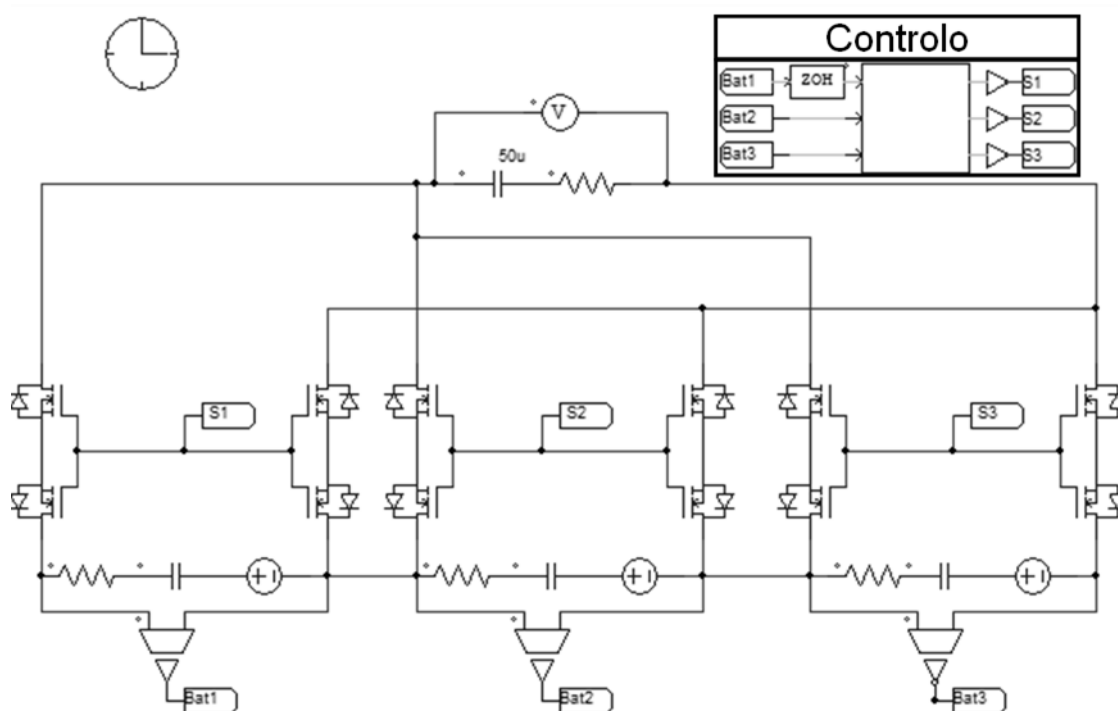


Figura 4.22 – Circuito em *PSIM* da topologia *Switch Matrix with Capacitor*.

Na primeira simulação as três baterias terão tensões iniciais diferentes ($V_{bat1} = 12,5 \text{ V}$, $V_{bat2} = 12 \text{ V}$ e $V_{bat3} = 11,5 \text{ V}$). O condensador de equalização é de $50 \mu\text{F}$ e a frequência de comutação é de 25 kHz . Pelas tensões das baterias ao longo do tempo (Figura 4.23), nota-se que as baterias são equalizadas. A tensão da bateria 2 não se altera, pois coincide com o valor médio de tensão das três baterias. A tensão da bateria 1 diminui de $12,5 \text{ V}$ para 12 V , enquanto a tensão da bateria 3 aumenta de $11,5 \text{ V}$ até 12 V .

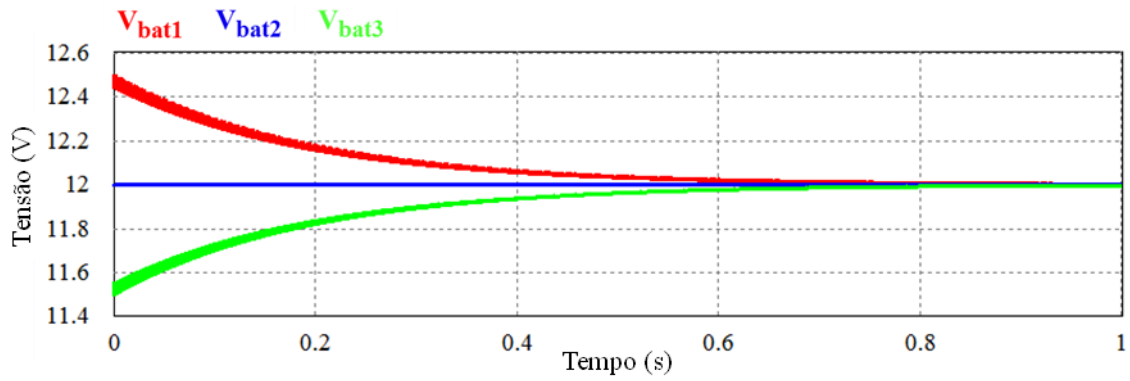


Figura 4.23 – Tensões nas três baterias durante o período de equalização.

O condensador de equalização transfere energia da bateria 1 para a bateria 3. Ao longo do tempo de equalização, a sua tensão (Figura 4.24) varia entre a tensão da bateria 1 e a tensão da bateria 3.

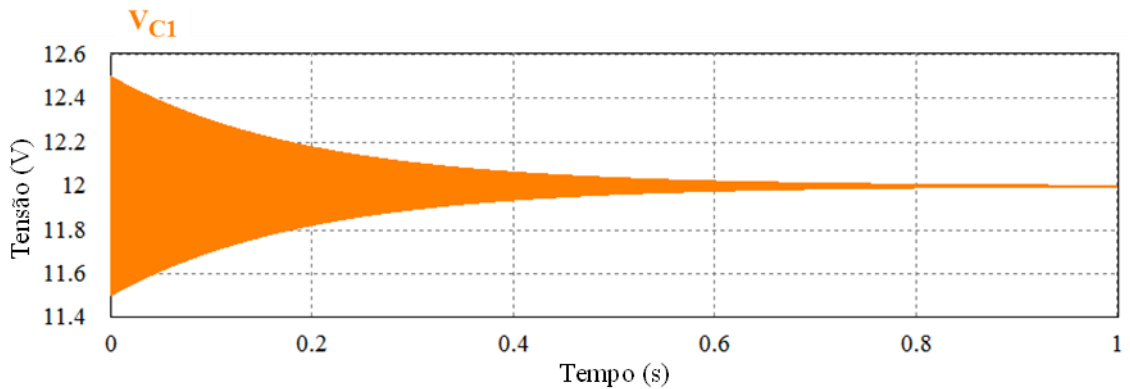


Figura 4.24 – Tensão no condensador durante o período de equalização.

Pela análise das correntes nas baterias, na Figura 4.25 é possível confirmar que só há troca de energia entre a bateria 1 e a bateria 3, a bateria 1 só fornece energia e a bateria 3 só recebe energia. Neste caso a corrente na bateria 2 é zero.

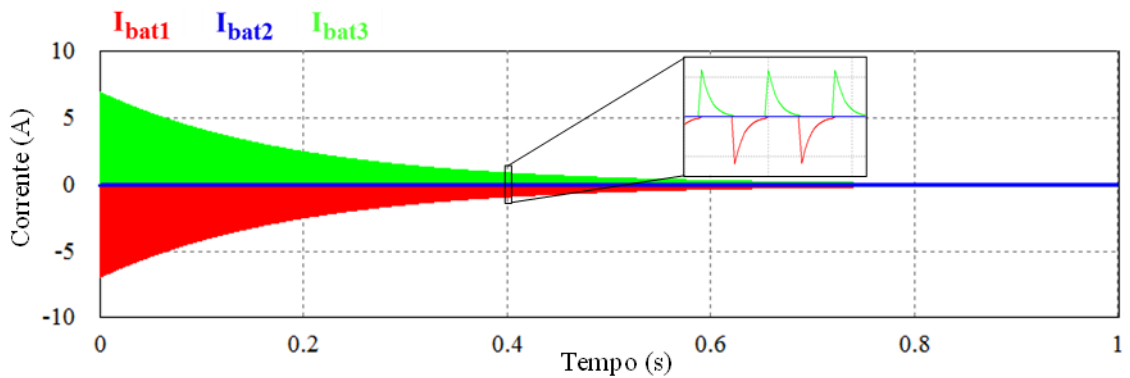


Figura 4.25 – Correntes nas três baterias durante o período de equalização.

Observando a corrente no condensador (Figura 4.26), verifica-se que esta é igual à soma das correntes de equalização das duas baterias. Isto porque o condensador é o elemento que auxilia a transferência de energia entre baterias.

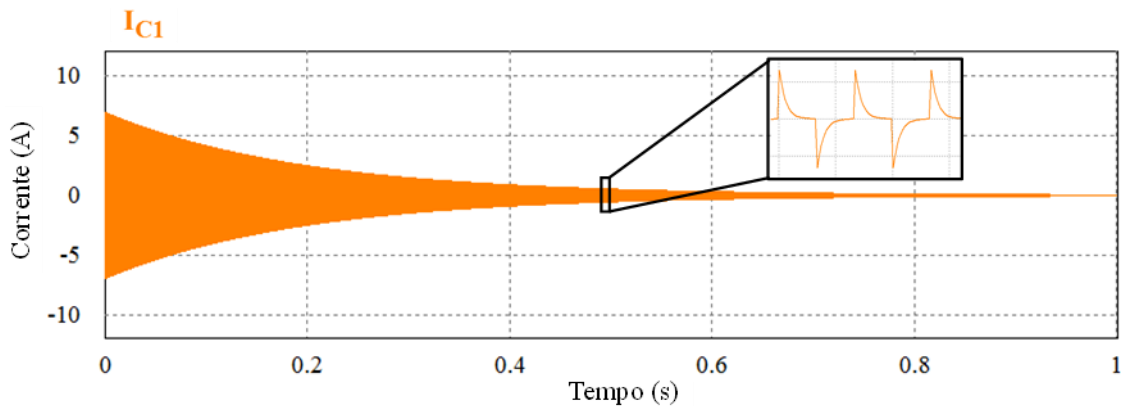


Figura 4.26 – Corrente no condensador durante o período de equalização.

Na Figura 4.27 está representada a tensão no interruptor bidirecional superior da bateria 1 no intervalo de tempo de 0,0001 a 0,0004 segundos. Verifica-se que quando o interruptor está a *off*, tem de suportar uma queda de tensão superior à tensão de duas baterias. Por outras palavras, caso se adicionassem n baterias à topologia, cada interruptor bidirecional deveria ser capaz de suportar uma queda de tensão superior à tensão de $n-1$ baterias.

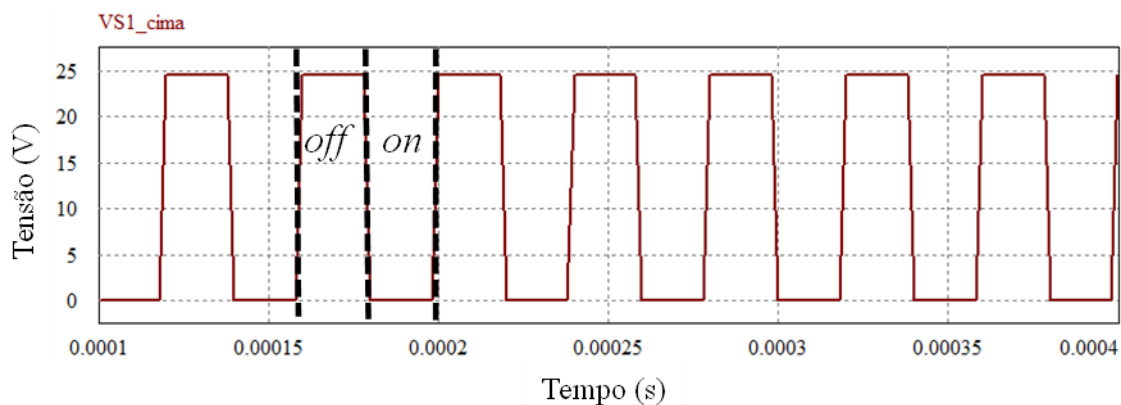


Figura 4.27 – Tensão no interruptor bidirecional superior da bateria 1.

Na segunda simulação, inicialmente duas baterias têm a mesma tensão e a outra bateria tem uma tensão superior, a bateria 1 tem 12,5 V e a bateria 2 e a bateria 3 têm ambas a mesma tensão de 11,5 V. As três baterias são equalizadas com uma diferença de mais 0,2 segundos (aproximadamente) relativamente à primeira simulação (Figura 4.28).

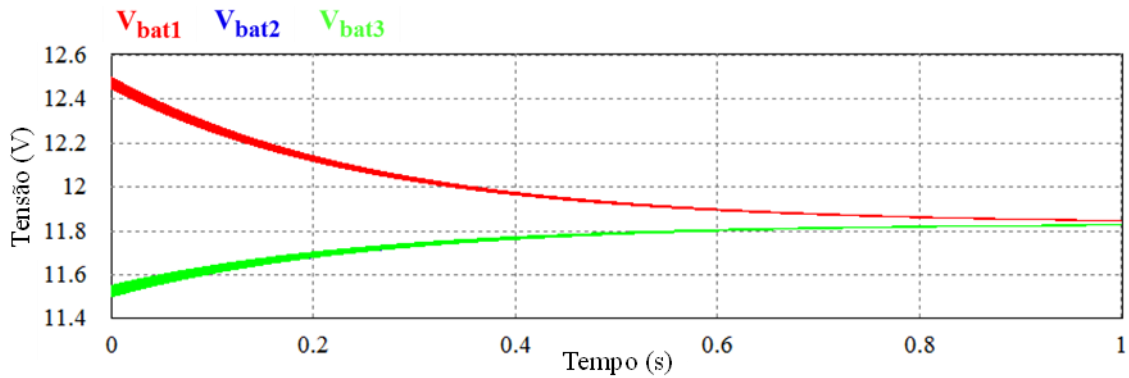


Figura 4.28 – Tensões nas três baterias durante o período de equalização.

Tal como na simulação anterior, a tensão no condensador de equalização varia entre a tensão da bateria menor e a tensão da bateria maior, ao longo do tempo. A tensão no condensador de equalização juntamente com a tensão das três baterias está apresentada na Figura 4.29.

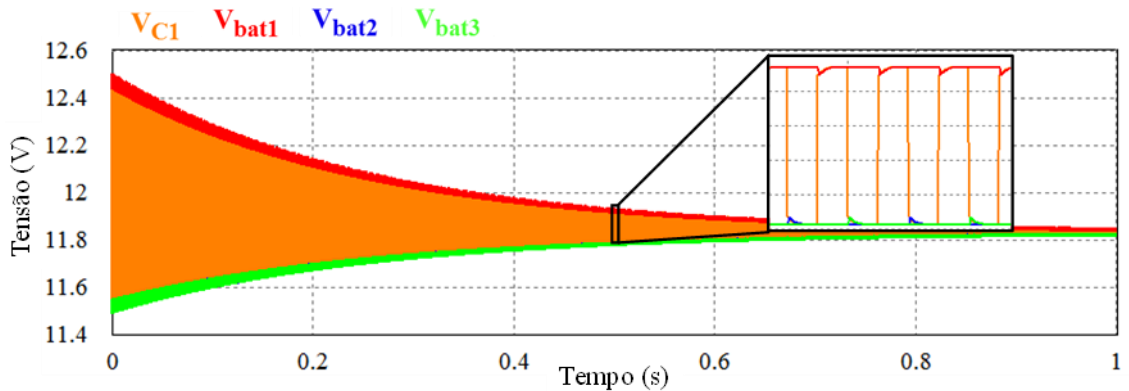


Figura 4.29 – Tensão no condensador e nas três baterias durante o período de equalização.

Pela Figura 4.30, onde estão representadas as correntes no condensador de equalização e nas baterias, comprova-se que o condensador carrega a partir da bateria 1 e descarrega na bateria 2, volta a carregar pela bateria 1 e descarrega na bateria 3. Este processo repete-se até ao final da equalização.

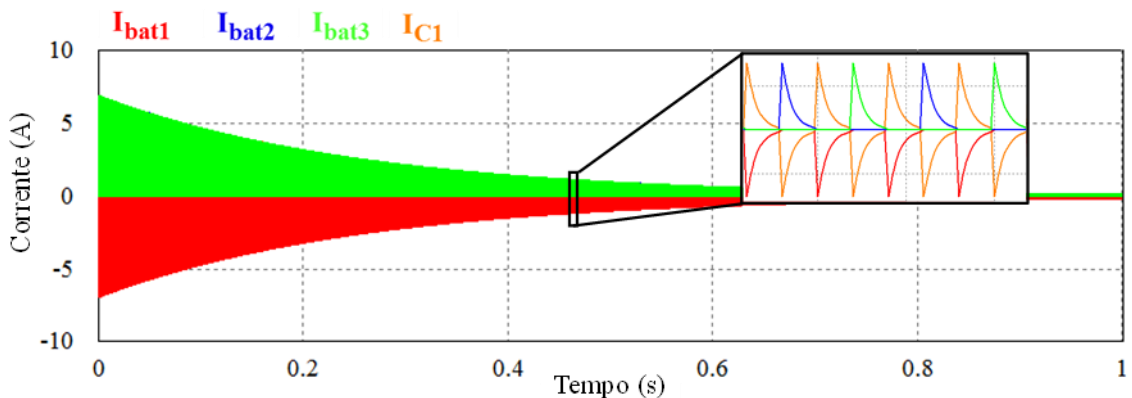


Figura 4.30 – Correntes nas baterias e no condensador durante o período de equalização.

Na terceira simulação, inicialmente as três baterias têm valores de tensão diferentes, sendo $V_{bat1} = 12,5 \text{ V}$, $V_{bat2} = 12,2 \text{ V}$ e $V_{bat3} = 11,5 \text{ V}$. É possível confirmar o funcionamento do algoritmo de controlo através da Figura 4.31, onde são apresentadas as tensões no condensador de equalização e nas três baterias. A bateria 2 só entra no processo de equalização quando tiver tensão mais elevada do que a bateria 1.

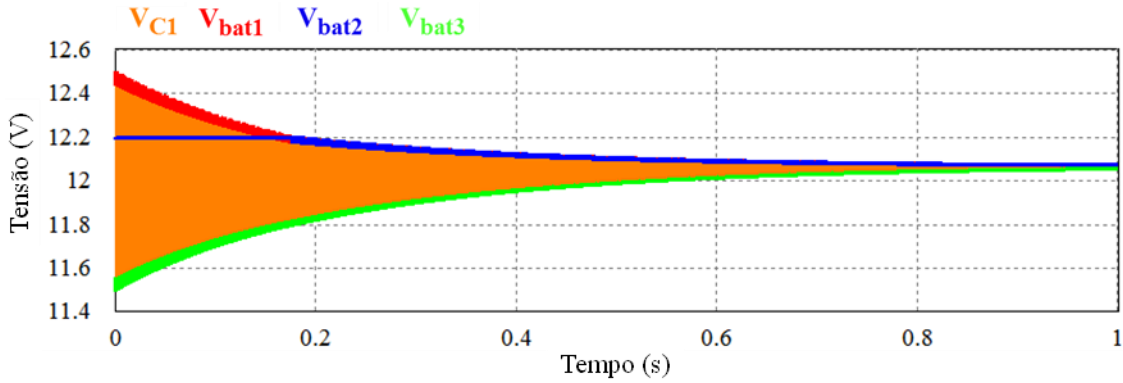


Figura 4.31 – Tensão no condensador e nas três baterias durante o período de equalização.

A quarta simulação mostra a relação entre a frequência de comutação e o valor do condensador de equalização. As três baterias têm diferentes valores iniciais de tensão ($V_{bat1} = 12,5 \text{ V}$, $V_{bat2} = 12 \text{ V}$ e $V_{bat3} = 11,5 \text{ V}$). Para a frequência de comutação foram utilizados valores entre 50 Hz e os 100 kHz, e para os condensadores de equalização, valores entre 10 μF e 1 mF. Cada ensaio tem uma duração de simulação de 5 segundos e é registado o instante de tempo em que a diferença de tensão entre a bateria 1 e a bateria 3 atinge os 50 mV. Os resultados estão registados e organizados na Tabela 4.2 para facilitar a sua análise. Para os casos em que a duração da equalização é superior ao tempo de simulação, é registado o valor da diferença de tensão entre a bateria 1 e a bateria 3 ao fim de 5 segundos na Tabela 4.3. Verifica-se que para o mesmo valor de condensador, quanto maior a frequência de comutação, menor será o tempo de equalização.

Tabela 4.2 – Duração da equalização para diferentes condensadores e frequências de equalização.

Condensador \ Frequência	Condensador						
	10 μF	20 μF	50 μF	100 μF	200 μF	400 μF	1 mF
50 Hz	+5 s	+5 s	+5 s	+5 s	+5 s	+5 s	+5 s
500 Hz	+5 s	+5 s	+5 s	+5 s	+5 s	3,7 s	1,8 s
10 kHz	+5 s	4,6 s	1,8 s	0,85 s	0,32 s	0,24 s	0,15 s
25 kHz	3,4 s	1,7 s	0,65 s	0,37 s	0,22 s	0,18 s	0,19s
50 kHz	1,7 s	0,91 s	0,34 s	0,23 s	0,19 s	0,18 s	0,18s
100 kHz	0,86 s	0,46 s	0,23 s	0,19 s	0,19 s	0,18 s	0,17 s

Tabela 4.3 – Diferença de tensão entre a bateria 1 e bateria 3 ao fim de 5 segundos de simulação.

Condensador Frequência	Capacitor Value							
	10 μF	20 μF	50 μF	100 μF	200 μF	400 μF	1 mF	
50 Hz	990 mV	990 mV	950 mV	910 mV	840 mV	700 mV	410 mV	
500 Hz	910 mV	850 mV	650 mV	420 mV	180 mV	50 mV	50 mV	
10 kHz	170 mV	50 mV	50 mV	50 mV	50 mV	50 mV	50 mV	
25 kHz	50 mV	50 mV	50 mV	50 mV	50 mV	50 mV	50 mV	
50 kHz	50 mV	50 mV	50 mV	50 mV	50 mV	50 mV	50 mV	
100 kHz	50 mV	50 mV	50 mV	50 mV	50 mV	50 mV	50 mV	

A quinta simulação tem como objetivo entender o efeito, no sistema de equalização, da resistência interna dos MOSFETs presentes em cada interruptor bidirecional. A tensão inicial de cada bateria é diferente ($V_{bat1} = 12,5 \text{ V}$, $V_{bat2} = 12 \text{ V}$ e $V_{bat3} = 11,5 \text{ V}$), e cada MOSFET tem uma resistência interna (R_{DSon}) de $100 \text{ m}\Omega$. Na Figura 4.32 estão representadas as tensões das três baterias a tensão no condensador de equalização. As baterias foram equalizadas, mas a equalização foi mais demorada do que na primeira simulação sem resistência interna dos MOSFETs. Também é possível verificar que o condensador de equalização tem uma variação de tensão (ΔV) menor. Com um ΔV menor, menor será também a corrente de equalização. Conclui-se então que a resistência interna do MOSFET é um dos fatores que influenciam tempo do processo de equalização.

