



Análise e Desenvolvimento de um Sistema de Equilíbrio de Células de Iões de Lítio baseado num Circuito Ressonante

Maria Mafalda Fernandes Machado

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Armando Sousa Araújo (Prof. Doutor)

30 de Julho de 2014

A Dissertação intitulada

**“Análise e Desenvolvimento de um Sistema de Equilíbrio de Células de Iões de
Lítio Baseado num Circuito Ressonante”**

foi aprovada em provas realizadas em 23-07-2014

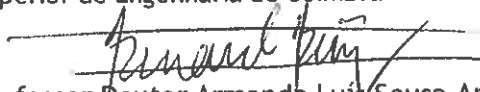
o júri



Presidente Professor Doutor António José de Pina Martins
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

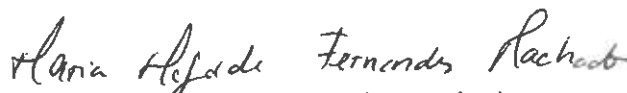


Professora Doutora Maria Teresa Duarte Baroca Delgado Outeiro
Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto
Superior de Engenharia de Coimbra



Professor Doutor Armando Luís Sousa Araújo
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.



Autor - Maria Mafalda Fernandes Machado

Resumo

Atualmente assistimos a um grande desenvolvimento em I&D associado a energias alternativas motivado, em grande parte, pelos problemas originados pela utilização de combustíveis fósseis. Estas novas fontes colocam alguns problemas devido quer à sua intermitência quer à variação de energia disponível em cada instante. Por outro lado, os já referidos problemas, associados aos combustíveis fósseis, levaram à introdução de veículos elétricos como parte da mobilidade mundial. Assim, aparece a necessidade de desenvolvimento de sistemas armazenadores de energia capazes de assistir os sistemas associados a ambos os casos.

Dos armazenadores de energia atualmente sob estudo destacam-se, por aplicação prática em ambas as temáticas referidas, as baterias. As baterias são compostas por um determinado número de células em série e paralelo, impondo os valores de tensão e corrente necessários em cada projeto. No entanto, e como elementos eletroquímicos, o ambiente sob o qual são fabricadas e o processo de que são alvo são fatores que influenciam individualmente cada uma das células criando, desde logo, diferenças inevitáveis, entre elas, o que leva a que, embora aparentemente equivalentes, tenham ligeiras diferenças entre si.

Sendo uma bateria, como sabido, composta por um determinado número de células, agrupadas em conjunto de séries e paralelos, e dado que cada célula não poderá ser carregada, ou descarregada, para além do seu limite, pode concluir-se então que, numa série, a célula com menor carga impõe o tempo de descarga e, analogamente, a célula com maior carga determina o tempo de carga. Este problema faz pois com que uma série de células fique limitada à carga/descarga da que tem menor capacidade já que será a que se carregará/descarregará mais rapidamente. Deste modo, a possibilidade de compensar as diferenças de carga a partir de um sistema capaz de promover a equalização entre as diferentes células é, por si só, um tipo de sistema de investigação pertinente e de solução mais ou menos complexa.

Assim, a introdução de um sistema de balanceamento, como parte integrante do sistema de gestão de baterias, tem vindo a ser prática recorrente pelo que têm surgido várias topologias, inovadoras, centradas neste objetivo: equilibrar a tensão do conjunto de células que compõem uma bateria.

Este processo de equilíbrio pode ser feito de forma passiva, caso em que o balanceamento é conseguido por dissipação energética com descarga resistiva das células, ou ativa, caso em que a energia é redirecionada entre células utilizando interruptores controlados e elementos não dissipativos, tais como bobinas e condensadores.

Deste modo, esta dissertação centra-se no estudo dos sistemas de balanceamento ativos, bem como na análise e desenvolvimento de um sistema inovador de transferências de energia baseado num circuito ressonante LC série.

Abstract

Nowadays, as a response for problems associated with the use of fossil combustibles, R&D is showing a huge investment associated to research of alternative energies. However, this new energy sources have limitations, mainly focused on their intermittent behaviour and differences on energy availability during the day. In the other hand, to overcome the use of fossil fuel, a massive investment is being made in order for increasing the use of electric vehicles in everyday mobility.

With that in mind, the need for innovative energy storage systems, capable of integrating any of the applications mentioned, rises. From the ones already in study, batteries have a natural emphasis for actual incorporating both cases: storage for new energy sources as well as for electric vehicles.

Batteries are composed by a specific number of cells, in series and parallel, stipulating voltage and current values, and directly associated with the system where they are being used. However, as electrochemical elements, the environment in which they are made and the process of their fabrication have a direct influence in each cell, creating slightly differences between them.

So, as a battery is a set of cells, in series and parallel, it is crucial that all of the cells are charged, or discharged, respecting its limits. It can be concluded that, in a string of cells, the cell with the lowest charge will be the one imposing discharge time. By the same way the cell with the highest charge will be the one responsible for charge time.

This shows that, because of unequally cell charge, battery behaviour is limited, both in charge and discharge times, by one single cell capacity.

So, the possibility to compensate cell charge differences by the use of an equalization system is a problem worth of investigation and with a more or less complex solution.

For that reason, the introduction of balancing systems, as an integrant part of a battery management system, is becoming a current practice. This has driven the creation of innovative topologies focused on this main goal: balance charge of a different set of cells composing a single battery.

This equalization process can be done passively, when it is done by dissipating energy through resistances, or actively, when the energy is transferred between cells using switches and non-dissipating elements as capacitors or inductors.

This dissertation focuses on the study of active balancing techniques, as well as the analysis and design of an innovative system, based on a resonant LC series circuit, to promote energy transfer between cells.

Agradecimentos

No decorrer desta dissertação muitos foram os intervenientes que me ajudaram a chegar até aqui e que, acima de tudo, enaltecera a minha motivação em momentos menos bons.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, o prof. Dr. Armando Luis de Sousa Araújo pela disponibilidade e acessibilidade que demonstrou ao longo deste semestre. Em especial relembro os momentos em que me ajudou a ultrapassar alguns dos obstáculos que surgiram demovendo-me de algumas descrenças.

Em segundo lugar gostaria de agradecer ao Daniel pela paciência tão grande que lhe exigi, pelos conselhos que me deu e pela confiança que demonstrou em mim. Ao Agostinho e ao Abel por terem perdido algum do seu tempo comigo e especialmente por terem demonstrado sempre essa disponibilidade.

Depois agradeço aos mesmos amigos!

À Ana Zé e ao João por serem o meu porto seguro e por me terem arrancado um sorriso em dias que mais ninguém conseguiria!

À Sónia, ao Pacheco, à Joana e ao Daniel pelo bom ambiente de trabalho criado e pelo especial companheirismo demonstrado nesta fase do curso.

À Marta, à Leonor e ao Filipe por garantirem a convivência aos almoços, lanches e jantares e por mais uma vez, demonstrarem interesse no meu trajeto!

Por fim mas não menos importante, agradeço aos meus pais e aos meus irmãos, por aguentarem as más caras da fase final e essencialmente por serem eles os principais responsáveis por ter chegado até aqui.

Maria Mafalda Fernandes Machado

*“Na noite onde todos estamos, o sábio esbarra com a parede,
enquanto o ignorante fica tranquilamente no meio do quarto.”*

Anatole France

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivos	3
1.3	Metodologia	3
1.4	Estrutura da Dissertação	4
2	Estado de arte	7
2.1	Acumuladores	7
2.1.1	Baterias	8
2.1.1.1	Baterias de íons de Lítio	9
2.1.2	Modelos	11
2.2	Sistemas de Gestão de Baterias	11
2.3	Sistemas de Balanceamento	12
2.3.1	Métodos Passivos	14
2.3.2	Métodos Ativos	15
2.3.2.1	Sistemas baseados em Condensadores	16
2.3.2.2	Sistemas baseados em Bobinas	17
2.3.2.3	Sistemas baseados em Conversores	19
2.4	Conclusão	22
3	Circuitos Ressonantes	25
3.1	Circuito LC ideal	26
3.2	Circuito LC não ideal	28
3.3	Conclusão	30
4	Sistema de Balanceamento	31
4.1	Requisitos	31
4.2	Modelação	32
4.2.1	Esquemático	32
4.2.1.1	Duas células em série	32
4.2.1.2	Três células em série	33
4.2.1.3	Seis células em série	34
4.2.1.4	Análise Comparativa	35
4.2.2	Parametrização	36
4.3	Modos de Funcionamento	38
4.4	Conclusão	39

5	Algoritmos de Controle	41
5.1	Malha aberta	42
5.2	Malha fechada	44
5.3	Conclusão	45
6	Análise Computacional e Resultados	47
6.1	Regime permanente	47
6.1.1	Duas células	47
6.1.1.1	Duas células - ideal	48
6.1.1.2	Duas células - não ideal	49
6.1.2	Três células	55
6.1.3	Seis células	57
6.2	Descarga	61
6.2.1	Três células	61
6.2.2	Seis células	62
6.3	Carregamento	63
6.3.1	Três células	64
6.3.2	Seis células	64
6.4	Conclusão	66
7	Ensaio prático	69
7.1	Diagrama de blocos	69
7.2	Resultados	70
7.3	Conclusão	77
8	Conclusão e trabalhos futuros	79
8.1	Conclusão	79
8.2	Trabalhos Futuros	80
	Referências	83

Lista de Figuras

1.1	Representação esquemática da metodologia adotada	4
2.1	Esquema típico de uma bateria	8
2.2	Evolução das células de íões de lítio em função da sua aplicação	10
2.3	Processo eletroquímico das células de íões de Lítio	10
2.4	Modelos Elétricos equivalentes de uma bateria	11
2.5	Principais Funcionalidades de um sistema de gestão de baterias	12
2.6	Sistema de bateria modular	13
2.7	Topologias de Balanceamento categorizadas segundo principais intervenientes . .	14
2.8	Topologia balanceamento resistivo	15
2.9	Topologia <i>Switched capacitor</i>	16
2.10	Topologia <i>Double-Tired Switched capacitor</i>	17
2.11	Topologia <i>Single switched capacitor</i>	17
2.12	Topologia <i>Single inductor</i>	18
2.13	Topologia <i>Single Winding</i>	19
2.14	Topologia <i>Multiple Winding</i>	19
2.15	Topologia <i>Cûk Converter</i>	20
2.16	Topologia <i>Buck/Boost Converter</i>	20
2.17	Topologia <i>Flyback Converter</i>	21
2.18	Topologia <i>Quasi-Resonant Converter</i>	21
2.19	Circuitos equivalentes de armazenamento e fornecimento de energia	22
3.1	Braço ressonante	26
3.2	Formas de onda da tensão no condensador (V_{C1} , a azul) e corrente na bobina (i_L , a vermelho)	27
3.3	Resposta oscilatória face a diferentes coeficientes de amortecimento	28
3.4	Formas de onda da tensão no condensador (V_{C1}) e corrente na bobina (i_L) num circuito RLC	29
4.1	Esquema do sistema de balanceamento para duas células em série	32
4.2	Esquema do sistema de balanceamento para três células em série	33
4.3	Esquema do sistema de balanceamento para seis células em série	34
4.4	Esquema de montagem de dois transístores em anti-série	35
4.5	Três modos de funcionamento para um conjunto de duas células em série	38
5.1	Sinais de comando	43
5.2	Analogia das hipóteses de transferência de energia	44
5.3	Algoritmo proposto para um controlo otimizado	45

6.1	Resultado da simulação do circuito de balanceamento ideal para duas células . . .	48
6.2	Tensão no condensador (vermelho) e corrente na bobina(azul)- ideal	49
6.3	Resultado da simulação do circuito de balanceamento não ideal para duas células	50
6.4	Tensão no condensador (vermelho) e corrente na bobina(azul)- não ideal	51
6.5	Resultado da simulação do circuito de balanceamento não ideal para duas células com algoritmo <i>pack-to-cell</i> - duty 20%/70%	52
6.6	Corrente e Tensão em momentos de variação do <i>duty-cycle</i>	53
6.7	Resultado da simulação do circuito de balanceamento não ideal para duas células com algoritmo <i>pack-to-cell</i> - dutys variáveis	54
6.8	Corrente e Tensão em momentos de variação do <i>duty-cycle</i>	55
6.9	Resultados da simulação de três sistemas de balanceamento distintos em steady- state, para variação máxima de 1V	56
6.10	Resultados da simulação do circuito de três células em série ideal e não ideal . .	57
6.11	Resultado da simulação do circuito de balanceamento para seis células aplicando o Algoritmo 1	58
6.12	Tensão no condensador aplicando Algoritmo 1	59
6.13	Resultado da simulação do circuito de balanceamento para seis células	60
6.14	Resultado da simulação do circuito de balanceamento para seis células aplicando o esquema da Figura 4.2	61
6.15	Descarga de uma bateria de três células sob efeito do sistema de balanceamento .	62
6.16	Descarga de uma bateria de três células não balanceada	62
6.17	Tensão das seis células em série sujeitas a uma corrente de descarga de 1 A . . .	63
6.18	Resultado da simulação do circuito de balanceamento para três células - 1A cor- rente de carregamento	64
6.19	Resultado da simulação do circuito de balanceamento para seis células - 1A cor- rente de carregamento	65
6.20	Ampliação da zona marcada na Figura 6.19	65
7.1	Diagrama de blocos ilustrativo da montagem efetuada	69
7.2	Exemplo dos sinais de comando responsáveis por comandar os transístores 1 e 3, e 2 e 4 - (correspondentes ao TESTE 2)	70
7.3	Confronto dos resultados computacionais (a) e práticos (b) relativos à tensão das duas células sob efeito do circuito de balanceamento - TESTE 1	71
7.4	Confronto dos resultados computacionais (a) e práticos (b) relativos à tensão aos terminais do condensador auxiliar do ramo LC - TESTE 1	72
7.5	Confronto dos resultados computacionais (a) e práticos (b) relativos à corrente da bobina pertencente ao ramo LC - TESTE 1	73
7.6	Confronto dos resultados computacionais (a) e práticos (b) relativos à tensão e corrente do condensador e bobina, respetivamente - TESTE 1	74
7.7	Confronto entre a dinâmica de equalização das tensões das células (C_{cell1} e C_{cell2}) e a tensão aos terminais do condensador auxiliar (a) e entre tensão e corrente em C e L, respetivamente (b) - TESTE 2	75
7.8	Confronto entre a dinâmica de equalização das tensões das células (C_{cell1} e C_{cell2}) e a tensão aos terminais do condensador auxiliar (a) e entre tensão e corrente em C e L, respetivamente (b) - TESTE 3	76
7.9	Resultado da equalização quando se aumenta a capacidade dos condensadores - TESTE 4	77

Lista de Tabelas

2.1	Baterias em comparação	9
2.2	Comparação quantitativa e qualitativa dos métodos de balanceamento abordados .	23
4.1	Três esquemas propostos sob comparação quantitativa e qualitativa, com n igual ao número de células envolvidas	35
4.2	Valores de Frequência ressonante versus diferentes valores de L e C	36
4.3	Especificação dos transístores a ligar para conectar o ramo LC a cada célula no esquema da Figura 4.3	38
6.1	Valores de duty-cycle usados na simulação	54
6.2	Comparação entre os métodos simulados no paper citado e o sistema projetado .	56
6.3	Análise comparativa dos resultados para os três esquemas	67
7.1	Dados relativos aos resultados experimentais	70

Abreviaturas e Símbolos

BMS	Battery Management System
CVL	Charge Voltage Limit
DVL	Discharge Voltage Limit
EV	Electric Vehicle
I&D	Investigação e Desenvolvimento
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
P&O	Perturb and Observe
PSIM	PowerSim
PWM	Pulse-width-modulation
SOC	State of Charge
SOH	State of Health
UPS	Uninterruptible Power Supply

Capítulo 1

Introdução

A necessidade de produção energética vasta e barata faz com que a economia mundial, tal e qual como a conhecemos, seja hoje em dia movida, em grande parte, pela exploração de petróleo. Acresce que, para além da produção energética, é a partir da sua combustão em motores associados a veículos que se garante a mobilidade de pessoas e bens. No entanto, as desvantagens que este método acarreta, naturalmente associadas à emissão de gases de efeito de estufa e consequente contribuição para o aquecimento global e poluição atmosférica, têm vindo a impulsionar a procura de fontes de energia alternativas [1].

A mobilidade elétrica e o consequente desenvolvimento de veículos puramente elétricos é, de forma facilmente inteligível, uma das áreas em que atualmente mais se investe na tentativa de se contrariar esta tendência. Assim surge, de forma natural, um compromisso claro entre a mobilidade elétrica e os sistemas fornecedores de energia aí empregues.

Paralelamente, os sistemas de energia renovável têm vindo a apresentar um crescimento notável e significativo, justificado pela produção de *energia verde* como alternativa e pelo potencial que apresentam. No entanto, face ao seu carácter de funcionamento intermitente, é necessário introduzir, a par dos mesmos, sistemas capazes de armazenar energia de forma viável e suficiente para cobrir a procura energética em momentos de produção escassa ou inexistente. Assim, a natural e crescente tendência no sentido de desenvolvimento de sistemas de energia inovadores, que consigam acompanhar o ritmo do desenvolvimento das aplicações que os exigem, impulsiona cada vez mais a I&D nesta temática.

As baterias são atualmente os acumuladores de energia cujas características melhor permitem a sua aplicação em veículos elétricos e sistemas de energia renovável. A família das baterias é vasta e a escolha de uma tecnologia em detrimento de outra é um exercício pouco trivial. No entanto, este é obrigatório, em qualquer projeto, no sentido de garantir que as especificações da bateria escolhida garantem, à partida, o exigido pelo processo que as utiliza [2].

As baterias usadas nesta dissertação são elementos eletroquímicos cujas reações internas permitem um funcionamento bidirecional e uma fácil transição entre o processo de transformação de energia química em elétrica, isto é, são baterias recarregáveis. Como é conhecido, as baterias

são conjuntos de células individuais agrupadas em séries e paralelos de forma a garantir as exigências em tensão e corrente impostas pela aplicação. Inicialmente as baterias eram consideradas elementos compactos e eram por isso desprezados quaisquer defeitos ou diferenças nas células que as constituíam. Rapidamente se tornou claro que seria fundamental tratar a bateria como um conjunto e monitorizar as características de cada célula individualmente. A manutenção da uniformidade da bateria enquanto conjunto é um fator crítico no desempenho da mesma [3]. Por outro lado, as células são elementos que, devido a fatores associados ao processo de manufactura, apresentam diferenças entre si [4]

As baterias da família dos iões de Lítio estão atualmente em voga pelas suas características vantajosas face às anteriormente empregues a sistemas cuja portabilidade é indispensável. No entanto, para tirar o máximo proveito da capacidade de uma bateria é necessário garantir que cada célula constituinte da mesma tem o mesmo estado de carga (SOC). O estado de carga de uma bateria é um parâmetro estimado a partir de valores de tensão e corrente da mesma. Esta variável é expressa em percentagem e representa a relação entre a capacidade atual de uma bateria e a sua capacidade no final de um ciclo completo de carga. Os métodos aplicados para esta estimação constituem por si só um tema pertinente e complexo de investigação [5].

Desta forma surgem sistemas de gestão associados diretamente à monitorização e controlo de uma bateria. A este tipo de sistemas chama-se Sistema de Gestão de Baterias, vulgarmente denominado por BMS. Faz parte de um BMS típico um subsistema responsável por estimar o estado de carga de uma bateria e outro subsistema responsável por balancear o estado de carga das baterias. Assim, maximiza-se a sua eficiência e garantem-se os limites de carga e descarga respetivos [6].

Deste modo é intenção desta dissertação desenvolver um sistema capaz de promover a equalização de um conjunto de células de uma bateria através de um circuito de balanceamento não dissipativo.

