







Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Bruno Joel Ribeiro da Silva

Desenvolvimento de um Posto de  
Carregamento Lento com BMS e Interface  
com o Cockpit para o CEPIUM

Tese de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de  
Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e de Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor João Luiz Afonso

outubro de 2013

## DECLARAÇÃO

Bruno Joel Ribeiro da Silva

Endereço eletrónico: A55703@uminho.pt Telefone:916289615

Número do Bilhete de Identidade: 13778559

Título da Tese:

### **Desenvolvimento de um Posto de Carregamento Lento com BMS e Interface com o Cockpit para o CEPIUM**

Orientador:

Doutor João Luiz Afonso

Ano de conclusão: 2013

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 DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

**Assinatura:** \_\_\_\_\_

*À Minha Família.*



## Agradecimentos

Em primeiro quero agradecer ao Doutor João Luiz Afonso pela sua disponibilidade, incentivo, encorajamento e orientação durante a realização deste trabalho de dissertação. Gostaria também de agradecer a oportunidade de poder frequentar o Laboratório do Grupo de Eletrónica de Potência e Energia, para execução prática deste trabalho.

Desde já quero manifestar o meu profundo agradecimento ao meu supervisor Vítor Monteiro, por todo apoio e ajuda prestada durante a implementação prática deste projeto.

Gostaria de agradecer a todos os investigadores e bolseiros do GEPE, e em especial ao Raul Almeida, Rui Araújo e Rui Moreira.

A todos os colegas e amigos que realizaram a dissertação de mestrado no Grupo de Eletrónica de Potência e Energia, e em especial ao Bruno Duarte, Hugo Peixoto e Simão Almeida pelo ambiente proporcionado, pelo companheirismo e ajuda na revisão deste documento.

Um muito obrigado a todos os professores que contribuíram para o meu processo de aprendizagem e permitiram a execução desta dissertação.

Aos funcionários das oficinas do DEI, Joel Almeida, Ângela Macedo e Carlos Torres por todo auxílio dispensado.

Agradecer a todos os meus colegas e amigos pelo convívio e acompanhamento ao longo destes anos.

Finalmente, à minha família, particularmente aos meus pais, João Teixeira da Silva e Rosa de Sousa Machado Ribeiro, e aos meus irmãos João Vítor Ribeiro da Silva e Gonçalo Daniel Ribeiro da Silva pelo seu esforço e apoio incondicional que permitiu o concretizar deste projeto.



# Resumo

Atualmente, os veículos elétricos têm vindo a ganhar notoriedade dentro do ramo da indústria automóvel. Assim, existe um interesse crescente na substituição dos veículos com motor de combustão interna por veículos elétricos, devido às vantagens inerentes aos mesmos. No entanto, o desenvolvimento do veículo elétrico exige novas infraestruturas e soluções ao nível do carregamento, bem como novas soluções para o armazenamento de energia.

O recurso às baterias para o armazenamento de energia nos veículos elétricos tem sido a solução mais adotada, assim, nesta dissertação descreve-se a implementação de um sistema de gestão e monitorização de baterias. Este sistema visa proteger as baterias contra abusos durante o seu funcionamento (não permite que os seus valores máximos e mínimos sejam excedidos), aumentando assim o seu tempo de vida útil, mas tentando sempre obter o melhor desempenho possível das baterias. Além disso, este sistema também informa o utilizador do veículo elétrico sobre diversos parâmetros do sistema de baterias, necessários para uma condução agradável e desprovida de ansiedade da autonomia, provocada pela falta de conhecimento do estado de carga das mesmas.

Nesta dissertação, numa fase inicial apresenta-se o estado de arte sobre as tecnologias de baterias. De seguida, descreve-se a estrutura e constituição de um sistema de gestão de baterias. Posteriormente, realizam-se várias simulações para validar a topologia de equalização. Por último, implementa-se e testa-se o sistema de gestão de baterias proposto.

**Palavras-Chave:** Baterias, Sistema de Gestão de Baterias, Equalização, Estado de Carga das Baterias, Estado de Saúde das Baterias, Condensadores, CAN.



# Abstract

Currently, electric vehicles have been gaining notoriety within the field of car industry. Thus, there is a growing interest in the replacement of vehicles with internal combustion engine for electric vehicles, due to the inherent advantages of these. However, the development of the electric vehicle requires new infrastructures and solutions in what concerns loading, as well as new solutions for energy storage.

The use of batteries for energy storage is the main solution adopted for electric vehicles. Thus, this work describes the implementation of a battery management system. This system aims to protect the batteries from abuse during operation (not allowing their maximum and minimum values to be exceeded), thereby increasing their lifetime, but always trying to get the maximum performance from the batteries. In addition, this system also informs the user of the electric vehicle about various parameters of the battery system required for a pleasant driving, and devoid of range anxiety, caused by the unawareness of the battery status.

This work, initially presents the state of the art on battery technologies. Afterwards, describes the structure and constitution of a battery management system. Thereafter, several simulations are carried out to validate the topology of equalization. Finally, it presents the implementation and testing of the battery management system.

**Keywords:** Battery, Battery Management System (BMS), Equalization, State-of-Charge (SoC), State-of-Health (SoH), Capacitors, CAN.



# Índice

<b>CAPÍTULO 1 Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. O Interesse do BMS nos Veículos Elétricos .....	1
1.2. Enquadramento .....	2
1.3. Motivações e Contribuições .....	3
1.4. Objetivos .....	3
1.5. Organização da Dissertação .....	4
<b>CAPÍTULO 2 Sistemas de Armazenamento de Energia e Tecnologias de Baterias .....</b>	<b>7</b>
2.1. Introdução .....	7
2.2. Sistema de Armazenamento de Energia .....	7
2.2.1. Ultracondensadores .....	8
2.2.2. Células de Combustível .....	9
2.2.3. Volante de Inércia .....	10
2.3. Requisitos das Baterias para Veículos Elétricos .....	12
2.3.1. Características Elétricas das Baterias .....	13
2.3.2. Custo das Baterias .....	13
2.3.3. Vida Útil da Bateria .....	14
2.3.4. Número de Ciclos .....	14
2.3.5. <i>Calendar Life</i> .....	15
2.3.6. Controlo da Temperatura .....	15
2.3.7. Segurança .....	16
2.3.8. Reciclagem e Meio-Ambiente .....	17
2.4. Baterias .....	18
2.4.1. Operação de Descarga da Bateria .....	19
2.4.2. Operação de Carga da Bateria .....	20
2.4.3. Diferentes Tipos de Baterias .....	21
2.4.3.1. Baterias Níquel-Zinco (NiZn) .....	23
2.4.3.2. Bateria Sódio-Cloreto de Níquel (Na-NiCl <sub>2</sub> ) .....	23
2.4.3.3. Baterias Níquel-Cádmio (NiCd) .....	24
2.4.3.4. Bateria de Níquel-Hidreto-Metálico (NiMH) .....	25
2.4.3.5. Baterias de Chumbo-Ácido .....	30
2.4.3.6. Baterias de Iões de Lítio .....	32
2.4.3.7. Comparação de Baterias .....	35
2.5. Comparação dos Sistemas de Armazenamento de Energia .....	37
2.6. Algoritmos de Carregamento para Baterias .....	38
2.6.1. Algoritmo de Corrente Constante .....	38
2.6.2. Algoritmo de Tensão Constante .....	39
2.6.3. Algoritmo Corrente Constante Seguido de Tensão Constante .....	39
2.6.4. Algoritmo de Pulsos de Corrente Positiva .....	40
2.6.5. Algoritmo de Pulsos de Corrente Positiva e Negativa .....	41
2.7. Conclusão .....	41
<b>CAPÍTULO 3 Sistema de Gestão das Baterias e Postos de Carregamento .....</b>	<b>43</b>
3.1. Introdução .....	43
3.2. Sistema de Gestão de Baterias .....	43
3.2.1. Técnicas para Medição da Corrente, Tensão e Temperatura .....	45
3.2.2. Métodos de Balanceamento .....	46
3.2.3. Determinação do Estado de Carga das Baterias .....	55
3.2.4. Determinação do Estado de Saúde das Baterias .....	58
3.2.5. Exemplos de BMS no mercado .....	60
3.3. Postos de Carregamento .....	62
3.3.1. Estações de Permuta de Baterias .....	63
3.3.2. Carregamento com Conexão Indutiva .....	65
3.3.3. Carregamento com Conexão Condutiva .....	68
3.3.3.1. Modo 1 .....	70
3.3.3.2. Modo 3 .....	70

---

3.3.3.3.	Modo 2.....	72
3.3.3.4.	Modo 4.....	73
3.3.4.	Exemplos de Postos de Carregamento .....	75
3.4.	Conclusão.....	77
<b>CAPÍTULO 4 Simulações do Sistema de Equalização do BMS.....</b>		<b>79</b>
4.1.	Introdução .....	79
4.2.	Modelo de Simulação da Bateria.....	79
4.3.	Balanceamento Passivo.....	80
4.4.	Balanceamento Ativo .....	82
4.5.	Conclusão.....	98
<b>CAPÍTULO 5 Implementação do BMS e da Interface com o Cockpit.....</b>		<b>101</b>
5.1.	Introdução .....	101
5.2.	Circuito de Potência .....	101
5.2.1.	Placa de Balanceamento .....	102
5.2.2.	Banco de Baterias .....	104
5.2.3.	Condensador .....	104
5.3.	Circuito de Controlo.....	105
5.3.1.	Sensor de Tensão .....	105
5.3.2.	Sensor de Corrente.....	107
5.3.3.	Sensor de Temperatura .....	108
5.3.4.	<i>Drivers</i> para os Mostefs .....	109
5.3.5.	Microcontrolador .....	111
5.3.6.	Proteções.....	112
5.3.7.	Memória EEPROM.....	115
5.3.8.	Comunicação CAN.....	117
5.4.	Sistema final.....	122
5.5.	Controlo do Sistema de BMS.....	123
5.6.	Conclusão.....	126
<b>CAPÍTULO 6 Realização de Ensaios e Obtenção de Resultados Experimentais .....</b>		<b>129</b>
6.1.	Introdução .....	129
6.2.	Comunicação entre DSP e EEPROM por I <sup>2</sup> C .....	129
6.3.	Teste do Sistema de Comunicação CAN.....	131
6.4.	Teste de Descarga e Carga às Baterias.....	134
6.5.	Equalização Passiva .....	136
6.6.	Equalização Ativa .....	138
6.7.	Conclusão.....	142
<b>CAPÍTULO 7 Conclusão.....</b>		<b>145</b>
7.1.	Conclusões .....	145
7.2.	Sugestões de Trabalho Futuro .....	148

# Lista de Figuras

Figura 2.1 – Configuração de uma célula de combustível a hidrogénio (adaptado de [1]).....	10
Figura 2.2 - Volante de inercia desenvolvido pela <i>Socomec</i> [12]: (a) Constituição; (b) Invólucro do volante de inércia .....	12
Figura 2.3 - Efeitos da temperatura na energia específica dos sistemas de baterias a uma taxa de descarga de 0,5C (retirado de [15]).....	16
Figura 2.4 - Constituição de uma célula da bateria (adaptado de [15]).....	19
Figura 2.5 - Operação eletroquímica da célula durante a descarga (adaptado de [15]). .....	20
Figura 2.6 – Operação eletroquímica da célula durante a carga (adaptado de [15]). .....	20
Figura 2.7 - Formas de onda do método de carregamento de variação negativa da tensão: (a) Forma de onda da tensão; (b) Forma de onda da corrente.....	28
Figura 2.8 – Comparação entre as diversas tecnologias de baterias e o ultracondensador em relação a potência específica e a energia específica (retirado de [13]).....	36
Figura 2.9 – Características dos vários sistemas de armazenamento de energia (retirado de [4]). .....	37
Figura 2.10 – Formas de onda na bateria quando carregada com o algoritmo de corrente constante: (a) Corrente aplicada na bateria; (b) Tensão nos terminais da bateria. ....	38
Figura 2.11 - Formas de onda na bateria quando carregada com o algoritmo de tensão constante: (a) Tensão aplicada na bateria; (b) Corrente na bateria durante o carregamento. ....	39
Figura 2.12 – Forma de onda da tensão e da corrente na bateria durante o carregamento com o algoritmo corrente constante seguido de tensão constante.....	40
Figura 2.13 – Forma de onda da corrente no algoritmo de carregamento de pulsos de corrente positivos.....	40
Figura 2.14 - Forma de onda da corrente no algoritmo de carregamento de pulsos de corrente positiva e negativa. ....	41
Figura 3.1 - <i>Layout</i> de um BMS típico para EVs (adaptado de [41]). .....	46
Figura 3.2 - Circuito de balanceamento passivo. ....	48
Figura 3.3 - Topologias de equalização baseadas em condensadores.....	49
Figura 3.4 – Circuito de balanceamento da topologia condensadores comutados. ....	49
Figura 3.5 – Circuito de balanceamento da topologia comutação de um único condensador com $n+5$ dispositivos de comutação. ....	51
Figura 3.6 – – Circuito de balanceamento da topologia comutação de um único condensador com $2n$ dispositivos de comutação .....	51
Figura 3.7 – Circuito de equalização da topologia condensadores comutados de dupla camada.....	52
Figura 3.8 - – Circuito de equalização da topologia de condensadores comutados. ....	52
Figura 3.9 – Circuito de balanceamento do transformador comutado. ....	53
Figura 3.10 – Circuito de balanceamento do transformador compartilhado. ....	54
Figura 3.11 – Circuito de balanceamento com múltiplos transformadores.....	55
Figura 3.12 – Esquemático do circuito de Balanceamento do Conversor <i>Step-Up</i> .....	55
Figura 3.13 – Sistemas de BMS da <i>Ewert Energy Systems</i> , e da <i>Nuvation</i> , respetivamente (retirado de [64], [66]).....	61

Figura 3.14 - Circuito integrado para monitorização e gestão de baterias AD7280 [66].	62
Figura 3.15 - Possível modelo da estação de permuta de baterias (retirado de [71]).	64
Figura 3.16 – Veículos elétricos com sistema de permuta de baterias integrado [72]: (a) <i>Renault Zoe</i> ; (b) <i>Renault Fluence</i> .	64
Figura 3.17 - Estação de permuta de baterias da <i>Better Place</i> (retirado de [70]).	65
Figura 3.18 – Funcionamento do conceito de eletrificação da estrada (retirado de [75]).	66
Figura 3.19 – <i>Paddle</i> e porta de inserção da <i>paddle</i> no EV (retirado de [76]).	67
Figura 3.20 - Modo de acoplamento do tipo de proximidade (retirado de [77]).	68
Figura 3.21 – Nomenclatura do EVSE (adaptado de [79]).	69
Figura 3.22 – Tomadas utilizadas no Modo 1: (a) Tomada industrial <i>IEC 60309</i> monofásica; (b) Tomada doméstica monofásica <i>shüco</i> (retirado de [78]).	70
Figura 3.23- Tomada e ficha do tipo 1 (retirado de [80]).	71
Figura 3.24 - Tomada e ficha do tipo 2 (retirado de [78], [80]).	72
Figura 3.25 - Tomada e ficha do Tipo 3 (retirado de [81]).	72
Figura 3.26 – Caixa de Comando para ligação do EV em Modo 2 (retirado de [78]).	73
Figura 3.27 – Tomada e Ficha utilizada no Modo 4 (retirado de [78]).	73
Figura 3.28 - Conector J1772 combo para carregamento no Modo 4 (retirado de [76]).	74
Figura 4.1- Modelo da bateria utilizado para simulação em PSIM.	80
Figura 4.2 – Interface do PSIM e esquemático do circuito de balanceamento resistivo.	81
Figura 4.3 – Formas de onda das tensões nas baterias com balanceamento passivo.	81
Figura 4.4 – Formas de onda das correntes nas resistências de dissipação.	82
Figura 4.5 - Esquemático da topologia comutação de um único condensador em <i>PSIM</i> .	83
Figura 4.6 - MOSFETs ligados em série, com sentido de condução opostos.	84
Figura 4.7 – Formas de onda das tensões nas baterias durante balanceamento com a topologia comutação de um único condensador.	84
Figura 4.8 – Forma de onda da corrente no condensador de balanceamento na topologia comutação de um único condensador.	85
Figura 4.9 - Forma de onda da tensão no condensador de balanceamento na topologia comutação de um único condensador.	85
Figura 4.10 - Forma de onda da tensão no condensador de balanceamento na topologia comutação de um único condensador.	85
Figura 4.11 - Forma de onda da corrente no condensador de balanceamento na topologia comutação de um único condensador.	86
Figura 4.12 - Forma de onda das tensões no interruptor <i>S2</i> e <i>S5</i> durante 4 ciclos na topologia comutação de um único condensador.	86
Figura 4.13 - Formas de onda das tensões nas baterias durante balanceamento com a topologia comutação de um único condensador.	87
Figura 4.14 - Formas de onda das tensões nas baterias durante balanceamento com a topologia comutação de um único condensador.	87
Figura 4.15 - Esquemático da topologia condensadores comutados em <i>PSIM</i> .	87
Figura 4.16 - Ilustração do sentido das correntes nesta topologia.	88

Figura 4.17 - Ilustração dos semicondutores de potência em condução consoante os sinais de gate aplicados a estes.....	89
Figura 4.18 – Forma de onda das tensões nas baterias durante o balanceamento com a topologia condensadores comutados.....	90
Figura 4.19 - Forma de onda das correntes nos condensadores de balanceamento na topologia condensadores comutados.....	90
Figura 4.20 - Forma de onda das tensões nos condensadores de balanceamento na topologia condensadores comutados.....	91
Figura 4.21 - Forma de onda das correntes na <i>Bat1</i> e <i>Bat3</i> durante o balanceamento com a topologia condensadores comutados.....	91
Figura 4.22 - Forma de onda das correntes na <i>Bat2</i> durante o balanceamento com a topologia condensadores comutados.....	92
Figura 4.23 - Corrente nos condensadores de balanceamento ao pormenor (durante 4 ciclos). ....	92
Figura 4.24 - Corrente em <i>Bat1</i> e <i>Bat3</i> ao pormenor (durante 4 ciclos). ....	92
Figura 4.25 - Corrente em <i>Bat2</i> ao pormenor (durante 4 ciclos). ....	93
Figura 4.26 – Tensão nos semicondutores de potência (MOSFETs), durante 4 ciclos. ....	93
Figura 4.27 – Forma de onda das tensões nas baterias durante o balanceamento com a topologia condensadores comutados com uma resistência interna de $0,1\Omega$ . ....	93
Figura 4.28 - Forma de onda das tensões nas baterias durante o balanceamento com a topologia condensadores comutados.....	95
Figura 4.29- Forma de onda das tensões nos condensadores de equalização durante o balanceamento com a topologia condensadores comutados. ....	95
Figura 4.30 - Forma de onda das tensões nas baterias durante o balanceamento com a topologia condensadores comutados.....	95
Figura 4.31 - Esquemático da topologia dupla cascata de condensadores comutados em <i>PSIM</i> . ....	96
Figura 4.32 – Forma de onda das tensões nas baterias durante o balanceamento com a topologia dupla cascata de condensadores comutados.....	97
Figura 4.33 – Forma de onda das correntes na <i>Bat1</i> e na <i>Bat3</i> durante o balanceamento topologia dupla cascata de condensadores comutados.....	97
Figura 4.34 - Forma de onda das correntes na <i>Bat2</i> o balanceamento topologia dupla cascata de condensadores comutados.....	98
Figura 4.35 - Forma de onda das tensões nas baterias durante o balanceamento com a topologia dupla cascata de condensadores comutados.....	98
Figura 4.36 - Forma de onda das tensões nas baterias durante o balanceamento com a topologia dupla cascata de condensadores comutados.....	98
Figura 5.1 – Circuito de potência com todos os seus componentes. ....	102
Figura 5.2 – Esquema de ligação dos MOSFETs por cada bateria: (a) com um MOSFET tipo P (M1) e um MOSFET tipo N; (b) ambos os MOSFETs tipo N.....	103
Figura 5.3 - Montagem em <i>veroboard</i> da primeira versão da placa de balanceamento: (a) Vista frontal; (b) Vista da retaguarda. ....	103
Figura 5.4 – Bateria de 12 V e 33 Ah, modelo <i>Power Mobility WCG-U1</i> . ....	104
Figura 5.5 – Condensadores de equalização. ....	105
Figura 5.6- Circuito para mediação da tensão em cada bateria. ....	106

Figura 5.7 - Circuito de teste do funcionamento do IL300. ....	107
Figura 5.8 – Esquema de ligação do sensor de Hall ACS712 ao banco de baterias. ....	107
Figura 5.9 – Tensão de saída do sensor ACS712 em função da corrente de entrada [88]. ....	108
Figura 5.10 – Circuito de condicionamento do sensor LM35. ....	109
Figura 5.11 - Montagem em <i>breadboard</i> do circuito de teste do sensor de temperatura <i>Lm35</i> . ....	109
Figura 5.12 - Diagrama de blocos funcional do <i>ADuM7234</i> [90]. ....	110
Figura 5.13 – Montagem em <i>breadboard</i> da primeira versão do circuito de teste para os <i>drivers</i> dos MOSFETs. ....	111
Figura 5.14 – Primeira versão do circuito de interface entre microcontrolador e <i>gate</i> do <i>MOSFET</i> . ....	111
Figura 5.15 – Placa de desenvolvimento <i>C2000™</i> [91]. ....	112
Figura 5.16 – Proteção dos sinais de <i>gate</i> dos MOSFETs. ....	113
Figura 5.17 - Montagem em <i>breadboard</i> do circuito de proteção dos sinais de <i>gate</i> dos MOSFETs. ....	114
Figura 5.18 – Circuito de condicionamento do sinal de corrente (não se encontra implementado). ....	114
Figura 5.19 - Circuito de condicionamento do sinal de tensão. ....	115
Figura 5.20 - Montagem em <i>breadboard</i> do circuito de teste para proteção das baterias contra sobretensão e subtensão. ....	115
Figura 5.21 - Sistema de proteções para as baterias e para o banco de baterias projetado. ....	113
Figura 5.22 – Esquema de ligação entra a memória <i>24AA025E48e</i> e o DSP. ....	116
Figura 5.23 – Composição da trama de comunicação por $I^2C$ entra a memória e o DSP. ....	117
Figura 5.24- Níveis de tensão no barramento CAN para bits dominantes e recessivos. ....	118
Figura 5.25 – Esquema de uma rede CAN com vários módulos. ....	118
Figura 5.26 – Estrutura e número de bits de uma trama de dados ( <i>data frames</i> ) no protocolo de comunicação CAN. ....	119
Figura 5.27 – Campo de arbitragem e campo de dados numa trama de dados e numa trama remota: (a) Trama standard; (b) Trama estendida. ....	120
Figura 5.28 – Circuito de teste para comunicação CAN, com o <i>transceiver</i> e o USB-2-X. ....	121
Figura 5.29 – Placa de circuito impresso inclui o circuito de balanceamento e a primeira versão do circuito de controlo. ....	122
Figura 5.30 – Sistema final do BMS. ....	123
Figura 5.31 - Fluxograma do controlo: (a) Programa principal; (b) Rotina de interrupção do ADC. ....	125
Figura 6.1 – Operação de escrita na memória EEPROM: a onda a amarelo representa o sinal de dados (CH1: 2 V/div), e a onda a azul representa o sinal de relógio (CH2: 2 V/div). ....	130
Figura 6.2 - Operação de leitura na memória EEPROM (primeira fase): a onda a amarelo representa o sinal de dados (CH1: 2 V/div), e a onda a azul representa o sinal de relógio (CH2: 2 V/div). ....	130
Figura 6.3 - Operação de leitura na memória EEPROM (segunda fase): a onda a amarelo representa o sinal de dados (CH1: 2 V/div), e a onda a azul representa o sinal de relógio (CH2: 2 V/div). ....	131
Figura 6.4 – Valor enviado e valor recebido pelo <i>USB-2-X</i> via comunicação CAN. ....	132
Figura 6.5 – Inicializações realizadas para o banco de baterias e para as baterias para testar o funcionamento da comunicação CAN. ....	132

Figura 6.6 - Valor enviado e valor recebido pelo <i>USB-2-X</i> via comunicação CAN. ....	133
Figura 6.7 – Valor enviado e valor recebido pelo <i>USB-2-X</i> via comunicação CAN. ....	134
Figura 6.8 – Teste de descarga da bateria com carga constante. ....	135
Figura 6.9 – Teste de carga da bateria com algoritmo corrente constante seguido de tensão constante. ....	135
Figura 6.10 - Teste de descarga da bateria com corrente constante. ....	136
Figura 6.11 - Circuito de balanceamento passivo: (a) resistência em paralelo com MOSFET inferior; (b) resistência em paralelo com MOSFET superior. ....	137
Figura 6.12 - Tensão nas baterias durante o processo de balanceamento passivo. ....	137
Figura 6.13 – Sinais de comando dos MOSFETs tipo P e tipo N (CH1 e CH2: 5 V/div). ....	138
Figura 6.14 - Sinais de comando dos MOSFETs (CH1 e CH2: 5 V/div), corrente (CH4: 10 mA/div) e tensão no condensador (CH3: 5 V/div). ....	139
Figura 6.15 – Tensão na bateria 1 (CH1: 5 V/div) e na bateria 2 (CH2: 5 V/div), e corrente (CH3: 5 V/div) e tensão (CH4: 10 mA/div) no condensador. ....	139
Figura 6.16 - Sinais de comando dos MOSFETs (CH1 e CH2: 5 V/div). ....	140
Figura 6.17 – Tensão na bateria 1 (CH1: 2 V/div) e na bateria 2 (CH1: 2 V/div), e corrente no condensador (CH4: 200 mA/div). ....	140
Figura 6.18 - Tensão (CH1: 2 V/div) e corrente (CH4: 200 mA/div) na bateria 1. ....	141
Figura 6.19 - Tensão (CH2: 2 V/div) e corrente (CH4: 200 mA/div) na bateria 2. ....	141
Figura 6.20 - Tensão nas baterias durante o processo de balanceamento ativo, com uma frequência de 80 kHz e um condensador de 66 $\mu$ F (polipropileno). ....	142



# Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Ultracondensadores desenvolvidos para aplicações em EVs [8]: (a) Um ultracondensador; (b) Um módulo de ultracondensadores.....	9
Tabela 2.2 - Configurações técnicas e elétricas do volante de inércia da Figura 2.2. ....	12
Tabela 2.3 - Características Elétricas requeridas pelos diferentes tipos de EVs (retirado de [13])......	13
Tabela 2.4 - Características e imagem de uma célula NiZn produzida pela <i>PKCELL</i> [18]. ....	23
Tabela 2.5 - Bateria ZEBRA produzida pela <i>MES-DEA</i> , modelo <i>Z5-278-ML3X-64</i> [20]. ....	24
Tabela 2.6 - Características e imagem de uma bateria NiCd produzida pela <i>YUASA</i> [23]. ....	25
Tabela 2.7 – Sistema de Baterias do <i>Toyota Prius</i> (2006) e as características do módulo de 2ª geração [13]. ....	26
Tabela 2.8 – Bateria de NiMH produzida pela <i>Saft</i> , modelo <i>NHP 10-340</i> e suas características [24]. ....	27
Tabela 2.9– Bateria de Chumbo-Ácido fluida do tipo SLI, produzida pela <i>VARTA</i> , modelo <i>Blue Dynamic D47</i> [26]. ....	31
Tabela 2.10 – Bateria de íões de Lítio produzida pela <i>GS Yuasa</i> , modelo <i>LEV50-4</i> [30]. ....	34
Tabela 2.11 – Célula de íões de Lítio produzida pela <i>AESC</i> [33]. ....	34
Tabela 2.12 - Célula de íões de Lítio produzida pela <i>MYD</i> [34]. ....	34
Tabela 2.13- Comparação entre as diversas tecnologias de baterias (retirado de [6]). ....	36
Tabela 3.1 – Relação entre os modos de carregamento tipos de carregamento [13], [69], [78], [82]. ....	74
Tabela 3.2 – Posto de Carregamento desenvolvido pela <i>Siemens</i> , modelo <i>Charge CP300D</i> [83]. ....	75
Tabela 3.3 - Posto de Carregamento desenvolvido pela <i>Siemens</i> , modelo <i>Charge CP500A</i> [83]. ....	75
Tabela 3.4 – Posto de carregamento desenvolvido pela <i>Efacec</i> , modelo <i>Homecharger</i> [84]. ....	76
Tabela 3.5 - Posto de carregamento desenvolvido pela <i>Efacec</i> , modelo <i>QC50</i> [84]. ....	77
Tabela 4.1 – Simulações com diferentes condensadores a diferentes frequências. ....	94



# Lista de Acrónimos

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
AESC	<i>Automotive Energy Supply Corporation</i>
AGM	<i>Absorbed Glass Mat</i>
ANN	<i>Artificial Neural Network</i>
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
CA	Corrente Alternada
CAN	Controller Area Network
CC	Corrente Contínua
CD	<i>Collision Detection</i>
CEPIUM	Carro Elétrico <i>Plug-In</i> da Universidade do Minho
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Code</i>
CSMA	<i>Carrier Sense Multiple Access</i>
DLC	<i>Data Length Code</i>
DoD	<i>Depth of Discharge</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read Only Memory</i>
EOF	<i>End of Frame</i>
ESR	<i>Equivalent Series Resistance</i>
ESS	<i>Energy Storage System</i>
EV	<i>Electric Vehicle</i>
EVSE	<i>Electric Vehicle Supply Equipment</i>
FC	<i>Fuel Cell</i>
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle</i>
I <sup>2</sup> C	<i>Inter Integrated Circuit</i>

IC	<i>Integrated Circuit</i>
ICE	<i>Internal Combustion Engine</i>
IDE	<i>Identifier Extension</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
KF	<i>Kalman Filter</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
NDA	<i>Non-Destructive Arbitration</i>
NiCd	<i>Nickel Cadmiun</i>
NiMH	<i>Nickel Metal Hydride</i>
OCV	<i>Open Circuit Voltage</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PHEV	<i>Plug-In Hybrid Eletric Vehicle</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RTR	<i>Remote Transmission Request</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SCI	<i>Serial Communications Interface</i>
SCL	<i>Serial Clock Line</i>
SDA	<i>Serial Data Line</i>
SLI	<i>Starting, Llighting and Ignition</i>
SMD	<i>Surface Mounting Device</i>
SoC	<i>State of Charge</i>
SOF	<i>Start of Frame</i>
SoH	<i>State of Health</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SRR	<i>Subistitute Remote Request</i>
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>

UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
USABC	<i>United States Advanced Battery Consortium</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
V2G	<i>Vehicle to Grid</i>
VRLA	<i>Valve Regulated Lead Acid</i>
ZEBRA	<i>Zero Emissions Batteries Research Activity</i>
ZOH	<i>Zero-Order Hold</i>



# CAPÍTULO 1

## Introdução

### 1.1. O Interesse do BMS nos Veículos Elétricos

As baterias, mesmo que construídas com a mesma tecnologia, têm sempre pequenas variações nas suas características, resultantes normalmente de pequenas variações no seu processo de fabrico. Com a associação em série de baterias, como acontece nos sistemas de armazenamento dos veículos elétricos, estas variações podem dar origem a problemas, que influenciam negativamente o rendimento das mesmas podendo levar ao fim de vida útil precoce de algumas baterias. Este fator é ainda mais grave quando existe uma distribuição desequilibrada da temperatura no banco de baterias. Para resolver este problema, nos veículos elétricos, implementa-se um sistema de gestão e monitorização de baterias (*Battery Management System - BMS*).

Em alguns tipos de baterias é necessário controlar rigorosamente as suas condições de funcionamento, por razões de segurança. Pois, caso os seus valores nominais sejam excedidos, durante o seu funcionamento, estas podem-se danificar. Mas, podem ainda ocorrer danos mais graves, como a possível destruição dos sistemas elétricos conectados ao veículo, ou até mesmo, colocar em perigo a segurança dos próprios utilizadores.

Em todo o tipo de veículos, seja este elétrico ou não, é necessário informar o condutor sobre diversos parâmetros, como por exemplo a sua autonomia. No caso dos veículos elétricos também é preciso indicar o estado de carga das baterias. Sendo o sistema de gestão e monitorização de baterias também responsável por esta tarefa.

Devido à importância das baterias para os veículos elétricos, quer seja no seu desempenho ou até mesmo no seu preço, e devido aos problemas associados a estas, o uso de um sistema de gestão e monitorização de baterias num veículo elétrico é fundamental.

## 1.2. Enquadramento

A utilização de veículos que operam com motor de combustão interna, dependentes do uso de petróleo e seus derivados, foi dos avanços tecnológicos mais importantes do século passado. Este tipo de veículos permitiu a melhoria das condições de vida do ser humano e têm sido indispensáveis para a sua mobilidade no dia-a-dia. Contudo, este tipo de veículos tem consequências negativas para o meio ambiente. Entre as consequências mais nefastas, destacam-se a poluição atmosférica e o aquecimento global, ambas devidas às emissões de gases.

Os problemas ambientais conjugados com o facto de o petróleo ser um recurso finito, o aumento drástico do seu preço nos últimos anos e com o facto do consumo desta substância estar a aumentar, tem levado à substituição do uso de automóveis com motor de combustão interna, por automóveis com motores elétricos, para a mobilidade dos cidadãos no dia-a-dia. Com isso, diminui-se não só a dependência dos combustíveis fósseis, como também a emissão de gases.

Nos veículos elétricos a energia é armazenada em baterias, mais concretamente, é utilizado um conjunto de baterias em série e/ou paralelo para atingir os níveis de tensão e capacidade pretendidos. O foco desta dissertação é o desenvolvimento de um sistema de gestão e monitorização de baterias (*Battery Management System - BMS*) com interface com o cockpit para o CEPIUM (Carro Elétrico *Plug-In* da Universidade do Minho), onde o GEPE (Grupo de Eletrónica de Potência e Energia da Universidade do Minho) é uma das entidades responsáveis pelo seu desenvolvimento.

Um BMS é um sistema de gestão e monitorização de baterias, utilizado para a gestão energética das mesmas, com o intuito de se obter o melhor rendimento possível e maximizar o seu tempo útil de vida. Mas, o BMS é considerado uma entidade separada do carregador, ou seja, é uma entidade com hardware e software próprios que está conectada a um carregador de baterias.

A integração dos veículos elétricos na sociedade como meio de transporte exige novas infraestruturas e soluções ao nível do carregamento. Nesta dissertação apresentam-se, igualmente, várias soluções para o carregamento de veículos com propulsão elétrica a partir da rede elétrica. O carregamento do veículo elétrico pode ser efetuado de três formas/modos diferentes: através da permuta de baterias, carregamento com conexão condutiva ou carregamento com conexão indutiva. Quanto ao modo de permuta de baterias este é efetuado numa estação dedicada para o efeito. O seu funcionamento pode ser comparado a uma estação de lavagem automática, onde o condutor chega com o seu veículo, e de uma forma totalmente automática são

substituídas as baterias descarregadas por outras totalmente carregadas. No carregamento com conexão indutiva a energia para o carregamento é transferida por indução, sem conexão direta. Já no carregamento com conexão condutiva, existe uma conexão direta entre o posto de carregamento e o veículo, através de um cabo elétrico. As normas Europeias/Portuguesas definem 4 modos de carregamento com conexão condutiva: Modo 1, Modo 2, Modo 3 e Modo 4.

### **1.3. Motivações e Contribuições**

O setor dos transportes é um dos principais responsáveis pela poluição atmosférica e pelo aquecimento global, devido essencialmente, ao uso de motores de combustão interna. No entanto, o motor de combustão interna tem ainda outros problemas associados, tais como, o facto de o petróleo ser um recurso finito e o seu preço aumentou drasticamente nos últimos anos. A utilização de veículos de propulsão elétrica minimiza estes problemas. Com isso, diminui-se não só, a dependência dos combustíveis fósseis como também a emissão de gases, pois este tipo de veículo é mais eficiente. A principal motivação desta dissertação é a apresentação de diversas soluções que ajudem a integração/penetração do veículo elétrico no mercado automóvel, ajudando assim a resolver os problemas anteriormente mencionados.

A motivação pessoal prende-se com o gosto pela área da Eletrónica de Potência, e em particular pelos veículos elétricos, pela importância destes para a sociedade como referido anteriormente e pela complexidade do problema (que necessita do conhecimento em diversas áreas para a sua resolução). Acresce ainda o facto deste projeto de dissertação englobar uma componente de estudo teórico e uma componente de implementação prática para a sua realização.

Além de já existirem soluções comerciais de sistemas de gestão de bateria, também já há circuitos integrados que realizam uma tarefa específica do BMS. Mas, estas soluções comerciais destinam-se essencialmente para células de Lítio e normalmente realizam balanceamento passivo. Nesta dissertação, pretende-se desenvolver um sistema de gestão de baterias para baterias de Chumbo-Ácido que realize balanceamento ativo.

### **1.4. Objetivos**

Esta dissertação tem como objetivos apresentar diversas soluções para o sistema de armazenamento de energia, para o sistema de gestão de baterias, e para os postos de

carregamento dos veículos elétricos. Sendo o foco do trabalho o sistema de gestão de baterias. Inicialmente estava previsto a implementação de um posto de carregamento, para interface entre o sistema de carregamento e a rede elétrica. No entanto, os objetivos iniciais eram muito abrangentes, e como o foco principal era o BMS, em relação ao posto de carregamento apenas foi realizado a pesquisa sobre o seu estado de arte. O primeiro objetivo deste projeto é a pesquisa sobre o estado de arte, que inclui o estudo sobre o estado atual dos sistemas de armazenamento de energia, com ênfase na tecnologia de baterias e seus métodos de carregamento. Para além disso, engloba também o estudo sobre as diversas tarefas que devem ser executadas pelo sistema de gestão de baterias e de que forma podem ser implementadas. Por último este objetivo inclui o estudo sobre as diversas formas de carregamento do veículo elétrico a partir da rede elétrica. O segundo objetivo é a simulação do modelo do BMS a implementar através do recurso a uma ferramenta computacional, neste caso o *PSIM*. O terceiro é a implementação do sistema de gestão de baterias onde este deve desempenhar todos os requisitos fundamentais para a aplicação a que se destina, e implementação do sistema de interface com o cockpit. Por último a realização de ensaios ao BMS e posterior implementação do BMS no CEPIUM (Carro Elétrico *Plug-In* Universidade do Minho).

## **1.5. Organização da Dissertação**

Esta dissertação encontra-se dividida em sete capítulos. De seguida será feita uma breve descrição do conteúdo dos mesmos.

No capítulo 1 identifica-se e enquadra-se o problema que se pretende mitigar nesta dissertação. São também apresentados os objetivos pretendidos neste trabalho, bem como as motivações do autor.

No capítulo 2 apresentam-se os sistemas de armazenamento de energia possíveis de utilizar em veículos elétricos, com ênfase nas tecnologias de baterias. Em relação a estas referem-se os principais requisitos das baterias, bem como as principais tecnologias para aplicações em mobilidade elétrica.

No capítulo 3 explicam-se as funcionalidades que um sistema destes deve incorporar. De seguida, indicam-se como essas funções podem ser implementadas, nomeadamente em relação ao sistema de balanceamento, cálculo do estado de carga e estado de saúde. Por último, apresentam-se os diferentes métodos utilizados para carregar os veículos elétricos.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos em *PSIM* relativamente ao sistema de equalização passivo e ativo.

No capítulo 5 descrevem-se as características do hardware utilizado para a implementação do circuito de controlo e do circuito de potência. Também é mencionada a função dos diversos constituintes de cada circuito.

No capítulo 6 apresentam-se os resultados obtidos com os testes realizados ao sistema de gestão de baterias.

No capítulo 7 apresentam-se as conclusões retiradas ao longo deste projeto de dissertação. Também são apresentadas algumas sugestões de trabalho futuro.



# CAPÍTULO 2

## Sistemas de Armazenamento de Energia e Tecnologias de Baterias

### 2.1. Introdução

A integração em massa do veículo elétrico na sociedade só acontecerá quando este se tornar uma solução viável, comparativamente aos veículos tradicionais, em termos de mobilidade. Entre os fatores mais importantes que influenciam o sucesso dos veículos elétricos destacam-se a autonomia e o custo inicial dos mesmos, o tempo de carregamento e o tempo de vida útil do sistema de armazenamento. Estes fatores estão diretamente relacionados e dependentes do sistema de armazenamento utilizado. No decorrer deste capítulo são apresentadas as diferentes opções existentes, atualmente, para tentar minimizar esses problemas em relação às tecnologias possíveis de serem utilizadas como armazenadores de energia. Será dada ênfase à tecnologia das baterias e aos seus métodos de carregamento, uma vez que é este o armazenador de energia utilizado no CEPIUM (Carro Elétrico *Plug-In* da Universidade do Minho).

### 2.2. Sistema de Armazenamento de Energia

O sistema de armazenamento de energia (*Energy Storage System* - ESS) é o componente responsável nos veículos elétricos (*Electric Vehicles* - EVs) pelo armazenamento da energia. Este deve ser dimensionado para armazenar energia suficiente e fornecer uma potência de pico adequada, de modo a proporcionar um desempenho satisfatório quer ao nível de autonomia, quer ao nível da aceleração do veículo. No entanto, as unidades de armazenamento de energia elétrica devem ser escolhidas e dimensionadas consoante as necessidades do tipo de veículo elétrico a que se destinam.

A maioria dos sistemas de armazenamento de energia ainda se encontram em desenvolvimento, em evolução, para satisfazer, em simultâneo, todos os requisitos necessários para utilização em EVs de forma eficiente e sem restrições de custo. No seu

estado atual de desenvolvimento estes ainda não conseguem responder a todos os requisitos fundamentais para a implementação dos EVs no mercado automóvel.

Nesta seção são apresentadas e descritas as características de diversos sistemas de armazenamento de energia, com a exceção das baterias. A descrição das tecnologias das baterias é feita na secção seguinte, de forma mais pormenorizada, uma vez que é o armazenador de energia utilizado pelo CEPIUM e o mais comum nos EVs atuais.

### **2.2.1. Ultracondensadores**

Um ultracondensador (UC) armazena energia separando fisicamente as cargas positivas e negativas. As cargas são armazenadas em duas placas paralelas divididas por um isolante. O potencial aplicado ao elétrodo positivo atrai os iões negativos ao passo que o potencial aplicado ao elétrodo negativo atrai os iões positivos. Embora seja um dispositivo eletroquímico, o seu mecanismo de armazenamento de energia não envolve reações químicas, e nem nos elérodos existem variações químicas. Assim, o mecanismo de armazenamento de energia é altamente reversível, pelo que permite ao ultracondensador ser carregado e descarregado centenas de milhares de vezes, ou seja, proporciona ao UC um ciclo de vida longo.

O UC apresenta uma densidade de energia muito menor que uma bateria, mas maior que um condensador. As taxas de carga e descarga são determinadas exclusivamente pelas suas propriedades físicas. Em comparação com uma bateria, que se baseia em reações químicas lentas, apresenta uma densidade de potência maior. Outra vantagem deste dispositivo é a sua resistência interna baixa, o que proporciona uma eficiência elevada. Uma desvantagem dos UCs é o facto da tensão nos seus terminais ser diretamente proporcional ao estado de carga, ou seja, a sua tensão varia consoante a energia armazenada o que leva à necessidade de utilização de conversores de tensão. Contudo, assim também é muito fácil saber o estado de carga.

Os ultracondensadores também podem ser utilizados em conjunto com baterias, formando um sistema híbrido: Este sistema permite combinar o desempenho ao nível da potência dos UCs com a maior capacidade de armazenamento de energia das baterias. Em comparação com um ESS baseado apenas na tecnologia de baterias o sistema híbrido permite estender a vida útil das baterias e economizar em custos de reposição e manutenção das mesmas, pois pode ser o condensador a responder aos picos de potência, quando necessário.

Atualmente, os UCs são usados como dispositivos auxiliares no sistema de armazenamento de energia nos veículos elétricos híbridos (*Hybrid Eelectric Vehicle* -

HEV). Estes são apropriados para captar energia elétrica gerada a partir da travagem regenerativa e depois fornecer, rapidamente, a energia para a aceleração, devido às suas elevadas taxas de carga e descarga [1–6].

Na Tabela 2.1 (a) encontra-se um exemplo de um UC e as suas especificações técnicas. O dispositivo apresentado pertence à série *K2* e ao modelo *BCAP0650*. Na Tabela 2.1 (b) é apresentado um módulo com associações de UCs pertencente à série *48VMODULES* e ao modelo *BMOD0083*, desenvolvido para aplicações em EVs (inclui balanceamento, monitorização da tensão e da temperatura). Ambos os dispositivos foram desenvolvidos pela empresa *Maxwell*. O preço de venda online do modelo *BCAP0650* é 34,22 € (por unidade), e do modelo *BMOD0083* é 1 146,22 € (por unidade) [7].

Tabela 2.1 – Ultracondensadores desenvolvidos pela para aplicações em EVs [8]: (a) Um ultracondensador; (b) Um módulo de ultracondensadores.

Capacidade:	650 F	
Tensão nominal:	2,7 V	
Máxima corrente (15°C):	54 A	
Temperatura de Operação:	40°C a 65°C	
Nº de Ciclos:	1 000 000	
Massa:	160 g	
Energia específica:	4,1 Wh/kg	
Potência específica:	6 800 W/kg	

(a)

Capacidade:	83 F	
Tensão nominal:	48 V	
Máxima corrente (15 °C):	61 A	
Temperatura de Operação: -	40 °C a 65 °C	
Nº de Ciclos:	1 000 000	
Massa:	10,3 kg	
Energia específica:	2,6 Wh/kg	
Potência específica:	2 700 W/kg	

(b)

### 2.2.2. Células de Combustível

A célula de combustível (*Fuel Cell* - FC) produz energia elétrica através de um processo eletroquímico como nas baterias, mas difere das baterias porque precisa do abastecimento contínuo dos reagentes. A bateria é um dispositivo de armazenamento de energia elétrica, ao passo que uma célula de combustível é um dispositivo de geração de energia elétrica. Desde que os fluxos dos reagentes sejam mantidos, a FC é capaz de gerar eletricidade. Como consequência, a capacidade de geração contínua de eletricidade depende da capacidade do depósito dos reagentes.

É possível utilizar diferentes combinações de combustíveis e oxidantes em FC. Atualmente, o combustível e oxidante mais utilizados são o hidrogénio e o oxigénio, respetivamente. O hidrogénio é um combustível não poluente ideal para FC (em comparação com outros combustíveis de possível utilização em FC), pois tem uma maior densidade de energia do que qualquer outro combustível, e o produto da reação química é apenas água. Existem, também outros elementos químicos de possível utilização como oxidante, mas estes têm associados problemas de segurança e toxicidade.

As vantagens da FC são a elevada eficiência de conversão de combustível para energia elétrica, operação silenciosa, a possível utilização de diferentes materiais como combustível ou oxidante, durabilidade e a possibilidade de reposição rápida do depósito.

As desvantagens da FC, além do seu elevado custo, prendem-se com as dificuldades de produção (é um processo complexo e dispendioso) e de armazenamento do hidrogénio. Para aplicações em veículos, um tanque específico para o armazenamento do combustível deve ser incluído a bordo. Devido à relativamente baixa densidade energética do hidrogénio líquido em comparação com combustíveis derivados de petróleo, os tanques de combustível necessários são maiores em comparação com os utilizados nos veículos convencionais [1–6], [9], [10].

Na Figura 2.1 está representada a configuração de uma FC a hidrogénio [1].

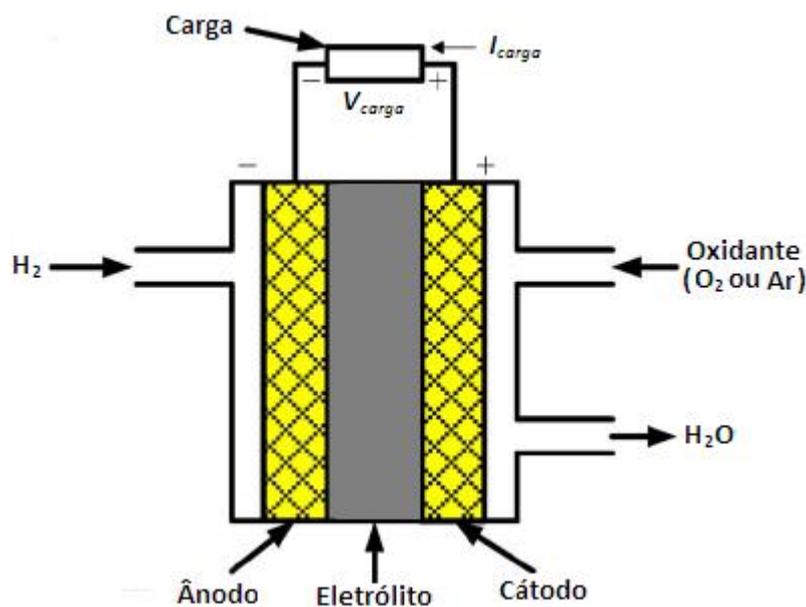


Figura 2.1 – Configuração de uma célula de combustível a hidrogénio (adaptado de [1]).

### 2.2.3. Volante de Inércia

O volante de inércia (*flywheel*) armazena energia cinética que com a ajuda de um gerador pode ser transformada em energia elétrica. Os principais constituintes do

volante de inércia são o rotor, o motor /gerador, que é acoplado ao volante de inércia, e as chumaceiras magnéticas que são utilizadas para fazerem o rotor girar sem que este esteja em contacto, com as outras partes constituintes do volante de inércia.

O princípio de funcionamento é simples e baseado no momento de inércia (quando um corpo se encontra em movimento tende a manter esse movimento, exceto se lhe for aplicada uma força no sentido oposto ao do movimento que possui). Este consiste em colocar o rotor a girar com a ajuda de um motor. Conforme a velocidade do rotor aumenta a energia armazenada no volante de inércia também aumenta. Posteriormente, o gerador extrai a energia do volante de inércia para a carga, convertendo a energia armazenada (energia cinética) em energia elétrica.

A expressão matemática que exprime a energia armazenada no volante de inercia é a equação (2.1), onde  $E$  é a energia cinética armazenada no volante de inércia,  $J$  é o momento de inércia,  $\omega$  é a velocidade de rotação do rotor. Na equação (2.2) está apresentada a equação do momento de inércia para um cilindro, onde  $M$  é massa do rotor e  $r$  é o raio do rotor [2].

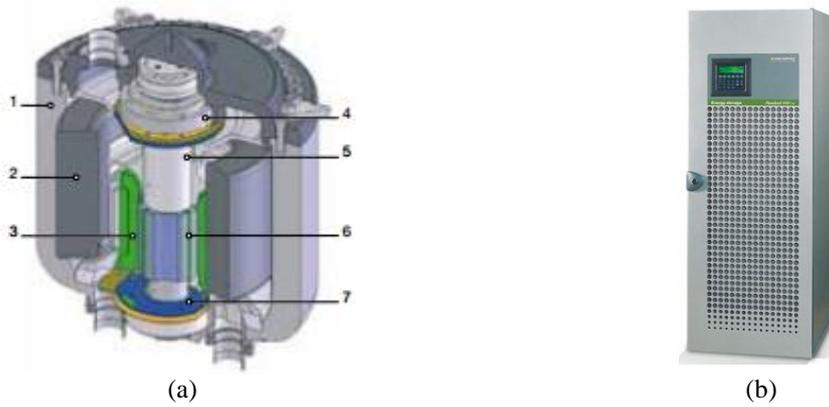
$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (2.1)$$

$$J = \frac{1}{2} M r^2 \quad (2.2)$$

Com base em (2.1), a capacidade de armazenamento de energia pode ser melhorada, quer aumentando o momento de inércia, quer aumentando a velocidade de rotação. No entanto, a segunda solução parece ser mais atraente para aplicações no setor automóvel, devido ao espaço disponível ser limitado e ao facto da energia armazenada aumentar com o quadrado da sua velocidade de rotação.

O tempo necessário para o volante de inércia atingir a sua velocidade máxima é variável, mas normalmente não ultrapassa os 20 minutos. Este tipo de armazenador de energia é caracterizado por precisar de pouca manutenção. Tem um carregamento rápido quando comparado com outros sistemas e não tem problemas devido a descargas profundas como as baterias. Além disso, tem uma longa vida útil e um rendimento elevado. Também não é prejudicial para o meio ambiente (visto que não utilizar elementos químicos para armazenar energia). Tem como desvantagens a variação da amplitude da tensão de saída, o facto da frequência da tensão produzida ser variável e a baixa segurança devido à pouca resistência a choques mecânicos [2], [5], [6], [11].

Na Figura 2.2 está apresentado um volante de inércia disponível no mercado pela empresa *Socomec*. Na Figura 2.2 (a) está apresentada a sua configuração, enquanto na Figura 2.2 (b) está apresentado o seu invólucro [12].



- |   |                                |   |                                |
|---|--------------------------------|---|--------------------------------|
| 1 | Caixa.                         | 5 | Sistema de vácuo.              |
| 2 | Volante de inércia em carbono. | 6 | Rotor.                         |
| 3 | Enrolamentos de estator.       | 7 | Chumaceira magnética inferior. |
| 4 | Chumaceira magnética superior. |   |                                |

Figura 2.2 - Volante de inercia desenvolvido pela *Socomec* [12]: (a) Constituição; (b) Invólucro do volante de inércia.

Na Tabela 2.2 são apresentadas as configurações técnicas e elétricas deste volante de inércia [12].

Tabela 2.2 - Configurações técnicas e elétricas do volante de inércia da Figura 2.2.

<b>Dados Técnicos e Elétricos:</b>	
Potência unitária nominal:	até: 190 kW (durante 12,5 s)
Energia:	5 125 kWh
Tensão (entrada/saída):	600 VCC (ajustável)
Temperatura de serviço:	-20 °C a +50 °C
Vida útil:	> 20 anos
Período de recarga:	100% em aproximadamente 7 minutos
Dimensão L x P x A:	630 x 830 x 1800 mm
Massa:	590 kg

### 2.3. Requisitos das Baterias para Veículos Elétricos

O desenvolvimento dos veículos elétricos está a impor novas exigências aos dispositivos de armazenamento de energia, devido ao uso de funcionalidades como o *start-stop*, a recuperação de energia elétrica proveniente da travagem regenerativa, a alimentação do sistema de tração principal. Isto exige às baterias que são utilizadas nos sistemas de armazenamento de energia um ciclo de vida longo, fiabilidade, segurança e

baixo preço. De seguida, são referidas algumas exigências comuns sobre as baterias para utilização em EV a vários níveis.

### 2.3.1. Características Elétricas das Baterias

As características e propriedades elétricas das baterias utilizadas como ESS variam consoante o tipo de veículo elétrico, conforme indicado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Características Elétricas requeridas pelos diferentes tipos de EVs (retirado de [13]).

Tipo de EV	Gama de Potência (kW)	Gama de Energia (kWh)	Gama de tensões (V)
<i>Micro</i> HEV	2,5 – 5	0,5	12 – 36
<i>Mild</i> HEV	15 – 20	1	120 – 160
<i>Full</i> HEV	30 – 50	2 – 3	200 – 350
FCHEV	25 – 30	1 – 2	220
<i>Plug-in</i> HEV	30 – 100	5 – 15	200 – 350
EV	35 – 70	25 – 40	200 – 350

De uma forma geral, as características elétricas das baterias para possibilitar a introdução e aceitação dos EVs nos mercados devem permitir [2], [14]:

- Elevada potência de descarga para sustentar novas tecnologias de arranque;
- Elevada capacidade das baterias e elevado número de ciclos de vida, para cobrir a demanda de energia quando o veículo esteja estacionado. Ou seja, para permitir que o modo de operação veículo para rede (*Vehicle to Grid - V2G*) seja vantajoso para o condutor;
- Permitir uma elevada taxa de carregamento para que o recarregamento da bateria possa ser efetuado de forma rápida, quando necessário;
- Elevada densidade de energia para permitir percorrer uma distância aproximadamente igual a um veículo equipado com motor de combustão interna (*Internal Combustion Engine - ICE*).

### 2.3.2. Custo das Baterias

O pack de baterias posiciona-se como o componente mais caro nos veículos elétricos com baterias (*Battery Electric Vehicles - BEVs*), e é responsável por uma significativa parte do custo dos HEVs. Isto determina que o preço da bateria é um fator chave tanto para a competitividade económica dos veículos elétricos, como para a

eletrificação em grande escala do EVs. Por conseguinte, existe uma forte pressão para reduzir o seu custo. Ao mesmo tempo, os requisitos de longevidade, segurança e fiabilidade, fazem com que essa meta seja difícil de alcançar para os fabricantes de baterias.

Grande parte do custo de uma bateria deve-se ao custo da matéria-prima das células eletroquímicas. Outra contribuição importante para o custo é o sistema de gestão e controlo necessário para assegurar o funcionamento correto das baterias. Isto é essencial para assegurar fiabilidade e segurança da bateria.

O fator mais determinante na escolha da bateria é o custo por ciclo de vida, em vez de o preço de venda da bateria. Uma bateria pode ser mais cara, mas apresentar uma melhor relação entre o seu preço e número de ciclos de vida úteis, fazendo com que o preço pago por cada ciclo da bateria seja menor. Devido a este facto, existem propriedades da bateria, tais como o envelhecimento e o número de ciclo úteis, que são de extrema importância no custo real da bateria e consequentemente, no custo do carro [13], [14].

### **2.3.3. Vida Útil da Bateria**

A limitada vida útil da bateria já tem consequências graves para equipamentos portáteis, por isso torna-se uma preocupação importante nos sistemas de armazenamento de energia (*Energy Storage System - ESS*) usados em EVs. A vida da bateria tem um impacto direto no custo da bateria por ciclo, e não deve ser substituída durante o ciclo médio de vida dos EVs (cerca de 10 anos). Um exemplo, são as baterias de Chumbo onde para além do seu peso e baixa densidade de energia, a limitação da sua vida útil é a maior entrave ao desenvolvimento de EVs com esta tecnologia, uma vez que o ciclo de vida é limitado a várias centenas de ciclos.