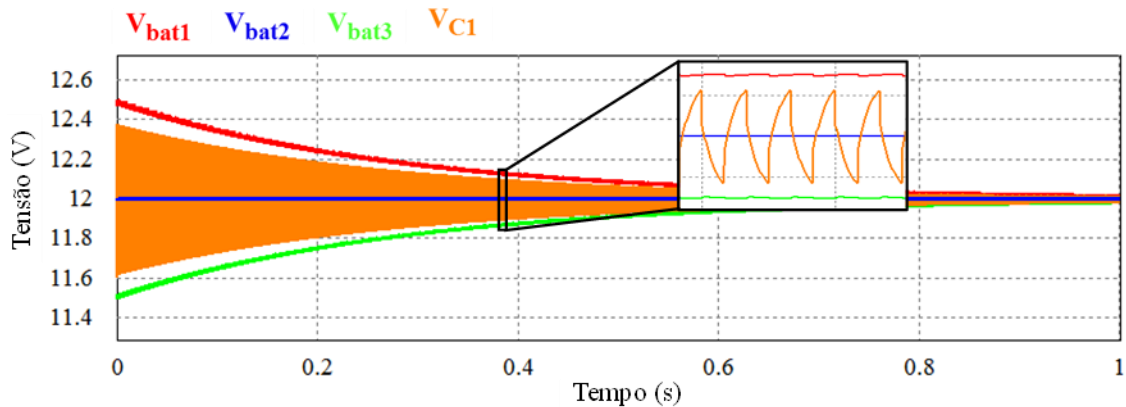


Figura 4.32 – Tensões nas baterias e no condensador durante o período de equalização.

4.4. Comparação Entre as Topologias Simuladas

O número de condensadores e o número de semicondutores controlados utilizados numa topologia influencia diretamente o custo da sua implementação. Nesta secção são apresentados dois tipos de comparações entre as diferentes topologias simuladas anteriormente. Analisando a Tabela 4.4, é possível comparar a quantidade de

condensadores necessários em cada topologia, para um banco com n baterias ligadas em série. Na Tabela 4.5 estão apresentados alguns exemplos com o número de interruptores bidirecionais necessários em cada topologia para diferentes quantidades de baterias ligadas em série. A análise destas duas tabelas está apresentada no subcapítulo 4.5 Conclusões.

Tabela 4.4 – Quantidade de condensadores necessários para cada topologia que contenha n baterias.

Nº de baterias (n)	SC ($n-1$)	DTSC (n)	SSC (1)	SMwC (1)
2	1	2	1	1
3	2	3	1	1
5	4	5	1	1
10	9	10	1	1
20	19	20	1	1

Tabela 4.5 – Quantidade de interruptores necessários para cada topologia que contenha n baterias.

Nº de baterias (n)	SC ($2n$)	DTSC ($2n$)	SSC ($n+5$)	SMwC ($2n$)
2	4	4	7	4
3	6	6	8	6
5	10	10	10	10
10	20	20	15	20
20	40	40	25	40

4.5. Conclusões

O tempo de balanceamento das topologias de equalização ativas baseadas em condensadores é influenciado pela variação de tensão (ΔV) entre baterias. Com o aumento de ΔV , maior será a corrente de equalização e à medida que ΔV diminui, menor será a corrente de equalização. A corrente de equalização depende da diferença de tensão entre baterias e da resistência equivalente do circuito (resistência do condensador e a resistência dos interruptores bidirecionais). Assim, pode-se concluir que o processo de equalização será mais rápido ao início e, à medida que o valor de ΔV entre baterias vai diminuindo, o processo de equalização será mais lento.

Das topologias simuladas em condições ideais, a que apresentou menor tempo de equalização foi a topologia *double-tiered switched capacitor*.

As topologias *single switch capacitor* (SSC) e *switch matrix witch capacitor* (SMwC) só necessitam de um condensador de equalização, independentemente do

número de baterias do sistema, enquanto a topologia *switched capacitor* (SC) e *double-tiered switched capacitor* (DTSC) necessitam de vários condensadores, consoante o número de baterias.

A topologia *single switched capacitor* (SSC) é a que necessita de menor número de interruptores bidirecionais para sistemas com mais de 5 baterias. Por outro lado é a que necessita de mais interruptores bidirecionais para aplicações com menos de 5 baterias.

Para implementação nesta Dissertação de Mestrado escolheu-se uma topologia que só necessita de um condensador de equalização, i.e., escolheu-se a topologia *switch matrix with capacitor*. Uma vez que para validar a topologia são necessárias apenas três baterias, esta topologia necessita de menos interruptores bidirecionais comparativamente com a topologia *single switched capacitor*.

CAPÍTULO 5

Projeto e Implementação do Sistema BMS

5.1. Introdução

Após terminadas as simulações que permitiram validar a topologia proposta e o respetivo sistema de controlo, procedeu-se à implementação do protótipo laboratorial do sistema BMS (*Battery Management System*). Neste sentido, neste capítulo são descritas as partes que constituem este projeto, nomeadamente o circuito de potência e o sistema de controlo. No circuito de potência é apresentado o dimensionamento do circuito de *driver* e das placas de equalização referentes às diferentes versões desenvolvidas. No sistema de controlo é apresentado o microcontrolador utilizado bem como o algoritmo de equalização e os sensores de tensão. Por fim, é apresentada a versão final do protótipo do sistema BMS.

5.2. Circuito de Potência

O circuito de potência é constituído por várias partes ligadas entre si, nomeadamente, um circuito de driver para os semicondutores, uma placa de BMS e uma placa com os condensadores de equalização. Este circuito inclui o hardware de potência necessário para a topologia de equalização ativa *switch matrix with capacitor* proposta para implementação nesta dissertação. De seguida são explicadas as diferentes partes que constituem o circuito de potência.

5.2.1. Circuito de *Driver* para os MOSFETs

Os semicondutores controlados escolhidos para a implementação do protótipo nesta dissertação foram MOSFETs. Estes semicondutores podem operar em três modos diferentes: Zona de saturação, zona ativa e zona corte. Nesta dissertação os MOSFETs funcionam como interruptores, por isso, apenas vão operar na zona de corte e saturação.

Inicialmente foi projetado o circuito de *driver* para os MOSFETs. O circuito de *driver* deve ser capaz de fazer o isolamento entre a *gate* do MOSFET e a placa de comando.

Para este projeto foi escolhido o *driver ADUM5230* da *Analog Devices*. O *ADUM5230* é um *gate driver* para meia ponte de MOSFETs. Este *driver* tem duas entradas para sinais lógicos e duas saídas. De acordo com o *datasheet* deste circuito integrado [56], a tensão de entrada deve estar compreendida entre os 4,5 V e os 5,5 V e a saída está situada entre 12 V e os 18 V. Este *driver* permite operar com temperaturas entre os -40 °C e os 105 °C. O *ADUM5230* também tem integrado um conversor CC-CC isolado. A integração desta fonte isolada foi uma das razões pela qual se escolheu este *driver* pois, contribui para uma redução do custo, espaço e outras dificuldades associadas à integração de uma fonte isolada externa. Este *driver* faz também o isolamento galvânico entre as entradas e as saídas. Na Figura 5.1 está representado o diagrama de blocos funcional do circuito integrado *ADUM5230*.

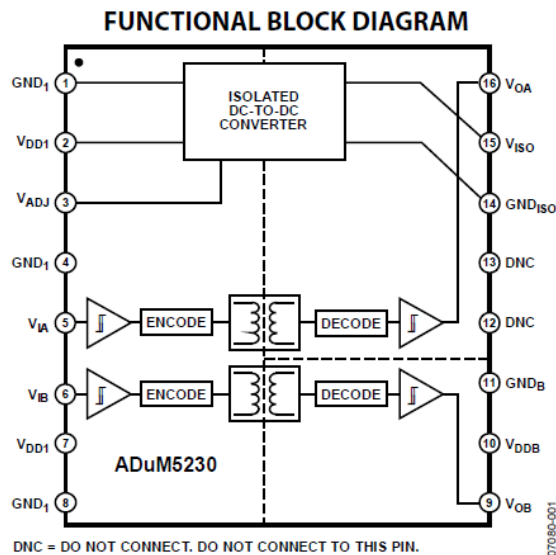


Figura 5.1 – Diagrama de blocos do *driver ADUM5230* da *Analog Devices* [56].

Para melhor compreender o funcionamento do *driver ADUM5230* foram efetuados diversos testes com uma frequência de 50 kHz. O esquema do circuito para validação do *driver* está representado na Figura 5.2.

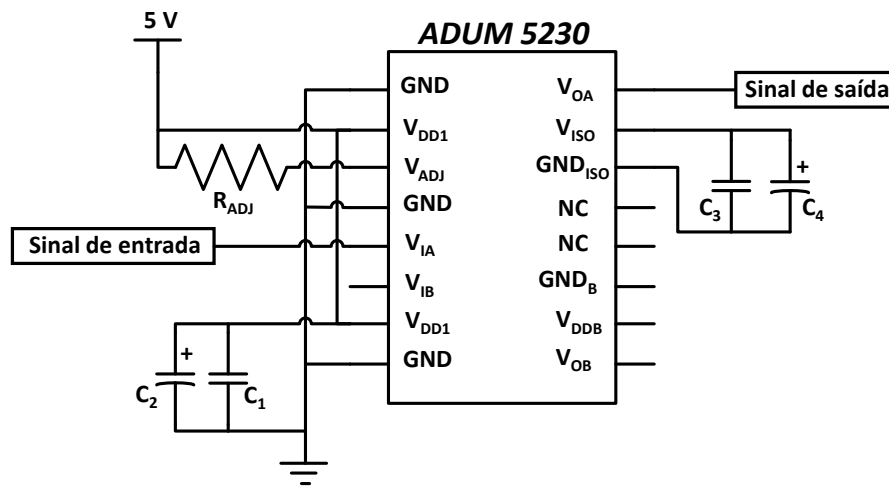


Figura 5.2 – Esquema do circuito para o teste e validação do *driver* ADUM5230.

Apesar de este *driver* admitir dois sinais PWM de entrada, numa primeira fase apenas foi testado com um sinal PWM. Na primeira montagem o circuito *driver* foi testado em *breadboard* como representado na Figura 5.3.

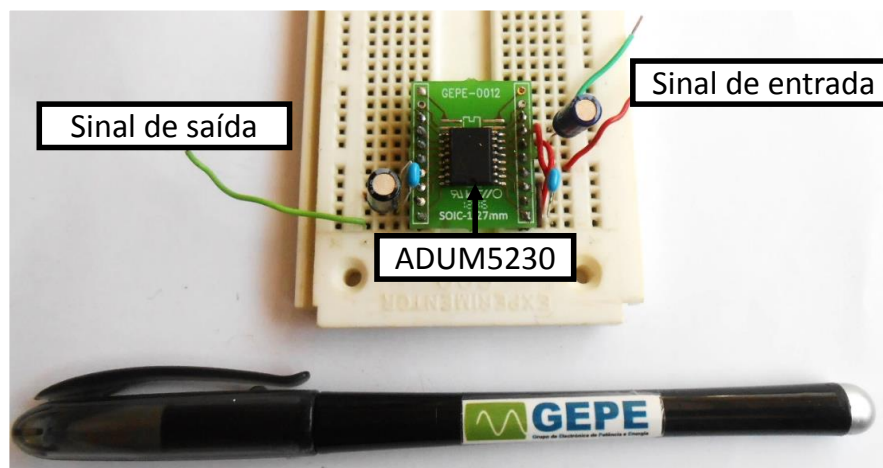


Figura 5.3 – Montagem em *breadboard* do circuito para teste do *driver* ADUM5230.

O primeiro teste foi efetuado para demonstrar a importância do uso de condensadores entre os pinos de alimentação do *driver*. Tal como referido no *datasheet* é necessário adicionar um condensador de cerâmica à entrada da fonte isolada para estabilizar a tensão de entrada na fonte. Contudo, apesar de ter sido utilizado um condensador (C_1) com o valor recomendado no *datasheet* (100 nF – 25 V), ainda foi possível notar algum *ripple* na tensão de entrada. Para minimizar o *ripple* foi também adicionado um condensador eletrolítico (C_2) em paralelo (22 μ F – 35 V) e verificou-se que esse *ripple* foi reduzido significativamente. Na Figura 5.4 está representado o sinal de alimentação do *driver* ADUM5230: (a) apenas com o condensador de cerâmica à entrada, (b) com um condensador de cerâmica e um condensador eletrolítico à entrada.

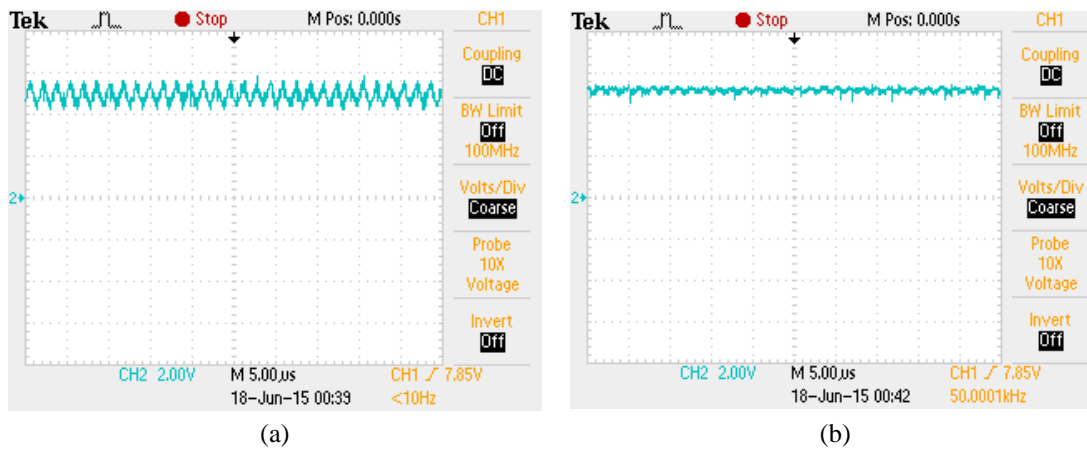


Figura 5.4 – Sinal da tensão de alimentação do *driver ADUM5230*: (a) Com condensador de cerâmica na entrada; (b) Com dois condensadores (cerâmica e eletrolítico) na entrada.

O segundo teste consistiu na análise dos sinais de saída do *driver ADUM5230*. Como sinal de PWM de entrada foi utilizado um sinal quadrado proveniente de um gerador de sinais, com valor pico a pico de 5 V e com um *duty-cycle* de 50%.

Numa primeira fase deste teste, foi medido o sinal à saída do *driver* em aberto, ou seja sem qualquer tipo de componente ligado à saída. O sinal obtido está apresentado na Figura 5.5 e é possível verificar que o sinal de saída não corresponde a um sinal típico de PWM, i.e., um sinal quadrado.

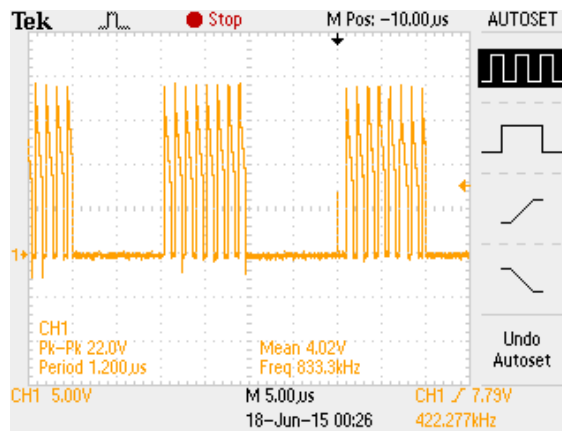


Figura 5.5 – Sinal de saída do *driver* sem qualquer componente ligado à saída.

Deste modo, o sinal obtido poderá interferir negativamente com o funcionamento do circuito. Como recomendado no *datasheet* foram adicionados condensadores à saída da fonte isolada do *driver ADUM5230* para obter um sinal correto. Entre os valores recomendados no *datasheet* e o material disponível, utilizou-se um condensador de cerâmica (100 nF – 25 V) e um condensador eletrolítico (22 μ F – 50 V) à saída da fonte isolada do *driver ADUM5230*. Como se pode verificar na Figura 5.6, a adição destes dois

condensadores resolveu o problema de ruído e a forma de onda na saída do *driver* já se assemelha a um sinal PWM típico.

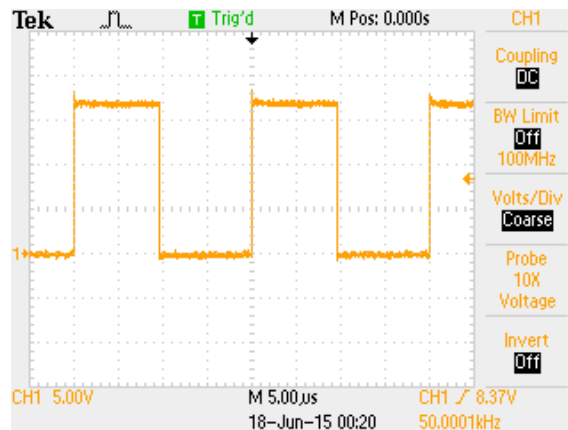


Figura 5.6 – Sinal de saída do *driver* com condensadores à saída (frequência de 50 kHz e *duty-cycle* de 50%).

Para concluir este segundo teste foram feitas medições no sinal PWM de entrada e no sinal de PWM de saída do *driver ADUM5230*. A Figura 5.7 (a) apresenta esses dois sinais com uma frequência de 50 kHz e *duty-cycle* de 50%, medidos com recurso a um osciloscópio digital. O valor máximo do sinal PWM de saída está dentro das especificações descritas no *datasheet* do *driver*, que refere que a tensão máxima de saída de PWM pode variar entre os 12 V e os 18 V. Analisando em detalhe os dois sinais (Figura 5.7 (b)), é possível observar que o *delay* entre o sinal de entrada e o sinal de saída é de aproximadamente 75 ns.

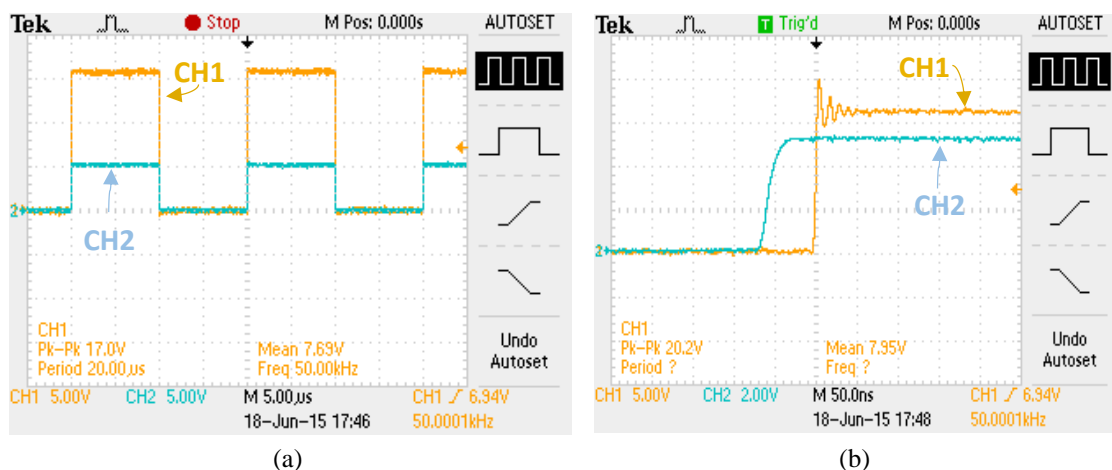


Figura 5.7 – (a) Sinal de entrada (CH2) e sinal de saída (CH1) do *driver*; (b) Detalhe dos dois sinais.

Depois de terminados os testes sobre o funcionamento do *driver ADUM5230* foi conectado um MOSFET ao *driver* e testado o seu funcionamento. O MOSFET utilizado para este teste foi o *IXFQ50N50P3* do tipo N (Figura 5.8), que suporta uma tensão de

500 V entre *drain* e a *source*, uma corrente de 50 A, e a sua resistência interna em condução é inferior a 125 mΩ [57]. Utilizou-se este MOSFET pois era o que tinha disponível no GEPE para a aplicação pretendida e também porque como se trata de um protótipo, utilizou-se um MOSFET sobredimensionado.

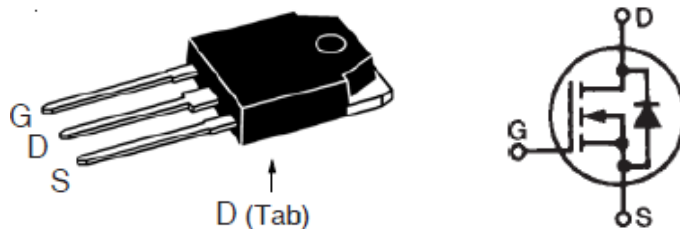


Figura 5.8 – MOSFET IXFQ50N50P3 da IXYS [57].

Antes de testar este MOSFET juntamente com o *driver*, foi dimensionado o circuito de proteção de *gate* (Figura 5.9). Neste circuito a resistência R_{GS} impede que o MOSFET entre em condução devido a tensões parasitas. Com o circuito desligado, se existir tensão entre a *gate* e a *source* do MOSFET, esta tensão é descarregada através desta resistência. São utilizados dois díodos *zener*, ligados em série com cátodo comum, para a proteção contra picos de tensão que ocorram entre a *gate* e a *source*. No *datasheet* do MOSFET é referido que a tensão entre a *gate* e a *source* não deve exceder os 30 V. Com esta informação e consoante o material disponível, utilizaram-se dois díodos *zener* de 16 V. Também com base nos dados do *datasheet* do MOSFET [57], é dimensionada uma resistência de *gate* ($R_G = 13 \Omega$) que tem como função proteger o circuito *driver* e para limitar a corrente na *gate*.

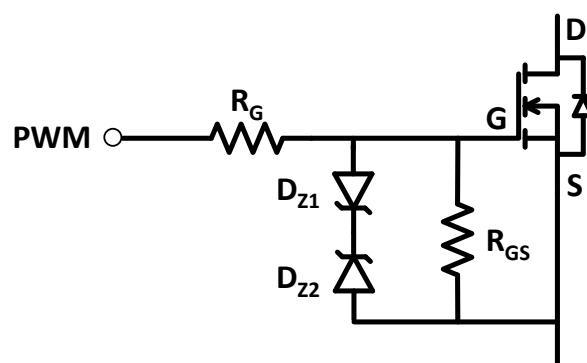


Figura 5.9 – Circuito de proteção de gate do MOSFET.