1.1 Motivação

A motivação desta dissertação surge da necessidade acrescida que assenta sobre o estudo de sistemas de baterias sustentáveis e aptos a funcionar em perfeita sintonia com o sistema em que estão inseridas o que faz com que a I&D nesta área seja uma aposta constante, cada vez mais fundamentada. Hoje em dia, do exposto, assiste-se a grande atividade de investigação no que concerne às diferentes técnicas e métodos associados a sistemas de balanceamento. Assim, ao longo desta dissertação, apresenta-se um sistema de balanceamento associado ao equilíbrio do estado de carga de cada elemento individual da bateria com o propósito de aumentar o desempenho da mesma. Nesta dissertação o equilíbrio é realizado em função da tensão de cada célula.

O balanceamento pode ser feito recorrendo a diferentes métodos que são normalmente agrupados em métodos passivos e métodos ativos.

Os primeiros realizam o equilíbrio a partir do princípio de dissipação resistiva de energia nas células. Deste modo a sua aplicação impõe algumas restrições embora, por outro lado, assegure algumas vantagens que serão mais tarde abordadas.

Os métodos ativos, pelo contrário, focam-se na transferência de energia entre as células da bateria através de um elemento intermédio capaz de armazenar e fornecer energia e, assim, equilibrar as tensões do conjunto sem perda energética por dissipação. Embora vantajosos, em termos energéticos, estes métodos acartam também desvantagens essencialmente tendo em conta a sua complexidade.

É motivação central desta dissertação desenvolver e analisar um sistema capaz de minimizar as desvantagens normalmente associadas aos métodos ativos e por outro lado maximizar vantagens diretamente associadas com os níveis de corrente e tensão atingidos face a tempos de equalização menores.

1.2 Objetivos

Enquanto projeto semestral, esta dissertação terá objetivos graduais e complementares que visarão o cumprimento de todos de forma a concretizar o seu propósito central.

Essencialmente esta dissertação objetiva, numa fase inicial o estudo e análise das características principais associadas a baterias de íões de lítio e das topologias de balanceamento existentes.

Nesse sentido será realizado um levantamento bibliográfico focado nestas temáticas. Posteriormente será efetuada uma análise comparativa, tanto quantitativa como qualitativa, dos métodos considerados mais relevantes ou com maior ênfase no âmbito da aplicação. Esta análise permitirá partir para a escolha de uma topologia a analisar e desenvolver em detalhe. Estes serão os principais tópicos que a revisão bibliográfica desta dissertação documenta.

Posteriormente, e em termos de conceção, este projeto será alvo de uma fase de estudo pormenorizado focado na solução escolhida a par de uma análise de funcionamento computacional por simulações que visem a sua validação.

Por fim, será feita uma implementação prática que fundamente aquilo que as simulações computacionais ditaram, e que permita assim validar o sistema projetado.

1.3 Metodologia

Um projeto complexo deve sujeitar-se a um planeamento a longo e a curto prazo que deverá ser constantemente atualizado face aos percalços encontrados e/ou ultrapassados. Assim o esquema da Figura 1.1 pretende mostrar as principais fases que compuseram o trabalho descrito ao longo desta dissertação.

As três principais etapas definidas resumem os pontos cruciais do projeto realizado e os diferentes objetivos, métodos e ferramentas aplicados a cada caso.

A primeira fase foca-se no estudo abrangente do tema e de todos os tópicos considerados pertinentes na concretização dos propósitos desta dissertação.

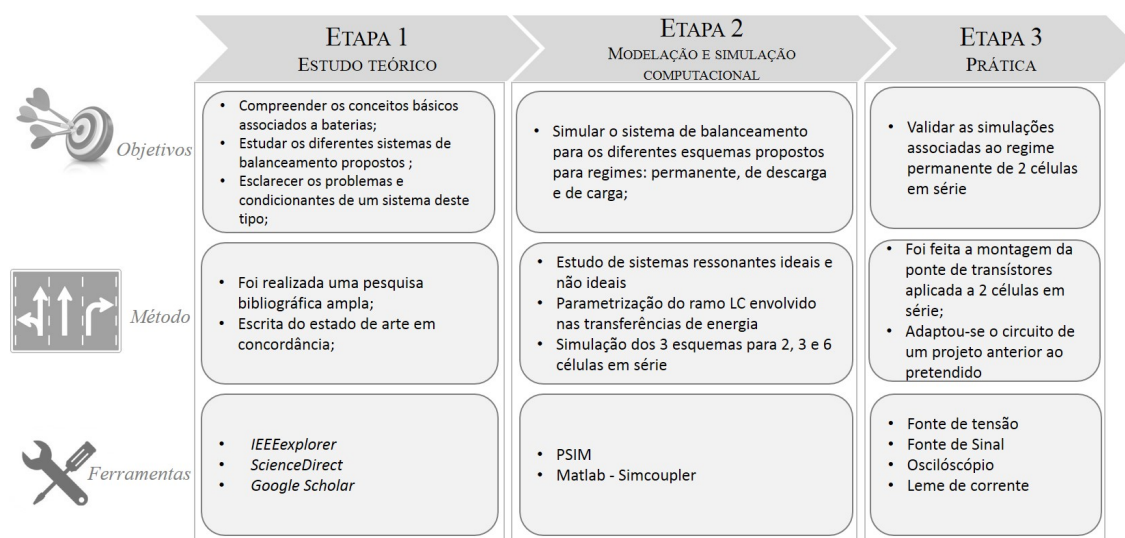


Figura 1.1: Representação esquemática da metodologia adotada

A segunda fase, classificada como a mais extensa, visou essencialmente o projeto do sistema específico e a posterior validação e análise via simulação computacional.

Por fim, mas não menos importante, surge a fase de implementação prática que, a par da fase anterior, permitiu validar as simulações e a fiabilidade do sistema projetado face aos objetivos propostos e requisitos por ele impostos.

1.4 Estrutura da Dissertação

Do exposto, esta dissertação será dividida em oito capítulos centrados nos principais temas que acarretam a base teórica fundamental de sistemas de balanceamento de baterias e posteriormente a fase de apresentação de resultados, análise e conclusões diretamente relacionadas com o projeto.

O primeiro capítulo, no qual este tópico se inclui, terá a função de apresentar ao leitor o foco do trabalho que se pretende na dissertação e, consequentemente, esclarecer essencialmente o seu âmbito, motivação, objetivos e metodologia adotada.

No segundo capítulo apresenta-se o estado de arte. Neste serão abordados os diferentes tipos de acumuladores de energia em função das suas características principais e fundamentais aquando da sua seleção. Será naturalmente dada especial atenção às baterias, especificamente às da família de iões de lítio. Ainda neste capítulo são apresentados os métodos e topologias capazes de promover o balanceamento entre células e assim concretizar aquilo que sistemas deste tipo objetivam.

O terceiro capítulo faz um estudo breve de sistemas ressonantes típicos apresentando os conceitos básicos do seu funcionamento ideal e em prol da introdução de não idealidades.

O quarto capítulo apresenta a modelação do sistema de balanceamento desenvolvido introduzindo os seus requisitos, a sua parametrização e as esquemáticas propostas.

O quinto capítulo pretende introduzir a problemática dos algoritmos de controlo diretamente relacionados com a transferência de energia entre células e apresenta o algoritmo empregue nas simulações computacionais efetuadas.

O sexto capítulo foca-se na apresentação dos resultados para três estados de funcionamento distintos confrontando as esquemáticas propostas no capítulo quatro.

O sétimo capítulo apresenta os resultados obtidos nos ensaios experimentais e pretende ao mesmo tempo validar o ambiente de simulação e por outro lado comparar a resposta do sistema em situações de diferente parametrização.

O oitavo e último capítulo surge como conclusão central de todo o trabalho desenvolvido enumerando os trabalhos futuros que poderão derivar do até agora desenvolvido.

Capítulo 2

Estado de arte

O presente capítulo apresenta uma revisão da informação entendida como pertinente no âmbito desta dissertação. Para tal foi realizado um vasto trabalho de pesquisa bibliográfica a fim de garantir a atualidade e fiabilidade dos conceitos em questão.

As características e o comportamento típico de uma determinada bateria impõem as funções que um sistema de gestão de baterias (*BMS*) deverá ter em conta aquando do seu projeto. O balanceamento é parte essencial de um sistema de gestão deste género e deverá, por isso, considerar todas as restrições impostas pela bateria que está destinado a equilibrar. Um estudo dos diferentes tipos de baterias e das suas características fundamentais é portanto parte integral necessária numa dissertação deste tipo. Será dada especial atenção às baterias de íões de lítio.

Assim, a leitura deste capítulo permitirá uma análise crítica das escolhas e objetivos impostos no decorrer desta dissertação

2.1 Acumuladores

O estado atual da economia mundial e das reservas de recursos naturais tem derivado na crescente necessidade em arranjar fontes de energia alternativas. É por isso necessário, como anteriormente exposto, investir, paralelamente, no estudo aprofundado de sistemas capazes de armazenar energia.

Os acumuladores de energia distinguem-se por inúmeras características e restrições obrigatoriamente associadas a cada tipo. A aplicação para a qual se destinam é o motor principal da escolha, estipulando quaisquer exigências e evidenciando a escolha de uma tecnologia em detrimento de outra. Atualmente, os sistemas acumuladores merecedores de maior atenção dividem-se em três categorias distintas: super-condensadores, pilhas de combustível e baterias [7].

Os super-condensadores são, como o próprio nome sugere, condensadores de muito elevada capacidade e, por isso, maior densidade de potência. Como não dependem de efeitos eletroquímicos tornam-se vantajosos tanto no que diz respeito aos ciclos de vida, como a nível de tempos de carga e de descarga. São assim ideais para aplicações que tal exijam, como em casos de travagem

regenerativa ou aceleração [7]. Geralmente surgem como elemento acessório e de apoio a um conjunto de baterias primário, ou empregues em UPS [8].

As pilhas de combustível, do inglês *fuel cells*, são uma tecnologia relativamente recente que se baseia em reações dadas no eletrólito entre um redutor (que constitui o combustível em questão) e um oxidante. Usa-se muitas vezes como combustível, para este tipo de sistemas, o hidrogénio pelas suas características não poluentes e pela elevada densidade energética que ostenta. As pilhas de combustível tornam-se vantajosas essencialmente devido à diminuição de emissões face a eficiências bastante satisfatórias. Negativamente, e por consequência do processo que ordenam, apresentam tempos de respostas relativamente longos.

As baterias, são sistemas eletroquímicos armazenadores de energia, cujo funcionamento resulta essencialmente do contacto entre os dois elétrodos com uma solução eletrolítica, Figura 2.1, responsável por promover as reações redox entre o cátodo e o ânodo e assim produzir energia elétrica.

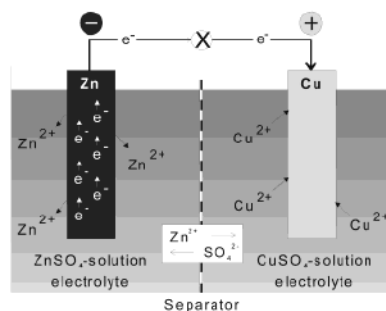


Figura 2.1: Esquema típico de uma bateria [9]

A capacidade de uma bateria é expressa em ampere-hora (Ah). Esta capacidade é o produto entre uma corrente de descarga constante e a duração dessa mesma descarga até ser atingido o nível definido como tensão final de descarga [10]. Existe uma gama variada de baterias com características próprias que as tornam mais ou menos apropriadas à sua utilização, mediante as restrições impostas pelo sistema que estarão responsáveis por alimentar.

2.1.1 Baterias

A maioria das aplicações de baterias exige tensões maiores que aquelas que uma célula individual consegue fornecer [11]. Assim, e no sentido de garantir as exigências de cada sistema particular, uma bateria consiste num conjunto de células agrupadas em série e/ou paralelo de forma a assegurar o compromisso de tensão e corrente característico de cada sistema específico e fazer corresponder a capacidade exigida [12].

A escolha apropriada de um tipo de bateria é também fator chave na fase de conceção de qualquer sistema que as empregue e deverão por isso ser tidos em conta aspetos como a sua capacidade ou como o nível de tensão médio que as mesmas ostentam. Esta escolha pode ser feita em função de vários fatores como: [13]

- **Energia Específica** (Wh/kg) — representa a quantidade de energia capaz de ser armazenada por unidade de massa;
- **Densidade Energética** (Wh/m^3) — representa a quantidade de energia disponível por unidade de volume;
- **Potência Específica** (W/kg) — quantidade de potência entregue pela bateria por unidade de massa (kg) a uma taxa de descarga específica;
- **Ciclos de vida** — corresponde à quantidade de vezes em que uma bateria pode ser carregada e descarregada sem sofrer alterações no seu desempenho de carga e descarga;
- **Custo** — representado normalmente sob a forma de unidade de moeda por kWh ;

No entanto tais fatores não são restritivos nem de certa maneira mandatários existindo, por isso, diferentes comparações e fatores decisivos tidos em conta [2, 7, 9, 14–18].

As famílias mais conhecidas de baterias são: Baterias de Chumbo (*Lead-acid*), Níquel e Lítio (*Lithium*). As primeiras, *Lead-acid*, são as mais antigas e que primeiro contemplaram a capacidade de recarga e são por isso um importante marco na história do desenvolvimento de baterias. Apesar da introdução de novas tecnologias estas continuam a ser muito usadas em detrimento de outras vencendo pelo seu baixo custo. As baterias baseadas em Níquel (Ni-Cd, Ni-Zn, Ni-MH, por exemplo) são uma boa alternativa em termos de densidade energética, ciclos de vida e capacidade de funcionamento em ambientes adversos, aguentando valores de temperatura elevados. No entanto, o seu custo torna-as menos competitivas.

A Tabela 2.1, estruturada a partir de informação presente em [1, 7, 12, 14, 19–21], permite uma comparação direta entre as baterias descritas.

Tabela 2.1: Baterias em comparação

Tipo	Tensão Nominal (V)	Energia Específica (Wh/kg)	Densidade energética (Wh/dm^3)	Potência Específica (W/kg)	Ciclos	Custo
Chumbo	2	30-50	50-80	75	200-1800	baixo
Níquel	1.2-1.65	20-120	45-310	50-1000	1500-3000	elevado
Lithium	3.3-3.8	100-158	200-340	700-1300	3000	elevado

As baterias de íões de lítio, como é possível concluir da análise da Tabela 2.1 erguem-se como uma boa opção, facilmente favorável. Para aplicação tanto em sistemas de energia renováveis como em veículos elétricos estas baterias são as que melhor preenchem os requisitos e que se mostram por isso mais promissoras [14, 20].

2.1.1.1 Baterias de íões de Lítio

As baterias de íões de lítio surgiram por volta do ano de 1960 e entraram em voga no ano de 1990, pela Sony Corporation que primeiro comercializou uma bateria deste tipo [1].

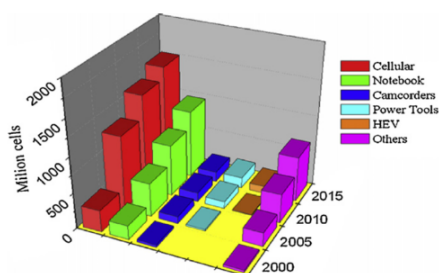


Figura 2.2: Evolução das células de íões de lítio em função da sua aplicação

Foram alvo de grande atenção desde então, uma vez que traziam vantagens significativas tanto a nível quantitativo como a nível qualitativo face às já conhecidas, começando a ser dominantes ao nível das tecnologias portáteis. Hoje em dia começam a ser implementadas em veículos elétricos, Figura 2.2.

A família de baterias de íões de lítio é conhecida por características como: elevada densidade energética (cerca de 4 vezes superior às de *Lead-acid*), níveis de tensão elevados (tipicamente uma célula de íões de lítio é capaz de substituir três de Ni-Cd ou Ni-MH), baixo peso e um ciclo de vida longo. No entanto, a este tipo de baterias é exigido que opere segundo um limite de tensão inferior (DVL) e superior (CVL) [22], o que torna a sua monitorização indispensável. No caso de uma bateria de íões de lítio típica, esses limites correspondem a 40% e 80% do seu estado de carga, respetivamente. O processo de descarga de uma bateria de *Li-ion* dá-se quando íões de lítio (Li^+) se deslocam do ânodo para o cátodo através de um eletrólito orgânico (isto é, não aquoso) [23], Figura 2.3.

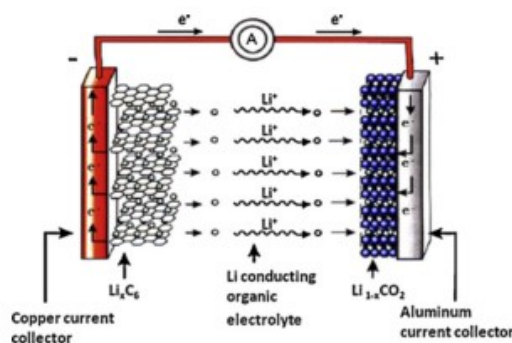


Figura 2.3: Processo eletroquímico das células de íões de Lítio [16]

O desenvolvimento deste tipo de baterias e a criação de novas tecnologias que componham a nova geração visa, na maioria dos casos, a substituição de um dos seus materiais constituintes (cátodo, ânodo ou eletrólito). Existe portanto uma gama diversificada de baterias de íões de lítio. Exemplos de tipos de baterias de íões de lítio são: LiCoO_2 , LiMnO_2 , LiFePO_4 , $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$. Uma análise comparativa destes tipos de baterias pode ser encontrada em [15]. A investigação em

prol da criação de novas baterias de iões de lítio visa essencialmente alcançar níveis de densidade energética e de potência cada vez mais elevados.

2.1.2 Modelos

A nível elétrico e de forma a viabilizar estudos computacionais centrados no funcionamento de uma bateria são adotados modelos elétricos ditos equivalentes. Isto é, uma bateria como elemento eletroquímico apresenta características dinâmicas e estáticas e deverá por isso ser representada por um modelo com estas características, normalmente constituído por um conjunto de resistências, condensadores e fontes de tensão que melhor traduzam o seu comportamento.

Sabe-se que o potencial medido aos terminais de uma determinada bateria não é um fator representativo da sua carga. Essa determinação é feita a partir de uma variável chamada estado de carga (SOC, *state of charge*) que representa a carga restante armazenada numa bateria face à sua capacidade máxima de carga. Assim, e no sentido de melhor simular uma bateria em ambiente computacional, vários modelos foram estudados e estruturados. Atualmente, os mais usados são:

- **Modelo de *Rint*** — fonte de tensão em série com uma resistência;
- **Modelo de *Thevenin*** — face ao modelo de *Rint* é acrescentado em série um ramo RC paralelo;
- **Modelo DP** — face ao modelo de *Thevenin* é acrescentado neste caso mais um ramo RC paralelo em série com o anterior;

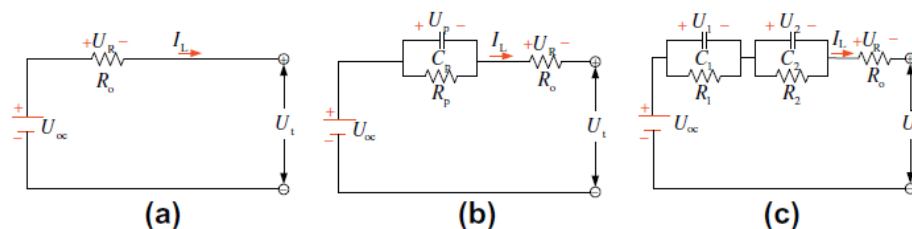


Figura 2.4: Modelos Elétricos equivalentes de uma bateria [24]

Relativamente às características, resistiva e capacitiva, de uma bateria estas irão resultar diretamente dos parâmetros influenciados pelas condições sobre as quais esta opera [17]. No decorrer desta dissertação será aplicado o modelo de *Rint* pela sua simplicidade face aos restantes e uma vez que o estudo de sistemas de balanceamento não tem como objetivo delineado a estimação do estado de carga da bateria sob aplicação.