A vida útil da bateria é influenciada pelo número de ciclos, pelo *calendar life* (explicado na secção 2.3.5) e pela temperatura [13].

### **2.3.4. Número de Ciclos**

O número de ciclos esperados durante a vida útil da bateria é dependente do perfil de utilização da mesma. Um veículo elétrico com baterias (*Battery Electric Vehicle – BEV*) ou veículos elétricos híbridos *plug-in* (*Plug-In Hybrid Electric Vehicle – PHEV*) requerem ciclos de descarga profundos, isto é, utilizar o máximo de energia disponível, armazenada durante uma carga, ao passo que um HEV apenas utiliza uma pequena parte da sua energia, tendo as suas baterias constantemente recarregadas. No caso dos BEVs e

PHEVs, geralmente a bateria é carregada durante a noite para utilização durante o dia seguinte. Portanto, o número de ciclos necessários corresponde a mais ou menos um ciclo por dia até que se utilize 80% da energia armazenada. Já no caso de aplicações para HEV, a bateria é normalmente sujeita a milhares de ciclos de carga e descarga por dia, mas a profundidade da descarga é pequena, utilizando uma parcela pequena da energia total da bateria (normalmente menos de 50% do SoC) [13].

As reações eletroquímicas que ocorrem em cada eletrodo durante a vida útil da bateria podem produzir mudanças muito importantes nos materiais da bateria. O envelhecimento é o resultado dessas modificações que ocorrem, prejudicando a relação entre o volume e a energia armazenada. Muitos outros fatores devem ser considerados para avaliar o ciclo de vida da bateria, tais como a profundidade da descarga, a taxa de descarga/carga, a temperatura e limites da tensão. Cada um destes fatores possui mais ou menos importância, dependendo do tipo de bateria [13].

### **2.3.5. Calendar Life**

O *Calendar life* é definido como a duração da bateria em repouso, isto é, sem a ocorrência de reações eletroquímicas. Durante o repouso as baterias também envelhecem, e tanto o tempo de utilização como o tempo em repouso devem ser considerados para avaliar o tempo de vida. Isto deve-se principalmente às interações entre os materiais ativos em contacto com o eletrólito. Idealmente o contacto entre o eletrólito e ambos os eletrodos é quimicamente estável, mas na prática ocorrem reações lentas com o tempo, levando a perda de capacidade de armazenamento[13].

### **2.3.6. Controlo da Temperatura**

A temperatura tem muita influência na taxa de envelhecimento das baterias, e deve ser mantida dentro da gama recomendada pelo fabricante através do uso de um sistema de gestão de temperatura. Normalmente, o melhor desempenho é obtido entre 20 °C e 40 °C, dependendo do tipo de bateria. Temperaturas mais baixas levam à redução da atividade por parte dos produtos químicos, e ao aumento da resistência interna da bateria. A uma temperatura mais elevada do que o recomendado a resistência interna diminui, mas aumenta a taxa de auto-descarga, o que pode levar à perda de energia. Na Figura 2.3 encontra-se um gráfico que apresenta a influência da temperatura na energia específica para os diversos tipos de baterias, a uma taxa de descarga constante de 0,2 C. Outra consequência da variação da temperatura numa bateria é a variação do valor da tensão aos terminais da bateria em circuito aberto.

Para não ultrapassar os limites definidos para a temperatura de operação pode ser usado um sistema de arrefecimento de ar ou líquido, associado ao sistema de gestão de calor do carro ou ao sistema de ar condicionado.

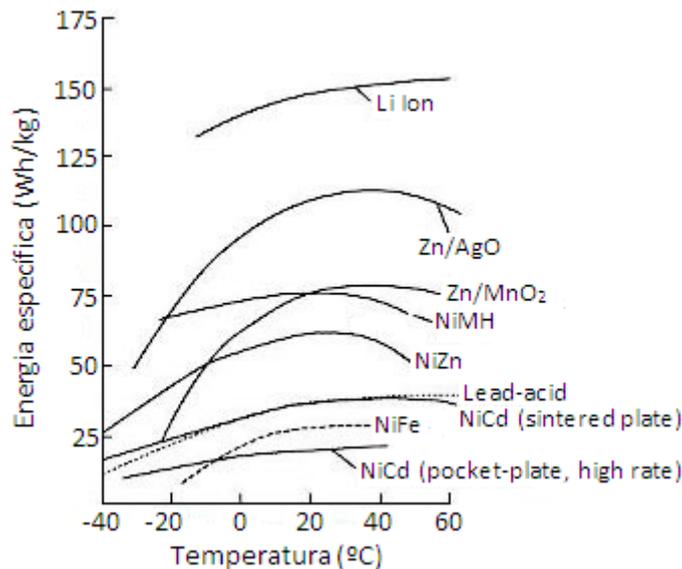


Figura 2.3 - Efeitos da temperatura na energia específica em alguns sistemas de baterias primárias e secundárias, a uma taxa de descarga de 0,5C (retirado de [15]).

A temperatura nas baterias deve estar, tanto quanto possível, distribuída uniformemente. Na verdade, os sistemas de baterias são construídos por associação de muitas células individuais (em série ou paralelo). Uma distribuição desigual da temperatura pode resultar na distribuição de energia irregular e desequilíbrio de SoC entre as células. Além disso, este desequilíbrio pode acelerar o envelhecimento das células, o que iria prejudicar a vida útil do banco de baterias do EV.

A principal fonte de calor numa bateria provém da passagem da corrente através da sua resistência elétrica, e aumenta proporcionalmente com o quadrado da corrente. Todavia, nos sistemas aquosos de desenho selado (como as baterias de Chumbo-Ácido, NiCd ou NiMH) a produção de calor aumenta na finalização do processo de carga. Esta reação não ocorre nos sistemas não aquosos (por exemplo, em baterias iões de Lítio), o que é uma vantagem destes sistemas [15] [13].

### 2.3.7. Segurança

Os elementos químicos utilizados nas baterias são sensíveis ao calor. Deste aspeto provém o maior perigo numa bateria, que é a súbita libertação da energia elétrica armazenada devido a um sobreaquecimento. Uma possível causa para este fenómeno ocorre durante o carregamento da bateria, devido à produção de oxidantes e redutores que podem, em certas circunstâncias, reagir quimicamente entre si e produzir calor.

Existem outras causas internas ou externas que também podem originar sobreaquecimento, como o curto-circuito ou a sobrecarga. As consequências podem ser a rutura do recipiente da bateria, incêndio ou explosão.

Existem vários fatores que aumentam ou diminuem o risco de ocorrer situações prejudiciais para a segurança das baterias. O fator mais importante é a natureza dos produtos químicos contidos na bateria. Por exemplo, a utilização de solventes não aquosos em detrimento de solventes aquosos, usados nas baterias tradicionais, diminui o risco de ocorrência dessas situações. Igualmente, a cinética da reação química e a taxa de propagação do calor pela bateria são fatores a ter em consideração. A segurança é sempre uma preocupação muito importante no desenvolvimento da bateria. A escolha dos materiais e o design da bateria são fundamentais para evitar situações drásticas.

As condições de abuso mais frequentes em EVs são curtos-circuitos externos, que podem resultar de uma falha no sistema elétrico ou de acidente, curtos-circuitos internos, resultantes de uma sobretensão ou sobreintensidade devido a uma falha no sistema da bateria ou no carregador, aquecimento a partir de uma fonte externa de calor, como um incêndio, e forte *stress* mecânico devido a vibrações e choques [13][14].

### **2.3.8. Reciclagem e Meio-Ambiente**

A reciclagem da bateria é um procedimento importante devido ao facto de alguns materiais constituintes das baterias serem tóxicos e poluentes, com consequências para o meio ambiente e para a saúde humana. A reciclagem permite diminuir não só a contaminação provocada por estes, mas também a necessidade de exploração mineira para a obtenção dos materiais. Além disso, alguns materiais utilizados em algumas baterias são escassos na natureza ou de acesso limitado devido a questões geopolíticas [13][14].

Devido à importância deste tema, várias entidades por todo o mundo, como por exemplo o Parlamento Europeu, criaram normas para a reciclagem dos automóveis e seus componentes. Por conseguinte, as baterias como um componente principal dos veículos elétricos devem cumprir esses regulamentos em relação aos materiais utilizados e à sua reciclagem. A título de exemplo, as normas comunitárias e a legislação nacional referem [16]:

- Os distribuidores de baterias de tração (para veículos híbridos e elétricos) estão obrigados a aceitar a devolução de baterias usadas pelos utilizadores finais, independentemente da sua composição química e da sua origem;

- A devolução das baterias empregues em veículos automóveis particulares e não comerciais é livre de quaisquer encargos para o utilizador final, e não depende da aquisição de novas baterias.

A união europeia já definiu taxas mínimas de reciclagem, consoante o tipo de bateria. Na Diretiva 2006/66/CE e no Decreto-Lei 6/2009 não só é proibida a eliminação de baterias usadas por deposição em aterro ou por incineração, como também se encontra definido um rendimento mínimo que os processos de reciclagem têm de atingir. Desde Setembro de 2011 que os recicladores têm de garantir taxas mínimas de reciclagem de [16]:

- 65% em massa, nas baterias de Chumbo-Ácido usadas em veículos;
- 75% em massa, nas baterias de Níquel-Cádmio usadas em veículos;
- 50% em massa, em outros tipos de baterias usadas em veículos.

## 2.4. Baterias

A maior parte dos EVs disponíveis no mercado utiliza baterias como ESS devido ao seu baixo custo, portabilidade e robustez. Por isso, as baterias são o dispositivo de armazenamento de energia predominante no mercado. Devido a este facto, a tecnologia das baterias será analisada com mais pormenor nesta seção. No entanto, não são abordados todos os aspetos inerentes às baterias.

A bateria é um dispositivo que converte a energia química contida nos seus materiais ativos diretamente em energia elétrica, por meio de reações eletroquímicas de oxidação<sup>1</sup> e redução<sup>2</sup>. No caso de uma bateria recarregável esta é recarregada por uma inversão do processo. As reações eletroquímicas (oxidação-redução ou vice-versa) causam a transferência/fluxo de eletrões de um material para outro, através de um circuito elétrico que faz a conexão entre os dois materiais [17].

A bateria é constituída por uma ou mais células eletroquímicas, ligadas eletricamente em série ou paralelo para fornecer a tensão e corrente de operação requerida. Em alguns casos, também pode incluir sistemas de monitorização, controlo e outros componentes auxiliares (como por exemplo, díodos e fusíveis).

A célula é a unidade eletroquímica básica da bateria, e é constituída por um conjunto de eléctrodos, separadores, eletrólito, terminais e um invólucro (Figura 2.4). Os eléctrodos da célula são dois, o positivo ou cátodo, e o negativo ou ânodo. O eletrólito

<sup>1</sup> Em Química, o termo oxidação significa a perda de eletrões por qualquer espécie química.

<sup>2</sup> Em Química, o termo redução significa o ganho de eletrões por qualquer espécie química.

proporciona o meio para a transferência de carga no interior da célula entre o ânodo e cátodo. O eletrólito é tipicamente um líquido, como água ou outros solventes com sais dissolvidos, dependendo do tipo de bateria. Contudo, algumas baterias utilizam eletrólitos de gel ou sólidos, que são condutores iónicos à temperatura de operação da célula. O separador é o material que impede o contacto electrónico entre os eléctrodos de polaridade oposta na mesma célula, mas este deve ser permeável aos iões do eletrólito [15], [17].

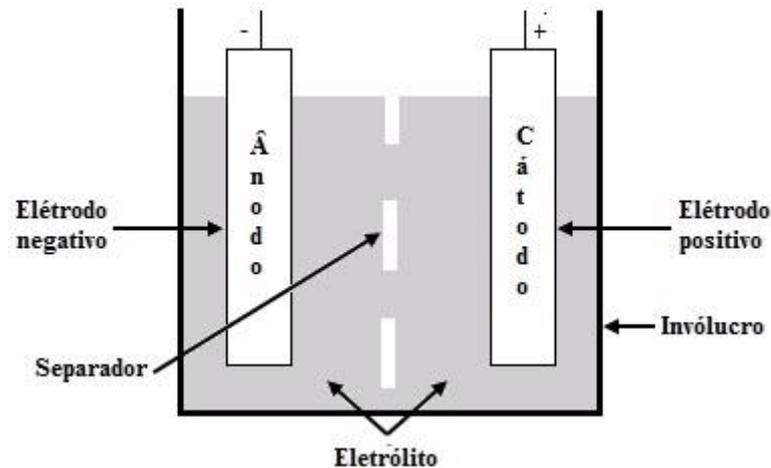


Figura 2.4 - Constituição de uma célula da bateria (adaptado de [15]).

Células eletroquímicas e baterias são classificadas como primárias (não recarregáveis) ou secundárias (recarregáveis), em função da sua capacidade de ser eletricamente carregadas, após a descarga, regressando à sua condição original. Para isso, é fornecida corrente, no sentido oposto à corrente de descarga. Nesta dissertação, apenas são mencionadas baterias do tipo secundário, porque a finalidade destas é serem utilizadas num veículo eléctrico, onde é obrigatório serem recarregadas.

#### 2.4.1. Operação de Descarga da Bateria

A operação de descarga de uma bateria consiste na extração da energia armazenada pela bateria para uma carga. Nesta operação converte-se a energia química de uma célula ou bateria em energia eléctrica.

O esquemático do funcionamento de uma célula durante a descarga é mostrado na Figura 2.5. Quando conectada uma carga externa à bateria existe um fluxo de electrões do ânodo, que é oxidado, através da carga externa para o cátodo, que é reduzido. O circuito eléctrico é completado no eletrólito pelo fluxo de aniões (iões de carga eléctrica negativa) e fluxo de catiões (iões de carga eléctrica positiva) para o ânodo e cátodo, respetivamente [15].

A reação de descarga pode ser descrita:

- Eléctrodo negativo: reação de oxidação (perda de electrões);
- Eléctrodo positivo: reação de redução (ganho de electrões).

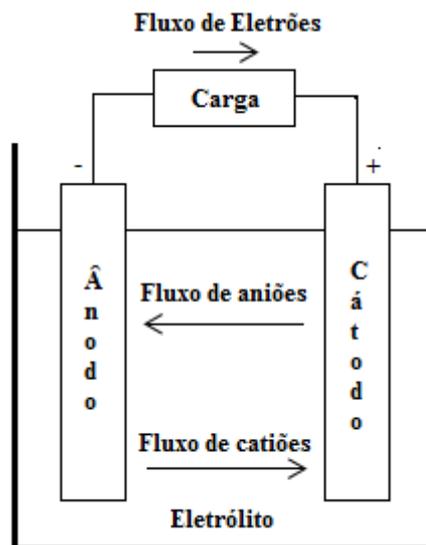


Figura 2.5 - Operação eletroquímica da célula durante a descarga (adaptado de [15]).

### 2.4.2. Operação de Carga da Bateria

O processo de carregamento da bateria consiste na conversão da energia eléctrica, fornecida a partir de uma fonte externa, em energia química, no interior da bateria. Durante o processo de carregamento da bateria o fluxo de corrente é invertido, e a oxidação tem lugar no eléctrodo positivo, enquanto a redução acontece no eléctrodo negativo, como se mostra na Figura 2.6 [15].

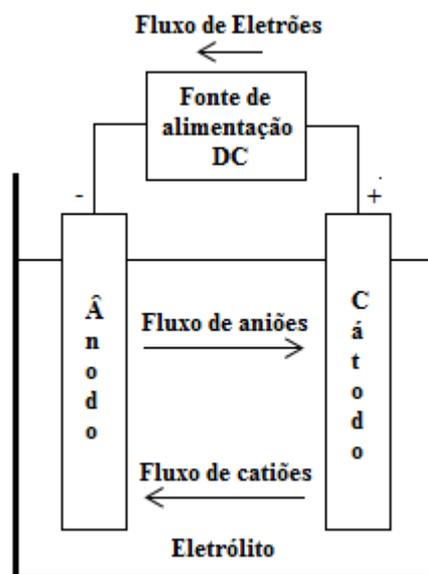


Figura 2.6 – Operação eletroquímica da célula durante a carga (adaptado de [15]).

A reação de carregamento pode ser descrita assim:

- Eléctrodo positivo: reação de oxidação (perda de electrões);
- Eléctrodo negativo: reação de redução (ganho de electrões).

### 2.4.3. Diferentes Tipos de Baterias

A seguir, são apresentadas algumas definições utilizadas para referir características e processos específicos inerentes a qualquer tipo de baterias [15]:

- Capacidade Nominal: É a corrente eléctrica (A) qua a bateria é capaz de fornecer durante um determinado período de tempo em horas (h). Ou seja, corresponde ao número de Amperes-hora (Ah) que uma bateria pode fornecer em condições específicas (para uma dada taxa de descarga e temperatura), geralmente classificadas pelo fabricante. Por exemplo, uma bateria com uma capacidade nominal de 5 Ah significa que numa hora pode fornecer 5 A, em duas horas pode fornecer 2,5 A e em 5 horas pode fornecer constantemente 1 A.
- Ciclo: Um ciclo designa a operação de descarga e posterior operação de carregamento da bateria.
- Ciclo de Vida: O número total de ciclos, em determinadas condições, que podem ser efetuados por uma bateria até que esta deixe de cumprir os critérios especificados em relação ao seu desempenho.
- Descarga Profunda: Descarga de pelo menos 80% da capacidade nominal da bateria.
- Profundidade de Descarga (*Depth of Discharge* - DoD): A razão entre a quantidade de energia eléctrica removida de uma célula ou bateria e a sua capacidade nominal, durante a descarga.
- Densidade de Energia: A relação entre a energia nominal da bateria e o seu volume. A sua unidade é Wh/l.
- Energia Específica: A relação entre a energia nominal da bateria e o seu peso. A sua unidade é Wh/kg.
- Potência Específica: A relação entre potência fornecida por uma bateria e o seu peso. A sua unidade é W/kg.
- Densidade de Potência: A relação entre a potência fornecida por uma bateria e o seu volume. A sua unidade é W/l.
- Tensão de Circuito Aberto (*Open Circuit Voltage* - OCV): A diferença de tensão entre os terminais de uma bateria quando esta não se encontra acoplada a uma carga.

- Sobrecarga: Ocorre sobrecarga quando se fornece energia à bateria após o seu carregamento estar concluído. Por outras palavras, o carregamento contínuo depois de 100% do estado de carga ser alcançado.
- Auto-Descarga: Corresponde à perda da capacidade útil de uma célula ou bateria devido à ação química interna (ação local), ou seja, é a perda de energia quando nenhuma carga externa lhe é aplicada. Numa bateria ideal, somente existe um fluxo de corrente quando o circuito entre os dois elétrodos é fechado externamente, através de um circuito elétrico. Todavia, numa bateria real existe uma descarga lenta quando os terminais estão em circuito aberto. Este processo é conhecido como auto-descarga [17].
- Estado de Carga (*State of Charge* - SoC): A energia elétrica disponível numa bateria em comparação com a sua energia nominal, expressa em percentagem.
- Tensão de Corte (*Cut-Off Voltage*): É a tensão mínima indicada pelo fabricante até à qual a bateria pode ser descarregada sem se danificar.
- Taxa C (*C-Rate*): Um termo comum empregue para a indicação da corrente de descarga ou de carga da bateria. Normalmente, esta taxa é expressa como um múltiplo da capacidade nominal da bateria, e pode ser calculada através da equação (2.3).

$$I = M C \quad (2.3)$$

Onde  $I$  é a corrente de descarga ou carga,  $C$  é capacidade nominal da bateria em amperes-hora (Ah) e  $M$  é o múltiplo ou fração de  $C$ . Por exemplo, para uma bateria de 250 mAh, descarregada a 50 mA corresponde a uma taxa  $0,2 C$  ou  $C/5$ . A mesma bateria, quando descarregada com uma relação de  $C/5$  pode fornecer constantemente 1 A, durante 5 horas.

De seguida, são descritas as características das tecnologias de bateria com mais hipóteses de sucesso para utilização em EVs. Esta análise foca-se nas características elétricas, no ciclo de vida, no custo e na composição de cada bateria. No final faz-se uma comparação entre as diversas tecnologias de baterias.

Nesta secção também são mencionadas as formas de carregamento mais usuais para os tipos de baterias mais utilizadas em EVs. Em alguns métodos de carregamento são apresentados os valores típicos de tensão e corrente usados, contudo estes variam de fabricante para fabricante. Devido a este facto deve-se ler sempre o manual de instruções do fabricante para verificar se existem indicações sobre estes valores. Também, o desempenho da bateria, bem como a sua longevidade, dependem da maneira

como é efetuado o seu carregamento. Um carregamento eficaz da bateria pressupõe a reposição da energia elétrica até se atingir 100% do estado de carga na mesma, mas evitando que a mesma seja sujeita a sobrecarga ou exposta a elevadas temperaturas durante o seu carregamento.

#### 2.4.3.1. Baterias Níquel-Zinco (NiZn)

Na bateria NiZn o cátodo é constituído por Níquel e o ânodo é constituído por Zinco. Os materiais utilizados são “amigos” do meio ambiente, recicláveis, e não são inflamáveis, o que torna esta bateria muito segura. A temperatura de operação varia entre -10 °C e 50 °C. Tipicamente, a tensão nominal da célula é 1,65 V e a tensão de operação varia entre 1,65 V e 1,4 V [15]. Na Tabela 2.4 encontram-se as características de uma célula deste tipo produzida pela empresa *PKCELL* [18]. No entanto, o fabricante não especifica o preço da célula.

Tabela 2.4 - Características e imagem de uma célula NiZn produzida pela *PKCELL* [18].

Tensão nominal:	1,6 V	
Capacidade:	2500 mAh	
Temperatura:	0 °C a 40 °C	
Massa:	25 g	
Tamanho (diâmetro x altura):	14,5 x 50,5 mm	

A bateria de NiZn tem alta densidade de potência e os seus materiais são de baixo custo. No entanto, o baixo número de ciclos de vida desta bateria impede a sua aplicação em EVs [1], [15], [19].

#### 2.4.3.2. Bateria Sódio-Cloreto de Níquel (Na-NiCl<sub>2</sub>)

A bateria Sódio-Cloreto de Níquel também é designada por bateria ZEBRA (*Zero Emissions Batteries Research Activity*). O ânodo é constituído por Sódio (Na), o cátodo é constituído por Cloreto de Níquel (NiCl<sub>2</sub>), e o eletrólito é constituído por Tetracloroaluminato de Sódio (NaAlCl<sub>4</sub>).

Esta bateria funciona a temperaturas elevadas, de aproximadamente 300 °C, pelo que precisa de um recipiente com elevado isolamento térmico. Apesar desta desvantagem, apresenta algumas vantagens como o seu baixo custo, à sua robustez, segurança, e elevado *calendar life*. É resistente a sobrecarga e suporta elevado número de ciclos sem degradação significativa, mesmo quando é descarregada quase 100% da

sua capacidade total. A energia específica da bateria ZEBRA é comparável com a das baterias de Lítio. Outra característica desta bateria é que à temperatura ambiente pode manter o seu estado de carga, por um longo período de tempo. No entanto, o arrefecimento até à temperatura ambiente e reaquecimento só é conveniente até um número limitado de ciclos, e o processo de reaquecimento é demorado. Por isso, quando esta não está em uso é mantida à sua temperatura de funcionamento para estar pronta para utilização quando solicitada. Isto resulta numa desvantagem porque existe perda de parte da energia armazenada na bateria sob a forma de energia calorífica, que é utilizada para esta manter a sua temperatura [2], [6], [19].

Na Tabela 2.5 está apresentada uma bateria ZEBRA e suas características, produzida pela MES-DEA, modelo Z5-278-ML3X 64 [20].

Tabela 2.5 - Bateria ZEBRA produzida pela MES-DEA, modelo Z5-278-ML3X-64 [20].

Capacidade:	64 Ah	
Tensão em circuito aberto:	278 V	
Tensão máxima:	313 V	
Tensão mínima:	186 V	
Densidade de energia:	152 Wh/l	
Energia específica:	100 Wh/kg	
Densidade de Potência:	273 W/l	
Potência específica:	179 W/kg	
Perdas térmicas (270°C):	<105 W	
Temperatura de ambiente:	-40 °C a 50 °C	
Tamanho (C x L x A):	826 x 530 x 296 mm	
Massa:	182 kg	

#### 2.4.3.3. Baterias Níquel-Cádmio (NiCd)

Na bateria NiCd o cátodo é constituído por Hidróxido de Níquel, o ânodo é constituído por Cádmio e o eletrólito é constituído por Hidróxido de Potássio [17].

Tipicamente, a tensão nominal da célula é 1,2 V e a tensão de operação varia entre 1,25 V e 1 V. A temperatura de operação é entre -40 °C a 50 °C [15].

Esta bateria tem um ciclo de vida longo, pode ser totalmente descarregada sem danos, tem uma elevada potência específica [21]. Esta bateria pode ser reciclada, mas o

Cádmio é um material tóxico [1]. Apresenta ainda como desvantagens o elevado custo de manutenção, baixa tensão por célula e o facto do seu custo inicial ser elevado em comparação com as baterias de Chumbo-Ácido. Esta bateria também apresenta o designado “efeito de memória” e tem uma alta taxa de auto-descarga.

O “efeito de memória” consiste na perda de capacidade da bateria quando esta é sujeita a descargas pouco profundas durante sucessivos ciclos. Este fenómeno é designado “efeito de memória ” porque a bateria parece “lembrar” a quantidade de energia entregue anteriormente. Por isso é recomendável nas baterias afetadas por este fenómeno efetuar descarregamentos completos [5], [15]. Mas, segundo [5], atualmente o efeito de memória nas baterias de NiCd é pequeno. Devido a estas desvantagens apresentadas estas baterias não são indicadas para utilização em EVs [6], [9], [10], [13], [19], [22]. Na Tabela 2.6 encontra-se uma célula de NiCd, produzida pela empresa YUASA [23] e as suas características.

Tabela 2.6 - Características e imagem de uma bateria NiCd produzida pela YUASA [23].

Tensão nominal:	1,2 V	
Capacidade:	4 Ah	
Massa:	130 g	
Tamanho (diâmetro x altura):	32,1 x 60,4 mm	
Preço [7]:	6,10 € (unidade)	

#### 2.4.3.4. Bateria de Níquel-Hidreto-Metálico (NiMH)

Na bateria de Níquel-Hidreto-Metálico (NiMH – *Nickel Metal Hydride Battery*) o eletrodo positivo é composto por Hidróxido de Níquel, o eletrodo negativo consiste numa liga que pode ser constituída por alguns dos seguintes materiais: Vanádio, Titânio, Níquel, Alumínio, Cobalto e outros. No eletrólito utiliza uma solução alcalina [14]. Os componentes desta bateria não são tóxicos para o meio ambiente e podem ser reciclados [2]. Esta bateria também não necessita de manutenção.

Tipicamente, a tensão nominal da célula é 1,2 V e a tensão de operação é entre 1,25 V e 1,1 V. A temperatura de operação é entre -20 °C a 50 °C, mas deve ser carregada com uma temperatura compreendida entre 0 °C e 40 °C [15].

As suas vantagens são: ciclo de vida longo, elevada energia específica, elevada potência específica, operação em segurança a elevada tensão, operação a uma larga

faixa de temperatura, tolerância a abuso de sobrecargas (mas uma tolerância menor em comparação com as baterias de NiCd), e tolerância a descargas profundas [6], [21].

As desvantagens são o seu custo, em comparação com as baterias de Chumbo-Ácido e NiCd, uma baixa tensão por célula, e o efeito de memória (no entanto, comparado com as baterias de NiCd este efeito é menor). Se descarregada frequentemente a uma elevada corrente o seu número de ciclos é reduzido. Tem uma taxa de auto-descarga elevada. Durante o carregamento gera uma grande quantidade de calor, pelo que necessita de um algoritmo de carregamento mais complexo. Apre

O melhor desempenho de operação é obtido quando descarregada entre 20% a 50% da sua capacidade nominal. Dentro das baterias de Níquel, este é o tipo bateria que apresenta mais hipóteses de utilização em aplicações de mobilidade elétrica [1], [5], [9], [10], [13], [17], [22].

Em seguida são apresentados alguns veículos elétricos que utilizam esta tecnologia de baterias [14]:

- *Toyota Prius*: composto por 28 baterias NiMH da marca *Panasonic*. Cada módulo de bateria contém seis células de 1,2 V conectados em série, para produzir uma tensão nominal de 201,6 V, através das 168 células. O peso do conjunto de baterias completo é 53,3 kg. Na Tabela 2.7 está apresentada a bateria utilizada neste HEV. Na mesma tabela também são mencionadas as características de um módulo de 2ª geração utilizado neste HEV.

Tabela 2.7 – Sistema de Baterias do *Toyota Prius* (2006) e as características do módulo de 2ª geração [13].

Tensão nominal:	7,2 V	
Capacidade:	6,5 Ah	
Massa:	1040 g	
Tamanho (C x L x A):	285 x 19,6 x 106 mm	
Altura Módulo da Bateria:	176 mm	

- *Toyota Highlander* (também *Lexus RX 400h*): composto por 240 células, tem uma tensão nominal de 288 V.
- *Ford Escape*: composto por 250 células individuais de NiMH desenvolvidas pela *Sanyo*. A tensão da célula é 1,3 V, e um grupo de 5 células forma um módulo. Existem 50 módulos de baterias, o que resulta numa tensão nominal de 330 V.

- *Honda Insight*: composto por 120 células da Panasonic de 1,2 V, logo a tensão nominal da bateria é 144 V.

Na Tabela 2.8 encontra-se a bateria *NHP 10-340* produzida pela *Saft*, e suas características. Esta bateria foi projetada para aplicações em HEV, e o preço no site do fabricante é 20,59 € [24].

Tabela 2.8 – Bateria de NiMH produzida pela *Saft*, modelo *NHP 10-340* e suas características [24].

Tensão nominal:	12 V	
Capacidade:	34 Ah	
Densidade de energia:	90 Wh/l	
Energia específica:	50 Wh/kg	
Densidade de Potência:	970 W/l	
Potência específica:	520 W/kg	
Temperatura de operação:	-20 °C a 40 °C	
Tamanho (C x L x A):	169 x 173 x 165 mm	
Massa:	9 kg	

### Método de Carregamento para as Baterias de NiMH e NiCd

As baterias NiMH e NiCd podem ser carregadas com o mesmo algoritmo de carregamento, podendo variar o método aplicado para detetar o fim do carregamento. O método de carregamento mais usual e utilizado nas baterias de NiMH e NiCd é o de corrente constante, mas existem pequenas derivações da maneira como ele é aplicado, que são explicadas posteriormente. Nas baterias à base de Lítio e Chumbo-Ácido o fim do carregamento acontece quando um valor pré-determinado de corrente ou tensão é atingido. Já nas baterias de NiMH e NiCd são utilizados algoritmos para detetar o fim do carregamento quando o SoC da bateria atinge os 100%.

A maioria dos métodos de deteção do fim de carga são baseados na tensão, ou na temperatura. Os métodos baseados na tensão são o método de queda de tensão (*voltage drop*) e o método de *voltage plateau* [15]. Os métodos baseados na temperatura são o da temperatura de corte (*temperature cutoff*), da variação da temperatura de corte (*temperature cutoff delta*) e da taxa de incremento da temperatura (*rate of temperature increase*) [10], [15].

O método queda de tensão também é chamado de variação negativa da tensão (*negative delta V*). À medida que o tempo de carregamento aumenta a tensão na bateria

também aumenta. No momento em que a bateria fica totalmente carregada existe um pico de tensão, seguindo-se posteriormente uma queda de tensão (Figura 2.7). Esta queda de tensão origina uma variação negativa de tensão que é utilizada para detetar o final do carregamento. Contudo, este método não deve ser utilizado para uma taxa de carregamento inferior a 0,5 C porque a variação negativa da tensão é praticamente indetetável. A variação de tensão utilizada é normalmente entre 10 mV a 20 mV. Outra desvantagem é a possibilidade de ocorrências de falsas deteções da variação negativa da tensão no início do processo de carregamento com baterias excessivamente descarregadas. Contudo, este problema pode ser ultrapassado com ajuda de um temporizador [5], [10], [15]. Este método é mais eficaz e mais utilizado nas baterias de NiCd, em especial, para carregamento rápido, mas também pode ser utilizado em baterias de NiMH. No entanto, a sua aplicação nas baterias de NiMH é diminuta porque a variação da tensão é mais pequena, e por conseguinte, mais difícil de detetar.

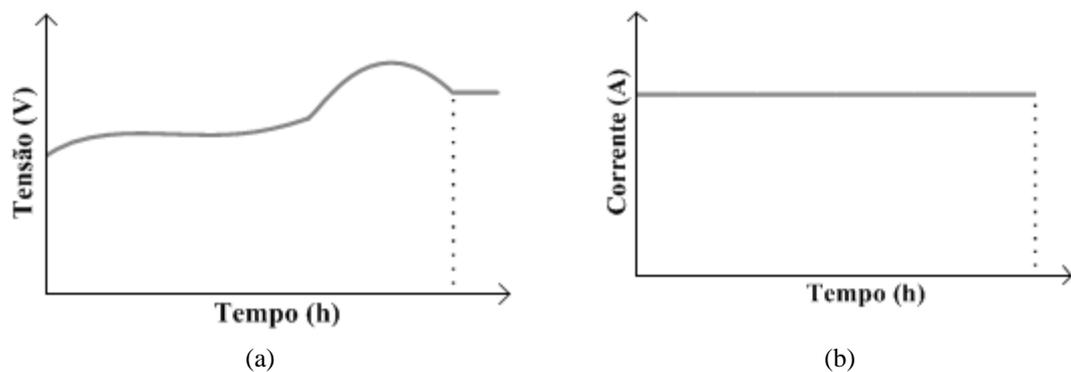


Figura 2.7 - Formas de onda do método de carregamento de variação negativa da tensão: (a) Forma de onda da tensão; (b) Forma de onda da corrente.

No método *voltage plateau*, o fim de carregamento acontece quando a inclinação da curva de tensão é zero. Isto acontece quando é atingido o pico de tensão. Este método apresenta menor risco de sobrecarga para as baterias de NiMH em comparação com o método anterior.

O método temperatura de corte termina o carregamento quando a bateria atinge uma determinada temperatura que indica o início de sobrecarga. Este valor é difícil de determinar e é influenciado pela temperatura ambiente, design da bateria e da célula, e pela taxa de carga. Porém, é utilizado em conjunto com outras técnicas e serve como medida de segurança para que a bateria não atinja uma temperatura prejudicial durante o carregamento. Normalmente, o limite máximo é aproximadamente 50 °C.

O método variação da temperatura de corte compara a temperatura ambiente com a temperatura da bateria e termina o carregamento quando esta diferença excede um

determinado valor. Todavia, este método é influenciado por alterações na temperatura ambiente.

O método taxa de incremento da temperatura monitoriza a temperatura ao longo do carregamento da bateria. Quando existir um aumento da temperatura acima de um determinado valor em relação ao valor anterior, o carregamento é terminado. Valores típicos utilizados são 2 °C por minuto ou 1 °C por minuto.

Alguns carregadores utilizam vários métodos em conjunto para detetar o final do carregamento de forma a aumentar a segurança do carregador e a prevenir a ocorrência de situações adversas para as baterias.

As derivações no carregamento destas baterias ocorrem sobretudo em relação ao número de etapas do carregamento aplicado, e no valor da intensidade da corrente aplicada. Alguns carregadores usam uma taxa de carga baixa e constante durante todo o carregamento, enquanto outros utilizam diferentes taxas de carga consoante a tensão da bateria.

De seguida são mencionados alguns exemplos do controlo para estes carregadores. Um método de carga lento consiste na aplicação de corrente constante de cerca de 0,1 C, com tempo limitado para terminar a carga. Este método é conveniente para carregar totalmente a bateria, mas esta deve estar totalmente descarregada para não resultar em sobrecarga excessiva. O carregamento deve terminar quando o carregador fornecer, no máximo, energia que corresponda a cerca de 150% da energia armazenada pela bateria (correspondente a aproximadamente 15 horas de carregamento) [15]. Com esta baixa taxa de carregamento pode ocorrer sobrecarga sem aumento da temperatura. Outro método de carregamento mais rápido consiste na aplicação de uma taxa de corrente constante entre 0,5 C a 1 C, até ocorrer o fim de carga. Utiliza-se como método para detetar o fim de carga a queda de tensão ou a taxa de incremento de temperatura, juntamente com um temporizador e um dispositivo de corte térmico que atua quando a temperatura ultrapassar os 50 °C. Há ainda carregadores que no fim deste estágio incluem outro estágio com corrente constante mas com uma taxa de carga mais baixa. Para evitar a auto-descarga também pode ser incluído um estágio de carga lenta, que consiste na aplicação de uma corrente constante entre 0,005 C e 0,05 C. Este estágio também pode ser usado para restaurar a energia descarregada devido a uso intermitente da bateria [15].

Para a bateria o carregamento é mais eficiente quando emprega uma alta taxa de carregamento, ou seja, é mais eficiente com uma taxa de 1 C do que com uma taxa de 0,1 C. Além que este também demora menos tempo [5], [10], [15], [19], [22], [25].

Alguns autores defendem que o método de carregamento com impulsos de corrente positivo e negativos é o ideal, pois melhora a velocidade e a eficiência de carregamento [25].

#### **2.4.3.5. Baterias de Chumbo-Ácido**

Na bateria de Chumbo-Ácido o Chumbo é o material utilizado no eletrodo negativo. O eletrodo positivo é composto por Óxido de Chumbo, enquanto o Ácido Sulfúrico diluído é o material usado no eletrólito [1]. Esta bateria é designada como bateria Chumbo-Ácido fluida. Na descarga tanto os materiais do eletrodo positivo e negativo são transformados em sulfato de Chumbo.

A bateria de Chumbo-Ácido apresenta várias vantagens. Estas, são produzidas em grande volume, originando uma fonte de energia de relativo baixo custo, aliás este é o tipo de bateria no mercado com custo mais baixo [9]. Além disso, a tecnologia de Chumbo-Ácido da bateria é uma técnica robusta e madura, devido à sua ampla utilização nos últimos 50 anos. Esta bateria também é tolerante à sobrecarga durante o seu carregamento. No entanto, a bateria Chumbo-Ácido não é adequada para descargas profundas (maiores do que 50% da sua capacidade nominal). Quando a profundidade de descarga é maior, o ciclo de vida é reduzido. Também requer manutenção periódica para reposição de água destilada, e o Chumbo é um material tóxico para o meio ambiente [6].

A bateria de Chumbo-Ácido é volumosa, muito pesada, e não é uma boa opção para EVs que desejem longa autonomia, devido a sua baixa densidade de energia. Outra limitação é o seu curto ciclo de vida, que obriga a bateria a ser trocada várias vezes durante o ciclo de vida do automóvel. Efetuar carregamentos rápidos não é igualmente aconselhável nesta bateria, senão reduz-se o seu ciclo de vida.

A maior parte das baterias de Níquel podem ser armazenadas por longos períodos de tempo sem estarem carregadas, e podem ser carregadas apenas quando for necessário utilizá-las, sem danos permanentes. Já a bateria de Chumbo-Ácido não pode permanecer descarregada porque isso é prejudicial para o desempenho da bateria.

Dentro das baterias fluidas existem ainda dois tipos de baterias especiais, as SLI (*starting, lighting and ignition* – partida, iluminação e ignição) e as de ciclo profundo (*deep-cycle*). As SLI são utilizadas por automóveis com motor de combustão interna e a sua principal função é ligar o motor de arranque. As baterias de ciclo profundo permitem uma descarga profunda antes de a bateria ser recarregada. Na Tabela 2.9 está apresentada uma bateria de Chumbo-Ácido do tipo fluida de arranque/SLI [26].

Um importante desenvolvimento na tecnologia da bateria de Chumbo-Ácido é a bateria do tipo válvula regulada de Chumbo-Ácido (*Valve Regulated Lead Acid - VRLA*). Existem dois tipos de baterias VRLA: a bateria AGM (*Absorbed Glass Mat*) e a bateria de gel [5]. Nestas baterias o eletrólito de Ácido Sulfúrico não se encontra no estado líquido, mas antes absorvido em fibra de vidro (nas baterias AGM) ou gelificado em sílica (nas baterias de gel). Estas baterias operam sobre o princípio de recombinação de oxigénio. Esta estrutura reduz a emissão de gases, oxigénio e hidrogénio da VRLA em cerca de 95%. A recombinação de oxigénio é facilitada pelo uso de uma válvula de descompressão, que é fechada durante o funcionamento normal. Quando a pressão aumenta, a válvula abre-se a um valor pré-determinado, ventilando os gases.

Tabela 2.9– Bateria de Chumbo-Ácido fluida do tipo SLI, produzida pela VARTA, modelo *Blue Dynamic D47* [26].

Tensão Nominal:	12 V	
Capacidade:	60 Ah	
Tipo:	Fluida/SLI	
Tamanho (C x L x A):	232 x 173 x 225mm	
Massa:	14,54 kg	

A tecnologia VRLA não precisa de manutenção e evita a perda do eletrólito através da gaseificação. No entanto, a bateria VRLA tem menor capacidade para tratar certo tipo de abusos (como por exemplo, elevadas temperaturas) em relação às convencionais baterias de Chumbo-Ácido [10], [15], [17], [19], [21], [22], [27].

### **Método de Carregamento para Baterias de Chumbo-Ácido.**

O carregamento típico desta bateria é lento e demora entre 12 horas a 14 horas. O carregamento rápido nesta bateria diminui o seu número de ciclos de vida, por isso raramente é aplicado. Este tipo de bateria suporta diferentes métodos de carregamento, como tensão constante, corrente constante, corrente pulsada e corrente constante seguido de tensão constante. Contudo a forma mais utilizada para o carregamento desta bateria consiste na aplicação do algoritmo corrente constante seguido de tensão constante e de um estágio denominado por carga flutuante (*float charge*). Este estágio consiste na aplicação de uma tensão, utilizada com o objetivo de manter a bateria totalmente carregada (de forma a evitar auto-descarga) [15].

Na primeira fase do carregamento é aplicada uma corrente constante até que seja atingida uma tensão pré-determinada. Normalmente, a intensidade da corrente aplicada não deve exceder os 0,2 C e a tensão pré-determinada não deve exceder os 2,4 V por célula a 25 °C. No segundo estágio é aplicada uma tensão constante, normalmente entre 2,3 V e 2,4 V por célula, para 25 °C. Esta fase termina quando a corrente é inferior a um determinado valor, usualmente três por cento da corrente nominal. A última fase tem por objetivo evitar a auto-descarga da bateria, aplicando uma tensão entre 2,25 V e 2,3 V por célula a 25 °C. Os valores definidos para a tensão em cada fase devem ser aumentados para temperaturas inferiores a 25 °C e diminuídos para temperaturas superiores [5], [15], [19], [22], [28].

#### 2.4.3.6. Baterias de Iões de Lítio

O termo "baterias de iões de Lítio" engloba uma família inteira de baterias usando vários materiais (mas o Lítio está sempre presente) para construir vários sistemas eletroquímicos. As baterias de Lítio são uma tecnologia relativamente recente (foi introduzida no início da década de 1990), e ainda se encontra em desenvolvimento [29]. O eléctrodo positivo é composto por um Óxido metálico com Lítio, e o material utilizado no eléctrodo negativo é a grafite (um derivado do Carbono). Utiliza um eletrólito líquido, um sal de Lítio dissolvido em carbonatos orgânicos, normalmente de  $LiPF_6$  (Hexafluorofostato de Lítio), mas a composição exata difere consoante os fabricantes.

Na literatura, além da utilização da fórmula química para designar a bateria consoante o material utilizado, também são empregues abreviaturas. No cátodo podem ser usados vários materiais e os principais são [13]:

- Óxido de Lítio-Cobalto ( $LiCoO_2$ ) - a sua abreviatura é LCO (*lithium cobalt oxide*);
- Lítio Fosfato de Ferro ( $LiFePO_4$ ) - a sua abreviatura é LFP (*lithium iron phosphate*);
- Óxido Lítio-Níquel ( $LiNiO_2$ );
- Óxido de Lítio-Manganésio ( $LiMn_2O_4$ ) - a sua abreviatura é LMO (*lithium manganese oxide*);
- Óxido de Lítio-Alumínio ( $LiAlO_2$ ).

O primeiro material utilizado no cátodo das baterias de Lítio foi o Cobalto, e ainda é o material mais comum hoje em dia. É usado, especialmente, em pequenas aplicações portáteis. A sua grande desvantagem é o preço elevado do Cobalto.

A bateria de iões de Lítio tem elevada energia específica, alta potência específica e não apresenta efeito de memória. É uma bateria “amiga do ambiente”, reciclável e não utiliza na sua construção materiais tóxicos, como o Cádmiu, Chumbo ou Mercúrio [6].

Tem ainda outras vantagens, como um ciclo de vida longo, não precisa de manutenção e operação com uma ampla gama de temperaturas, aproximadamente entre 20 °C e 60 °C. Em comparação com as baterias de NiMH e NiCd as células das baterias de Lítio têm uma tensão mais elevada, na gama de 3 V a 4 V (na maior parte, dependendo da natureza dos materiais escolhidos.), pelo que para atingir a mesma tensão são necessárias menos células. Uma vantagem destas baterias para aplicações em EVs é permitirem uma elevada taxa de carregamento e descarregamento (até 5C), diminuindo assim o tempo necessário para o carregamento destas baterias [2]. Estas características tornam esta tecnologia de bateria a mais promissora para aplicação nas próximas gerações de EVs [1], [9], [14], [15], [27].

As baterias de Lítio também apresentam algumas desvantagens. Destacam-se a falta de segurança e o seu elevado custo inicial (é a tecnologia mais cara), inflacionado ainda pelo custo do sistema de gestão, monitorização e controlo que estas baterias necessitam para evitar sobrecarga, sobretensão e para manter a temperatura dentro dos limites adequados. Todavia, com este sistema de gestão um nível elevado de segurança consegue ser alcançado.

Existe também a bateria Lítio de polímero que apenas difere das baterias de Lítio no material do eletrólito utilizado. Neste caso, o eletrólito é um condutor de polímero sólido ou um gel. Em comparação com as baterias de iões de Lítio é mais segura, porque o eletrólito é um material sólido que não vaza em caso de acidente e devido à sua baixa reatividade com o Lítio, além disso o seu custo é menor [15], [27]. Apesar da densidade de energia e a energia específica serem comparáveis com as das baterias de iões de Lítio, as baterias de Lítio polímero apresentam uma potência específica menor. A bateria Lítio polímero tem ainda a particularidade de poder ser produzida em qualquer tamanho ou forma, o que proporciona flexibilidade para os fabricantes de EVs [5], [10], [13], [17], [21], [30], [31].

Na Tabela 2.10 apresenta-se um módulo composto por 4 células de Lítio, produzido pela empresa *GS Yuasa*, modelo *LEV50-4*, que é utilizado no BEV *Mitsubishi iMiEV* [13], [32].

Na Tabela 2.11 apresenta-se uma célula de iões de Lítio produzida pela *AESC (Automotive Energy Supply Corporation)* que corresponde ao ESS utilizado no veículo *Nissan Leaf*. A bateria deste veículo é composta por 48 módulos, onde cada módulo é composto por 4 células. A tensão total da bateria é 360 V [13], [33].

Tabela 2.10 – Bateria de íões de Lítio produzida pela *GS Yuasa*, modelo *LEV50-4* [30].

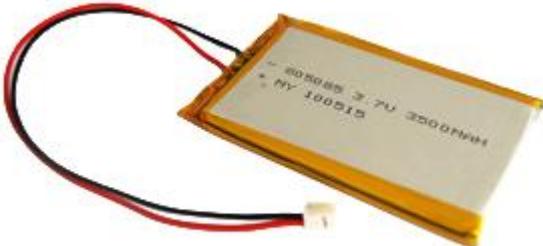
Tensão nominal:	14,8 V (4 células em série)	
Capacidade:	50 Ah	
Energia Específica:	99 Wh/kg	
Tamanho (C x L x A):	175 x 194 x 116 mm	
Massa:	7,5 Kg	

Tabela 2.11 – Célula de íões de Lítio produzida pela *AESC* [33].

Tensão Nominal:	3,8 V	
Capacidade:	33,1 Ah	
Material cátodo:	LiM <sub>2</sub> O <sub>4</sub> com LiNiO <sub>2</sub>	
Tamanho (C x L x E):	290 x 216 x 7,1 mm	
Massa:	799 g	

Na Tabela 2.12 apresenta-se uma célula de íões de Lítio de polímero produzida pela *MYD (MD Technology Limited)* correspondente à série *XX3375* e ao modelo *083375H*. Esta célula destina-se principalmente para aplicações portáteis, como por exemplo, computadores pessoais, telemóveis e câmaras digitais.

Tabela 2.12 - Célula de íões de Lítio produzida pela *MYD* [34].

Tensão Nominal:	3,7 V	
Capacidade:	3 500 mAh	
Resistência:	<50 mΩ	
Tamanho (C x L x E):	75 x 33 x 3,1 mm	
Massa:	67 g	

### Método de Carregamento para as Baterias de Íões de Lítio

Este tipo de baterias tem requisitos críticos que devem ser cumpridos durante o carregamento para evitar a sobrecarga ou o sobreaquecimento. O método de carregamento da bateria de íões de Lítio é semelhante ao método de carregamento da bateria de Chumbo-Ácido, corrente constante seguida de tensão constante, mas sem a fase de carga flutuante para não ocorrer sobrecarga [5]. Contudo, no carregamento das

baterias de íões de Lítio utiliza-se uma tensão por célula maior, mas com menor flexibilidade em relação à tensão de corte, e a taxa de carregamento pode ser maior.

Aumentar a corrente de carga não diminui o tempo de carregamento das baterias de íões de Lítio, porque apesar da duração do estágio corrente constante (fase 1) ser menor a duração do estágio tensão constante (fase 2) vai ser maior. Contudo, para carregamento rápido alguns carregadores apenas aplicam a fase 1, mas no máximo só carregam as células até 85% da sua capacidade.

A tensão na fase 2 é normalmente de 4,1 V ou 4,2 V a 25 °C. O carregamento a uma tensão de 4,2 V oferece uma maior capacidade mas o ciclo de vida é mais curto em comparação com o carregamento com uma tensão de 4,1 V [15], [19].

Apesar do carregamento da bateria de íões de Lítio não utilizar o estágio de carga flutuante ou carga lenta, em alguns carregadores quando a tensão em circuito aberto desce abaixo dos 4 V, devido à auto-descarga voltam a recarregar a célula até os 4,1 V ou 4,2 V através da aplicação de um estágio de carga lenta ou de carga flutuante.

Alguns fabricantes recomendam aplicar uma taxa de carga baixa (0,1 C) quando a célula está muito descarregada (tensão for inferior a 2,9 V), estágio designado por pré-carga. O processo deve manter-se inalterado até que seja atingido um determinado valor de tensão (normalmente 3 V). Quando a tensão for superior aos 3 V aplica-se o método de carregamento corrente constante seguida de tensão constante [22], [25], [28], [35].

#### **2.4.3.7. Comparação de Baterias**

Das diversas tecnologias aquela que apresenta menor custo é a bateria de Chumbo-Ácido. Contudo, também é o sistema de armazenamento que apresenta uma menor relação entre a energia armazenada e o seu peso. A tecnologia de bateria mais cara é a bateria de Lítio. No entanto, como se pode observar pela Tabela 2.13 a relação entre o custo de produção e a energia armazenada (€/kWh) é melhor em comparação com as baterias com base na tecnologia de Níquel.

Pela Figura 2.8 identifica-se que a bateria que apresenta uma maior energia específica e uma maior potência específica em simultâneo são as baterias com base na tecnologia de Lítio. Através da Tabela 2.13 verifica-se que entre as baterias de Níquel a que apresenta uma melhor solução para aplicações em EVs, tendo em conta as diversas características, é a bateria NiMH. A área onde a bateria de NiCd é consideravelmente melhor que a bateria de NiMH é nas suas propriedades de auto-descarga [21]. De todas as tecnologias mencionadas as principais competidoras para utilização em EVs são a

bateria de NiMH e a bateria iões de Lítio. No entanto, com o desenvolvimento progressivo da tecnologia da bateria de Lítio é de esperar que seja esta a tecnologia maioritariamente empregada em EVs.

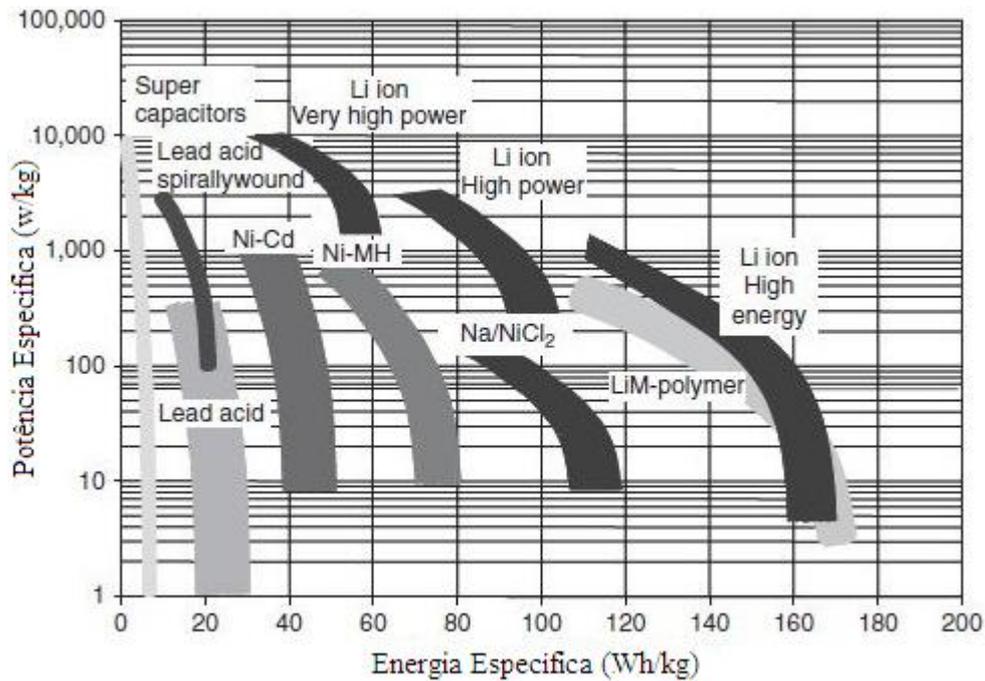


Figura 2.8 – Comparação entre as diversas tecnologias de baterias e o ultracondensador em relação a potência específica e a energia específica (retirado de [13]).

Tabela 2.13- Comparação entre as diversas tecnologias de baterias (retirado de [6]).

Tecnologia da Bateria	Características				
	Energia Específica (Wh/kg)	Densidade de Energia (Wh/l)	Potência específica (W/kg)	Número de Ciclos	Custo de Produção (€/kWh)
Chumbo-Ácido	35	100	180	1000	46
NiCd	50 - 80	300	200	2000	190 – 230
NiMH	70 – 95	180 – 220	200 – 300	< 3000	150 – 190
NiZn	75	140	170 – 260	300	75 – 150
ZEBRA	90 – 120	160	155	1200	175 – 265
Iões de Lítio	118 – 250	200 – 400	200 – 430	2000	115
Lítio-polímero	130 – 225	200 – 250	260 – 450	> 1200	115
LiFePO <sub>4</sub>	120	220	2000 – 4500	> 2000	265
USABC	200	300	400	1000	< 75

Pela Tabela 2.13 verifica-se que ainda não existe nenhuma tecnologia de bateria que satisfaça simultaneamente todos os critérios definidos pela USABC (*United States*

*Advanced Battery Consortium*). A tecnologia que está mais próxima de atingir essas metas é a bateria baseada na tecnologia de Lítio.

## 2.5. Comparação dos Sistemas de Armazenamento de Energia

A Figura 2.9 mostra as características de baterias, ultracondensadores, volantes de inércia e células de combustível, em comparação com a gasolina.

Na Figura 2.9 verifica-se que a energia específica da célula de combustível é comparável com a da gasolina, no entanto, a sua potência específica é muito menor que a da gasolina. Assim o desempenho de um veículo elétrico a partir de células de combustível pode ser inferior em comparação com um veículo convencional equipado com ICE.

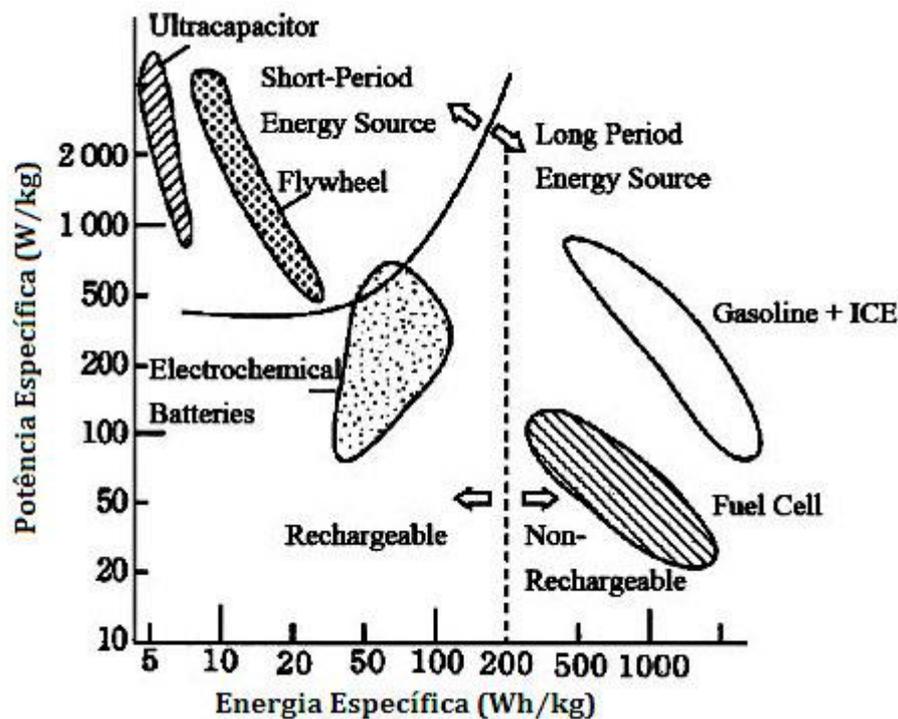


Figura 2.9 – Características dos vários sistemas de armazenamento de energia (retirado de [4]).