Para testar o acionamento do MOSFET a partir do circuito *driver*, foi utilizado o circuito representado no esquema da Figura 5.10, composto por uma fonte de tensão de 15 V, um MOSFET tipo N e uma resistência.

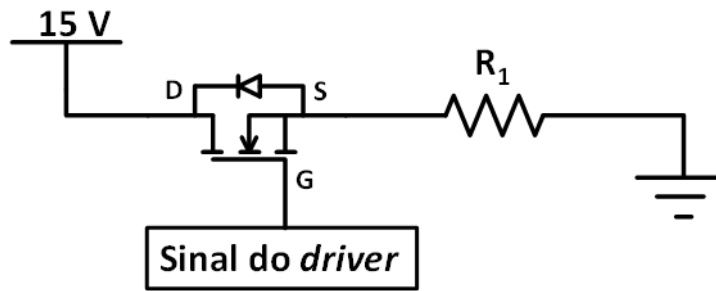


Figura 5.10 – Esquema do circuito para teste do acionamento do MOSFET a partir do *driver*.

Como na aplicação BMS pretendida o valor de corrente varia conforme a diferença de carga entre baterias, foram utilizados valores diferentes na resistência R_1 deste circuito de testes para se conseguir obter diferentes valores de corrente.

Num primeiro ensaio, utilizou-se uma resistência de $100\ \Omega$, o que corresponde a aproximadamente uma corrente de 150 mA, para três valores de frequências diferentes: 25 kHz, 50 kHz e 100 kHz. Na Figura 5.11 está apresentada a tensão *drain-source* e a tensão *gate-source* do MOSFET para uma frequência de comutação 50 kHz.

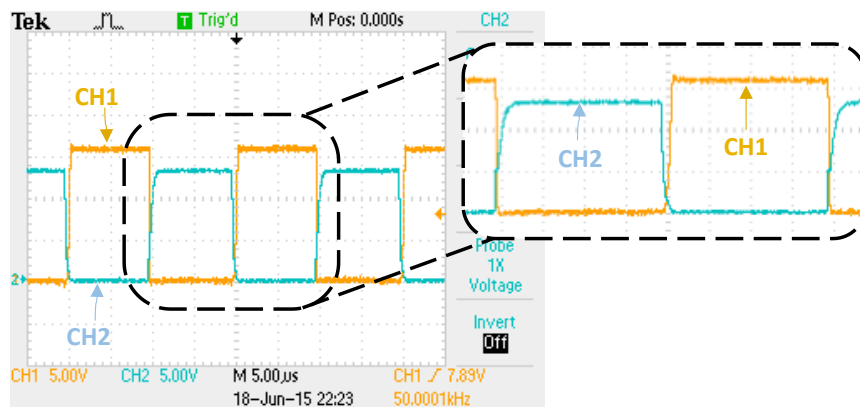


Figura 5.11 – Tensão entre *drain* e *source* (CH2) e sinal na *gate* (CH1) do MOSFET com uma corrente de 150 mA.

No segundo ensaio, para testar com um valor de corrente mais alto, foi utilizada uma resistência de valor menor ($15\ \Omega$) que no teste anterior, o que corresponde a aproximadamente uma corrente de 1 A. Tal como no teste anterior foram efetuadas medições para três frequências de comutação diferentes: 25 kHz, 50 kHz e 100 kHz. Na Figura 5.12 está apresentada a tensão *drain-source* e a tensão *gate-source* do MOSFET para uma frequência de comutação de 50 kHz.

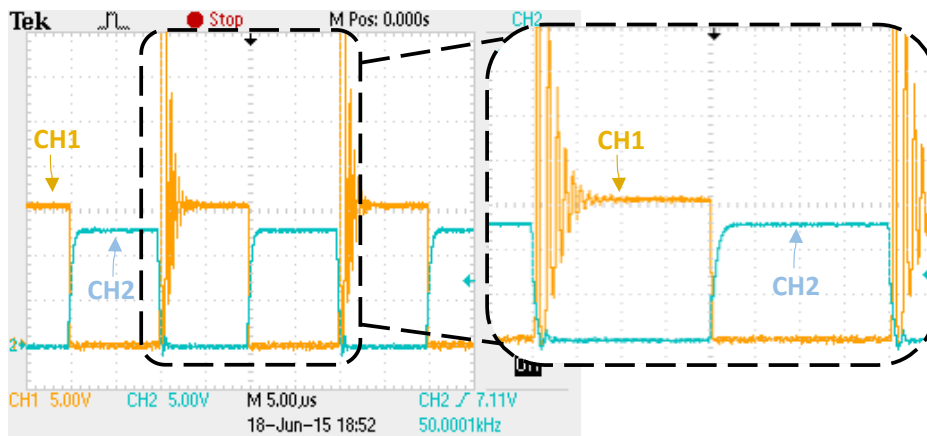


Figura 5.12 – Tensão entre *drain* e *source* (CH2) e sinal na *gate* (CH1) do MOSFET com uma corrente de 1 A.

Comparando os resultados deste teste é possível verificar que com o aumento da corrente no MOSFET, aumenta também o ruído na tensão *drain-source* durante as comutações do MOSFET. Uma solução possível para minimizar este problema passa por dimensionar um circuito *snubber* entre o *drain* e a *source* do MOSFET para filtrar as altas frequências provenientes das comutações.

Durante a fase de testes ao sistema de equalização o *driver* necessita de estar em funcionamento durante longos períodos de tempo, por isso foram medidas a suas temperaturas. Verificou-se que tanto em *breadboard* como em *veroboard* a temperatura máxima que o *driver* atingia rondava entre os 65 °C e os 70 °C. No *datasheet* do ADUM5230 [56] é recomendado que no desenho do PCB para aplicar o integrado, seja incluída uma maior área de cobre nos pinos GND da fonte isolada, para servir como dissipador. Aquando da integração do *driver* num PCB, esta informação foi tida em conta e observou-se que a sua temperatura desceu significativamente, variando entre os 32 °C e os 38 °C.

5.2.2. Placa BMS

A placa BMS tem na sua constituição o circuito de *driver* para os MOSFETs e o circuito de proteção desses semicondutores. Esta foi desenhada com o propósito de ser aplicável a uma única bateria e permitir fazer a sua ligação com o elemento de equalização do sistema que, no caso deste projeto, é o condensador. Cada placa BMS tem dois interruptores bidirecionais, um conectado entre o terminal positivo da bateria e o terminal positivo do condensador e o outro interruptor bidirecional conectado entre os terminais negativos da bateria e do condensador. Assim, esta placa BMS é versátil caso, numa versão futura, se pretenda alterar o elemento de equalização do sistema por um conversor

CC-CC ou por um transformador. Cada bateria necessita de uma placa BMS para que seja possível realizar a sua equalização.

Ao longo do desenvolvimento deste projeto, a placa BMS sofreu várias alterações e por isso estão apresentadas as várias versões desta placa e quais as suas vantagens e desvantagens. Todas as versões foram montadas e testadas em *veroboard* e posteriormente em PCB.

O esquema com o circuito base da placa BMS está representado na Figura 5.13. Esta placa tem todos os componentes necessários para a configuração do *driver ADUM5230*: condensadores de entrada, condensadores à saída, circuitos para proteção dos MOSFETs e alimentação para os sinais PWM de saída (V_{OA} e V_{OB}). O sinal V_{OA} é alimentado internamente pela fonte isolada do *driver*. Para a alimentação do sinal V_{OB} é utilizada uma fonte isolada (+5V para +5V). Cada sinal de saída está conectado a um interruptor bidirecional e cada interruptor é responsável por fazer a ligação entre um terminal da bateria com um terminal do condensador de equalização (terminal positivo com positivo e negativo com negativo).

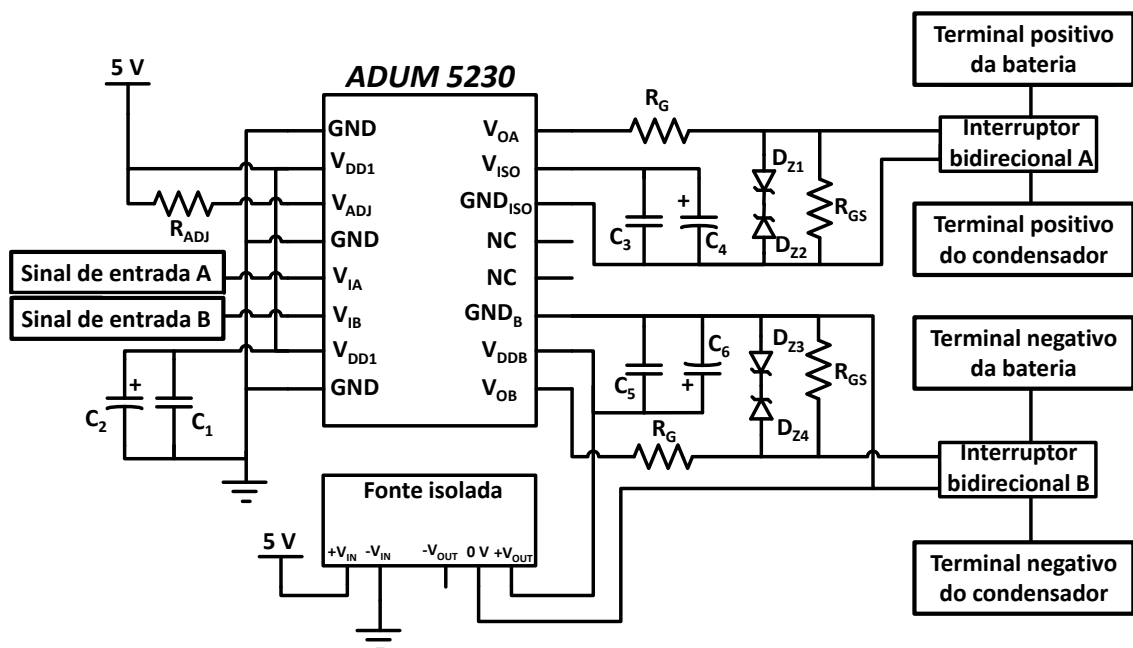


Figura 5.13 – Esquema do circuito base da placa BMS.

Um dos principais requisitos para o funcionamento da topologia BMS proposta (*switch matrix with capacitor*) é a utilização de interruptores bidirecionais totalmente controlados. Tal como referido anteriormente, o MOSFET é utilizado como interruptor nesta dissertação. Porém, só é possível controlar a sua condução para um dos sentidos, e assim o desafio seguinte passou por encontrar uma solução para obter interruptores bidirecionais totalmente controlados, através da utilização de MOSFETs. São propostas

dois tipos de soluções para superar este desafio utilizando o MOSFET *IXFQ50N50P3* do tipo N. Ambas as soluções foram implementadas em placas BMS e testadas (numa primeira versão em *veroboard* e numa segunda versão em PCB desenhada com o software PADS). É também apresentada a comparação entre as duas soluções para esclarecer qual a que melhor se aplica à topologia BMS proposta.

Solução 1 – Interruptor bidirecional controlado com MOSFET e ponte de díodos

Nesta solução, cada interruptor bidirecional totalmente controlado é constituído por um MOSFET do tipo N e por uma ponte de díodos, como demonstrado na Figura 5.14. A ponte de díodos utilizada é a *KBL406* [58] que aceita até uma corrente máxima de 4 A.

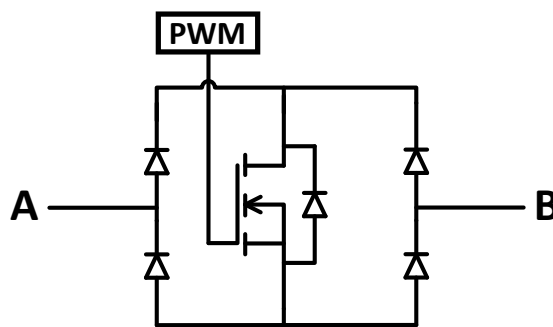


Figura 5.14 – Interruptor bidirecional controlado com MOSFET do tipo N e ponte de díodos.

Este circuito foi então integrado na placa BMS, juntamente com o *driver*, para ser testado. Na Figura 5.15 está a primeira versão desta solução construída em *veroboard* para validar o seu funcionamento como interruptor bidirecional totalmente controlado.

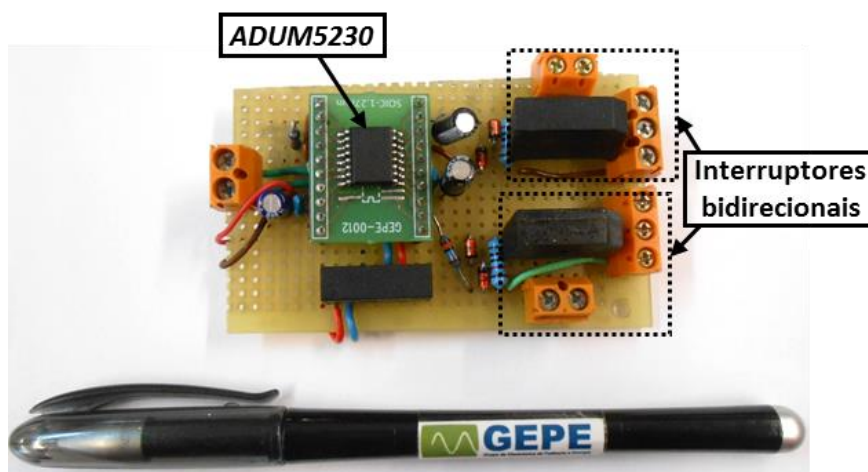


Figura 5.15 – Circuito em *veroboard* da placa BMS desenhada para a solução 1.

Os esquemas da Figura 5.16 demonstram o sentido da corrente quando interruptor conduz do potencial A para o potencial B e vice-versa. Assim verifica-se que esta solução funciona como interruptor bidirecional.

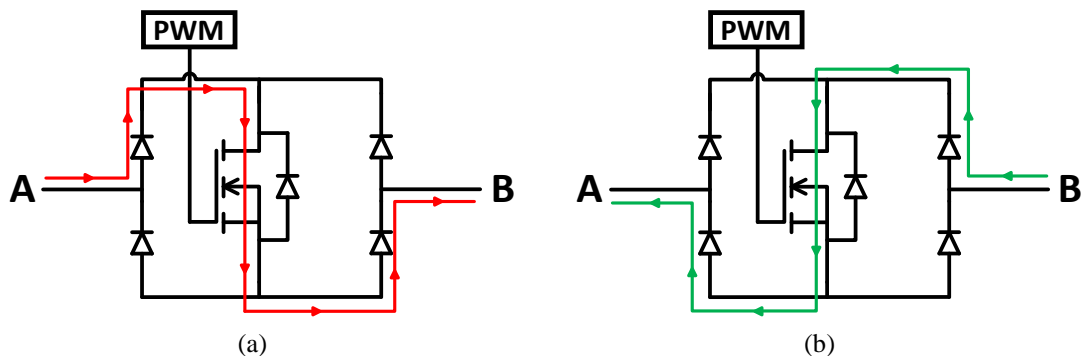


Figura 5.16 – Sentido da corrente quando conduz: (a) de A para B; (b) de B para A.

A segunda versão deste circuito foi desenhada e implementada em PCB para ser integrada na topologia BMS e manter o *driver* em condições de temperatura mais baixas, como explicado anteriormente. No desenho do PCB também foi necessário respeitar o isolamento galvânico do *driver* e retirar o cobre do lado secundário da placa. Para que o circuito ficasse impresso apenas numa das faces da placa, o *driver ADUM5230* foi soldado na parte inferior. Na Figura 5.17 está apresentada a vista da parte superior desta versão da placa BMS em PCB. De realçar que a placa está preparada para, posteriormente, se testarem diferentes modelos de MOSFETs, por isso na imagem apenas se encontram os conectores destinados aos semicondutores. Na Figura 5.18 é apresentada a parte inferior da mesma placa, onde se pode observar o *driver ADUM5230*.

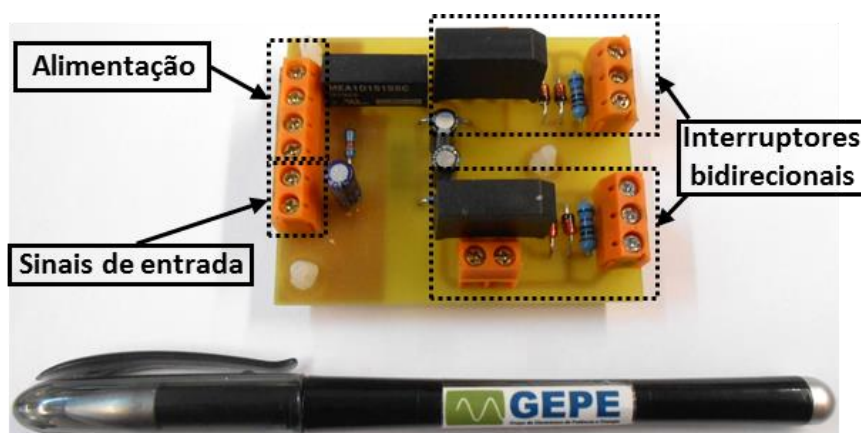


Figura 5.17 – Circuito em PCB da placa BMS (face superior) desenhada para a solução 1.



Figura 5.18 – Circuito em *PCB* da placa BMS (face inferior) desenhada para a solução 1.

Solução 2 - Interruptor bidirecional controlado com dois MOSFETs em série

Para esta solução, cada interruptor bidirecional totalmente controlado é constituído por dois MOSFETs do tipo N ligados em série com o terminal *source* comum, como apresentado na Figura 5.19. Esta solução está apresentada na literatura [46][48] e também já foi abordada no capítulo 4 das simulações.

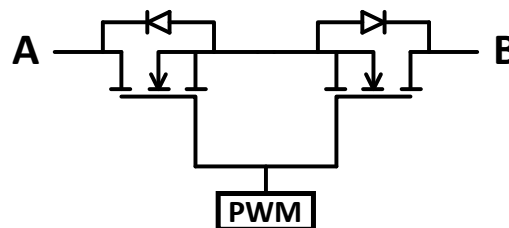


Figura 5.19 – Interruptor bidirecional controlado com dois MOSFET do tipo N em série com terminal *source* comum.

A primeira versão da placa BMS, montada em *veroboard*, para validação desta solução está apresentada na Figura 5.20.

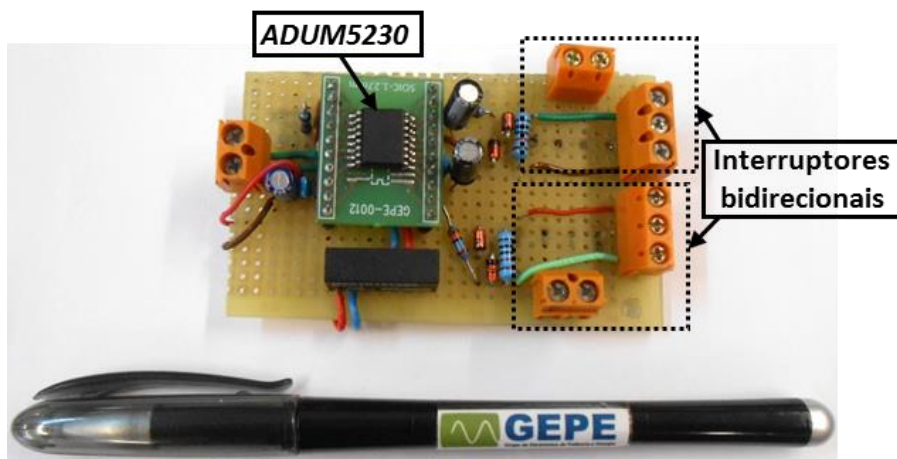


Figura 5.20 – Circuito em *veroboard* da placa BMS desenhada para a solução 2.

Na Figura 5.21 são apresentados os esquemas que demonstram o caminho da corrente quando interruptor conduz do potencial A para o potencial B e vice-versa. Verifica-se também que este circuito funciona como interruptor bidirecional.

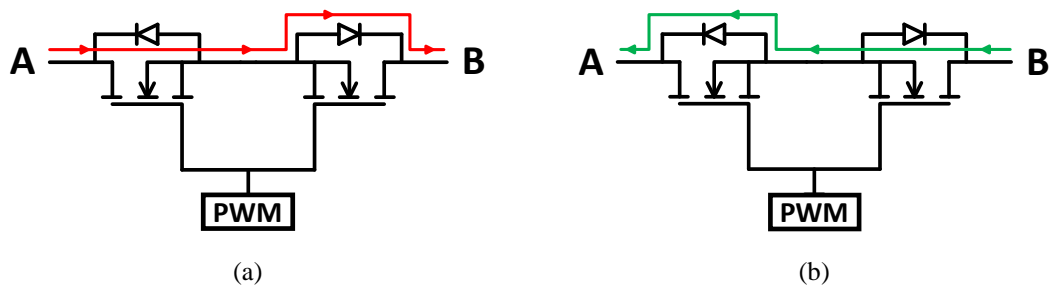


Figura 5.21 – Sentido da corrente quando conduz: (a) de A para B; (b) de B para A.

A segunda versão da placa BMS que integra esta solução, também desenhada e montada em PCB, está apresentada na Figura 5.22. Também no desenho do PCB foi respeitado o isolamento galvânico do *driver ADUM5230* e as condições necessárias para uma dissipação eficiente do calor da sua fonte isolada interna. Na Figura 5.23 está apresentada a face superior da placa BMS com esta versão de interruptor bidirecional. Uma vez, os MOSFETs não estão incluídos na figura pois a placa foi desenhada com o intuito de se poderem testar vários modelos de MOSFETs do tipo N. O circuito foi impresso apenas na face inferior da placa BMS, por isso, o *driver ADUM5230* foi soldado na parte inferior por questões de simplificação de desenho e de recursos na criação do PCB.