2.2 Sistemas de Gestão de Baterias

A evolução acentuada que se tem vindo a notar no âmbito das baterias exige, cada vez mais, um sistema de gestão de baterias também ele evoluído. A este sistema faz-se chegar a tarefa

principal de garantir que as baterias correspondem a uma solução segura, viável e com uma boa relação custo/eficiência [6].

Assim, a gestão da bateria parte da sua monitorização e, dependendo da bateria em jogo, são tidas todas as considerações para o seu funcionamento em pleno. Isto é, são garantidos os limites máximos e mínimos de tensão, corrente e temperatura. A uma bateria estão associados dois conceitos principalmente importantes, o seu SOC (*state-of-charge*) e SOH (*state-of-health*). A sua estimação é também função de um sistema de gestão de baterias e pode ser feita de diferentes modos. Uma boa fonte sobre este assunto pode encontrar-se em [25]

A uma bateria corresponde um conjunto de diversas células em série cujas diferenças a nível da sua capacidade comprometem a performance da mesma. Assim, e como resposta a este problema surgem, como parte integrante de um BMS, os sistemas de balanceamento. A este subsistema, como já foi referido, será entregue a função de diminuir a discrepância entre o estado de carga das células que compõem a bateria.

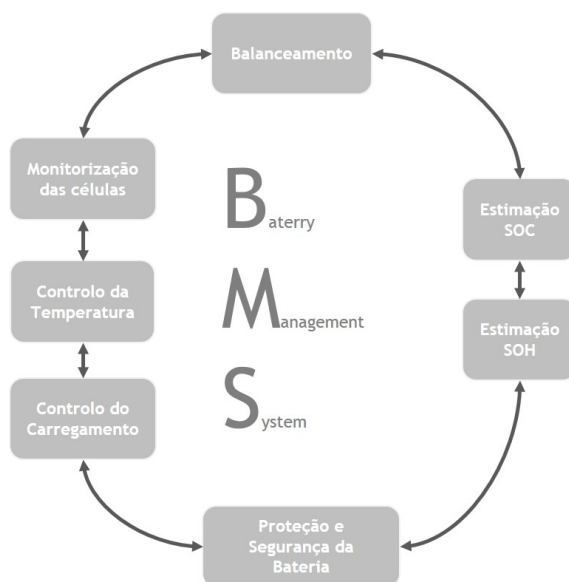


Figura 2.5: Principais Funcionalidades de um sistema de gestão de baterias

A Figura 2.5 representa esquematicamente as principais funcionalidades de um sistema de gestão de baterias. No entanto, deve salientar-se que não é uma caracterização restritiva e muito menos abrangente uma vez que cada subsistema se pode multiplicar em subproblemas traduzindo a verdadeira complexidade associada a esta temática [10, 25].

2.3 Sistemas de Balanceamento

A não uniformidade de uma bateria refere-se ao fenómeno de uma bateria composta por um conjunto de células individuais do mesmo tipo, apresentar diferenças nas suas características [25], (Figura 2.6).

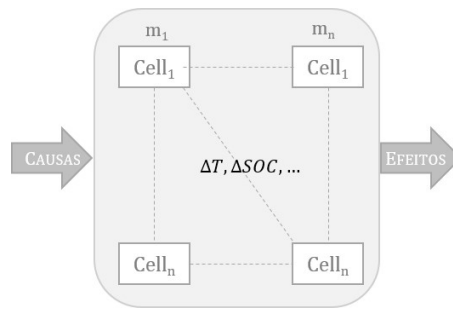


Figura 2.6: Sistema de bateria modular

A necessidade de minimizar a degradação de uma bateria, mantendo a uniformidade entre células, é a motivação central para usar um sistema de controlo cujo propósito é equalizar a carga entre células [3]. O objetivo base da equalização de uma bateria é contrariar o facto de a sua performance ao nível da descarga ser dada pela célula com menor carga e ao nível do carregamento pela célula com maior carga, traduzindo-se na ineficiência da bateria.

As causas destas variações não são claras nem objetivamente definidas para cada caso, mas considera-se que a maioria seja devido a processos de manufatura distintos, ambientes de operação adversos e em resposta a circuitos externos acoplados. Naturalmente, as consequências mais visíveis debruçam-se sob a variação do estado de carga entre células pertencentes a uma mesma bateria assim como a diminuição incontornável da potência e capacidade da mesma [4].

A capacidade de uma bateria constituída por n_s células é dada inicialmente por:

$$C_x = \min\{C_1, C_2, \dots, C_n\} \quad (2.1)$$

Isto é, a célula de menor capacidade ditará a capacidade total da bateria. As técnicas de balanceamento surgem por isso para evitar esta limitação. A intervenção de um sistema deste tipo permitirá que a capacidade da bateria aumente segundo a equação 2.2 de acordo com [26] considerando uma ou mais células com capacidades deterioradas.

$$C = \min \left\{ C_x + I_{xbat} \cdot t \cdot \left(\frac{t_i}{t} - \frac{1}{n_s} \right) \right\}_{i=1 \dots n_s} \quad (2.2)$$

Onde, I_{xbat} corresponde à corrente de balanceamento, t ao tempo de balanceamento total e t_i ao tempo levado pela bateria i .

Sabe-se que a equalização feita em função do estado de carga de cada célula, embora conceitualmente mais complexa, é aquela cujo tento deverá ser maior, por apresentar maior fiabilidade face ao comportamento de auto-descarga de cada célula e por conseguinte de toda a bateria.

Como já foi introduzido no capítulo 1 deste documento os métodos de balanceamento podem ser agrupados em duas categorias principais e claramente distintas: passivos e ativos, também conhecidos por métodos dissipativos e não dissipativos, respetivamente.

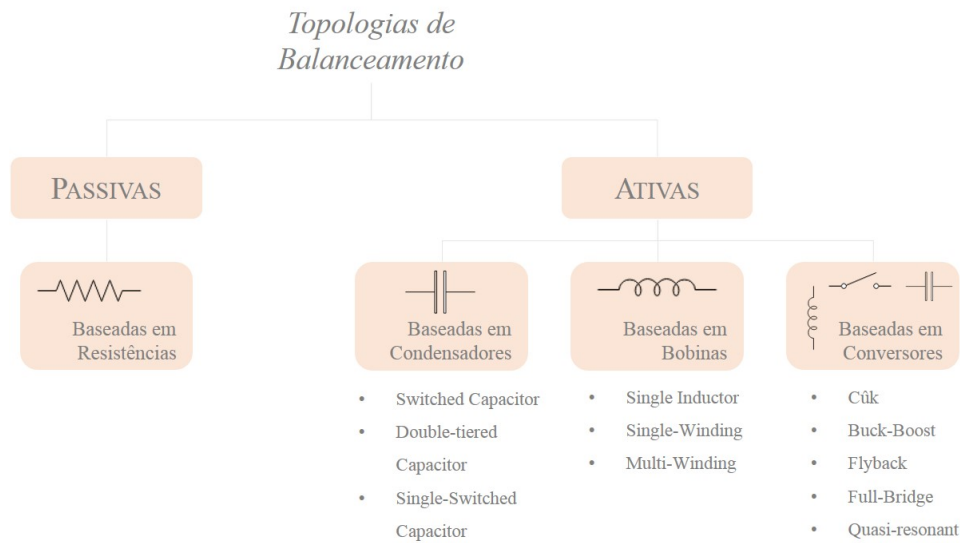


Figura 2.7: Topologias de Balanceamento categorizadas segundo principais intervenientes

Assim, é principal motivação desenvolver um sistema cuja capacidade de balanceamento resulte na maximização da capacidade e do tempo de vida de uma bateria. Particularmente, a introdução de uma técnica de uniformização de carga entre células permite que estas operem dentro dos seus limites de segurança reduzindo as hipóteses de sobrecarga.

É de salientar, e em tom conclusivo, que a variação máxima entre células não será, na maioria dos casos e em momentos de regime permanente, superior a 500mV uma vez que os sistemas de balanceamento atuarão antes que tais condições sejam atingidas.

Já em momentos de carga e descarga as diferenças não serão tão ténues tornando estes casos mais críticos, onde a capacidade de balancear uma bateria é ainda mais importante. No caso da carga por acelerar o processo e permitir que todas as células sejam carregadas para perto do seu valor máximo. No caso da descarga o balanceamento é visivelmente influente por não limitar a capacidade da bateria à célula mais fraca e assim otimizar o aproveitamento de toda a energia.

2.3.1 Métodos Passivos

Os métodos passivos, como o próprio nome sugere, são técnicas dissipativas que não envolvem normalmente qualquer tipo de controlo complexo e que restringem a carga de todas as células àquela de menor carga no momento. Especificamente, esta técnica tira partido de uma série de resistências colocadas em paralelo com cada célula (Figura 2.8) obrigando a corrente a circular gastando a energia da célula com maior carga até que esta atinja os mesmos valores daquela de valor menor.

Esta topologia é uma alternativa barata e simples mas, devido à sua configuração, está continuamente a dissipar energia sob a forma de calor [28]. Deste modo é uma técnica pouco eficiente que não pode ser usada em todo o tipo de baterias, como é o caso das baterias de iões de Lítio

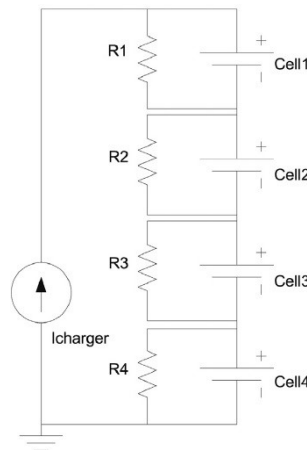


Figura 2.8: Topologia balanceamento resistivo [27]

pois não assegura os limites de funcionamento seguro. A topologia acima pode sofrer derivações (como a introdução de interruptores de caminho) e contornar alguns problemas, relativos aos limites que deverão ser assegurados, ao permitir que apenas determinada célula descarregue. Uma vez que este estudo se debruça sob a equalização ativa de baterias de íões de lítio, estes métodos não serão alvo de estudo minucioso e detalhado.

2.3.2 Métodos Ativos

Os métodos de balanceamento denominados ativos são aqueles que não se restringem a dissipar energia mas que, por outro lado, permitem redirecionar a energia acima do limite estipulado das células com maior carga para as de menor. Durante o carregamento o sistema de balanceamento deverá ter em conta que a célula mais carregada não deverá atingir valores de estado de carga superiores àqueles estipulados como seguros. Já durante processos de descarga o nível mínimo deverá, também ele, ser mantido a fim de cumprir os requisitos estipulados para o bom funcionamento de uma bateria. Esta transferência de energia é feita recorrendo a um *buffer*, ou seja, a um elemento intermediário que armazene energia de forma temporária e que funcione em ambos os sentidos, isto é, como fonte de energia ou como armazenador.

As topologias pertencentes a esta categoria podem, também elas, ser agrupadas entre si, essencialmente em virtude do componente/circuito que utilizam como intermediário. Normalmente são criadas três subcategorias de métodos ativos: baseadas em condensadores, baseadas em bobinas e baseadas em conversores de energia [22,27–30]. Estes métodos surgem como uma alternativa mais eficiente embora demonstrem maior complexidade de controlo e dificuldade de implementação. Outra característica associada a este tipo de circuitos de balanceamento assenta na possibilidade de decidir como será feita a transferência de energia, isto é, se de uma célula para outra, ou de um conjunto de células para uma só ou vice-versa. As inúmeras possibilidades levam a que tal se torne num problema de escalonamento muito interessante.

2.3.2.1 Sistemas baseados em Condensadores

O agrupamento destas topologias sob a forma de uma só deriva das vantagens em categorizar as mesmas por um princípio de funcionamento comum, no que diz respeito à maneira como a energia é armazenada e consequentemente transferida. Naturalmente, os condensadores como elementos base de qualquer tipo de circuitos funcionam sob princípios convenientemente conhecidos o que permite prever, em todos os casos, a consequência ou resultado da sua intervenção. Estas topologias podem incluir desde um condensador para cada conjunto de duas células, até apenas um para todas. A interligação entre o ou os condensadores e a bateria define o funcionamento do método de balanceamento respetivo.

Switched Capacitor O primeiro método rege-se de certa forma da mesma maneira que o método resistivo ilustrado na Figura 2.8. Neste caso teremos elementos capacitivos e interruptores o que resultará no esquemático da Figura 2.9. Da Figura 2.9 pode concluir-se que as células

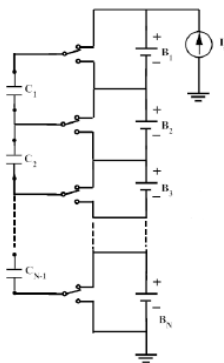


Figura 2.9: Topologia *Switched capacitor* [27]

poderão apenas transferir energia entre aquelas que lhe são adjacentes tornando o processo despretensiosamente demorado. Por outro lado, este tipo de topologia não requer nenhum controlo exigente em malha fechada uma vez que as comutações funcionarão em uníssono, isto é, todos os interruptores serão ligados na sua posição superior ou inferior. Note-se que, na realidade, um interruptor bidirecional corresponde ao uso de dois semicondutores seleccionados para o efeito da comutação, ou de um elemento de um relé.

Double-tiered Capacitor Derivando da topologia *Switched-Capacitor* surge uma topologia que, a par do esquemático da Figura 2.9, coloca um condensador em paralelo com cada conjunto de dois [31]. Denomina-se *Double-tiered switched capacitor* por analogia dos dois níveis de condensadores a uma camada ou fileira, Figura 2.10. A vantagem deste segundo método face àquele do qual deriva centra-se na diminuição do tempo de equalização para cerca de metade e no aumento de eficiência.

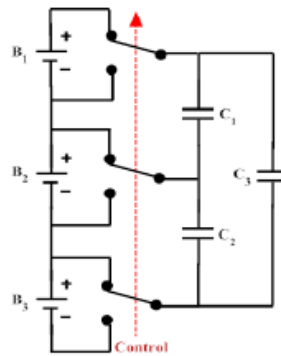


Figura 2.10: Topologia *Double-Tired Switched capacitor* [27]

Single-Switched Capacitor Outra topologia merecedora de atenção denomina-se *Single Switched Capacitor* (*flying capacitor*, [22]) por usar apenas um condensador para promover a transferência de energia entre todas as células da bateria.

A principal diferença a destacar entre esta topologia e as anteriormente citadas é o facto de esta permitir a transferência de energia entre quaisquer células, sem constranger o método a uma transferência gradual. Por outro lado, o método de controlo a ela associado é mais complexo e

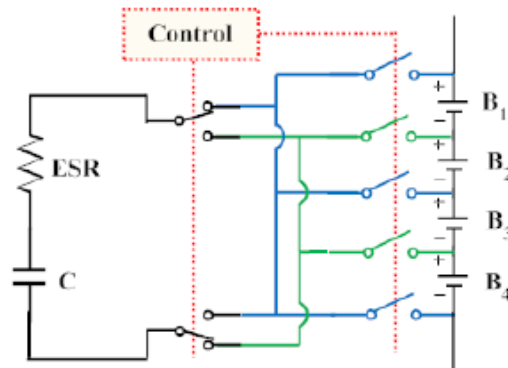


Figura 2.11: Topologia *Single switched capacitor* [27]

exige níveis de implementação diferentes uma vez que a comutação será promovida em função dos valores de SOC (ou tensão) de cada uma das células que compõem a bateria, sob efeito do balanceador. Esta topologia é analisada e estudada em maior detalhe em [29].

2.3.2.2 Sistemas baseados em Bobinas

Estas topologias, caracterizadas por transferir energia através de bobinas ou transformadores. Tais topologias são vantajosas essencialmente no que diz respeito à velocidade de balanceamento.

Tornam-se desfavoráveis devido ao elevado custo, às perdas magnéticas associadas aos transformadores e à necessidade de incorporar condensadores para filtrar as altas frequências de comutação. De forma semelhante ao descrito para as topologias do ponto anterior, existem diferentes métodos de balancear uma bateria recorrendo a bobinas: *Single/Multi Inductor*, *Single-Windings Transformer* e a *Multi-Windings Transformer*.

Single Inductor O funcionamento desta topologia, Figura 2.12, é análogo àquela que recorre a apenas um condensador como mediador de energia. Já a topologia *Multi Inductor* assemelha-se à *Switched Capacitor* pela restrição de transferência de energia apenas entre células adjacentes.

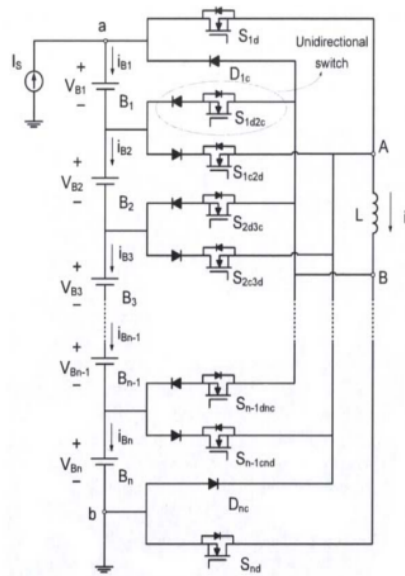
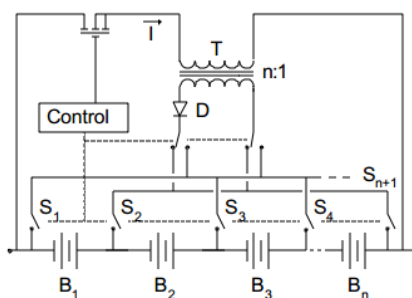
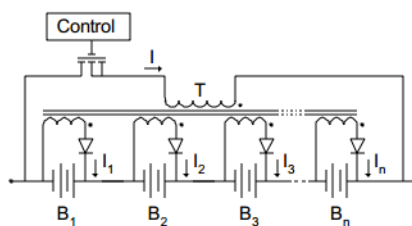


Figura 2.12: Topologia *Single inductor* [32]

No entanto ambas as topologias diferenciam-se pela maior velocidade de balanceamento mas menor eficiência. Tal advém da corrente de balanceamento superior, que terá oportunidade de ser controlada a partir de um dimensionamento cuidadoso do componente indutivo aqui em questão. Uma análise mais profunda desta topologia é feita em [32].

Single Winding e Multi-Winding Transformer As topologias seguintes distinguem-se por recorrerem às características básicas e ao princípio de funcionamento de um transformador típico. Naturalmente motivam a transferência de energia tirando proveito da razão de transformação ligada ao mesmo. Na topologia exibida pela Figura 2.13, a saída no secundário é retificada e entregue a uma das células da bateria. Esta pode funcionar segundo duas técnicas distintas de transferência de energia: "*pack-to-cell*", onde a energia é transferida da bateria para a célula de menor carga e "*cell-to-pack*", onde a energia da célula de maior carga é transferida para a bateria.

Relativamente à *Multi-Winding*, Figura 2.14, a principal vantagem desta configuração é a possibilidade de balancear desequilíbrios de tensão, relativamente pequenos, rapidamente.

Figura 2.13: Topologia *Single Winding* [30]Figura 2.14: Topologia *Multiple Winding* [30]

De ambos os métodos surgem desvantagens focalizadas nas perdas magnéticas e na saturação dos comutadores. O dimensionamento preciso do transformador é indispensável para garantir a manutenção dos níveis seguros de funcionamento de cada uma das células. Por esse motivo, representa uma desvantagem para estas topologias pela discrepância que surgirá devido ao envelhecimento das células e à baixa modularidade que têm associada [33].

2.3.2.3 Sistemas baseados em Conversores

A introdução desta categoria surge da combinação de elementos capacitivos e indutivos e pela recorrência a esquemas vulgarmente conhecidos. Daí são criadas novas técnicas que se baseiam no funcionamento de conversores, tais como: *Cûk*, *Buck-Boost*, *Flyback*, *Full-Bridge* e *Quasi-Resonant*. As principais topologias, atualmente sob revisão bibliográfica, seguem os princípios básicos de conversores de energia DC/DC, com a particularidade de garantirem uma característica bidirecional promotora de ambas, carga e descarga.