As baterias apresentam uma potência específica equiparável à gasolina. Porém a sua energia específica em comparação com a gasolina é muito menor. O UC é o ESS que apresenta uma maior potência específica. A Figura 2.9 também indica que, atualmente, nenhum dispositivo de armazenamento de energia consegue atender a todas as exigências dos EVs, para que estes possam ter um funcionamento equiparável aos veículos tradicionais com ICE. Todavia, pode-se utilizar sistemas de armazenamento de energia que combinam dois ou mais dispositivos, para limitar certos inconvenientes de cada dispositivo.

## 2.6. Algoritmos de Carregamento para Baterias

Devido à natureza diferente dos diversos tipos de baterias, nem todas podem ser carregadas com o mesmo método, nem com as mesmas tensões ou correntes. Por exemplo, enquanto a bateria de Chumbo-Ácido suporta a sobrecarga, já na bateria de íões de Lítio a ocorrência de sobrecarga durante o carregamento é extremamente prejudicial. Por isso, existem vários métodos para efetuar o carregamento de uma bateria. Nesta secção são apresentados os mais utilizados.

A escolha de um algoritmo de carregamento deve ter em consideração o tipo de bateria a que se destina, bem como as suas características de modo que o carregamento desta ocorra em segurança. Também é recomendada a leitura do manual de instruções da bateria para verificar se não existem recomendações efetuadas pelo fabricante. Caso na escolha do método de carregamento as recomendações do fabricante não sejam tidas em conta, pode ocorrer uma deterioração da bateria. Esta detioração pode ser, por exemplo, devido a sobrecarga ou sobreaquecimento. O tempo necessário para efetuar o carregamento da bateria, é outro fator a ter em consideração.

É natural que o processo de carregamento da bateria seja constituído por vários e diferentes algoritmos de carregamentos, designados por estágios de carregamento.

### 2.6.1. Algoritmo de Corrente Constante

Este algoritmo é um método de carregamento simples composto por apenas um único estágio. Na Figura 2.10, está ilustrada a evolução da tensão e da corrente durante o processo de carregamento da bateria.

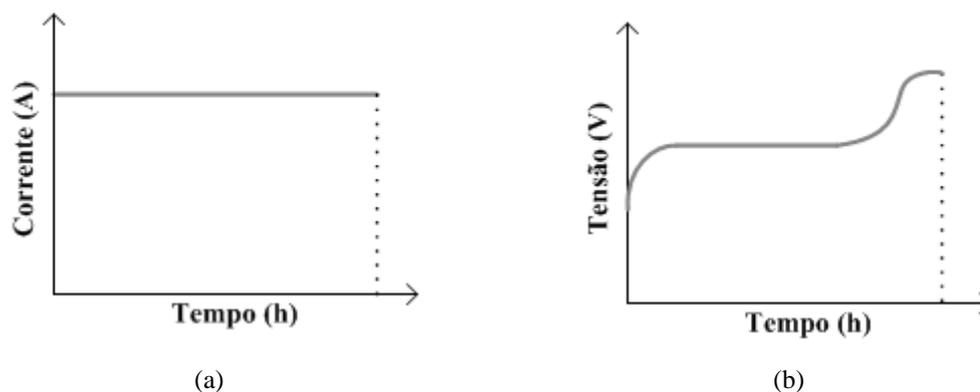


Figura 2.10 – Formas de onda na bateria quando carregada com o algoritmo de corrente constante: (a) Corrente aplicada na bateria; (b) Tensão nos terminais da bateria.

Este algoritmo consiste na aplicação de corrente constante à bateria, pelo que o carregador funciona como uma fonte de corrente constante. O processo de carregamento

termina quando a bateria atinge a tensão nominal. A utilização de uma corrente de carregamento pequena prolonga o tempo de carregamento. Para diminuir o tempo de carregamento aumenta-se a intensidade da corrente constante. Contudo, aumentando a intensidade de corrente aplicada aumenta-se a temperatura da bateria, e além disso, a probabilidade de ocorrer sobrecarga é maior. Este método é normalmente utilizado para baterias de Níquel. [5], [15], [36], [37].

### 2.6.2. Algoritmo de Tensão Constante

O algoritmo de tensão constante é composto por um único estágio sendo o seu controlo simples de implementar. Este consiste em aplicar uma tensão constante à bateria, pelo que o carregador funciona como uma fonte de tensão constante. A corrente de carregamento é determinada pelas características eletroquímicas da bateria. Consoante a tensão da bateria se aproxima do seu valor nominal, a corrente de carregamento vai diminuindo. O fim do carregamento é dado pela intensidade da corrente e acontece quando ela se aproxima de zero. Porém, em alguns casos, durante a fase inicial do carregamento a corrente é limitada para proteger os dispositivos. Isto acontece porque se o SoC da bateria for muito baixo pode resultar numa corrente de carregamento elevada, durante a fase inicial do carregamento [5], [15], [36], [37]. Na Figura 2.11 está representada a evolução da tensão e da corrente, ao longo do tempo com este algoritmo de carregamento.

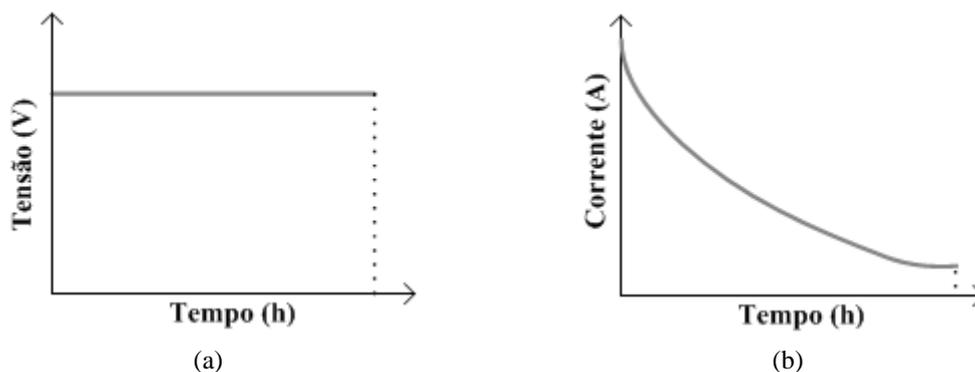


Figura 2.11 - Formas de onda na bateria quando carregada com o algoritmo de tensão constante: (a) Tensão aplicada na bateria; (b) Corrente na bateria durante o carregamento.

### 2.6.3. Algoritmo Corrente Constante Seguido de Tensão Constante

O algoritmo corrente constante seguido de tensão constante combina os dois algoritmos apresentados anteriormente. Na primeira etapa de carregamento, a bateria é carregada por uma corrente constante provocando um aumento da tensão da bateria. Este estágio termina quando a tensão da bateria atingir um valor pré-definido,

especificado pelo fabricante para não danificar a bateria. No final deste estágio, a bateria encontra-se entre 60% a 80% do seu SoC. Na segunda fase, uma tensão constante é aplicada para o carregamento da bateria até que a corrente seja inferior a um valor pré-definido.

Este algoritmo de carregamento é utilizado em baterias de íões de Lítio e em baterias de Chumbo-Ácido [5], [15], [36], [37]. Na Figura 2.12 está representada a evolução da tensão e da corrente ao longo do tempo com este algoritmo de carregamento.

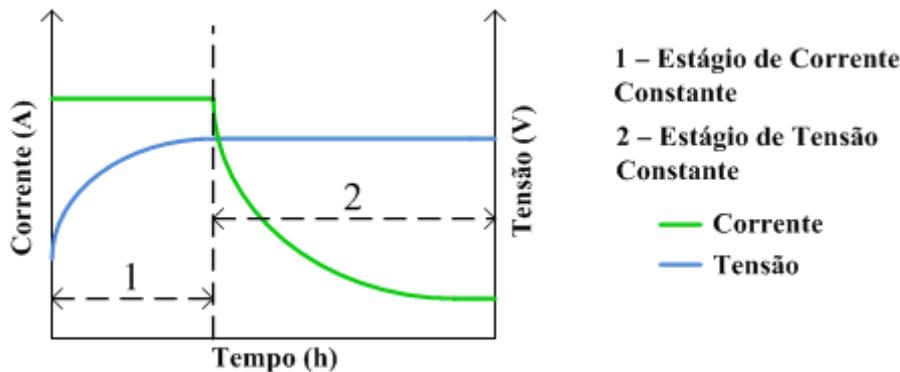


Figura 2.12 – Forma de onda da tensão e da corrente na bateria durante o carregamento com o algoritmo corrente constante seguido de tensão constante.

#### 2.6.4. Algoritmo de Pulsos de Corrente Positiva

Este algoritmo de carregamento consiste na aplicação de pulsos de corrente periódicos à bateria. A Figura 2.13 mostra a forma de onda de corrente neste método de carregamento.

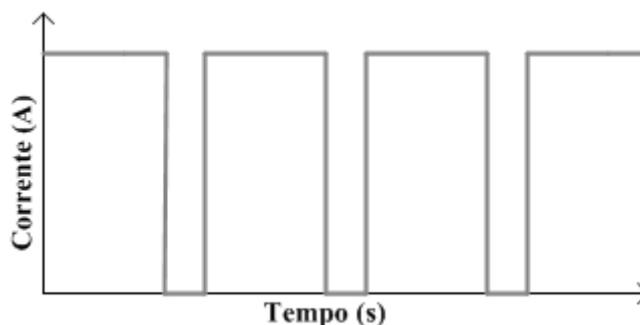


Figura 2.13 – Forma de onda da corrente no algoritmo de carregamento de pulsos de corrente positivos.

Neste algoritmo, durante o processo de carregamento existe um período de descanso/relaxamento, onde não é aplicada a corrente à bateria. A taxa de carregamento é controlada variando a amplitude do pulso, bem como o seu *duty-cycle*. Normalmente a duração do pulso de corrente é de cerca de um segundo, com cerca de 20 ms a 30 ms de descanso. O objetivo deste método é diminuir o risco de sobrecarga e aumentar a

eficiência do carregamento. O período de descanso permite estabilizar as reações químicas na bateria, diminuindo a temperatura da mesma. Outra vantagem do período de descanso é a redução das reações químicas indesejáveis, tais como, formação de cristais que provocam a diminuição do ciclo de vida [19], [36], [37].

### 2.6.5. Algoritmo de Pulsos de Corrente Positiva e Negativa

O algoritmo de carregamento com pulsos de corrente positiva e negativa (em inglês chamado de *Reflex*) é uma melhoria do método de carregamento de pulsos de corrente positiva. Neste algoritmo é adicionado um pulso de corrente negativo (pulso de descarga da bateria), de curta duração em comparação com o algoritmo pulsos de corrente positiva, para acelerar o processo de estabilização das reações químicas. Em comparação com o método anterior a complexidade do carregador aumenta [19], [36], [37]. A Figura 2.14 mostra a forma de onda da corrente para o método de carregamento pulsos de corrente positiva e negativa.

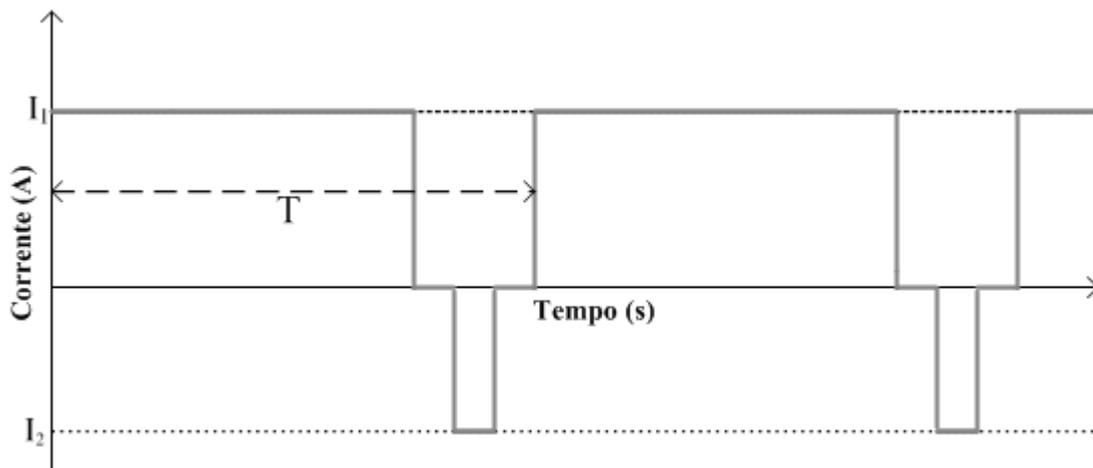


Figura 2.14 - Forma de onda da corrente no algoritmo de carregamento de pulsos de corrente positiva e negativa.

## 2.7. Conclusão

Neste capítulo começou-se por mencionar as diferentes tecnologias de armazenamento de energia utilizadas em EVs, com ênfase na tecnologia das baterias. Em relação às baterias começou-se por explicar quais as características necessárias para utilização desta tecnologia em EVs, e quais as tecnologias existentes no mercado que mais se adaptam as necessidades dos EVs. Por fim, além de se apresentar os diferentes algoritmos de carregamento indica-se, entre estes, quais os mais aconselhados para cada tecnologia de baterias, de modo a que o carregamento destas possa ser efetuado sem as danificar.

Com o decorrer dos anos a tecnologia das baterias tem evoluído, mas estas ainda não satisfazem os requisitos desejados para aplicações em mobilidade elétrica. Entre os diferentes sistemas de baterias, a tecnologia à base de Lítio é a que se aproxima mais dos pressupostos necessários para aplicação em mobilidade elétrica, ao nível da densidade de energia, número de ciclos... Visto que esta tecnologia de bateria ainda é recente, espera-se que nas próximas décadas atinja a maturidade e consiga satisfazer plenamente os objetivos traçados para aplicações em veículos elétricos, incluindo o seu preço, que é atualmente a sua maior desvantagem.

# CAPÍTULO 3

## Sistema de Gestão das Baterias e Postos de Carregamento

### 3.1. Introdução

Como já foi mencionado, anteriormente, o banco de baterias é um componente vital e de extrema importância em mobilidade elétrica, especialmente em veículos elétricos. Como tal, este deve ser gerido de forma a obter-se sempre o melhor rendimento possível, desde que garanta o seu funcionamento dentro dos seus limites de segurança, definidos pelo construtor (quer ao nível da temperatura, estado de carga, corrente de carga ou descarga, entre outros) com o intuito de maximizar a sua vida útil. Nos veículos elétricos o sistema responsável pela execução dessa função é o sistema de gestão de baterias (*Battery Management Systems* - BMS).

Uma questão igualmente importante para a mobilidade elétrica, e que também está diretamente relacionada com as baterias é o tempo necessário para o recarregamento destas. Assim, neste capítulo para além de ser descrita a tecnologia e as funcionalidades dos sistemas de gestão de baterias apresenta-se igualmente as diferentes soluções existentes para o carregamento do veículo elétrico a partir da rede elétrica.

### 3.2. Sistema de Gestão de Baterias

O BMS é um sistema de gestão e monitorização de baterias, utilizado para gerir um conjunto de baterias com o intuito de se obter o melhor rendimento possível, maximizar o seu tempo útil de vida e garantir o funcionamento dentro dos seus valores nominais. Para tal propósito devem ser usados circuitos de proteção. Estes circuitos de proteção são usados para proteger os equipamentos conectados ao veículo elétrico (*Electric Vehicle* - EV), bem como os utilizadores. Depois, em termos financeiros o sistema de baterias é responsável por uma grande parcela do custo de alguns EVs e por isso, a falha prematura deste pode significar custos de reparação superiores ao valor do veículo.

A complexidade de um BMS pode variar amplamente da aplicação a que se destina. Mesmo em EVs a complexidade deste depende do tipo de bateria utilizada, dos requisitos e condições de funcionamento do EV a que se destina.

O BMS é considerado um sistema com hardware e software próprio que está conectado a um carregador de baterias e a um banco de baterias, podendo estar ou não integrado dentro do carregador [38]. Este normalmente controla o funcionamento das baterias utilizadas num EV, mas também pode ser que o controlo destas seja efetuado por um controlador de nível superior, como o controlador do EV, que toma a decisão com base nas informações provenientes do BMS.

De uma forma geral, as principais tarefas de um BMS, para aplicação em EVs são [13], [19], [39], [40]:

- Monitorização e medição em tempo real e com precisão dos diversos parâmetros de operação das baterias como temperatura, tensão e corrente;
- Proteção das baterias contra sobrecarga e descarga profunda;
- Controlo da corrente, tensão e temperatura das baterias;
- Determinação do estado de saúde (*State of Health* – SoH) das baterias;
- Cálculo do estado de carga (*State of Charge* – SoC) das baterias;
- Cálculo da profundidade de descarga (*Depth of Discharge* – DoD) das baterias;
- Comunicação com outros subsistemas do EV (inclui comunicar/informar o condutor sobre os diversos parâmetros de operação das baterias e situações de anomalia);
- Deve calcular a autonomia do veículo com a energia disponível naquele momento nas baterias;
- Equalização da energia nas baterias, distribuindo uniformemente a energia por cada bateria;
- Histórico ou livro de registo das diversas variáveis de monitorização como número de ciclos, tensões máximas, tensões mínimas, temperaturas e correntes de carga e descarga. Estas variáveis ou parâmetros devem ser guardadas para posterior avaliação (para determinar se as baterias têm sido objeto de abusos ou para determinar o estado de saúde destas).

Dependendo do tipo de bateria e das suas características eletroquímicas, algumas tarefas podem ser mais críticas e importantes do que outras. Alguns autores reagrupam estas tarefas em cinco unidades básicas do BMS que são a monitorização, o cálculo, o controlo, a comunicação e o balanceamento sendo estas unidades responsáveis por executar as tarefas descritas anteriormente [13]. Outros apenas dividem em três

unidades básicas: sistema de proteção e monitorização, sistema de balanceamento e a unidade inteligente da bateria [41].

A comunicação com o condutor pode ser efetuada de diversas formas. Pode ser tão simples como acender um díodo emissor de luz (*light-emitting diode* - LED) para indicar que alguma anomalia ocorreu, ou pode ser mais complexo envolvendo algum protocolo de comunicação como SPI (*Serial Peripheral Interface*) ou barramento CAN (*Controller Area Network*) [13].

Um BMS é construído com base em duas arquiteturas básicas: centralizada e distribuída [13]. Numa arquitetura centralizada as funções são incorporadas num sistema único, que é responsável por todas as funções do BMS. Numa arquitetura distribuída o banco de baterias é dividido em módulos ou subsistemas, normalmente chamados de escravos (*slave*), onde cada escravo é responsável por um número similar de baterias. Existe uma unidade de controlo principal, normalmente chamada de mestre (*master*), que coordena a atividade de todos os escravos. A unidade principal comunica e troca informações com todos os módulos. Esta abordagem permite uma maior flexibilidade no projeto do BMS, mas aumenta o número de conexões [13]. Normalmente em EVs é preferida a arquitetura distribuída [13].

A Figura 3.1 mostra o *layout* típico de um BMS para aplicação em EVs e a sua relação com outros sistemas elétricos do automóvel [41].

### 3.2.1. Técnicas para Medição da Corrente, Tensão e Temperatura

Para medição da corrente no banco de baterias podem ser usadas duas técnicas: o *shunt* resistivo ou sensores de efeito *Hall*. O *shunt* resistivo consiste numa resistência de baixo valor colocada em série com o banco de baterias. Esta resistência ao ser percorrida pela corrente origina uma queda de tensão. Medindo esta queda de tensão com um conversor analógico para digital (*Analog to Digital Converter* – ADC) consegue-se obter o valor da corrente.

Para medição da tensão das baterias podem ser usadas várias soluções. A mais simples consiste no tradicional divisor resistivo. Contudo, se a tensão a medir for muito elevada a resolução obtida pode ser muito baixa. Sensores de efeito *Hall* também podem ser utilizados para medir tensão, mas é necessário utilizar uma resistência de entrada, porque o sinal que estes medem é em corrente. Outra forma para medir a tensão em cada bateria é recorrer a amplificadores isolados. No entanto, estes são bastantes caros. Em [42] é apresentada uma ideia onde se seleciona através de relés de estado sólido a bateria que se pretende medir. Também é possível recorrer a optoacopladores lineares.

A diferença para os tradicionais optoacopladores reside no facto nos optoacopladores lineares a tensão de saída é proporcional à tensão de entrada. Ou então pode-se recorrer a uma arquitetura modular, onde cada bateria tem um microcontrolador dedicado para medir a tensão que comunica com o microcontrolador central.

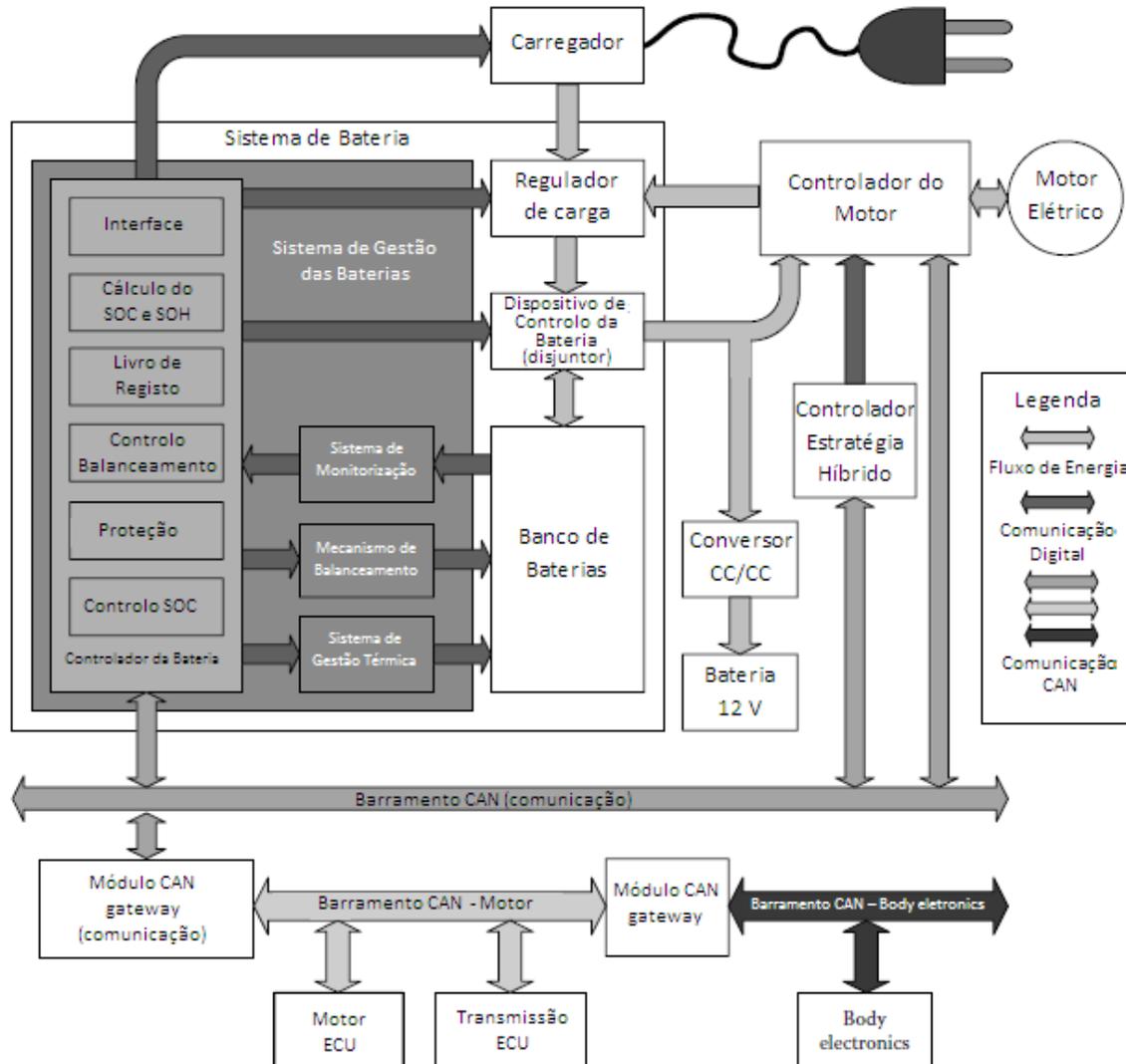


Figura 3.1 - Layout de um BMS típico para EVs (adaptado de [41]).

Para medir a temperatura também podem ser usados diferentes tipos de sensores como termopares, termístores, termómetros de resistência (*Resistance Temperature Detector* - RTD), ou sensores de silício [43].

### 3.2.2. Métodos de Balanceamento

O balanceamento/igualização é necessário para distribuir de forma equitativa a energia por todas as baterias existentes num banco de baterias.

As causas responsáveis pelo desequilíbrio da energia podem ser internas e externas à própria bateria [44]. As causas internas incluem pequenas variações em

alguns parâmetros das baterias que acontecem durante a sua produção, o que origina baterias com diferentes taxas de auto-descarga e/ou com resistência interna diferente. Entre as fontes externas salientam-se a diferença térmica existente entre as baterias do mesmo banco num EV, durante o seu funcionamento ou alguns circuitos integrados de proteção conectados às baterias com consumo desigual.

A desigualdade de energia armazenada em cada bateria origina que, durante o carregamento, algumas baterias alcancem primeiro o nível máximo de carga. Durante o processo de descarga, algumas das baterias atingem primeiro o limite máximo de descarga recomendado pelo fabricante. Como consequência, não se obtém o rendimento máximo que as baterias podem proporcionar. Quando alguma bateria atinge o limite máximo ou o limite mínimo de carga recomendado pelo fabricante o respetivo processo é finalizado, senão corre-se o risco de danificar as baterias. Este problema é ainda mais grave quando o banco de baterias é composto por um elevado número de baterias (formando um sistema de baterias de alta tensão). A solução para este problema passa pelo balanceamento entre baterias, extraíndo-se a energia das baterias que estão mais carregadas para as que estão menos carregadas ou dissipando energia das baterias mais carregadas. Todavia, este processo não tem a mesma importância para todos os tipos de bateria. As baterias de íões de Lítio são muito sensíveis à sobrecarga, enquanto as baterias de Chumbo e Níquel são mais tolerantes e podem ser colocadas em sobrecarga sem danos permanentes [44], [45]. Em [41] o autor afirma que para as baterias de Lítio o balanceamento ativo é o único método de equalização aplicável, pois a temperatura nestas baterias deve ser controlada rigorosamente na faixa de operação de segurança.

Os métodos de equalização das baterias podem ser divididos em duas categorias: balanceamento passivo e balanceamento ativo.

### **Balanceamento Passivo**

O balanceamento passivo é mais simples de controlar e implementar que o balanceamento ativo. O balanceamento passivo consiste na dissipação da energia das baterias com mais energia armazenada, em resistências até todas as baterias atingirem um SoC equivalente ou até estas atingirem um SoC de referência [46], [47].

O desperdício de energia representa a maior desvantagem do método passivo. Para além disso, é necessário um sistema de gestão térmica rigoroso devido à dissipação de energia.

Na Figura 3.2 encontra-se um esquemático do circuito para esta topologia. A mesma topologia pode funcionar em dois modos, modo contínuo ou modo detecção. Este método é o mais utilizado atualmente em sistemas de balanceamento.

No modo de detecção cada interruptor pode ser controlado individualmente, pelo que necessita de um sistema de controlo mais complexo. Sempre que houver desigualdades entre o SoC das baterias o carregamento é parado, para dissipar a energia das baterias em excesso. Quando todas as baterias voltarem a deter um SoC equivalente o carregamento é reiniciado [44], [48].

No modo contínuo todos os interruptores são controlados pelo mesmo sinal, que só é ativado durante o carregamento. As baterias com tensões mais elevadas terão correntes de carga menores que as baterias que têm tensões menores [44], [48].

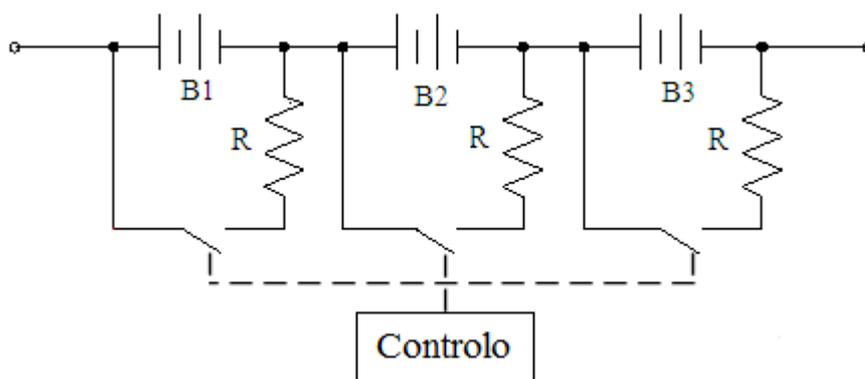


Figura 3.2 - Circuito de balanceamento passivo.

### Balanceamento Ativo

O balanceamento ativo transfere energia entre baterias com ajuda de circuitos e componentes externos. Podem ser utilizadas três estratégias diferentes para fazer o balanceamento entre baterias:

- Transferir a energia das baterias com maior SoC para as baterias com menor SoC;
- Extrair energia das baterias com um SoC mais elevado para o banco de baterias;
- Extrair energia do banco de baterias para as baterias com um SoC menor.

Existe uma grande variedade de métodos utilizados para balanceamento ativo, baseados em condensadores, ou em conversores de energia. Na literatura são apresentadas quatro topologias diferentes baseadas em condensadores, apresentadas na Figura 3.3.

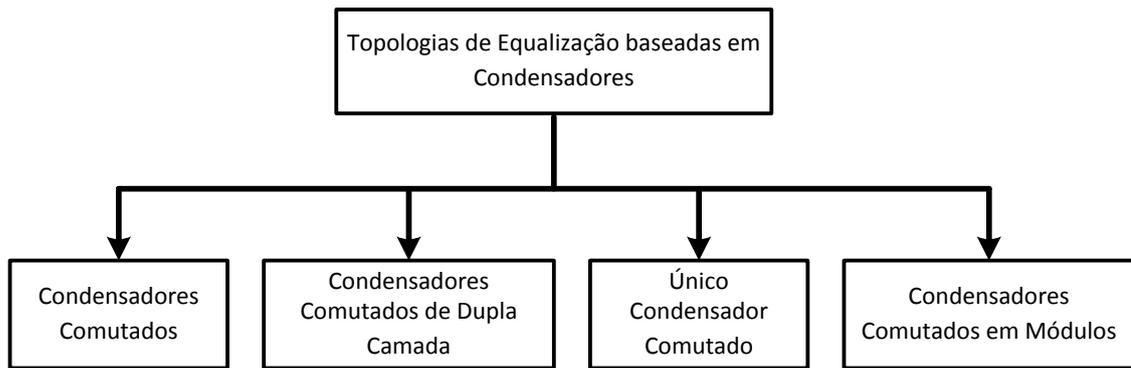


Figura 3.3 - Topologias de equalização baseadas em condensadores.

### Condensadores Comutados

No método de balanceamento comutação de condensadores (também é chamado de cascata de condensadores) são necessários  $n-1$  condensadores e  $2n$  semicondutores controlados para um conjunto de  $n$  baterias [44].

O esquema desta topologia está representado na Figura 3.4. Este consiste na utilização dos condensadores em cascata e que comutam em simultâneo, para transferir energia entre duas baterias adjacentes. Os condensadores transferem sempre a energia para a bateria seguinte (transferem a energia da bateria 1 para a bateria 2, da bateria 2 para a bateria 3 e assim sucessivamente, até transferir da bateria  $n-1$  para a bateria  $n$ , ou o inverso). A energia ( $E$ ) armazenada num condensador depende da tensão ( $V$ ) e capacidade ( $C$ ) (de acordo com a equação (3.1)). Então, a energia transferida entre as duas baterias vizinhas depende da diferença de tensão entre elas. Se a energia a transferir for entre baterias que se encontram em extremidades opostas, o tempo necessário para o balanceamento é maior [47–49].

Este método funciona tanto na carga como descarga das baterias [44], [50].

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \tag{3.1}$$

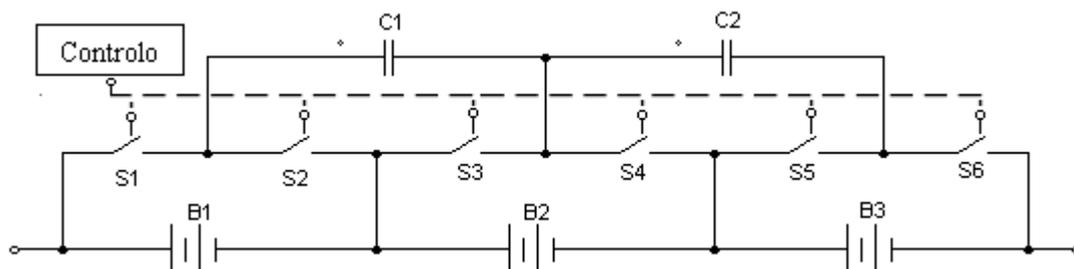


Figura 3.4 – Circuito de balanceamento da topologia condensadores comutados.

Para simplificação de escrita, nesta dissertação para esta topologia a seguinte terminologia:

- Braço para designar o circuito composto por os dois semicondutores controlados conectados à mesma bateria (por exemplo, o semicondutor controlado  $s1$  e  $s2$  formam um braço);
- Semicondutor controlado superior para designar o semicondutor controlado que se encontra conectado ao polo positivo da bateria (por exemplo, o semicondutor controlado  $s1$ ,  $s3$  e  $s5$ );
- Semicondutor controlado inferior para se referir ao semicondutor controlado que se encontra conectado ao polo negativo da bateria (por exemplo, o semicondutor controlado  $s2$ ,  $s4$  e  $s6$ ).

Segundo [51] o valor do condensador pode ser calculado através das equações (3.2) e (3.3). Onde  $v_N - v_{N-1}$  representa a diferença de tensão entre duas baterias adjacentes,  $f_{comutação}$  representa a frequência de comutação,  $C$  representa o valor do condensador,  $I_C$  representa a corrente no condensador e  $R_{min}$  representa a resistência mínima do circuito (resistência série do condensador e resistência interna do semicondutor controlado).

$$I_C = \frac{v_N - v_{N-1}}{R_{eq}} \quad (3.2)$$

$$R_{eq} = \frac{1}{f_{comutação} C} + R_{min} \quad (3.3)$$

Para o cálculo do condensador define-se a corrente no condensador desejada (em função da capacidade da bateria) para uma determinada diferença de tensão entre as baterias. Segundo [51] os valores da corrente no condensador variam entre  $C\text{-rate}/2000$  e  $C\text{-rate}/500$  para uma diferença de tensão de 10 mV por causa da limitação do  $R_{min}$ .

### Único Condensador Comutado

O método comutação de um único condensador é uma derivação do método comutação de condensadores. A diferença reside no facto de só utilizar um condensador, Figura 3.5 e Figura 3.6. Esta topologia pode ser implementada usando 2 configurações diferentes. Na primeira configuração o número de semicondutores controlados necessários são  $n+5$ , Figura 3.5 [47], e na segunda configuração são necessários  $2n$  semicondutores controlados, Figura 3.5.

A estratégia de controlo mais simples consiste em ligar o condensador paralelamente a cada bateria de forma sequencial (liga primeira a bateria 1, depois a bateria 2 e assim sucessivamente até à bateria  $n$ ). Com esta estratégia de controlo a velocidade do balanceamento é apenas  $1/n$  em comparação com o método comutação de

condensadores. No entanto, com uma estratégia de controlo mais avançada (por exemplo, comutando o condensador entre as duas baterias com maior diferença de SoC entre elas), o tempo necessário para o balanceamento das baterias será menor. Esta estratégia de controlo é vantajosa, especialmente, em situações que as baterias que necessitam de ser equalizadas se encontram em extremidades opostas no banco de baterias [44], [47], [48].

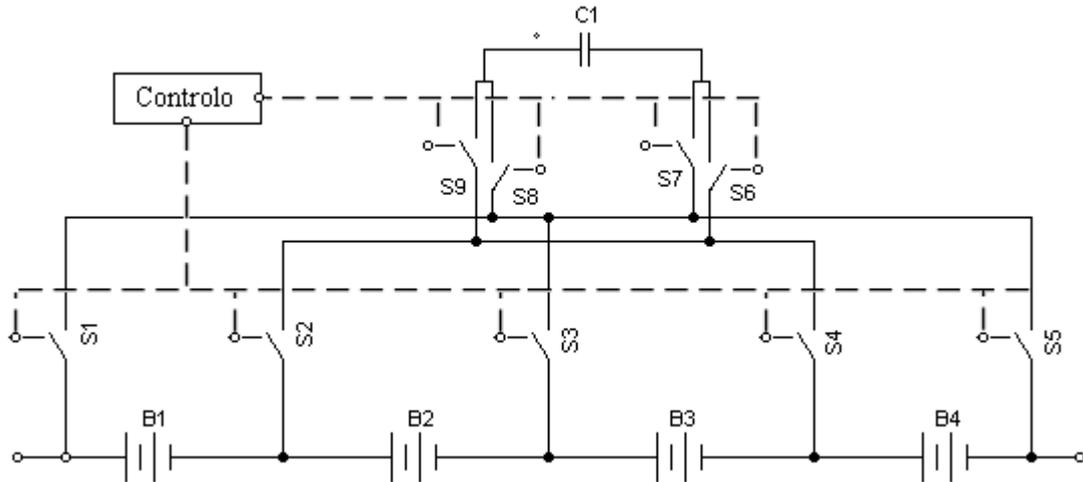


Figura 3.5 – Circuito de balanceamento da topologia comutação de um único condensador com  $n+5$  dispositivos de comutação.

A utilização de condensadores para equilibrar as baterias apresenta algumas desvantagens. As perdas nos condensadores limitam a eficiência destes métodos, e uma parte do equilíbrio é conseguido à custa da energia dissipada na resistência do dispositivo de comutação e do condensador sob a forma de calor [47]. Segundo [48] a eficiência máxima que se consegue obter é 50%. Outro problema é o tempo de balanceamento que é longo quando a diferença de tensão entre as baterias é baixa. Depois, diferenças elevadas entre a tensão das baterias só existem quando a profundidade de descarga é elevada [52].

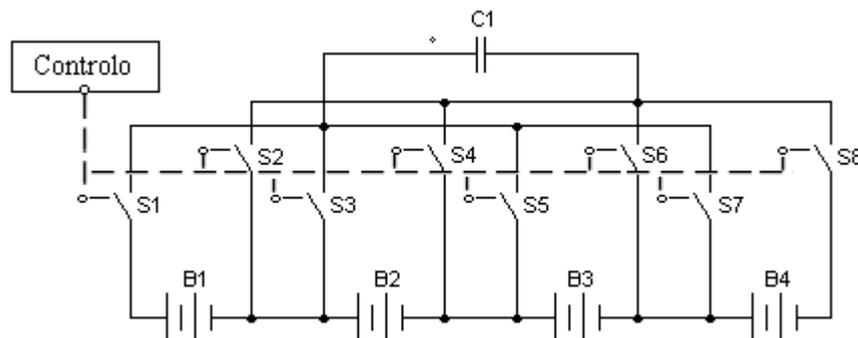


Figura 3.6 - - Circuito de balanceamento da topologia comutação de um único condensador com  $2n$  dispositivos de comutação

### Condensadores Comutados de Dupla Camada

O método condensadores comutados de dupla camada também é uma derivação do método condensadores comutados. A diferença reside no facto deste método adicionar um condensador em paralelo a cada dois condensadores da primeira camada, originando assim mais uma camada de condensadores, ver Figura 3.7. Em comparação com o método condensadores comutados o número de condensadores necessários aumenta 50%, mas em contrapartida o tempo de equalização pode ser reduzido para metade [53], [54].

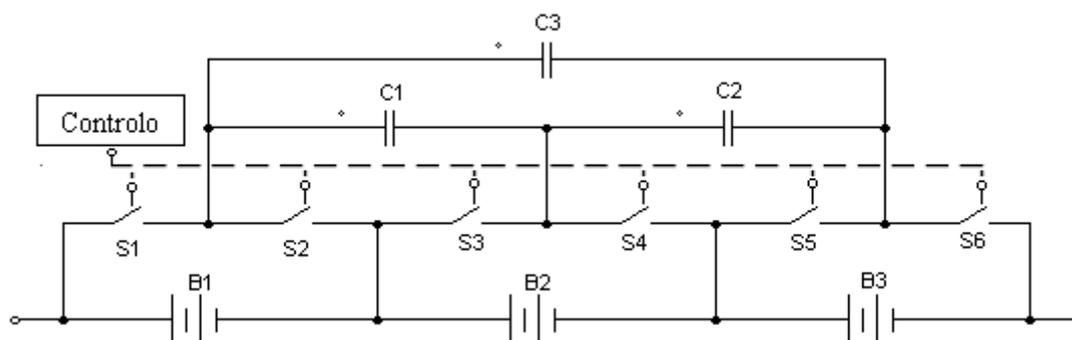


Figura 3.7 – Circuito de equalização da topologia condensadores comutados de dupla camada.

### Condensadores Comutados em Módulos

Normalmente, o sistema de baterias de um EV é composto por um determinado número de baterias/células ligadas em série e paralelo, denominado por banco de baterias. Este método divide o banco de bateria em módulos, onde todos os módulos são formados por um número equivalente de baterias, ver Figura 3.8. Por exemplo, um banco de baterias composto por 15 baterias, pode ser dividido em 3 módulos cada um composto por 5 baterias.

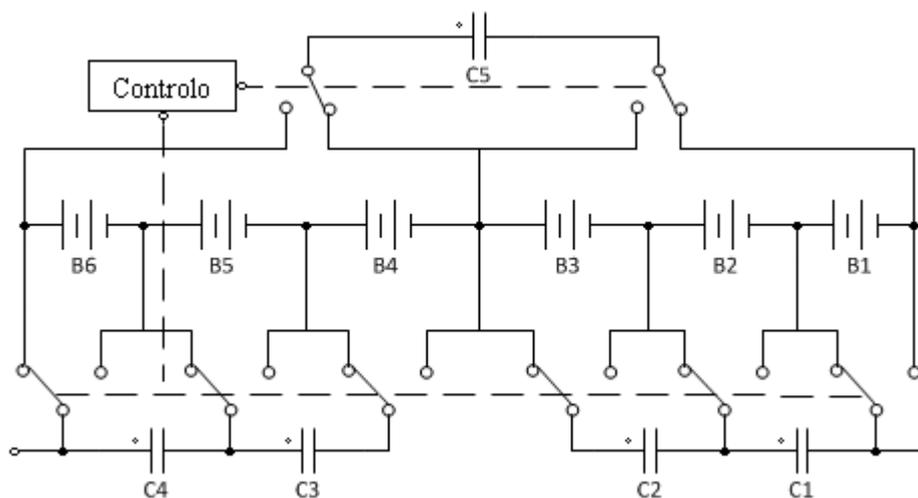


Figura 3.8 - - Circuito de equalização da topologia de condensadores comutados.

O princípio de funcionamento é o seguinte: em cada módulo existe um sistema de balanceamento independente, depois existe em paralelo outro sistema de equalização para realizar a compensação entre módulos. Esta melhoria é usualmente aplicada à topologia de condensadores comutados.

Apresenta como vantagens a diminuição do tempo necessário para o balanceamento em comparação com a topologia convencional. Como desvantagens precisa de  $2n+4$  dispositivos de comutação bidirecionais,  $n-1$  condensadores de baixa tensão e  $m-1$  condensadores de alta tensão, para  $n$  baterias/células e  $m$  módulos [44], [54–56].

Existem várias topologias de balanceamento baseadas em conversores *boost*, conversores *boost-buck*, conversores *cûk*, conversores em ponte completa e conversor *CC/CC flyback*. De seguida são apresentadas algumas dessas topologias.

### Transformador Comutado

O método transformador comutado utiliza um transformador para transferir energia do banco de baterias para uma única bateria (ver Figura 3.9). O primário do transformador está ligado ao banco de baterias, enquanto o secundário é ligado a uma série de dispositivos de comutação, que são utilizados para seleccionar a bateria à qual se conecta. O controlador deteta a bateria com menor tensão e controla os interruptores para ligar o transformador a essa bateria.

Este método permite equilibrar as baterias rapidamente. Porém, apresenta como desvantagens elevada complexidade, baixa eficiência devido às perdas nos dispositivos de comutação e no transformador, e elevado custo [44], [48].

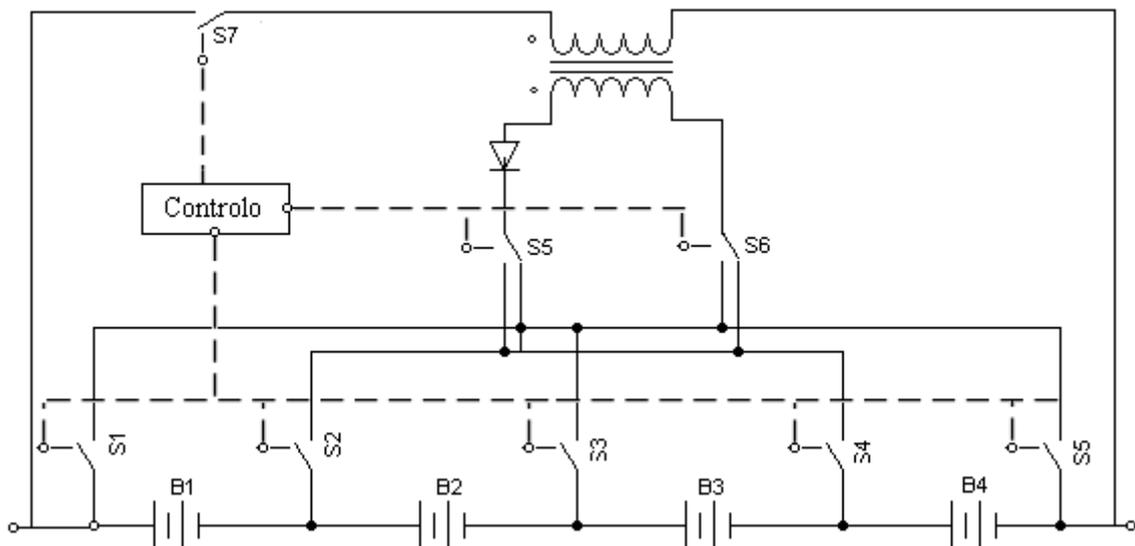


Figura 3.9 – Circuito de balanceamento do transformador comutado.

### Transformador Compartilhado

No método transformador compartilhado, o transformador tem um único núcleo magnético possuindo um *tap* no secundário para cada bateria. Por isso, o transformador é personalizado consoante o número de baterias, tornando assim difícil adicionar baterias posteriormente. Na Figura 3.10 está representado o esquemático do método transformador compartilhado.

A energia é retirada do banco de baterias e entregue individualmente a cada bateria. O secundário com menor reactância, devido à menor tensão, terá uma maior corrente induzida [47]. Deste modo, a corrente de balanceamento de cada bateria é inversamente proporcional ao seu SoC.

Esta topologia apresenta como desvantagens um circuito complexo e o seu custo é elevado. No entanto, apresenta menos perdas por comutação [44], [47].

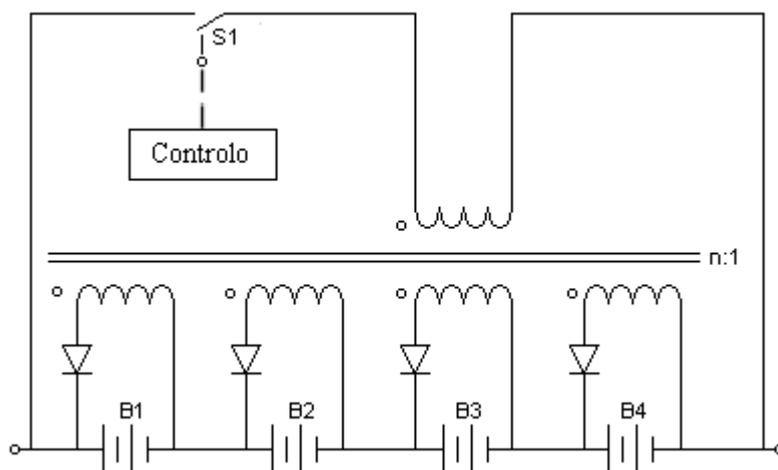


Figura 3.10 – Circuito de balanceamento do transformador compartilhado.

### Múltiplos Transformadores

O método de múltiplos transformadores consiste na utilização de um transformador para cada bateria. A vantagem deste método é que cada bateria tem o seu próprio núcleo magnético permitindo assim adicionar baterias sem alterar o sistema de controlo [44], [47], [48].

Na Figura 3.11 encontra-se o circuito deste método de balanceamento. Segundo [47] se a corrente total for menor que 100 mA/Ah, o dispositivo pode funcionar continuamente com uma eficiência superior aos outros métodos ativos.

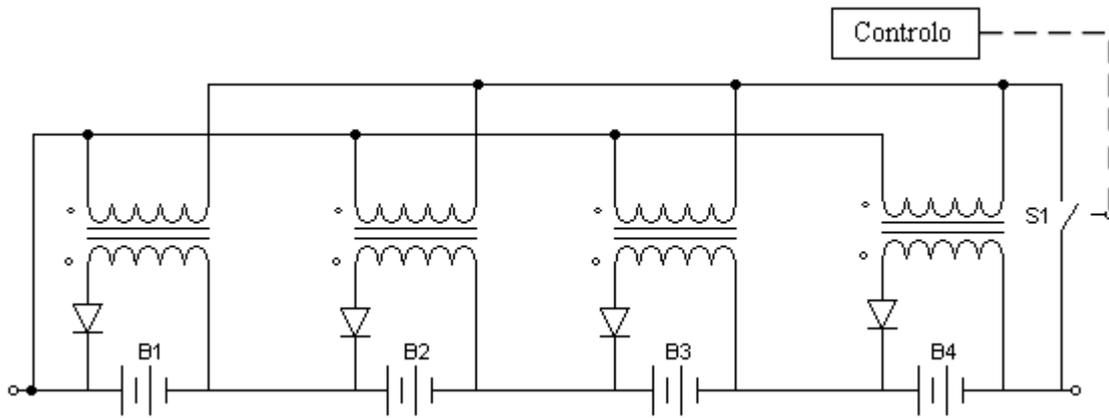


Figura 3.11 – Circuito de balanceamento com múltiplos transformadores.

### Conversores *Boost* e *Buck-Boost*

Existem várias topologias baseadas em conversores *boost* e em conversores *buck-boost* [44], [49], [54]. Estas topologias tanto podem ser unidirecionais como bidirecionais, e tanto podem ser isoladas como não isoladas. Estas topologias transferem energia das baterias para o banco de baterias ou transferem energia entre duas baterias adjacentes. Quando a topologia transfere energia de uma bateria para o banco de baterias a tensão nominal do banco de baterias não deve ser elevada, visto que, o conversor tem de elevar a tensão de cada bateria para a tensão total do banco de baterias [44].

Na Figura 3.12 apresenta-se uma topologia baseada no conversor bidirecional *buck-boost* [49]. Este conversor transfere energia de uma bateria para todas as outras baterias que pertencem ao banco de baterias.

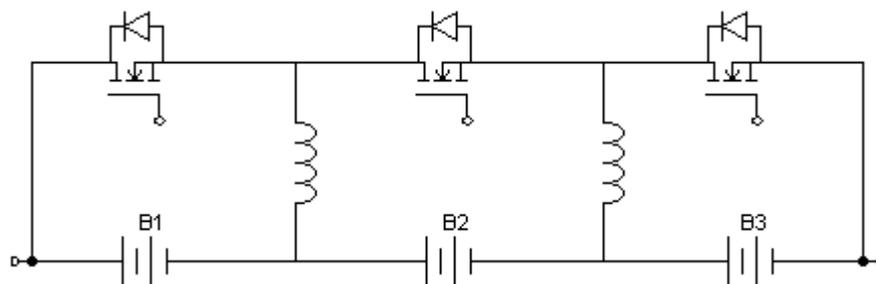


Figura 3.12 – Esquemático do circuito de balanceamento do conversor *buck-boost*.

### 3.2.3. Determinação do Estado de Carga das Baterias

O cálculo do estado de carga é um das funções mais importantes para a utilização de forma segura das baterias. O SoC é definido como a razão entre a capacidade disponível no momento e a capacidade nominal da bateria, sendo expresso em percentagem, equação (3.4) [57], [58]. Por outras palavras, é a razão entre a energia

armazenada na bateria e a energia total que pode ser armazenada na mesma. A estimativa do SoC permite calcular a autonomia e distância que ainda pode ser percorrida pelo EV com a energia restante armazenada nas suas baterias. Pode ser comparado com o medidor de combustível presente nos veículos com motor de combustão interna (*Internal Combustion Engine - ICE*), só que em vez de indicar a quantidade de combustível presente no depósito indica a energia disponível no sistema de armazenamento de energia (*Energy Storage Systems - ESS*) do EV. Além disso, uma estimativa correta do SoC é importante para evitar danos e o envelhecimento rápido das baterias. Com a informação da energia armazenada nas baterias sabe-se quando deve ser parado o carregamento das baterias para não ocorrer sobrecarga, bem como quando deve ser terminada a descarga das baterias.

$$SoC = \frac{C}{C_{nom}} \times 100 \quad (3.4)$$

Geralmente, os métodos utilizados para estimar o SoC são divididos em duas categorias: métodos diretos e métodos indiretos. Nos métodos indiretos o SoC é estimado a partir de algumas propriedades físicas da bateria [57].

De seguida, apresentam-se alguns métodos utilizados para estimar o SoC em baterias.

### **Tensão de Circuito Aberto**

O método tensão em circuito aberto (*Open Circuit Voltage - OCV*) consiste, como o próprio nome indica, em medir a tensão da bateria em circuito aberto, ou seja, sem carga acoplada aos seus terminais. Pois, nas baterias existe uma relação linear entre a tensão de circuito aberto e o SoC.

Este método apresenta uma desvantagem. Para a medição ser precisa a bateria tem que estar no estado estacionário, uma condição que só é alcançada após um longo período de descanso (algumas horas). Por esta razão este método não é adequado para utilização em EV. No entanto, este método pode ser usado juntamente com outras técnicas, para diminuição do erro ou para determinar o SoC inicial [59], [60].

### **Contagem de Coulomb**

O método contagem de *Coulomb* (*Coulomb-Counting method*) é o método utilizado na maioria das aplicações para determinação do SoC. O SoC da bateria num dado instante é determinado através da subtração ao SoC inicial da bateria a corrente fornecida por esta ao longo do tempo, em Ah (amperes-hora), equação (3.5) [59].

$$SOC = SOC_0 + \frac{1}{C_{Nom}} \int_{t_0}^t I dt \quad (3.5)$$

Este método é simples, fácil de implementar, e em aplicações de curta duração os resultados obtidos são precisos e satisfatórios. No entanto, este método apresenta algumas desvantagens. Primeiro é necessário saber o SoC inicial. Depois, este método tem limitações quando aplicado durante longos períodos de tempo por causa da acumulação de erros na mediação da corrente [57], [59], [60]. Para diminuição dos erros utilizam-se pontos de recalibração utilizando, por exemplo, o método OCV para corrigir o valor do SoC.

### Rede Neuronal Artificial

A rede neuronal artificial (*Artificial Neural Network* - ANN) é um modelo de dados baseado diretamente no cérebro humano. Pode ser usado para modelar sistemas lineares e sistemas não lineares complexos como o estado de carga de uma bateria. A maior limitação deste sistema adaptativo é a fase de aprendizagem, que precisa de uma grande quantidade de dados diferentes para ser relevante. O Erro numa ANN depende fortemente dos dados usados durante a fase de aprendizagem e do método de aprendizagem. Por isso, a ANN deve ser treinada com informações de baterias similares (mesmo fabricante e modelo da bateria) para que a informação contida na ANN seja o mais fidedigna possível. O método ANN pode ser usado em qualquer tipo de baterias e pode ser usado tanto para calcular o SoC como SoH [58–60].

### Filtro de Kalman

O filtro de *Kalman* (*Kalman filter* - KF) aborda a seguinte questão: como obter informações precisas de dados imprecisos. O KF tenta responder a essa questão, sendo um algoritmo que pode ser utilizado para minimizar os efeitos do ruído nas medições, e calcular algum estado do sistema que não possa ser medido diretamente.

O KF é um algoritmo recursivo que combina uma base de dados e um conjunto de medições. Este algoritmo é composto por diversas equações (que representam o modelo da bateria) que estimam um valor mensurável. Este valor é comparado com o valor real medido e o KF corrige a estimativa. Diferentes filtros de *Kalman* podem ser usados para determinar o SoC da bateria. Em geral, um KF necessita de um bom modelo de bateria para diminuição do erro. As suas desvantagens são a elevada capacidade computacional necessária para aplicação do KF, precisa de um modelo de bateria adequado e pode ser

difícil determinar alguns parâmetros. Pode ser usado tanto para calcular o SoC como SoH [58–60].

#### 3.2.4. Determinação do Estado de Saúde das Baterias

Durante a vida útil de uma bateria, o seu desempenho tende a deteriorar-se gradualmente, devido a mudanças físicas e químicas irreversíveis que ocorrem com o seu uso. Um exemplo disso é a capacidade de armazenamento de energia da bateria que tende a diminuir com o seu uso. Então uma questão importante na utilização de baterias é a seguinte: uma bateria quanta vezes pode ser carregada e descarregada, e manter o desempenho especificado/desejado? A resposta para esta questão é o estado de saúde (*State of Health - SoH*) [30].