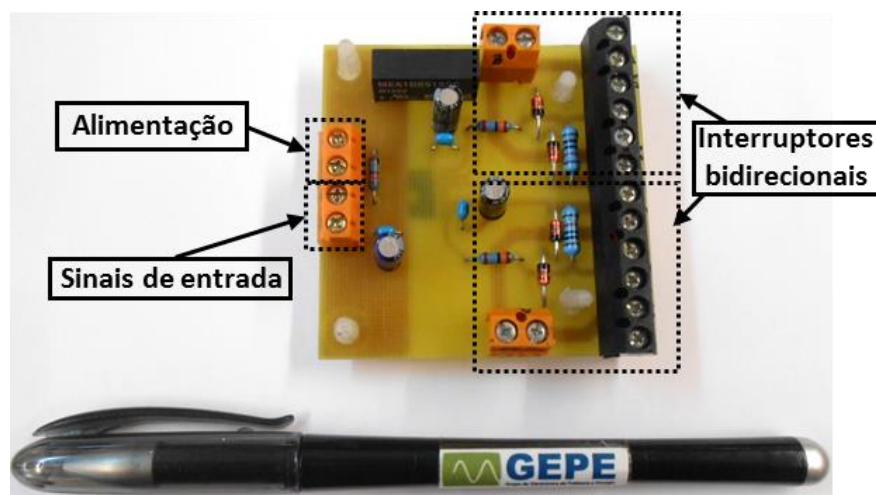


Figura 5.22 – Circuito em PCB da placa BMS (face superior) desenhada para a solução 2.

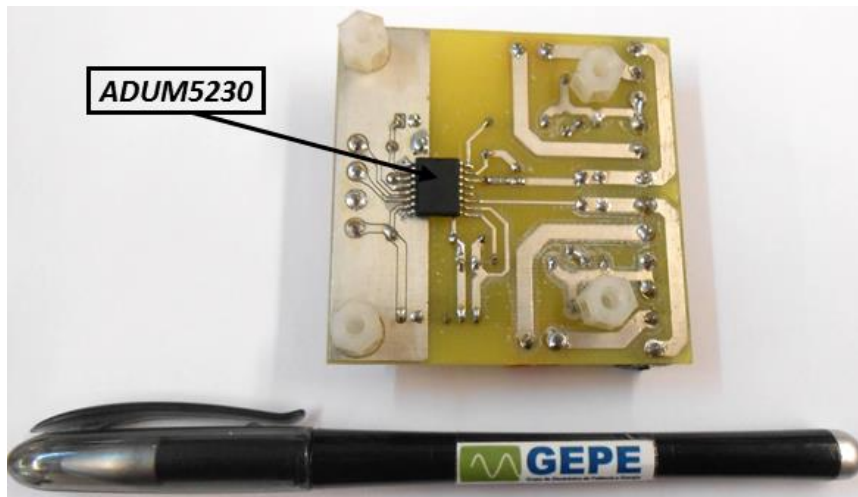


Figura 5.23 – Circuito em *PCB* da placa BMS (face inferior) desenhada para a solução 2.

5.2.3. Placa do Condensador de Equalização

Durante a fase de testes foram utilizados condensadores eletrolíticos e de poliéster para determinar qual o que apresentava melhor desempenho para esta aplicação. Foram escolhidos os condensadores de poliéster, pois apresentaram resultados mais satisfatórios.

Os condensadores disponíveis no GEPE e utilizados neste projeto, têm uma capacidade de 10 μF . Para a integração do condensador de equalização no BMS, foi desenhada uma placa com o software de *design* gráfico *PADS* e montada em *PCB*. Esta placa foi desenhada com o objetivo de poder juntar em paralelo vários condensadores deste tipo para conseguir obter diferentes valores de capacidade. Deste modo é possível realizar diferentes testes com para diferentes valores de capacidade do condensador de equalização. Assim, a placa do condensador de equalização, apresentada na Figura 5.24, permite juntar em paralelo até 8 condensadores (de 10 μF a 80 μF). Nos resultados finais, o valor de capacidade utilizado maioritariamente é de 50 μF .

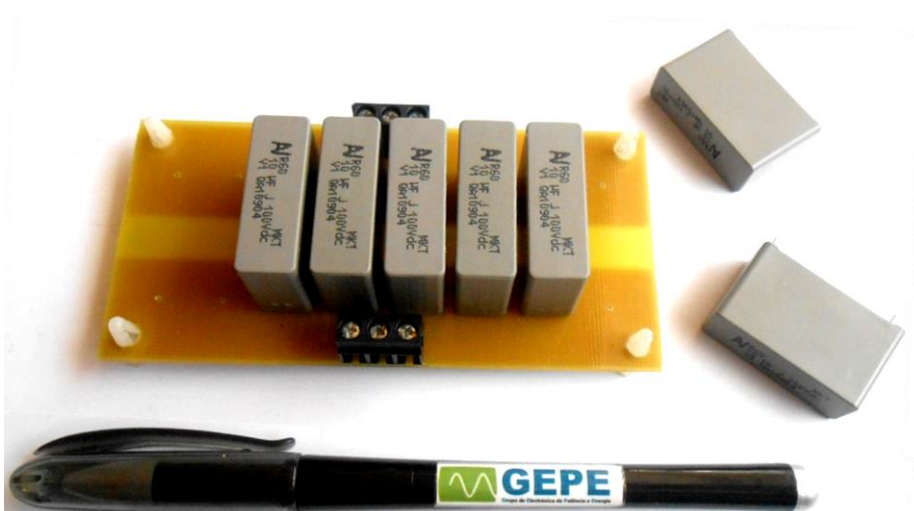


Figura 5.24 – Placa do condensador de equalização.

5.2.4. Banco de Baterias para Equalização

Neste projeto foi utilizado um banco de três baterias de chumbo-ácido (modelo *WCG-UI* da *Power Mobility*). As especificações de baterias deste modelo já estão apresentadas anteriormente neste documento, na Tabela 4.1 do subcapítulo 4.2. A tensão nominal de cada bateria é de 12 V e a sua capacidade é de 33 Ah. Quando ligadas em série, a tensão do banco de baterias é de 36 V. No final, pretende-se que a topologia proposta seja capaz de fazer a equalização das três baterias de chumbo-ácido.



Figura 5.25 – Banco com três baterias de chumbo-ácido *WCG-UI* da *Power Mobility* em série.

5.3. Sistema de Controlo

O sistema de controlo é responsável pela recolha e análise das medições feitas às baterias (neste caso, tensão das baterias) e comandar as comutações dos MOSFETs consoante os dados recebidos. Este sistema tem como objetivo o controlo da equalização e também, conforme o seu grau de robustez, contribui para a segurança do sistema. De seguida estão apresentadas as partes que constituem este sistema de controlo, que é constituído por um microcontrolador, sensores de tensão e o algoritmo de controlo utilizado no microcontrolador.

5.3.1. Microcontrolador

Como para a validação da topologia implementada nesta dissertação apenas é necessária a equalização entre um número reduzido de baterias em série (entre duas ou três), optou-se por utilizar um único microcontrolador e assim uma arquitetura centralizada. Nesta dissertação utilizou-se a placa *C2000 Piccolo LaunchPad* (Figura 5.26) desenvolvida pela *Texas Instruments (TI)*. Esta placa contém embebido o

DSP (*Digital Signal Processor*) *TMS320F28027* também da *TI* [59]. Escolheu-se este DSP pois possui os recursos necessários para a sua integração no protótipo a implementar.

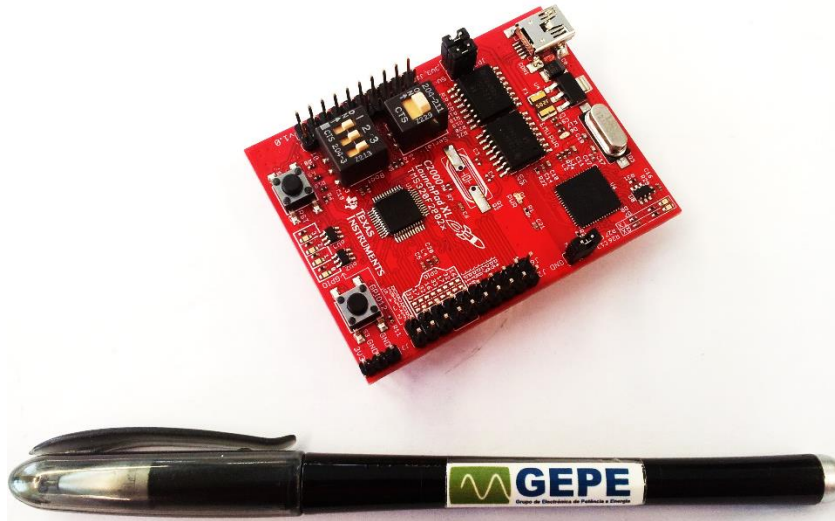


Figura 5.26 – *C2000 Piccolo LaunchPad* da *Texas Instruments*.

As suas principais características são: uma frequência de *clock* de 60 MHz ($\approx 16,67$ ns correspondem a um ciclo); 3 *timers* de 32-bits; 1 ADC (*Analog to Digital Converter*) multiplexado em 13 canais com uma resolução de 12-bits; alimentação de 3,3 V; 4 saídas PWM e os seus complementares com uma amplitude entre 0 V e 3,3 V; um módulo SPI (*Serial Peripheral Interface*); permite 3 interrupções externas; possibilita o *debug* em tempo real; possui 22 pinos de uso geral para entrada/saída (*General Purpose Input/Output* - GPIO).

A placa *C2000 Piccolo LaunchPad* permite duas formas de programação: a primeira é através da utilização de um conjunto de bibliotecas já desenvolvidas, com funções predefinidas que facilitam a configuração do DSP; a segunda maneira consiste em configurar o DSP ao registo. Apesar da utilização das bibliotecas predefinidas facilitar a programação do DSP, nesta dissertação utilizou-se a configuração ao registo. Com este tipo de programação é possível ter uma melhor noção e controlo da memória do dispositivo e facilita também a integração do código desenvolvido noutros DSPs mais avançados (como o exemplo do *TMS320F28335* utilizado em vários projetos do GEPE).

A programação e o *debug* do DSP foram feitos através de um PC, com recurso à ferramenta *Code Composer v5* também pertencente à *Texas Instruments*.

5.3.2. Placa de Interface Entre o DSP e o *Driver ADUM5230*

Como os PWMs do DSP têm uma amplitude que varia entre 0 V (*low*) e 3,3 V (*high*) e o *driver ADUM5230* só reconhece o nível logico *high* a partir dos 3,5 V, foi

necessário utilizar um circuito integrado para fazer a ligação entre o DSP e o *driver*. Este integrado serve amplificar os 3,3 V (valor *high*) do DSP para 5 V, de modo a poder ser ligado ao *driver*. Foram testados dois circuitos integrados para arranjar uma solução para este problema: o 74LS07 [60] e o 74HCT04 [61]. Ambos fazem a conversão de um sinal TTL (*Transistor-Transistor Logic*) para CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*).

O 74LS07 é um *buffer* que reconhece sinais de entrada superiores a 2 V como nível lógico *high* e amplifica-os para 5 V. Esta é uma solução simples mas representa algumas desvantagens para a aplicação BMS implementada. O 74LS07 tem a saída em coletor aberto, o que significa que quando os sinais PWM à entrada estão desligados o integrado apresenta 5 V à saída (*high*). Para esta aplicação, como medida de segurança para o sistema, quando os PWM estão desligados, a saída do integrado terá de apresentar 0 V (*low*). Esta solução foi então posta de parte e foi experimentado o 74HCT04. O 74HCT04 é um inversor com 6 portas lógicas *NOT*. Ao utilizar apenas uma porta lógica *NOT*, isso fará com que a lógica do sinal PWM proveniente do DSP seja invertida. Para evitar que isso aconteça o sinal PWM é invertido duas vezes. Como foram utilizados 3 sinais PWM, um integrado 74HCT04 é suficiente. Na Figura 5.27 está apresentado o esquema de ligações para o 74HCT04 e na Figura 5.28 a montagem em *veroboard* deste integrado.

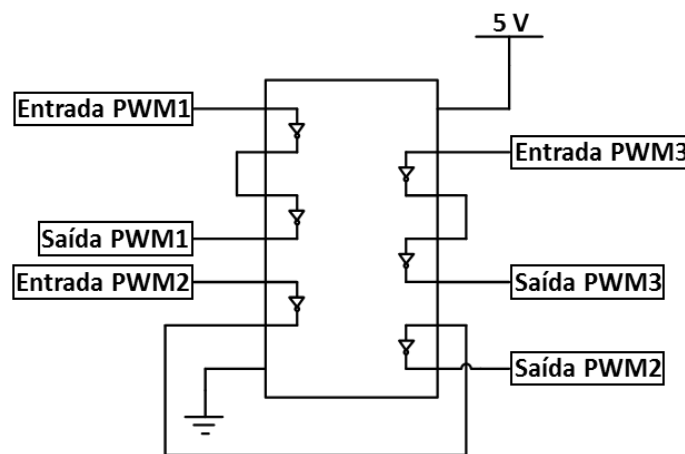


Figura 5.27 – Esquema de ligações do integrado 74HCT04.

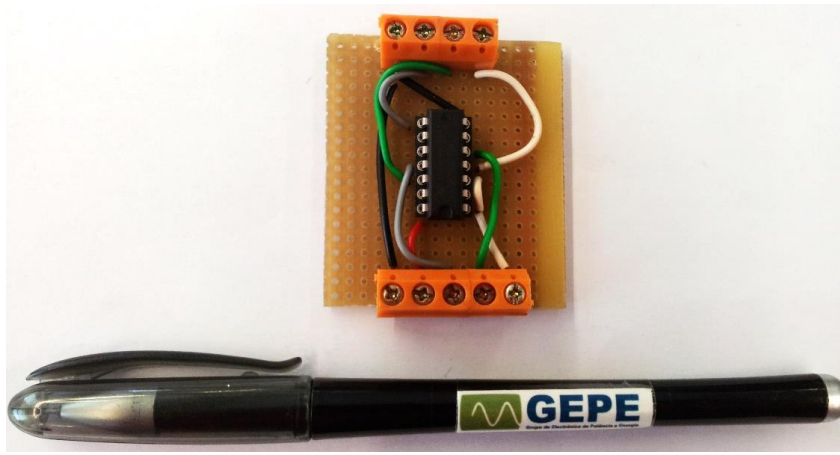


Figura 5.28 – Placa de interface entre o DSP e o *driver ADUM5230*.

Quando se escolheu o *driver ADUM5230* foram procuradas outras soluções que aceitassem sinais de entrada compreendidos entre os 0 V e os 3,3V. Foi testado o *ADUM3223* [62], um *driver* com o funcionamento muito idêntico ao *ADUM5230*, à exceção que este novo *driver* aceita sinais com 3,3 V de nível *high*. Porém o *ADUM3223* não foi utilizado pois, ao contrário do *ADUM5230*, não tem fonte isolada interna, o que torna esta solução mais dispendiosa em conjunto com o material necessário para o sistema final.

5.3.3. Algoritmo de Controlo

O algoritmo presente nesta dissertação tem como objetivo controlar a equalização das baterias através da topologia implementada *switch matrix with capacitor*. Num BMS deste género, o algoritmo de controlo representa um papel essencial para o sistema pois é fundamental para o seu correto funcionamento. Este algoritmo é bastante importante pois sem um correto controlo da topologia, esta pode não funcionar corretamente o que pode provocar danos às baterias. O algoritmo de controlo apresentado neste subcapítulo foi desenvolvido e implementado no DSP, utilizando a linguagem de programação C. De seguida serão apresentados os fluxogramas que compõem o algoritmo de controlo deste projeto.

O fluxograma da Figura 5.29 apresenta o algoritmo do sistema, utilizado para comandar a topologia proposta. Antes do início da equalização, neste algoritmo começam-se por inicializar as variáveis e configurar o sistema. São feitas as configurações dos PWM, ADC e do *timer*. De seguida são lidos os valores das tensões das baterias e após terminada a leitura, é calculada a média de tensão total e a diferença de tensão entre baterias. Caso a diferença de tensão entre baterias esteja distanciada de um certo valor padrão é iniciada a equalização, caso contrário são aguardadas novas

leituras de tensões das baterias. Quando a diferença de tensão entre baterias for igual ou inferior ao valor padrão, o processo de equalização é terminado e são desabilitados todos os sinais PWMs.

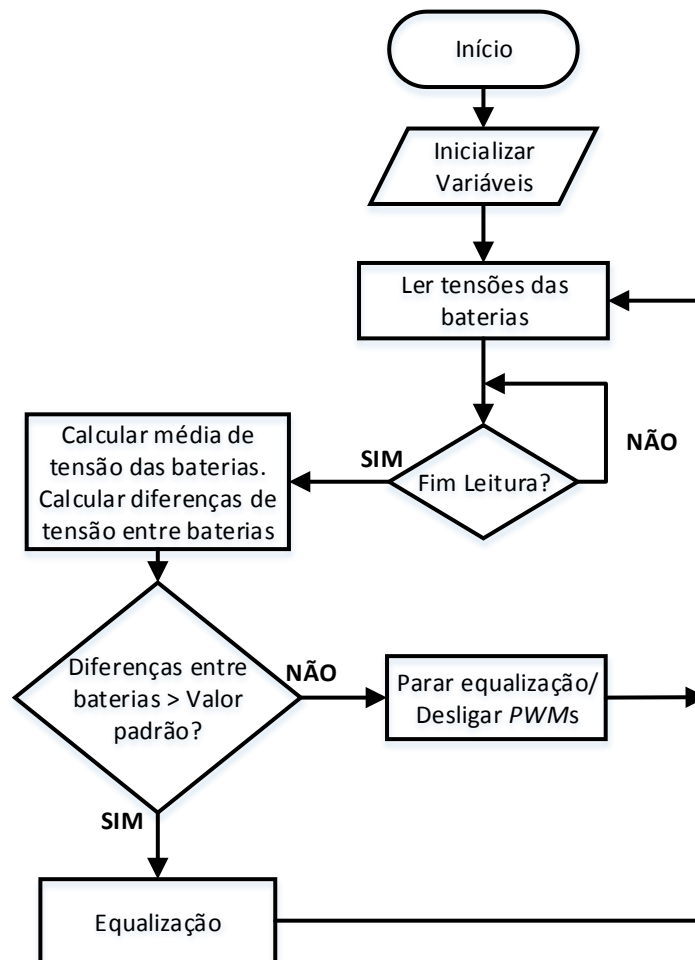


Figura 5.29 – Fluxograma do algoritmo do sistema para a topologia proposta.

No bloco “Equalização” são chamadas as funções que determinam qual a bateria com maior tensão e qual a com menor tensão (funções “Bat_maior_tensão” e “Bat_menor_tensão”). De seguida, são ativados os respetivos sinais PWM responsáveis para iniciar a equalização da bateria com maior tensão e da bateria com menor tensão. Por exemplo, caso a bateria com maior tensão seja a bateria 1 e a bateria com menor tensão seja a bateria 2, serão ligados os sinais PWM1 e PWM2 com um desfasamento de 180° entre eles. O fluxograma da Figura 5.30 explica o funcionamento do bloco “Equalização” para um banco de três baterias.

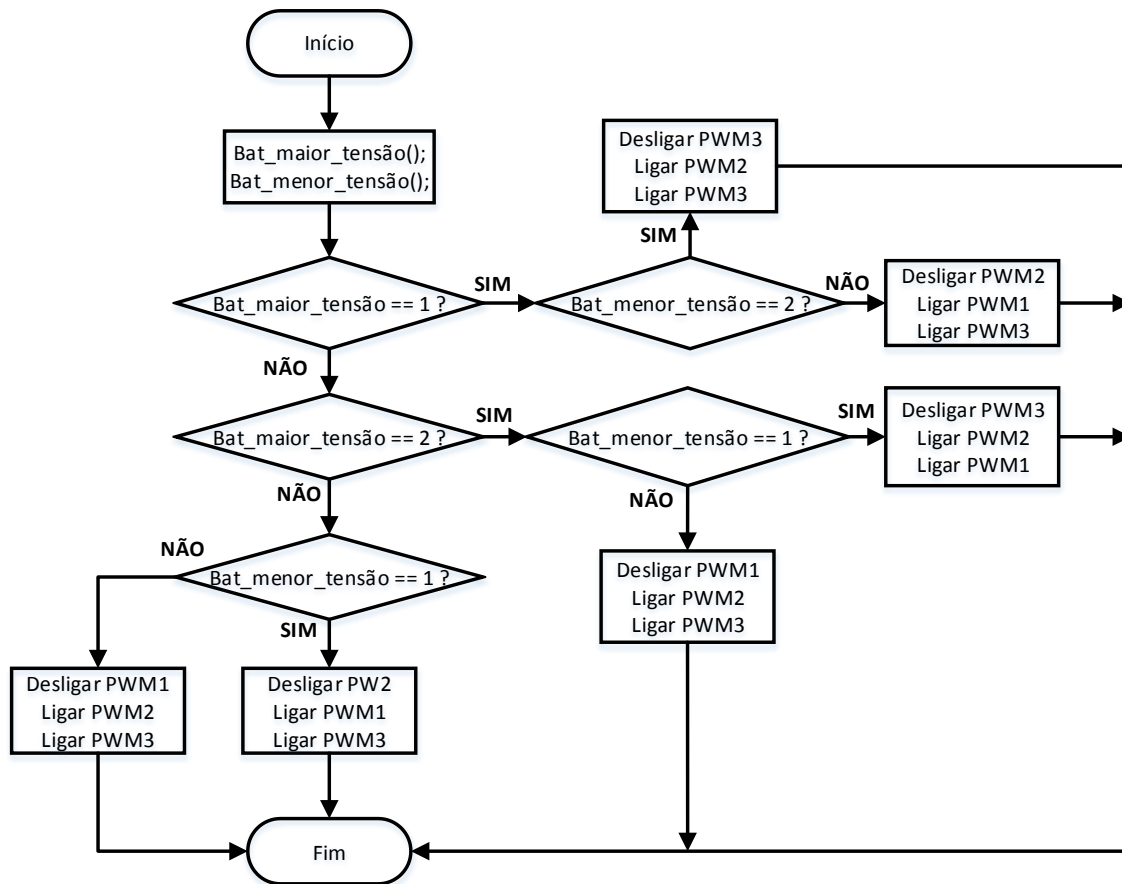


Figura 5.30 – Fluxograma do algoritmo de equalização para a topologia proposta.

Os sinais de PWM são utilizados para a comutação dos MOSFETs. É necessário 1 sinal PWM para cada placa BMS, o que significa que para um banco com 3 baterias, são necessários 3 sinais de PWM diferentes. É necessário ainda, na configuração garantir um *dead-time* entre as comutações para garantir que as baterias não entrem em curto-circuito.

O *timer* foi configurado de modo a que os ADCs façam as leituras das tensões dos sensores com a frequência pretendida. Inicialmente foi escolhida uma frequência de leitura de 25 kHz (40 μ s). A interrupção externa é ativada a cada 40 μ s para serem recolhidas as leituras dos ADC. Após lidas 10 amostras e feita a sua média é que a variável que contém o valor de tensão da bateria é atualizada. O fluxograma da Figura 5.31 mostra a rotina executada durante a interrupção externa do *timer*.