Sabe-se que, devido ao número de componentes, ao custo e ao nível de exigência de controlo não são muito usados e a sua pertinência terá de ser bem avaliada a fim de se tornar compensatória a sua utilização.

Cûk Converter Recorrendo a este método, a transferência de energia é garantida por um condensador, duas bobinas e dois transístores (Figura 2.15). O fator chave desta topologia assenta no carregamento do condensador a partir de uma fonte de corrente. Esta característica contorna as limitações de corrente impostas por elementos resistivos e a sua consequente perda associada.

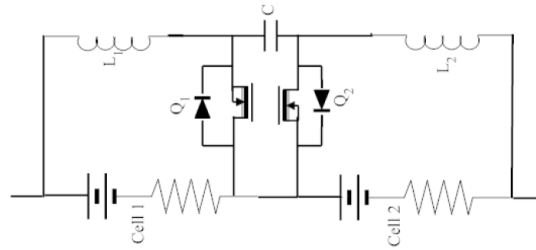


Figura 2.15: Topologia *Câk Converter* [28]

O sentido da corrente nas respectivas bobinas dita o trajeto da energia e é decidido em função do estado ON ou OFF dos transístores.

Buck/Boost Converter *Buck-Boost converter* é um tipo de conversor justificadamente utilizado em sistemas de balanceamento de células. Trata-se de um conversor DC/DC que transita entre os dois modos de funcionamento, abaixador e elevador, de acordo com aquilo que o sistema necessita e o controlo impõe.

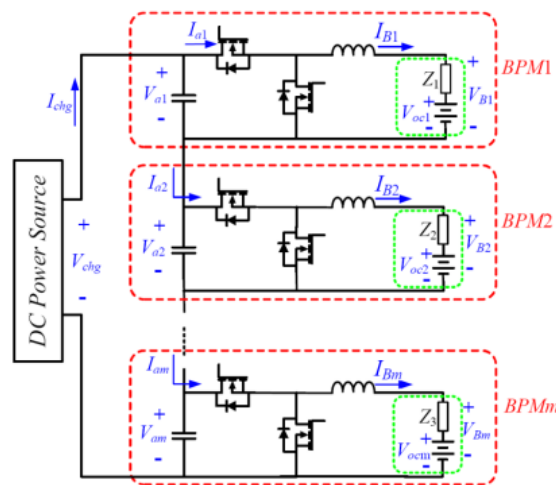


Figura 2.16: Topologia *Buck/Boost Converter* [28]

Embora o esquemático da Figura 2.16 remeta para a utilização de um destes conversores para cada célula de bateria, a utilização de um só como único promotor da equalização não é deixada de lado [22] uma vez que, embora acresça na complexidade de controlo, se traduza em vantagens a nível de eficácia, custo e implementação. Estes conversores são também propostos como elemento auxiliar a outro sistema de balanceamento [29]. Assim, esta topologia permite, e tirando partido da sua característica bidirecional, funcionar sob diferentes métodos de balanceamento: *cell-to-cell* e *pack-to-cell*.

Flyback Converter A topologia que se segue, *flyback*, funciona de forma semelhante a um conversor *Buck-Boost*, mas supera-o pela sua característica isolada, em sistemas que tal demandem, Figura 2.17. Contudo, a relação de espiras que o tipo de transformador empregue necessita torna este método pouco interessante, a nível de custos e perdas magnéticas associadas.

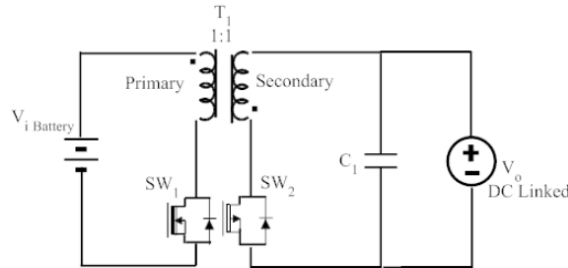


Figura 2.17: Topologia *Flyback Converter* [28]

É usado uma vez mais, um conversor deste tipo para cada célula o que se torna facilmente inconveniente face àquilo que mais se pretende, maximização da razão eficiência/custo.

Quasi-Resonant Converter Este tipo de conversores de energia tem como principal objetivo tirar proveito da comutação em valores de corrente ou tensão zero (ZCQR ou ZVQR), usando para tal elementos L e C que garantam ao sistema características ressonantes.

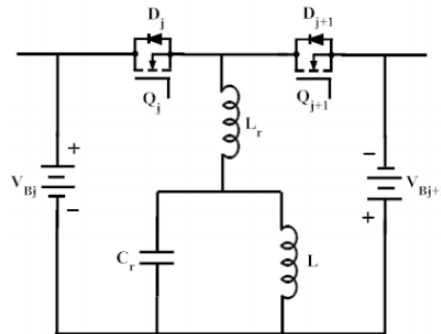


Figura 2.18: Topologia *Quasi-Resonant Converter* [27]

O principal benefício deste método, Figura 2.18, traduz-se na elevada eficiência a par da redução das perdas de comutação. Naturalmente, o seu custo acrescido e complexidade de controlo desincentivam a sua aplicação.

2.4 Conclusão

Tendo em conta aquilo que esta dissertação objetiva e o exposto ao longo deste capítulo, torna-se clara a condição imprevisível que uma bateria acarreta face ao seu tipo e, dentro do mesmo género, às suas características resistivas e capacitivas. A consideração destas características aquando a escolha e projeto de um sistema de balanceamento é portanto indispensável.

O comportamento de baterias eletroquímicas pode ser expresso seguindo diferentes modelos. Aquele aqui adotado remete para o correspondente elétrico da mesma. Das baterias sob análise, *Lead-Acid*, Níquel e Lítio, e depois de uma análise comparativa, concluiu-se que as mais vantajosas a serem empregues em veículos de tração elétrica assim como em sistema de energia renovável correspondem às baterias de iões de lítio. Tal deve-se ao facto de apresentarem maior densidade energética, elevada eficiência, baixo peso e um ciclo de vida satisfatoriamente longo. Por outro lado, e tendo em conta as condições de operação em que as baterias são obrigadas a funcionar, as discrepâncias ao nível de cada uma em função das suas características internas, traduzir-se-á na modificação de fatores como capacidade, estado de carga e tempo de vida de uma ou várias células que as componham. Tal remete para a diminuição do tempo de vida da bateria e por isso resulta num enorme inconveniente. Disto surge a necessidade de projetar sistemas de balanceamento de baterias que compensem tais diferenças entre as células que a compõe.

Depois de analisados alguns dos métodos usados atualmente para atingir a equalização de uma determinada bateria é possível concluir, a nível individual e global alguns dos principais problemas associados às mesmas assim como evidenciar fatores que as destacam das restantes.

Relativamente ao estudo das topologias baseadas em condensadores é possível concluir que há problemas intrínsecos que a maior parte da bibliografia não refere. Imagine-se a implementação de um sistema do tipo *Single Switched-Capacitor* aplicado a uma bateria composta por duas células em série. Considerando a célula 1 a mais carregada e a célula 2 a menos carregada podemos esquematizar os circuito equivalentes da Figura 2.19, considerando os díodos resultado do uso de MOSFETS como os semicondutores utilizados.

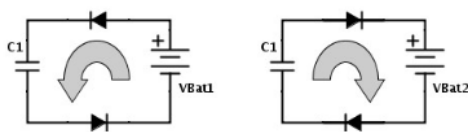


Figura 2.19: Circuitos equivalentes de armazenamento e fornecimento de energia

Assim, é possível antecipar a queda de tensão a que o sistema se sujeita aquando da passagem da corrente por um díodo. Como já tinha sido esclarecido no início deste capítulo, a diferença de tensão entre as células dificilmente atingirá valores acima dos 500mV, fora da fase primordial de carregamento ou descarga, indiscutivelmente. Por esse motivo a eficácia destes métodos torna-se subjetiva e de certo modo pouco fiável principalmente a um nível experimental. Assumindo-se

que a célula de maior tensão está carregada a 3,2 V e a de menor tensão a 3,1 V a transferência será promovida entre a primeira e a segunda. Uma vez que a queda típica de um diódo é de 0,6 V tal descompensará a diferença de tensão justificando a suscetibilidade desta topologia. Isto é, a queda no diódo não permitirá que a tensão final do condensador exceda a tensão da célula mais carregada menos a diferença dada por essa queda. Por consequência, e já na fase de carregamento de uma célula a partir deste condensador, a tensão que o mesmo apresenta não será suficiente para elevar a tensão da célula 2 em prol daquilo que um sistema de equalização objetiva. Este é um dos principais problemas de topologias deste tipo e a principal razão pela qual a grande maioria das referências apenas se refere a ela a nível de análise computacional.

Já os métodos de balanceamento indutivos destacam-se pelo possível controlo da corrente, em concordância com o elemento indutor que for introduzido. Por outro lado, destacam-se por tirarem proveito da razão de transformação associada ao transformador usado a fim de atingir objetivos de tensão. No entanto, caracterizam-se negativamente pelas perdas magnéticas que acarretam e pela dimensão acrescida do sistema, que o emprego de elementos indutivos obriga.

Finalmente, e de análise do exposto acerca das topologias baseadas em conversores de energia, a aplicação das mesmas não é comum nem, na maioria dos casos, vantajosa especialmente devido ao elevado custo e complexidade de controlo e implementação. Assim, estes métodos são geralmente preteridos em detrimento de outros.

Concluindo este tópico e em retrospectiva é possível fazer uma análise comparativa acerca das condicionantes tanto qualitativas como quantitativas de cada uma destas topologias.

Tabela 2.2: Comparação quantitativa e qualitativa dos métodos de balanceamento abordados

	Componentes			Eficiência	Tempo de Equalização	Controlo	Implementação	Custo
	SW	C	L					
<i>SC</i>	2n	n-1		+++	Muito Lento	Simples	Simples	€€
<i>DTSC</i>	2n	n	-	+++	Lento	Simples	Simples	€€
<i>SSC</i>	n+5	1		+++	Muito Lento	Médio	Simples	€
<i>SSI</i>	2n		1	++	Muito Rápido	Médio	Simples	€€
<i>SWT</i>	n+1		2	+	Rápido	Complexo	Simples	€€€
<i>MWT</i>	2		n+1	+	Rápido	Médio	Complexa	€€€
<i>Cûk</i>	n+1	n-1	n+1	++	Rápido	Complexo	Simples	€€€
<i>BBC</i>	2n	n	n	+++	Muito Rápido	Complexo	Simples	€€€
<i>FbC</i>	2n	n	2n	+	Rápido	Médio	Simples	€€€€
<i>QRC</i>	2n-2	n-1	2n-2	++	Rápido	Complexo	Média	€€€€

SC:switched capacitor, **DTSC**:Double-tiered switched capacitor,**SSC**: Single Swtiched Capacitor, **SSI**:single swit-
ched inductor, **SWT**: single winding transformer, **MWT**: multi-winding transformer, **BBC**: buck-boost converter, **FbC**:
Flyback converter, **QRC**: quasi-resonant converter.

+ a ++++: de Satisfatório a Excelente

€ a €€€€ de Baixo a Elevado

Da breve análise dos principais métodos que visam aquilo a que qualquer sistema de balanceamento objetiva e possível tirar algumas conclusões tais como:

- ⇒ a razão custo/eficiência é um fator decisivo de escolha;
- ⇒ as correntes de balanceamento traduzem a rapidez dos métodos e ao mesmo tempo as perdas associadas;
- ⇒ a rapidez de equalização será irremediavelmente importante em casos como o de aplicação automóvel;
- ⇒ semicondutores bidirecionais têm um importante papel, transversal a todas as topologias;
- ⇒ a complementaridade dos métodos é clara.

As conclusões a tirar são muitas vezes guiadas pelos requisitos e especificações associados à aplicação em questão e deverá ser, portanto, o ponto de partida para o projeto de um sistema deste tipo.

Capítulo 3

Circuitos Ressonantes

Efetuada a devida revisão bibliográfica acerca das topologias mais comuns e atualmente sob maior utilização decidiu-se tirar proveito de ambos os componentes, condensador e bobina. Assim, a estratégia utilizada tem como objetivo tirar proveito das características mais vantajosas de cada um deles individualmente. Tal constituirá, como já foi explicado, um conversor de energia. No entanto, a complexidade e o custo acrescido dos atualmente sob estudo são uma desvantagem clara. Desse modo, a análise e desenvolvimento de um novo sistema, capaz de traduzir de forma prioritária as vantagens associadas às categorias apresentadas, mostrou-se pertinente e desafiante.

Com isto em mente decidiu-se projetar um sistema capaz de tirar proveito de um único braço ressonante como elemento de transferência de energia entre quaisquer células constituintes da bateria. Assim, e dada a escolha de um braço constituído por dois elementos passivos, condensador e bobina é necessário, antes de qualquer desenvolvimento específico, expor o funcionamento de um circuito deste género quando acoplado a uma fonte DC (neste caso, a bateria empregue).

Os circuitos denominados por conversores ressonantes surgem da tentativa em minimizar perdas de comutação, essencialmente quando estas se encontram associadas a altas frequências de trabalho. Tal característica, resultado do efeito ressonante, permite determinar com precisão os momentos em que a tensão e a corrente se anulam. Deste modo é possível, com este conhecimento à priori e sem sensorização exigida, promover comutações a corrente ou tensão zero. Este fator é, por si só, razão suficiente para justificar o investimento neste tipo de sistemas.

Por outro lado, é necessário estudar a influência no comportamento do sistema, resultante da adição de um elemento resistivo ao circuito. Isto porque, na realidade, existem sempre não idealidades consequência dos fios de ligação usados e da resistência associado aos elementos em uso.

Deste modo, este capítulo pretende apresentar uma abordagem associada a esta temática, primeiro ao nível do circuito ideal LC e, por fim, considerando um circuito RLC.

3.1 Circuito LC ideal

Sabe-se, da teoria básica de circuitos, que um condensador armazena energia no campo elétrico de valor proporcional à tensão aos seus terminais. Já um elemento indutor armazena energia no seu campo magnético de acordo com a corrente que o percorre. A energia armazenada no condensador e na bobina pode ser calculada a partir das equações 3.1 e 3.2, respetivamente.

$$E = \frac{1}{2}C\Delta V^2 \quad (3.1)$$

$$E = \frac{1}{2}L\Delta I^2 \quad (3.2)$$

A variação de tensão do condensador dada por ΔV será, no momento do primeiro ciclo de carga, igual à tensão final do condensador, considerando que este parte com tensão inicial nula.

Um circuito LC é normalmente chamado de circuito ressonante uma vez que ligação em série de uma bobina e um condensador, Figura 3.1, faz com que a tensão e corrente do sistema oscilem.

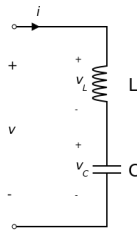


Figura 3.1: Braço ressonante

Assim, um sistema deste tipo oscila com uma frequência dada por:

$$F_r = \frac{1}{T_r} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.3)$$

A esta frequência chama-se frequência de ressonância e é indispensável na consideração e projeto de qualquer circuito deste género. Uma vez que as perdas por comutação estão naturalmente associadas, de forma proporcional, à frequência de comutação, é de salientar que deverão ser mantidos limites a fim de não deteriorar o sistema em função da sua eficiência [10]. Desta forma, deverá ser feito, em todos os casos, um dimensionamento cuidado dos elementos a utilizar, de acordo com os objetivos estipulados. A corrente é também ela controlável a partir desta escolha, uma vez que é dada por:

$$i_L = V\sqrt{\frac{C}{L}} \quad (3.4)$$

com V o valor da tensão aplicada ao circuito LC série.

Analisando o circuito apresentado na figura 3.1 podemos estabelecer as equações que regem o funcionamento deste sistema, equações 3.5 e 3.6.

$$V = L \frac{di_L}{dt} + v_C \quad (3.5)$$

$$i_C = C \frac{dv_C}{dt} \quad (3.6)$$

Considerando meio ciclo de funcionamento, à frequência imposta pelos componentes escolhidos, é possível dividi-lo em quatro partes fundamentais:

- ◇ No início a tensão do condensador é nula e a tensão aos terminais da bobina é igual à tensão imposta pela fonte (célula da bateria). Quando a bobina começa a ser percorrida por corrente e a armazenar energia, o condensador começa também ele a ser carregado;
- ◇ Quando a tensão aos terminais do condensador iguala a tensão da bateria, a tensão da bobina é nula e dá-se o pico máximo de corrente;
- ◇ Mesmo com tensão nula, e uma vez que a corrente na bobina não pode mudar instantaneamente, o sentido da corrente na bobina mantém-se. Neste momento, a bobina liberta a energia previamente armazenada.
- ◇ Desde o momento em que a corrente atinge o seu máximo até ao momento em que se anula, a tensão aos terminais do condensador duplica. Após este meio ciclo de funcionamento o processo repete-se agora em sentido inverso. A corrente oscila com valores negativos e a tensão no condensador desce até zero.

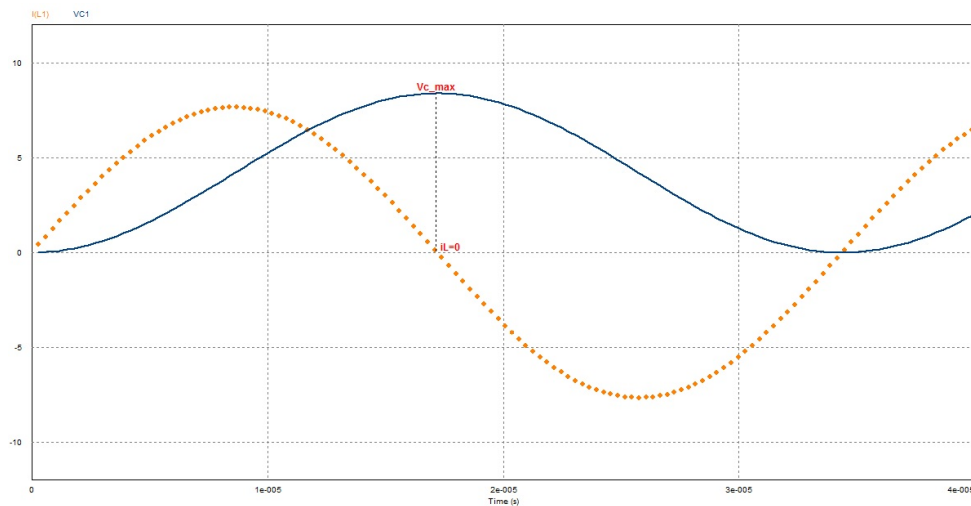


Figura 3.2: Formas de onda da tensão no condensador (V_{C1} , a azul) e corrente na bobina (i_L , a vermelho)

A figura 3.2 ilustra o exposto, considerando uma célula carregada com 4,2V e uma frequência de ressonância de 30kHz.

3.2 Circuito LC não ideal

É de certa forma óbvio que o circuito escolhido para transferência de energia não é unicamente constituído pelos elementos passivos mencionados, condensador e bobina. Deverá ser assim considerada a resistência associada à célula, aos interruptores eletrónicos utilizados bem como dos fios de ligação.

Pode-se então, de forma semelhante ao ponto anterior, escrever as equações que descrevem o funcionamento de um circuito deste género.

$$V_{bat1} = Ri + L_1 \frac{di}{dt} + v_C \quad (3.7)$$

Substituindo v_C por $\frac{q}{C}$, i por $\frac{dq}{dt}$ e dividindo tudo por L resulta na equação seguinte:

$$\frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + L_1 \frac{d^2q}{dt^2} + \frac{q}{LC} = 0 \quad (3.8)$$

As soluções da equação resultante poderão ser obtidas usando a transformada de Laplace. Da mesma obtemos a seguinte equação característica:

$$s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC} = 0 \quad (3.9)$$

As raízes da equação característica definem o comportamento do sistema, distinguindo-se três tipos diferentes definidos pelo seu coeficiente de amortecimento ξ (com $\xi = \frac{R}{2L}$):

- **Sobreamortecido** $\xi > 1$: duas raízes reais distintas;
- **Criticamente amortecido** $\xi = 1$: duas raízes reais iguais;
- **Subamortecido** $\xi < 1$: duas raízes complexas distintas;

A Figura 3.3 ilustra as diferentes respostas impulsiais do sistema assumindo diferentes coeficientes de amortecimento.