O SoH pode ser definido como uma "medida" que reflete o estado geral de uma bateria e compara o seu desempenho atual com o desempenho da mesma quando era nova [58]. O seu objetivo é fornecer uma indicação do desempenho que pode ser esperado a partir da bateria. É uma peça vital para permitir aos utilizadores saberem com antecedência quando uma bateria deve ser substituída. Ou seja, quanto tempo útil de vida lhe resta até ser substituída com um desempenho por parte da bateria que seja minimamente aceitável. O SoH ajuda a uma melhor utilização da bateria, à sua gestão, e identifica num banco de baterias aquelas que necessitam de ser substituídas [30].

O SoH é influenciado por diversos fatores como o número de dias em que a bateria não é utilizada e sofre auto-descarga, a DoD a qua esta é sujeita, a temperatura de funcionamento, a taxa de descarga da bateria, entre outros.

Diferentes métodos são propostos para determinar a SoH de baterias e têm como base qualquer parâmetro ou característica que mude significativamente com a idade/uso, como as propriedades eletroquímicas, a temperatura, a tensão, o SoC e o número de ciclos.

A indicação SoH de uma bateria é relativo ao estado da mesma quando era nova, por isso o sistema de medição deve manter um registo das condições iniciais. Por exemplo, se a impedância da bateria é o parâmetro utilizado para calcular o SoH, o sistema deve manter na memória um registo da impedância inicial da bateria [19].

Alguns dos métodos mencionados anteriormente para mediação do SoC também podem ser usados para mediação do SoH, como rede neuronal artificial ou filtro de *Kalman*. Outros métodos utilizados para estimativa do SoH são a mediação da resistência interna da bateria, uma vez que esta tende a aumentar com a idade da bateria. A principal desvantagem destas técnicas é a necessidade de equipamento de teste

especializado. Além disso, a escolha da frequência do teste nas técnicas que utilizam a medição da impedância pode influenciar a medição. Também, com estas técnicas de medição a degradação do SoH pode só ser detetada depois de já ter ocorrido degradação significativa deste [59], [61].

Nas baterias de Chumbo-Ácido o *coup de fouet* pode similarmente ser usado para determinar o SoH. O *coup de fouet* corresponde a uma pequena queda de tensão que acontece no início da descarga da bateria após o seu carregamento completo. Este apresenta como desvantagens o facto de apenas poder ser usado entre os três a cinco minutos seguintes ao início de descarga da bateria, e esta tem que se encontrar completamente carregada no início da descarga. O cálculo do SoH é baseado na diferença entre os dois parâmetros. O primeiro parâmetro é a tensão mínima durante a ocorrência de *coup de fouet* e o segundo parâmetro é a tensão de planalto, isto é, a tensão máxima atingida durante a recuperação de tensão no final do *coup de fouet*. A diferença entre estes parâmetros tem uma relação linear com a capacidade [60].

Outro método para calcular o SoH proposto em [62] consiste na comparação entre diferentes métodos de estimação do SoC. Neste caso, entre o método contagem de *Coulomb* e a tensão de circuito aberto. Segundo o autor, quando o SoH numa bateria nova está perto de 100% o resultado de medição de carga dos dois métodos é muito semelhante. Com o aumento da idade da bateria aumenta progressivamente a diferença entre o resultado da medição obtida pelos dois métodos, e a razão entre os dois irá dar uma boa indicação do SoH [62].

Um método alternativo é basear a estimativa do SoH no histórico da utilização da bateria, em vez de se basear em parâmetros medidos. O número de ciclos da bateria pode ser usado com esse intuito. Os fabricantes especificam o número de ciclos e a profundidade de descarga que uma bateria é capaz de fornecer ao longo do seu tempo de vida. Porém, existe a influência de outras condições de operação que necessitam de ser considerados e que este método não tem em conta, como a temperatura ou taxa de carga e descarga [19], [61]. Para diminuir o erro da estimativa também pode ser empregado o filtro de *Kalman* ou a lógica *fuzzy*. O problema com estes sistemas é o alto esforço computacional necessário para a implementação, e consequentemente o aumento do custo da solução desenvolvida [30].

O método mais simples para calcular o SoH consiste na mediação da capacidade da bateria. O SoH é obtido pela relação entre a capacidade atual e a capacidade inicial da bateria [63].

### 3.2.5. Exemplos de BMS no mercado

Atualmente, já existem sistemas de BMS no mercado desenvolvidos para veículos elétricos. A grande parte destes sistemas são desenvolvidos, principalmente, para baterias de íões de Lítio, mas alguns também podem ser empregues na gestão e monitorização da bateria de NiMH.

Para a tecnologia de baterias íões de Lítio também é possível encontrar no mercado diferentes sistemas dedicados ou circuitos integrados (*Integrated Circuit - IC*) desenvolvidos para monitorização, proteção e medição do estado de carga para várias células (*gauge meters*). Nesta secção são apresentados alguns destes modelos.

#### Orion BMS

O *Orion BMS* é desenvolvido e fabricado pela empresa *Ewert Energy Systems*. Este sistema de BMS é projetado, essencialmente, para baterias de Lítio. Segundo o fabricante, este sistema foi projetado especificamente para satisfazer os importantes requisitos de proteção e gestão de baterias para veículos elétricos.

As suas principais características são:

- Proteção ao nível de corrente e tensão;
- Gestão térmica;
- Balanceamento passivo;
- Cálculo do SoC com recurso ao método contagem de coulomb;
- Cálculo do SoH;
- Comunicação via CAN;
- Compatível com alguns carregadores de baterias.

Este sistema utiliza uma arquitetura centralizada e suporta desde 5 células até 180 células. As vantagens deste sistema são o fornecimento de software para programar o BMS, exibição de dados em tempo real, leitura de códigos de erros, visualização de gráficos, registro de dados em tempo real e permite o download dos parâmetros cálculos pelo BMS. O preço no site do fabricante para uma bateria de 12 células é 580 € (apenas custo de produção do fabricante) [64]. Na Figura 3.13 (a) está representado o *Orion BMS* [64].

#### Nuvation BMS

O *Nuvation BMS* é desenvolvido e fabricado pela empresa *Nuvation*. Funciona tanto para baterias com tecnologia de Lítio como para baterias com tecnologia de Níquel. Este sistema foi desenvolvido para monitorizar, balancear e proteger baterias

em diferentes aplicações, tais como veículos elétricos, fontes de alimentação ininterrupta (*Uninterruptible Power Supply* - UPS), aplicações em energias renováveis e aplicações militares. A temperatura de funcionamento situa-se entre  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  e os  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Cada módulo é escalável entre 3 a 12 células com uma capacidade por sistema até 744 células. Tem incorporado sistema de comunicação via CAN e *Ethernet* [65]. Este sistema tem equipado com uma função que o fabricante chama de “serviço de desconexão” que ao ser removido separa a bateria em duas metades eletricamente isoladas [66].

Na Figura 3.13 (b) está representado o sistema de BMS da *Nuvation* implementado num veículo elétrico [66].

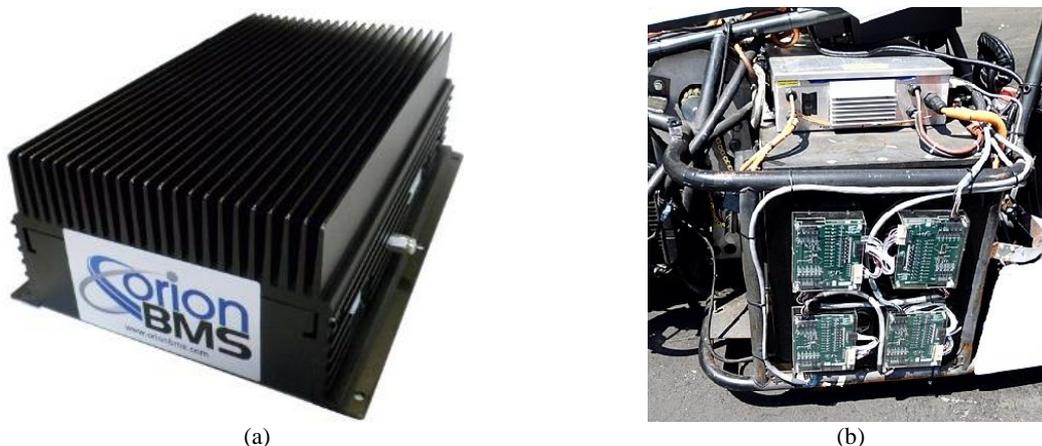


Figura 3.13 – Sistemas de BMS da *Ewert Energy Systems*, e da *Nuvation*, respetivamente (retirado de [64], [66]).

### Circuito Integrado AD7280

O circuito integrado *AD7280* é desenvolvido pela *Analog Devices*. Este integrado tanto pode ser utilizado em baterias de Lítio como em baterias de NiMH. Uma aplicação possível para este integrado são os veículos elétricos. Na Figura 3.14 apresenta-se o diagrama de blocos do circuito integrado *AD7280*. Cada *AD7280* está projetado para proteger no máximo 6 células. Para um número maior de células pode-se ligar os circuitos integrados em série, até um máximo de 8, sem necessidade de isolar cada dispositivo. A tensão de entrada pode variar entre 1 V a 5 V, com uma precisão máxima para cada célula é  $\pm 1,6\text{ mV}$ . Este dispositivo está igualmente preparado com vários canais conversores de analógico para digital (*Analog to Digital Converter* – ADC) auxiliares para mediação da temperatura. Para realizar o balanceamento das células, este IC tem um interface concebido para controlar dispositivos de comutação externos a este. Caso seja necessário realizar comunicação com microprocessadores o *AD7280* vem incorporado com comunicação por SPI (*Serial Peripheral Interface*) [67].

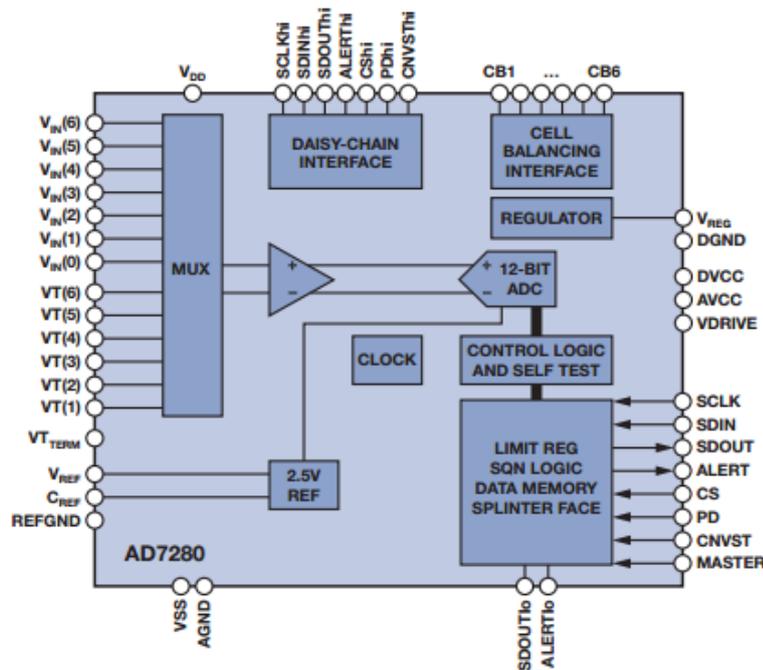


Figura 3.14 - Circuito integrado para monitorização e gestão de baterias AD7280 [66].

### Circuito Integrado bq76PL536A-Q1

O circuito integrado *bq76PL536A-Q1* é similar ao dispositivo apresentado anteriormente só que neste caso o fabricante é a *Texas Instruments*. Este foi desenvolvido para baterias de Lítio e pode ser usado tanto em aplicações de mobilidade elétrica (veículos elétricos, bicicletas elétricas...) como em UPS.

Cada *bq76PL536A-Q1* suporta entre 3 a 6 células e pode ser ligado em série até um máximo de 192 células. Este dispositivo tem uma precisão de  $\pm 1$  mV. Este dispositivo protege as baterias contra sobretensões, subtensões e sobreaquecimento. O *bq76PL536A-Q1* oferece também a possibilidade de balanceamento passivo, mas necessita de resistências e dispositivos de comutação externos [68].

### 3.3. Postos de Carregamento

O uso de veículos elétricos exige novas infraestruturas e soluções ao nível do carregamento. Este pode ser efetuado em estações dedicadas para o efeito, designadas por postos de carregamento. Como tal, estes devem ser abundantes para que os utilizadores possam recarregar o seu veículo em casa, nas estradas, no escritório ou num parque de estacionamento no centro comercial ou supermercado. Assim, um desafio para o progresso dos EVs é o desenvolvimento de postos de carregamento standard com diferentes modos de funcionamento onde os utilizadores de veículos elétricos consigam

ser capazes de carregar o seu automóvel, independentemente do local, sem qualquer interoperabilidade e obstáculo no pagamento [69].

Os fatores que influenciam o modo de carregamento são o tempo disponível, a energia ainda restante nas baterias e o tipo de baterias usado.

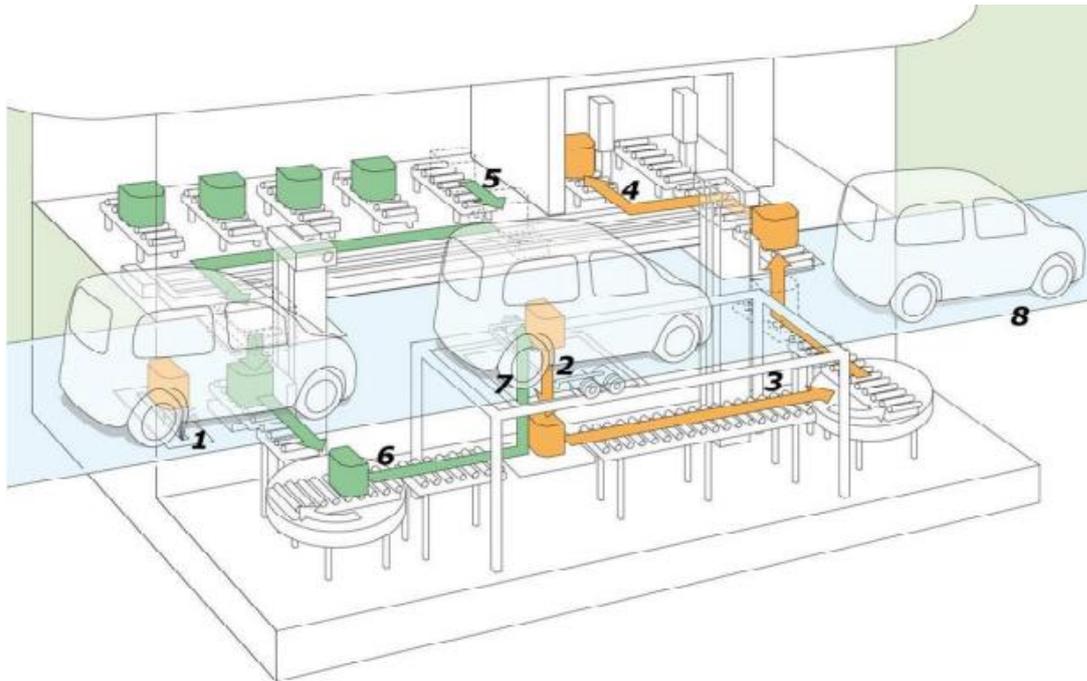
Nesta subsecção apresenta-se uma descrição da tecnologia envolvida nos postos de carregamento utilizados para a alimentação de veículos de propulsão elétrica, utilizando energia proveniente da rede elétrica. As tecnologias de carregamento podem ser agrupadas consoante o método de carregamento, que pode ser efetuado com conexão condutiva, com conexão indutiva ou estações de permuta/troca de baterias.

### **3.3.1. Estações de Permuta de Baterias**

Como se sabe, uma das desvantagens dos EVs em comparação com veículos com motor de combustão interna é o tempo de abastecimento. Para tentar minimizar esse problema uma das soluções previstas são as estações de troca rápida da bateria ou de permuta de bateria. Nestas estações é possível trocar uma bateria descarregada por outra totalmente carregada em menos de 5 minutos [70]. Este sistema é vantajoso para viagens longas com EVs onde se exige uma maneira rápida de aumentar o alcance proporcionado pelas baterias. Mas, para que isso possa acontecer é necessário que os EVs estejam equipados com baterias comutáveis (denominação de baterias que podem ser facilmente instaladas e removidas num EV).

O processo de troca da bateria numa estação de permuta de baterias é comparável aos sistemas de lavagem automáticos, no sentido em que o condutor entra com o carro e imobiliza-o num local pré-determinado. A partir deste momento, o processo é todo automatizado, e o condutor não precisa de sair do seu veículo. Depois o veículo é transportado ao longo da estação para executar as várias tarefas do processo de permuta da bateria. Primeiro, lava-se e seca-se a parte inferior da carroçaria, depois um sistema robotizado posiciona-se por baixo do carro de forma a localizar o sistema de fixação da bateria. Um robô remove a bateria descarregada e transporta-a para a zona onde seja possível efetuar o seu carregamento, para posteriormente ser utilizada por outro veículo. De seguida, uma bateria idêntica totalmente carregada é instalada. É verificado se a nova bateria foi colocada corretamente e se o sistema de segurança se encontra bloqueado. No final o veículo é autorizado a prosseguir a viagem [70].

A Figura 3.15 representa um modelo de uma estação de troca rápida de baterias projetada pela *Renault* em colaboração com a *Better Place* [71].



- 1 Zona da lavagem da parte inferior da carroçaria;
- 2 Local de remoção da bateria descarregada;
- 3 Passadeira para transporte da bateria descarregada até ao local de carregamento;
- 4 Área de carregamento de baterias;
- 5 Local de armazenamento de baterias carregadas;
- 6 Passadeira para transporte de baterias carregadas até o EV;
- 7 Local de conexão da bateria carregada;
- 8 Zona Saída do veículo.

Figura 3.15 - Possível modelo da estação de permuta de baterias (retirado de [71]).

A *Renault* é o construtor de automóveis que já está a desenvolver veículos que permitem a substituição das baterias, para além do carregamento com conexão condutiva. Um exemplo é o modelo *Renault Fluence*, Figura 3.16 (b) que já se encontra no mercado e do modelo *Renault Zoe*, Figura 3.16 (a), que já foi apresentado mas ainda não se encontra no mercado.



(a)



(b)

Figura 3.16 – Veículos elétricos com sistema de permuta de baterias integrado [72]: (a) *Renault Zoe*; (b) *Renault Fluence*.

*Better Place* é uma empresa pioneira a nível mundial no desenvolvimento de estações de permuta de bateria [70]. Na Figura 3.17 encontra-se a imagem de uma estação implementada por esta empresa.



Figura 3.17 - Estação de permuta de baterias da *Better Place* (retirado de[70]).

### 3.3.2. Carregamento com Conexão Indutiva

Os carregadores com conexão indutiva caracterizam-se por fornecerem energia ao EV através de um campo eletromagnético sem conexão direta. Ou seja, os cabos elétricos utilizados no método com conexão condutiva são dispensáveis [73]. O princípio para transferir energia é o mesmo de um transformador, ou seja, a energia elétrica é transferida através da indução de campos magnéticos entre duas bobinas separadas. Aplica-se uma tensão alternada à bobina do primário que origina um fluxo de corrente variável, que por sua vez cria um campo magnético que irá induzir uma tensão alternada na bobina secundária. Por sua vez, a bobina secundária presente no veículo está ligada ao carregador interno das baterias que retifica a CA para CC, para ser armazenada nas baterias. [74], [75].

As principais vantagens deste tipo de sistemas são os seguintes [74], [75]:

- Isolamento galvânico proporciona o carregamento das baterias em ambientes industriais, húmidos e adversos de forma mais segura;
- Conveniência para o utilizador já que permite efetuar o carregamento de forma totalmente automatizada, sem a necessidade do condutor manusear cabos ou outros equipamentos, exceto num sistema designado por tipo de inserção;
- Não é necessário usar cabos elétricos nem fichas elétricas para fazer interface entre o posto de carregamento e o veículo, exceto num sistema designado por tipo de inserção.

As principais desvantagens deste tipo de sistemas de carregamento são as seguintes [74]:

- Eficiência mais baixa relativamente aos carregadores com conexão condutiva;
- A complexidade do fabrico, o tamanho e o custo;
- Circuitos ressonantes difíceis de sintonizar;
- Interferência eletromagnética: o uso de conversores de alta frequência pode causar interferência nos equipamentos das proximidades;
- Campo magnético não penetra metais: se houver qualquer objeto metálico no meio da conexão magnética as perdas aumentam e o sistema pode não funcionar.

Na literatura são indicadas duas metodologias diferentes para se proceder ao carregamento de um veículo de forma indutiva. Na solução que é usada atualmente, o veículo encontra-se estacionado ou imobilizado. A outra solução, mais futurista, reside na eletrificação de estradas e assim o carregamento é efetuado enquanto o veículo se move ao longo de uma faixa da estrada eletrificada. Neste sistema o veículo não precisa de se encontrar imobilizado para efetuar o carregamento [75], [76].

### Carregamento com Conexão Indutiva e com EV em Movimento

Este tipo de sistema transfere a energia da fonte primária fixa (pista ou laços) embutida por baixo da superfície do pavimento para um ou mais circuitos secundários instalados num veículo em movimento. Para aumentar a eficiência o campo magnético pode ser ligado apenas no instante em que o veículo se desloca sobre ele como se mostra na Figura 3.18.



Figura 3.18 – Funcionamento do conceito de eletrificação da estrada (retirado de [75]).

No carregamento com conexão indutiva, e com o EV em movimento ao longo da estrada as restrições de armazenamento de energia no veículo elétrico podem ser diminuídas, uma vez que parte da força operacional pode ser entregue a partir do carregador embutido na estrada. Este sistema de carregamento pode ser usado para redução de tamanho, peso da bateria e conseqüente diminuição do custo inicial de aquisição do veículo. Similarmente, com a eletrificação das estradas é eliminado o

problema denominado de *range anxiety*<sup>3</sup> uma vez que o carregador indutivo embutido na estrada pode fornecer a energia requerida pelo veículo [75], [76].

### Carregamento com Conexão Indutiva com EV Imobilizado

O processo de carregamento dos EVs acontece quando ele está imobilizado num estacionamento que tem instalado o posto de carregamento.

A frequência de operação e o mecanismo de acoplamento são dos fatores mais importantes que afetam o design e o desempenho do sistema de carregamento. Contudo, os sistemas para carregarem EVs devem utilizar alta frequência para diminuir o tamanho e peso do sistema de carregamento.

Com base no modo mecânico de acoplamento entre as bobinas do solo e do veículo, os acopladores indutivos podem ser classificados em três tipos [77]:

- Tipo de inserção (*insertion type*): O transdutor primário é uma *paddle* e o transdutor secundário é uma porta de inserção (*charge port*) no veículo. Para transferir energia a *paddle* é inserida na porta de carga, formando-se um circuito magnético. Este tipo usa conversores de alta frequência. É desenvolvido principalmente nos EUA e Japão. Na Figura 3.19 mostra uma *paddle* e a porta de inserção num EV.



Figura 3.19 – *Paddle* e porta de inserção da *paddle* no EV (retirado de [76]).

- Tipo de proximidade (*proximity type*): A indutância no solo e a indutância do veículo são acoplados pelo posicionamento correto do veículo. Na Figura 3.20 mostra-se um exemplo deste tipo.
- Tipo de anel encadeado (*chained-ring type*): A bobina do solo e a bobina do veículo são ligadas uma à outra, após o posicionamento adequado o veículo, com a ajuda de um atuador.

Três características importantes neste tipo de carregadores são [75]:

<sup>3</sup>Designa o sentimento de ansiedade sentido por alguns condutores de EVs mediante a possibilidade do veículo ficar sem energia, num local onde não seja possível o seu carregamento.

- Distância máxima de carga: distância máxima entre o chassis do veículo e o sistema de carregamento implementado no solo.
- Tolerância de alinhamento horizontal e vertical para proporcionar facilidade no estacionamento do EV para um condutor normal.
- Tamanho e peso: o carregador deve ser facilmente instalado em um EV.

Dos três modos de acoplamento aquele que permite maior potência de carregamento é o tipo de inserção. Também, é este o modo de acoplamento que apresenta uma eficiência maior [77].

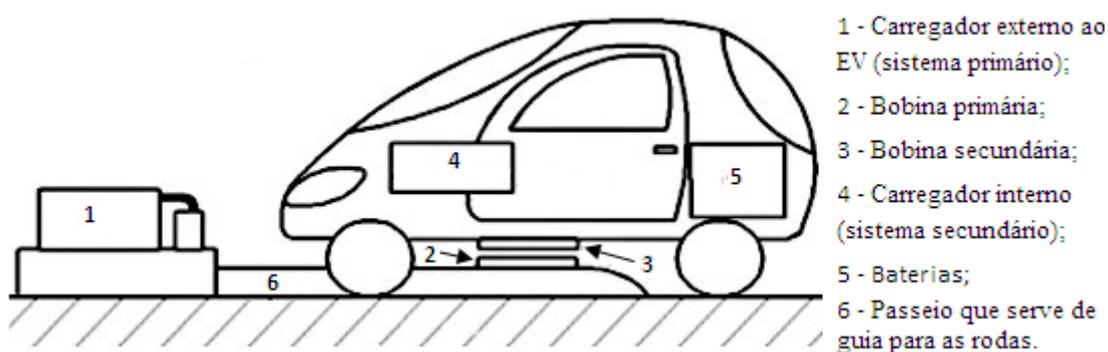


Figura 3.20 - Modo de acoplamento do tipo de proximidade (retirado de [77]).

No sistema de acoplamento do tipo de aproximação pode ser necessário recorrer a alinhamento mecânico, pois pretende-se que o transmissor e recetor fiquem corretamente alinhados. Quando o veículo é estacionado sem orientação mecânica, o posicionamento deste é incerto e o sistema mecânico compensa o posicionamento incerto do automóvel, oferecendo um grau de latitude no ajuste final. A opção mais utilizada é a instalação do componente no solo móvel, e a instalação do componente na parte inferior do carro fixo.

O alto custo da solução de carregamento com conexão indutiva e o nível elevado de segurança que pode ser alcançado com solução de carregamento com conexão condutiva origina que o uso da solução de carregamento com conexão indutiva seja limitado e se destine principalmente a aplicações de nicho [13].

### 3.3.3. Carregamento com Conexão Condutiva

O modo de carregamento com conexão condutiva do EV resume-se ao contacto direto entre a fonte de alimentação exterior ao veículo (posto de carregamento) e o próprio veículo através de um cabo elétrico. O carregamento do veículo elétrico efetua-se em tomadas elétricas apropriadas, onde a conexão é materializada através de cabos elétricos. Os carregadores de bateria para EVs podem estar colocados no interior

do veículo (*on-board*) ou no exterior deste (*off-board*), e o fluxo de energia pode ser unidirecional ou bidirecional [76], [78]. Porém, o carregamento unidirecional é o primeiro passo, porque limita os requisitos de hardware, simplifica as questões de conexão e reduz a degradação da bateria. O carregamento bidirecional é uma questão em aberto para o futuro, que será assente no desenvolvimento das baterias e no conceito veículo para rede (*Vehicle to Grid – V2G*).

São usadas duas terminologias para definir os tipos de carregamento com conexão condutiva, “Nível” que é usada essencialmente na América do Norte e “Modo” que é usada principalmente pelas organizações Europeias de Standards [36]. As configurações específicas de cada modo de carregamento variam de país para país, dependendo da frequência e da tensão do sistema elétrico, e da legislação em vigor em cada país. Os requisitos de ligação à terra também variam consoante o país e fabricante automóvel.

Para garantir-se uma comunicação clara e simples é usada a seguinte terminologia, Figura 3.21 [79]:

- Ficha (*plug*): representa a ficha de carregamento do cabo elétrico do lado do posto de carregamento;
- Tomada (*socket outlet*): representa a tomada de carregamento no posto de carregamento;
- Conector (*connector*): representa a ficha de carregamento do cabo elétrico do lado do EV;
- Entrada do veículo (*vehicle inlet*): representa a tomada de carregamento no EV;
- Equipamentos de alimentação do veículo elétrico (*Electric Vehicle Supply Equipment - EVSE*): condutores (fases, neutro e proteção), as tomadas, fichas de fixação, e todos os outros acessórios. Ou seja, tomadas ou equipamentos instalados especificamente com a finalidade de fornecer energia para o EV a partir da instalação elétrica, e que permitem a comunicação entre eles, se necessário.

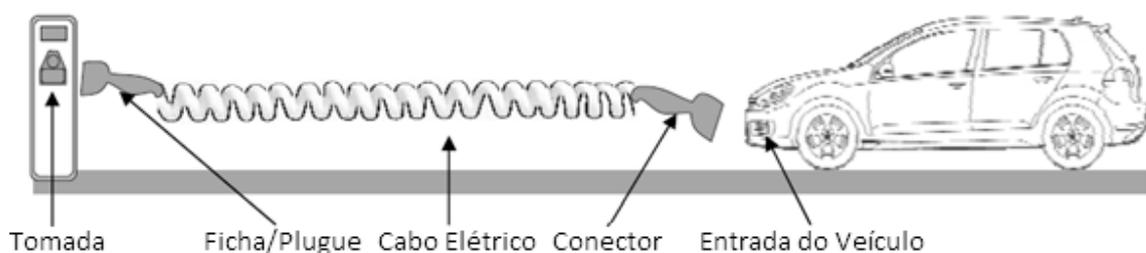


Figura 3.21 – Nomenclatura do EVSE (adaptado de [79]).

A norma europeia/portuguesa EN/NP61851 – “Sistema de carga condutiva para veículos elétricos” define como deve ser feito o carregamento de um veículo elétrico e

em que condições [78]. Esta norma define 4 modos de carregamento, que são aqui descritos.

### 3.3.3.1. Modo 1

No carregamento em Modo 1 a ligação do EV à rede elétrica utiliza tomadas normalizadas que permitem corrente até 16 A monofásica ou trifásica, e tenha terra de proteção. O carregamento pode ser realizado através de tomadas domésticas *shüco* ou industriais da norma *EN60309*, apresentadas na Figura 3.22 [78].



Figura 3.22 – Tomadas utilizadas no Modo 1: (a) Tomada industrial *IEC 60309* monofásica; (b) Tomada doméstica monofásica *shüco* (retirado de [78]).

No entanto, é obrigatória a presença de disjuntor diferencial de elevada sensibilidade do lado de alimentação elétrica e a existência da terra de proteção [14], [65].

### 3.3.3.2. Modo 3

O Modo 3 segundo a norma *EN/NP61851*, é um sistema de carregamento em corrente alternada, desenvolvido especificamente para veículos elétricos. O sistema Modo 3 é constituído por três componentes fundamentais [78]:

- Tomadas e fichas de carregamento dedicadas para EVs que incluem: condutores das fases, neutro e terra de proteção, condutor do sinal com função “piloto de controlo” (opcional) e sensor de inserção da ficha na tomada. As tomadas têm ainda incluído no seu desenho um mecanismo de encravamento da ficha na tomada após inserção. A função deste mecanismo é garantir que a tomada não se liberta depois do início do carregamento.

- Relé de corte da alimentação controlado pelo sistema eletrónico que permite o corte da alimentação da tomada quando o sistema eletrónico o indicar.
- Sistema “piloto de controlo” e as suas funções são: verificação que o conector e a ficha estão conectados corretamente, verificação contínua da integridade do condutor da terra de proteção, comunicação da taxa de carregamento.

Para que se possa efetuar o carregamento de um EV no Modo 3 é necessário um sistema de carregamento que também permita o carregamento em Modo 3 com quem o carro elétrico se possa conectar. Caso isso não aconteça, não é possível carregar o EV utilizando o Modo 3.

Na primeira edição da norma *IEC 61851*, o piloto de controlo é definido como um condutor adicional no conjunto dos cabos necessários para o carregamento, para além da(s) fase(s), neutro e terra de proteção. A versão seguinte da norma *IEC 61851-1* introduziu o conceito “função do piloto de controlo”, obrigatório para o carregamento no Modo 3, que tem de realizar as mesmas funções que o condutor “piloto de controlo” descritas acima, porém estas podem ser realizadas por outros meios que não obriguem a introdução de um condutor extra [13].

Em relação a tomadas/fichas para utilização neste Modo a norma define 3 tipos de tomadas diferentes [78].

### Tipo 1

A tomada do Tipo 1 (ver Figura 3.23) também chamada *Yazaki* ou *SAE J1772*, é utilizada principalmente no Japão e nos EUA.



Figura 3.23- Tomada e ficha do tipo 1 (retirado de[80]).

Esta tomada é utilizada nos veículos *Nissan Leaf* e *Mitsubishi iMiev*. Tem 5 pinos: fase, neutro, terra, detetor de inserção e piloto de controlo.

### Tipo 2

A tomada Tipo 2 (ver Figura 3.24) também é chamada por *Mennekes* e é proposta para a Europa. É trifásica e suporta uma potência até 44 kVA (63 A p/fase), e está a ser

usada pela *Renault*. Está previsto vir a ser a tomada usada nos carros de fabrico europeu, no futuro. Tem 7 pinos: três para as fases, neutro, terra, detetor de inserção e piloto de controlo.



Figura 3.24 - Tomada e ficha do tipo 2 (retirado de [78], [80]).

### Tipo 3

A tomada Tipo 3 (ver Figura 3.25) é desenvolvida pela *EV Plug Alliance*, também é designada por *Scame*, e é proposta para utilização na Europa. É trifásica e suporta uma potência até 22 kVA (32 A p/fase). Tem 7 pinos: três fases, neutro, terra de proteção, detetor de inserção e piloto de controlo.



Figura 3.25 - Tomada e ficha do Tipo 3 (retirado de [81]).

#### 3.3.3.3. Modo 2

O Modo 2 é um sistema de carregamento desenvolvido para permitir a um veículo que só carrega em Modo 3, carregar numa tomada doméstica ou industrial. Para esse efeito o cabo de carregamento tem a função de piloto de controlo desde o veículo até uma caixa de comando situada na outra ponta do cabo. Esta caixa permite carregar no Modo 3 ao longo do cabo. Da caixa de comando sai uma ficha doméstica ou industrial para ligar a uma tomada [13], [78]. A principal desvantagem do Modo 2 é que a caixa de controlo protege o cabo a jusante do veículo, mas não a própria ficha.

Na Figura 3.26 apresenta-se um cabo com caixa de comando e com ficha *Mennekes* que permite o carregamento do EV no Modo 2.



Figura 3.26 – Caixa de Comando para ligação do EV em Modo 2 (retirado de[78]).

#### 3.3.3.4. Modo 4

Os veículos elétricos são carregados através de um carregador externo ao EV, ou seja, o carregador encontra-se implementado no posto de carregamento. O posto de carregamento fornece corrente contínua diretamente para as baterias. O Modo 4 também tem a funcionalidade de Piloto de Controlo. Atualmente, o conector em utilização para o carregamento em Modo 4 é de uma associação Japonesa de nome *CHAdeMO* e permite uma potência máxima de 50 kVA, Figura 3.27 [69]. Neste momento ainda se encontra em desenvolvimento a norma europeia para carregamento DC (*IEC 62196-3*). Durante o carregamento é o veículo que controla o carregador, através de comunicação no cabo.

O custo da instalação e manutenção da infraestrutura para este Modo é maior porque utiliza um equipamento adicional no posto de carregamento em relação aos outros Modos de carregamento [13], [78].



Figura 3.27 – Tomada e Ficha utilizada no Modo 4 (retirado de [78]).

O SAE (*Society of Automotive Engineers* – Sociedade de Engenheiros de Automóveis) também está a trabalhar num "conector híbrido" normalizado para o carregamento rápido CC. Estes optaram por adicionar dois pinos CC de alta tensão ao conector Tipo 1 já desenvolvido para o Modo 2 de carregamento, Figura 3.28. Assim, é permitido o uso da mesma tomada, ficha e conector para todos os níveis de carga [76].



Figura 3.28 - Conector J1772 combo para carregamento no Modo 4 (retirado de [76]).

O carregamento do EV além de ser definido consoante o Modo de carregamento, também pode ser definido em três tipos consoante o nível de potência envolvido no mesmo. Na Tabela 3.1 encontram-se resumidos os modos de carregamento, o tipo de carregamento e suas características elétricas.

Tabela 3.1 – Relação entre os modos de carregamento tipos de carregamento [13], [69], [78], [82].

Modo de Carregamento	Corrente [A]	Tensão (FN) [V]	Potência [kVA]	Conexão	Tipo de Carregamento
Modo 1 Modo2	< 16	230	< 3,7	1-fase	Potência Normal
Modo 2 Modo 3	16-32	230	3,7 – 22	1 ou 3-fases	Média Potência
Modo 2 Modo 3	63	230	43,5	3-fases	Elevada Potência
Modo 4	> 32	-	50	DC	Elevada Potência

O nível de potência mais baixo é definido como o carregamento normal, mas também é designado por carregamento lento e utiliza uma potência até 3,7 kVA. A duração média do carregamento é cerca de 8 horas e pode ser efetuado em casa ou no local de trabalho. O nível de potência mais elevado é designado por carregamento rápido ou carregamento com elevada potência. Utiliza uma potência trifásica até 43,7 kVA no Modo 3, e no Modo 4 de carregamento a potência pode ir até 50 kVA com a norma *CHAdemo* [82]. Este tipo de carregamento é efetuado em áreas de serviço próprias e estas destinam-se principalmente para carregamento do EV durante as viagens. O objetivo é carregar cerca de 80% das baterias entre 10 a 20 minutos. Depois, existe um tipo de intermédio que utiliza uma potência entre 3,7 kVA e 22 kVA, que se destina a locais como centros comerciais, via pública [13], [69], [78], [82].

### 3.3.4. Exemplos de Postos de Carregamento

Nesta secção são apresentados alguns modelos de postos de carregamento que se encontram no mercado. Os modelos apresentados na Tabela 3.2 e na Tabela 3.3 são produzidos pela *Siemens*, e os dois modelos apresentados na Tabela 3.4 e na Tabela 3.5 são produzidos pela empresa portuguesa *Efacec*. Na Tabela 3.2 é apresentado o modelo *Charge CP300D* desenvolvido pela *Siemens*, e é designado como posto de carregamento rápido em CC. Destina-se para aplicações em áreas públicas e foi desenvolvido para operar ao ar livre (*outdoor*) [83]. Na Tabela 3.3 é apresentado o modelo *Charge CP500A*, que funciona no Modo de carregamento 1, 2 ou 3. Neste posto também é possível efetuar o carregamento de dois EVs em simultâneo [83].

Tabela 3.2 – Posto de Carregamento desenvolvido pela *Siemens*, modelo *Charge CP300D* [83].

Modo de Carregamento:	Modo 4	
Tipo de Ficha:	<i>CHAdEMO</i>	
Tensão de Entrada:	400 VCA/50 Hz-60 Hz	
Tensão de saída:	50 – 500 VCC	
Corrente de saída:	120 A (máx)	
Potência de saída:	50 kVA (máx)	
Temperatura de operação:	-10 °C a 40 °C	
Dimensões (C x L x A):	658 x 804 x 1903 (mm)	
Massa:	Aprox. 420 kg	

Tabela 3.3 - Posto de Carregamento desenvolvido pela *Siemens*, modelo *Charge CP500A* [83].

Modo de Carregamento:	Modo 3, 2, 1		
Tipo de Ficha:	Modo 3	Tipo 2 ( <i>Mennekes</i> )	
	Modo 1, 2	Tomada doméstica	
Tensão de Entrada:	400 VCA/50 Hz		
Tensão de saída:	Modo 3	400 VCA/50 Hz	
	Modo 1, 2	230 VCA/50 Hz	
Corrente de saída:	Modo 3	3 x 32 A	
	Modo 1, 2	16 A	
Potência de saída:	Modo 3	22 kVA	
	Modo 1, 2	3,7 kVA	
Temperatura de operação:	-25 °C a 40 °C		
Dimensões (C x L x A):	280 x 490 x 1650 (mm)		
Massa:	Aprox. 100 kg		

A *Efacec* possui atualmente três famílias/linhas de postos de carregamento, a família *Home Charging*, a família *Public A.C. Charging* e a família *Quick Charging*.

O *Homecharger*, apresentado na Tabela 3.4 pertence à família *Home Charging*, e é o equipamento recomendado para carregamento doméstico das baterias dos EVs. Este posto de carregamento está disponível em diferentes configurações, para permitir o carregamento de acordo com as normas Tipo 1, Tipo 2 ou Tipo 3. Em todas as configurações o carregamento com o Modo 3, como especificado na norma IEC/EN 61851-1 [84].

Tabela 3.4 – Posto de carregamento desenvolvido pela *Efacec*, modelo *Homecharger* [84].

Modo de Carregamento:		Modo 3	
Tipo de Ficha:		Tipo 2 ( <i>Mennekes</i> )	
Tensão:		400 VCA ou 230 VCA	
Corrente de saída (por linha):		16 ou 32 A	
Potência:	Monofásica	3,68 kVA ou 7 kVA	
	Trifásica	11 kVA ou 22 kVA	
Temperatura de operação:		-10 °C a 40 °C	
Dimensões (C x L x A):		Depende do Modelo	
Massa:		Depende do Modelo	

De referir que alguns postos de carregamento podem ter integrados no seu interior o sistema de carregamento do veículo elétrico. No entanto, existem postos de carregamento que apenas funcionam como um interface entre a rede elétrica e o veículo elétrico. Estes normalmente possuem apenas um sistema de proteções. Um exemplo deste tipo de posto de carregamento encontra-se apresentado na Tabela 3.4.

O *Quick Charger*, apresentado na Tabela 3.5 pertence a família *Quick Charging*, é um posto de carregamento de corrente contínua da *Efacec* que pode ser utilizado para carregar todos os veículos elétricos concebidos de acordo com a norma *CHAdeMO*. É recomendado para utilização em áreas de serviço para carregamento rápido. Apesar de ser desenvolvido para funcionamento no Modo 4, opcionalmente, também está disponível operação com corrente alternada até 43 kVA [84].

Tabela 3.5 - Posto de carregamento desenvolvido pela *Efacec*, modelo *QC50* [84].

Modo de Carregamento:	Modo 4	
Tipo de Ficha:	<i>CHAdeMO</i>	
Tensão de Entrada:	400 VCA/50 Hz-60 Hz	
Tensão de saída:	50 – 500 VCC	
Corrente de saída:	0 – 125 A	
Potência Nominal:	50 kVA	
Temperatura de operação:	-25 °C a 50 °C	
Dimensões (C x L x A):	800 x 800 x 2000 (mm)	
Massa:	800 kg	

### 3.4. Conclusão

Neste capítulo são apresentadas e explicadas as diferentes topologias do sistema de gestão de baterias, qual a sua importância para os EVs e também apresentam-se as funções que o mesmo deve incorporar.

As técnicas de equalização podem ser divididas em duas categorias: passiva e ativa. A equalização passiva além de ser a mais simples de implementar, é também a menos dispendiosa. Contudo, além da dissipação de energia, esta técnica necessita de um sistema de gestão térmica muito eficiente. Entre as técnicas ativas, aquelas que são baseadas em condensadores são as menos dispendiosas e as mais simples de controlar. No entanto, também são aquelas onde o tempo de equalização necessário pode ser maior.

Para calcular o SoC e o SoH ainda não existem técnicas simples de implementar que sejam muito precisas para aplicações em mobilidade elétrica. Há técnicas como os filtros de *Kalman* ou redes neuronais que se pode obter bons resultados, mas necessitam de um processamento computacional muito grande. Para o cálculo do SoC a contagem de *Coloumbs* é a técnica que apresenta uma melhor relação entre fiabilidade e simplicidade. Já o melhor método para calcular o SoH é comparação da capacidade atual da bateria com capacidade inicial da mesma.

Nesta secção também se apresentam alguns exemplos existentes no mercado de BMS ou circuitos integrados destinados que executam partes das tarefas do BMS. Contudo, estes realizam balanceamento passivo e destinam-se principalmente para

baterias de Lítio. Dependendo das tarefas realizadas e do número de células que suportam, os sistemas existentes no mercado podem ser bastantes caros.

Em relação aos postos de carregamento do veículo elétrico, estão a ser desenvolvidas estações de permuta de baterias para diminuir o tempo de carregamento dos veículos elétricos. Nestas, o tempo da duração da troca das baterias é similar ao tempo de abastecimento do depósito num automóvel equipado com ICE. Outra solução para o futuro é o carregamento em postos de carregamento rápidos, onde pode ser recarregada cerca de 80% da bateria em 10 minutos ou menos. Porém, espera-se que a principal forma de carregamento dos EVs seja durante a noite, no próprio domicílio dos condutores, e fora dos horários de picos de consumo de energia elétrica. Em relação ao método de carregamento acredita-se que o carregamento com conexão indutiva com o veículo imobilizado seja utilizado apenas em nichos de mercado.

# CAPÍTULO 4

## Simulações do Sistema de Equalização do BMS

### 4.1. Introdução

O uso de ferramentas de simulação na eletrónica é de extrema importância, pois estas trazem várias vantagens sobretudo no que toca ao desenvolvimento de novos produtos. Estas ferramentas permitem avaliar o desempenho e comportamento do sistema, não só para diferentes estratégias de controlo, como também para diferentes variáveis de entrada. Além de validar o sistema, também permite compreender melhor o seu funcionamento, através da identificação dos parâmetros/variáveis que realmente influenciam o funcionamento deste. Do ponto de vista prático, as ferramentas de simulação permitem uma redução de tempo e uma poupança de custos, visto que possibilita o esclarecimento de diversas dúvidas inerentes ao desenvolvimento de qualquer projeto, sem ser necessário recorrer-se à implementação física deste. Assim, no desenvolvimento de qualquer produto, somente se deve iniciar a etapa de implementação prática ou desenvolvimento de hardware depois do sistema estar validado em simulação computacional.

Neste projeto de dissertação a ferramenta de simulação computacional utilizada foi o *PSIM*. Esta é uma ferramenta projetada para eletrónica de potência, com um interface intuitivo e fácil de usar para o utilizador (*friendly user interface*), e permite também programar em linguagem C.

Ao longo deste capítulo é apresentado e descrito o modelo de bateria utilizado nas simulações. É igualmente apresentado o modelo de simulação de algumas topologias passivas e ativas de equalização.

### 4.2. Modelo de Simulação da Bateria

O modelo de simulação utilizado no *PSIM* encontra-se representado na Figura 4.1 e pode ser designado método simples. Este modelo não é complexo e tem como objetivo apenas simular o estado de carga (*State of Charge - SoC*) da bateria. A fonte de tensão contínua representa a tensão mínima atingida pela bateria (cerca de 10,5V), o

condensador representa a variação da tensão nos terminais da bateria consoante o SoC desta, e a resistência representa a resistência interna da bateria.

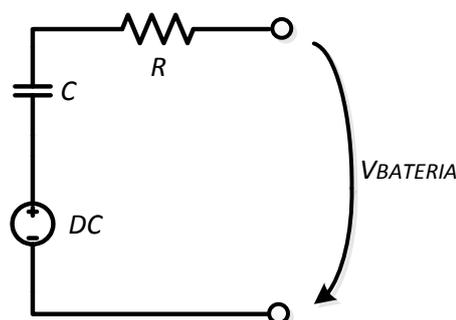


Figura 4.1- Modelo da bateria utilizado para simulação em PSIM.

A capacidade do condensador no modelo de simulação deve corresponder a capacidade da bateria. Mas nesta dissertação isso não acontece (em vez do valor teórico real utiliza-se uma redução no valor de 1/20000), porque o valor do condensador seria muito elevado. Consequentemente, o tempo necessário para a realização da simulação computacional também seria muito elevado. Por exemplo, para uma bateria com uma capacidade de 33 Ah e considerando que a diferença de tensão entre o SoC de 100% e 0% seja 2,2 V o valor do condensador correspondente é 54 kF (equação (4.1)). Convém realçar que no cálculo do valor do condensador são ignorados alguns factos em relação às baterias, como o facto de quando a atinge a tensão de corte esta ainda tem energia armazenada, entre outros.

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{33 \times 3600}{2,2} = 54 \text{ kF} \quad (4.1)$$

### 4.3. Balanceamento Passivo

Na Figura 4.2 mostra-se o interface do *PSIM* utilizada para o desenho dos circuitos eletrónicos. Nesta figura apresenta-se, igualmente, o circuito de balanceamento passivo.

Na topologia de balanceamento passivo simulada, normalmente, utiliza-se uma resistência de dissipação que garante uma velocidade de balanceamento de aproximadamente 1% numa hora, ou seja, a resistência deve garantir uma corrente de dissipação de energia no valor de 10 mA/Ah [44], [47].

O controlo funciona em modo de deteção, isto é, quando existir uma diferença de tensão entre baterias superior a 10 mV dá-se início ao processo de equalização, até a diferença ser menor de 5°mV.

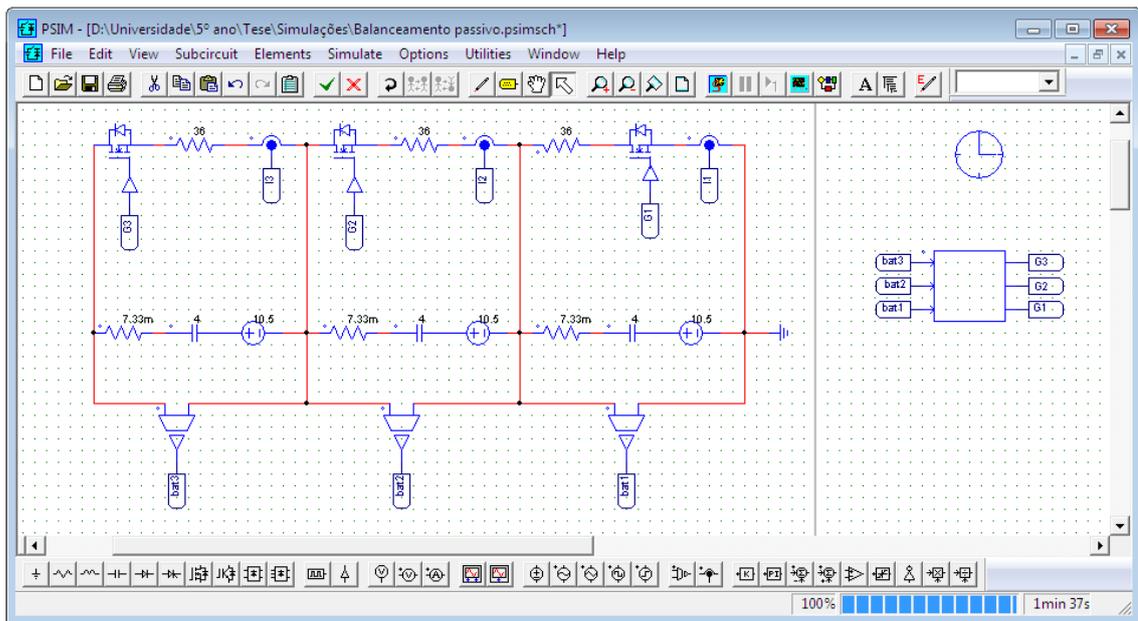


Figura 4.2 – Interface do PSIM e esquemático do circuito de balanceamento resistivo.

Nesta simulação utilizaram-se três baterias (são designadas por *Bat1*, *Bat2* e *Bat3*), com tensões iniciais de 12,25 V, 12,5 V e 12,8 V, respetivamente. Em paralelo foram usadas três resistências de 36 Ω para dissipação de energia (uma para cada bateria).

Na Figura 4.3 estão representadas as tensões das três baterias ao longo do processo de balanceamento. Como esperado, a tensão em duas baterias (*Bat2* e *Bat3*) diminui até ser aproximadamente igual à tensão na outra bateria (*Bat1*). Então, no final do processo de equalização a tensão nas três baterias é sensivelmente de 12,25 V, com desvio máximo de 5 mV.

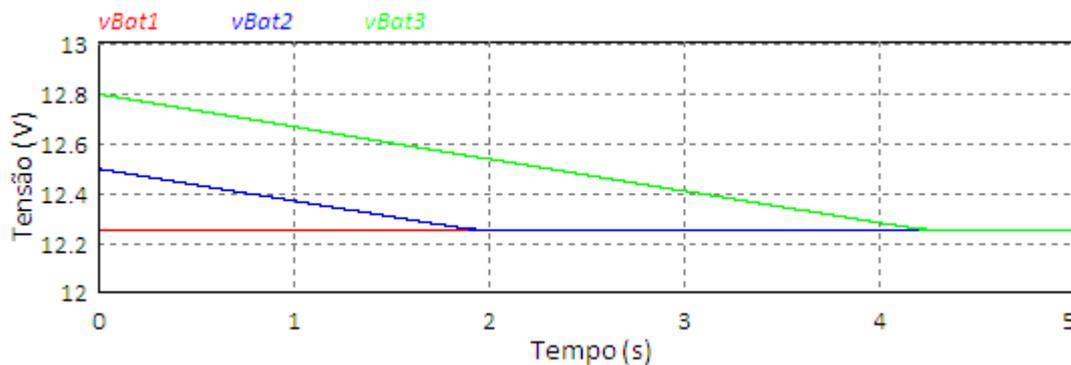


Figura 4.3 – Formas de onda das tensões nas baterias com balanceamento passivo.

Na Figura 4.4 estão representadas as correntes na resistência de dissipação de cada bateria. Como se observa na bateria *Bat1* não existe dissipação de energia, logo a corrente na sua resistência de dissipação ( $i_{rBat\_1}$ ) é zero. Já nas resistências  $i_{rBat\_2}$  e

$i_{RBat\_3}$  existe dissipação de energia, até a respetiva bateria atingir a tensão pretendida. Neste caso, corresponde à tensão da bateria *Bat1*.

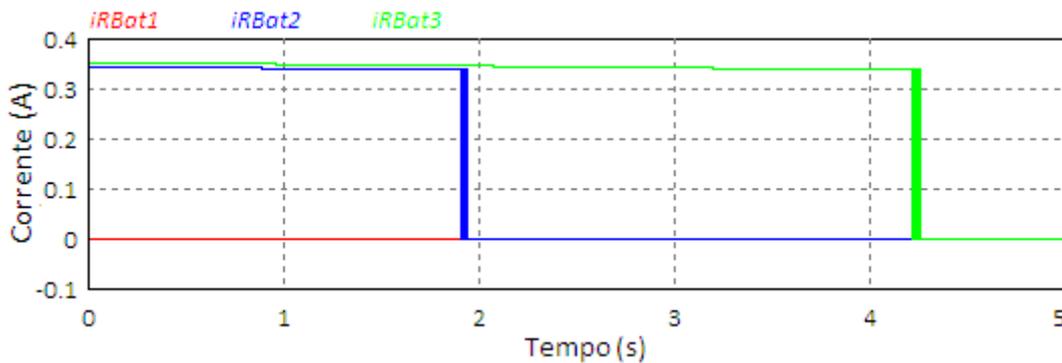


Figura 4.4 – Formas de onda das correntes nas resistências de dissipação.

#### 4.4. Balanceamento Ativo

Em relação ao balanceamento ativo realizaram-se simulações para três dos quatro métodos apresentados no capítulo 3.2.2, que utilizam condensadores (condensadores comutados, comutação de um único condensador, condensadores comutados de dupla camada). Optou-se pela utilização do condensador para a realização do balanceamento devido as vantagens proporcionadas pelo mesmo. O controlo para qualquer uma destas topologias é fácil e simples de implementar, o custo de implementação da solução é relativamente baixo comparando a outras tecnologias de balanceamento ativo, e existe alguma facilidade em adicionar ou remover baterias, sem ser necessário efetuar grandes alterações no sistema.

O principal objetivo das simulações é validar os diferentes conceitos. O segundo objetivo é analisar quais os prós e contras de cada topologia e identificar qual destas topologias é mais vantajosa para uma aplicação num EV. Para isso, realizaram-se simulações com diferentes combinações de tensão nas baterias, empregando diferentes valores de condensadores e diversas frequências de comutação.

##### 4.4.1. Topologia Comutação de Um Único Condensador

A topologia apresentada na Figura 3.5 (topologia comutação de um único condensador) foi a primeira a ser simulada. Na Figura 4.5 encontra-se o esquemático da simulação em *PSIM*. Para a implementação do controlo foi usado um bloco do *PSIM* que permite programar em linguagem C, designado de *C Block*. Para o controlo do sistema ser realizado à frequência desejada utiliza-se um bloco designado por *zero-order hold (ZOH)*. Em série com o condensador de equalização utiliza-se uma

resistência (esta resistência é empregue em todas as topologias simuladas) para modelar o valor da resistência série equivalente do condensador (*Equivalent Series Resistance - ESR*) juntamente com a resistência interna dos MOSFETs em condução. O valor desta resistência é  $0,2 \Omega$ , que segundo [85] corresponde ao valor standard utilizado em simulações. O funcionamento desta topologia é simples, e consiste em comutar o condensador entre a bateria com maior tensão e a bateria com menor tensão. A estrutura do controlo implementada é a seguinte (este é o processo de controlo realizado em cada iteração):

- Calcula-se o valor médio da tensão nas baterias;
- Calcula-se para cada bateria a diferença, em valor absoluto, entre a tensão da bateria e a média;
- Se esta diferença for maior que um valor pré-definido, verifica-se a bateria com maior tensão ou com menor tensão (dependendo se é pretendido carregar ou descarregar o condensador), e conecta-se o condensador de equalização a essa bateria. Senão esta iteração é terminada;
- Volta ao início na próxima iteração. A iteração atual é dada por terminada.