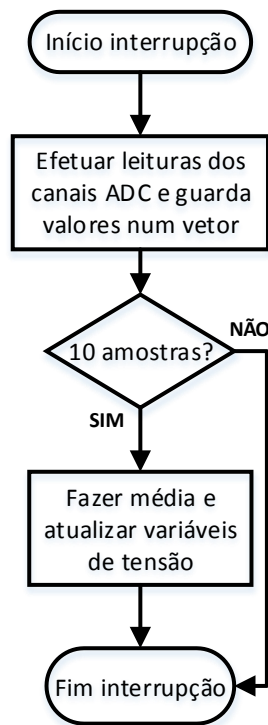


Figura 5.31 – Fluxograma para a leitura dos ADC.

Como o ADC faz a leitura de tensões entre os 0 V e os 3,3 V estes valores são convertidos pelo DSP para valores digitais compreendidos entre 0 e 4095 (12 bits). Isto significa que é possível ter uma resolução de leitura de 805 μV .

5.3.4. Placas para os Sensores de Tensão

A utilização de sensores de tensão é uma parte importante para o correto funcionamento do sistema de controlo. Com base na informação proveniente das leituras feitas pelos sensores de tensão é que o algoritmo de controlo deste sistema irá controlar os sinais de comando para os MOSFETs.

O sensor de tensão de efeito de *Hall* utilizado neste projeto foi o *CYHVS025A* [63]. Este sensor permite realizar medições de tensão de forma isolada. Segundo o seu *datasheet*, também apresenta bom isolamento a interferências externas, precisão, linearidade e tem um tempo de resposta baixo. O valor nominal de corrente é de 10 mA. A sua relação de transformação é de 2500:1000, i.e., a corrente no secundário (I_s) será 2,5 vezes maior do que a corrente no primário (I_p). A alimentação é de +15 V, GND, -15 V e a precisão de leitura é de $\pm 0,8\%$. O esquemático com as ligações externas necessárias para a medição de tensões com este sensor está apresentado na Figura 5.32.

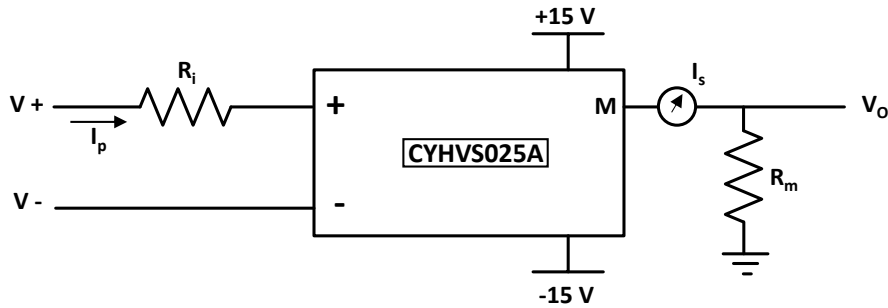


Figura 5.32 – Ligações do sensor CYHVS025A (esquema baseado em [63]).

De acordo com a tensão que se pretende medir e segundo as especificações do sensor presentes no *datasheet* são dimensionados os valores da resistência R_i do primário e da resistência R_m do secundário. Terá de ser utilizado um sensor de tensão para cada bateria. Considerando que a tensão máxima de cada bateria é de 14,2 V, as resistências R_i e R_m terão de ser calculadas com base nesta tensão de referência. O ADC do microcontrolador faz a leitura de tensões entre os 0 V e os 3,3 V, assim quando a entrada do primário do sensor tiver 14,2 V, no secundário do sensor terá de sair a sua tensão correspondente, ou seja, 3,3 V para o valor máximo. Utilizando as equações (5.1) e (5.2) é possível calcular o valor das resistências R_i e R_m , respetivamente.

$$R_i = \frac{V}{I_p} \quad (5.1)$$

$$R_p = \frac{V_o}{I_s} \quad (5.2)$$

Considerando uma tensão máxima de entrada de 14,2 V e uma corrente de 10 mA, substituído estes valores na equação (5.1), obtém-se o valor da resistência R_i :

$$R_i = \frac{14,2}{0,01} = 1,42 \text{ k}\Omega$$

Se a tensão máxima de saída for de 3,3 V, utilizando a relação de transformação e sabendo que a corrente no primário é de 10 mA, a corrente no secundário é de 25 mA. Logo, substituindo estes valores na equação (5.2) obtém-se o valor da resistência R_m :

$$R_m = \frac{3,3}{0,025} = 132 \Omega$$

Assim, aproximando os valores calculados com os valores existentes na realidade, a resistência R_i tomou o valor de 1,4 k Ω e para a resistência R_m foram utilizadas duas

resistências (uma resistência de 56Ω e outra de 75Ω) em série para obter o valor de 131Ω .

Após dimensionados todos os componentes, foi utilizada uma placa desenvolvida pelo GEPE para a integração deste sensor de tensão (Figura 5.33). O conector verde no lado primário conecta-se aos terminais da bateria que se pretende medir. O conector laranja do lado secundário tem quatro terminais: um destinado à tensão de saída do sensor, um para os +15 V de alimentação, um para o GND e outro para a alimentação de -15 V.



Figura 5.33 – Placa para um sensor de tensão *CYHVS025A* (desenvolvida pelo GEPE).

Apesar destes sensores de tensão serem dispendiosos e sobredimensionados, estavam disponíveis para utilização no GEPE (juntamente com a placa já desenvolvida) e preenchem os requisitos necessários para a validação deste protótipo. Posteriormente numa aplicação mais avançada, deverão ser revistos sensores que consigam preencher os requisitos necessários para a aplicação tendo em conta a minimização do impacto no seu custo final.

5.4. Protótipo do Sistema BMS Final

O protótipo final tem como finalidade equalizar as três baterias do banco de baterias a partir da topologia de equalização ativa *switch matrix with capacitor*. Para isso são necessárias três placas BMS, uma placa do condensador de equalização, um DSP e três sensores de tensão, tal como apresentado no esquema da Figura 5.34. Caso se adicionem mais baterias ao sistema, basta acrescentar mais uma placa BMS e um sensor de tensão por cada bateria adicionada.

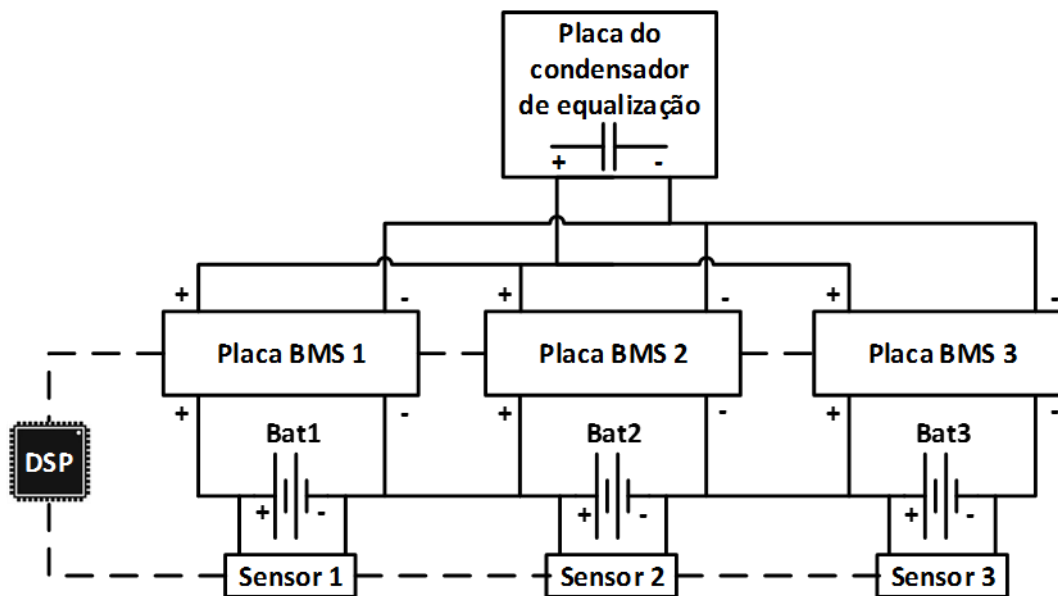


Figura 5.34 – Esquema do protótipo final da topologia *switch matrix with capacitor*.

5.4.1. Escolha do Interruptor Bidirecional Mais Adequado

Das soluções para construir um interruptor bidirecional controlado, foi selecionada a que melhor se aplicava para esta aplicação de BMS. Para as duas soluções, foi utilizado um circuito de teste constituído por uma fonte de tensão de 15 V, uma resistência ($R_I = 100 \Omega$) e a placa BMS do respetivo interruptor. Nas placas BMS foram utilizados MOSFETs *IXFQ50N50P3*. Utilizou-se uma frequência de comutação de 50 kHz e um *duty-cycle* de 50% para estes testes. O esquema deste circuito de teste está representado na Figura 5.35. O objetivo deste teste é medir a queda de tensão entre os terminais do interruptor bidirecional quando este está em condução (*on*).

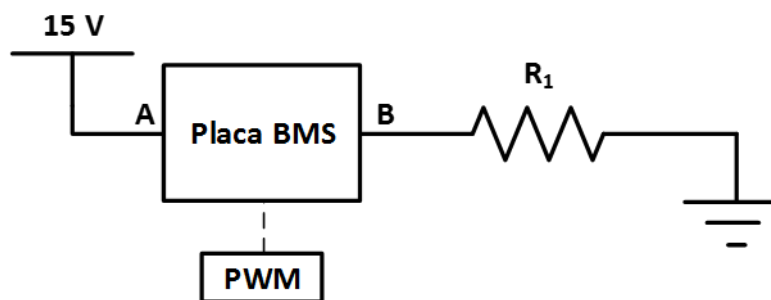


Figura 5.35 – Circuito de teste para os interruptores bidirecionais.

A primeira solução a ser testada foi a do conjunto formado pelo MOSFET e pela ponte de díodos. Utilizando o osciloscópio foram medidas as tensões na resistência R_I e na fonte de alimentação Figura 5.36. Teoricamente, quando o interruptor está a *off*, a tensão na resistência R_I deverá ser de 0 V e quando o interruptor está a *on*, a tensão em R_I deve ser igual à tensão da fonte de alimentação, i.e., 15 V. Analisando a Figura 5.36

em detalhe, quando o interruptor está a *off*, não existe tensão em R_I , mas quando o interruptor está a *on* a tensão aos terminais de R_I é aproximadamente 13,5 V, mais baixa que a tensão da fonte de alimentação. Há uma diferença tensão de cerca de 1,5 V entre a tensão da fonte de alimentação e a tensão na resistência R_I , quando o interruptor está a *on*.

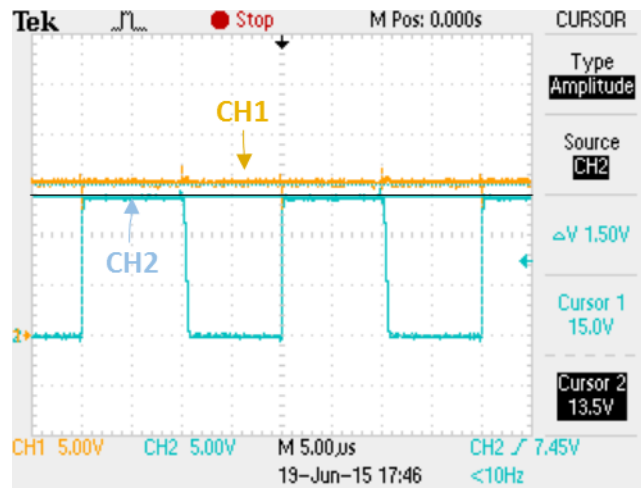


Figura 5.36 – Teste ao interruptor da solução 1: tensão na fonte de alimentação (CH1) e tensão na resistência (CH2).

Analisando a tensão no interruptor na Figura 5.37, é possível observar que quando o interruptor está a *off* a sua tensão é igual à tensão da fonte de alimentação. Quando o interruptor está a *on* observa-se uma queda de tensão de 1,5 V, diferente dos 0 V teóricos. Esta queda de tensão no interruptor bidirecional é significativamente elevada para aplicações de BMS que utilizem baterias com tensões baixas, pois compromete o seu princípio de funcionamento.

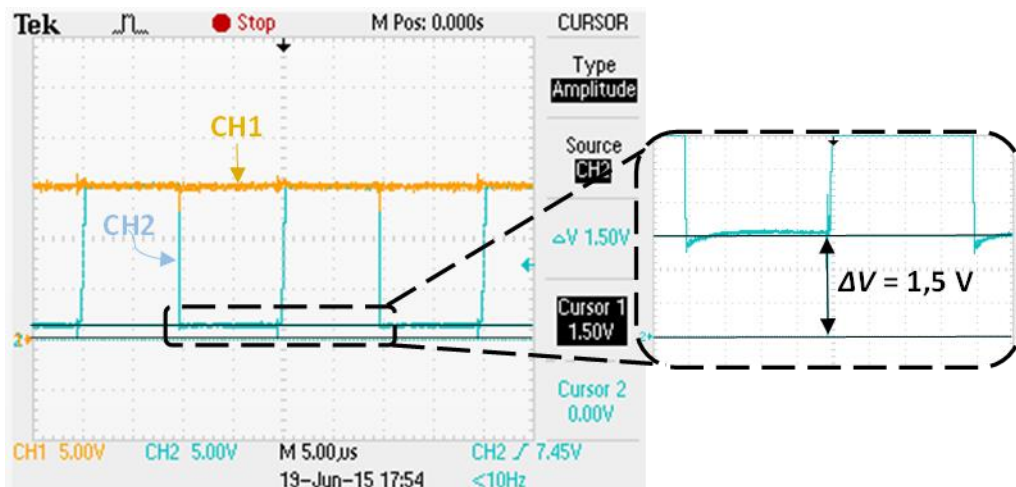


Figura 5.37 – Teste ao interruptor da solução 1: tensão na fonte de alimentação (CH1) e tensão no interruptor (CH2) (ampliação com 500 mV/Div).

A segunda solução a ser testada foi a de dois MOSFETs do tipo N em série com o terminal *source* comum. Tal como no teste com o interruptor bidirecional apresentado anteriormente, foi utilizado o mesmo circuito para testar o funcionamento desta nova solução, com uma frequência de comutação de 50 kHz e *duty-cycle* de 50%. Na Figura 5.38 está apresentada a tensão na resistência R_I e a tensão na fonte de alimentação. Como pode ser observado, quando o interruptor está a *off* a tensão em R_I é de 0 V e quando o interruptor está a *on*, há uma diferença de tensão de cerca de 180 mV entre a tensão da fonte de alimentação e a tensão de R_I . Isto significa que, quando o interruptor está a *off* a sua tensão será igual à tensão da fonte e quando o interruptor estiver a *on*, terá uma queda de tensão aproximadamente de 180 mV.

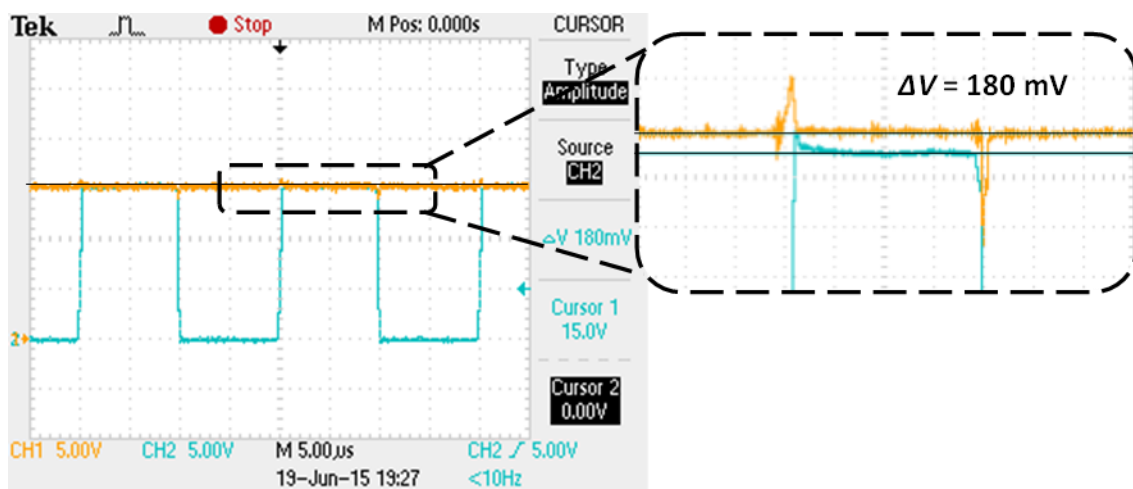


Figura 5.38 – Teste ao interruptor da solução 2: tensão na fonte de alimentação (CH1) e tensão na resistência (CH2) (ampliação com 500 mV/Div).

Comparando as duas soluções de interruptores bidirecionais apresentadas anteriormente, conclui-se que a solução 1 (MOSFET com ponte de díodos) não é vantajosa para o sistema pretendido. A solução 2 (dois MOSFETs do tipo N em série com *source* comum) apesar de apresentar uma queda de tensão de 180 mV pode ser aplicada neste sistema para validar o funcionamento da topologia. Por isso a solução 2 foi a escolhida para integrar no protótipo final. É necessário ter a atenção que devido a esta queda de tensão de 180 mV as baterias não poderão ficar totalmente equalizadas, i.e., ficarem com a mesma tensão no final do processo de equalização. Uma possível solução de minimizar essa queda de tensão passa por dimensionar um MOSFET com uma resistência interna menor que o utilizado.

5.4.2. Aspeto do Sistema Final

Após dimensionadas e testadas todas as partes que constituem este sistema BMS, na Figura 5.39 está apresentado o aspeto do circuito de potência com os sensores de tensão do protótipo final. Nesta figura não estão visíveis nem o microcontrolador nem as ligações entre o microcontrolador e as placas BMS.

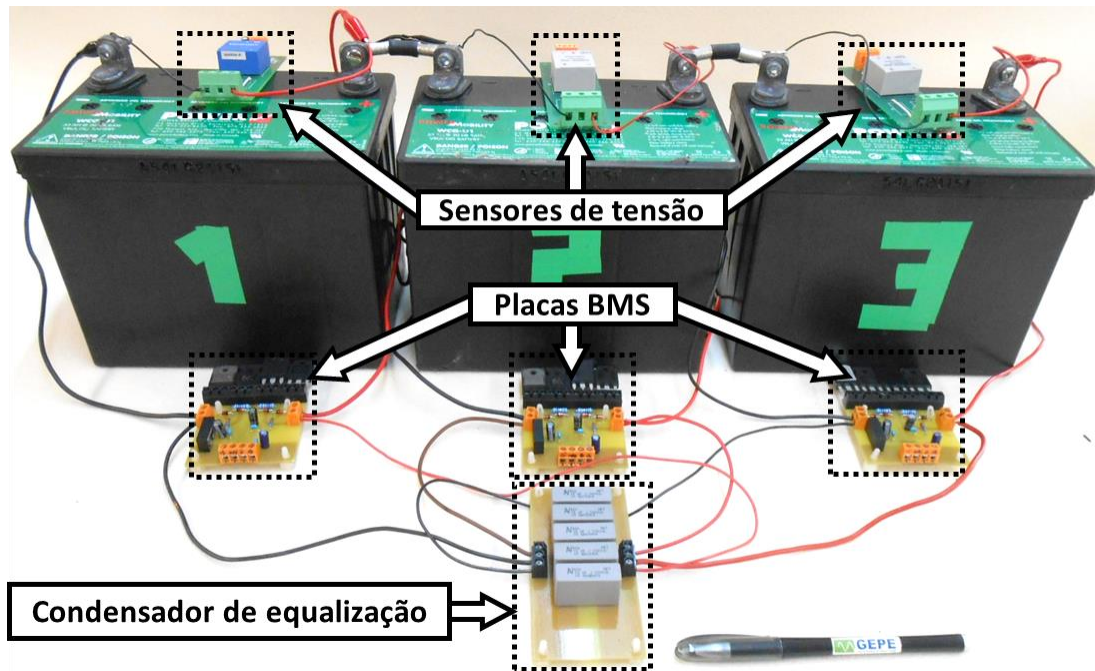


Figura 5.39 – Protótipo final do sistema BMS desenvolvido.

5.5. Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as várias etapas para a implementação do sistema BMS, mais propriamente as etapas para o projeto da topologia proposta *switch matrix with capacitor*. Numa primeira fase é descrito todo o hardware utilizado para o circuito de potência, de seguida é apresentado o sistema de controlo com os algoritmos necessários para a elaboração do software e controlo, por fim é apresentado o protótipo final do sistema BMS.

No circuito de potência, utiliza-se o *driver ADUM5230* pois satisfaz os requisitos necessários para este projeto e o facto de ter internamente uma fonte isolada, contribui para a sua escolha. Cada *driver ADUM5230* é integrado numa placa BMS. Cada placa BMS é destinada a uma única bateria, esta contém dois interruptores bidirecionais para fazer a ligação entre a bateria o elemento de equalização (condensador). Existem vários métodos para construir interruptores bidirecionais totalmente controlados a partir de MOSFETs do tipo N. Nesta dissertação são apresentadas duas soluções, uma primeira

que recorre a uma ponte de díodos e a um MOSFET do tipo N, e uma segunda solução que utiliza dois MOSFETs do tipo N em série com o terminal *source* comum. A segunda solução apresenta resultados mais satisfatórios, e por isso é a utilizada nesta implementação.

Para facilitar o teste de equalização de baterias para vários valores de capacidade, foi desenhada e montada uma placa para o condensador de equalização. Esta placa permite a adição até 8 condensadores em paralelo e permite obter valores de capacidade entre os 10 μF e os 80 μF .

No sistema de controlo é utilizada uma arquitetura centralizada que contém um único DSP responsável pela gestão de todo o sistema de controlo. O algoritmo de controlo foi projetado para três baterias. Este calcula a tensão média do banco de baterias e deteta se existem diferenças de tensão significativas entre baterias. Caso existam diferenças de tensão entre baterias, é iniciada a equalização das baterias. Como proteção de software é adicionado um *dead-time* entre as comutações dos semicondutores que evita que as baterias entrem em curto-circuito.

A adição de mais baterias a este sistema é simples, pois para isso basta adicionar mais uma placa BMS por cada nova bateria, e fazer ligeiras alterações na programação do algoritmo de controlo.