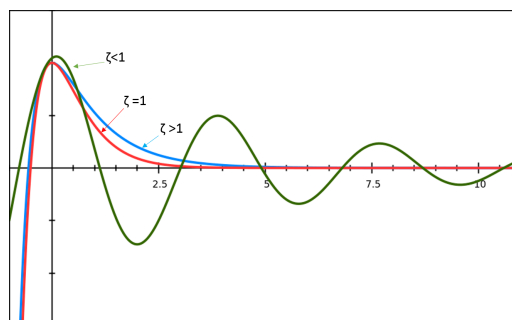


Figura 3.3: Resposta oscilatória face a diferentes coeficientes de amortecimento

No caso particular do sistema que se pretende projetar tenciona-se que assuma uma característica subamortecida. Assim, é necessário escolher os componentes em concordância com o que se pretende.

De forma resumida é necessário ter em conta os seguintes critérios:

- > garantir que o sistema é subamortecido;
- > minimizar o tamanho da bobina;
- > escolher uma frequência de ressonância dentro de limites, condicionados quer pela fiabilidade quer pela possibilidade de implementação prática do sistema.

Neste caso, e analisando o sistema num ciclo completo, existem diferenças face ao circuito LC que têm efeito direto no valor da corrente e tensão do condensador ao longo do tempo. Admitindo que se parte de um ponto com a tensão aos terminais do condensador nula, a tensão aos terminais do elemento indutor será a da fonte menos a queda dada pela resistência agora incorporada. Ao fim do primeiro meio ciclo tem-se aos terminais do condensador uma tensão dada por:

$$V_{Cfinal} = 2V_{Bat1} - V_R - V_{Cinicial} \quad (3.10)$$

Devido à queda de tensão resultante da resistência, o sistema tem uma envolvente exponencial associada ao traçado oscilatório da curva de tensão do condensador.

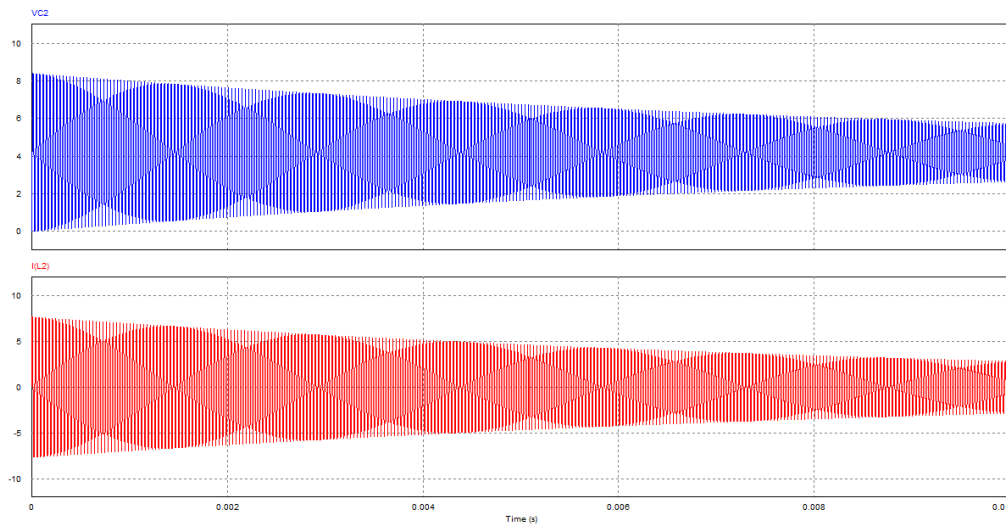


Figura 3.4: Formas de onda da tensão no condensador (V_{C1}) e corrente na bobina (i_L) num circuito RLC

De facto, da análise da Figura 3.4 depreende-se que as formas de onda estão limitadas a $(1 + e^{-x})$ e $-(1 + e^{-x})$.

3.3 Conclusão

O modo de funcionamento de um circuito LC ideal permite, em todos os ciclos, que a tensão aos terminais do condensador duplique, face à tensão de alimentação. Tal característica foi razão central para a escolha de um circuito deste género como elemento armazenador de energia pois, face a este fenómeno seria possível:

- controlar os picos de corrente através do elemento indutor;
- armazenar energia no campo elétrico do condensador;
- operar o sistema a frequências de comutação elevadas;
- aumentar a corrente entre a bateria e o condensador auxiliar, face a uma maior diferença de tensão entre os mesmos;
- diminuir o tempo de balanceamento, resultado de correntes de balanceamento superiores;
- diminuir as perdas de comutação, tirando partido de comutações a corrente zero;

No entanto, a generalidade dos sistemas físicos, dificilmente constituirá um circuito ideal deste tipo. Assim, é necessário considerar o seu funcionamento perante a introdução de não idealidades. No caso particular do sistema que se pretende projetar é indispensável garantir que se trata de um sistema subamortecido. O funcionamento deste circuito será tão mais vantajoso quanto maior for o tempo de estabilização e portanto mais se assemelhar a um circuito LC ideal.

Capítulo 4

Sistema de Balanceamento

O sistema de balanceamento que se pretende desenvolver, ao tirar partido de um circuito ressonante, deverá ser projetado tendo em conta as condições de funcionamento de um circuito deste tipo, admitindo qualquer não idealidade introduzida. Assim, este capítulo começa por apresentar os requisitos a ter em conta no momento de escolha dos componentes a utilizar.

Posteriormente, é introduzido o esquemático adotado para o sistema de balanceamento a desenvolver, para conjuntos de duas, três e seis células, respetivamente. É efetuada uma comparação construtiva dos três esquemas, o que permite avaliá-los de acordo com a aplicação que pretendem integrar.

No seguimento da modelação é feita a devida parametrização tendo em conta o que os pontos anteriores especificaram.

Por fim são explicados os modos de funcionamento que o sistema utiliza.

4.1 Requisitos

O sistema de balanceamento sob projeto deverá cumprir alguns requisitos a fim de tornar a sua aplicação viável e, acima de tudo, cumprir o seu propósito.

Este sistema deverá pois: equilibrar as tensões das baterias de forma ativa, maximizando o seu rendimento; possuir uma característica flutuante e modular; conseguir atingir o equilíbrio com um tempo curto e possuir pequenas dimensões .

É, por isso, importante dividir o problema de modelação em subproblemas que concretizem e garantam cada um destes requisitos. Podemos dividir este problema em três pontos cruciais:

- ⇒ Desenvolvimento de um esquema capaz de transferir energia entre células de uma determinada bateria;
- ⇒ Parametrização dos componentes tendo em conta as frequências de funcionamento pretendidas e a sua consequente dimensão;
- ⇒ Escolha dos semicondutores que minimizem as perdas e quedas de tensão, e que, por outro lado, funcionem bem à frequência de ressonância imposta;

⇒ Modelação da bateria de forma fiável e tendo em conta a capacidade atribuída à mesma;

4.2 Modelação

A modelação de um circuito elétrico é parte indispensável quando se pretende fazer uma análise profunda do mesmo, tirando partido de programas de simulação computacional.

Qualquer projeto de modelação deverá ter influência clara dos requisitos impostos à priori. Neste caso, foi usado o programa de simulação *PowerSim* de forma a projetar o processo de balanceamento para um conjunto de duas, três e seis células em série. Poderão ser feitas considerações em prol da sua simplificação ou redução do tempo de simulação desde que as comparações com o funcionamento a nível real as ponderem.

4.2.1 Esquemático

A capacidade de um dado sistema de balanceamento em transferir energia entre células é delimitada pela estrutura que o mesmo ostenta. O desenho dos caminhos, entre as células e o sistema de armazenamento de energia, é um elemento fulcral que fundamenta o processo de equalização.

Assim, e uma vez que se pretende usar apenas um ramo LC, o que lhe atribui uma característica flutuante, é necessário projetar um circuito que tal o permita, sem adversidades associadas.

4.2.1.1 Duas células em série

Numa primeira fase foi projetado um circuito que contemplava duas células em série e um braço LC ligado entre as mesmas, Figura 4.1.

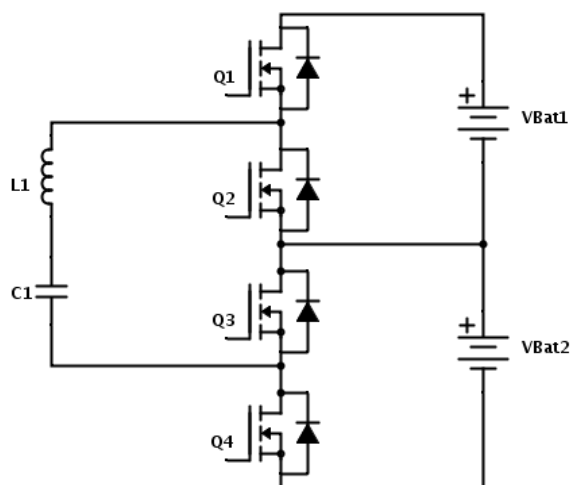


Figura 4.1: Esquema do sistema de balanceamento para duas células em série

Os semicondutores aqui empregues funcionarão aos pares, transitando entre diferentes modos de funcionamento consoante o seu estado ON ou OFF. Estes modos são abordados no ponto 4.3 deste capítulo.

O esquemático aplicado às duas células não pode ser replicado para mais de duas sem que se ignore um dos requisitos: a característica flutuante do ramo LC. Isto é, a fim de manter a configuração dos semicondutores aplicados seria necessário replicar o ramo LC para cada conjunto de duas células. Com tal configuração seria apenas possível transferir energia entre células adjacentes tornando o processo demorado e o sistema naturalmente maior e mais dispendioso, face ao número e custo dos elementos indutores e capacitivos necessários.

4.2.1.2 Três células em série

Uma vez que a junção de uma ou mais células não permite a utilização direta do esquema das duas células sem que se comprometam determinados caminhos, foi necessário adotar uma nova combinação de interruptores. A esta nova combinação, Figura 4.2, exigiu-se que garantisse a necessidade de apenas um braço intermediário de energia e permitisse o aumento ou diminuição do número de células. Tal característica é indispensável face às exigências de tensão das diferentes aplicações.

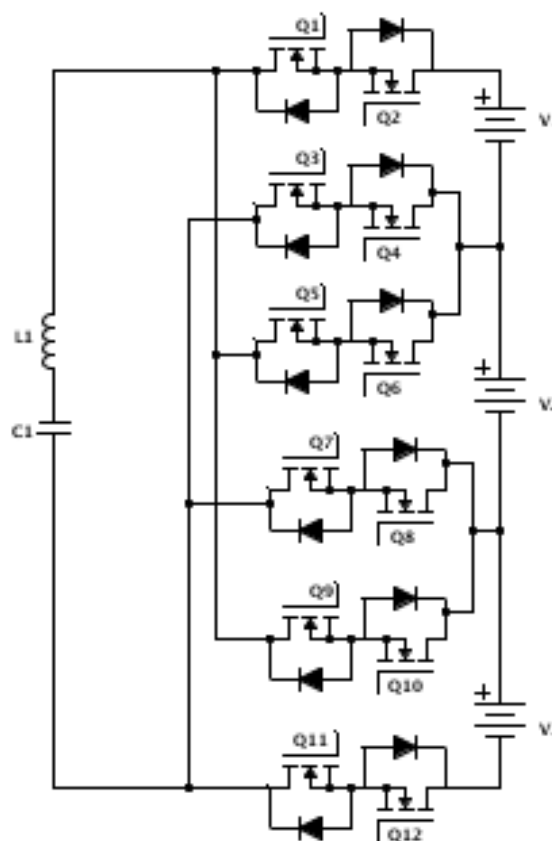


Figura 4.2: Esquema do sistema de balanceamento para três células em série

No entanto, a configuração agora adotada, permitirá única e exclusivamente a transferência de energia de uma célula para outra, descartando a hipótese de carregar o condensador auxiliar a partir de séries de células.

4.2.1.3 Seis células em série

Para sistemas como EVs ou sistemas de produção de energia renovável as necessidades a nível de tensão são normalmente superiores aos valores que duas ou três células podem atingir. Assim, foi projetado um circuito assumindo um conjunto de seis células em série, equivalente a uma bateria de 24V. Tendo em conta os esquemáticos apresentadas nos pontos anteriores, a escolha desta nova configuração teve em conta adotar as características vantajosas de ambas: permitir a extensão da topologia a mais ou menos células; e permitir a ligação em série de, pelo menos, duas células.

Destas imposições surge o esquema da Figura 4.3.

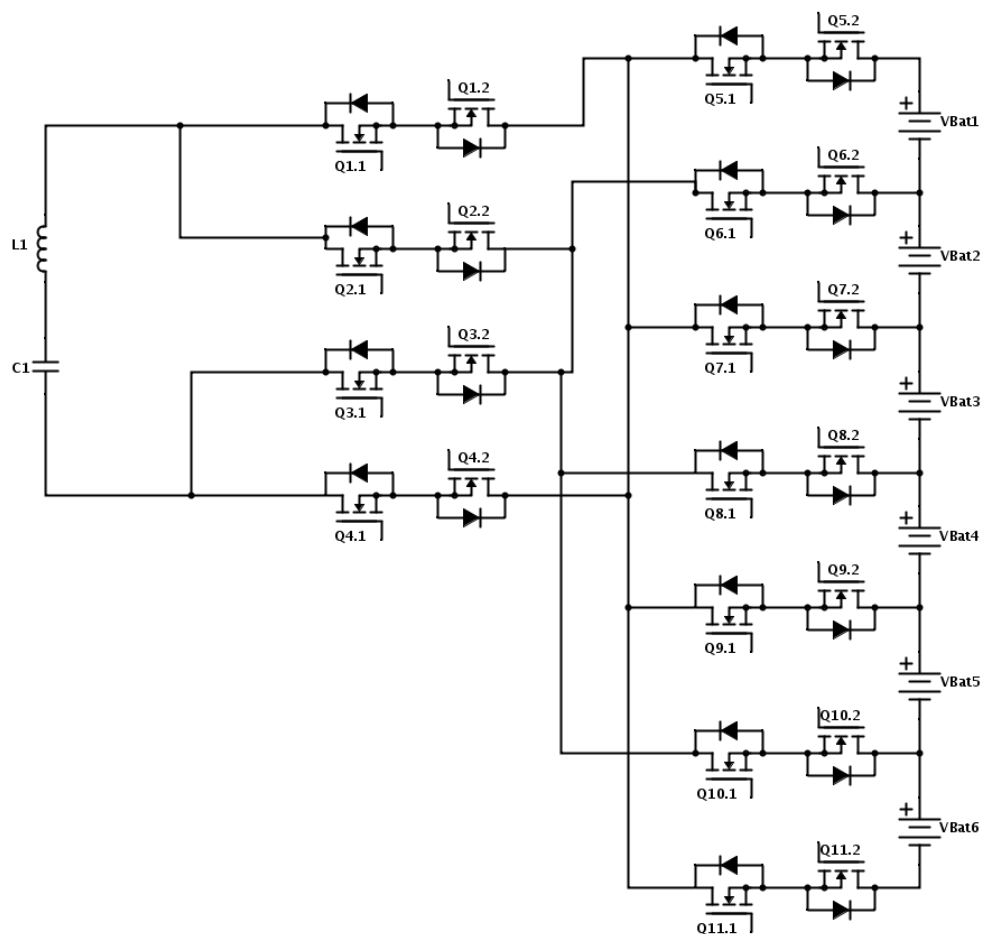


Figura 4.3: Esquema do sistema de balanceamento para seis células em série

Para garantir o cumprimento da primeira exigência imposta ao sistema, foi projetado um nível de interruptores equivalente ao esquema das três células. Por outro lado, e a fim de permitir a ligação do ramo LC a uma série de células, foi criado um nível de semicondutores extra.

4.2.1.4 Análise Comparativa

Deve salientar-se que, a maioria da bibliografia se refere à utilização de transístores bidirecionais como apenas uma unidade quando na realidade, a sua característica bidirecional advém da utilização de dois. Especificamente para o caso das três e seis células, a ligação dos MOSFETs é feita de acordo com a Figura 4.4. Isto é, com *sources* comuns, o que permite que o mesmo sinal de comando seja utilizado para ligar e desligar ambos os transístores.

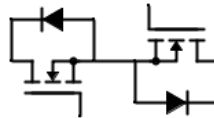


Figura 4.4: Esquema de montagem de dois transístores em anti-série

A ideia deste esquema chega como uma das alternativas possíveis de modo a contornar a queda de tensão associada aos díodos. Ou seja, ao ligar os dois MOSFETs ao mesmo tempo, cria-se um caminho de corrente alternativo, de acordo com o sentido de corrente pretendido. No entanto, haverá também uma queda de tensão característica do semiconductor usado mas que é significativamente menor que a de um diodo. Por outro lado, esta solução acarreta a desvantagem de necessitar de mais transístores e de uma técnica de controlo mais complexa.

Tabela 4.1: Três esquemas propostos sob comparação quantitativa e qualitativa, com n igual ao número de células envolvidas

Esquema	Figura 4.1	Figura 4.2	Figura 4.3
Ramo LC	$n/2$	1	1
nº total de MOSFETS	$4n$	$2n$	$8+2(n+1)$
MOSFETS ligados consecutivamente	2	4	8
Série?	SIM	NÃO	SIM
Tamanho	+++	+	++
Custo	€€€€	€	€€
Rapidez de Equalização	Média	Fraca	Boa

A Tabela 4.1 apresenta as principais diferenças entre os esquemas abordados nomeadamente relativamente ao número de ramos LC que dispendem, número total de MOSFETs empregues e quantos são ligados consecutivamente, possibilidade de criar séries, tamanho, custo e rapidez de equalização. A avaliação do tamanho e do custo centra-se essencialmente no conjunto composto pelos elementos passivos envolvidos e MOSFETs. Da análise da Tabela 4.1 é possível concluir acerca de qual deverá ser o esquema a adotar mediante o pretendido. Se o tamanho for um fator

crucial, o esquema reportado pela coluna um deverá ser à partida dispensado. Já relativamente à rapidez de equalização, a escolha aponta para o último, que por possibilitar séries de células, tenderá a tornar o processo mais rápido. Por outro lado, se o custo for parâmetro de definição, o esquema reportado pela última coluna vence em casos cujo número de células seja elevado. Isto porque, a evolução do número de transístores com o aumento do número de células, é maior no esquema reportado pela coluna dois (por exemplo: para 24 células, adotando o segundo esquemático serão empregues 96 transístores contra os 58 requeridos pela terceira). No entanto, a obrigatoriedade de ligação de oito transístores aquando de qualquer transferência, tende a agravar as perdas e portanto a piorar o rendimento do sistema da Figura 4.3, favorecendo o esquema ilustrado para as três células, Figura 4.2.

Desta análise comparativa é então possível concluir que a escolha de um esquemático em detrimento de outro deve ser feita discutindo à priori os requisitos do sistemas e os fatores sob os quais se deve, ou não, ter mais atenção. Qualquer escolha deverá, por outro lado, sujeitar o esquema escolhido a simulações computacionais que a fundamentem.

4.2.2 Parametrização

Depois do estudo de circuitos deste tipo, e impostos os requisitos ao sistema, é necessário parametrizar os componentes principais .

Ramo LC Pode concluir-se, a partir da Tabela 4.2, que é necessário haver um compromisso entre os valores de L e C e os valores da frequência de ressonância resultante.