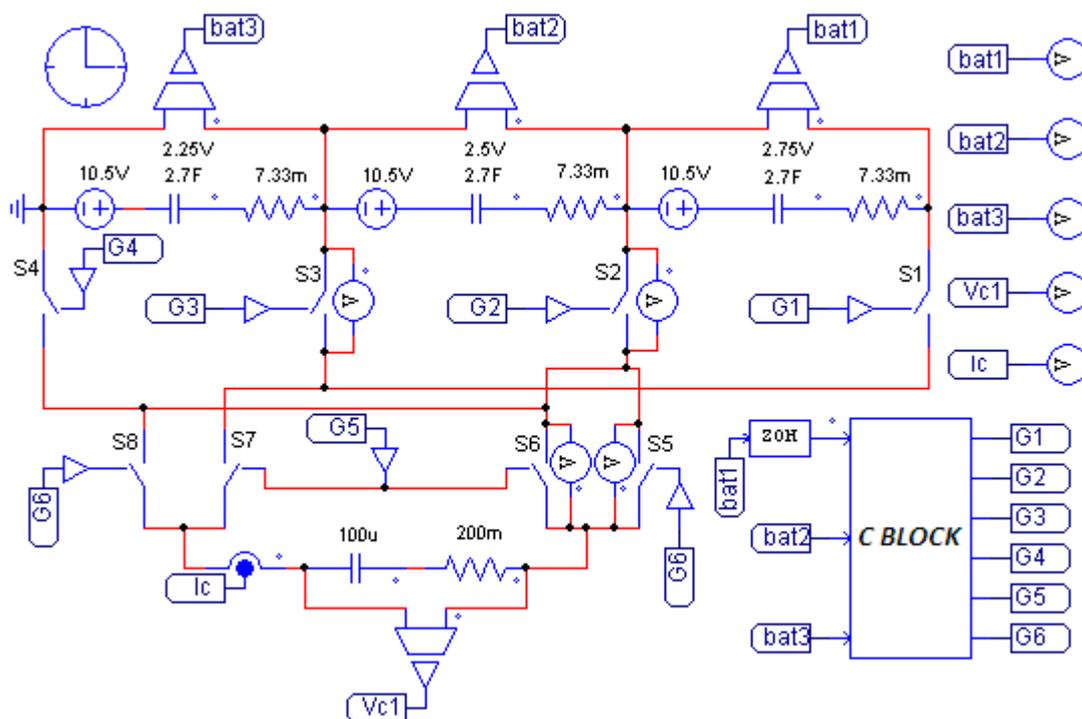


Figura 4.5 - Esquemático da topologia comutação de um único condensador em PSIM.

Na primeira configuração cada bateria tinha uma tensão inicial diferente ( $bat1=12,75 \text{ V}$ ;  $bat2=12,5 \text{ V}$ ;  $bat3=12,25 \text{ V}$ ). A primeira conclusão obtida na simulação desta topologia é que nos semicondutores controlados têm que ser possível conseguir

controlar quando estes entram em condução, em ambos os sentidos. Isto torna impossível a utilização de MOSFETs (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) ou IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) como dispositivo de comutação (pois não é possível controlar quando o diodo de proteção em antiparalelo usados nestes semicondutores se encontra em condução) o que é uma grande desvantagem desta topologia. Uma possível solução para este problema é apresentada na Figura 4.6 e consiste na utilização de dois MOSFETs em série (só conduz num sentido quando se atua na gate de um MOSFET). A desvantagem é que o número de dispositivos de comutação necessários duplica.

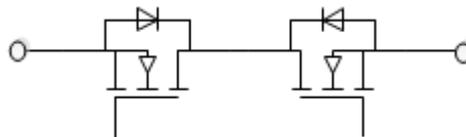


Figura 4.6 - MOSFETs ligados em série, com sentido de condução opostos.

Na Figura 4.7 está representado a tensão nas três baterias, para uma frequência de 20 kHz e um condensador de balanceamento de 100  $\mu$ F. Na simulação da Figura 4.7, a tensão da bateria *Bat2* não se altera no decorrer do processo de balanceamento, visto que a tensão corresponde a tensão média das três baterias. A troca de energia acontece entre as baterias *Bat1* e *Bat3*. Este caso representa a situação mais favorável para esta topologia, com 3 baterias. Nesta simulação verifica-se que a topologia usada é mais eficaz quando existem grandes desequilíbrios de tensão. Isso pode ser verificado na Figura 4.7 onde, no primeiro segundo de equalização a diferença das tensões das baterias é reduzida de 12,75 V para 12,6 V, enquanto no segundo apenas é reduzida de 12,6 V para 12,55 V.

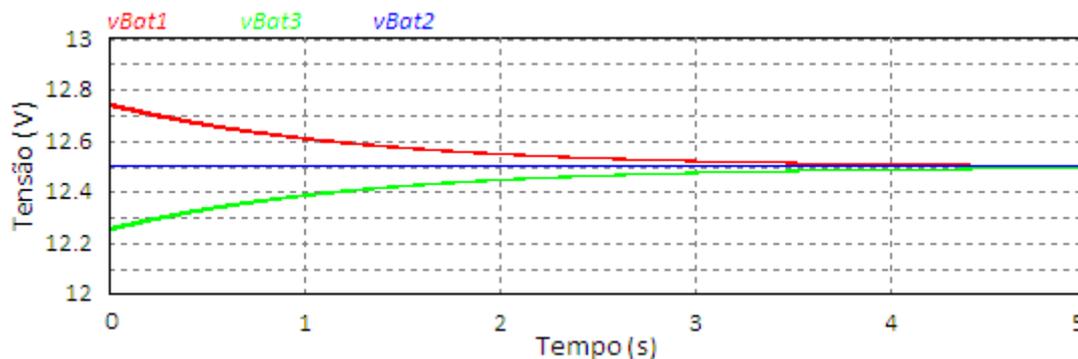


Figura 4.7 – Formas de onda das tensões nas baterias durante balanceamento com a topologia comutação de um único condensador.

. Na Figura 4.8 e Figura 4.9 estão apresentadas, respetivamente, a corrente e tensão no condensador empregue para a troca de energia entre baterias. Verifica-se que

a corrente no condensador diminui conforme a diferença de tensão entre estas baterias também diminui. Já a variação de tensão no condensador corresponde à diferença de tensão entre as bateria com maior (*Bat1*) e menor (*Bat3*) tensão.

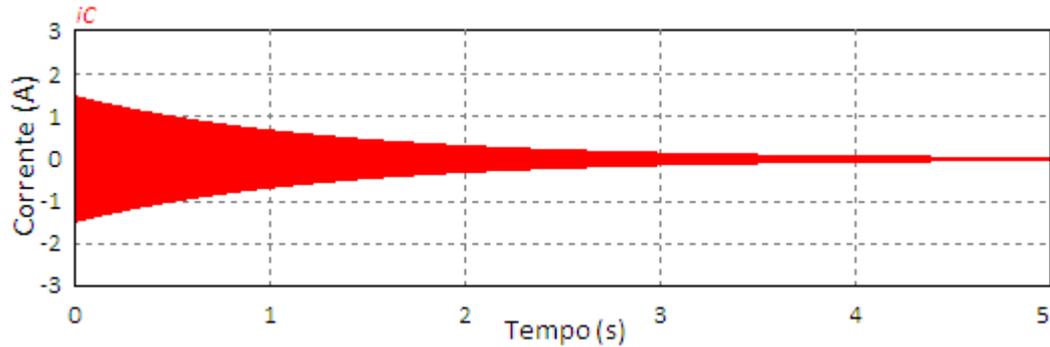


Figura 4.8 – Forma de onda da corrente no condensador de balanceamento na topologia comutação de um único condensador.

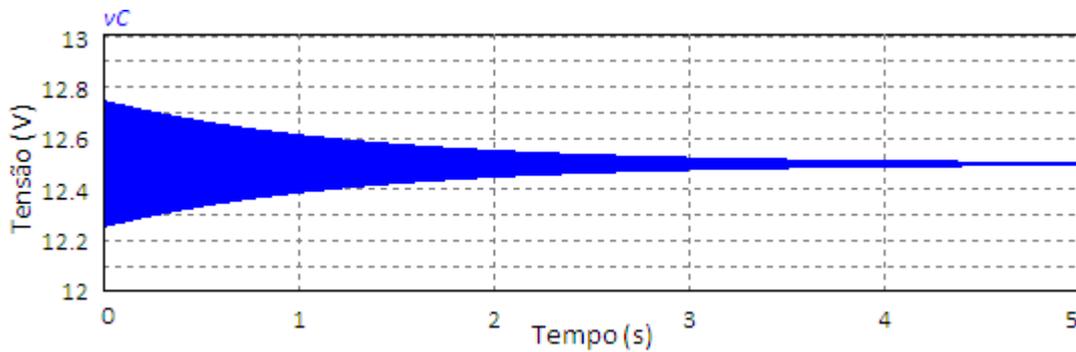


Figura 4.9 - Forma de onda da tensão no condensador de balanceamento na topologia comutação de um único condensador.

A Figura 4.10 e Figura 4.11 mostra a forma de onda da tensão e corrente, respetivamente, no condensador nos instantes iniciais do balanceamento (Figura 4.9 e Figura 4.8, respetivamente, ampliada entre 0,1 s e 0,10015 s). Em ambos os casos, na imagem está indicada a que bateria o condensador está ligado.

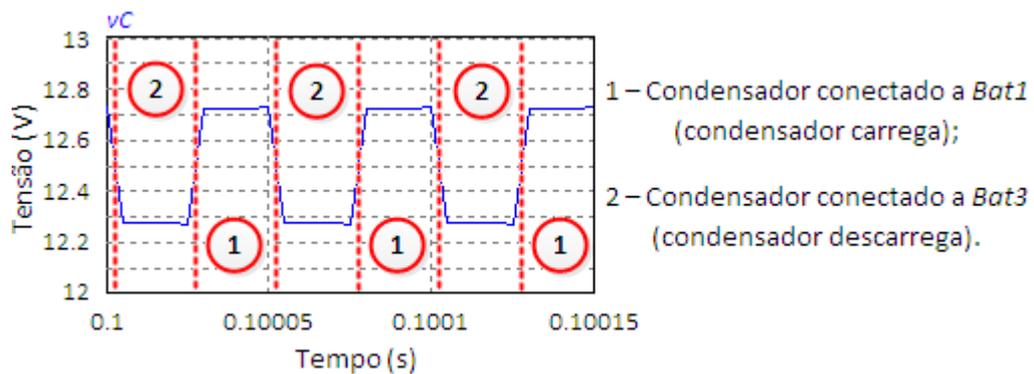


Figura 4.10 - Forma de onda da tensão no condensador de balanceamento na topologia comutação de um único condensador.

Em relação à corrente no condensador nota-se na Figura 4.8 e Figura 4.11 que o valor médio da corrente neste é zero.

Na Figura 4.12 apresenta-se a tensão em dois interruptores ( $S2$  e  $S5$ ). Pela figura pode-se observar que o interruptor  $S5$  apenas precisa de suportar a tensão do condensador. O mesmo se verifica para os interruptores  $S6$ ,  $S7$  e  $S8$ . Já no caso do interruptor  $S2$  para um banco composto por  $n$  baterias este tem que suportar a tensão de  $n-1$  baterias. Verifica-se o mesmo para os interruptores  $S1$ ,  $S3$  e  $S4$ .

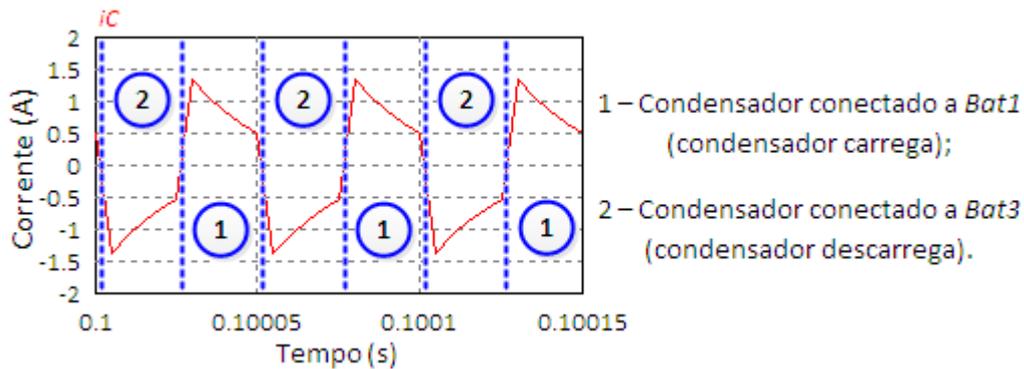


Figura 4.11 - Forma de onda da corrente no condensador de balanceamento na topologia comutação de um único condensador.

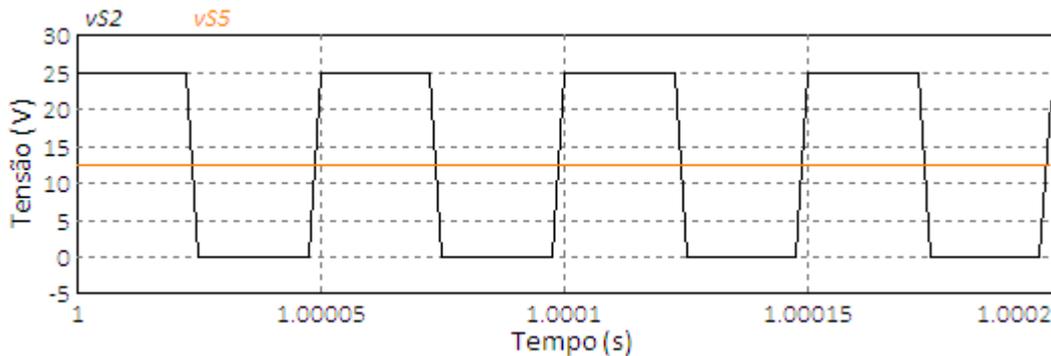


Figura 4.12 - Forma de onda das tensões no interruptor  $S2$  e  $S5$  durante 4 ciclos na topologia comutação de um único condensador.

De seguida, alteraram-se os valores da tensão nas baterias. Nesta caso, a tensão em duas baterias era igual ( $Bat3$  e  $Bat2$ ), cerca de 12,5 V e na outra bateria ( $Bat1$ ) era cerca de 12,8 V. O valor do condensador e frequência mantém-se os mesmos. A Figura 4.13 mostra a tensão nas baterias ao longo do processo de balanceamento. Ao fim de 5 s todas as baterias têm praticamente a mesma tensão de 12,6 V, que corresponde ao valor médio da tensão, no início do processo de equalização.

Na simulação da Figura 4.14 as baterias  $Bat1$ ,  $Bat2$  e  $Bat3$  têm uma tensão inicial de 12,8 V, 12,5 V e 12,7 V, respetivamente. Como se nota, com o decorrer do processo de equalização a tensão das baterias aproxima-se do valor médio da tensão inicial destas, cerca de 12,67 V.

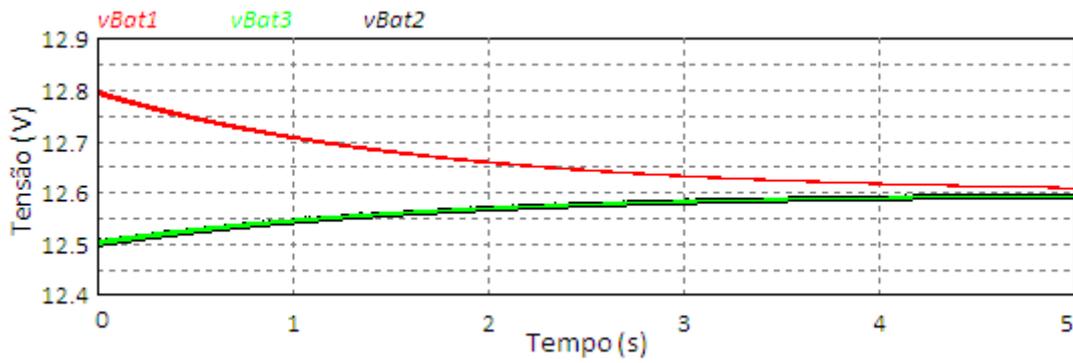


Figura 4.13 - Formas de onda das tensões nas baterias durante balanceamento com a topologia comutação de um único condensador.

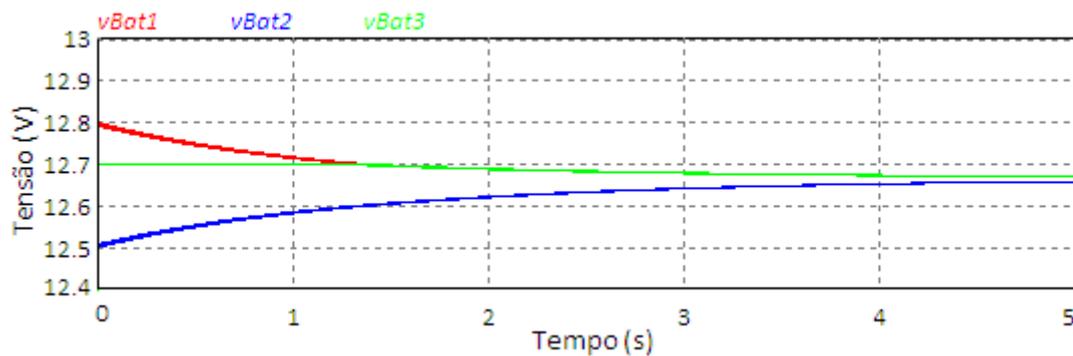


Figura 4.14 - Formas de onda das tensões nas baterias durante balanceamento com a topologia comutação de um único condensador.

#### 4.4.2. Topologia Condensadores Comutados

Na Figura 4.15 está representado o circuito em *PSIM* da topologia condensadores comutados, para três baterias (*Bat1*, *Bat2* e *Bat3*).

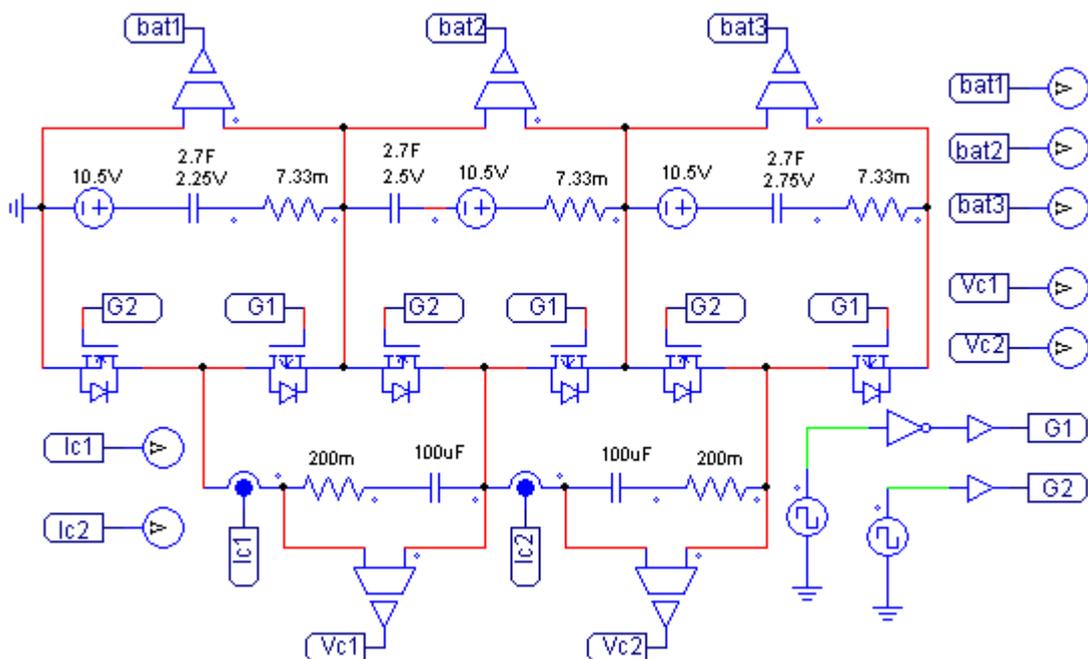


Figura 4.15 - Esquemático da topologia condensadores comutados em *PSIM*.

Em termos de controlo, esta topologia apenas necessita de dois sinais modulados por largura de pulso (*Pulse Width Modulation* - PWM) desfasados 180° entre si, e com um *duty-cycle* de 50%. No circuito utilizado em *PSIM* recorreu-se a duas fontes de tensão quadradas para implementar os sinais de PWM. Nesta topologia o processo de equalização não necessita de ter o conhecimento da tensão em cada bateria.

Antes da apresentação dos resultados das simulações computacionais, explica-se o funcionamento desta topologia. Na Figura 4.16 e na Figura 4.17 pretende-se indicar o caminho e o sentido da corrente, consoante os sinais aplicados na gate dos semicondutores de potência e a tensão nas baterias. Para simplificar a compreensão das imagens, apenas são utilizadas duas baterias. Pela Figura 4.16 também se consegue identificar a que bateria a o condensador se encontra conectado. Na Figura 4.17, apenas são apresentados para cada caso, os semicondutores que entram em condução.

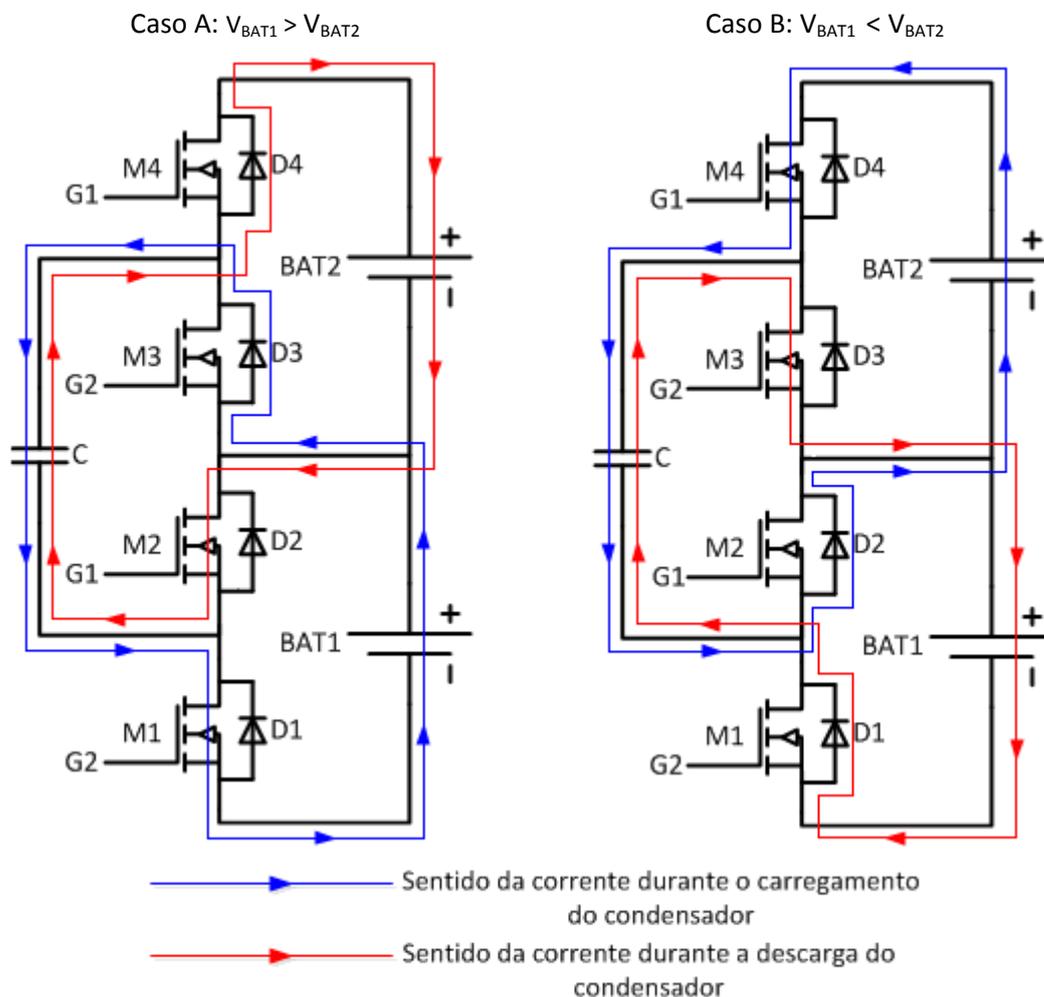


Figura 4.16 - Ilustração do sentido das correntes nesta topologia.

No caso A, quando o sinal *G2* está no estado *high*, o condensador está conectado à bateria 1 (*BAT1*) e recebe energia da bateria 1. A corrente flui pelo MOSFET *M1* e pelo diodo *D3*. Quando o sinal *G1* está no estado *high*, o condensador encontra-se conectado

à bateria 2 e transfere energia para esta. A corrente flui através do MOSFET  $M2$  e do diodo  $D4$ .

No caso B, quando o sinal  $G1$  está no estado *high*, o condensador está conectado à bateria 2 ( $BAT2$ ) e recebe energia desta. A corrente flui pelo MOSFET  $M4$  e pelo diodo  $D2$ . Quando o sinal  $G2$  está no estado *high*, o condensador encontra-se conectado a bateria 1 e transfere energia para esta. A corrente flui através do MOSFET  $M3$  e do diodo  $D1$ .

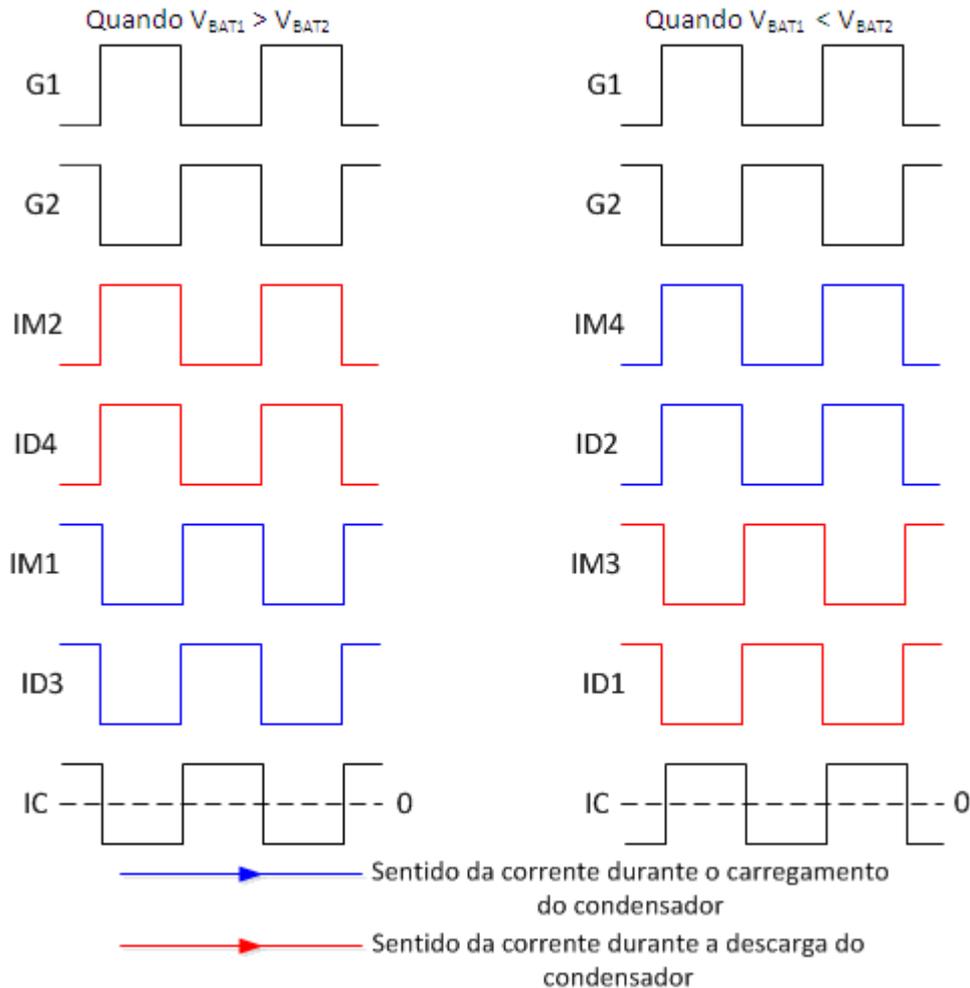


Figura 4.17 - Ilustração dos semicondutores de potência em condução consoante os sinais de gate aplicados a estes.

Nesta topologia além da simulação dos três casos anteriores, realizam-se ainda outras simulações, em que se variou o valor dos condensadores (entre 20  $\mu\text{F}$  e 10000  $\mu\text{F}$ ) e da frequência entre 500 Hz e 100 kHz. Estas simulações tinham como objetivo descobrir qual era o melhor valor de condensador a utilizar consoante a frequência utilizada.

Na primeira configuração cada bateria tinha uma tensão inicial diferente ( $Bat1=12,25\text{ V}$ ;  $Bat2=12,5\text{ V}$ ;  $Bat3=12,75\text{ V}$ ). O valor dos condensadores é 100  $\mu\text{F}$  e a

frequência 20 kHz. Na Figura 4.18 apresenta-se a tensão nas baterias durante o processo de equalização. Apesar de nesta topologia a energia ser transferida de forma sequencial, a tensão da *Bat2* não se altera, porque a diferença de tensão entre *Bat1* e *Bat2* é igual à diferença de tensão entre *Bat2* e *Bat3*. Assim a energia recebida é equivalente à energia transferida por esta bateria.

Em comparação com a simulação da Figura 4.7 (topologia comutação de um único condensador), verifica-se que no final do processo de balanceamento o desequilíbrio entre as tensões das baterias é maior, pois na topologia da Figura 4.7 a energia é transferida diretamente da *Bat1* para a *Bat3*, enquanto nesta simulação a energia é transferida da *Bat3* para *Bat2* e da *Bat2* para a *Bat1*. Assim, a corrente no condensador de equalização da topologia da Figura 4.7 é maior do que a corrente nos condensadores de equalização desta simulação, porque uma menor diferença de tensão nos condensadores resulta numa corrente de equalização menor.

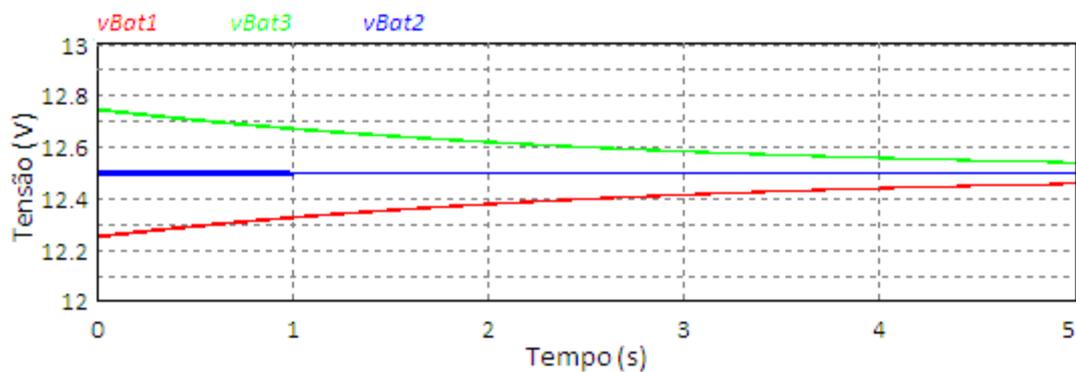


Figura 4.18 – Forma de onda das tensões nas baterias durante o balanceamento com a topologia condensadores comutados.

Na Figura 4.19 está apresentado a corrente em ambos os condensadores utilizados para equalização das baterias. A corrente é a mesma em ambos os condensadores, porque compensam ambos a mesma diferença de tensão entre baterias, como se pode observar na Figura 4.20.

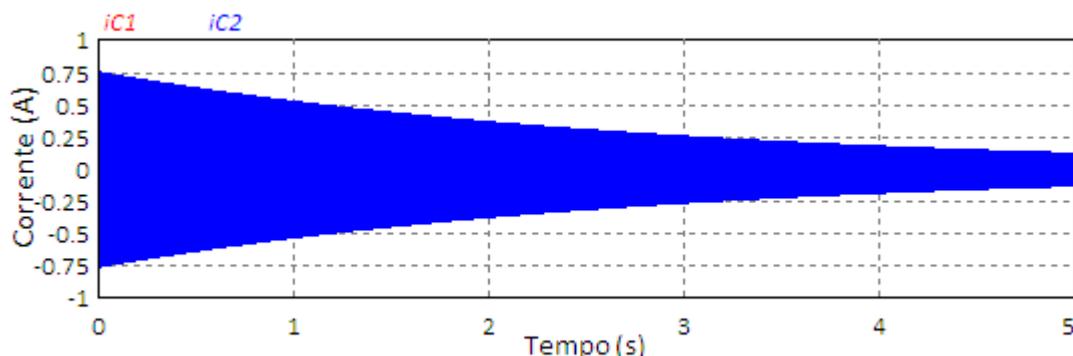


Figura 4.19 - Forma de onda das correntes nos condensadores de balanceamento na topologia condensadores comutados.

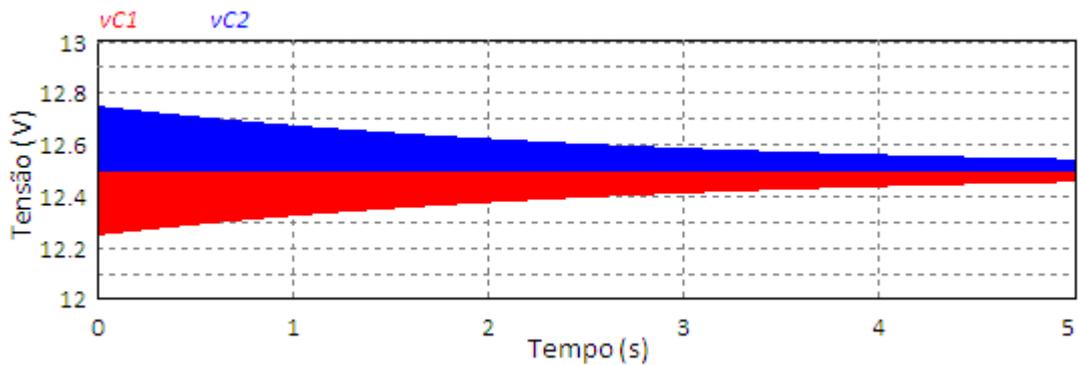


Figura 4.20 - Forma de onda das tensões nos condensadores de balanceamento na topologia condensadores comutados.

A Figura 4.20 mostra a tensão nos condensadores de equalização. A tensão no condensador 1 ( $v_{C1}$ ) corresponde à diferença de tensão entre *Bat1* e *Bat2*, enquanto no condensador 2 ( $v_{C2}$ ) corresponde à diferença entre *Bat2* e *Bat3*. A Figura 4.21 exibe a corrente na *Bat1* e na *Bat3*.

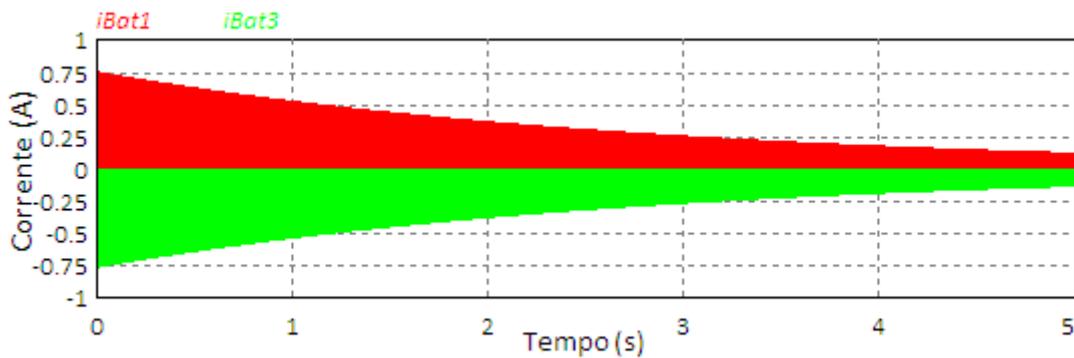


Figura 4.21 - Forma de onda das correntes na *Bat1* e *Bat3* durante o balanceamento com a topologia condensadores comutados.

Já a Figura 4.22 exibe a corrente na *Bat2*. Nestas imagens é possível verificar que a *Bat3* só fornece energia, a *Bat1* só recebe energia, enquanto a *Bat2* recebe energia e transfere energia. O valor da corrente nas baterias *Bat1* e *Bat3* é o mesmo, apenas com sentido oposto. Isto acontece porque é a *Bat3* que fornece a energia para a *Bat1*. A *Bat2* funciona como uma ponte para transferência de energia entre a *Bat3* e *Bat1*. Ou seja, a *Bat2* recebe energia da *Bat3* que de seguida transfere para a *Bat1*.

Na Figura 4.23 apresenta-se a corrente nos condensadores de forma mais pormenorizada, durante quatros ciclos, entre os instantes 0,1 s e 0,10015 s. Na mesma figura também é possível observar que o valor médio da corrente no condensador de equalização é zero.

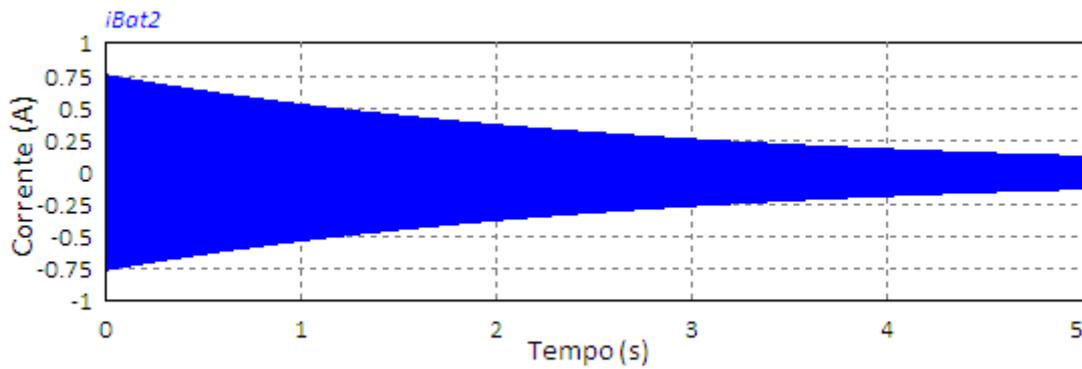


Figura 4.22 - Forma de onda das correntes na *Bat2* durante o balanceamento com a topologia condensadores comutados.

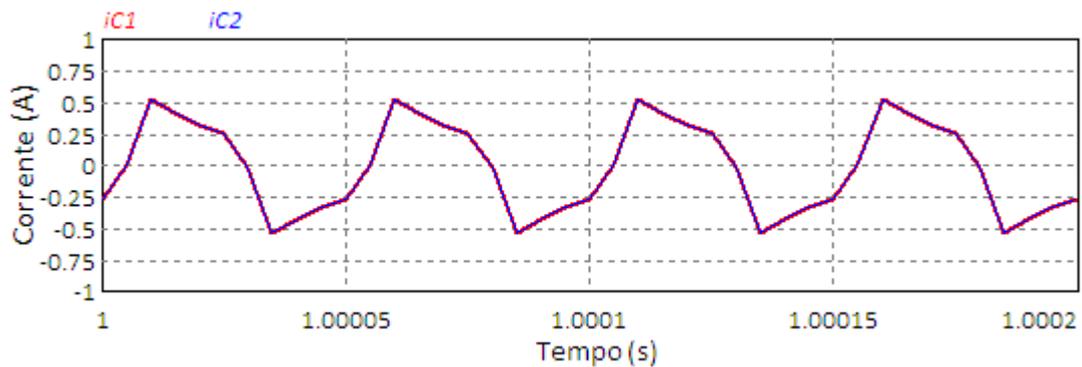


Figura 4.23 - Corrente nos condensadores de balanceamento ao pormenor (durante 4 ciclos).

Já na Figura 4.24 e na Figura 4.25 apresenta-se a corrente nas baterias de forma mais pormenorizada, durante quatros ciclos. Esta figura realça o que foi mencionado anteriormente sobre a corrente nas baterias.

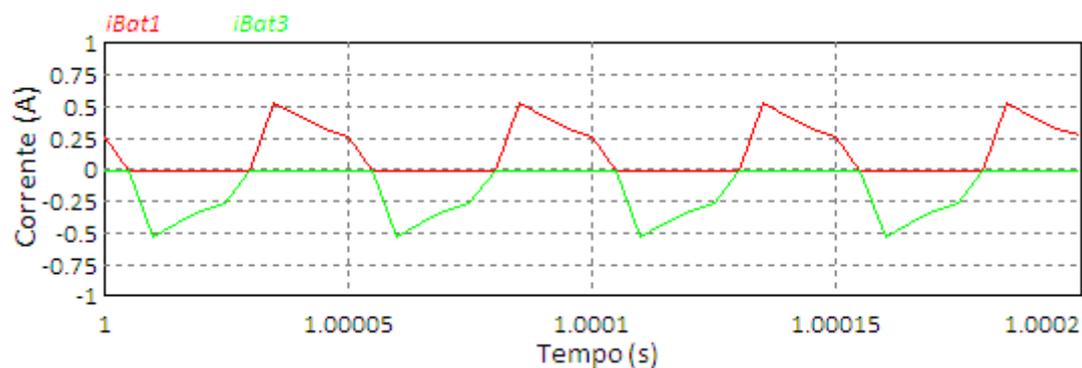


Figura 4.24 - Corrente em *Bat1* e *Bat3* ao pormenor (durante 4 ciclos).

Na Figura 4.26 estão apresentadas as tensões que os MOSFETs da *Bat3* têm que suportar. A onda  $v_{MosI}$  corresponde à tensão do MOSFET inferior enquanto a onda  $v_{MosS}$  corresponde à tensão do MOSFET superior. Através da Figura 4.26 é possível verificar que ambos os MOSFETs têm de suportar a mesma tensão, e corresponde apenas à tensão da própria bateria, e não à tensão do banco de baterias. De referir que apesar de se exibir unicamente a tensão num MOSFET do braço superior, e num

MOSFET do braço inferior, para os restantes semicondutores de potência verifica-se o mesmo, ou seja, estes têm que suportar unicamente a tensão da bateria à qual estão associados.

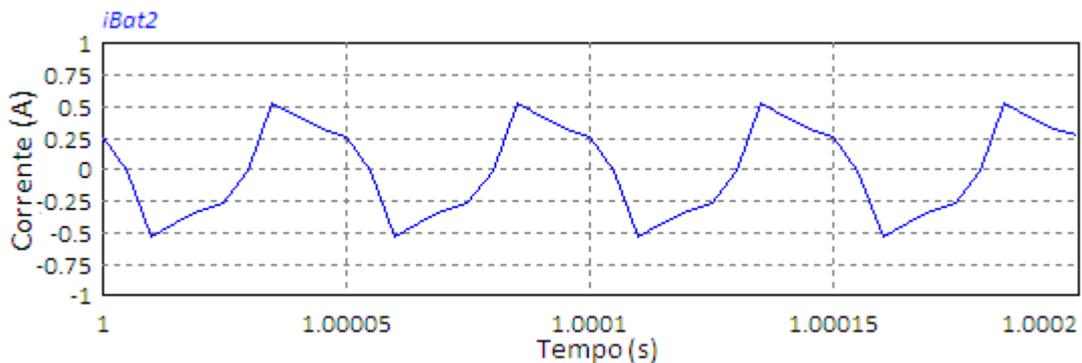


Figura 4.25 - Corrente em Bat2 ao pormenor (durante 4 ciclos).

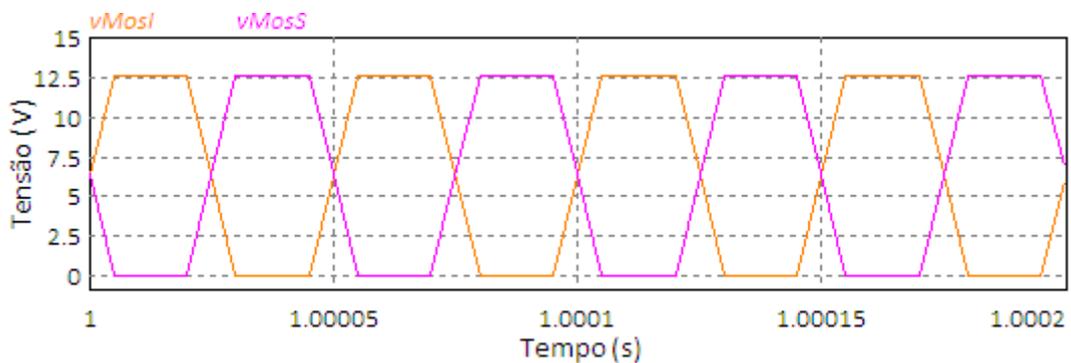


Figura 4.26 – Tensão nos semicondutores de potência (MOSFETs), durante 4 ciclos.

Em todas as simulações com a exceção da representada na Figura 4.27 a resistência em série com o condensador é de  $0,2 \Omega$ . Na simulação da Figura 4.27 o valor da resistência utilizado é  $0,1 \Omega$ . O objetivo desta simulação é verificar o efeito da resistência interna do MOSFET e do ESR do condensador no tempo de equalização.

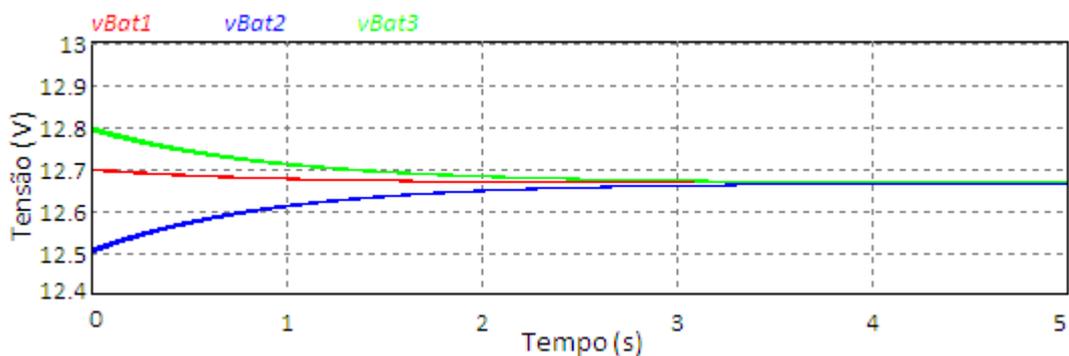


Figura 4.27 – Forma de onda das tensões nas baterias durante o balanceamento com a topologia condensadores comutados com uma resistência interna de  $0,1\Omega$ .

Comparativamente com os resultados obtidos na Figura 4.18, verifica-se que quanto menor for o valor desta resistência menor é o tempo de equalização necessário.

Isto acontece pois quanto menor for a resistência do sistema maior será a corrente de equalização. Consequentemente, o tempo necessário para o processo de equalização também será menor.

Como esta é a topologia a ser implementada realizam-se várias simulações com diferentes valores de condensadores e diferentes frequências. Na secção “Conclusão” deste capítulo explicasse o motivo de escolha desta topologia. O tempo de duração da simulação foi de 15 segundos. Na Tabela 4.1 apresenta-se o tempo que demorou até o desequilíbrio entre as baterias ser menor que 10 mV. Caso isso não aconteça nos 15 segundos simulados, apresenta-se a maior diferença de tensão verificada entre baterias, no fim dos 15 s. O objetivo destas simulações era verificar qual o valor do condensador que apresenta melhores resultados a diversas frequências. Como era esperado consoante se aumenta a frequência o valor do condensador necessário diminui.

Tabela 4.1 – Simulações com diferentes condensadores a diferentes frequências.

Condensador	Frequência					
	500 Hz	1 kHz	10 kHz	20 kHz	50 kHz	100 kHz
20 $\mu$ F	0,471 V	0,448 V	0,146 V	0,056 V	13,5 s	10,8 s
47 $\mu$ F	0,439 V	0,386 V	0,04 V	14 s	10,5 s	10s
100 $\mu$ F	0,378 V	0,286 V	13,5 s	11 s	10 s	9,7 s
220 $\mu$ F	0,272 V	0,148 V	10,5 s	10 s	9,7 s	9,7 s
470 $\mu$ F	0,132 V	0,039 V	10 s	9,8 s	9,7 s	9,7 s
1000 $\mu$ F	0,034 V	13,35 s	9,8 s	9,7 s	9,7s	9,7 s
10000 $\mu$ F	10 s	9,8 s	9,7 s	9,7	9,7 s	9,7 s

Posteriormente, alteraram-se os valores das tensões nas baterias. Neste caso, a tensão nas baterias *Bat1* e *Bat2* era a mesma, cerca de 12,5 V, e na outra bateria (*Bat3*) era cerca de 12,8 V. A Figura 4.28 mostra a tensão nas baterias ao longo do processo de balanceamento. Nesta simulação, ao contrário do que acontece na simulação da Figura 4.13 a tensão nas baterias *Bat1* e *Bat2* não aumenta ao mesmo ritmo. Isto deve-se ao facto de nesta topologia a energia ser transferida de forma sequencial. Assim, como a diferença entre *Bat3* e *Bat2* é maior que a diferença entre *Bat2* e *Bat1*, a tensão na *Bat2* aumenta mais rapidamente.

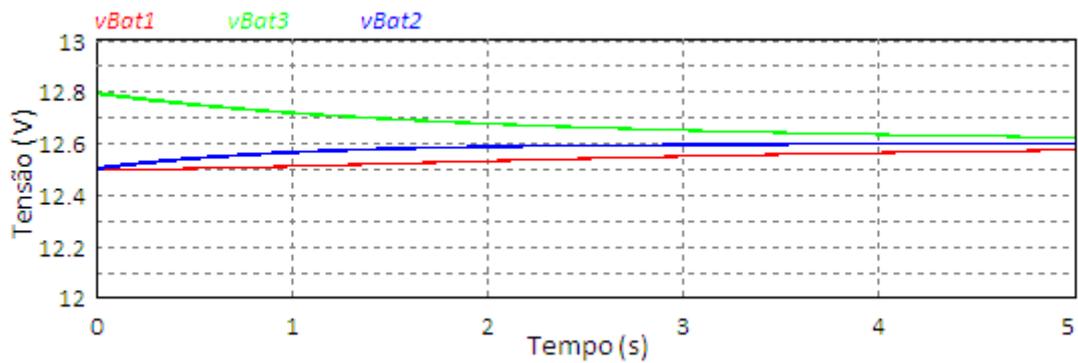


Figura 4.28 - Forma de onda das tensões nas baterias durante o balanceamento com a topologia condensadores comutados.

A Figura 4.29 mostra a tensão nos condensadores durante o processo de balanceamento. Como no início deste processo a diferença de tensão entre *Bat1* e *Bat2* é pequena, a diferença de tensão no condensador *C2* também é pequena. Com o aumento da diferença de tensão entre as baterias 1 e 3 também aumenta a diferença de tensão no condensador *C2*.

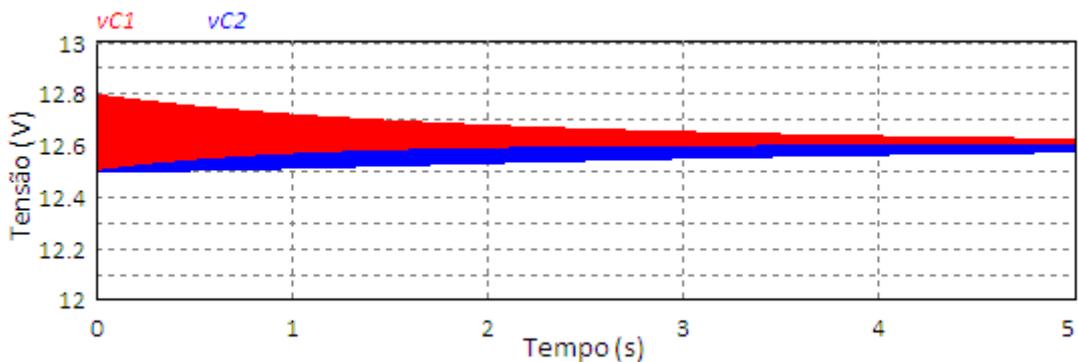


Figura 4.29- Forma de onda das tensões nos condensadores de equalização durante o balanceamento com a topologia condensadores comutados.

Na simulação da Figura 4.30 as baterias *Bat1*, *Bat2* e *Bat3* têm uma tensão inicial de 12,7 V, 12,5 V e 12,8 V, respetivamente.

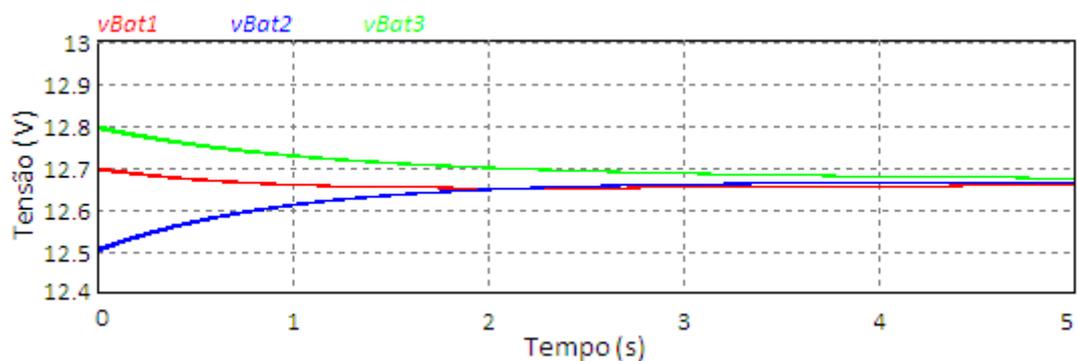


Figura 4.30 - Forma de onda das tensões nas baterias durante o balanceamento com a topologia condensadores comutados.

Na Figura 4.30 com o decorrer do processo de equalização, as tensões das baterias aproximam-se do valor médio da tensão inicial destas, cerca de 12,67 V. No entanto, em comparação com a simulação da Figura 4.14 (mesmas condições, mas topologia diferente) o desequilíbrio entre baterias parece ser idêntico no fim dos cinco segundos de equalização.

#### 4.4.3. Topologia Dupla Camada de Condensadores Comutados

Na Figura 4.31 está representado o circuito em *PSIM* da topologia dupla camada de condensadores comutados, para três baterias (*Bat1*, *Bat2* e *Bat3*). A única diferença entre esta topologia e a anterior é o número de camadas de condensadores utilizados. A utilização do condensador C3 em paralelo com os condensadores C1 e C2 origina uma nova camada de condensadores. O processo de controlo é exatamente o mesmo que o utilizado na topologia anterior.

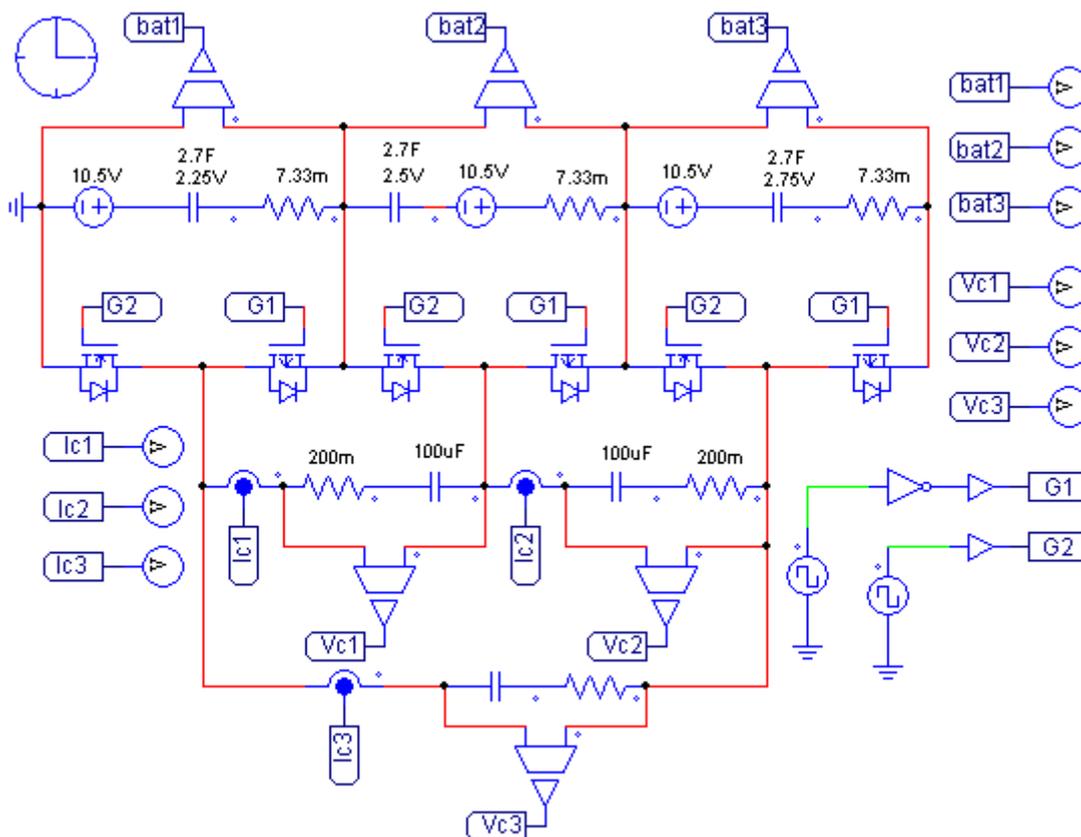


Figura 4.31 - Esquemático da topologia dupla cascata de condensadores comutados em *PSIM*.

Para esta topologia simularam-se também as três situações anteriores, à mesma frequência (20 kHz), e com o mesmo valor de condensadores (100  $\mu$ F). Na simulação da Figura 4.32 cada bateria tinha uma tensão inicial diferente (*Bat1*=12,25 V; *Bat2*=12,5 V; *Bat3*=12,75 V). Na Figura 4.35 a tensão em duas baterias (*Bat1* e *Bat2*)

era a mesma, cerca de 12,5 V, e na outra bateria (*Bat3*) era cerca de 12,8 V. Já na Figura 4.36 as baterias *Bat2* e *Bat3* têm a mesma tensão inicial de 12,8 V e a tensão inicial na *Bat1* é 12,5 V.