CAPÍTULO 6

Resultados Experimentais

6.1. Introdução

Após a conclusão da etapa do projeto e implementação do sistema de gestão de baterias, neste capítulo estão apresentados os principais resultados experimentais obtidos assim como as respectivas análises. Assim, neste capítulo são apresentados os resultados que permitem validar o princípio de funcionamento da topologia de BMS proposta, i.e., são apresentados ensaios com a equalização da tensão entre duas baterias de chumbo-ácido. Os resultados experimentais foram obtidos com recurso ao osciloscópio digital *Tektronix TPS 2024*.

6.2. Validação da Topologia BMS Proposta

O princípio de funcionamento do sistema de gestão de baterias implementado nesta dissertação consiste em transferir energia de uma determinada bateria com maior tensão para uma bateria com tensão menor. Para comprovar que a topologia de BMS proposta funciona, inicialmente foi efetuado um teste para equalização de duas baterias. O circuito utilizado para este primeiro teste é composto pela placa do condensador de equalização, por uma placa BMS e por duas baterias. Este circuito está apresentado na Figura 6.1, onde Bat_1 e Bat_2 representam as duas baterias, C corresponde ao condensador de equalização e S_1 e S_2 representam dois interruptores bidirecionais. Neste circuito apenas foi utilizada uma placa BMS pois apenas são necessários dois interruptores bidirecionais, i.e., visto que as baterias estão em paralelo com o condensador, a massa é comum e apenas é necessário isolar um dos terminais das baterias.

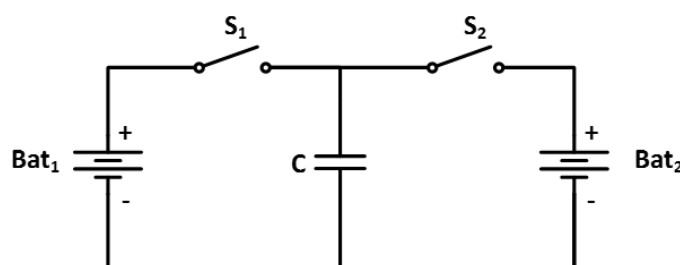


Figura 6.1 – Circuito para validar o conceito de equalização da topologia de BMS.

6.2.1. Análise das Tensões e correntes no Condensador, nos Interruptores e nas Baterias

No primeiro teste é utilizada uma bateria de 7,77 V para Bat_1 , uma bateria com uma tensão de 6,56 V no lugar de Bat_2 e um condensador de equalização de 10 μF . Os sinais de comando dos interruptores (S_1 e S_2) estão em oposição de fase com uma frequência de comutação (f_c) de 50 kHz e com um *duty-cycle* de 50%. Como a Bat_1 tem uma maior tensão que a Bat_2 , a Bat_1 irá carregar o condensador que por sua vez irá carregar a Bat_2 . Na Figura 6.2 estão apresentadas as tensões nos interruptores do circuito.

Quando S_1 está a *off*, a sua tensão corresponde à diferença de tensão entre Bat_1 e o condensador de equalização. Enquanto S_1 está a *off* essa diferença de tensão vai aumentando, pois parte da energia do condensador está a ser descarregada na Bat_2 .

Quando S_2 está a *off*, a sua tensão será igual à diferença de tensão entre o condensador de equalização e a Bat_2 . Também se verifica que enquanto este interruptor está a *off* a diferença de tensão vai aumentando pois o condensador está a ser carregado a partir da Bat_1 .

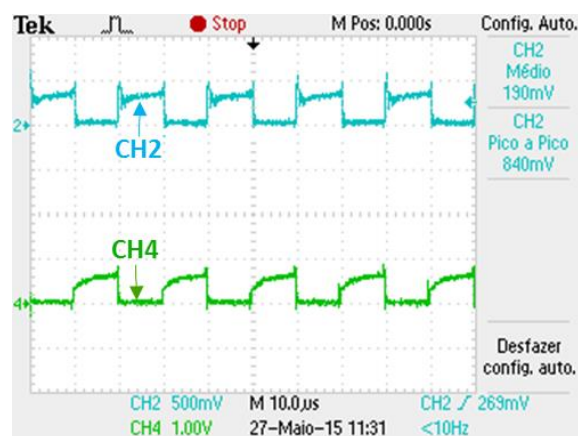


Figura 6.2 – Tensões nos interruptores bidirecionais S_1 (CH4) e S_2 (CH2) ($f_c = 50$ kHz).

De seguida, para garantir uma diferença de tensão maior entre baterias, é utilizada uma bateria de 12 V para Bat_1 , uma bateria com uma tensão de 8,5 V no lugar de Bat_2 e um condensador de equalização de 10 μF . Na Figura 6.3 está apresentada a tensão no condensador de equalização e a corrente na Bat_2 com uma frequência de comutação de 25 kHz. Quando o condensador de equalização está a receber energia não há corrente na Bat_2 e quando o condensador descarrega existe corrente na Bat_2 . Verifica-se que o condensador transfere energia para a bateria pois, a corrente circula do condensador para a Bat_2 .

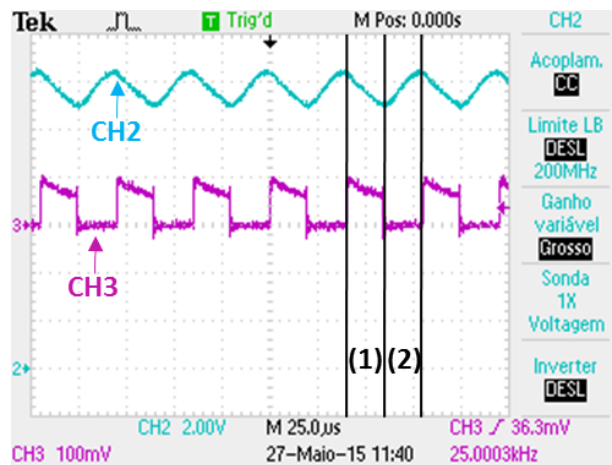


Figura 6.3 – Tensão no condensador de equalização (CH2) e corrente na Bat_2 (CH3): (1) Condensador fornece energia; (2) Condensador recebe energia ($f_c = 25$ kHz).

Posteriormente, aumentou-se a frequência de comutação para 50 kHz e foram registados os sinais das correntes nas duas baterias e a tensão no condensador de equalização. Analisando a Figura 6.4 é possível observar que quando a tensão do condensador aumenta existe corrente na Bat_1 e não existe corrente na Bat_2 , ou seja, significa que o condensador está a receber energia da Bat_1 . Quando a tensão do condensador está a diminuir não existe corrente na Bat_1 , mas observa-se corrente na Bat_2 , i.e., a Bat_2 está a receber energia proveniente do condensador de equalização. É possível observar também que com o aumento da frequência de comutação a variação de tensão no condensador de equalização diminui.

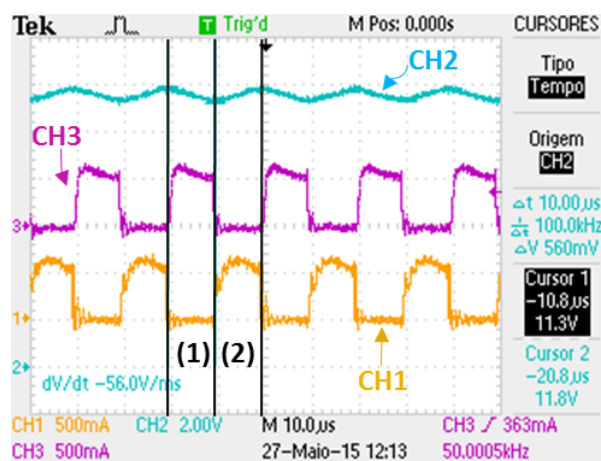


Figura 6.4 – Tensão no condensador de equalização (CH2), corrente na Bat_1 (CH1) e corrente na Bat_2 (CH3): (1) Condensador fornece energia; (2) Condensador recebe energia ($f_c = 50$ kHz).

Mantendo a mesma frequência de comutação, foram medidas as tensões no condensador e no interruptor S_2 e a corrente na Bat_2 . Estes sinais podem ser observados na Figura 6.5.

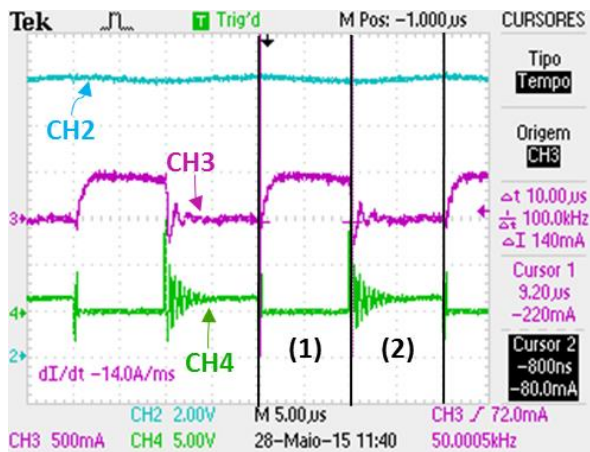


Figura 6.5 – Tensão no condensador de equalização (CH2), corrente na Bat_2 (CH3) e tensão em S_2 (CH4): (1) Condensador fornece energia; (2) Condensador recebe energia ($f_c = 50$ kHz).

Como ainda não tinha sido implementado um circuito *snubber* foram medidas as mesmas tensões e corrente com uma frequência de comutação mais baixa (10 kHz) e apresentadas na Figura 6.6. Analisando os resultados, verifica-se que quando o S_2 está a *off*, não existe corrente na Bat_2 e o condensador está a carregar e quando S_2 está a *on* o condensador descarrega e existe corrente na Bat_2 . Uma vez mais se comprova o princípio de funcionamento da topologia, i.e., o condensador carrega a partir da Bat_1 e descarrega para a Bat_2 . De notar que, novamente, ao diminuir a frequência de comutação a variação de tensão do condensador aumenta.

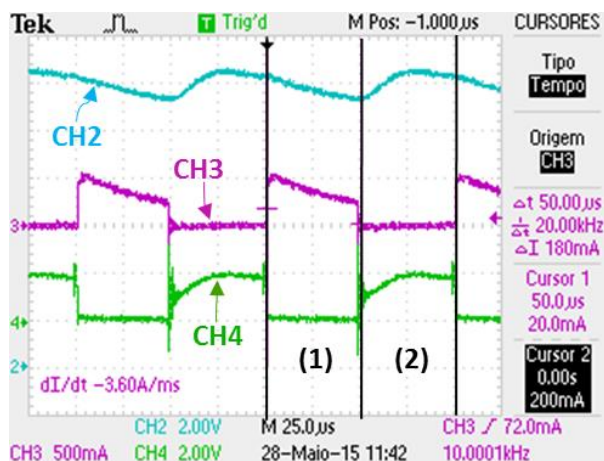


Figura 6.6 – Tensão no condensador de equalização (CH2), corrente na Bat_2 (CH3) e tensão em S_2 (CH4): (1) Condensador fornece energia; (2) Condensador recebe energia ($f_c = 10$ kHz).

6.2.2. Análise da Tensão e da Corrente no Condensador de Equalização

De seguida, com um condensador de equalização com $50 \mu\text{F}$, foram medidas as suas tensões e correntes com uma frequência de comutação de 25 kHz e apresentadas na Figura 6.7. Analisando esta figura é possível observar os instantes em que o condensador está a carregar ou a descarregar. Quando o sinal da corrente é positivo o condensador

carrega e esta corrente corresponde à corrente na Bat_1 , quando o sinal da corrente é negativo o condensador descarrega e esta corrente corresponde à corrente na Bat_2 .

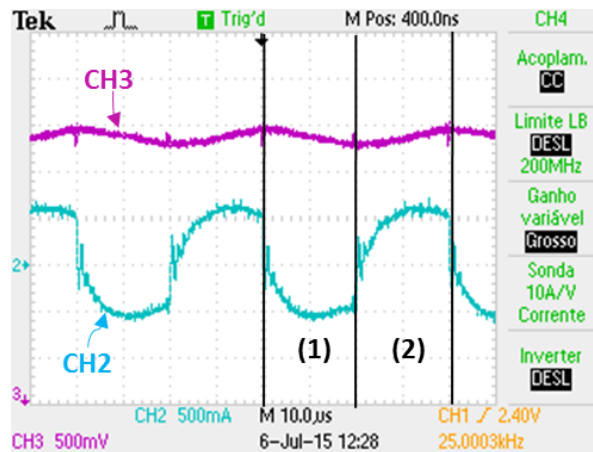


Figura 6.7 – Tensão (CH3) e corrente (CH2) no condensador de equalização: (1) Condensador fornece energia; (2) Condensador recebe energia ($f_c = 25$ kHz).

Para a mesma diferença de tensão entre as baterias, na Figura 6.8 é possível verificar que ao utilizar frequências de comutação diferentes (25 kHz e 50 kHz, com *duty-cycle* de 50%) a variação de tensão no condensador (ΔV_C) é diferente. Ao aumentar a frequência de comutação o ΔV_C diminui. Também é possível verificar a corrente nas duas baterias e que a sua soma corresponde à corrente no condensador de equalização, como concluído anteriormente.

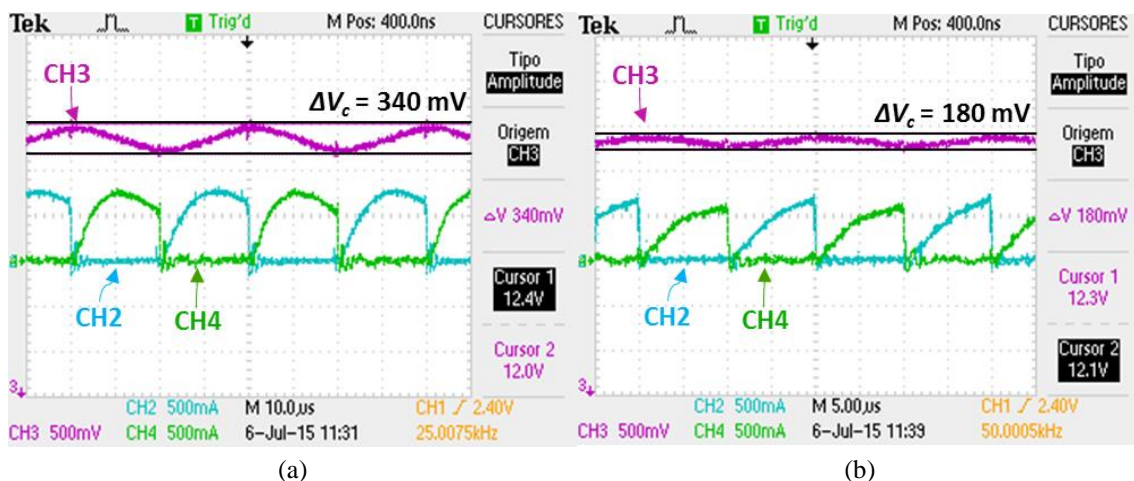


Figura 6.8 – Tensão (CH3) no condensador de equalização e corrente na Bat_1 (CH2) e na Bat_2 (CH4): (a) $f_c = 25$ kHz; (b) $f_c = 50$ kHz.

6.2.3. Análise da Tensão no Condensador de Equalização e nas Baterias

Com uma frequência de comutação de 25 kHz, *duty-cycle* de 50% e um condensador de 50 μ F, foram medidas com o osciloscópio as tensões (Figura 6.9) no condensador de equalização e nas baterias. As duas baterias têm uma diferença de tensão

de 500 mV, sendo que a Bat_1 tem 12,5 V e a Bat_2 tem 12 V. Verifica-se que o condensador tem um ΔV_C de 200 mV, e que a sua tensão encontra-se entre a tensão das duas baterias. Na simulação, para um caso ideal, o ΔV_C deveria ser igual à variação de tensão entre as duas baterias (500 mV) mas, na realidade isto não se verifica. Isto condiciona a equalização das duas baterias, i.e., as duas baterias não poderão ficar com a mesma tensão após o final da equalização. A resistência interna do MOSFET quando este está a *on* (R_{DSon}) é uma das principais causas deste comportamento. Ao aumentar a frequência de comutação, o valor de R_{DSon} do MOSFET aumenta também, tal como a resistência interna do condensador.

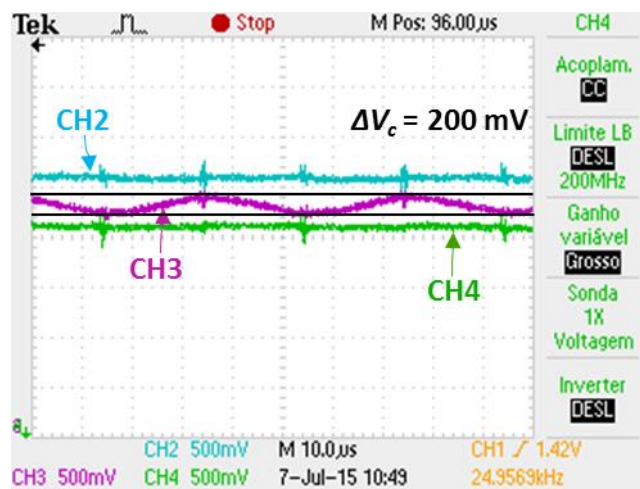


Figura 6.9 – Tensões no condensador de equalização (CH3), na Bat_1 (CH2) e na Bat_2 (CH4) ($f_c = 25$ kHz).

6.3. Equalização de Duas Baterias em Série

Neste teste pretende-se comprovar o funcionamento da topologia *switch matrix with capacitor* para duas baterias ligadas em série e um condensador de equalização e 50 μF . Cada bateria tem uma placa BMS individual que está ligada à placa do condensador de equalização e ao microcontrolador. O circuito da montagem está apresentado na Figura 6.10.

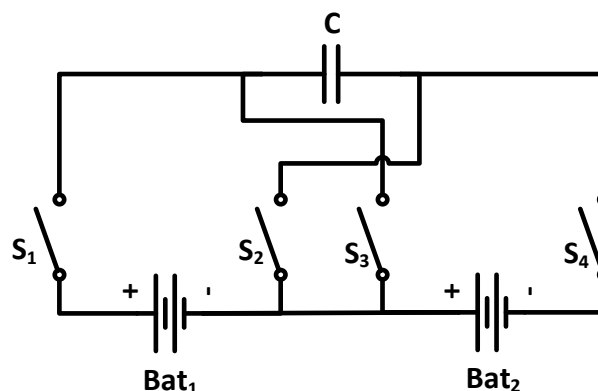


Figura 6.10 – Circuito para equalização de duas baterias ligadas em série.

6.3.1. Análise da Tensão no Interruptor Bidirecional

No capítulo das simulações está demonstrado que num banco com n baterias cada interruptor bidirecional deve ser capaz de suportar a tensão de $n-1$ baterias. Assim, num banco com duas baterias os interruptores têm de ser capazes de suportar uma tensão igual à tensão de uma bateria. Foram utilizadas duas baterias em série com tensões diferentes, em que as tensões da Bat_1 e da Bat_2 eram de 12,42 V e 11,74 V, respetivamente. Foi medida a tensão no interruptor superior (S_1) da Bat_1 e, como se pode observar na Figura 6.11, a tensão no interruptor bidirecional quando este está a *off* é igual à tensão da Bat_2 , ou seja, aproximadamente 11,8 V. Utilizou-se uma frequência de comutação de 10 kHz, para retirar um sinal com menos ruído, e um *duty-cycle* de 50%.

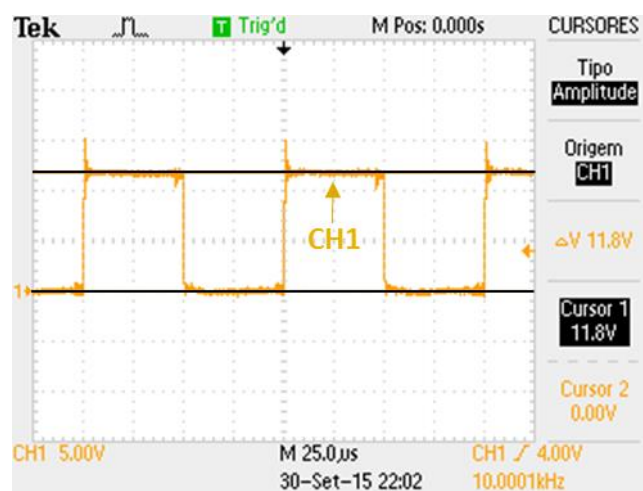


Figura 6.11 – Tensão no interruptor bidirecional S_1 (CH1) ($f_c = 10$ kHz).

De seguida são apresentados alguns testes com frequências de comutação de 25 kHz e 50 kHz que demonstram as tensões das duas baterias ao longo do processo de equalização. Devido às quedas de tensão nos interruptores bidirecionais e ao elevado tempo de equalização, foram utilizadas baterias com uma diferença de tensão de 1 V e medidas as suas tensões ao longo do tempo até que a diferença de tensão atingisse os 500 mV.

6.3.2. Equalização com uma Frequência de Comutação de 25 kHz

Neste primeiro teste de equalização foi utilizada uma frequência de comutação de 25 kHz e um *duty-cycle* de 50%. Os valores de tensão foram recolhidos de 10 em 10 minutos durante 10 horas e organizados no gráfico da Figura 6.12.

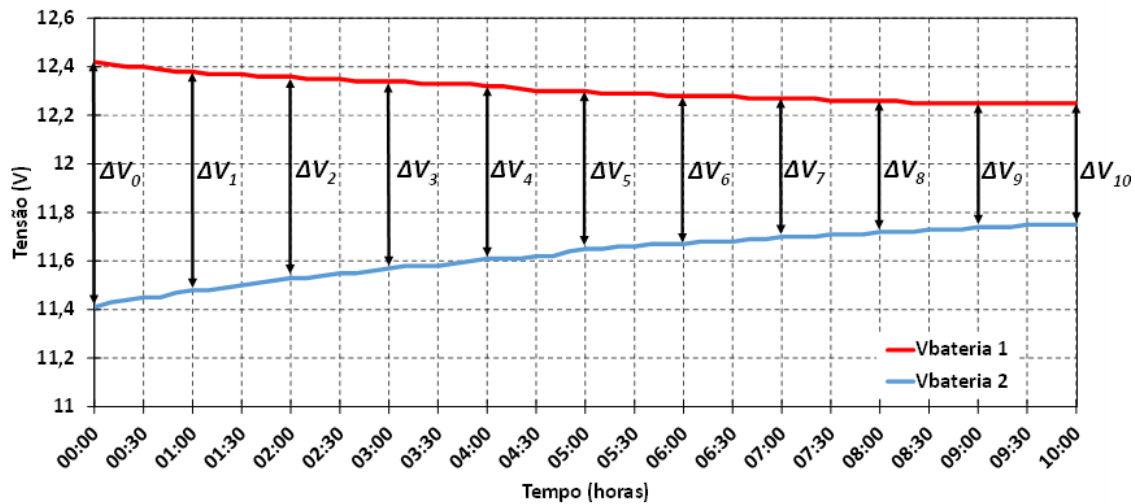


Figura 6.12 – Tensões das baterias durante 10 horas de equalização ($f_c = 25$ kHz).