Tabela 4.2: Valores de Frequência ressonante versus diferentes valores de L e C

R	L	C	F_r	Oscila?
60m	3 μ	10 μ	29kHz	SIM
60m	2 μ	100 μ	11kHz	SIM
60m	1 μ	1 μ	160kHz	SIM
60m	5m	0,1m	225Hz	NÃO
60m	20 μ	1m	1kHz	SIM

Para pequenos valores de ambos os elementos, a frequência de ressonância é demasiado elevada ($\geq 100kHz$) o que se torna desvantajoso ao nível do processamento computacional e das perdas, que aumentam. Por outro lado, e para valores baixos de frequência ($\leq 1kHz$), o sistema poderá não oscilar e, em situações em que efetivamente oscila, os componentes a utilizar são de dimensões exageradas. Assim, no projeto desenvolvido procurou-se um compromisso situando os valores dos componentes de modo a que a frequência de ressonância estivesse na zona da dezena de kHz.

Semicondutores A escolha dos semicondutores a utilizar, num sistema deste tipo, deverá ser prioritária e deve considerar as restrições impostas pelo mesmo, assim como os requisitos que deverá cumprir. A utilização de um circuito LC de custo e dimensões aceitáveis acarretará um funcionamento a uma frequência naturalmente elevada. Por essa razão é necessário ter em conta que deverão ser empregues semicondutores rápidos.

Os semicondutores mais usados que desempenham a função de interruptores em sistemas de balanceamento são: IGBTs e MOSFETs.

A escolha de MOSFETs como semicondutores de seleção teve como principais razões associadas:

- ✓ Condução em ambos os sentidos;
- ✓ Baixa resistência interna;
- ✓ Associação natural de um díodo em paralelo, *Body-drain*;
- ✓ Funcionamento a altas frequências;
- ✓ Possibilidade de *duty-cycles* longos;
- ✓ Comutação rápida.

Baterias As baterias podem ser simuladas, em ambiente computacional, por um condensador de valor elevado (proporcional à sua capacidade) e uma resistência de baixo valor (Modelo de *Rint*, abordado no ponto 2.1.2 desta dissertação). Assim, a capacidade equivalente da célula da bateria deve ser calculada tendo em conta que:

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

Sabe-se que a capacidade de uma célula é dada em *Ah*, e que 1*Ah* equivale a 3600 coulombs. Por isso, e assumindo uma capacidade de 11*Ah* e uma variação máxima de tensão de 1,2*V*, tem-se que a capacidade equivalente de uma célula é dada por:

$$C_{total} = \frac{11 \times 3600}{(4,2 - 3)} = 33000F \quad (4.2)$$

No entanto, e com o propósito de acelerar a simulação, considerou-se um valor de capacidade na ordem dos 0,03*F*. Deste modo, os tempos de equalização deverão ser multiplicados pelo fator de divisão usado para simplificação.

Será considerado, no estudo do sistema de balanceamento, a equalização das tensões das células da bateria e não do seu estado de carga.

4.3 Modos de Funcionamento

A seleção de uma combinação de interruptores permite transitar entre diferentes modos de funcionamento. Os modos possíveis para um esquemático de duas células são apresentados na Figura 4.5.

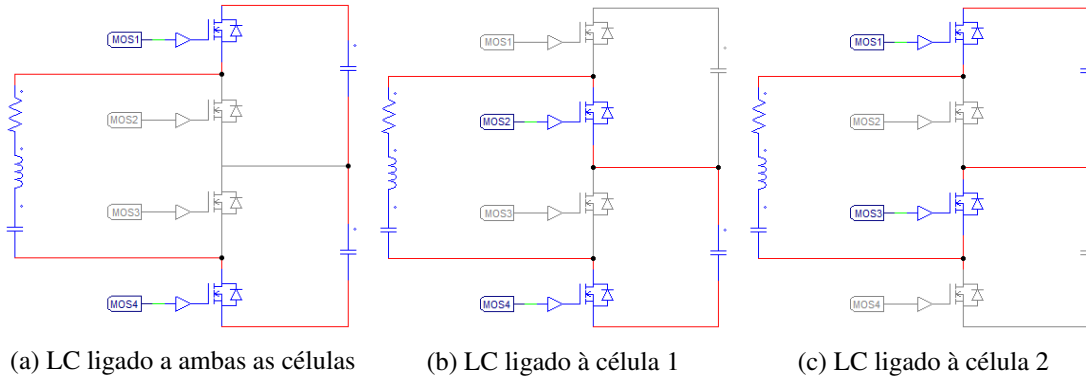


Figura 4.5: Três modos de funcionamento para um conjunto de duas células em série

Para além dos modos exemplificados existe também um modo natural de *free-wheeling* que surge quando todos os transístores estão no estado OFF. Neste caso, a corrente fluirá pelos díodos dos transístores interiores (2 e 3 da Figura 4.5).

Já no caso do esquema aplicado às três células em série (Figura 4.2), os MOSFETS a serem ligados são aqueles imediatamente acima e abaixo da célula correspondente. Em qualquer caso serão ligados quatro MOSFETS a partir de dois sinais de comando equivalentes, para cada dois consecutivos.

Para aceder a uma célula específica, do conjunto das seis usadas, são neste caso ligados um total de oito MOSFETs, dois a dois, o que corresponde a quatro sinais de *gate* distintos. Dada a complexidade acrescida que uma série de seis células acarreta, a demonstração dos modos de funcionamento deste sistema seria um estudo algo labiríntico.

Tabela 4.3: Especificação dos transístores a ligar para conectar o ramo LC a cada célula no esquema da Figura 4.3

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
Cell1	ON	-	ON	-	ON	ON	-	-	-	-	-
Cell2		ON	-	ON	-	ON	ON	-	-	-	-
Cell3	ON	-	ON	-	-	-	ON	ON	-	-	-
Cell4	-	ON	-	ON	-	-	-	ON	ON	-	-
Cell5	ON	-	ON	-	-	-	-	-	ON	ON	-
Cell6	-	ON	-	ON	-	-	-	-	-	ON	ON

Assim, a tabela 4.3 identifica-os, sendo que T_i representa na realidade dois MOSFETs que deverão ser ligados em simultâneo. Por exemplo, T1 corresponde aos MOSFETs Q1.1 e Q1.2, identificados na Figura 4.3.

No entanto, uma característica particular do esquemático considerado centra-se no facto deste permitir ligar as células em séries de três ou cinco elementos adjacentes. Para tal são ligados os MOSFETs 1 e 3 ou 2 e 4 (os de primeiro nível) de acordo com a paridade da primeira célula da série. Os MOSFETs de segundo nível que deverão ser ligados são o superior à primeira célula da série e o inferior à última (fechando naturalmente o circuito). Esta característica é explicada com mais detalhe no capítulo 5.

4.4 Conclusão

O projeto de qualquer sistema deve partir de um conjunto de requisitos bem estipulados aos quais se deverá sempre voltar, a par da análise do funcionamento do mesmo. Assim, e partindo dos mesmos, deve ser feita uma modelação consistente do sistema levando em conta o programa de simulação adotado.

Do projeto do sistema de balanceamento aqui proposto é possível realçar algumas conclusões tais como:

- O sistema deverá considerar a utilização de um único ramo LC para a transferência de energia entre quaisquer células de uma série;
- A escolha dos componentes a utilizar deverá ser focada na frequência de ressonância da qual advém a frequência de comutação dos semicondutores, na dimensão e no custo;
- O esquemático projetado permite ao sistema comutar entre diferentes modos de funcionamento, que se refletem em resultados diferentes e em necessidades de controlo também elas distintas;
- O programa de simulação PSIM não dispõe de um modelo típico de uma bateria que deverá portanto ser simulada. Nest trabalho usou-se um modelo previamente escolhido de acordo com os parâmetros associados à bateria em questão.

A fase seguinte ao projeto de um sistema deste tipo será focada no estudo dos algoritmos de controlo que melhor encaminhem os resultados deste sistema face a relações custo/benefício e tempo de equalização/rendimento.

Capítulo 5

Algoritmos de Controlo

Para o controlo do sistema de balanceamento apresentado é necessário, em prol dos objetivos, desenvolver um método apropriado e acima de tudo otimizado de acordo com os resultados pretendidos.

A generalidade dos controladores, e os dos circuitos elétricos não são exceção, usam um sinal de referência, que se pretende seguir, e medidas das variáveis de interesse, obtidos por sensorização, criando um tipo de controlo que se designa por controlo em malha-fechada por utilizar a realimentação (*feedback*) das referidas variáveis. No entanto, isso resulta num aumento dos custos, por exigir elementos sensores muitas vezes caros face ao custo pretendido para o fim a que se destinam.

Assim, há que estudar alternativas que dispensem a utilização de um número elevado de sensores e que, ainda assim, permitam cumprir os objetivos em vista.

No caso específico de um sistema de balanceamento, pretende-se controlar a transferência de energia entre as diferentes células, levada a cabo pela criação de caminhos de corrente entre as mesmas e o elemento armazenador utilizado.

O problema prende-se com determinar a melhor estratégia para transferir a energia entre células no menor espaço de tempo possível. Este problema é um problema de investigação operacional com uma solução não trivial. Admita-se, por exemplo, um sistema com quatro células de bateria mas com diferentes quantidades de carga (SOC). O número de modos possíveis para transferir energia entre elas, de forma a que fiquem todas com a mesma carga, é significativo. Naturalmente, a adição de mais células irá fazer aumentar a quantidade de alternativas de forma exponencial. Assim, de modo a melhor escolher um possível algoritmo a aplicar, comecemos por enumerar os objetivos aos quais este se propõe. Deste modo, o algoritmo responsável por alcançar a equalização entre todas as células terá como objetivos principais os seguintes:

- 1) Minimizar o tempo de equalização;
- 2) Minimizar as perdas;
- 3) Maximizar o tempo de vida da bateria;
- 4) Maximizar a eficiência energética.

Deve salientar-se ainda que a escolha entre algoritmos diferentes está também ela associada à topologia de balanceamento escolhida para o efeito.

É, por isso, comum agrupar as topologias sob a forma de técnicas de transferência de energia: *cell-to-cell* e *pack-to-cell*. A primeira permite apenas transferir energia entre células adjacentes. Por outro lado, a segunda remete para a possibilidade de transferir energia de toda a bateria para apenas uma célula.

Ambas as técnicas podem coexistir, derivando da utilização de um circuito apropriado e uma estratégia de controlo mais complexa. Isto é, será possível, ao sofrer algumas alterações, criar um sistema capaz de seleccionar entre apenas uma ou um conjunto de células, das quais deverá ser retirada energia, e uma ou mais células para a qual essa energia deverá ser redireccionada. Expressamente, a escolha de um algoritmo ótimo não é imediata nem linear e deverá usar uma função que cumpra o compromisso entre o pretendido e as condições em que se garantem as exigências do algoritmo. As exigências do controlo projetado deverão ainda ter em conta questões de aquisição de dados e sensorização, a par do poder computacional que o processador empregue deverá ter. Assim, é indispensável garantir um compromisso entre estes fatores e o valor acrescido no preço do sistema de balanceamento em questão.

5.1 Malha aberta

Um sistema de balanceamento terá de transitar entre dois estados claros: o de carga do elemento armazenador de energia, a partir de uma ou mais células da bateria, e o de descarga do mesmo, para uma ou mais células escolhidas para tal.

A nível de sensorização é indispensável ler os valores de tensão das diferentes células de modo a determinar em cada instante as células com maior e menor SOC. Por outro lado, e uma vez que se utiliza um ramo ressonante como armazenador de energia, a sensorização da corrente no elemento indutor poderá ser dispensável por assumir um comportamento previsível.

Os momentos de carga e descarga poderão assim ser determinados a partir de dois sinais PWM cujo *duty-cycle* e desfaseamento ditarão diferentes funcionamentos e, consequentemente, diferentes resultados a nível de rapidez e eficiência do sistema.

Para o sistema em causa foram criados quatro sinais PWM:

- 1) Um sinal responsável pela carga do condensador (S1);
- 2) Um sinal responsável por manter o ramo LC desconectado das células após carga (S2);
- 3) Um sinal responsável pela descarga do condensador (S3);
- 4) Um sinal responsável por manter o ramo LC desconectado das células após descarga (S4).

A soma dos quatro sinais deverá criar um sinal com *duty-cycle* unitário que será iniciado, a cada período de ressonância. A malha aberta a que esta secção se refere diz respeito aos valores

fixos da frequência e *duty-cycles* dos sinais mencionados. O desfasamento angular e temporal entre os quatro sinais pode ser calculado, considerando o seu funcionamento como consecutivo, a partir das equações 5.1 e 5.2.

$$\text{Angular : } \phi_0 = 360 \times f_r \times \Delta t_i \quad (5.1)$$

$$\text{Temporal : } \Delta t_i = \Delta t_{i-1} + \delta \times T_r \quad (5.2)$$

Onde f_r e T_r representam respetivamente a frequência e o período de ressonância e δ o duty-cycle escolhido. Assim teremos um conjunto de sinais semelhantes aos ilustrados na Figura 5.1.

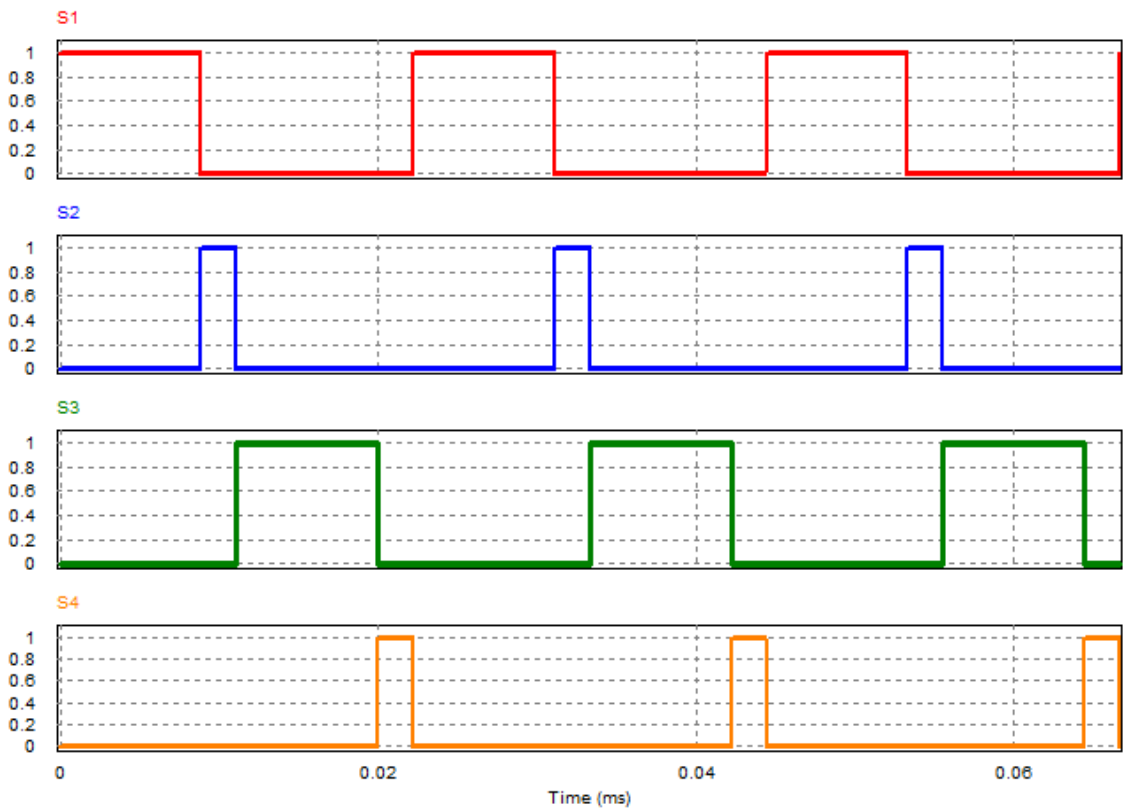


Figura 5.1: Sinais de comando

A medida dos níveis de tensão das diferentes células permite avaliar a sua posição face àquela mais e menos carregada. Especificadas as células de maior e menor carga (em relação à sua tensão) e tendo em conta o estado que os sinais de controlo impõem, é possível determinar quais os MOSFETs que deverão ser ligados, a fim de criar os caminhos de corrente pretendidos. Assim, e seguindo uma lógica AND e/ou OR, estes são determinados tendo em conta a célula ou células que se pretendam ligar ao ramo LC.

As possibilidades de transferência de energia entre células, face ao esquema das seis células adotado (Figura 4.3) podem ser discutidas segundo o diagrama da Figura 5.2

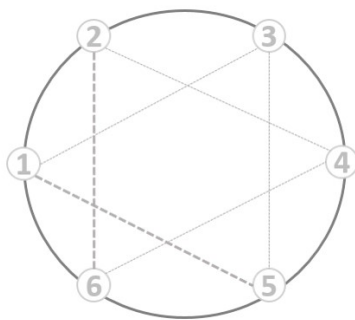


Figura 5.2: Analogia das hipóteses de transferência de energia

Poderá imaginar-se portanto um anel com tantos pontos quantas forem as células que compõem a bateria. Interligando os 6 pontos obtemos todas as ligações célula a célula que podem ser efetuadas. Com a circunferência do anel agora desenhada, conectando os elementos ímpares e pares entre os quais existe uma ou mais células verifica-se quais as séries possíveis, delimitadas pelos elementos interligados. As séries que englobam três células estão representadas pelas retas a cheio enquanto que as englobam cinco estão representadas pelas retas a tracejado.

A característica flutuante do elemento armazenador, na topologia adotada, permite, como vimos, que se transfira energia de uma qualquer célula para outra qualquer célula. Do esquemático já apresentado na Figura 4.3, vemos que é também possível ligar séries de células e assim carregar o armazenador de energia com uma tensão mais elevada. Concretamente, e seguindo a analogia criada pela Figura 5.2, na topologia projetada as séries possíveis são: $[1\ 2\ 3]$, $[2\ 3\ 4]$, $[3\ 4\ 5]$ e $[4\ 5\ 6]$ que agrupam as células em séries de três elementos, ou $[1\ 2\ 3\ 4\ 5]$ e $[2\ 3\ 4\ 5\ 6]$ que agrupam as células em séries de cinco elementos.

5.2 Malha fechada

Do estudo dos métodos de controlo em malha aberta é possível prever que uma otimização dos valores de *duty-cycle*, dos sinais de comando a par de uma sintonização objetiva da frequência de ressonância, resultará uma melhoria no funcionamento do sistema.

A análise e procura do ponto ótimo de funcionamento recorre a um algoritmo do tipo perturbar e observar, P&O, que, face a comparações de valores à posteriori com valores instantâneos, regula os sinais de comando.

Assim, os quatro sinais de onda apresentados no ponto anterior deste capítulo, seriam sinais com *duty-cycle* variável em função do estado do sistema e daquilo que é pretendido. Note-se que os sinais que mantêm o estado de carga e descarga do condensador podem ser desprezados por simples anulação do seu período de funcionamento.

Por outro lado, a aplicação deste tipo de algoritmo permitiria tirar partido dos valores já sensorizados não acarretando consequências no aumento dos custos de implementação do sistema. A malha fechar-se-ia por receber *feedback* das alterações efetuadas a nível da modelação dos sinais de comando. A influência destas variações está exemplificada no capítulo 6.