Ao observar as simulações para os três casos (Figura 4.32, Figura 4.35 e Figura 4.36) verifica-se que nesta topologia o desequilíbrio entre baterias foi corrigido mais rapidamente para todos os casos, em comparação com as duas topologias simuladas anteriormente.

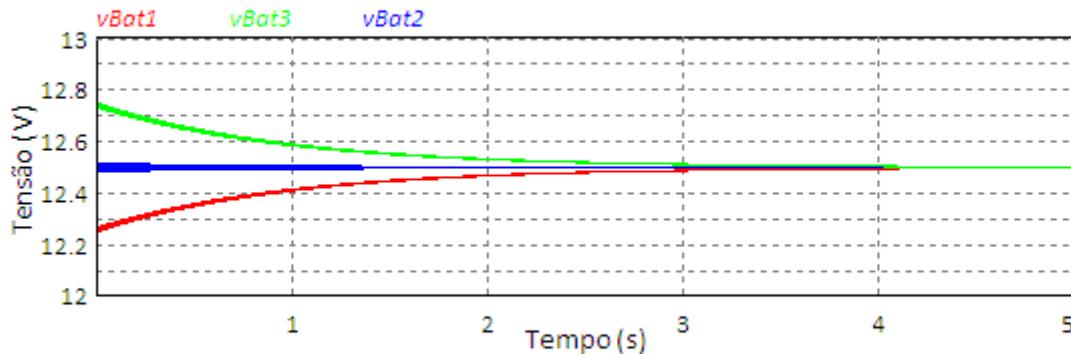


Figura 4.32 – Forma de onda das tensões nas baterias durante o balanceamento com a topologia dupla cascata de condensadores comutados.

Pela Figura 4.33 e pela Figura 4.34 observa-se que nesta topologia as correntes de equalização nas baterias chegam a ser superiores ao dobro das verificadas nas simulações da topologia condensadores comutados, no início do processo de equalização.

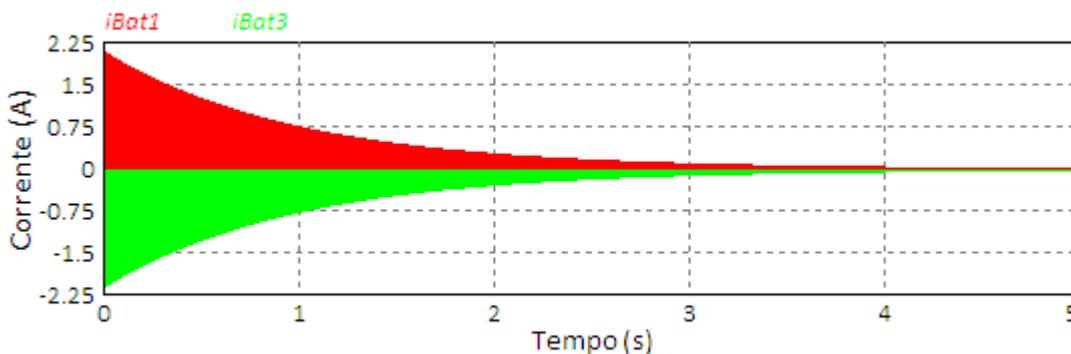


Figura 4.33 – Forma de onda das correntes na *Bat1* e na *Bat3* durante o balanceamento topologia dupla cascata de condensadores comutados.

Na Figura 4.35 e na Figura 4.36 apresenta-se as tensões nas baterias ao longo do processo de equalização. Em ambas figuras verifica-se que a partir dos 2,5 s todas as baterias estão praticamente equilibradas.

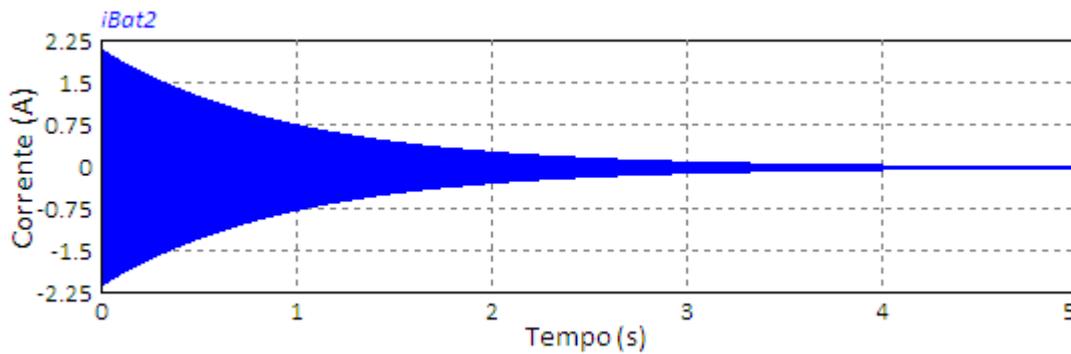


Figura 4.34 - Forma de onda das correntes na *Bat2*o balanceamento topologia dupla cascata de condensadores comutados.

Em comparação com o método de balanceamento condensadores comutados, em alguns casos, a redução do tempo de equalização é bastante significativa. Isto indica que a redução do tempo de equalização pode compensar o custo superior da topologia dupla cascata de condensadores comutados.

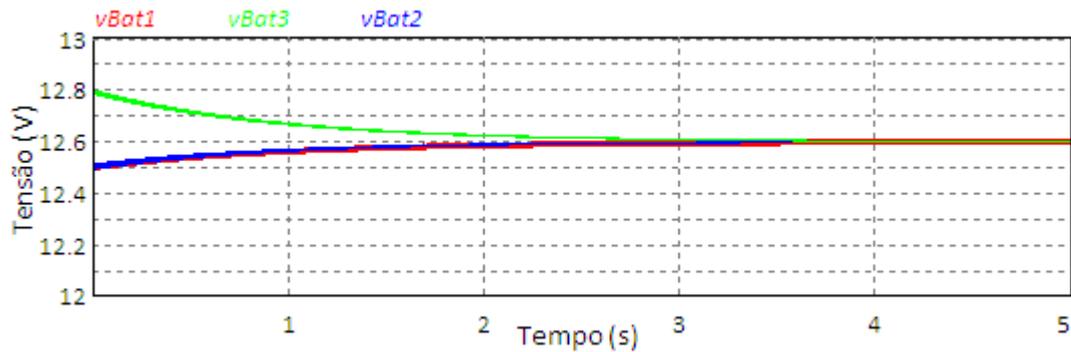


Figura 4.35 - Forma de onda das tensões nas baterias durante o balanceamento com a topologia dupla cascata de condensadores comutados

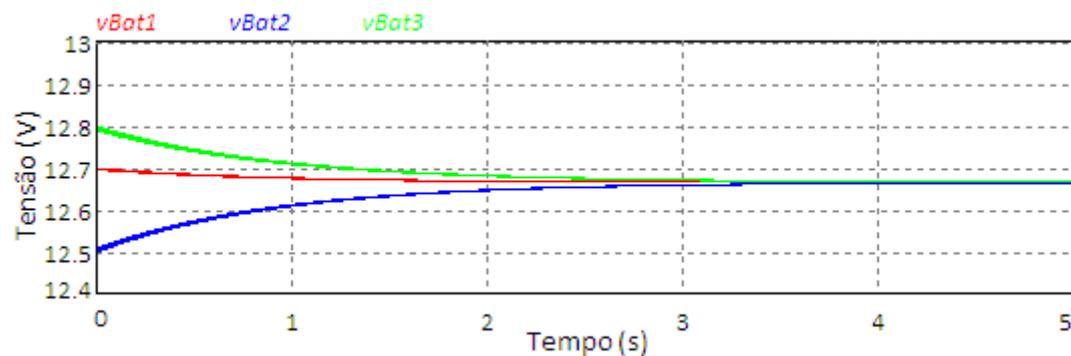


Figura 4.36 - Forma de onda das tensões nas baterias durante o balanceamento com a topologia dupla cascata de condensadores comutados.

## 4.5. Conclusão

O modelo de simulação das baterias utilizado é o método simples. Este método é simples e não necessita de testes experimentais para obtenção de parâmetros. No

entanto, este método não é muito preciso e modela de forma linear a relação entre SoC e tensão nos terminais da bateria.

Em relação à utilização do condensador como elemento responsável pela equalização das baterias podem-se retirar fundamentalmente duas conclusões. A primeira é que a corrente é controlada essencialmente pela resistência equivalente do circuito de balanceamento, e pela diferença de tensão entre as baterias. Assim, quanto mais baixo for esta resistência melhor, pois o processo de equalização vai ser mais rápido. A segunda é que o processo de balanceamento pode ser mais demorado na sua parte final que no seu início. Isto deve-se ao facto que quanto menor for a diferença de tensão entre as baterias menor será a corrente de equalização.

Das três topologias simuladas aquela que apresenta um menor tempo de equalização é a topologia dupla cascata de condensadores. Depois, verifica-se que para um número reduzido de baterias, a topologia condensadores comutados apesar de utilizar mais elementos para balanceamento que a topologia comutação de um único condensador não apresenta menor tempo de balanceamento. Além disso, dependendo do caso, o tempo de balanceamento na topologia condensadores comutados pode ser superior. Contudo, numa primeira fase, nesta dissertação é implementada a topologia condensadores comutados. As razões são o facto de necessitar de menos semicondutores controlados que a topologia comutação de um único condensador, e depois de o sistema estar validade e funcional, e caso se pretenda aumentar a velocidade de equalização basta acrescentar uma cascata de condensadores.



# CAPÍTULO 5

## Implementação do BMS e da Interface com o Cockpit

### 5.1. Introdução

Neste capítulo são descritos os passos realizados para a implementação do sistema de gestão de baterias (*Battery Management System – BMS*). Ao nível do hardware implementou-se uma solução genérica, de forma a permitir adicionar ou retirar baterias ao sistema de BMS. Isso é possível porque cada bateria tem a sua própria placa de potência. Ao nível do controlo o número de baterias está dependente do número de canais de conversores de analógico para digital (*Analog to Digital Converter – ADC*) disponíveis no microcontrolador. Contudo este obstáculo pode ser facilmente ultrapassado com multiplexador ou com a utilização de ADCs externos.

Em primeiro lugar apresenta-se o circuito de potência que é composto pelo circuito de equalização das baterias. De seguida, aborda-se o circuito de controlo que é constituído pelos diversos tipos de sensores utilizados e circuitos de condicionamento destes sinais, pelos *drivers* dos semicondutores, microcontrolador e circuito de proteções. Por fim, mostrar-se a estrutura do controlo digital implementado no microcontrolador.

Todos os circuitos implementados foram previamente testados e implementados em *breadboard* ou em *veroboard*. Depois de estes circuitos estarem validados procedeu-se à implementação em placas de circuito impresso (*Printed Circuit Board - PCB*).

### 5.2. Circuito de Potência

O circuito de Potência é composto pela placa de balanceamento, pelo banco de baterias e pelo condensador de balanceamento. Mas, durante a realização dos testes também foi utilizado um disjuntor como interruptor, entre o banco de baterias e a placa de balanceamento. A placa de balanceamento contém o hardware responsável pelo interface entre as baterias e o condensador de balanceamento.

Na Figura 5.1 apresenta-se o circuito de potência do BMS com os elementos que constituem o mesmo.

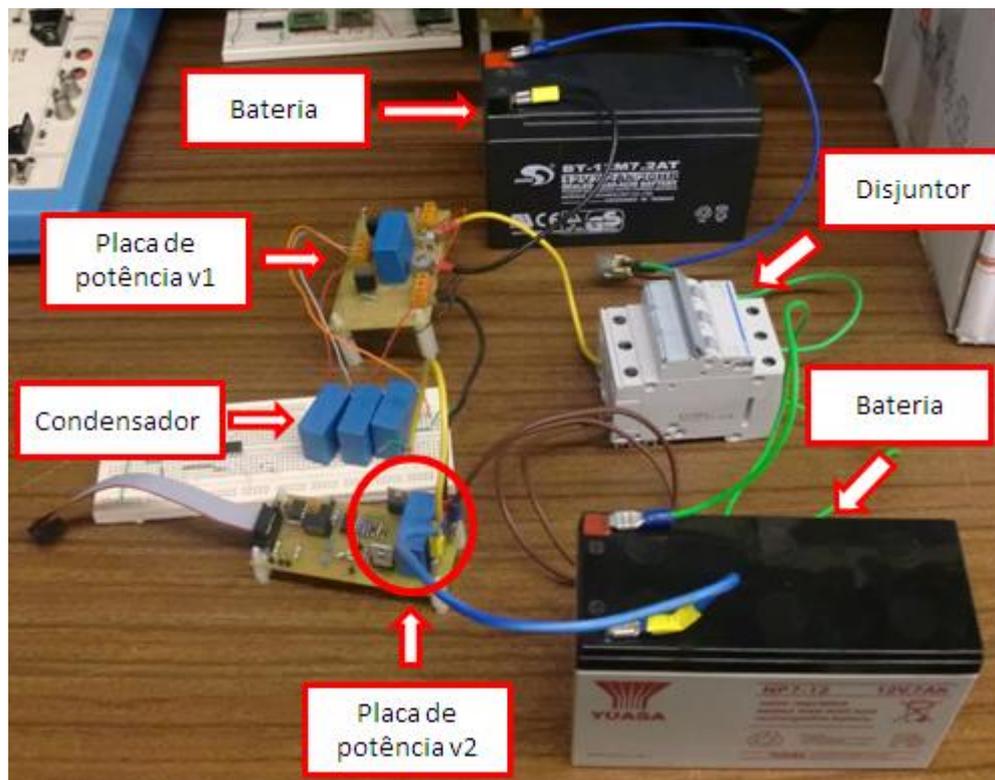


Figura 5.1 – Circuito de potência com todos os seus componentes.

### 5.2.1. Placa de Balanceamento

Na Figura 5.2 é apresentada a primeira versão do circuito da placa de balanceamento montado numa placa *veroboard*. A placa de balanceamento foi projetada com o intuito de se utilizar uma placa por bateria, tornando assim a solução genérica (em relação ao número de baterias). A primeira versão era constituída por dois MOSFETs (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*), um do tipo P (*IRF9640*) colocado na parte superior do braço e outro do tipo N (*IRF540N*) colocado na parte inferior do braço (Figura 5.3 (a)). O MOSFET *IRF9640* suporta uma tensão de 200 V entre o *drain* e a *source*, uma corrente de 11 A, e possui uma resistência interna em condução de 0,5  $\Omega$ . Já o MOSFET *IRF540N* suporta uma tensão de 100 V entre o *drain* e a *source*, uma corrente de 33 A, e possui uma resistência interna em condução de 0,044  $\Omega$ . Estes MOSFETs não são os ideais para a aplicação e estão sobredimensionados. Contudo, estes eram os que estavam disponíveis no Laboratório de Eletrónica de Potência da Universidade do Minho (GEPE).

Ao utilizar esta configuração (MOSFETs do tipo P e tipo N) tinha-se como objetivo poupar o uso de fontes isoladas. Isto era possível porque a alimentação dos optoacopladores era realizada a partir da respetiva bateria.

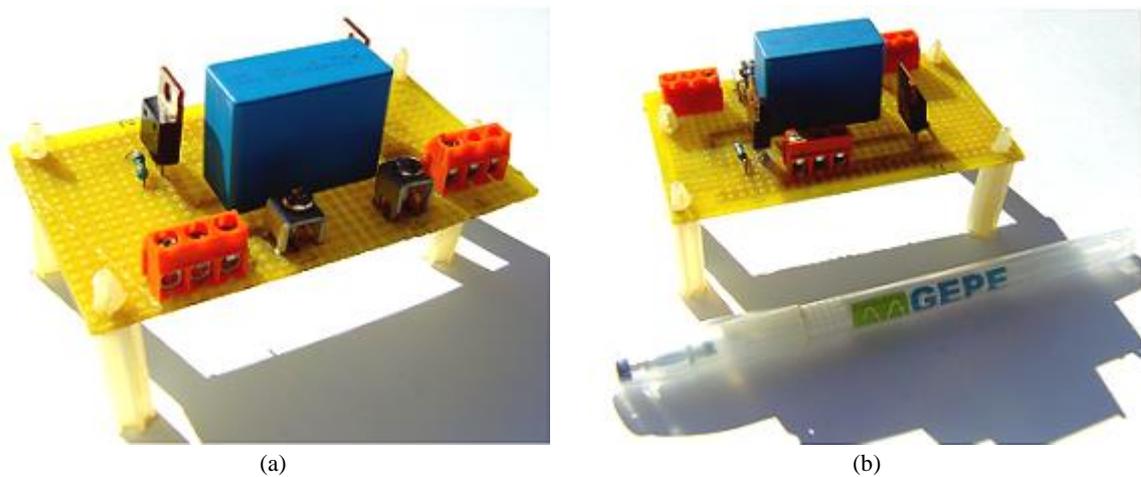


Figura 5.2 - Montagem em veroboard da primeira versão da placa de balanceamento: (a) Vista frontal; (b) Vista da retaguarda.

Todavia, com a realização de testes verificou-se que os MOSFETs *IRF9640*, a elevadas frequências, aqueciam excessivamente devido à sua resistência interna elevada, quando comparado com a resistência interna dos MOSFETs *IRF540N*. Para ultrapassar este problema optou-se por utilizar somente MOSFETs do tipo N (Figura 5.3 (b)). Contudo, é necessário utilizar uma fonte de alimentação isolada para alimentar o *driver* que atua o MOSFET superior do braço. Em paralelo com as baterias utiliza-se um condensador como filtro. Este deve ser de polipropileno para responder às variações de alta frequência da tensão. Os conectores presentes na placa destinam-se a permitir a ligação do condensador de equalização, dos sinais de gate, alimentação do circuito de controlo e conexão à placa seguinte.

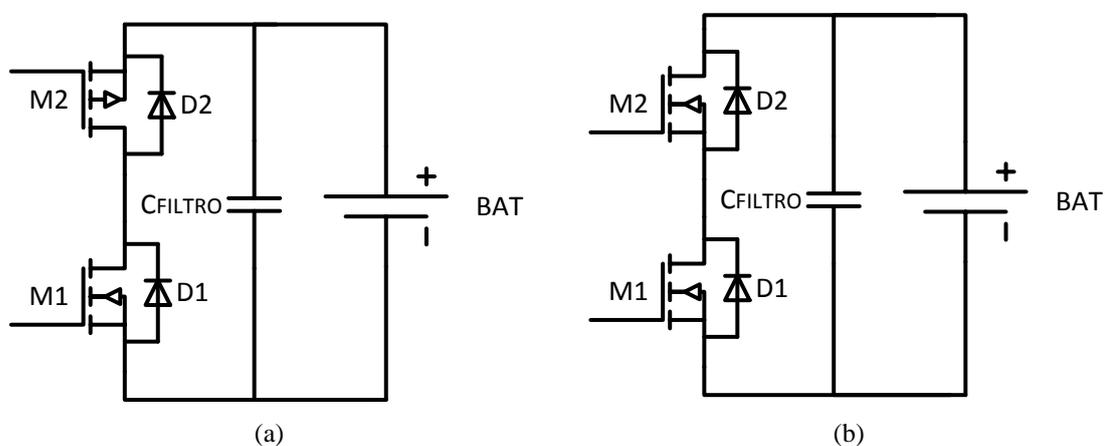


Figura 5.3 – Esquema de ligação dos MOSFETs por cada bateria: (a) com um MOSFET tipo P (*M2*) e um MOSFET tipo N (*M1*); (b) ambos os MOSFETs tipo N.

Para proteção da *gate* dos MOSFETs contra sobretensões são utilizados, entre esta e a *source* do MOSFET, dois díodos de *zener* em antiparalelo de 16 V. Em paralelo com estes também é ligada uma resistência para caso ocorra alguma falha o MOSFET não entrar em condução, sem se pretender.

### 5.2.2. Banco de Baterias

Numa primeira fase, o banco de baterias era composto por duas baterias de Chumbo-Ácido de 12 V e 33 Ah, modelo *Power Mobility WCG-U1*, Figura 5.4. Estas são as baterias utilizadas pelo CEPIUM (Carro elétrico *Plug-In* da Universidade do Minho) no seu sistema de armazenamento de energia. As duas baterias estavam ligadas em série, pelo que o banco tinha uma tensão nominal de 24 V. Contudo, devido ao tempo de duração dos ensaios do sistema de balanceamento ser muito longo, decidiu-se diminuir a capacidade das baterias utilizadas. Assim, numa segunda fase utilizou-se uma bateria de 4,2 Ah e 12 V (modelo *4-12B* produzida pela *Bentel Security*), e uma bateria de 7,2 Ah e 12 V (modelo *BT-12M7.2AT* produzida pela *Saite Power Source Science & Technology*) ligadas em série.



Figura 5.4 – Bateria de 12 V e 33 Ah, modelo *Power Mobility WCG-U1*.

### 5.2.3. Condensador

Para determinar o condensador com o qual o sistema tem melhor desempenho foram testadas várias soluções (foram utilizados diferentes valores de condensadores e diferentes tipos de condensadores (eletrolítico e polipropileno), com diferentes valores de frequência de comutação. A solução que apresentou resultados satisfatórios, até ao momento, consistiu num condensador polipropileno de 66  $\mu\text{F}$  (corresponde a associação

em paralelo de três condensadores de 22  $\mu\text{F}$ , Figura 5.5), para uma frequência de 80 kHz.

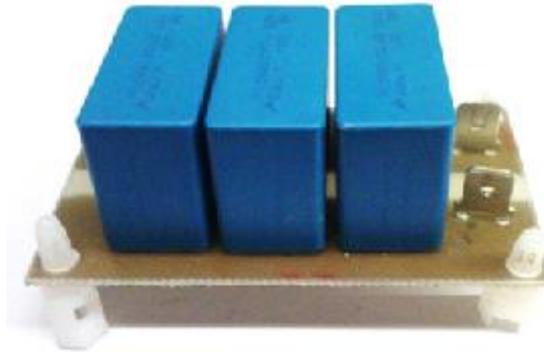


Figura 5.5 – Condensadores de equalização.

### 5.3. Circuito de Controlo

O circuito de controlo é o responsável pela aquisição da tensão em cada bateria, da temperatura e da corrente do banco de baterias. Faz parte ainda do sistema de controlo o circuito de comando dos semicondutores de potência, bem como o sistema de proteções. De seguida, explica-se como foram implementados e dimensionados os diversos circuitos responsáveis por estas tarefas.

#### 5.3.1. Sensor de Tensão

Para medir a tensão em cada bateria é necessário um dispositivo que o faça com isolamento elétrico. Isto é necessário por duas razões. A primeira porque as baterias estão conectadas em série, e a massa das baterias (a exceção da primeira) é diferente da massa do circuito. A segunda porque a utilização de um divisor resistivo para cada bateria também não funciona devido à baixa resolução conseguida para um elevado número de baterias ligadas em série. O dispositivo escolhido para sensor de tensão é o optoacoplador linear *IL300*. Na Figura 5.6 apresenta-se a solução adotada para medir a tensão em cada bateria. Figura 5.7 encontra-se uma imagem da implementação do circuito de teste do funcionamento do *IL300*.

O *IL300* é constituído por um díodo emissor de luz (*Light-Emitting Diode* – LED) e por dois fotodíodos independentes. Um fotodíodo (pinos 3 e 4 – passará a ser designado por fotodíodo 1) fornece um sinal de *feedback* que controla a corrente no LED. O outro fotodíodo (pinos 5 e 6 - passará a ser designado por fotodíodo 2) proporciona isolamento galvânico entre a entrada e a saída [86].

Todas as equações apresentadas nesta secção foram retiradas de [86]. A corrente fornecida pelo fotodíodo 1,  $I_{p1}$ , tem que ter uma amplitude que force a tensão  $V_b$  a ser

igual à tensão  $V_a$  ( para manter a tensão igual em ambas entradas do amplificador operacional), equação (5.1). Esta corrente também é diretamente proporcional ao fluxo incidente no LED (corresponde ao ganho de realimentação  $K1$  vezes a corrente de excitação no LED ( $I_F$ ), equação (5.2)). Esta operação é responsável por linearizar o fluxo do LED. O amplificador operacional tem que fornecer ao LED a corrente para manter a relação da equação (5.1).

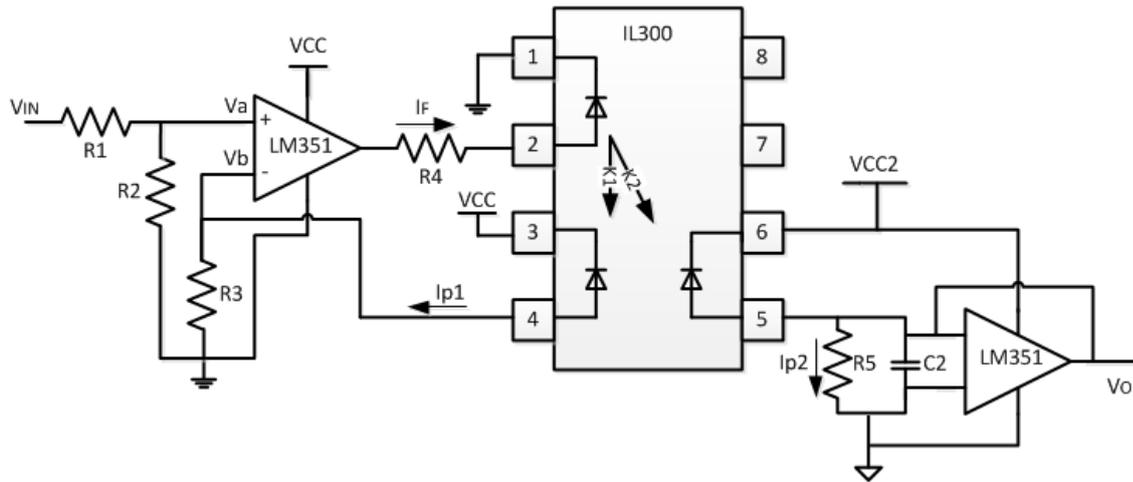


Figura 5.6- Circuito para mediação da tensão em cada bateria.

$$I_{p1} = \frac{V_{IN}}{R3} \quad (5.1)$$

$$\frac{V_{IN}}{R3} = k1 I_F \quad (5.2)$$

A corrente fornecida pelo fotodíodo 2,  $I_{p2}$ , é o produto entre ganho de saída ( $K2$ ) e a corrente de excitação no LED ( $I_F$ ). A resistência de carga,  $R5$ , converte a corrente ( $I_{p2}$ ) em tensão ( $V_o$ ), equação (5.3).

$$V_o = R5 I_F k2 \quad (5.3)$$

O ganho total da transferência ( $V_o/V_{IN}$ ) é dado pela equação (5.4). O ganho de transferência do  $IL300$  ( $K3$ ) pode ser expresso como a razão entre o ganho de saída e ganho de realimentação, equação (5.5).

$$\frac{V_o}{V_{IN}} = \frac{K2 R5}{K1 R3} \quad (5.4)$$

$$k3 = \frac{k2}{k1} \quad (5.5)$$

O  $IL300$  usado neste projeto tem um ganho de transferência ( $K3$ ) típico de 1,24. Segundo a ficha técnica (*datasheet*) deste integrado a zona de melhor linearidade acontece quando a corrente no LED ( $I_F$ ) está entre 5 mA e 20 mA [86]. Consultando o *datasheet* um  $I_F$  de 15 mA corresponde a  $I_{p1}$  de aproximadamente de 16  $\mu A$  [87].

Dimensionando-se  $R3$  para uma tensão  $Va$  de 5 V obtém-se uma resistência de 43 k $\Omega$ . A ficha técnica também indica que o valor das resistências  $R3$  e  $R2$  deve ser o mesmo. A resistência  $R1$  é dimensionada através da fórmula apresentada na equação (5.6). Para uma tensão de entrada ( $V_{IN}$ ) de 15 V e  $Va$  de 5 V obtém-se  $R1$  igual a 86 k $\Omega$ . A resistência  $R5$  é calculada através das equações (5.4) e (5.5). Para a tensão de saída corresponder a 3 V quando a tensão na entrada é 15 V o valor de  $R5$  deve ser 20,8 k $\Omega$ .

$$R1 = R2 \left( \frac{V_{IN}}{Va} - 1 \right) \quad (5.6)$$

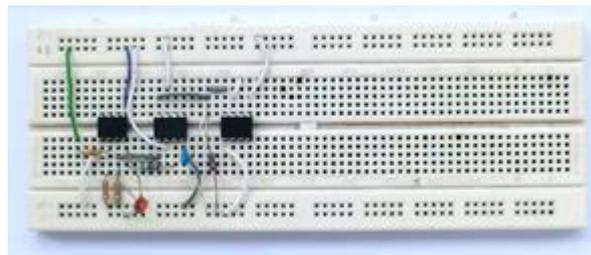


Figura 5.7 - Circuito de teste do funcionamento do IL300.

### 5.3.2. Sensor de Corrente

Para medir a corrente no banco de baterias usa-se o sensor de efeito de *Hall* ACS712, desenvolvido pela *Alegro*. Este sensor pode ser usado tanto em aplicações de corrente alternada (CA) como em aplicações de corrente contínua (CC) [88]. Na Figura 5.8 encontra-se o esquema de ligação do sensor ao banco de baterias (em série com este) e ao microcontrolador.

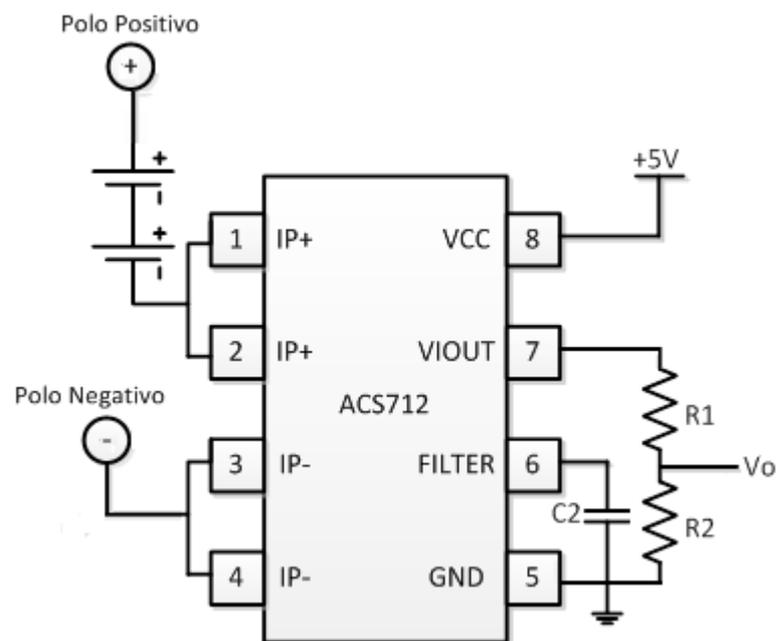


Figura 5.8 – Esquema de ligação do sensor de Hall ACS712 ao banco de baterias.

O sensor *ACS712* permite medir um sinal de corrente entre -20 A e +20 A, com uma sensibilidade de 100mV/A (a tensão na saída varia entre 0,5 V e 4,5 V). Quando a corrente a medir corresponde a -20 A a saída do sensor é 0,5 V, para 20 A a saída do sensor é 4,5 V. Na Figura 5.9 encontra-se o gráfico que relaciona a corrente na entrada com a tensão na saída a diferentes temperaturas [88].

Para converter o valor analógico da tensão à da saída do sensor para valores digitais emprega-se o ADC do microcontrolador. Contudo, como este apenas converte tensões entre 0 V e 3 V utiliza-se um divisor resistivo na saída do sensor (formado pelas resistências R1 e R2 na Figura 5.8).

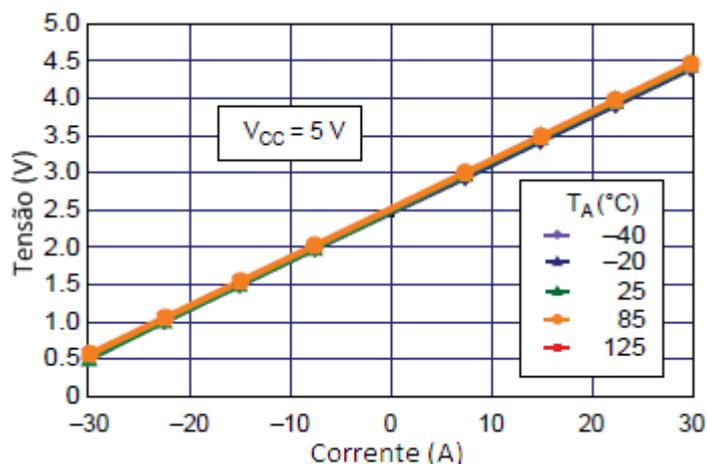


Figura 5.9 – Tensão de saída do sensor ACS712 em função da corrente de entrada [88].

### 5.3.3. Sensor de Temperatura

O sensor de temperatura utilizado é o circuito integrado *LM35* produzido pela *Texas Instruments*. A gama de funcionamento deste sensor é entre -40 °C e +110 °C. A sua saída em tensão varia linearmente com a temperatura. O ganho do sensor é de 10 mV/°C. A tensão de saída varia de -400 mV a 1100 mV, e para uma temperatura de 0 °C a tensão de saída é 0 V [89].

Na Figura 5.10 apresenta-se o circuito de condicionamento do sinal do *LM35* com uma única fonte de alimentação para medição da temperatura na sua gama completa de funcionamento. A desvantagem desta solução utilizando apenas uma fonte de alimentação é o facto de ser necessário dois canais de ADC, pois a tensão de saída não está referenciada à massa.

Na Figura 5.11 apresenta-se o circuito de teste do sensor de temperatura *LM35*, montado numa placa *breadboard*.

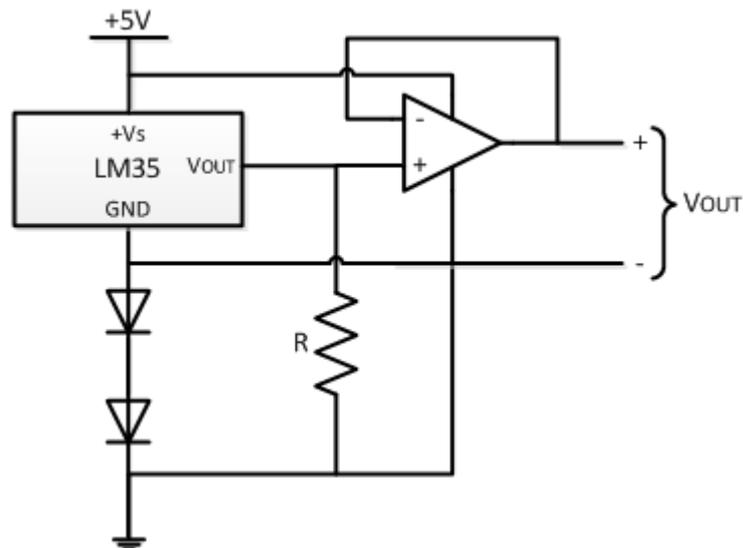


Figura 5.10 – Circuito de condicionamento do sensor LM35.

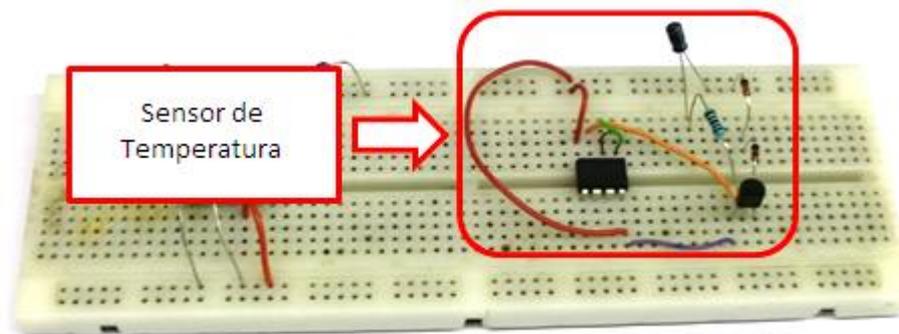


Figura 5.11 - Montagem em *breadboard* do circuito de teste do sensor de temperatura *Lm35*.

#### 5.3.4. Drivers para os Mostefs

O MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) foi o dispositivo de comutação escolhido para este projeto. Este tem três modos diferentes de funcionamento (zona ativa, zona corte e zona de saturação) consoante a tensão aplicada aos seus terminais. Neste trabalho, apenas se pretende que os MOSFETs operem na zona de corte e saturação. A zona de operação em que o MOSFET se encontra depende da tensão aplicada na *gate* em relação à sua *source*. Como isso não acontece no MOSFET superior do braço é necessário recorrer a um integrado que faça essa função (dispositivos designados por *drivers*) e garanta o isolamento entre a parte de controlo e a parte de potência.

O *driver* escolhido é o *ADuM7234* da *Analog Devices*, e na Figura 5.12 apresenta-se o esquema de blocos deste dispositivo [90]. O *ADuM7234* é um *gate driver* de meia ponte isolado que combina a tecnologia *CMOS* (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) com tecnologia dos transformadores, o que proporciona a este

componente um desempenho superior em termos de precisão e temporização em comparação com as soluções baseadas em optoacopladores [90]. A tensão de entrada recomendada situa-se entre 4,5 V e 5,5 V e a tensão de saída recomendada situa-se entre 12 V e os 18 V. Este *driver* fornece uma corrente de pico até 4 A e o tempo de subida (*rise time*) e tempo de queda (*fall time*) é 100 ns. O *ADuM7234* funciona com lógica positiva.

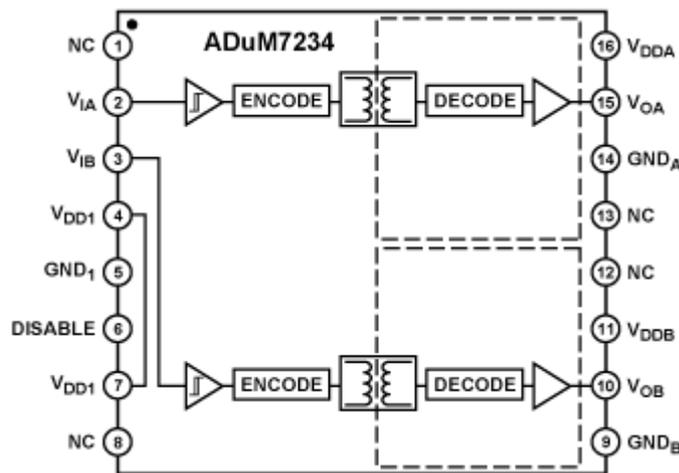


Figura 5.12 - Diagrama de blocos funcional do *ADuM7234* [90].

Os sinais modulados por largura de pulso (*Pulse Width Modulation* - PWM) não foram ligados diretamente do microcontrolador às entradas do *driver*. Porque a tensão do sinal de PWM do microcontrolador é 3,3 V e a tensão mínima nas entradas do *driver* ( $V_{IA}$  e  $V_{IB}$ ) é 0,7 vezes a tensão de alimentação ( $V_{DD1}$ ), que corresponde a 3,5 V para uma tensão de alimentação de 5 V. Então, para fazer o interface entre o microcontrolador e o *ADuM7234*, na primeira versão desenvolvida do circuito de comando utilizou-se um inversor com 6 canais independentes (*SN74ACT04*) produzido pela *Texas Instruments* que converte um sinal de TTL (*Transistor-Transistor Logic*) para CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*). Para não se inverter a lógica o sinal de PWM, este é invertido duas vezes. Também, em paralelo com os sinais de PWM oriundos do microcontrolador liga-se uma resistência à massa. Esta resistência funciona como *pull-down* para garantir um potencial fixo, de 0 V, à entrada do inversor. Contudo, na segunda versão desenvolvida do circuito de comando o interface entre o microcontrolador e o *ADuM7234* é realizado pelo circuito de proteção dos sinais de gate, explicado em 5.3.6. À saída do sinal do *driver* também não se ligou diretamente a *gate* do MOSFET. Conectou-se uma resistência em série entre eles para melhorar a comutação e limitar a corrente na *gate* do MOSFET.

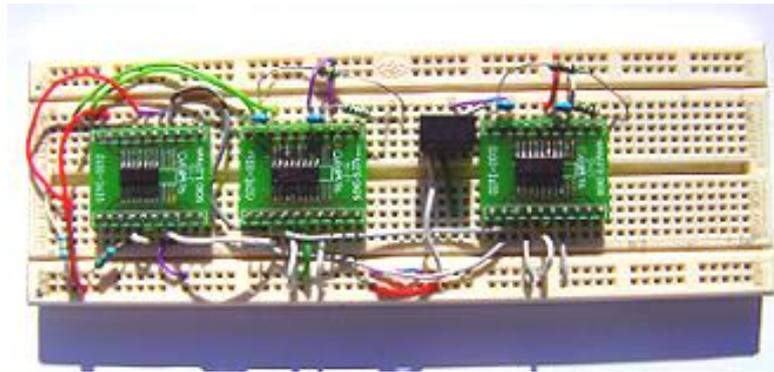


Figura 5.13 – Montagem em *breadboard* da primeira versão do circuito de teste para os *drivers* dos MOSFETs.

Na Figura 5.14 está representado a primeira versão desenvolvida do circuito desde a saída do microcontrolador até aos terminais da bateria.

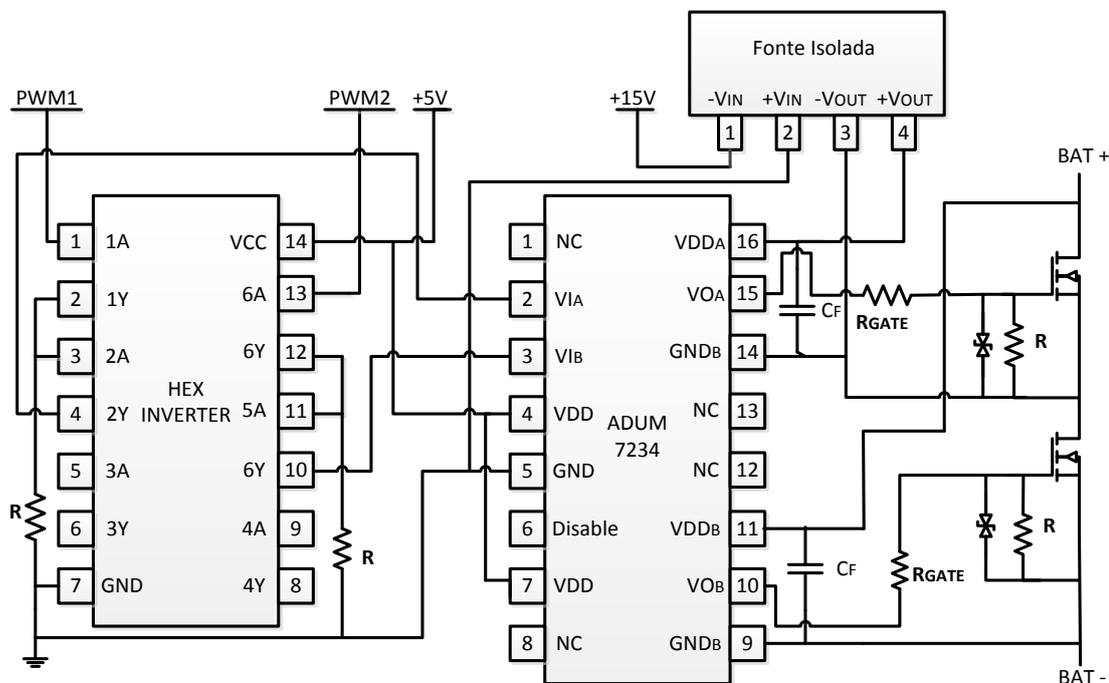


Figura 5.14 – Primeira versão do circuito de interface entre microcontrolador e *gate* do MOSFET.

### 5.3.5. Microcontrolador

O controlo do sistema é feito de forma digital. Por isso, recorreu-se ao kit de desenvolvimento *C2000<sup>TM</sup>* (*C2000<sup>TM</sup> Experimenter's Kit*) da *Texas Instruments*. Este kit consiste numa base de encaixe (*docking station*) com todo hardware necessário para interagir com os periféricos e por uma placa de desenvolvimento *controlCARD F28335*. Esta placa de desenvolvimento utiliza um microcontrolador de 32 bits da série delfino o *TMS320C28335*, e pertence a família dos DSPs (*Digital Signal Processors*). Este microcontrolador foi desenvolvido para oferecer alto desempenho em aplicações de controlo em tempo real e as suas principais características são [91]:

- Frequência de 150MHz;
- Unidade de vírgula-flutuante (*floating-point*);
- 18 Canais de PWW;
- 16 Canais de ADC de 12 bits;
- 3 Timers de 12 bits;
- Unidades de comunicação SPI (*Serial Peripheral Interface*), SCI (*Serial Communication Interface*) e CAN (*Controller Area Network*), I<sup>2</sup>C (*Inter-Integrated-Circuit*);
- 88 Pinos de entrada/saída (*input/output*).

Como todo o processo de controlo é executado por este microcontrolador, utiliza-se uma estrutura centralizada para o BMS.



Figura 5.15 – Placa de desenvolvimento C2000™ [91].

### 5.3.6. Proteções

Na segunda versão desenvolvida do sistema de BMS incorporou-se tanto um sistema de proteção por software como por hardware. Ao nível do hardware para o banco de baterias dimensionou-se e implementou-se proteções contra sobreintensidades, contra sobretensões e subtensões. Usa-se também proteção para os sinais de PWM provenientes do DSP para não possibilitar que ambos os sinais estejam ao nível alto (*high*) ao mesmo tempo. Caso isso aconteça os MOSFETs do mesmo braço entram em condução e provocam um curto-circuito à bateria. O sistema de proteções contra sobreintensidades apenas está dimensionado/projetado, não se procedeu à sua implementação, uma vez que não foram realizados testes com banco de baterias do CEPIUM (o BMS apenas foi testado com duas baterias ligadas em série).

Na Figura 5.16 está presente o esquema geral do circuito de proteção à exceção do circuito de proteção dos sinais de gate dos MOSFETs. O circuito de condicionamento de sinal apresentado na mesma figura corresponde ao circuito apresentado na Figura

5.19 ou na Figura 5.20, dependendo se é pretendido acondicionar um sinal de tensão ou corrente.

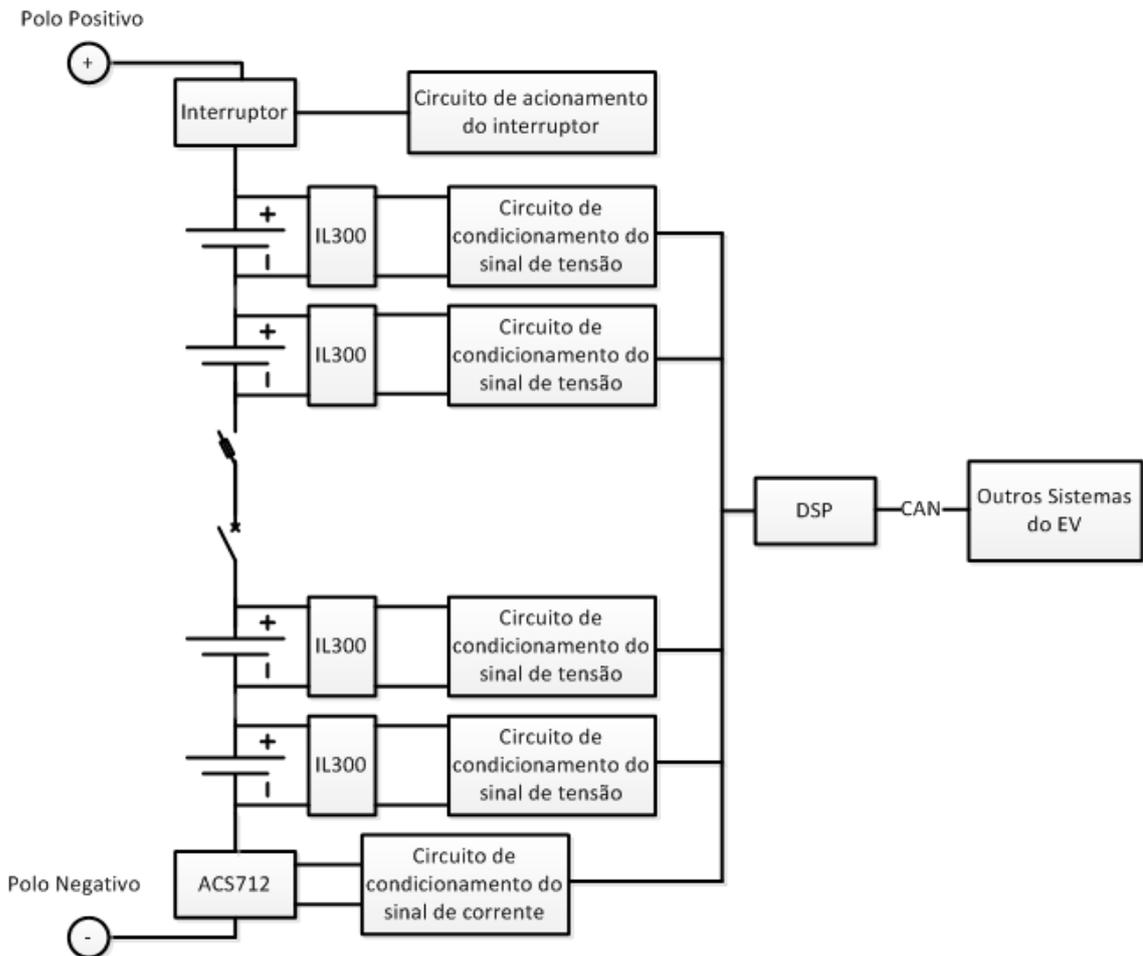


Figura 5.16 -Sistema de proteções para as baterias e para o banco de baterias projetado.

Na Figura 5.17 encontra-se o circuito de proteção dos sinais de *gate* dos MOSFETs. O circuito é composto por uma porta lógica *NAND* e por dois *buffers* de 3 estados (*buffer 3-state*).

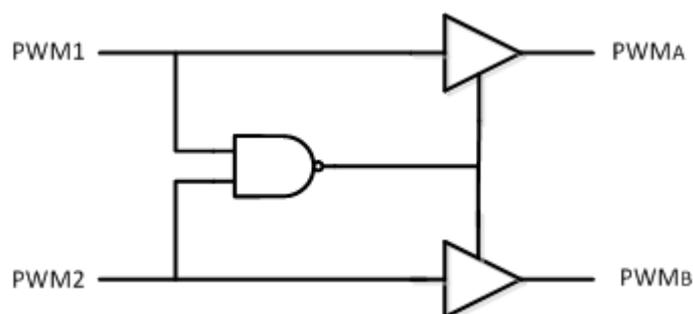


Figura 5.17 – Proteção dos sinais de gate dos MOSFETs.

O funcionamento do circuito da Figura 5.17 é simples. Caso o *PWM1* e o *PWM2* se encontrem no estado *high* ao mesmo tempo, a saída da porta *NAND* fica no estado

*low*, o que provoca ambos os *buffers* permaneçam no estado de alta impedância. Para as outras combinações dos sinais de *gate* (*PWM1* e *PWM2*), a saída de cada *buffer* corresponde ao valor do respetivo sinal de entrada.

Na Figura 5.18 apresenta-se o circuito de teste do funcionamento do circuito de proteção dos sinais de gate dos MOSFETs, montado numa placa *breadboard*.

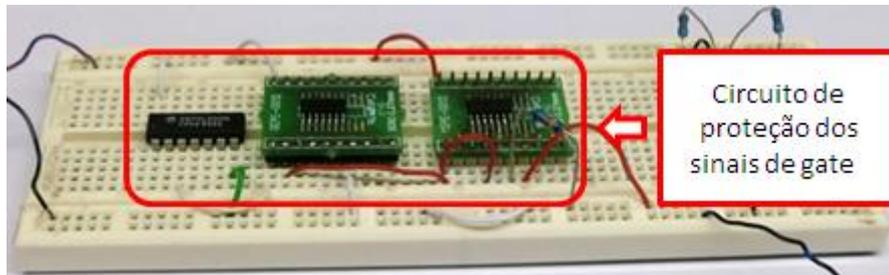


Figura 5.18 - Montagem em *breadboard* do circuito de proteção dos sinais de gate dos MOSFETs.

A proteção contra sobreintensidades está projetada para ser realizada através de um fusível e de um interruptor, colocados em série com o banco de baterias. O interruptor a utilizar ainda não se encontra definido, e tanto pode ser um contactor, como um semiconductor de potência (por exemplo, um MOSFET). Também, ainda não se encontra definida a entidade/sistema responsável pela atuação deste interruptor, e como consequência, também não se encontra dimensionado o circuito auxiliar para atuar o interruptor.

A intensidade da corrente é monitorizada com o recurso a um sensor de efeito de *Hall*. Se o valor medido por este ultrapassar um determinado valor o sistema de BMS manda abrir o interruptor. Na Figura 5.19 está representado o circuito projetado para o condicionamento do sinal proveniente do sensor de corrente. O fusível protege a bateria contra condições de operação extremas, e normalmente é colocado em série, no meio do banco de baterias. Utiliza-se esta configuração porque quando o fusível atua, divide o banco de baterias em dois. Um interruptor manual (disjuntor) também é colocado no meio do banco de baterias (junto ao fusível). Este interruptor é usado para abrir o circuito elétrico quando é necessário substituir o fusível ou trocar uma bateria.

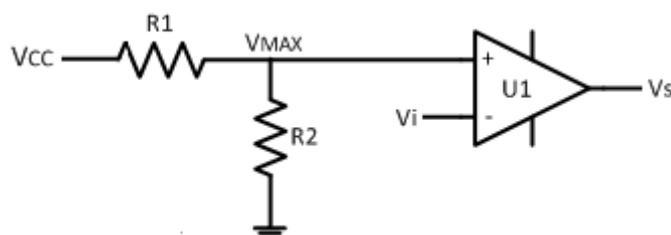


Figura 5.19 – Circuito de condicionamento do sinal de corrente (não se encontra implementado).

Para a realização de proteção contra sobretensões e subtensões o sistema monitoriza a tensão em cada bateria. O valor medido é comparado com o valor máximo e mínimo que a tensão pode atingir. Se o valor medido não se situar entre esta gama de valores é enviado um sinal ao DSP, através de uma interrupção externa. Também se deve mandar abrir o interruptor. Contudo, este circuito não se encontra implementado nem dimensionado. Na Figura 5.20 está representado o circuito de condicionamento do sinal proveniente do sensor de tensão de cada bateria.

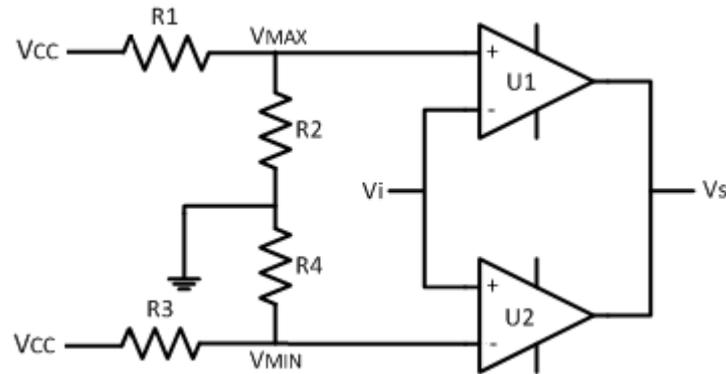


Figura 5.20 - Circuito de condicionamento do sinal de tensão.

Na Figura 5.21 apresenta-se o circuito de teste do circuito de proteção para as baterias contra sobretensão e subtensão, implementado numa placa *breadboard*.

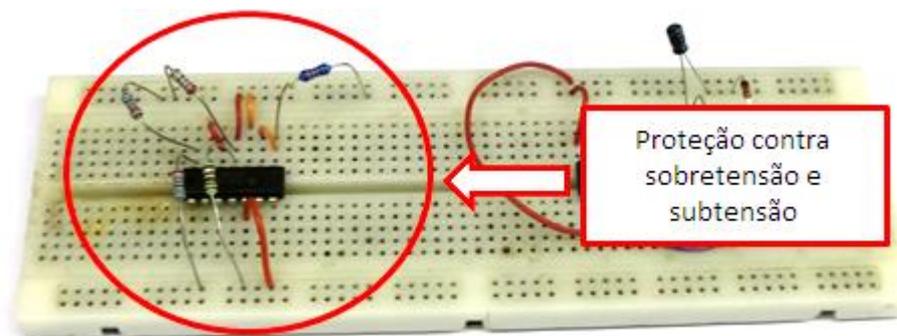


Figura 5.21 - Montagem em *breadboard* do circuito de teste para proteção das baterias contra sobretensão e subtensão.

### 5.3.7. Memória EEPROM

Alguns parâmetros do BMS necessitam de ser guardados permanentemente. Para isso recorreu-se a uma memória EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*). Esta memória é não-volátil, ou seja, ao desligar a fonte de alimentação os dados previamente armazenados não são perdidos. A memória utilizada é o modelo 24AA025E48 produzida pela *Microchip* e consegue armazenar até 2 kbits.

O ideal era guardar os seguintes parâmetros para cada bateria: tensão máxima e mínima, temperatura máxima e mínima, número de ciclos, número de vezes que a tensão e temperatura ultrapassaram um dado valor, e o número de vezes que a tensão, temperatura e SoC foram inferiores a um dado valor. Para o banco de baterias devia-se guardar corrente máxima de descarga e de carga e o número de vezes que a corrente de descarga e carga ultrapassou um determinado valor. Contudo, devido a memória utilizada ser apenas de 2 kbits, e dependendo do número de baterias que compõe o banco de baterias pode não ser possível guardar todos os parâmetros desejados.