Inicialmente as duas baterias em série tinham aproximadamente tensões de 12,42 V e 11,41 V o que corresponde a uma diferença de tensão de cerca de 1 V. Demorou aproximadamente 9 horas e 30 minutos para que essa diferença de tensão passasse para 500 mV.

O tempo de equalização é demorado para equalizar uma diferença de tensão de 500 mV. Para analisar o comportamento da equalização à medida que a diferença de tensão (ΔV_x) entre baterias vai diminuindo, os valores de ΔV_x entre baterias ao longo das 10 horas (um ΔV por cada hora de equalização) foram organizados no gráfico da Figura 6.13. Na Tabela 6.1 está apresentada a tensão equalizada entre as duas baterias ao longo das 10 horas.

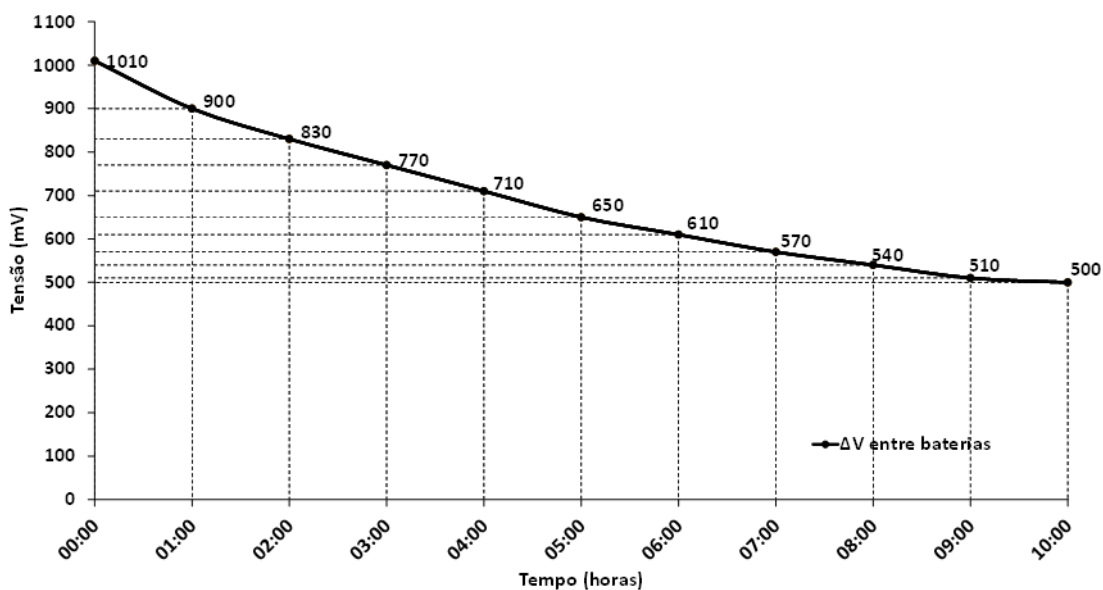


Figura 6.13 – Diferença de tensão entre baterias durante 10 horas de equalização.

Tabela 6.1 – Diferença de tensão equalizada entre baterias por hora (ao longo de 10 horas).

Intervalo de tempo (horas)	Tensão equalizada (mV)
00:00 – 01:00	110
01:00 – 02:00	70
02:00 – 03:00	60
03:00 – 04:00	60
04:00 – 05:00	60
05:00 – 06:00	40
06:00 – 07:00	40
07:00 – 08:00	30
08:00 – 09:00	30
09:00 – 10:00	10

Verifica-se que para uma maior diferença de tensão entre baterias, a equalização é mais rápida do que quando a diferença de tensão entre baterias é menor. Por outras palavras, à medida que a diferença de tensão entre baterias diminui, maior é o tempo de equalização.

6.3.3. Equalização com uma Frequência de Comutação de 50 kHz

Neste segundo teste de equalização foi utilizada uma frequência de comutação de 50 kHz e um *duty-cycle* de 50%. Inicialmente as duas baterias em série tinham aproximadamente tensões de 12,38 V e 11,36 V. Tal como no teste anterior, os valores de tensão nas baterias foram recolhidos de 10 em 10 minutos durante 10 horas e organizados no gráfico da Figura 6.14. No início da equalização as baterias tinham uma diferença de tensão de cerca de 1 V e demorou aproximadamente 7 horas e 10 minutos para que essa diferença de tensão passasse para 500 mV. Para a mesma diferença de tensão inicial entre baterias, a equalização com uma frequência de comutação de 50 kHz foi mais rápida do que com uma frequência de 25 kHz.

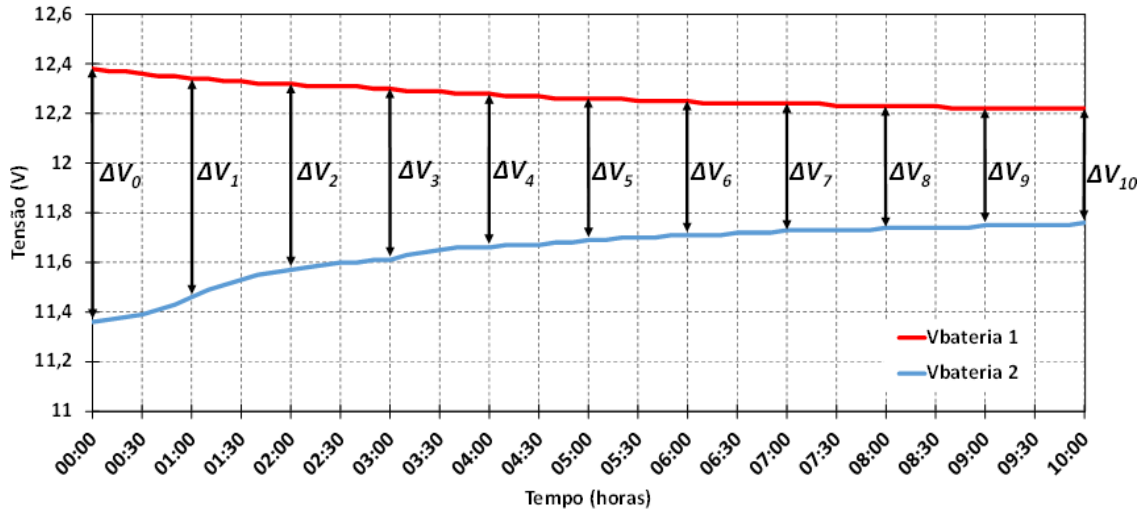


Figura 6.14 – Tensões das baterias durante 10 horas de equalização ($f_c = 50$ kHz).

Seguindo a lógica do teste anterior, para facilitar a análise do comportamento da equalização à medida que a diferença de tensão (ΔV_x) entre baterias diminui, foram registados para um novo gráfico (Figura 6.15) os valores de ΔV_x entre baterias ao longo das 10 horas (um ΔV por cada hora de equalização).

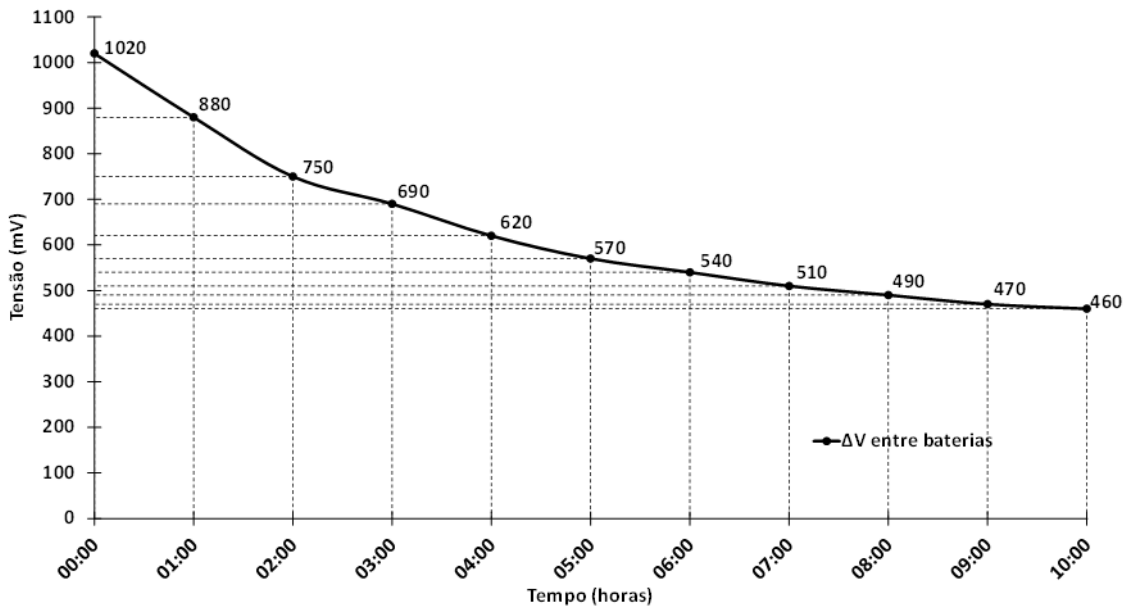


Figura 6.15 – Diferença de tensão entre baterias durante 10 horas de equalização.

Pela análise do gráfico da Figura 6.15 é possível observar a redução da diferença de tensão entre baterias ao longo das 10 horas. A redução da diferença de tensão entre baterias está listada na Tabela 6.2. Também para este caso se verifica que à medida que a diferença de tensão entre as baterias diminui, maior é o tempo de equalização.

Tabela 6.2 – Diferença de tensão equalizada entre baterias por hora (ao longo de 10 horas).

Intervalo de tempo (horas)	Tensão equalizada (mV)
00:00 – 01:00	140
01:00 – 02:00	130
02:00 – 03:00	60
03:00 – 04:00	70
04:00 – 05:00	50
05:00 – 06:00	30
06:00 – 07:00	30
07:00 – 08:00	20
08:00 – 09:00	20
09:00 – 10:00	10

6.3.4. Ciclo de Equalização Completo

A duração deste teste é de cerca de 24 horas onde foram medidas as tensões das duas baterias durante o processo de equalização. Após as primeiras 12 horas de teste houve um intervalo de cerca de 10 horas até o teste ser retomado novamente. Este teste foi dividido em duas partes por ser muito extenso e porque para testes com longas durações, como este, é comum haver uma paragem, tal como em [46], [48].

Utilizaram-se duas baterias com uma diferença de tensão de aproximadamente 1,51 V. Inicialmente a bateria com maior tensão tem 12,54 V e a bateria com menor tensão tem 11,03 V. Com uma frequência de comutação de 25 kHz e um *duty-cycle* de 50%, foi iniciado o teste e medidas as tensões das baterias de 10 em 10 minutos até ao final da sua duração (24 horas). O gráfico com as tensões das duas baterias durante o período de equalização está apresentado na Figura 6.16. No final das 24 horas a diferença de tensão entre as baterias passou de 1,51 V para 380 mV. Ao fim das primeiras 12 horas a diferença de tensão entre baterias é de 540 mV, sendo que a *Bat₁* tem 12,26 V e a *Bat₂* tem 11,72 V. Durante as 10 horas de descanso a tensão da bateria 1 um subiu para 12,34 V e a tensão da *Bat₂* desceu para 11,57 V (diferença de tensão de 770 mV entre baterias). Quando recomeçou o teste, nas 12 horas seguintes foram equalizados 390 mV, sendo que no final as baterias tinham 12,18 V e 11,8 V (diferença de tensão entre baterias de 380 mV).

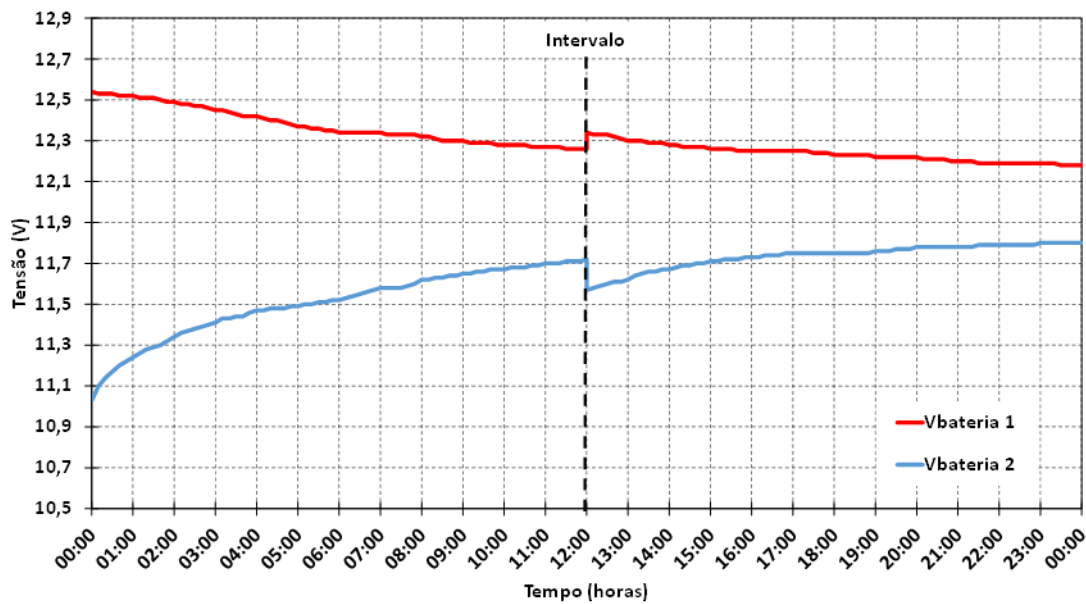


Figura 6.16 – Tensões das baterias durante 24 horas de equalização ($f_c = 25$ kHz).

Tal como nos testes anteriores, verificou-se que para o mesmo intervalo de tempo, quanto maior a diferença de tensão entre baterias, maior será a diferença de tensão equalizada. Isto confirma-se com a análise do gráfico da Figura 6.17 e da Tabela 6.3 onde está demonstrado que, a cada 1 hora de equalização, à medida que a diferença de tensão entre baterias diminui, menor será a tensão equalizada nas baterias. Por exemplo das 2 horas às 3 horas foram equalizados 110 mV, enquanto das 7 horas às 8 horas foram equalizados apenas 60 mV. De ressaltar que entre as 12 horas iniciais e as 12 horas finais houve um intervalo de 10 horas e que a diferença de tensão entre baterias aumentou cerca de 230 mV durante esse período em relação à diferença de tensão no final das 12 horas iniciais.

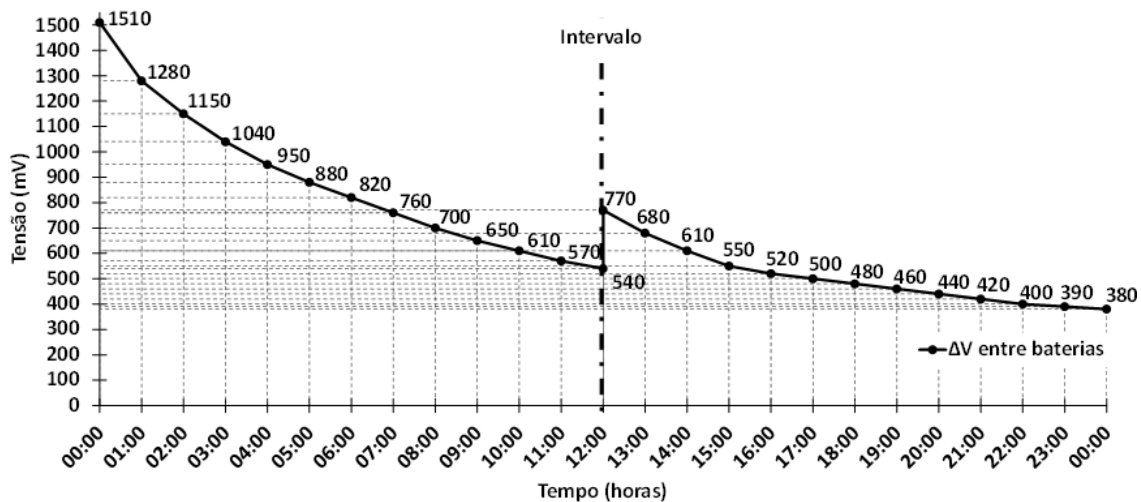


Figura 6.17 – Diferença de tensão entre baterias durante 24 horas de equalização com intervalo de 10 horas às 12 horas.

Tabela 6.3 – Diferença de tensão equalizada entre baterias por hora (ao longo de 24 horas).

Primeira parte (12 horas iniciais)		Segunda parte (12 horas finais)	
Intervalo de tempo (horas)	Tensão equalizada (mV)	Intervalo de tempo (horas)	Tensão equalizada (mV)
00:00 – 01:00	230	12:00 – 13:00	90
01:00 – 02:00	130	13:00 – 14:00	70
02:00 – 03:00	110	14:00 – 15:00	60
03:00 – 04:00	90	15:00 – 16:00	30
04:00 – 05:00	70	16:00 – 17:00	20
05:00 – 06:00	60	17:00 – 18:00	20
06:00 – 07:00	60	18:00 – 19:00	20
07:00 – 08:00	60	19:00 – 20:00	20
08:00 – 09:00	50	20:00 – 21:00	20
09:00 – 10:00	40	21:00 – 22:00	20
10:00 – 11:00	40	22:00 – 23:00	10
11:00 – 12:00	30	23:00 – 00:00	10

6.4. Conclusão

Este capítulo apresenta os resultados e testes experimentais considerados mais relevantes para comprovar e validar o funcionamento da topologia BMS proposta (*switch matrix with capacitor*).

Inicialmente são apresentados alguns testes com as tensões nos interruptores bidirecionais que mostram que estes são comutados alternadamente. Observa-se também que a resistência interna dos MOSFETs (que constituem os interruptores bidirecionais) influencia o comportamento do sistema durante a equalização. Por outras palavras, quanto maior a resistência dos MOSFETs maior será a queda de tensão nos interruptores e consequentemente menor será a variação de tensão no condensador.

Também é apresentada a tensão e corrente no condensador de equalização e nas baterias e comprova-se que o condensador está conectado a uma bateria de cada vez. Durante o período de equalização, a tensão máxima do condensador nunca é superior à tensão da bateria mais carregada (maior tensão) e a tensão mínima do condensador nunca é inferior à tensão da bateria com menor carga (menor tensão). Nos resultados experimentais, apesar da variação de tensão no condensador variar entre as tensões das duas baterias (como era de esperar), o seu valor máximo e mínimo de tensão difere dos resultados obtidos nas simulações. Esta situação deve-se ao facto de terem sido usados

componentes ideais (por exemplo, MOSFETs e condensadores) no modelo de simulação. Nos resultados experimentais verifica-se que a variação da tensão no condensador é menor do que a variação da tensão entre baterias, i.e., $\Delta V_C < \Delta V_{Bat}$.

São também apresentados três testes de equalização de duas baterias. Dois desses testes têm a duração de 10 horas, com frequências de comutação diferentes (25 kHz e 50 kHz). O outro teste de equalização tem a duração de 24 horas com uma frequência de comutação de 25 kHz, e equaliza uma diferença de tensão entre baterias de 1,51 V (valor inicial) para 380 mV (valor final). A operação com uma frequência de comutação de 50 kHz apresenta um tempo de equalização menor do que com uma frequência de comutação de 25 kHz, ao equalizarem diferenças de tensão iniciais iguais. Em ambos os testes é visível que à medida que a diferença de tensão entre as baterias diminui, maior é o tempo de equalização. Um dos fatores que influencia o tempo de equalização desta topologia é a diferença de tensão entre baterias.

Os resultados experimentais obtidos durante a equalização das baterias diferem dos resultados obtidos nas simulações computacionais, principalmente, porque foram considerados componentes ideais e porque não foi considerado o estado de carga das baterias que faz com que a resistência interna das baterias varie. É importante referir que não foi considerado o estado de carga das baterias porque a versão da ferramenta de simulação utilizada (*PSIM v9.0*) não é a mais adequada para modelar baterias. A título de exemplo, as ferramentas de simulação *PSPICE v9.1* e *MATLAB*, ou mesmo versões mais recentes do *PSIM* (*v9.3* ou *v10.0*), são mais adequadas para a modelação de baterias.

CAPÍTULO 7

Conclusões e Trabalho Futuro

7.1. Conclusões

Nesta dissertação está apresentado o procedimento necessário para o desenvolvimento e implementação de um sistema de gestão de baterias (*Battery Management System* - BMS) com balanceamento ativo.

Para cumprir os objetivos propostos para este projeto, é feito o estudo do estado da arte e um planeamento com a divisão de tarefas para as diferentes fases.

Em primeiro lugar é introduzido o conceito de BMS e o seu enquadramento em aplicações de mobilidade elétrica, mais propriamente a sua utilização em veículos elétricos (VEs).

O capítulo 2 apresenta o estado da arte sobre BMS, onde começa por explicar as principais características que constituem um sistema de gestão de baterias, dando alguns exemplos de BMS disponíveis no mercado e apresentando também alguns exemplos de baterias com estes sistemas de gestão já integrados, aplicáveis em VEs. Resumidamente, um BMS tem como principais funções a proteção das células da bateria, controlo do carregamento e descarregamento, determinação do estado de carga e estado de saúde, recolha do histórico, comunicação e principalmente a equalização da carga entre baterias. Isto com o objetivo de preservar a vida útil de cada bateria. No mercado, existe uma grande variedade de sistemas de gestão de baterias, desde módulos genéricos que podem ser adaptados a vários tipos de baterias, a módulos destinados a baterias específicas. Atualmente os BMS existentes focam a sua equalização no método passivo, porém o método ativo é uma área ainda em desenvolvimento.

No capítulo 3, ainda relativo ao estado da arte, são abordadas as principais arquiteturas BMS. Em sistemas com um número reduzido de baterias pode-se optar pela arquitetura centralizada, por ser mais simples de implementar. Porém, como a arquitetura distribuída tem como vantagem a sua flexibilidade, é a arquitetura aconselhada para sistemas que envolvam um grande número de baterias.

Existem várias topologias que fazem equalização passiva ou ativa entre baterias. As topologias passivas são mais simples de implementar do que as topologias ativas. As topologias ativas equalizam a capacidade entre baterias com o auxílio de um elemento de transferência de energia, que pode ser composto por elementos capacitivos (topologias baseadas em condensadores), elementos indutivos (baseadas em transformadores e indutâncias) e conversores dedicados que abrangem elementos capacitivos ou indutivos. As topologias que utilizam condensadores como elemento de transferência de energia são menos dispendiosas, requerem um sistema de controle simples de implementar e permitem uma equalização contínua de baterias, quando comparadas com outras topologias ativas.