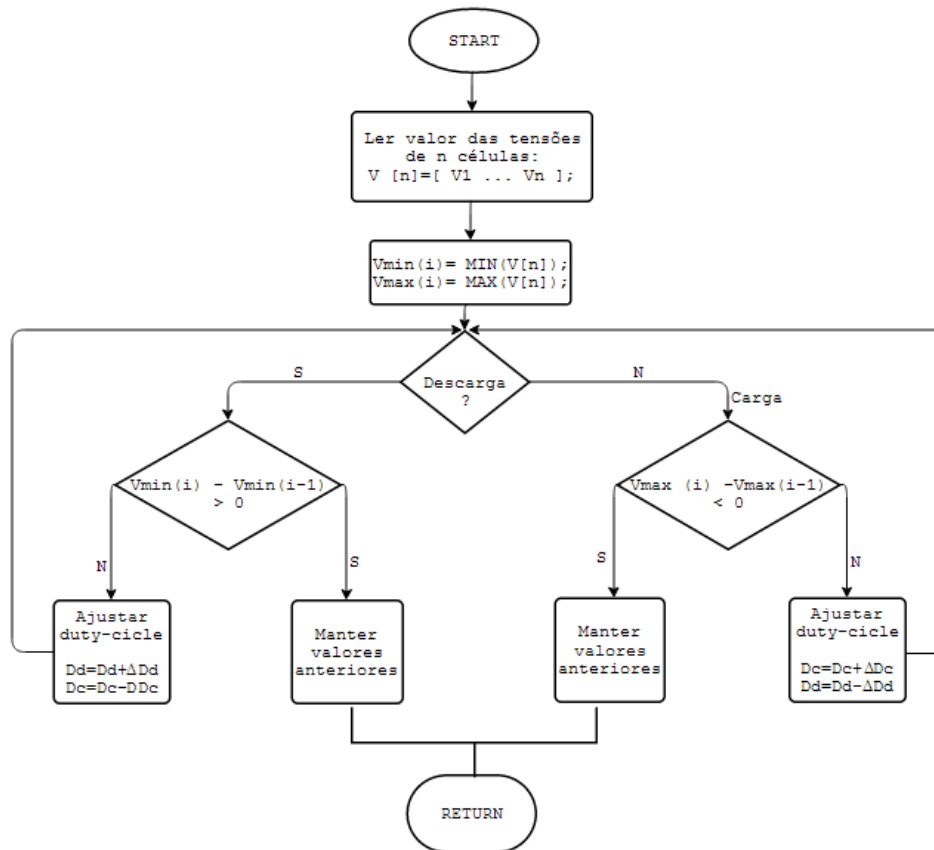


Figura 5.3: Algoritmo proposto para um controlo otimizado

5.3 Conclusão

A escolha ou desenvolvimento de um algoritmo pressupõe, à priori, um conhecimento claro dos resultados que se pretendem atingir. Desta forma, o seu enquadramento com o sistema será mais objetivo e, por outro lado, mais evidente.

No caso de um sistema de balanceamento, no qual se pretende promover transferências de energia entre células, é pretendido que, após um determinado período de tempo, a carga das mesmas se iguale. Ou seja, o controlo deste sistema assentará sob a modelação das formas de onda que controlam o estado ON e OFF dos transístores, criadores dos caminhos de corrente, e que assim decidem a transição entre estados de carga e descarga do elemento armazenador auxiliar. Um controlo em malha aberta parece portanto suficiente para cumprir o objetivo central.

No entanto, o prolongamento de um destes estados de carga ou descarga em detrimento do outro, consequentemente encurtado, terá a sua influência facilmente visível no comportamento do sistema. Transições prematuras ou tardias entre o estado de carga e o estado de descarga têm influência direta nos valores máximos e mínimos de tensão e corrente atingidos pelo condensador e bobina, respetivamente.

Sem simulações à priori pode-se prever que, encurtando o tempo de carga, a tensão aos terminais do condensador não tenderá para sensivelmente o dobro da tensão que o alimenta. Por outro lado, ao aumentar o tempo de descarga a tensão aos seus terminais pode sofrer uma inversão. Esta inversão faz com que, também o condensador, passe a representar uma fonte de tensão adicional, comparativamente ao que acontece com a bobina (conforme explicado no capítulo 3). Isto poderá ser vantajoso em casos em que seja necessário atingir valores de tensão superiores àquilo que, sem essa fonte adicional, seria possível.

Por isso, um algoritmo em malha fechada que ajuste o *duty-cycle* de acordo com a evolução do estado do sistema traria vantagens ao nível dos requisitos impostos ao sistema de balanceamento proposto, embora aumentasse a complexidade de controlo exigida.

Capítulo 6

Análise Computacional e Resultados

Qualquer circuito elétrico, em fase de projeto, poderá submeter-se a uma análise e consequente validação a partir de um programa de simulação computacional apropriado.

Assim, neste capítulo são apresentados os resultados das diferentes simulações efetuadas recorrendo ao programa PSIM. A parametrização do sistema aplicada a esta análise está descrita no capítulo 4.

Começou-se por simular o sistema de balanceamento a nível ideal para diferentes conjuntos de células e, posteriormente, foram adicionadas as não idealidades. Os resultados apresentados ao longo deste capítulo visam confrontar as diferenças e os elementos decisivos mais importantes de acordo com cada resultado. Isto é, face a diferentes abordagens tanto a nível de controlo como a nível da escolha da combinação de células para transferência de energia, são apresentados os diferentes resultados conseguidos.

6.1 Regime permanente

O estudo do funcionamento do sistema em regime permanente tem como principal objetivo demonstrar a adequação do sistema aos objetivos propostos. Isto porque, é em momentos cruciais de funcionamento, como o de descarga e carga da bateria que o sistema de balanceamento mais deverá intervir. Aplicações como os veículos elétricos traduzem facilmente esta importância.

Estes testes são ainda uma ferramenta base para validar o processo de transferência de energia e os algoritmos usados para tal. As simulações apresentadas recorrem a um ramo LC, de valores $3\mu\text{H}$ e $10\mu\text{F}$ respetivamente, tal que a frequência de ressonância é 30kHz .

6.1.1 Duas células

Esta secção destina-se a apresentar os resultados obtidos na simulação do circuito que utiliza duas células em série. Durante o processo de simulação começou-se por testar o circuito ideal de forma a tornar claro o efeito das resistências dos semicondutores e/ou quedas nos díodos. Posteriormente foram feitas diferentes simulações para períodos de comutação distintos.

6.1.1.1 Duas células - ideal

Considerando apenas duas ondas moduladoras para os sinais de comando, complementares entre si e com *duty-cycle* de 50%, projetou-se um algoritmo de controlo que, a partir da sensorização das tensões nas células, decide os caminhos de corrente. Assumiu-se, para este caso, que o circuito se consideraria balanceado a menos de uma diferença de 5mV entre a tensão das células. A Figura 6.1 ilustra os resultados obtidos.

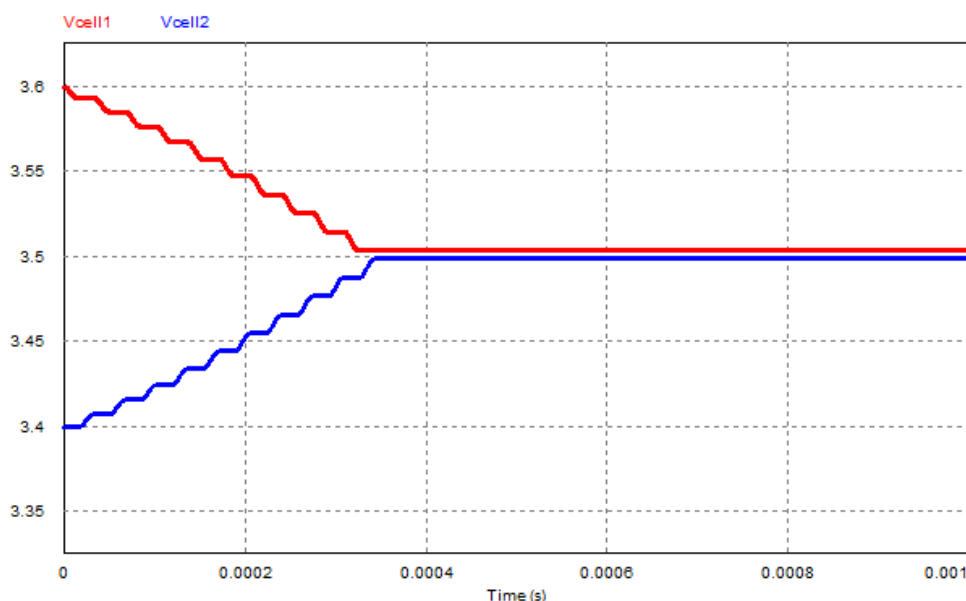
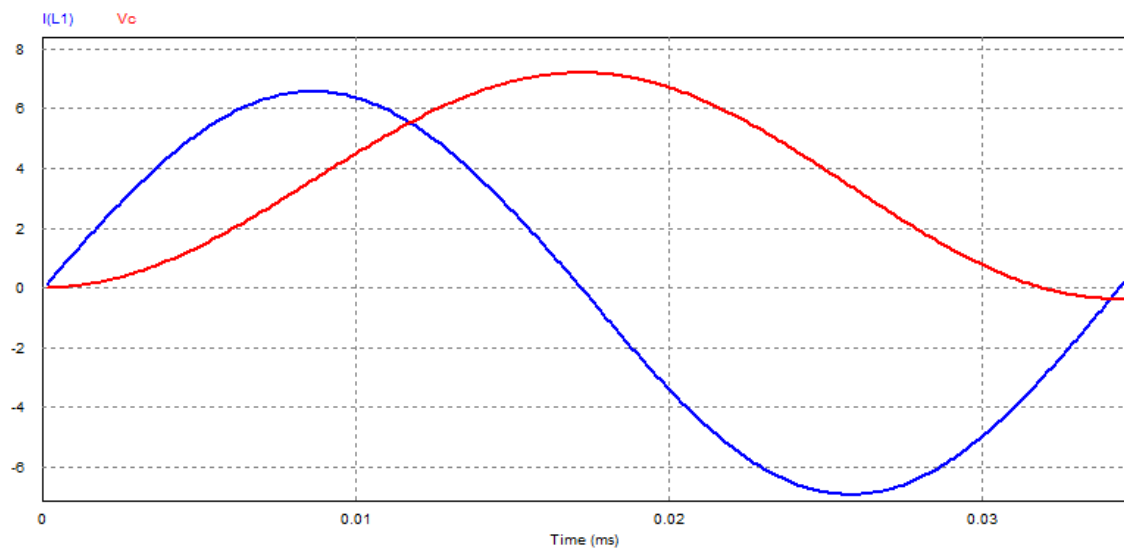


Figura 6.1: Resultado da simulação do circuito de balanceamento ideal para duas células

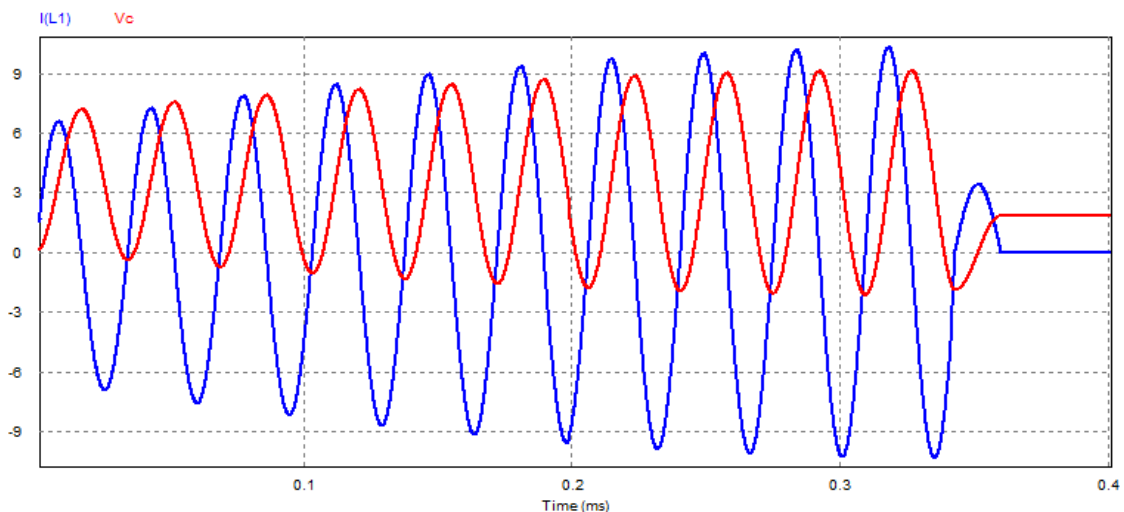
A transferência é, neste caso, efetuada exclusivamente entre uma célula e outra fazendo o sistema transitar entre os modos 2 e 3 da Figura 4.5b e 4.5c.

Considerando então duas células com uma diferença máxima de 200mV de tensão, 3,6V e 3,4V, e assumindo uma transferência do tipo *cell-to-cell*, verificou-se, como seria de esperar, que o valor de tensão máximo que o condensador auxiliar atinge corresponde ao dobro da tensão maior das células, neste caso 7,2V, Figura 6.2a.

Tratando-se de um circuito ideal, desvalorizando portanto elementos resistivos, o valor de tensão do condensador, correspondente ao dobro da tensão da célula de maior carga, é atingido pelo mesmo em cada ciclo de ressonância. Ou seja, durante períodos de carga a tensão duplica e durante períodos de descarga a tensão anula-se, fazendo com que o sistema oscile infinitamente até que se atinja o equilíbrio. A forma de onda da corrente, a azul na Figura 6.2, tenderá a comportar-se de forma equivalente, fazendo corresponder a sua interseção com zero com o valor máximo e mínimo de tensão registado no condensador, Figura 6.2b.



(a)



(b)

Figura 6.2: Tensão no condensador (vermelho) e corrente na bobina(azul)- ideal

6.1.1.2 Duas células - não ideal

A problemática de muitos circuitos elétricos centra-se na introdução de elementos não ideais nos mesmos. Os semicondutores, usados como interruptores, são elementos resistivos que influenciam notoriamente o sistema de balanceamento em estudo.

Assim, e de modo a estudar com a máxima realidade o comportamento do sistema, consideraram-se as resistências associadas ao diodo e transistor, para além daquela associada aos cabos de ligação.

Duty-cycles iguais De forma análoga ao que efetuado no caso anterior, introduziu-se uma queda típica no diodo de 0,6V e uma resistência ON dos semicondutores de 50mΩ

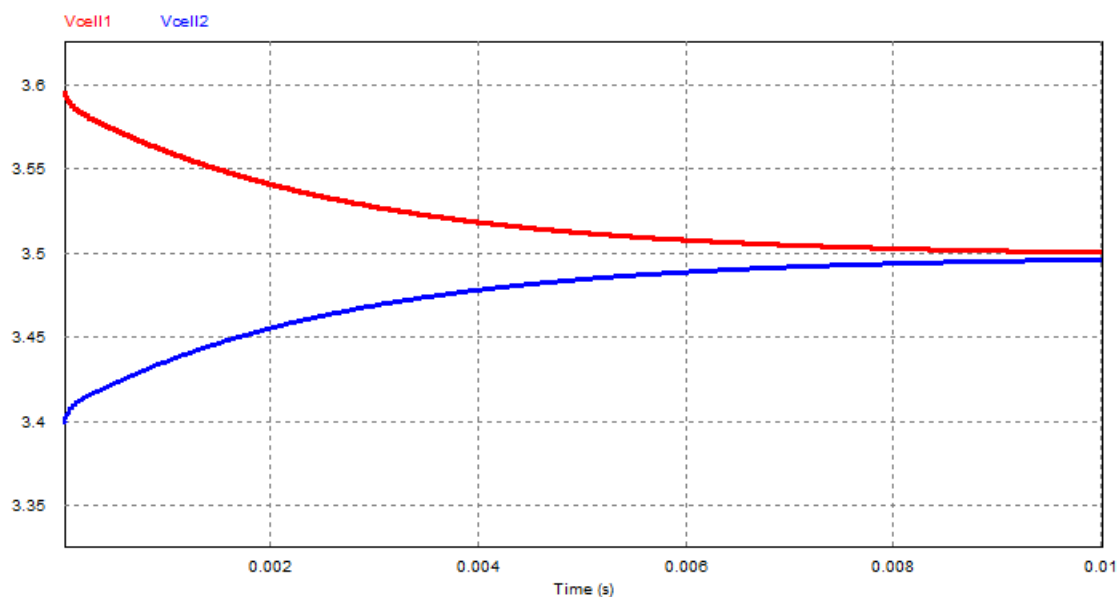


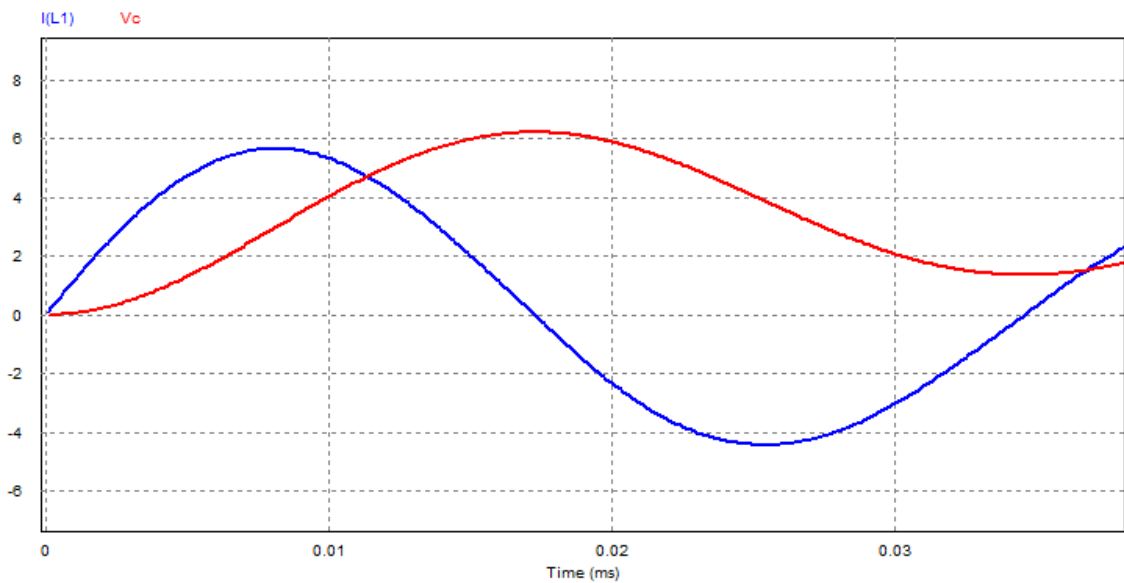
Figura 6.3: Resultado da simulação do circuito de balanceamento não ideal para duas células

Pode ver-se, a partir da Figura 6.3, comparativamente com a Figura 6.1, que o tempo de equalização deste é cerca de trinta vezes superior ao anteriormente apresentado. Note-se que este valor se encontra de acordo com a parametrização da bateria e que 1ms representa aproximadamente 3300 segundos reais.