A comunicação entre o DSP e a memória é feita através do protocolo de comunicação I<sup>2</sup>C. A comunicação entre dispositivos no barramento I<sup>2</sup>C é efetuada através de duas linhas bidirecionais. Uma linha é a responsável pela comunicação de dados (*Serial Data Line - SDA*) e a outra é a linha do relógio (*Serial Clock Line- SCL*). Estes dois sinais devem-se conectar à fonte de alimentação através de uma resistência de *pull-up*. O esquema de ligação entre o DSP e a memória EEPROM está representado na Figura 5.22. Nesta memória os pinos *A0*, *A1* e *A2* podem ser ligados a *V<sub>CC</sub>* ou *V<sub>SS</sub>*, e a sua função é indicar o endereço físico da mesma. Isto mostra que no mesmo barramento podem ser conectadas até 8 dispositivos *24AA025E48* [92].

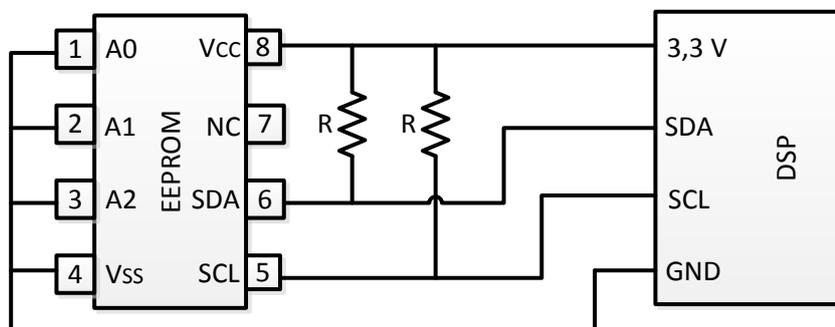


Figura 5.22 – Esquema de ligação entre a memória *24AA025E48* e o DSP.

Neste protocolo todos os dispositivos ligados ao barramento têm um endereço único, e tanto podem operar como escravos (*slave*) ou como mestres (*master*). É designado por mestre o dispositivo que inicia a comunicação, sendo que todos os dispositivos endereçados por este são considerados escravos. Também é o mestre o responsável por gerar o sinal de relógio [92], [93].

A trama na comunicação I<sup>2</sup>C normalmente é composta por (ver Figura 5.23):

- Um *start* bit enviado pelo mestre para iniciar a comunicação.
- O mestre envia o endereço do escravo com quem pretende comunicar (7 bits).
- O mestre envia um bit (8º bit) para designar se pretende escrever ou ler.

- O escravo identificado pelo aquele endereço envia um bit de confirmação (bit *acknowledge* - *ACK*).
- O mestre envia a posição de memória do escravo que pretende aceder, seguido por um bit de confirmação por parte do escravo.
- O mestre ou escravo enviam pacotes de dados de 8 bits seguidos por um bit de confirmação de receção por parte do mestre ou escravo. O número de pacotes a enviarem é ilimitado. No entanto, a EEPROM utilizada apenas armazena até 16 pacotes de dados.
- O mestre envia um *stop* bit para encerrar a comunicação.

O *start* bit e o *stop* bit são determinados pela variação do estado da linha de dados quando a linha de relógio se encontra no nível alto. Para o envio de dados é necessário que a mudança de nível lógico na linha de dados aconteça quando sinal de relógio se encontre no nível lógico baixo.

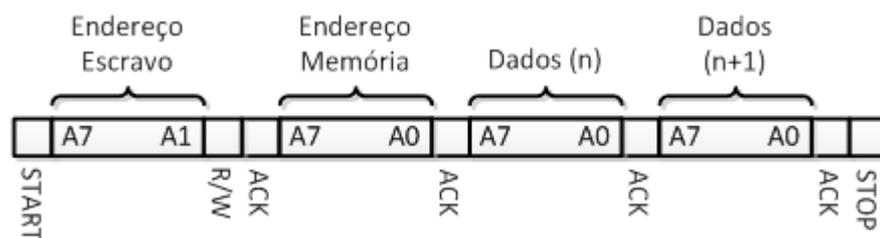


Figura 5.23 – Composição da trama de comunicação por I<sup>2</sup>C entra a memória e o DSP.

### 5.3.8. Comunicação CAN

O CAN (*Controller Area Network*) é um protocolo de comunicação série síncrono. Atualmente, ainda não se encontra definido como o BMS se vai emparelhar com os outros sistemas do CEPIUM. Em princípio, vai-se utilizar comunicação CAN para os diferentes sistemas trocarem informação entre si. Devido a isso, ainda não se encontram definidos os identificadores das mensagens para cada módulo da rede, a taxa de transmissão, como também ainda não se encontra especificado a informação que o BMS deve enviar e receber pelo barramento CAN. A escolha, em princípio, recaiu no protocolo de comunicação CAN devido ao facto de este ser robusto, especialmente contra ruído eletromagnético. Além disso, atualmente é o protocolo de comunicação utilizado pela maioria dos fabricantes de automóveis.

O CAN é baseado em três conceitos: multi-mestre, *multicast*, CSMA/CD with NDA (*Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection with Non-Destructive Arbitration*) [94]. Devido ao conceito multi-mestre todos os módulos na rede podem ser escravos ou mestres. Assim vários módulos podem pedir acesso ao meio, mas apenas

transmite aquele que contém a mensagem com maior prioridade (conceito CSMA/CD). Como este protocolo se baseia no *multicast* todas as mensagens são enviadas para todos os módulos presentes da rede. Contudo, cada módulo com base no identificador da mensagem decide se deve processar ou não a mesma. Assim, como consequência deste conceito numa rede CAN não existe módulos com endereços, mas apenas mensagens que possuem um determinado identificador. Este identificador também define a prioridade da mensagem (quanto mais baixo o identificador maior é a prioridade da mensagem).

No barramento CAN a comunicação é realizada através de transmissão diferencial, ou seja, o valor dos dados depende da diferença de tensão entre dois fios, designados por CAN\_L e CAN\_H. O barramento CAN introduz um conceito de bits dominantes (corresponde ao tradicional nível lógico baixo (bit a “0”)) e bits recessivos (corresponde ao tradicional nível lógico alto (bit a “1”)). Num bit recessivo a tensão nos fios (CAN\_L e CAN\_H) deve ser a mesma, cerca de 2,5 V. Num bit dominante a tensão no fio CAN\_H deve ser 3,5 V e no fio CAN\_L cerca de 1,5 V, o que corresponde a uma diferença de tensão de 2 V (ver Figura 5.24) [94].

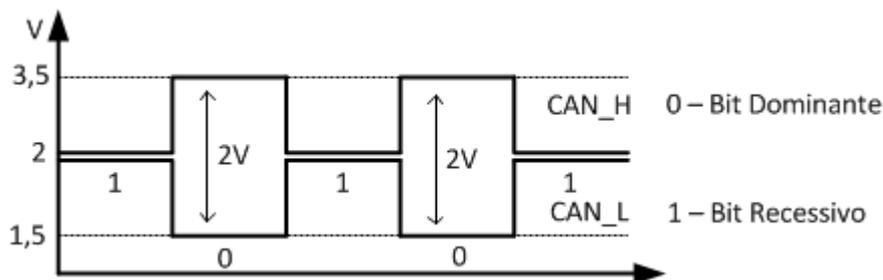


Figura 5.24- Níveis de tensão no barramento CAN para bits dominantes e recessivos.

Em cada extremidade do barramento CAN é necessário utilizar uma resistência de 120 Ω, entre os fios CAN\_L e CAN\_H (são designadas por resistências de terminação) [95]. Na Figura 5.25 está representado um esquema de uma rede CAN com vários módulos, juntamente com as resistências de terminação do barramento.

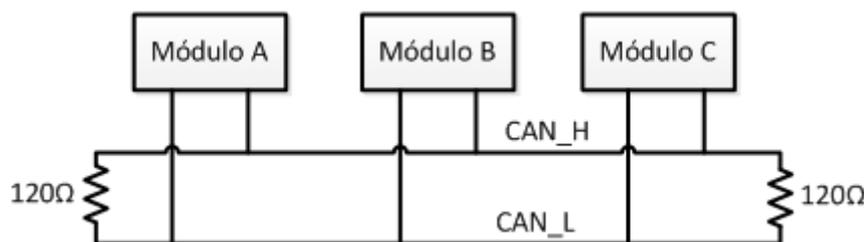


Figura 5.25 – Esquema de uma rede CAN com vários módulos.

A taxa de transmissão máxima numa rede CAN é de 1Mbps, até um comprimento de 40 metros. Quando o comprimento da rede é maior a taxa de transmissão diminui [94].

Em relação ao protocolo CAN podemos ter quatro tipos de tramas (*frames*): trama de dados (*data frames*), trama remota (*remote frame*), trama de erro (*error frames*) e trama de sobrecarga (*overload frames*). As tramas de dados servem, como o próprio nome indica, para enviar dados entre diferentes módulos da rede. As tramas remotas utilizam-se para solicitar uma trama de dados a um determinado módulo da rede (que contém o mesmo identificador). As tramas de erro são enviadas por qualquer módulo quando este deteta erros na rede. As tramas de sobrecarga utilizam-se para provocar um atraso entre uma trama de dados ou remota e a trama posterior [96]. Nesta dissertação apenas foram configuradas e testadas tramas de dados e tramas remotas.

Atualmente, são utilizados dois formatos de *frames*, designados por CAN 2.0A e CAN 2.0B. Na *frames* CAN 2.0A o identificador da mensagem é composto por 11 bits, enquanto no formato CAN 2.0B o mesmo é composto por 29 bits. O microcontrolador nesta dissertação trabalha com o protocolo CAN 2.0B. As tramas onde o identificador da mensagem é composto por 11 bits também são designadas por tramas standard (*standard frames*), enquanto as mensagens com identificador de 29 bits são designadas por tramas estendidas (*extended frames*). As tramas de dados e as tramas remotas tanto podem usar o formato tramas standard como o formato tramas estendidas [96].

Uma trama de dados é composta por sete campos: início da trama (*Start of Frame - SOF*), campo de arbitragem (*arbitration field*), campo de controlo (*control field*), campo de dados (*data field*), campo de redundância cíclica (*Cyclic Redundancy Code - CRC*), campo ACK (*Acknowledge field*), fim da trama (*End of Frame - EOF*) (ver Figura 5.26). Já uma trama remota contém apenas por seis campos, e o seu formato é semelhante ao de uma trama de dados, com a exceção que numa trama remota não existe campos de dados.



Figura 5.26 – Estrutura e número de bits de uma trama de dados (*data frames*) no protocolo de comunicação CAN.

O campo início da trama corresponde a um bit dominante e marca o início de uma trama de dados ou remota.

O campo arbitragem define o formato de uma trama, e o número de bits depende do formato da trama a enviar. Assim, uma trama standard é composta por 12 bits, 11 bits para o identificador da mensagem e 1 bit para requisição de transmissão de dados (*Remote Transmission Request - RTR*) (Figura 5.27 (a)). Enquanto uma trama estendida é composta por 32 bits, 29 bits para o identificador da mensagem, 1 bit de RTR, 1 bit identificador de extensão (*Identifier Extension - IDE*) para identificar o formato da trama e 1 bit recessivo denominado de SRR (*Substitute Remote Request*) (Figura 5.27 (b)).

O campo de controlo em ambos formatos é composto por 6 bits. No entanto, a sua composição depende do formato da trama. Assim numa trama standard este campo é composto por 4 bits de DLC (*Data Length Code*) que indica o número de bytes da mensagem (ou seja, o número de bytes utilizados no campo de dados), 1 bit de IDE, e 1 um bit reservado (r0) (Figura 5.27 (a)). Numa trama estendida é composto por 4 bits de DLC e por 2 bits reservados (r0 e r1) (Figura 5.27 (b)). O valor do DLC no caso de uma trama remota corresponde ao valor do DLC da correspondente trama de dados.

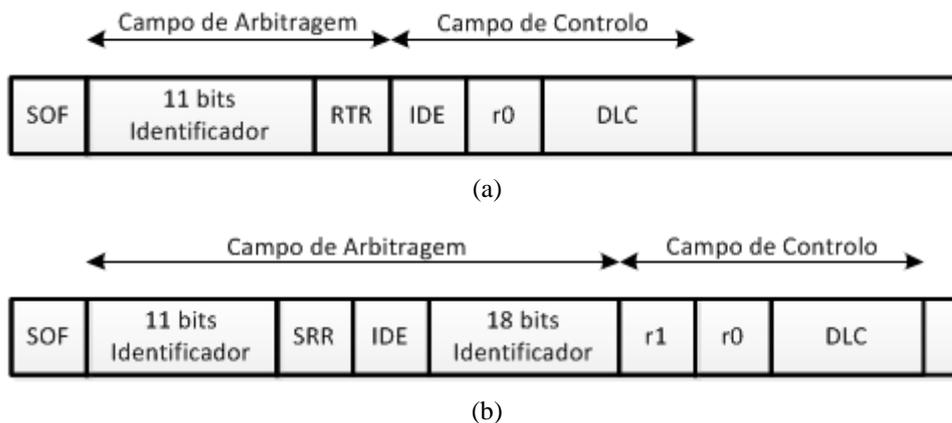


Figura 5.27 – Campo de arbitragem e campo de dados numa trama de dados e numa trama remota: (a) Trama standard; (b) Trama estendida.

O campo de dados é onde se escreve a mensagem que se deseja transmitir, numa trama de dados. Esta pode conter no máximo 8 bytes.

O campo CRC é composto por 16 bits e contém o valor do teste CRC efetuado à trama. Este teste serve para verificar se não ocorreu nenhum erro durante o envio da trama. Assim quando é recebida uma mensagem o controlador efetuado o teste de CRC. Caso o valor não seja o mesmo que o enviado na respetiva trama é porque ocorreu um erro durante o envio.

O campo ACK é constituído por 2 bits e permite a qualquer módulo confirmar a receção da trama, sem a ocorrência de qualquer erro.

O campo EOF é composto por sete bits recessivos para indicar o fim da trama.

Para testar e validar o funcionamento da comunicação CAN no DSP é necessário outro dispositivo com o qual o DSP possa comunicar através do barramento CAN. Como tal, utilizou-se o dispositivo *USB-2-X*, fabricado pela empresa *Trinamic* (Figura 5.28). Para o DSP conseguir comunicar com o barramento CAN é necessário utilizar um *transceiver* para fazer a ligação entre a rede CAN e o mesmo. Para tal, utilizou-se uma placa já existente no laboratório do GEPE (Grupo de Eletrónica de Potência e Energia da Universidade do Minho) que contém o *transceiver SN65HVD1040* (produzido pela *Texas Instruments*) e a resistência de terminação do barramento CAN (Figura 5.28). O *USB-2-X* está equipado com interface CAN e pode-se conectar ao computador pessoal (*Personal Computer - PC*) através do interface USB (*Universal Serial Bus*). Este dispositivo também contém uma resistência de terminação para o barramento CAN de  $120\ \Omega$  que pode ser ativada através de um *jumper*. De uma forma simplista, este dispositivo recebe dados através do barramento CAN e envia esses dados para o PC através de uma porta USB, ou o vice-versa. O fabricante também fornece o software necessário para se interligar com este dispositivo (a interface deste software pode ser observada no capítulo 6.3). A Este software permite verificar os dados recebidos pelo *USB-2-X* ou então para enviar dados através deste.

Depois de estar validado o correto funcionamento da comunicação CAN no DSP, para o mesmo comunicar com o barramento CAN do CEPIUM (*Carro Elétrico Plug-In* da Universidade do Minho) apenas é necessário utilizar o *transceiver*.

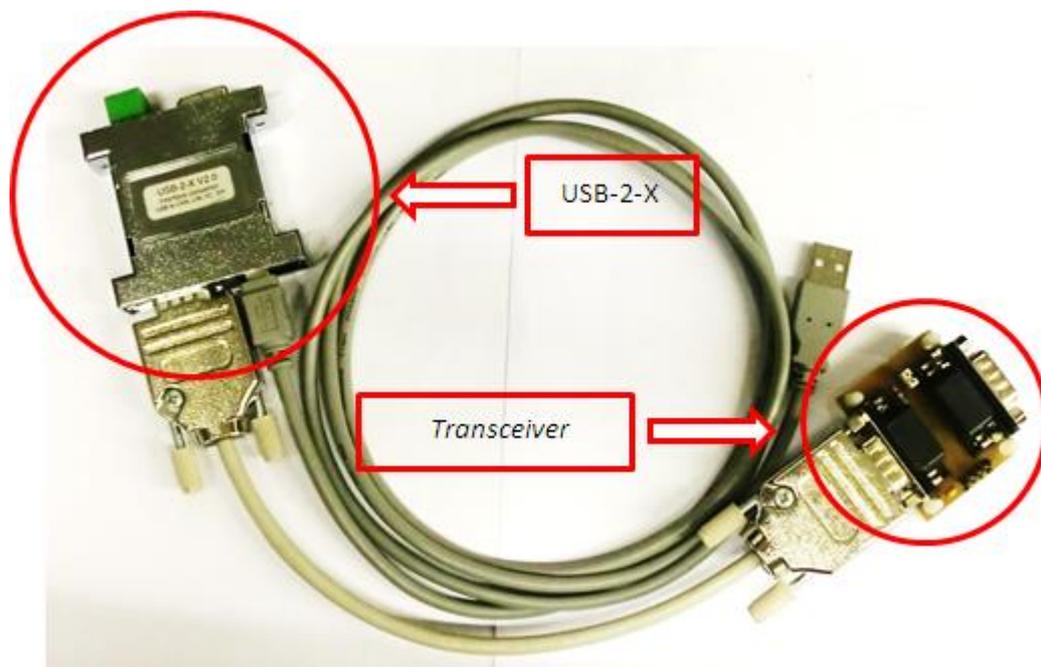


Figura 5.28 – Circuito de teste para comunicação CAN, com o *transceiver* e o *USB-2-X*.

## 5.4. Sistema final

Na Figura 5.29 encontra-se a primeira versão desenvolvida da placa de circuito impresso (*Printed Circuit Board* - PCB). Esta placa contém o circuito de controlo (inclui primeira versão circuito de comando e o circuito de condicionamento do sensor de tensão), e o circuito de balanceamento. A mesma foi projetada com o objetivo de se utilizar uma placa por cada bateria. Nesta placa, o *driver ADuM7234* encontra-se soldado na face inferior da mesma, pois este componente é SMD (*Surface Mounting Device*). Como a placa desenvolvida não é de dupla face, e as pistas foram feitas na face inferior esse componente teve que ser soldado nessa face.

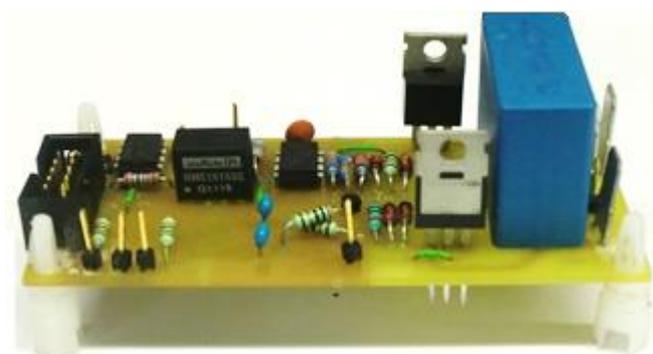


Figura 5.29 – Primeira versão da placa de circuito impresso, inclui o circuito de balanceamento e a primeira versão do circuito de comando.

Na Figura 5.30 e na Figura 5.31 apresenta-se a vista superior e inferior da segunda versão do PCB desenvolvido (um *upgrade* realizado a placa de PCB da Figura 5.29). Esta placa de PCB inclui o circuito de balanceamento, a segunda versão do circuito de comando e o circuito de proteção por hardware para sobretensão e subtensão. Nesta placa optou-se por utilizar maioritariamente componentes SMD para reduzir o tamanho da placa. Mais uma vez, como a placa desenvolvida não é de dupla face foi necessário soldar componentes na face superior e inferior da mesma.

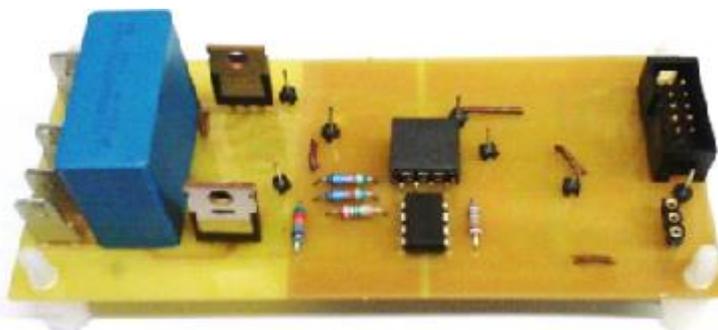


Figura 5.30 – Vista superior da segunda versão do PCB desenvolvido.

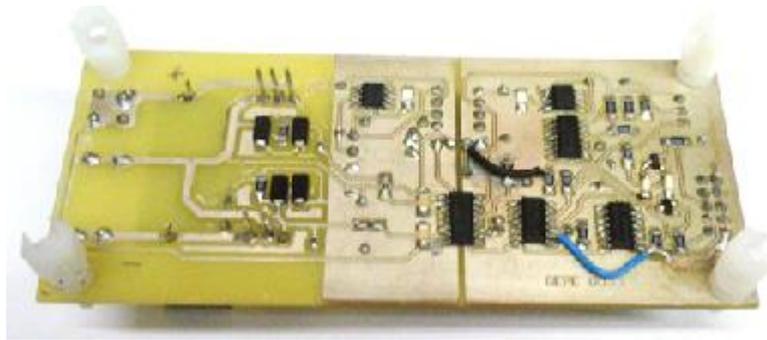


Figura 5.31 - Vista inferior da segunda versão do PCB desenvolvido.

Em relação ao circuito de potência, ambas placas incluem ainda os conectores para ligação com as baterias e o condensador de equalização, bem como os semicondutores de potência e as proteções de gate dos mesmos.

Na Figura 5.32 encontra-se o sistema final do BMS implementado.

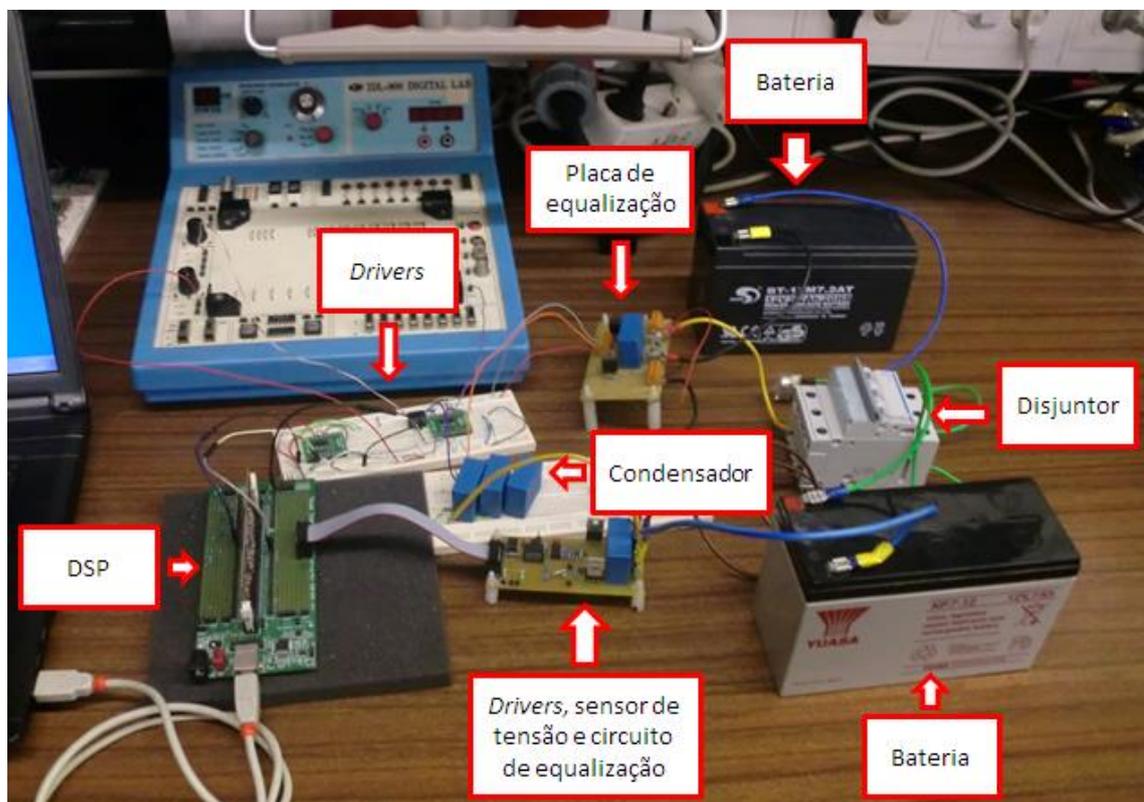


Figura 5.32 – Sistema final do BMS.

## 5.5. Controlo do Sistema de BMS

Como já indicado utiliza-se neste projeto um microcontrolador TMS320F28335 para implementação do sistema de controlo do BMS. Neste trabalho necessita-se de um módulo de SCI, um módulo de I<sup>2</sup>C, dois interrupções externas, dois canais de PWM, um temporizador (*timer*), cinco canais de ADC, um módulo de comunicação CAN.

A comunicação via porta série assíncrona (*Serial Communications Interface* - SCI) é implementada para troca de informação entre o computador e o microcontrolador. Quando o DSP recebe dados provenientes do computador ativa a interrupção da porta série.

A comunicação CAN é utilizada para troca de informação com os outros módulos/controladores do veículo elétrico.

O protocolo I<sup>2</sup>C, como já referido anteriormente, é necessário para estabelecer a comunicação entre o DSP e a memória EEPROM (modelo 24AA025E48).

As interrupções externas são usadas para o controlo digital saber quando as proteções por hardware atuaram. Ou seja, existem dois pinos analógicos (um pino para cada tipo de interrupção), que estão configurados como entradas, e estão conectados diretamente ao respetivo sistema de proteção. Quando um sistema de proteção atua, há uma mudança no seu valor lógico, que por sua vez ativa a respetiva interrupção externa.

Os sinais de PWM são utilizados para acionar os interruptores controlados (MOSFETs). Para tal, são necessários dois sinais de PWM, visto que todos os MOSFETs superiores de cada braço podem ser acionados pelo mesmo sinal. Acontece o mesmo para os MOSFETs inferiores de cada braço. Apenas deve haver um *dead-time* entre ambos para não ocorrer curto-circuito às baterias (no momento em que o MOSFET superior liga, o MOSFET inferior tem que estar desligado ou o inverso).

O temporizador (*timer*) é empregue para ligar os ADC à frequência desejada, neste caso de 1 Hz.

Os canais de ADC são utilizados para medir a corrente e temperatura no banco de baterias, e para medir a tensão em cada bateria. O ADC mede valores de tensão compreendidos entre 0 V e 3 V e a sua resolução é 732 μV (ADC é de 12 bits). O resultado da conversão é dado pela equação (5.7) quando a tensão de entrada é igual ou superior a 0 V e inferior ou igual a 3 V. Caso contrário o resultado da conversão é 0 ou 4095, dependendo se a tensão é menor que 0 V ou superior a 3 V [97].

$$valorDigital = 4095 \left( \frac{valorAnalógico}{3} \right) \quad (5.7)$$

De seguida, explica-se a estrutura de funcionamento do código. A primeira função é a inicialização do módulo de comunicação I<sup>2</sup>C e a inicialização das variáveis do sistema. Depois são lidos os dados guardados na memória EEPROM. Somente quando a leitura estiver terminada é que os restantes periféricos (ADC, temporizador, interrupções externas, SCI, PWM, GPIO) são inicializados. A partir deste momento o programa entra num ciclo infinito, até ser dada a ordem para desligar o sistema de BMS.

Quando isso acontecer alguns dados são guardados na memória EEPROM. De seguida, o programa termina (Figura 5.33 (a)). As restantes funções são realizadas dentro das rotinas de interrupção dos periféricos. A maior parte das funções do sistema de controlo do BMS são executadas dentro da rotina de interrupção do ADC (Figura 5.33 (b)).

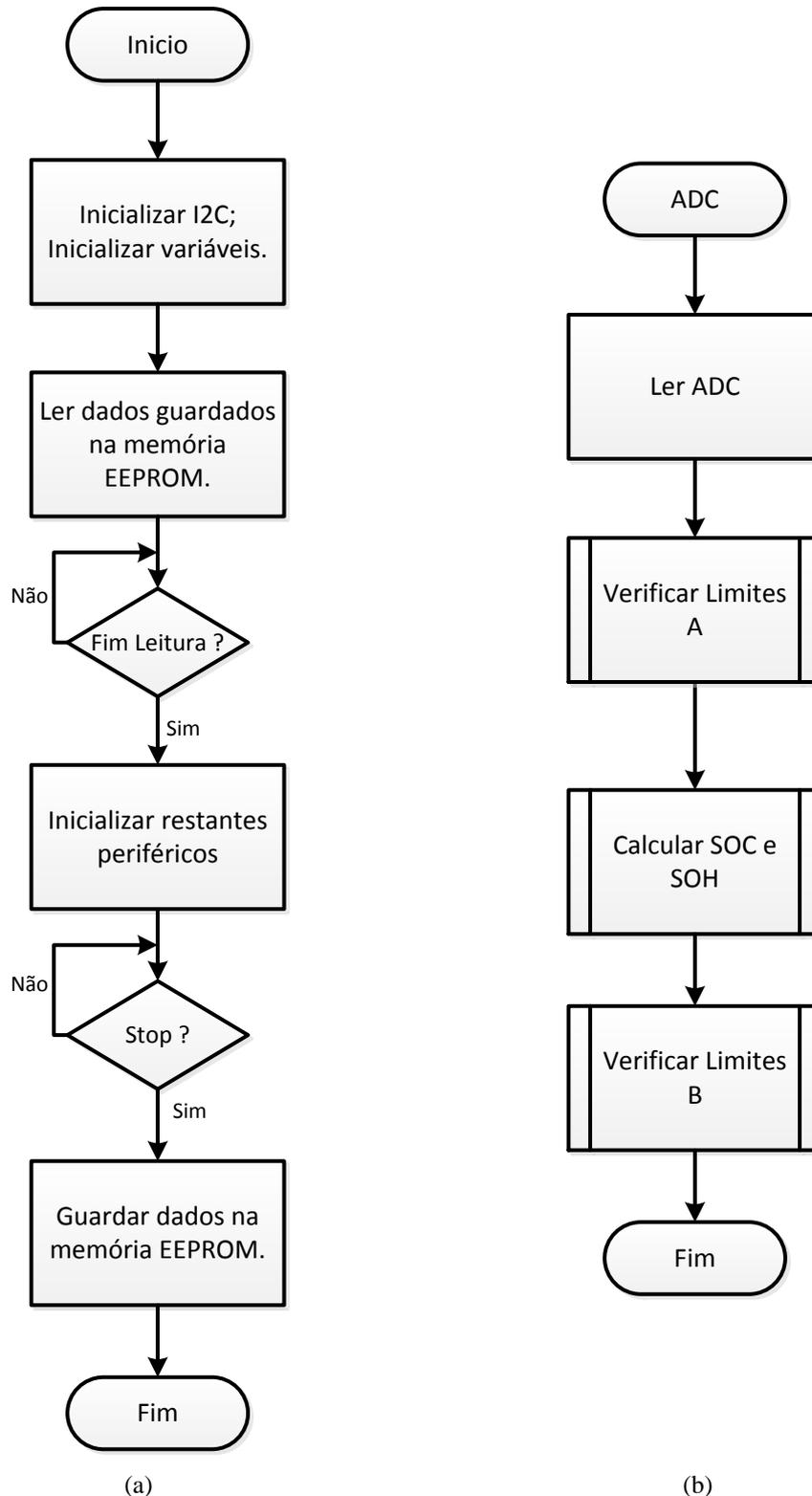


Figura 5.33 - Fluxograma do controlo: (a) Programa principal; (b) Rotina de interrupção do ADC.

A primeira função do programa quando entra na rotina de interrupção do ADC é a leitura dos valores digitais do mesmo. De seguida, verifica-se os valores lidos estão dentro da gama de valores para o funcionamento normal. Caso isso não aconteça ativa o sistema de proteções por software. Esta tarefa é realizada na subrotina *Verificar Limites A*. Posteriormente, é calculado para cada bateria o respetivo estado de carga e o estado de saúde, na subrotina *Calcular SoC e SoH*. Depois, verifica-se os valores calculados se encontram dentro da gama de valores aceites para o funcionamento normal. Caso isso não aconteça, verifica-se as medidas a serem tomadas pelo BMS (se deve iniciar ou parar o processo de equalização, se deve avisar que a bateria deve ser substituída ou se deve parar o processo carga ou descarga da bateria). Por fim, verifica-se é necessário guardar no histórico alguns dos valores lidos ou calculados (como por exemplo, tensão máxima da bateria, tensão de descarga máxima). Tudo isto é realizado na subrotina *Verificar Limites B*.

O valor do SoC das baterias é obtido pela comparação do valor de tensão nas mesmas com os dados guardados numa tabela. Assim em cada leitura verifica-se na tabela qual o valor correspondente do SoC. O método mais eficaz consistia na utilização do método Contagem de *Coulomb*. Contudo, este método é mais caro porque necessita de um sensor de corrente para cada bateria.

Para calcular o SoH verifica-se a quantidade de energia fornecida pela bateria até atingir a tensão que representa 50% do SoC da mesma. Quando a quantidade de energia fornecida atualmente pela bateria corresponder apenas a 80% da quantidade de energia fornecida pela mesma, no início do seu ciclo de vida, indica-se que a respetiva bateria necessita de ser substituída.

## 5.6. Conclusão

Neste capítulo é descrito o processo de implementação do sistema de BMS. Primeiro, descreve-se o hardware envolvido no circuito de potência. Depois apresenta-se o circuito de controlo e hardware envolvido neste. Por fim, descreve-se a estrutura do processo de controlo digital do BMS.

Em relação ao circuito de potência projetou-se o sistema para que seja extremamente fácil aumentar ou diminuir o número de baterias do banco. Para isso, projetou-se o circuito de potência de forma que cada na bateria tenha a sua própria placa de potência. Em relação aos semicondutores controlados, numa primeira fase eram utilizados MOSFETs do tipo P e do tipo N. Contudo, devido ao aquecimento excessivo

dos MOSFETs do tipo P estes foram trocados por MOSFETs do tipo N. Assim, na versão final só são utilizados MOSFETs do tipo N.

Em relação ao circuito de controlo a grande dificuldade era medição da tensão de cada bateria de forma isolada. A solução encontrada foi o recurso a optoacopladores lineares, neste caso o IL300. Para medir a corrente no banco de baterias utiliza-se um sensor de efeito *Hall*. Para o BMS comunicar com o computador, com outros sistemas do veículo elétrico e com a memória EEPROM utiliza-se comunicação SCI, CAN e I<sup>2</sup>C, respetivamente.

O sistema de proteção do BMS inclui proteções por software e hardware. Contudo, em relação ao sistema de proteções por hardware apenas se encontra implementado o circuito de condicionamento para o sinal de tensão, faltando implementar os dispositivos de proteção a inserir em série com o banco de baterias.

Como o controlo do BMS é efetuado todo pelo mesmo microcontrolador a estrutura do BMS é centralizada. A estrutura do processo de controlo é descrita por fluxogramas. Para o cálculo do SoC utiliza-se a relação entre este e a tensão nas baterias, em detrimento do método contagem de *Coulomb*, uma vez que este método necessitava de um sensor de corrente em cada bateria.



# CAPÍTULO 6

## Realização de Ensaios e Obtenção de Resultados Experimentais

### 6.1. Introdução

Neste capítulo apresenta-se os resultados experimentais obtidos durante a fase de testes do sistema de gestão de baterias. Começa-se por mostrar os resultados obtidos durante a fase de testes quer ao sistema de comunicação por I<sup>2</sup>C (*Inter Integrated Circuit*) entre o DSP e a EEPROM, quer ao sistema de comunicação via CAN. De seguida, apresentam-se os testes realizados às baterias utilizadas pelo CEPIUM. Por fim, mostra-se os resultados para o sistema de equalização. Além do teste do sistema de equalização implementado, condensadores comutados, testou-se também a equalização passiva com o recurso a resistências.

Durante a fase de teste do sistema de gestão de baterias (*Battery Management System - BMS*) foram utilizadas apenas duas baterias de Chumbo-Ácido, compostas por seis células, para validação do funcionamento da topologia. As primeiras baterias a serem utilizadas tinham uma capacidade de 33 Ah. Devido, ao longo tempo necessário por estas, para completar o processo de equalização optou-se por diminuir a capacidade das baterias utilizadas, e conseqüentemente diminuir o tempo necessário para equalização das mesmas. Assim, as novas baterias utilizadas tinham uma capacidade de 7,2 Ah e 4,2 Ah.

De mencionar que durante o funcionamento do processo de equalização ativa ou passiva as baterias não se encontram em operação.

### 6.2. Comunicação entre DSP e EEPROM por I<sup>2</sup>C

Com a execução destes testes pretendeu-se comprovar a escrita e leitura de dados na memória EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read Only Memory*). Pretende-se comprovar não só a realização de comunicação entre ambos os dispositivos, como também, a escrita e leitura por parte do DSP (*Digital Signal Processor*) no endereço de memória pretendido.

Para testar a escrita na EEPROM enviou-se um byte com o valor 0x12, para ser guardado na posição de memória 0x00. A Figura 6.1 apresenta o estado da linha de dados (sinal amarelo) e da linha de relógio (sinal azul). A frequência do sinal de relógio gerado pelo mestre é 400 kHz.

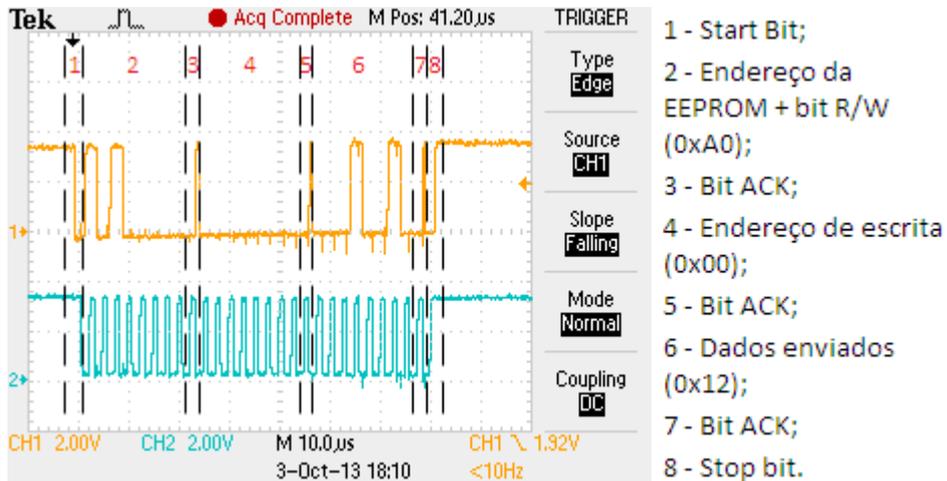


Figura 6.1 – Operação de escrita na memória EEPROM: a onda a amarelo representa o sinal de dados (CH1: 2 V/div), e a onda a azul representa o sinal de relógio (CH2: 2 V/div).

A operação de leitura da memória EEPROM pode ser dividida em duas fases. Na primeira fase, corresponde à Figura 6.2, o DSP transmite a trama configurada como se pretendesse realizar uma operação de escrita. Mas, depois de enviar a posição de memória onde supostamente quer escrever o DSP envia um *stop* bit terminando o processo de escrita. Esta fase tem como objetivo colocar o apontador interno da memória EEPROM na posição de memória que se pretende ler.

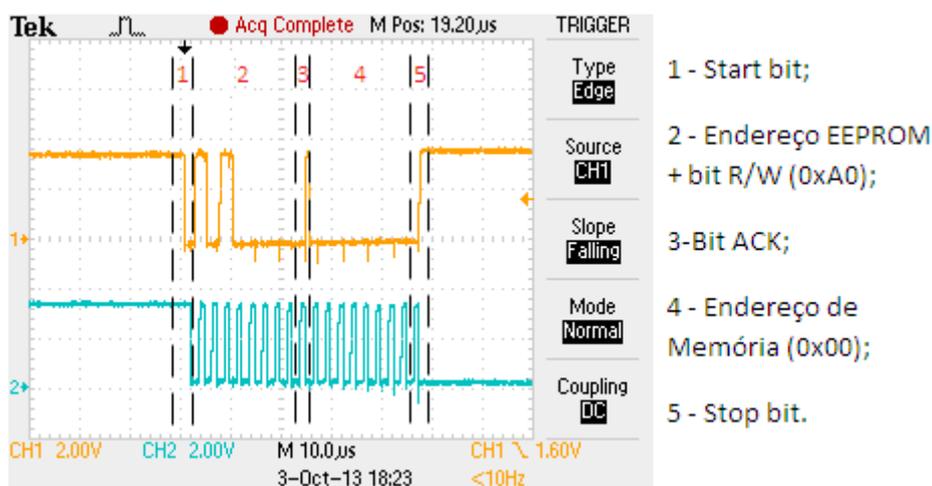


Figura 6.2 - Operação de leitura na memória EEPROM (primeira fase): a onda a amarelo representa o sinal de dados (CH1: 2 V/div), e a onda a azul representa o sinal de relógio (CH2: 2 V/div).

Na segunda fase o DSP apenas envia o endereço da EEPROM e indica que pretende realizar uma operação de leitura. A partir deste momento a EEPROM começa

a transmitir os dados guardados na posição de memória onde se encontra o apontador. A EEPROM envia apenas um byte de dados (8 bits) de cada vez e fica a espera de receber o bit de *acknowledge* enviado pelo DSP. Depois de isso acontecer a EEPROM envia outro byte de dados e volta a ficar a espera do bit de *acknowledge*. O processo repete-se até o DSP enviar um stop bit. Isto é possível porque a memória 24AA025E48 incrementa automaticamente o apontador que contém o endereço da posição de memória a ler. Na Figura 6.3 mostra-se o sinal de relógio e o sinal de dados durante a segunda fase da operação de leitura de um byte de dados.

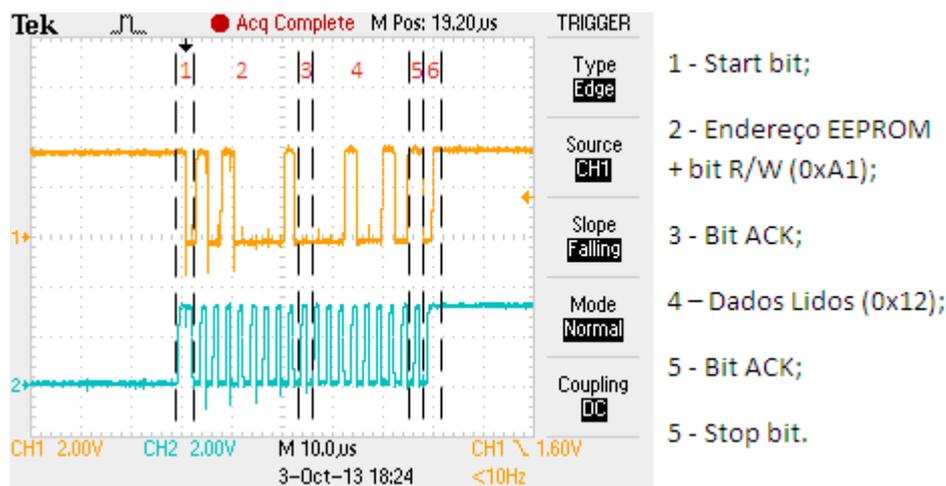


Figura 6.3 - Operação de leitura na memória EEPROM (segunda fase): a onda a amarelo representa o sinal de dados (CH1: 2 V/div), e a onda a azul representa o sinal de relógio (CH2: 2 V/div).

Observando a Figura 6.1 e a Figura 6.3 comprova-se a correta transmissão de dados entre o DSP e a memória 24AA025E48, uma vez que se verifica que a escrita e a leitura ocorreram na posição de memória pretendida, bem com o valor lido é igual ao valor escrito na EEPROM.

### 6.3. Teste do Sistema de Comunicação CAN

Estes testes têm como objetivo comprovar que o DSP está corretamente configurado para receber e enviar dados através de comunicação CAN. O primeiro teste consistiu em enviar através do programa do *USB-2-X* um determinado valor para o DSP e este tinha que enviar o valor recebido de volta para o *USB-2-X*. Em todos os testes realizados utilizou-se uma taxa de transmissão de 1 Mbps. Convém realçar como mencionado na secção 5.3.8 que alguns parâmetros em relação ao protocolo de comunicação CAN ainda não se encontram definidos. Por isso, a taxa de transmissão e o identificador das mensagens foram definidos apenas para a realização destes testes, sendo possível virem a ser alterados posteriormente. Em relação ao programa utilizado

deve-se mencionar dois aspetos. O primeiro é que os números a enviar devem ser escritos em base decimal, enquanto os valores recebidos pelo mesmo encontram-se em base hexadecimal. O segundo é que caso se pretenda enviar dados com mais de 8 bits tem que se delimitar cada 8 bits por uma vírgula. Na Figura 6.4 encontra-se uma imagem do software fornecido pelo fabricante do *USB-2-X* que funciona como uma espécie de terminal, onde é possível escrever os dados a enviar via CAN ou então verificar os dados recebidos via CAN pelo mesmo. Na mesma figura também se observa que no primeiro teste realizado o valor enviado pelo *USB-2-X* (em base decimal) corresponde ao valor recebido pelo mesmo (em base hexadecimal).

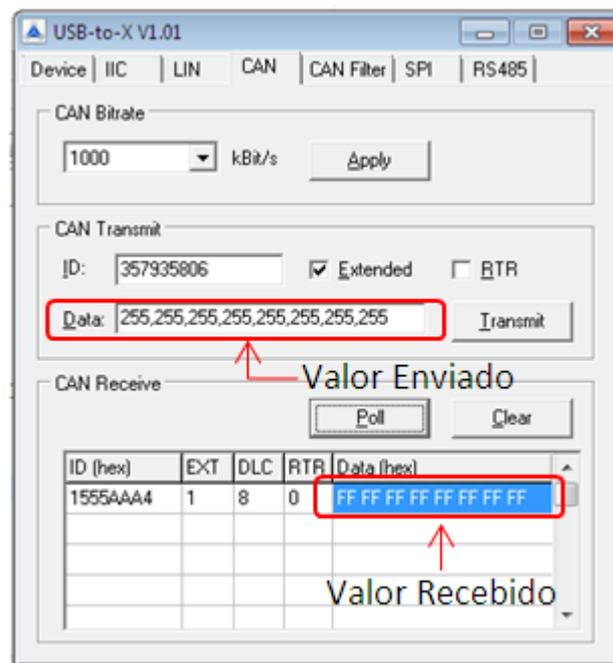


Figura 6.4 – Valor enviado e valor recebido pelo *USB-2-X* via comunicação CAN.

Para a realização do segundo e terceiro teste definiram-se alguns parâmetros para o banco de baterias e para algumas baterias (ver Figura 6.5).

```
//inicializar
bancoBaterias.autonomia=150;
bancoBaterias.corrente.all=2000;//mA
bancoBaterias.temperatura=25;
bancoBaterias.bat[1].soc=50;
bancoBaterias.bat[1].soh=95;
bancoBaterias.bat[1].tensao.all=12500;//mV
bancoBaterias.bat[0].soc=60;
bancoBaterias.bat[0].soh=90;
bancoBaterias.bat[0].tensao.all=12000;//mV
```

Figura 6.5 – Inicializações realizadas para o banco de baterias e para as baterias para testar o funcionamento da comunicação CAN.

No segundo teste o *USB-2-X* envia o número referente a uma bateria. O DSP verifica a que bateria corresponde esse número e envia as informações relativas a essa bateria. Na Figura 6.6 é enviado o valor 1 que corresponde à bateria 1. Pela Figura 6.5 e pela Figura 6.6 verifica-se que a informação enviada pelo DSP corresponde à bateria pretendida. Na Figura 6.6 o byte mais significativo corresponde ao valor do *soc*, enquanto os dois bytes menos significativos correspondem ao valor da *tensão*.

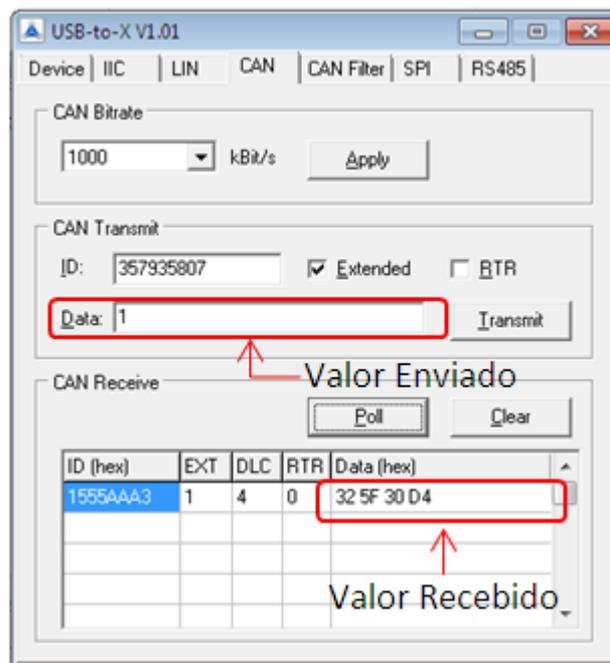


Figura 6.6 - Valor enviado e valor recebido pelo *USB-2-X* via comunicação CAN.

O terceiro teste tinha como objetivo testar a comunicação CAN através de tramas remotas. Para isso, configurou-se no DSP a *Mailbox* (corresponde ao *buffer* onde são guardados os valores a enviar ou recebidos através do protocolo CAN) que contém os valores relativos ao banco de baterias para responder a pedidos de tramas remotas. Assim o *USB-2-X* envia como um pedido de transmissão de dados, como se observa na Figura 6.7 o bit RTR encontra-se ativo. De referir que no software do *USB-2-X* o valor do campo *data* referente a aba *CAN transmit* não tem qualquer importância quando se trata de uma trama remota, este serve apenas para indicar ao programa quantos bytes se espera receber na resposta ao pedido de transmissão. Por exemplo, escrever 1,1,1 neste campo é exatamente igual a escrever 2,2,2, pois ambos indicam que se espera obter uma resposta com 3 bytes. Já escrever 1,1 é diferentes de escrever 1,1,1, pois no primeiro caso espera-se obter uma resposta com 2 bytes, enquanto no segundo caso a resposta deve ter 3 bytes.

Pela Figura 6.5 e pela Figura 6.7 verifica-se que a informação enviada pelo DSP é referente ao banco de baterias. Os dois bytes mais significativos referem-se ao valor da

corrente, o terceiro byte mais significativo corresponde à *temperatura*, e o byte menos significativo refere-se à *autonomia*.

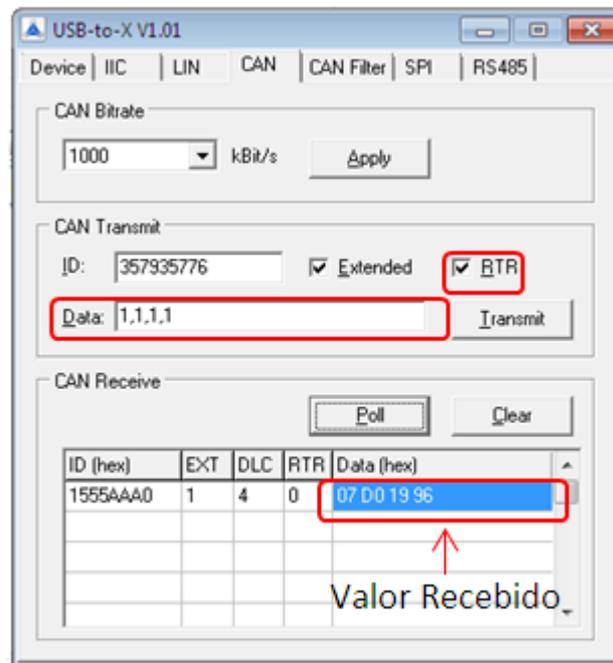


Figura 6.7 – Valor enviado e valor recebido pelo *USB-2-X* via comunicação CAN.

#### 6.4. Teste de Descarga e Carga às Baterias

Foram efetuados vários testes de descarga e de carga às baterias que são utilizadas no CEPIUM (*Power Mobility WCG-UI*). Estes testes permitem estabelecer uma relação entre o estado de carga (*State-of-Charge - SoC*) e a tensão na bateria. Contudo, esta aproximação tem sempre uma margem de erro, pois a tensão na bateria durante o seu funcionamento depende sempre da temperatura e da taxa de descarga ou carga a que a mesma está sujeita.

O primeiro teste consistiu na descarga de uma bateria com uma carga constante. A taxa de descarga para a tensão nominal da bateria foi aproximadamente de 0,08C. Em todos os testes de descarga o objetivo era uma taxa de descarga de 0,1C, pois este é um valor standard muito utilizado pelos fabricantes em testes. Contudo, isso não foi possível pois não existia hardware disponível que permitisse a realização do teste nas condições pretendidas. Utilizou-se uma carga puramente resistiva de 4,4  $\Omega$  capaz de dissipar uma potência 100 W (consistia em duas resistências ligadas em série, cada uma de 2,2  $\Omega$  com uma tolerância de 5% e capaz de dissipar uma potência de 50 W). A bateria no início do teste encontrava-se totalmente carregada e o teste terminou quando a tensão nesta era aproximadamente 10,5 V (corresponde a tensão de corte recomendada pelo fabricante). Na Figura 6.8 encontra-se a tensão e corrente medida com recurso a

dois multímetros durante o teste de descarga. Este teste durou cerca de oito horas e dez minutos e a bateria forneceu aproximadamente 20,5 Ah.

No segundo teste procedeu-se ao carregamento da bateria através do algoritmo corrente constante seguido de tensão constante. Durante o estágio corrente constante a bateria foi carregada com uma taxa constante de 0,2C e durante o estágio tensão constante a mesma foi carregada com 14,4 V constantes. Na Figura 6.9 apresenta-se a corrente e a tensão na bateria durante a realização do teste. Este teve a duração de cerca de sete horas e cinquenta minutos e a bateria absorveu cerca de 25,2 Ah.

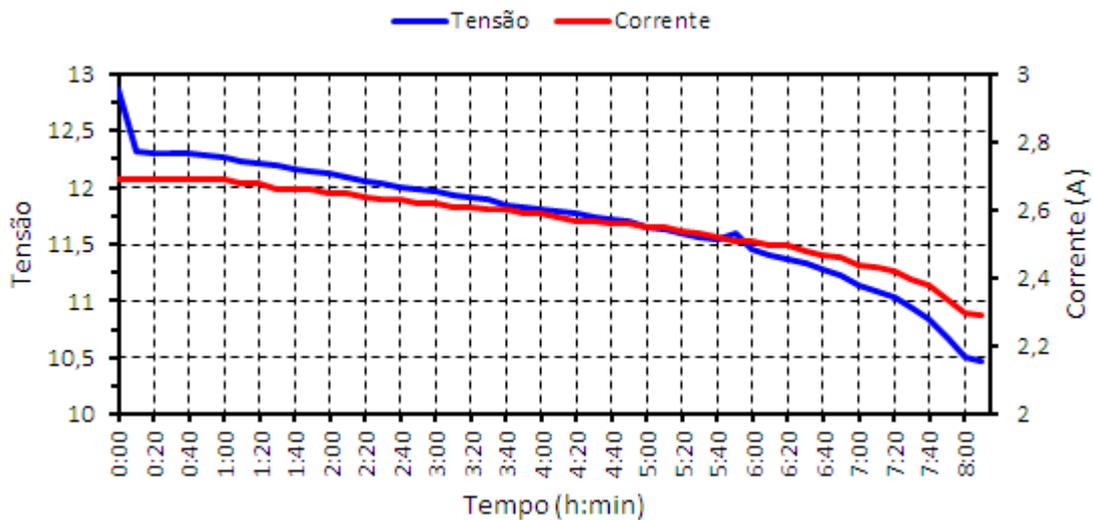


Figura 6.8 – Teste de descarga da bateria com carga constante.

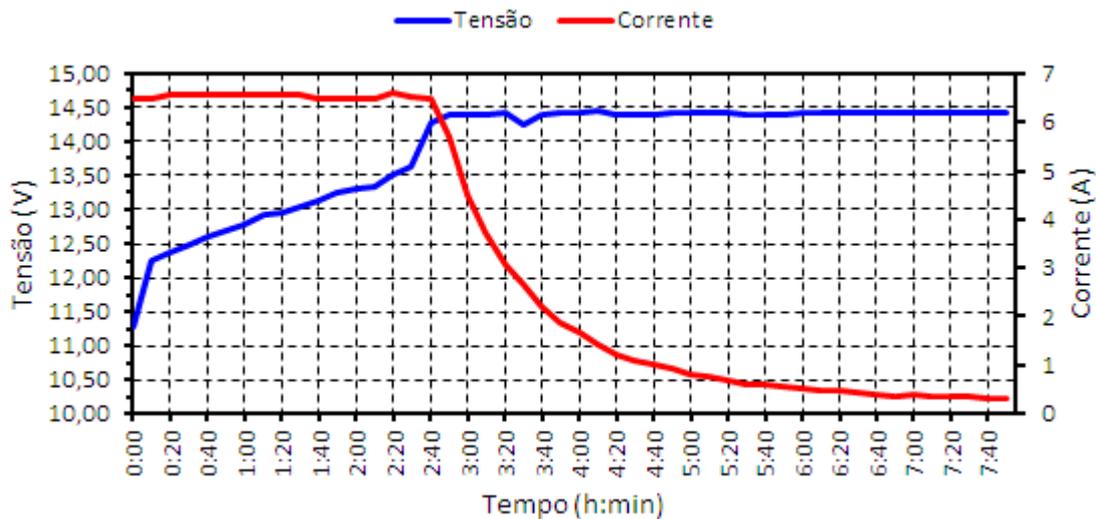


Figura 6.9 – Teste de carga da bateria com algoritmo corrente constante seguido de tensão constante.