O capítulo 4 apresenta as simulações computacionais de algumas topologias de equalização ativas. Para as mesmas condições iniciais, a topologia que apresentou a equalização com menor duração foi a *double-tiered switched capacitor*.

As topologias que utilizam apenas um condensador permitem a equalização entre baterias seja qual for a sua posição no banco de baterias, e são topologias facilmente adaptáveis à adição ou diminuição de baterias desse banco. No caso das topologias que utilizam mais do que um condensador, essa versatilidade já não existe, pois a adição de mais baterias requer a adição de mais condensadores e apenas permitem a equalização entre baterias adjacentes. Assim, caso haja desequilíbrio entre duas baterias que estejam em extremos opostos, quanto maior for o número de baterias do banco de baterias mais tempo demorará a equalização das mesmas (para topologias que requerem vários condensadores). No caso de topologias que têm apenas um condensador (*single switch capacitor* e *switch matrix with capacitor*), o tempo de equalização é o mesmo, quer as baterias desequilibradas estejam lado a lado ou em extremos opostos.

Após várias simulações da topologia *switch matrix with capacitor*, utilizando frequências de comutação diferentes e vários valores de capacidade para o condensador de equalização, verifica-se que esses parâmetros contribuem diretamente para o tempo de equalização. Com componentes ideais durante a simulação, conclui-se que quanto maior a frequência de comutação, menor será o tempo de duração da equalização. Ao utilizar frequências de comutação mais altas é possível utilizar um condensador com um valor de capacidade mais baixo e mesmo assim conseguir um tempo de equalização reduzido, pois quanto maior a capacidade do condensador, maior é o seu custo.

A diferença de tensão entre baterias também é um fator que influencia a duração da equalização entre baterias. Quanto maior a diferença de tensão entre baterias maior será a variação da tensão no condensador de equalização. Com o aumento da variação de

tensão no condensador maior será a corrente de equalização. Consequentemente, com a diminuição dessa variação de tensão, a corrente de equalização também diminui. A corrente de equalização depende não só da diferença de tensão entre baterias, mas também da resistência equivalente de todo o BMS (resistência interna do condensador, resistência dos interruptores bidirecionais e resistência interna da bateria). Assim, o processo de equalização é mais rápido ao início (com uma variação de tensão maior no condensador) e vai ficando mais lento à medida que a variação de tensão no condensador diminui.

No capítulo 5 descrevem-se os passos necessários para a implementação da topologia BMS *switch matrix with capacitor*. Todas as placas foram desenvolvidas de raiz, à exceção da placa para os sensores de tensão, que já tinha sido desenvolvida no GEPE. Cada placa BMS é aplicável a uma bateria e isto facilita a adição de mais baterias ao sistema. Esta contém um *driver ADUM5230*, dois interruptores bidirecionais, circuito de proteção de MOSFETs e foi desenhada de forma a respeitar o isolamento galvânico do *driver*, para fazer o correto isolamento entre a parte de controlo e do circuito de potência. Ao longo deste projeto foram testadas duas soluções para criar interruptores bidirecionais totalmente controlados a partir de MOSFETs do tipo N. O problema que levou a testar diferentes soluções, prende-se com o facto de tentar encontrar o interruptor bidirecional com a menor queda de tensão quando está a *on* (ligado). Tal como se verificou no capítulo das simulações, a resistência no interruptor influencia diretamente o tempo de equalização e a diferença de tensão entre baterias no final da equalização. Apesar da utilização de MOSFETs com uma resistência interna elevada, escolheu-se a solução que recorre a dois MOSFETs em série com terminal *source* comum, pois apresenta resultados mais satisfatórios de entre as soluções apresentadas.

Para o sistema de controlo utilizou-se uma arquitetura centralizada com um único DSP para fazer a gestão de todo o sistema. O algoritmo de equalização implementado permite equalizar baterias, independentemente da sua posição no banco de baterias. Apenas é necessário saber a tensão de cada bateria e conectar o condensador alternadamente à bateria com maior tensão e à bateria com menor tensão. Este algoritmo é de simples implementação e serve para validar a topologia BMS. Com a adição de sensores de temperatura e corrente, seria possível criar um algoritmo de controlo que melhorasse o desempenho da equalização.

No capítulo 6 estão apresentados os resultados experimentais para a validação prática da topologia implementada *switch matrix with capacitor*. Com a observação das tensões no condensador de equalização e nos interruptores bidirecionais verifica-se que há transferência de energia de uma bateria para o condensador e do condensador para

outra bateria. Os interruptores bidirecionais têm de ser capazes de suportar tensões superiores a $n-1$ baterias, para um banco de n baterias em série.

Foram realizados vários testes utilizando diferentes frequências de comutação (25 kHz e 50 kHz), que mostram a evolução das tensões nas duas baterias durante o período de equalização. Confirmaram-se os resultados óbitos nas simulações que demonstraram que (para a mesma diferença de tensão entre baterias inicial) ao aumentar a frequência de comutação dos interruptores bidirecionais, o tempo de equalização diminui. Ambos os testes demonstraram que a velocidade da equalização é influenciada pela diferença de tensão entre baterias. Por exemplo, no teste com duração de 24 horas a uma frequência de 25 kHz, quando a diferença de tensão entre baterias é de 1,15 V, passado uma hora são equalizados 110 mV, mas quando a diferença de tensão entre baterias é menor (550 mV), uma hora depois são equalizados apenas 30 mV. Em todos os testes de equalização de baterias é visível que a equalização é um processo demorado.

Uma das desvantagens de uma topologia ativa, que utiliza condensadores como elemento de transferência de energia, é o facto de não ser possível obter uma equalização em que as baterias acabem com o mesmo valor de tensão. Uma das fortes razões para essa desvantagem deve-se às resistências dos interruptores bidirecionais, condensador e baterias, que além de contribuírem para uma equalização mais demorada, não permitem obter uma equalização perfeita. Porém é possível minimizar a diferença de tensão entre baterias e a duração da equalização, focando um estudo mais aprofundado no tipo de condensador utilizado e escolher MOSFETs com uma resistência interna mais baixa (desde que respeitem as condições para o correto funcionamento da topologia).

7.2. Sugestões para Trabalho Futuro

Com os resultados obtidos nesta Dissertação, conclui-se que é possível equalizar baterias com a topologia *switch matrix with capacitor*. Porém ainda existem otimizações e novos testes para esta topologia. Como trabalho futuro propõe-se que seja efetuado um estudo mais aprofundado para reduzir o tempo de equalização e reduzir ao máximo possível a diferença de tensão entre baterias no final da equalização. Uma das soluções para este problema passa pela escolha de MOSFETs com uma resistência interna mais baixa, visto a placa BMS já estar preparada para testar vários modelos de MOSFETs. Após conseguida uma significativa redução no tempo de equalização, sugere-se também o teste de equalização entre três ou mais baterias, visto o sistema estar projetado para ser fácil a adição de mais baterias em série. Depois da otimização da resistência interna do circuito já é possível testar frequências de comutação mais altas.

A placa BMS também está preparada para ser integrada com outro tipo de elemento de transferência de energia, i.e., para além do teste com um condensador também é possível trocar esse condensador por um transformador ou por um conversor CC-CC, passando assim a utilizar a topologia *switch matrix with transformer* ou a topologia *switch matrix with DC/DC converter*.

Quanto ao sistema de controlo, aconselha-se a utilização de um DSP com melhor capacidade de processamento, a fim de ser possível guardar variáveis como tensão, correntes e temperatura para que o BMS além da equalização seja capaz de fazer uma monitorização de todo o processo. Na parte de software, é ainda possível melhorar o algoritmo de controlo para reduzir o tempo de equalização. Testar o comportamento das baterias e do condensador ajudará posteriormente na programação de um algoritmo mais robusto.

Depois de otimizada a topologia, também seria interessante, numa perspetiva de aplicação a um VE, integrar este BMS com um sistema de carregamento de baterias.

Referências

- [1] M. Daowd, N. Omar, P. van den Bossche, e J. van Mierlo, “A review of passive and active battery balancing based on MATLAB/Simulink”, *Int. Rev. Electr. Eng.*, vol. 6, n. 7, pp. 2974–2989, 2011, ISSN: 18276660.
- [2] M. Daowd, N. Omar, P. Van Den Bossche, e J. Van Mierlo, “Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation”, em *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2011, pp. 1–7. doi: 10.1109/VPPC.2011.6043010.
- [3] K. W. E. Cheng, B. P. Divakar, H. Wu, K. Ding, e H. F. Ho, “Battery-management system (BMS) and SOC development for electrical vehicles”, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, n. 1, pp. 76–88, 2011. doi: 10.1109/TVT.2010.2089647, ISSN: 00189545.
- [4] The Electropaedia, “Battery and Energy Technologies.” [Online]. Disponível em: <http://www.mpoweruk.com/index.htm>. [Acedido: 15-Jul-2015].
- [5] W. Puviwatnangkurn, B. Tanboonjit, e N. H. Fuengwarodsakul, “Overcurrent protection scheme of BMS for Li-Ion battery used in electric bicycles”, em *2013 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 2013, pp. 1–5. doi: 10.1109/ECTICon.2013.6559591.
- [6] M. Bingeman, P. D. Engineer, e B. Jeppesen, “Performance and Cost with Altera FPGAs”, n. January, pp. 1–16, 2015.
- [7] M. Brandl, H. Gall, M. Wenger, V. Lorentz, M. Giegerich, F. Baronti, G. Fantechi, L. Fanucci, R. Roncella, R. Saletti, S. Saponara, A. Thaler, M. Cifrain, e W. Prochazka, “Batteries and battery management systems for electric vehicles”, em *2012 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, 2012, pp. 971–976. doi: 10.1109/DATE.2012.6176637, ISSN: 15301591.
- [8] Jeong-Hyo Bae, Bai Zhiguo, Bong-Jun Koo, Hong-Ryoung Kim, e Dae-Gyeong Jang, “Battery management system by using CAN communication based on DSP platform”, em *2013 Fifth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, 2013, pp. 582–587. doi: 10.1109/ICUFN.2013.6614886.
- [9] N. Q. Kang Li, Yusheng Xue, Shumei Cui, *Intelligent Computing in Smart Grid and Electrical Vehicles*, vol. 463. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. doi: 10.1007/978-3-662-45286-8.
- [10] Analog Devices, “Datasheet do circuito integrado AD7280A.” [Online]. Disponível em: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7280A.pdf>. [Acedido: 12-Ago-2015].
- [11] Victron Energy, “Lynx ion.” [Online]. Disponível em: <http://www.victronenergy.pt/battery-monitors/lynx-ion-shunt-350-600>. [Acedido: 08-Ago-2015].
- [12] Victron Energy, “Battery balancer.” [Online]. Disponível em: <http://www.victronenergy.pt/battery-monitors/battery-balancer>. [Acedido: 08-Ago-2015].
- [13] Victron Energy, “Datasheet do Battery balancer.” [Online]. Disponível em: <http://www.victronenergy.pt/upload/documents/Datasheet-Battery-Balancer-EN.pdf>. [Acedido: 08-Ago-2015].

- [14] Victron Energy, “Battery Balancer app.” [Online]. Disponível em: http://www.victronenergy.com/live/battery_balancer_demo_webapp. [Acedido: 08-Ago-2015].
- [15] Victron Energy, “App Battery Balancer.” [Online]. Disponível em: <http://bb-demo.victronenergy.com/>. [Acedido: 08-Ago-2015].
- [16] REC, “REC BMS 7-R.” [Online]. Disponível em: 2015-08-10. doi: <http://www.rec-bms.com/BMS7R.html>.
- [17] REC, “REC Active BMS.” [Online]. Disponível em: <http://www.rec-bms.com/ABMS.html>. [Acedido: 10-Ago-2015].
- [18] Orion, “Orion BMS.” [Online]. Disponível em: <http://www.orionbms.com/products/orion-bms-standard/>. [Acedido: 10-Ago-2015].
- [19] Nuvation, “Datasheet da Nuvation BMS.” [Online]. Disponível em: http://nuvation.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2015/03/Nuvation_Motive_Battery_Management_System_2015_0311.pdf. [Acedido: 11-Ago-2015].
- [20] Nuvation, “Nuvation BMS.” [Online]. Disponível em: <http://www.nuvation.com/battery-management-system/bms-for-specialty-vehicles-marine-systems-mobile-robots>. [Acedido: 11-Ago-2015].
- [21] Nuvation, “Nuvation BMS aplicado a um VE.” [Online]. Disponível em: http://nuvation.wpengine.netdna-cdn.com/img/nuvation-bms-web/bms_mobile_configuration_1200.jpg. [Acedido: 11-Ago-2015].
- [22] GWL/Power, “BMS123 - Cell MODULE.” [Online]. Disponível em: <http://www.123electric.nl/>. [Acedido: 12-Ago-2015].
- [23] S. M. Lukic, R. C. Bansal, F. Rodriguez, e a. Emadi, “Energy Storage Systems for Automotive Applications”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, n. 6, pp. 2258–2267, 2008. doi: 10.1109/TIE.2008.918390, ISSN: 0278-0046.
- [24] J. Dixon, “Energy storage for electric vehicles”, em *2010 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2010, pp. 20–26. doi: 10.1109/ICIT.2010.5472647.
- [25] C. C. Chan, “The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles”, *Proc. IEEE*, vol. 95, n. 4, pp. 704–718, Abr. 2007. doi: 10.1109/JPROC.2007.892489, ISSN: 0018-9219.
- [26] K. Young, C. Wang, L. Y. Wang, e K. Strunz, *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*. 2013. doi: 10.1007/978-1-4614-0134-6.
- [27] D. D. Friel, “Management of Batteries for Electric Traction Vehicles”, em *Electric and Hybrid Vehicles*, 1.^a ed., Elsevier, 2010, pp. 493–515. doi: 10.1016/B978-0-444-53565-8.00019-1.
- [28] Saft, “Ion’Drive 630.” [Online]. Disponível em: <http://www.saftbatteries.com/battery-search/ion%E2%80%99drive%C2%AE-630-v-battery-system>. [Acedido: 13-Ago-2015].
- [29] Saft, “Datasheet do modulo de baterias NHE 10-100.” [Online]. Disponível em: <http://www.elteconline.com/download/pdf/SAFT-RIC-NI-MH-NHE-Module-Data-Sheet.pdf>. [Acedido: 13-Ago-2015].
- [30] Saft, “NHE 10-100.” [Online]. Disponível em: <http://aircraft.saftbatteries.com/tabid/314/Language/en->

- US/tabid/329/TypeControl/Produto/ProdutoId/24/Default.aspx. [Acedido: 13-Ago-2015].
- [31] GWL/ Power, “WN-model.” [Online]. Disponível em: <http://www.ev-power.eu/WINA-30Ah-100Ah/WINA-LiFePO4-Power-3-2V-100Ah-aluminium-case.html>. [Acedido: 15-Ago-2015].
- [32] GWL/ Power, “Datasheet da bateria WN100AH.” [Online]. Disponível em: http://files.ev-power.eu/inc/_doc/attach/StoItem/2900/GWL-WINA_WN100AH_Specifications.pdf. [Acedido: 15-Ago-2015].
- [33] Valence, “Site da Valence.” [Online]. Disponível em: <https://www.valence.com/>. [Acedido: 15-Ago-2015].
- [34] Valence, “Datasheet da bateria U27-12XP.” [Online]. Disponível em: http://www.cleanenergybrands.com/shoppingcart/product_docs/Battery/Valence/u_charge_xp_module_datasheet_aug_12_2.pdf. [Acedido: 15-Ago-2015].
- [35] Valence, “Datasheet do U-BMS-HV.” [Online]. Disponível em: <http://www.sunshineworks.com/downloads/valence-lithium-batteries/valence-u-charge-bms-datasheet-oct-2010.pdf>. [Acedido: 15-Ago-2015].
- [36] D. W. Gao, *Energy Storage for Sustainable Microgrid*. Elsevier, 2015.
- [37] Jon Munson, “How to structure a battery management system. Power supplement”, 2011. [Online]. Disponível em: http://www.nxtbook.com/nxtbooks/hearst/ep0811_power/#/16. [Acedido: 25-Jul-2015].
- [38] Jon Munson, “How to structure a battery management system”, 2011. [Online]. Disponível em: http://www.electronicproducts.com/Power_Products/Batteries_and_Fuel_Cells/How_to_structure_a_battery_management_system.aspx. [Acedido: 25-Jul-2015].
- [39] Drive For Innovation, “Volt Teardown: The battery pack.” [Online]. Disponível em: <http://www.driveforinnovation.com/volt-teardown-the-battery-pack/>. [Acedido: 20-Jul-2015].
- [40] W. F. Bentley, “Cell balancing considerations for lithium-ion battery systems”, em *The Twelfth Annual Battery Conference on Applications and Advances*, 1997, pp. 223–226. doi: 10.1109/BCAA.1997.574107, ISSN: 1089-8182.
- [41] D. V. Cadar, D. M. Petreus, e T. M. Patarau, “An energy converter method for battery cell balancing”, em *33rd International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2010*, 2010, pp. 290–293. doi: 10.1109/ISSE.2010.5547305.
- [42] S. W. Moore e P. J. Schneider, “A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems”, *SAE Tech. Pap. 2001-01-0959*, *SAE 2001 World Congr.*, n. 724, 2001. doi: 10.4271/2001-01-0959, ISSN: 1932-4529.
- [43] J. Cao, N. Schofield, e A. Emadi, “Battery balancing methods: A comprehensive review”, em *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2008, pp. 1–6. doi: 10.1109/VPPC.2008.4677669.
- [44] W. C. Lee, D. Drury, e P. Mellor, “Comparison of passive cell balancing and active cell balancing for automotive batteries”, em *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2011, pp. 1–7. doi: 10.1109/VPPC.2011.6043108, ISSN: Pending.

- [45] N. H. Kutkut e D. M. Divan, “Dynamic equalization techniques for series battery stacks”, em *Proceedings of Intelec '96 - International Telecommunications Energy Conference*, 1996, pp. 514–521. doi: 10.1109/INTLEC.1996.573384, ISSN: 0780335074.
- [46] M. Daowd, M. Antoine, N. Omar, P. Lataire, P. Van Den Bossche, e J. Van Mierlo, “Battery Management System—Balancing Modularization Based on a Single Switched Capacitor and Bi-Directional DC/DC Converter with the Auxiliary Battery”, *Energies*, vol. 7, n. 5, pp. 2897–2937, Abr. 2014. doi: 10.3390/en7052897, ISSN: 1996-1073.
- [47] J. Qi e D. Dah-Chuan Lu, “Review of battery cell balancing techniques”, em *2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 2014, n. October, pp. 1–6. doi: 10.1109/AUPEC.2014.6966514.
- [48] M. Daowd, M. Antoine, N. Omar, P. van den Bossche, e J. van Mierlo, “Single Switched Capacitor Battery Balancing System Enhancements”, *Energies*, vol. 6, n. 4, pp. 2149–2174, Abr. 2013. doi: 10.3390/en6042149, ISSN: 1996-1073.
- [49] A. Baughman e M. Ferdowsi, “Analysis of the Double-Tiered Three-Battery Switched Capacitor Battery Balancing System”, em *2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2006, pp. 1–6. doi: 10.1109/VPPC.2006.364284.
- [50] Z. G. Kong, C. B. Zhu, R. G. Lu, e S. K. Cheng, “Comparison and evaluation of charge equalization technique for series connected batteries”, *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, 2006. doi: 10.1109/PESC.2006.1711751, ISSN: 02759306.
- [51] M. Einhorn, F. V. Conte, C. Kral, e J. Fleig, “Comparison, Selection, and Parameterization of Electrical Battery Models for Automotive Applications”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, n. 3, pp. 1429–1437, Mar. 2013. doi: 10.1109/TPEL.2012.2210564, ISSN: 0885-8993.
- [52] R. Mizanur, S. Khan, e A. Rahm, “A Modularized Battery Charge Equalizer in the Application of Electric Vehicle”, n. November, pp. 1–5, 2014. doi: 10.1109/ICSIMA.2014.7047422.
- [53] C. Speltino, a. Stefanopoulou, e G. Fiengo, “Cell equalization in battery stacks through State Of Charge estimation polling”, *Am. Control Conf. (ACC), 2010*, pp. 5050–5055, 2010, ISSN: 0743-1619.
- [54] Hong-Sun Park, Chol-Ho Kim, Ki-Bum Park, Gun-Woo Moon, e Joong-Hui Lee, “Design of a Charge Equalizer Based on Battery Modularization”, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, n. 7, pp. 3216–3223, Set. 2009. doi: 10.1109/TVT.2009.2015331, ISSN: 0018-9545.
- [55] Power Mobility, “Datasheet da bateria WCG-U1.” [Online]. Disponível em: <http://www.powbat.co.uk>.
- [56] Analog Devices, “Datasheet do driver ADUM5230.” [Online]. Disponível em: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ADuM5230.pdf>. [Acedido: 07-Abr-2015].
- [57] IXYS, “Datasheet do MOSFET IXFQ50N50P3.” [Online]. Disponível em: [http://ixapps.ixys.com/Datasheet/DS100461B\(IXFH-FT-FQ50N50P3\).pdf](http://ixapps.ixys.com/Datasheet/DS100461B(IXFH-FT-FQ50N50P3).pdf). [Acedido: 19-Abr-2015].
- [58] Comchip, “Datasheet da ponte retificadora KBL406.” [Online]. Disponível em: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/comchip/KBL404.pdf>. [Acedido: 11-Jun-2015].

- [59] Texas Instruments, “Datasheet C2000 LaunchPad.” [Online]. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/sprs523j/sprs523j.pdf>. [Acedido: 13-Jun-2015].
- [60] Texas Instruments, “Datasheet do integrado 74LS07.” [Online]. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74ls17.pdf>. [Acedido: 12-Jul-2015].
- [61] ON Semiconductor, “Datasheet do integrado 74HCT04.” [Online]. Disponível em: http://media.digikey.com/pdf/Data_Sheets/ON_Semiconductor_PDFs/74HCT04.pdf. [Acedido: 12-Jul-2015].
- [62] Analog Devices, “Datasheet do circuito integrado ADUM3223.” [Online]. Disponível em: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuM3223_4223.pdf. [Acedido: 19-Jun-2015].
- [63] ChenYang, “Datasheet do sensor de tensão de efeito Hall CYHVS025A.” [Online]. Disponível em: <http://www.hallsensors.de/CYHVS025A.pdf>. [Acedido: 03-Jun-2015].