O terceiro teste consistiu na descarga da bateria, mas agora com uma corrente de descarga constante. Para isso, recorreu-se a um reóstato. O reóstato é um componente eletrónico que permite variar a resistência, e conseqüentemente possibilita aumentar ou diminuir a intensidade da corrente no circuito. Na Figura 6.10 apresenta-se a corrente e

a tensão na bateria durante a realização do teste de descarga. Tinha-se como objetivo manter a corrente constante em 2,5 A (corresponde a taxa de 0,075C), mas esta variou entre 2,59 A e 2,43 A. Isto aconteceu porque o reóstato utilizado não tinha uma precisão suficiente para atingir esse objetivo. Este teve a duração de cerca de oito horas e trinta minutos e a bateria forneceu cerca de 21,3 Ah.

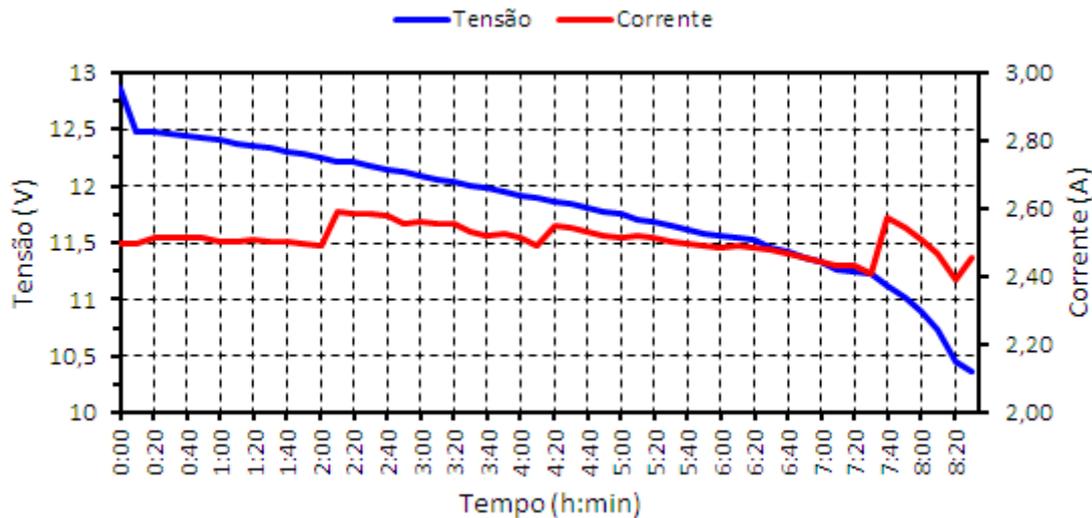


Figura 6.10 - Teste de descarga da bateria com corrente constante.

## 6.5. Equalização Passiva

Apesar de todo o hardware ter sido desenvolvido para a realização de equalização ativa, e aplicação da topologia condensadores comutados, este também pode ser adotado para a realização de equalização passiva, através do uso de resistências. Contudo, a placa de balanceamento desenvolvida tem componentes em excesso para essa função (nomeadamente, um MOSFET a mais). Para a realização de equalização passiva na placa desenvolvida, além da troca do dispositivo de equalização apenas se atua um MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) por cada braço (o superior ou o inferior), o outro MOSFET encontra-se sempre ao corte. Na Figura 6.11 está representado o circuito de balanceamento para os dois casos possíveis. Na Figura 6.11 (a) atua-se o MOSFET superior e liga-se a resistência de dissipação em paralelo com o MOSFET inferior do braço. Na Figura 6.11 (b) é o inverso.

O gráfico apresentado na Figura 6.12 contém as tensões das baterias durante a realização do teste de balanceamento passivo nas mesmas. Uma bateria tinha uma capacidade de 7,2 Ah (passará a ser designada por bateria 1), enquanto a outra tinha uma capacidade de 4,2 Ah (passará a ser designada por bateria 2). Utilizou-se uma resistência de 100  $\Omega$ , que permite dissipar, numa hora, a energia correspondente a 1,6%

e 2,9% da energia total armazenada pelas baterias 1 e 2, respetivamente (cálculos efetuados para valores nominais).

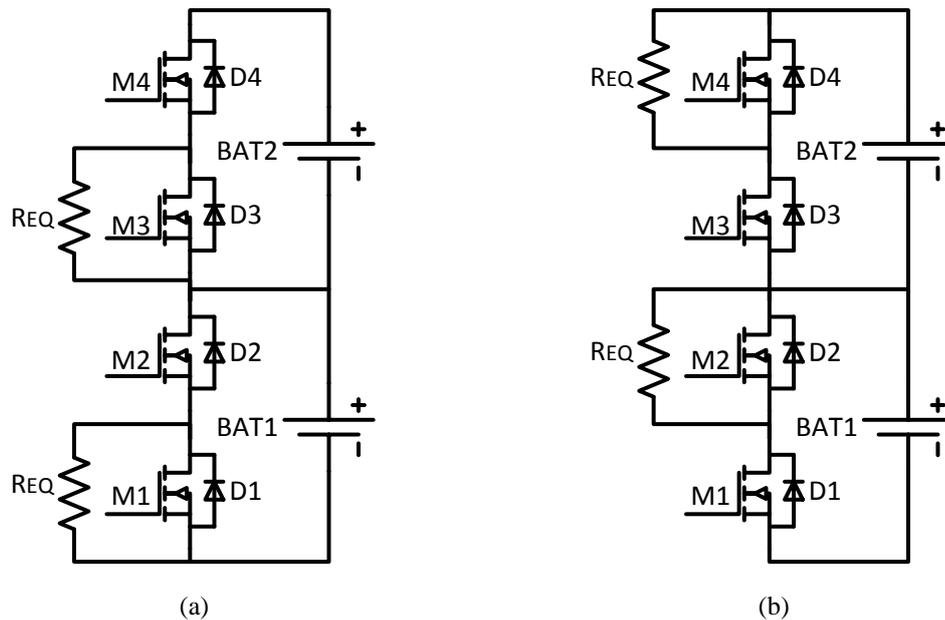


Figura 6.11 - Circuito de balanceamento passivo: (a) resistência em paralelo com MOSFET inferior; (b) resistência em paralelo com MOSFET superior.

A tensão inicial na bateria 1 era de 12,58 V, e na bateria 2 era de 12,26 V. Na bateria 1 nota-se que nos primeiros minutos do processo de equalização ocorreu uma queda de tensão (cerca de 10 mV). Esta queda existente na tensão da bateria é provocada pela queda de tensão que ocorre na resistência interna da bateria. A tensão no final do processo de equalização era de 12,26 V, em ambas as baterias. O processo de equalização durou cerca de 5 horas e 40 minutos.

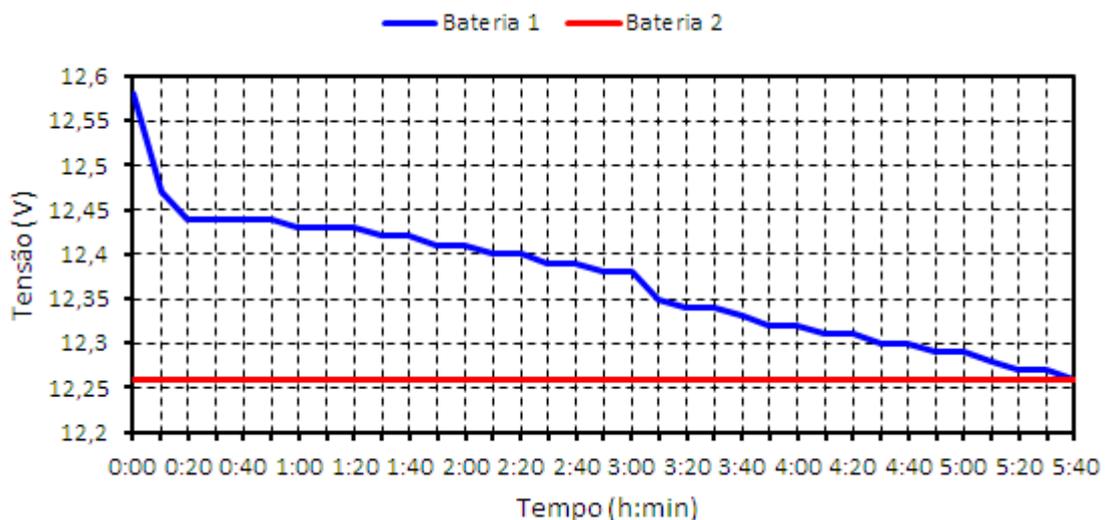


Figura 6.12 - Tensão nas baterias durante o processo de balanceamento passivo.

## 6.6. Equalização Ativa

Os primeiros testes realizados tinham apenas como objetivo verificar o funcionamento correto do sistema desenvolvido. Convencionou-se que o sentido da corrente no condensador quando este está a carregar e a bateria com maior tensão a descarregar, corresponde ao sentido positivo da corrente.

Nos primeiros testes efetuados, ambas as baterias utilizadas tinham uma capacidade de 33 Ah. A tensão na bateria 1 era de 10,5 V e a tensão na bateria 2 era de 12,5 V. A frequência de comutação era de 1 kHz e o condensador de balanceamento utilizado era de 47  $\mu$ F (eletrolítico). Na Figura 6.13 estão apresentados os sinais de comando dos MOSFETs. A onda a azul corresponde ao sinal aplicado de comando aplicado ao MOSFET tipo N, enquanto a onda a amarelo corresponde ao sinal de comando do MOSFET tipo P. Neste teste ambos os sinais tinham um *duty-cycle* de 40%.

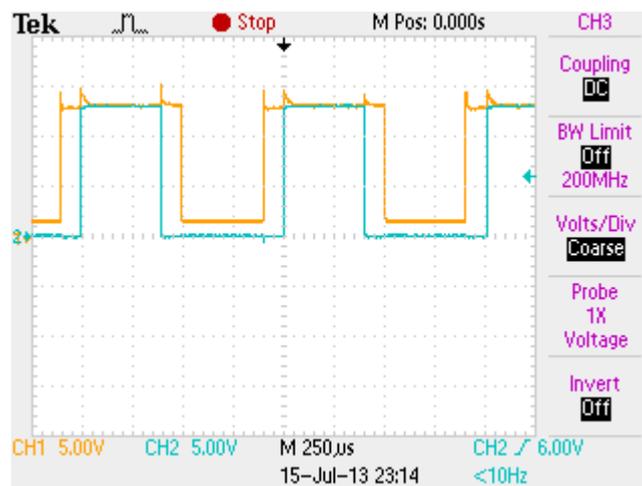


Figura 6.13 – Sinais de comando dos MOSFETs tipo P e tipo N (CH1 e CH2: 5 V/div).

Pela Figura 6.14 e pela Figura 6.15 verifica-se que quando os MOSFETs do tipo P se encontram em condução o condensador carrega, e a sua tensão é igual à tensão da bateria 2. Já quando os MOSFETs do tipo N se encontram em condução o condensador descarrega, e verifica-se que a tensão na bateria 1 aumenta, sendo a sua tensão aproximadamente igual a tensão da bateria 2. Contudo, quando os MOSFETs do tipo N ficam ao corte a tensão na bateria 1 baixa. Convém indicar que quando o condensador está a carregar se encontra conectado à bateria 2 e quando este está a descarregar se encontra conectado à bateria 1.

A primeira placa de balanceamento era constituída por um MOSFET do tipo P e por outro do tipo N. Contudo com a realização dos primeiros ensaios verificou-se que os

MOSFETs tipo P aqueciam em excesso, e por isso estes foram trocados por MOSFETs do tipo N. Os testes apresentados a partir da Figura 6.17 foram realizados só com MOSFETs do tipo N.

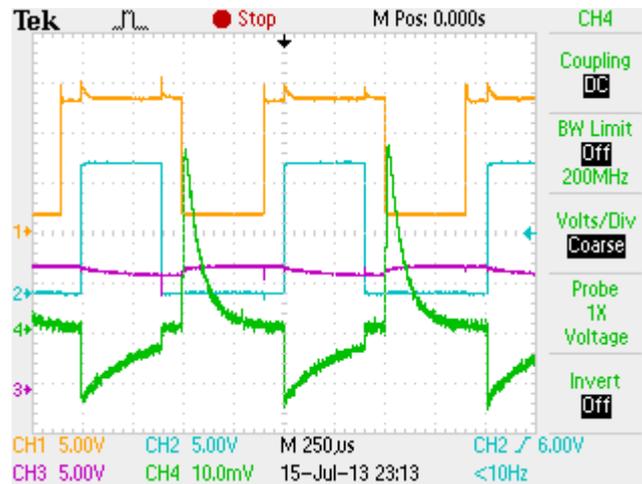


Figura 6.14 - Sinais de comando dos MOSFETs (CH1 e CH2: 5 V/div), corrente (CH4: 10 mA/div) e tensão no condensador (CH3: 5 V/div).

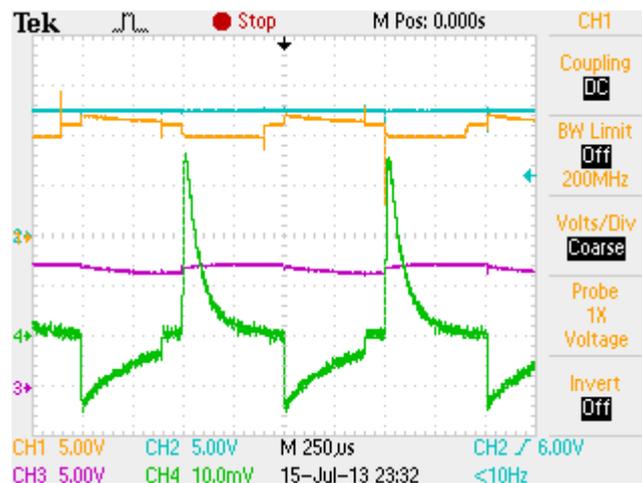


Figura 6.15 – Tensão na bateria 1 (CH1: 5 V/div) e na bateria 2 (CH2: 5 V/div), e corrente (CH3: 5 V/div) e tensão (CH4: 10 mA/div) no condensador.

Na Figura 6.16 está apresentado os sinais de comando quando os MOSFETs do braço superior e do braço inferior são do tipo N. Ambos os sinais de comando têm um *duty-cycle* de 40% e a frequência de comutação é de 40 kHz. Na mesma figura também se observa que entre ambos os sinais existe um *dead-time*. Convém mencionar o valor da tensão de pico não é a mesma em ambos sinais, pois o *driver* do MOSFET inferior do braço é alimentado pela bateria, logo o pico de tensão varia consoante a tensão na bateria, o *driver* do MOSFET superior do braço é alimentado por uma fonte isolada de 15 V.

Na Figura 6.17 apresenta-se uma experiência com as mesmas baterias, mas agora a tensão inicial na bateria 1 era 12,2 V e na bateria 2 era de 11,6 V. Nesta figura é apresentada a corrente condensador de equalização e a tensão em cada bateria. Neste teste a frequência de comutação foi de 50 kHz, e utilizou-se um condensador de polipropileno de 44  $\mu\text{F}$  (associação em paralelo de 2 condensadores de 22  $\mu\text{F}$ ). De referir que nesta última imagem e na Figura 6.19 a ponta de prova para medição da corrente foi colocada com a polaridade trocada, e que de acordo com o sentido de corrente convencionado nestas imagens quando a corrente é negativa devia ser positiva, e o vice-versa.

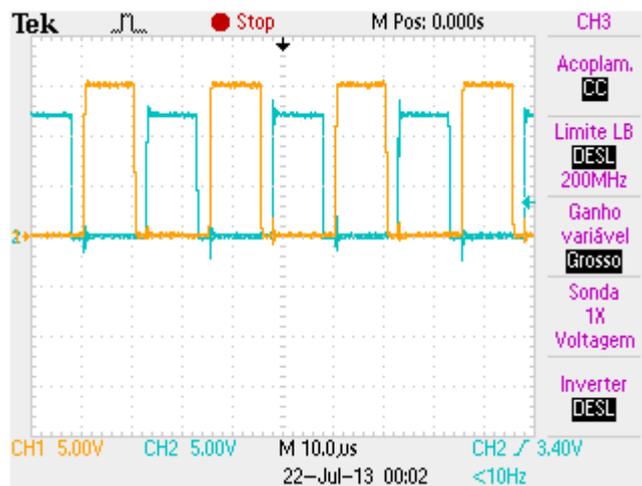


Figura 6.16 - Sinais de comando dos MOSFETs (CH1 e CH2: 5 V/div).

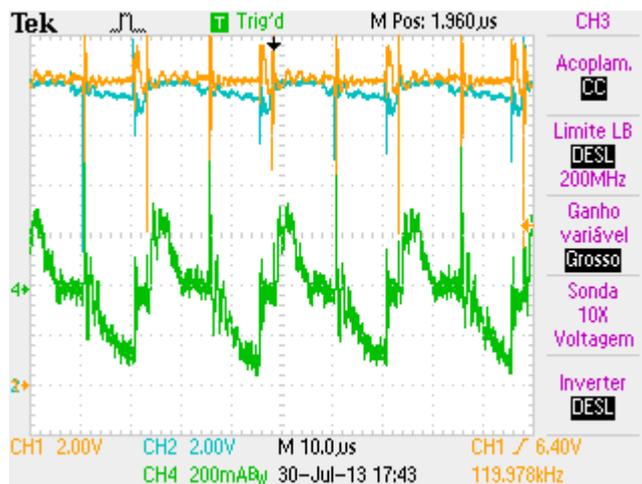


Figura 6.17 – Tensão na bateria 1 (CH1: 2 V/div) e na bateria 2 (CH1: 2 V/div), e corrente no condensador (CH4: 200 mA/div).

Na Figura 6.18 apresenta-se com mais pormenor a corrente (onda verde) e a tensão (onda amarela) na bateria 1.

Na Figura 6.19 apresenta-se com mais pormenor a corrente (onda verde) e a tensão (onda azul) na bateria 2. Pode-se verificar qua a corrente no condensador durante

o seu carregamento (Figura 6.17) é igual à corrente na bateria 1 durante a sua descarga (Figura 6.18). Já a corrente durante a descarga o condensador corresponde a corrente na bateria 2 (Figura 6.19).

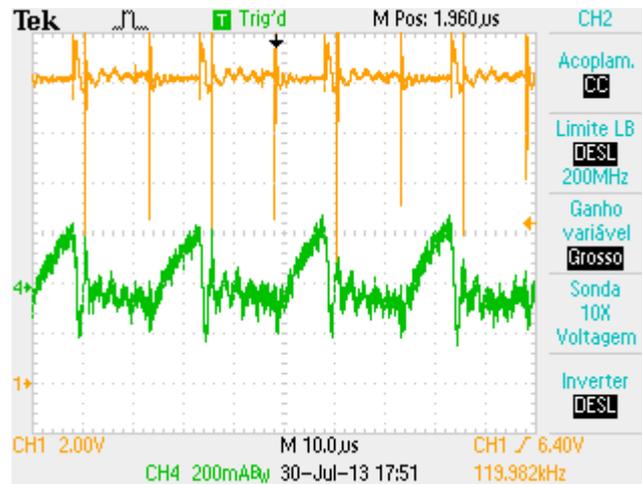


Figura 6.18 - Tensão (CH1: 2 V/div) e corrente (CH4: 200 mA/div) na bateria 1.

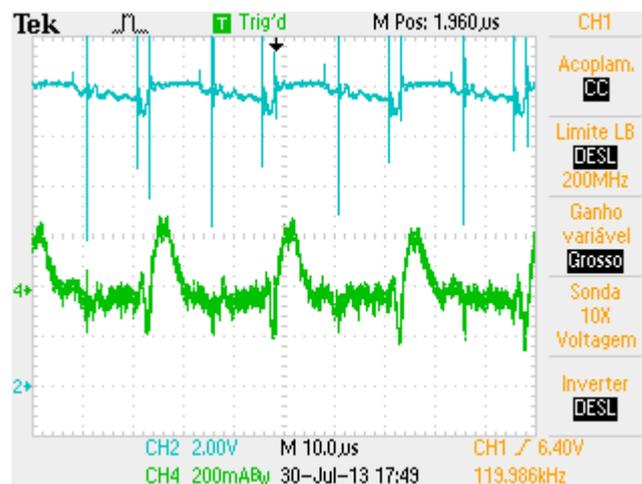


Figura 6.19 - Tensão (CH2: 2 V/div) e corrente (CH4: 200 mA/div) na bateria 2.

Na Figura 6.20 está apresentado a tensão durante o processo de equalização para uma bateria de 7,2 Ah com uma tensão inicial de 12,62 V, e para uma bateria de 4,2 Ah com uma tensão inicial de 12,3 V. Esta troca deveu-se, como já foi explicado anteriormente, devido ao tempo de balanceamento necessário com as baterias de 33 Ah. Na realização deste teste utilizou-se uma frequência de comutação de 80 kHz e um condensador de polipropileno de 66 µF (associação em paralelo de 3 condensadores de 22 µF). Pelo gráfico nota-se que o processo de equalização é bastante lento, demorou cerca de cinco horas para corrigir uma diferença de 300 mV. A tensão nas duas baterias no final do processo de equalização não corresponde ao valor médio das tensões iniciais nas mesmas (12,45 V), pois as baterias têm capacidades diferentes. Assim a tensão em ambas baterias no final do processo de balanceamento é 12,5 V.

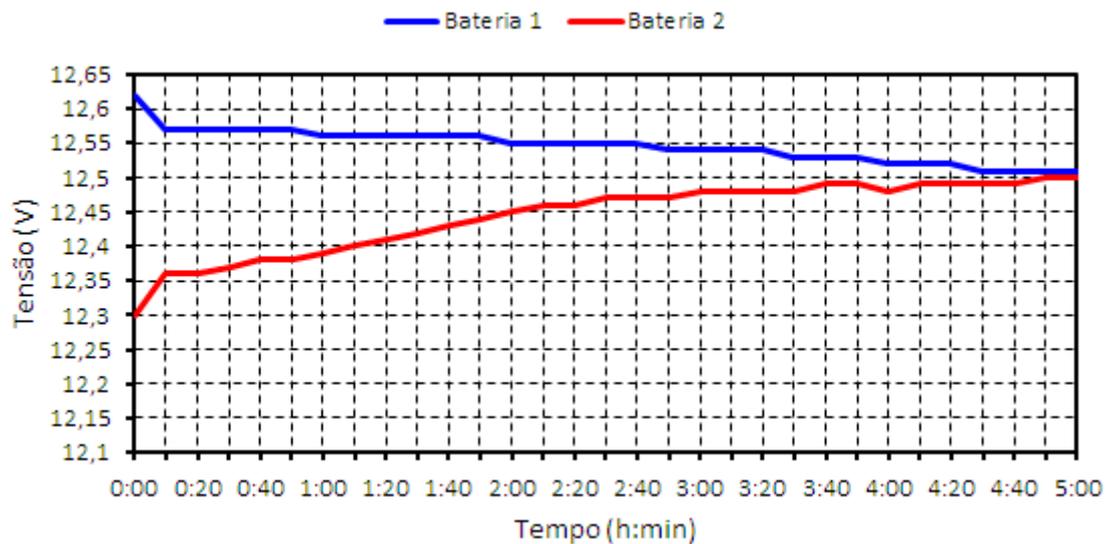


Figura 6.20 - Tensão nas baterias durante o processo de balanceamento ativo, com uma frequência de 80 kHz e um condensador de 66  $\mu\text{F}$  (polipropileno).

## 6.7. Conclusão

Neste capítulo começa-se por comprovar a comunicação por  $I^2C$ , entre o DSP e a memória EEPROM. Para isso, guardou-se um byte de dados com o valor 0x12 na EEPROM e depois procedeu-se à sua leitura. Verificou-se que o valor lido (0x12) correspondia ao valor escrito.

Para testar a comunicação CAN começou-se por enviar para o DSP um determinado valor e verificou-se que o DSP enviava de volta o mesmo valor. De seguida, inicializaram-se alguns parâmetros das baterias e do banco de baterias. Assim enviou-se o número de uma bateria para o DSP, e este enviava os parâmetros relacionados com essa bateria para o PC através do dispositivo *USB-2-X*. Verificou-se que o DSP voltou a enviar os valores corretos. Para finalizar os testes da comunicação CAN testou-se a resposta do DSP a pedidos de transmissão de dados através de tramas remotas. Verificou-se que o DSP recebeu o pedido e respondeu mais uma vez de forma prevista. Assim é possível concluir que o DSP está corretamente configurado para realização comunicação via CAN, seja através de tramas de dados ou de tramas remotas.

Os testes de descarga e carga realizados às baterias utilizadas no CEPIUM, permitiram verificar o perfil da tensão da bateria durante a sua descarga e carga. Com estes testes também é possível estabelecer uma relação entre o SoC da bateria e sua tensão. Embora esta relação não seja muito correta.

De seguida, testou-se o balanceamento passivo com recurso a resistências de 100  $\Omega$ . Além de não haver aproveitamento da energia nesta técnica de equalização, este

método também é lento. Para corrigir uma diferença de aproximadamente 320 mV demorou cerca de 5 horas e quarenta minutos.

Por fim, realizaram-se testes com equalização ativa, através da técnica de balanceamento condensadores comutados. A primeira conclusão com a realização de ensaios foi a necessidade de trocar os MOSFETs do tipo P por MOSFETs do tipo N. Depois, devido ao tempo necessário para a equalização das baterias com capacidade de 33 Ah, decidiu-se trocar estas por outras baterias com menor capacidade. Os ensaios foram realizados com diferentes tipos (polipropileno e eletrolítico) e valores de condensadores, e com várias frequências de comutação. Os melhores resultados foram obtidos com um condensador de 66  $\mu\text{F}$  e uma frequência de 80 kHz. Mas mesmo assim para corrigir uma diferença de 320 mV demorou-se cerca de 5 horas. Por isso, a velocidade de equalização com esta técnica é baixa.



# CAPÍTULO 7

## Conclusão

### 7.1. Conclusões

Esta dissertação de mestrado descreve a implementação de um sistema de gestão de baterias para um veículo elétrico. Para avaliar e validar o sistema desenvolvido foi concebido um protótipo.

No capítulo 2 foram descritos os sistemas de armazenamento de energia com ênfase na tecnologia das baterias, uma vez que é o sistema de armazenamento predominante em veículos elétricos (EVs). Sobre as baterias foram indicados quais são os requisitos necessários para que as mesmas possam ser empregues em aplicações de mobilidade elétrica. Também foram mencionadas quais as tecnologias de baterias que mais se adaptam para utilização em EVs. De entre os tipos de baterias apresentados é de realçar as baterias de Lítio, pois é o tipo de tecnologia que mais se adequa e mais se aproxima das características necessárias para aplicações de mobilidade elétrica. Por fim, apresentaram-se os diversos algoritmos de carregamento de baterias e indicou-se qual o mais adequado para cada tecnologia de baterias.

No capítulo 3 apresentou-se o estado de arte em relação aos BMS e postos de carregamento para EVs. Assim, no início deste capítulo apresentou-se a estrutura de um BMS e indicaram-se as funções que o mesmo deve executar. Em relação aos métodos de equalização, estes podem ser divididos em duas categorias consoante a maneira como a mesma é efetuada: equalização passiva e equalização ativa. Na equalização ativa podem ser usadas três estratégias para equalização das baterias: transferência de energia entre baterias, transferência de energia das baterias com maior SoC para o banco de baterias, ou transferência de energia a partir do banco de baterias para as baterias com menor SoC. As topologias ativas também podem ser divididas em duas categorias, consoante o componente auxiliar utilizado para a realização do processo de balanceamento. Dentro destas destacam-se as topologias baseadas em condensadores, pois são as que apresentam menor custo de implementação, apresentando como principal desvantagem uma menor velocidade de equalização.

Para calcular o estado de carga das baterias podem-se utilizar técnicas mais simples, como a da tensão em circuito aberto ou o método contagem de *Coloumb*, ou ainda técnicas mais sofisticadas, como redes neuronais ou filtros de *Kalman*. Os métodos mais simples são menos precisos e apresentam uma margem de erro maior que os métodos mais sofisticados. Contudo, os métodos mais sofisticados necessitam de uma grande capacidade de processamento computacional.

Para calcular o estado de saúde (*State-of-Health* - SoH) das baterias o método mais usual consiste na comparação da capacidade atual da bateria com a capacidade nominal especificada pelo fabricante.

Para finalizar o estado da arte sobre BMS são indicados alguns circuitos integrados (ICs) e módulos de BMSs existentes no mercado desenvolvidos para aplicações de mobilidade elétrica. No entanto, a grande maioria dos sistemas ou ICs existentes no mercado destinam-se às baterias de Lítio.

Uma das desvantagens dos veículos elétricos em relação aos veículos convencionais é o tempo necessário para o carregamento das baterias. De modo a tentar contrariar este inconveniente estão a ser desenvolvidas diferentes tecnologias de carregamento de EVs, tais como, carregamento com conexão condutiva, carregamento com conexão indutiva ou estações de permuta/troca de baterias. Nas estações de permuta, como o próprio nome indica, em vez de se efetuar o carregamento das baterias procede-se antes a substituição destas por outras, que se encontrem totalmente carregadas. A vantagem é que este processo pode ser efetuado num curto período de tempo. Em relação ao carregamento com conexão indutiva pensa-se que o mesmo só seja aplicado num número limitado de situações. Já em relação ao carregamento com conexão condutiva espera-se que este possa ser efetuado em diferentes locais (por exemplo em casa, no local de trabalho, em centros comerciais ou em estações públicas dedicadas para o efeito). No entanto, prevê-se que na sua maioria das vezes este ocorra durante o período noturno, nas habitações dos utilizadores.

No capítulo 4 foram apresentados os resultados das simulações computacionais para equalização passiva e para equalização ativa. O modelo de simulação das baterias é composto apenas por uma fonte de tensão, um condensador e uma resistência. Em ambos os casos validou-se o princípio de funcionamento da topologia de balanceamento. Em relação à utilização do condensador como dispositivo de equalização retiraram-se algumas conclusões. A primeira é que o controlo da corrente no condensador depende essencialmente da resistência interna do circuito de balanceamento e da diferença de tensão entre as baterias. Devido a estes fatores, o

tempo necessário, na parte final do processo, para equalizar uma diferença de tensão pequena pode ser o mesmo que o necessário, no início do processo, para equalizar uma tensão de diferença maior.

Em relação às topologias simuladas, a que apresenta uma velocidade de equalização maior é a dupla cascata de condensadores. Verificou-se ainda que para um número reduzido de baterias a topologia condensadores comutados, em comparação com a topologia comutação de um único condensador, não apresenta uma redução de tempo de equalização apesar de utilizar um número maior de condensadores.

No capítulo 5 descreveu-se a implementação do sistema de BMS. Convém mencionar que todas as placas foram desenvolvidas de raiz, com a exceção da utilizada para testar a comunicação via CAN. Numa primeira fase descreveu-se o circuito de potência do BMS. O hardware para este circuito foi desenvolvido de forma genérica, para que o sistema de BMS não esteja limitado a um número de baterias pré-definido. Para isto ser possível, o hardware foi projeto de modo que cada bateria que integra o banco de baterias tenha a sua própria placa de potência.

Em relação ao circuito de controlo utilizaram-se optoacopladores lineares para medir a tensão em cada bateria. Para a medição da temperatura foi utilizado um sensor de silício, o *LM35*. Também foram implementadas algumas proteções por hardware (proteção contra sobretensão, subtensão e proteção para os sinais de PWM provenientes do DSP), enquanto outras foram apenas projetadas, ou seja, não se procedeu à sua implementação (proteção contra sobreintensidades no banco de baterias). Para fazer o interface entre o DSP e os semicondutores controlados foi necessária a utilização de *drivers* isolados. Como o DSP utilizado não tem forma de guardar dados quando o seu sistema de alimentação é desligado, recorreu-se a uma memória EEPROM externa a este para guardar permanentemente alguns parâmetros do BMS. O DSP e a EEPROM comunicam por I<sup>2</sup>C.

Para comunicar com outros sistemas do veículo elétrico utiliza-se comunicação CAN. Esta troca de informações pode ser realizada através de tramas de dados ou tramas remotas.

Todo o controlo do BMS é realizado por um único *DSP320F28335*, pelo que o BMS desenvolvido possui uma estrutura centralizada.

No capítulo 6 descreveram-se os ensaios e os resultados obtidos com a realização dos mesmos. Foi validada a comunicação por I<sup>2</sup>C entre o DSP com a memória EEPROM. Com recurso ao dispositivo *USB-2-X* e ao software fornecido pelo fabricante deste, também se validou a troca de informação entre este dispositivo e o DSP via CAN.

Apresentaram-se os resultados obtidos através de diferentes testes efetuados (descarga da bateria com carga constante, descarga da bateria com corrente constante e carga da bateria com algoritmo corrente constante seguido de tensão constante) às baterias utilizadas pelo CEPIUM. Neste capítulo, por último indicaram-se os resultados obtidos com equalização passiva e ativa. A velocidade de equalização em ambos os sistemas é baixa. Apesar da realização de vários testes com diferentes condensadores e diferentes frequências, o tempo da duração do processo de balanceamento ainda é longo. Durante a realização destes testes verificou-se a necessidade de substituir os MOSFETs do tipo P por MOSFETs tipo N, uma vez que estes aqueciam em excesso durante os testes efetuados.

## 7.2. Sugestões de Trabalho Futuro

Apesar do trabalho já realizado, ainda existem melhorias que podem ser efetuadas no BMS desenvolvido. Para começar, pode-se verificar a resposta do sistema com uma cadeia de baterias mais longa, uma vez que o mesmo foi testado apenas com duas baterias. Em relação ao sistema de balanceamento pode-se implementar outra técnica de balanceamento, como por exemplo, a topologia dupla cascata de condensadores. Assim, também é possível comprovar experimentalmente se esta topologia apresenta uma redução significativa no tempo de balanceamento, como mencionado no estado da arte e verificado posteriormente, durante a realização das simulações computacionais. Outra ideia interessante seria implementar outro método para o cálculo do estado de carga e saúde, para comparar os resultados obtidos com os métodos que se encontram implementados atualmente.

Também seria interessante verificar o funcionamento do sistema de equalização em simultâneo com o carregamento das baterias, uma vez que nos testes efetuados o carregamento das baterias era parado quando o processo de balanceamento se iniciava.

Para melhorar a relação entre a tensão nas baterias e o respetivo estado de carga, podem ser efetuados mais testes às baterias, com diferentes taxas de descarga. Para os resultados serem mais fidedignos estes testes devem ser realizados a várias baterias.

Em relação ao hardware desenvolvido pode-se concluir a implementação de todos os circuitos em placas de circuito impresso. O sistema de controlo durante a fase de testes foi alimentado a partir de um *Digital Lab*. Para a implementação do BMS num veículo elétrico deve ser desenvolvida uma fonte para alimentar o sistema de controlo a partir do banco de baterias, ou da bateria de serviço do mesmo. Para a placa de equalização pode-se implementar uma solução baseada em MOSFETs do tipo P e do

tipo N, desde que ambos possuam uma resistência muito baixa. Assim pode ser implementada a ideia inicial possibilitando reduzir o custo de implementação, pois a fonte isolada utilizada para alimentar o driver *ADuM7234* deixa de ser necessária. Para comunicação com outros sistemas do CEPIUM através do barramento CAN devem-se definir as configurações de funcionamento da rede CAN. Assim deve-se definir, para todos os módulos presentes na rede CAN, o identificador para as mensagens enviadas por cada módulo e a sua prioridade. Deve também se definir qual a informação que cada módulo deve enviar e receber, que tipo e formato de tramas devem ser usadas, e por último definir a velocidade da taxa de transmissão na rede CAN.

Seria também interessante desenvolver uma aplicação gráfica que permitisse a análise dos parâmetros do BMS através de um computador pessoal.

A última sugestão de trabalho futuro consiste em implementar e testar o funcionamento do sistema de gestão de baterias no CEPIUM.



## Referências

- [1] Khaligh, A.; Zhihao Li, “Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.59, no.6, pp.2806,2814, July 2010 doi: 10.1109/TVT.2010.2047877.
- [2] Dixon, J., “Energy storage for electric vehicles,” 2010 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Vi a del Mar, vol., no., pp.20-26, 14-17 March 2010, E-ISBN: 978-1-4244-5696-3, doi: 10.1109/ICIT.2010.5472647.
- [3] Lukic, S.M.; Cao, J.; Bansal, R.C.; Rodriguez, F.; Emadi, A., “Energy Storage Systems for Automotive Applications,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.55, no.6, pp.2258-2267, June 2008, ISSN: 0278-0046, doi: 10.1109/TIE.2008.918390. .
- [4] C. C. Chan, “The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles”, Proc. IEEE, vol. 95, pp. 704–718, Apr. 2007, ISSN 0018-9219, doi: 10.1109/JPROC.2007.892489.
- [5] Vitor Monteiro, “Desenvolvimento de um Sistema Inteligente de Carregamento de Baterias”, Dissertação de Mestrado na Universidade do Minho, 2009.
- [6] Siang Fui Tie; Chee Wei Tan; “A review of energy sources and energy management system in electric vehicles”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 20, April 2013, Pages 82-102, ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.077>.
- [7] Digi-Key Corporation, Página web do distribuidor de material eletrónico Digi-key Corporation, disponível online no dia 20 de Fevereiro de 2013, em <http://www.digikey.com/>.
- [8] Maxwel Technologies, Página web do fabricante de ultracondensadores Maxwell Technologies, disponível online no dia 20 de Fevereiro de 2013, em <http://www.maxwell.com/>.
- [9] Chan, C.C.; Wong, Y.S.; , “Electric vehicles charge forward,” IEEE Power and Energy Magazine , vol.2, no.6, pp. 24- 33, Nov.-Dec. 2004, ISSN: 1540-7977, doi: 10.1109/MPAE.2004.1359010.
- [10] Dhameja, Sandeep; “Electric Vehicle Battery Systems” (2002), Newnes, ISBN 9780750699167.
- [11] Manuel, António; Carvalho, Santos Marques, Bruno Filipe; Fernando, Paulo; “Flywheel - A Bateria Electromecânica”, Instituto Politécnico de Viseu, Out-1997, ISSN: 1647-662X, <http://hdl.handle.net/10400.19/761>.
- [12] Socomec, “ Flywheel de 60 a 900 kVA - Solução de Suporte de Tensão para garantir uma alimentação estática autónoma”, 2011, disponível em <http://www.socomec.pt>.
- [13] Pistoia, Gianfranco; “Electric and Hybrid Vehicles Power Sources, Models, Sustainability, Infrastructure and The Markey”, 1º ed, 2010, Elsevier, ISBN: 978-0-444-53565-8.
- [14] Guerrero, C.P.A.; Jingshan Li; Biller, S.; Guoxian Xiao, “Hybrid/electric vehicle battery manufacturing: The state-of-the-art,” 2010 IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Toronto, vol., no., pp.281-286, 21-24 Aug. 2010, Print ISBN: 978-1-4244-5447-1, doi: 10.1109/COASE.2010.5584739. .
- [15] Linden, David; Reddy, Thomas B; “Handbook of Batteries”, 3ª.ed, McGraw-Hill, ISBN 0-07-135978-8 .
- [16] Sociedade de Gestão de Veículos em Fim de Vida (Valorcar), “Guia de Gestão Baterias de Veículos Usadas”, disponível online, no dia 24 de Janeiro de 2013, em <http://www.valorcar.pt>.
- [17] Husain, Iqbal; “ Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals”, 2005, CRC Press, ISBN 0-8493-1466-6.
- [18] PKCELL, Página web do fabricante de baterias PKCELL, disponível online no dia 20-02-2013 em <http://www.pkcell.net/> .
- [19] Woodbank Communications; “The Electropaedia”, Página web dedicada às baterias e a BMS, disponível online no dia 21 -12-2012, em <http://www.mpoweruk.com/index.htm> .

- [20] MES-DEA “Technical data ZEBRA Batteries Z5” (2011), disponível em <http://www.cebi.com>.
- [21] Larminie, James; Lowry, John; “Electric Vehicle Technology Explained”, 2003, John Wiley & Sons, ISBN 0-470-85163-5, .
- [22] Cadex Electronics Inc., “Battery University” , Página web patrocinada pelo fabricante de carregadores de baterias Cadex Electronics, disponível online no dia 3 de Fevereiro de 2013, em <http://batteryuniversity.com/> .
- [23] YUASA, Página web do fabricante de baterias YUASA, disponível online no da 21 de Fevereiro de 2013, em <http://www.yuasaeurope.com>.
- [24] SAFT, Página web do fabricante de baterias Saft, disponível online no dia 23 de Fevereiro de 2013, em <http://www.saftbatteries.com/>.
- [25] Hussein, H.A.-H.; Batarseh, I., “A Review of Charging Algorithms for Nickel and Lithium Battery Chargers,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.60, no.3, pp.830,838, March 2011, ISSN: 0018-9545,doi: 10.1109/TVT.2011.2106527.
- [26] VARTA, Página web do fabricante de baterias Varta, disponível online no dia 22 de Fevereiro de 2013, em <http://www.varta.com/eng/>.
- [27] Shafiei, A.; Williamson, S.S., “Plug-in hybrid electric vehicle charging: Current issues and future challenges,” 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Lille, vol., no., pp.1-8, 1-3 Sept. 2010, Print ISBN: 978-1-4244-8220-7, doi: 10.1109/VPPC.2010.5729134 .
- [28] Monteiro, Vítor; Pedrosa, Delfim; Exposto, BrunoFerreira, João C; Afonso, João L; “Smart Charging System of the Electric Vehicle CEPIUM” 2012, ISBN: 978-972-98603-5-5, <http://hdl.handle.net/1822/20912> .
- [29] Broussely, Michel; “Traction Batteries. EV and HEV”, Industrial Applications of Batteries. From Cars to Aerospace and Energy Storage, chapter 4; 2007, Elsevier B.V. , 2007.
- [30] Shahriari, M.; Farrokhi, M., “Online State-of-Health Estimation of VRLA Batteries Using State of Charge,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.60, no.1, pp.191-202, Jan. 2013, ISSN:0278-0046, doi: 10.1109/TIE.2012.2186771. .
- [31] Whittingham, M. Stanley, “Lithium batteries and cathode materials”, Chemical Reviews, 2004, vol.104, no. 10, pp.4271-4302, DOI: 10.1021/cr020731c.
- [32] GS Yuasa International Ltd,“GS Yuasa”, Página web do fabricante de baterias GS Yuasa Internationa, disponível online no dia 22 de fevereiro de 2012, em <http://www.gs-yuasa.com/gyin/en/>.
- [33] Automotive Energy Supply Corporation,“AESC”, Página web do fabricante de baterias de iões de Lítio Automotive Energy Supply Corporation, disponível online no dia 22 de Fevereiro de 2013, em <http://www.eco-aesc-lb.com/en/> .
- [34] MD TECHNOLOGY LIMITED,Página web do fabricante de baterias MD TECHNOLOGY LIMITED, disponível online no dia 22 de Fevereiro de 2013, em <http://www.mydbattery.com> .
- [35] Hussein, H.A.-H.; Pepper, M.; Harb, A.; Batarseh, I., “An efficient solar charging algorithm for different battery chemistries,” IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC '09), 2009 Dearborn, vol., no., pp.188-193, 7-10 Sept. 2009, E-ISBN: 978-1-4244-2601-0, doi: 10.1109/VPPC.2009.5289853. .
- [36] Tavares, Diogo; Moreira,Filipe; “Soluções técnicas para sistemas de carga de veículos eléctricos” Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto,2009, <http://hdl.handle.net/10216/60380> .
- [37] Chih-Chiang Hua; Meng-Yu Lin, “A study of charging control of lead-acid battery for electric vehicles,” Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2000 (ISIE 2000), Cholula, Puebla; vol.1, no., pp.135,140 vol.1, 2000, Print ISBN: 0-7803-6606-9, doi: 10.1109/ISIE.2000.930500. .

- [38] Cheng, K. W E; Divakar, B. P.; Hongjie Wu; Ding, Kai; Ho Fai Ho, "Battery-Management System (BMS) and SOC Development for Electrical Vehicles," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.60, no.1, pp.76,88, Jan. 2011, ISSN :0018-9545, doi: 10.1109/TVT.2010.2089647.
- [39] Brandl, M.; Gall, H.; Wenger, M.; Lorentz, V.; Giegerich, M.; Baronti, F.; Fantechi, G.; Fanucci, L.; Roncella, R.; Saletti, R.; Saponara, S.; Thaler, A.; Cifrain, M.; Prochazka, W., "Batteries and battery management systems for electric vehicles", Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition, 2012, pp. 971- 976, ISSN 1530-1591, doi: 10.1109/DATE.2012.6176637.
- [40] Sen, C.; Kar, N.C., "Battery pack modeling for the analysis of battery management system of a hybrid electric vehicle," Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC '09), Dearborn, 2009, vol., no., pp.207-212, 7-10 Sept. 2009, E-ISBN: 978-1-4244-2601-0, doi: 10.1109/VPPC.2009.5289848.
- [41] Bogdan M. Wilamowski; J. david Irwin; "Power electronics and motor drives", 2<sup>a</sup>ed.,CRC Press, 2011, ISBN 9781439802854.
- [42] Robert Krause, "Solid-state relays simplify monitoring electric-car battery voltage", Fairchild Semiconductor, EDN Design Idea, 2004, disponível em <http://www.edn.com/design/power-management/4334350/Solid-state-relays-simplify-monitoring-electric-car-battery-voltage> .
- [43] Bonnie Baker, "Application Notes: AN679 -Temperature Sensing Technologies", Microchip, 1998, disponível em <http://www.microchip.com/> .
- [44] J. Cao; N. Schofield; and A. Emadi, "Battery balancing methods: A comprehensive review," in Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Harbin, China, Sep. 3–5, 2008, pp. 1–6, E-ISBN 978-1-4244-1849-7, doi: 10.1109/VPPC.2008.4677669.
- [45] Baronti, F.; Fantechi, G.; Leonardi, E.; Roncella, R.; Saletti, R., "Hierarchical platform for monitoring, managing and charge balancing of LiPo batteries,"2011-IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Chicago , vol., no., pp.1,6, 6-9 Sept. 2011, E-ISBN: 978-1-61284-246-2, doi: 10.1109/VPPC.2011.6043074 .
- [46] Wai Chung Lee; Drury, D.; Mellor, P., "Comparison of passive cell balancing and active cell balancing for automotive batteries," IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011, Chicago, vol., no., pp.1-7, 6-9 Sept. 2011, E-ISBN: 978-1-61284-246-2, doi: 10.1109/VPPC.2011.6043108. .
- [47] Moore, S. and Schneider, P., "A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems," SAE Technical Paper 2001-01-0959, 2001, doi:10.4271/2001-01-0959.
- [48] Cadar, D.V.; Petreus, D.M.; Patarau, T.M., "An energy converter method for battery cell balancing," 33rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), 2010-Warsaw, vol., no., pp.290,293, 12-16 May 2010, E-ISBN: 978-1-4244-7850-7 doi: 10.1109/ISSE.2010.5547305.
- [49] Kong Zhi-Guo; Zhu Chun-bo; Lu Ren-gui; Cheng Shu-kang, "Comparison and Evaluation of Charge Equalization Technique for Series Connected Batteries," 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC '06), 2006, Jeju, vol., no., pp.1,6, 18-22 June 2006, ISSN: 0275-9306, doi: 10.1109/PESC.2006.1711751.
- [50] Hong-sun Park; Chong-Eun Kim; Chol-Ho Kim; Gun-Woo Moon; Joong-Hui Lee, "A Modularized Charge Equalizer for an HEV Lithium-Ion Battery String," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.56, no.5, pp.1464-1476, May 2009, ISSN: 0278-0046, doi: 10.1109/TIE.2009.2012456. .
- [51] West, S.; Krein, P.T., "Equalization of valve-regulated lead-acid batteries: issues and life test results," Telecommunications Energy Conference, 2000. INTELEC. vol., no., pp.439,446, 2000 doi: 10.1109/INTLEC.2000.884287.

- [52] Barsukov, Yevgen; “Battery cell balancing: what to balance and how”, Texas Instruments (2005) disponível em <http://focus.ti.com/download/trng/docs/seminar/Topic%20%20-%20Battery%20Cell%20Balancing%20-%20What%20to%20Balance%20and%20How.pdf>.
- [53] Daowd, M.; Antoine, M.; Omar, N.; van den Bossche, P.; van Mierlo, J.; “Single Switched Capacitor Battery Balancing System Enhancements”; *Energies* 2013, 6, 2149-2174.
- [54] Daowd, M.; Omar, N.; Van den Bossche, P.; Van Mierlo, Joeri, “Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation,” *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2011, vol., no., pp.1,7, 6-9 Sept. 2011 doi: 10.1109/VPPC.2011.6043010.
- [55] Hong-sun Park; Chol-Ho Kim; Ki-Bum Park; Gun-Woo Moon; Joong-Hui Lee, “Design of a Charge Equalizer Based on Battery Modularization,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.58, no.7, pp.3216,3223, Sept. 2009 doi: 10.1109/TVT.2009.2015331.
- [56] Mohamed Daowd, Noshin Omar, Peter Van Den Bossche, Joeri Van Mierlo; “A Review of Passive and Active Battery Balancing based on MATLAB/Simulink”, *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*, 2011, 2974-2989.
- [57] I. González, A. Ramiro, M. Calderón, A.J. Calderón, J.F. González, Estimation of the state-of-charge of gel lead-acid batteries and application to the control of a stand-alone wind-solar test-bed with hydrogen support, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 37, Issue 15, August 2012, Pages 11090-11103, ISSN 0360-3199, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.05.001>.
- [58] Watrin, N.; Blunier, B.; Miraoui, A., “Review of adaptive systems for lithium batteries State-of-Charge and State-of-Health estimation”, *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Dearborn, USA, vol., no., pp.1-6, 18-20 June 2012, E-ISBN 978-1-4673-1406-0, doi: 10.1109/ITEC.2012.6243437.
- [59] Codeca, F.; Savaresi, S.M.; Rizzoni, G.; “On battery State of Charge estimation: A new mixed algorithm,” *IEEE International Conference on Control Applications*, 2008, pp.102-107, Sept. 2008, E-ISBN 978-1-4244-2223-4, doi: 10.1109/CCA.2008.4629635.
- [60] Sabine Piller, Marion Perrin, Andreas Jossen, “Methods for state-of-charge determination and their applications”, *Journal of Power Sources*, Volume 96, Issue 1, Pages 113-120, June 2001, ISSN 0378-7753, doi: 10.1016/S0378-7753(01)00560-2.
- [61] Pascoe, P.E.; Anbuky, A.H., “Standby power system VRLA battery reserve life estimation scheme,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol.20, no.4, pp.887,895, Dec. 2005 doi: 10.1109/TEC.2005.853749.
- [62] Sinclair, P.; Duke, R.; Round, S., “An adaptive battery monitoring system for an electric vehicle,” *International Conference on Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth*, 1998., vol.2, no., pp.786-791 Vol. 2, 1-3 Dec. 1998, Print ISBN: 0-7803-4879-6, doi: 10.1109/PEDES.1998.1330701.
- [63] Le, Daniel, and Xidong Tang. “Lithium-ion Battery State of Health Estimation Using Ah-V Characterization.” *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*. 2011.
- [64] Ewert Energy Systems, Inc, “Orion Bms”, Página web do fabricante do Orion BMS, disponível online no dia 12 de Fevereiro de 2013, em <http://www.orionbms.com/>.
- [65] Nuvation, disponível online no dia 14 de Março de 2012, em <http://www.nuvation.com/>.
- [66] Steve Taranovich, “Nuvation innovation, a Microchip dsPIC33 and an eRex at 160 mph”, *Electronics Design Network (EDN)*, April 24, 2013, <http://www.edn.com/>.
- [67] Analog Devices, “AD7280 Lithium-Ion Battery Monitor for Hybrid Electric Vehicles” (2008), disponível em <http://www.analog.com/en/index.html>.
- [68] Texas Instruments, “3 to 6 Series Cell Lithium-Ion Battery Monitor and Secondary Protection IC for EV and HEV Applications”, (2011), disponível em <http://www.ti.com/>.

- [69] Union of the Electricity Industry (EURELECTRIC), “Facilitating e-mobility : EURELECTRIC views on charging infrastructure”, march 2012, disponível online, no dia 20 de novembro de 2012, em <http://www.eurelectric.org/> .
- [70] Better Place, Página web da empresa de permuta de baterias Better Place, disponível online em 20 de Novembro de 2012, em <http://www.betterplace.com/>.
- [71] Gabay C. Yudan A., Mulato G., Poillot J. Hennequet G., “Easy Battttery Swapping”, Better Place and Renault, (2011), disponível no dia 21 de Novembro de 2012, em <http://www.green-cars-initiative.eu/public/> .
- [72] Renault, Página web do fabricante de automóveis Renault, disponível online no dia 22 de Novembro de 2012, em <http://www.renault.com/en/pages/home.aspx>.
- [73] Hayes, J.G., “Battery charging systems for electric vehicles,” IEE Colloquium on Electric Vehicles - A Technology Roadmap for the Future (Digest No. 1998/262), London, vol., no., pp.4/1-4/8, 5 May 1998, INSPEC Accession Number:5966498, doi: 10.1049/ic:19980359. .
- [74] Neves, A.; Sousa, D.M.; Roque, A.; Terras, J.M., “Analysis of an inductive charging system for a commercial electric vehicle,” Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011), Birmingham, vol., no., pp.1-10, Aug. 30 2011-Sept. 1 2011, E-ISBN: 978-90-75815-15-3.
- [75] Wu, H.H.; Gilchrist, A.; Sealy, K.; Israelsen, P.; Muhs, J., “A review on inductive charging for electric vehicles,” IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011, Niagara Falls, vol., no., pp.143-147, 15-18 May 2011, Print ISBN: 978-1-4577-0060-6, doi: 10.1109/IEMDC.2011.5994820. .
- [76] Yilmaz, M.; Krein, P. T.; , “Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol.28, no.5, pp.2151-2169, May 2012, ISSN 0885-8993, doi: 10.1109/TPEL.2012.2212917.
- [77] Gaston Maggetto, Peter Van den Bossche, “Inductive Automatic Charging: The Way to Safe, Efficient and User- Friendly Electric Vehicle Infrastructure”, Vrije Universiteit Brussel, disponível online, no dia 5 de Dezembro de 2012, em <http://etec.vub.ac.be/publications/evs18gm.pdf> .
- [78] Câmara Municipal de Loures (2012), “Formas de Carregamento de Veículos Elétricos em Portugal”, disponível online, no dia 21 de Novembro de 2012, em <http://www.cmloures.pt/doc/Ambiente/RedeMobie.pdf>.
- [79] European Automobile Manufacturers Association, “ACEA position and recommendations for the standardization of the charging of electrically chargeable vehicles”, disponível online no dia 6 de Dezembro de 2012, em <http://www.acea.be>.
- [80] Foley, A.M.; Winning, I. J.; Gallachoir, B.P.O., “State-of-the-art in electric vehicle charging infrastructure,” 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Lille, vol., no., pp.1-6, 1-3 Sept. 2010, Print ISBN: 978-1-4244-8220-7, doi: 10.1109/VPPC.2010.5729014. .
- [81] Scame Parre, Página web do fabricante de material elétrico Scame Parre S.p.A., disponível online no dia 7 de Dezembro de 2012, em <http://www.scame.com/en/home.asp> .
- [82] EURELECTRIC, “European electricity industry views on charging Electric Vehicles”,(2011), disponível em <http://www.eurelectric.org/> .
- [83] Siemens, Página web do fabricante de Postos de Carregamento Siemens, disponível online no dia 14 de Março de 2013, em <http://www.energy.siemens.com>.
- [84] Efacec, Página web do fabricante de postos de carregamento Efacec, disponível online no dia 14 de Março de 2013, em <http://www.efacec.pt>.
- [85] Baughman, A.C.; Ferdowski, M., “Double-Tiered Switched-Capacitor Battery Charge Equalization Technique,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, , vol.55, no.6, pp.2277,2285, June 2008 doi: 10.1109/TIE.2008.918401.

- [86] Vishay Semiconductors, “Linear Optocoupler , High Gain Stability , Wide Bandwidth (IL300)”, 2012, disponível em <http://www.vishay.com/> .
- [87] Vishay Semiconductors, “Designing Linear Amplifiers Using the IL300 Optocoupler Vishay Semiconductors”, 2012, disponível em <http://www.vishay.com/> .
- [88] Allegro MicroSystems, “Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor (ACS712)”,2012, disponível em <http://www.allegromicro.com/> .
- [89] Texas Instruments, “LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors”,2013, disponível em <http://www.ti.com/> .
- [90] Analog Devices, “Datasheet ADuM7234”,2013, disponível em <http://www.analog.com/en/index.html> .
- [91] Texas Instruments, “Data Manual TMS320F28335, TMS320F28334, TMS320F28332 Digital Signal Controllers (DSCs)”, 2007, disponível em <http://www.ti.com/> .
- [92] Microchip, “2K I2C<sup>TM</sup> Serial EEPROMs with EU1-48<sup>TM</sup> Node Identity (24AA02E48/24AA025E48)”,2010, disponível em <http://www.microchip.com/> .
- [93] Texas Instruments, “ Reference Guide TMS320x280x, 2801x, 2804x Inter-IntegratedCircuit (I2C) Module”, 2011, disponível em <http://www.ti.com/> .
- [94] Guimarães, Alexandre; Saraiva, Antônio “O Protocolo CAN: Entendendo e Implementando uma Rede de Comunicação Serial de Dados baseada no Barramento ”Controller Area Network" Universidade de São Paulo, 2002.
- [95] Eduardo Ferreira, “Automação Residencial Utilizando Protocolo CAN”, Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná,, 2009.
- [96] Bosch, “CAN Specification version 2.0”, 1991.
- [97] Texas Instruments, “ Reference Guide TMS320x2833x Analog-to-Digital Converter (ADC) Module”, 2007, disponível em <http://www.ti.com/> .