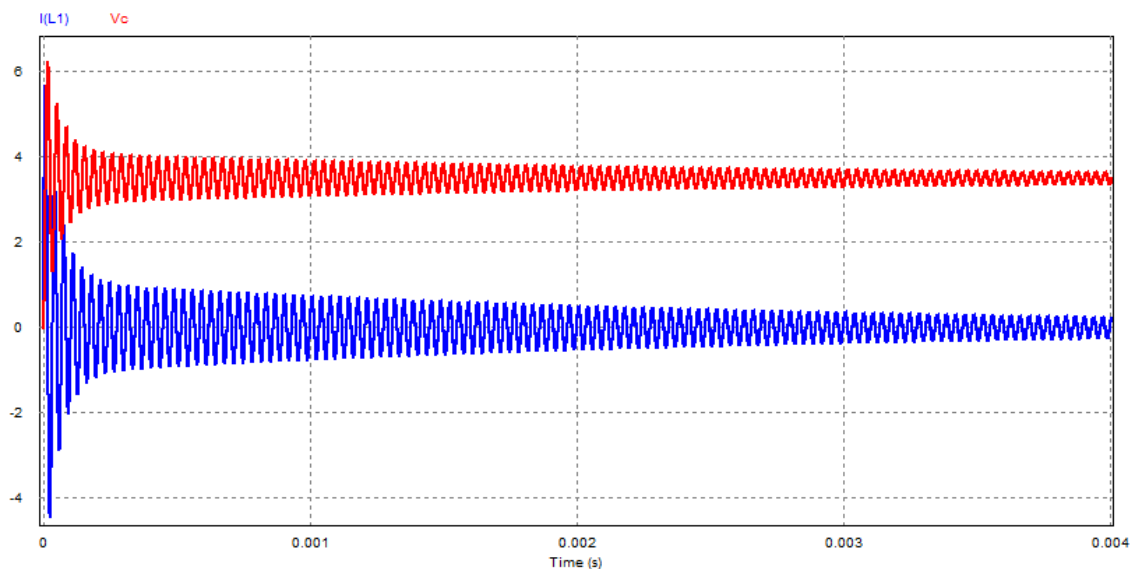
Neste caso, o valor de tensão máximo atingido pelo condensador será dado pelo dobro da tensão da célula de maior carga, menos as quedas de tensão provocadas pelos elementos resistivos e pela tensão inicial do condensador, Figura 6.4a. Assim, a tensão do condensador tenderá a estabilizar rapidamente sobre o valor médio das tensões das duas células envolvidas, isto porque, e como se pode ver na Figura 6.4b, o valor final da tensão do condensador após descarga nunca se anula e portanto parte sempre com um valor inicial diferente de zero, que vai aumentando progressivamente. Já em termos de corrente, a consequência da consideração de elementos resistivos é clara, uma vez que se verifica um decréscimo do valor médio da corrente para 195mA, cerca de 10 vezes inferior àquele considerado idealmente, Figura 6.2b.

O tempo de equalização está diretamente associado à corrente de balanceamento praticada. Por isso, e uma vez considerando o sistema como um sistema RLC, estaremos perante o funcionamento descrito no ponto 3.2 do capítulo 3. Daí, facilmente se conclui que o tempo de equalização exigido é pouco praticável em casos reais.

Por outro lado, a queda de tensão intrínseca aos elementos semicondutores não permite que o equilíbrio seja feito a menos de alguns mV resultado das suas resistências internas e, em casos que não seja possível fazer *shunt* ao diodo essa diferença torna-se maior. Desta forma, foi indispensável procurar soluções que contornassem este problema.



(a)



(b)

Figura 6.4: Tensão no condensador (vermelho) e corrente na bobina(azul)- não ideal

Duty-cycles diferentes Sabe-se que, no primeiro ciclo de carga do condensador a tensão aos seus terminais tende para o dobro da tensão da fonte que o alimenta (uma célula ou o conjunto de células), a menos das quedas nas resistências do caminho. No primeiro ciclo de descarga o condensador parte com esta tensão e é ligado a outra fonte.

A tensão final do condensador será dada pela diferença entre a sua tensão inicial e aquela à qual foi ligado (considerando novamente todas as não idealidades). Deste modo, a descarga do condensador nunca é realizada a 100% e portanto, após o primeiro ciclo de carga, o condensador parte sempre com um nível de tensão inicial. Este facto não permite que a tensão aos terminais do condensador volte a duplicar, prejudicando a dinâmica do sistema de balanceamento proposto.

É por esse motivo que em [34] e [35] se recorrem a estratégias que permitem ao condensador descarregar completamente. O primeiro ([34]) define três modos distintos sendo que um deles se destina a anular a tensão do condensador no final da descarga. Já o segundo ([35]) possibilita a entrada em modo *free-wheeling* que permite ao condensador chegar aos valores de tensão desejados. No entanto, em ambos os processos se destitui a importância do aproveitamento energético, algo que o sistema sob projeto pretende contrariar.

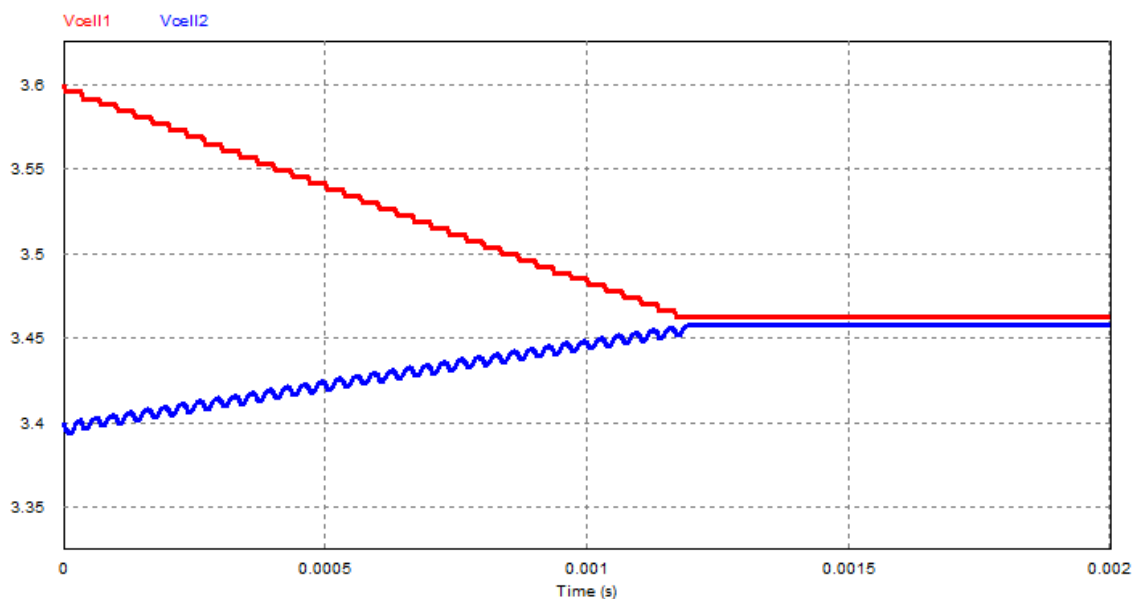
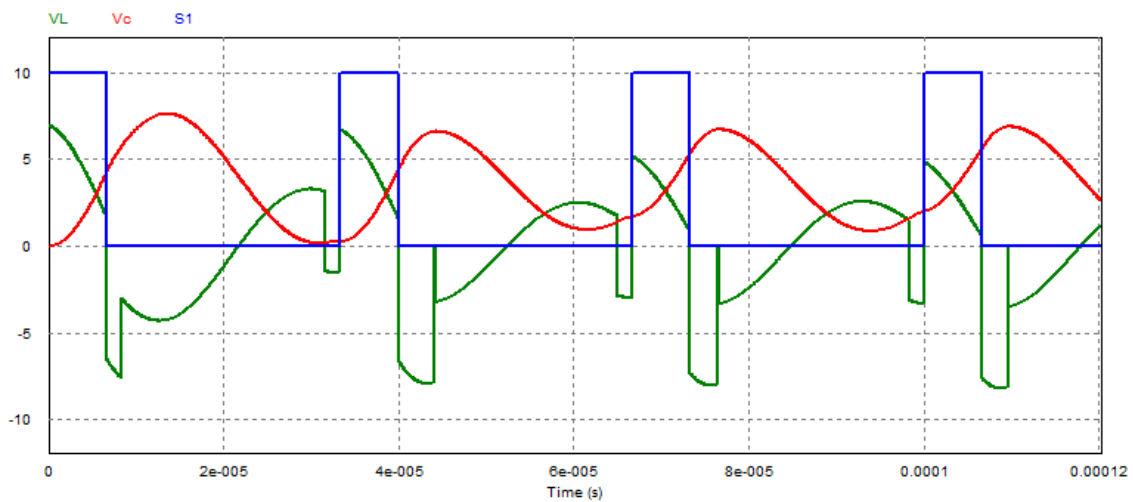


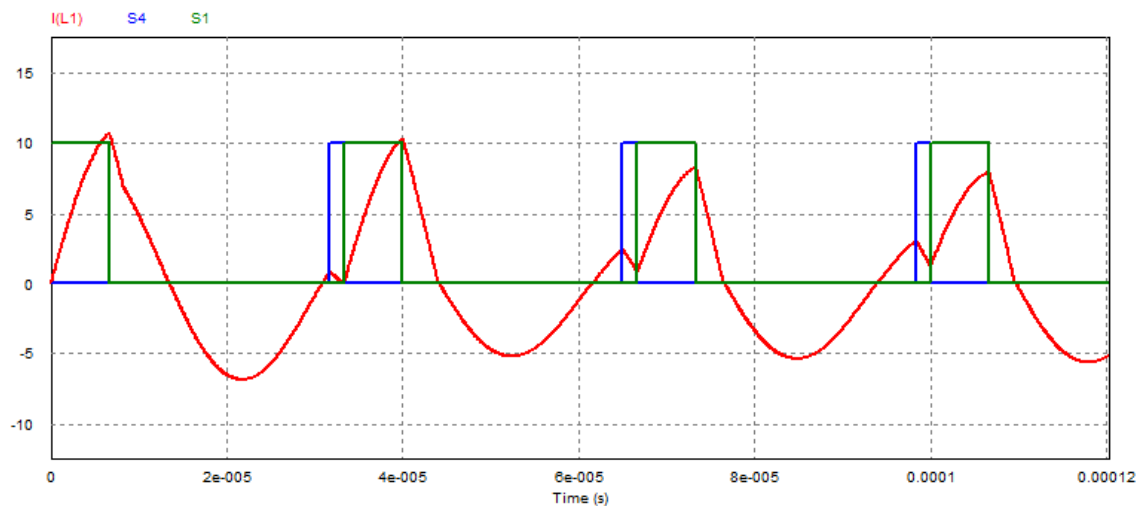
Figura 6.5: Resultado da simulação do circuito de balanceamento não ideal para duas células com algoritmo *pack-to-cell* - duty 20%/70%

Assim decidiu-se usar, em todos os momentos de carga, as duas células para carregar o condensador e no momento de descarga transferir a energia para a célula de menor tensão (*pack-to-cell*). Tal permitiria que a tensão do condensador fosse sempre mais elevada que a da célula para a qual descarrega e contornar o principal problema associado às resistências internas dos semicondutores, de não possibilitarem o equilíbrio a menos da queda de tensão que impõe. A corrente de balanceamento seria obrigatoriamente maior acelerando o processo de equalização.

Comparativamente com a simulação representada na Figura 6.3 o tempo do balanceamento visível na Figura 6.5, para diferenças de tensão equivalentes, é notoriamente mais curto. No entanto, o valor para o qual a tensão de cada uma das células tende é mais baixo o que denota maiores perdas (quer de condução quer de comutação) comprometendo o rendimento desta abordagem. Por outro lado, adotando esta estratégia, a comutação dos transístores não será feita a corrente nula, depreciando esta possibilidade vantajosa. O resultado ilustrado pela Figura 6.5 resulta de uma combinação de *duty-cycles* de 20% e 70% para os momentos de carga e descarga do condensador, respetivamente. Assim, e de acordo com o que já foi explicado, ao estreitar o período de carga, as comutações serão efetuadas para valores de corrente elevados, o que se reflete nas perdas e portanto no rendimento do sistema.



(a) Sinal de comando S_1 (azul), responsável pela carga do condensador VS variação da tensão no condensador (vermelho), na bobina (verde)



(b) Sinal de comando S_1 (a azul, momento de carga do condensador) e S_4 (a verde, *free-wheeling mode*) VS variação da corrente na bobina (vermelho)

Figura 6.6: Corrente e Tensão em momentos de variação do *duty-cycle*

A tensão máxima atingida pelo condensador seria, no caso de se tratar de um circuito ideal igual ao dobro da soma das tensões das células uma vez que se opta por usar as duas células para carregar o condensador. Neste caso, o valor de pico da tensão no condensador é 7,6V, a vermelho na Figura 6.6a. Este valor aproxima-se do valor dado quando se usa apenas uma célula, no caso ideal. Esta comparação justifica a utilização das duas células para carregar o condensador, por permitir atingir valores de tensão mais elevados. Esta característica promove diferenças de tensão maiores nos momentos de transferência de energia e por isso corrente também maiores que, em conjunto, aceleram o processo de equalização.

Note-se ainda pela Figura 6.6a que mesmo após o final do momento de carga, ditado pelo sinal S_1 (a azul), a tensão no condensador (a vermelho) cresce ligeiramente. Este comportamento relaciona-se diretamente com a inversão do sentido da corrente na bobina (Figura 6.6b, a verme-

lho)que, uma vez impossibilitada de mudar instantaneamente, faz libertar a energia armazenada na mesma para o condensador, elevando a sua tensão. A Figura 6.6b permite verificar que a comutação será feita para valores de corrente elevados o que terá efeito direto e negativo nas perdas. Por outro lado permite ver que o período imediatamente antes da carga do condensador, S4 (a verde), permite baixar a corrente para perto de zero e assim equiparar o comportamento da corrente àquele de um circuito ideal.

Duty-cycle variável De forma a melhor analisar o comportamento do sistema sob o efeito de diferentes combinações de *duty-cycle* para os respetivos sinais de controlo foi realizada uma simulação que contempla variações nos mesmos. Foram adotados dois *duty-cycles* distintos no decorrer da simulação de acordo com o que documenta a Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Valores de duty-cycle usados na simulação

Sinal	Combinação 1		Combinação 2	
	duty-cycle	desfasamento (ϕ)	duty-cycle	desfasamento (ϕ)
Carga	0,15	0,0	0,4	0,0
Hold_1	0,05	54,0	0,05	144,0
Descarga	0,6	180,0	0,5	162,0
Hold_2	0,2	288,0	0,05	342,0

O comportamento das tensões aos terminais das duas células é ilustrado pela Figura 6.7, na qual se identificam com clareza os momentos de transição entre os diferentes *duty-cycles* propostos.

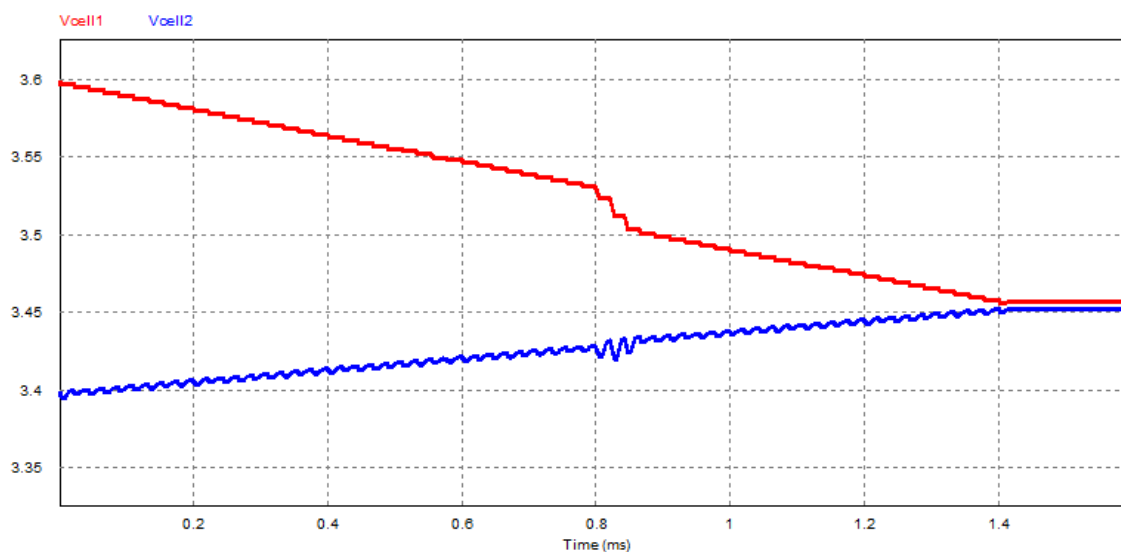


Figura 6.7: Resultado da simulação do circuito de balanceamento não ideal para duas células com algoritmo *pack-to-cell* - dutys variáveis

A variação da tensão das células para os diferentes momentos é significativa, principalmente quando associada à tensão aos terminais do condensador e à corrente percorrida na bobina.

Os momentos de transição correspondem a uma combinação do tipo : $1 \rightarrow 2 \rightarrow 1$. A combinação 2 foi mantida durante um período de tempo suficientemente grande para se notar a sua atuação.

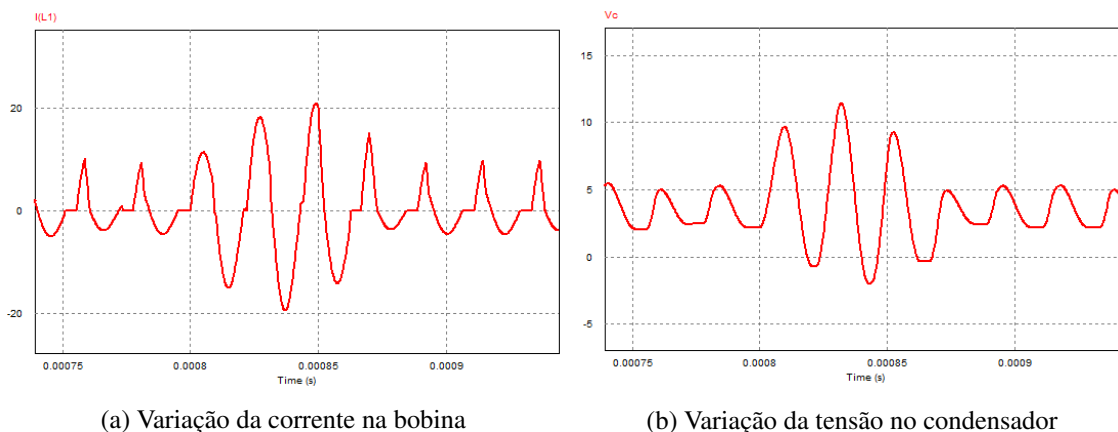


Figura 6.8: Corrente e Tensão em momentos de variação do *duty-cycle*

Pode ver-se na Figura 6.8 que esta transição provoca uma variação bastante significativa, tanto nos valores de corrente na bobina como nos de tensão do condensador.

Inicia-se o processo de balanceamento dando notoriedade ao processo de descarga do condensador e portanto alongando o sinal responsável pelo seu período. Os valores de tensão do mesmo oscilam entre 5V e 2V, fazendo corresponder valores de corrente na bobina entre os 10A e os -5A.

A evidência clara da variação sob os resultados, diretamente associados aos principais responsáveis por definir os parâmetros de tempo de equalização e rendimento, tensão e corrente, traduzem a pertinência desta estratégia.

No entanto, e por análise breve da Figura 6.7, pode ver-se que a cadência com que a célula 1 é descarregada é maior que aquela com que a célula 2 é carregada. No momento de transição, entre valores de *duty-cycle* distintos, esta diferença acentua-se. Por isso, a precisão de comutação entre um estado de carga e descarga, diretamente relacionada com os períodos estipulados para os mesmos é, por si só, um exercício complexo, que exige um algoritmo mais elaborado e direcionado para as exigências de tensão e corrente do sistema.

6.1.2 Três células

De forma semelhante ao que foi realizado para duas células em série, a topologia de três células em série foi testada tendo em conta as restrições que a mesma impõe.

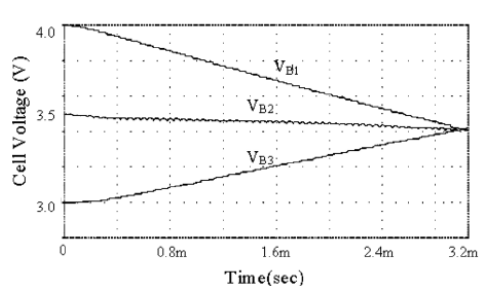
Foi comparado o resultado obtido na simulação ideal deste esquemático com os resultados apresentados em [36]. Para tal, o sistema foi parametrizado de acordo com a referência de comparação. A tabela 6.2 permite uma comparação abrangente, listando as parametrizações aplicadas.

O sistema de balanceamento atua assumindo-se uma diferença máxima de tensão entre células de 1V (célula 1, 4V e célula 3, 3V) e uma diferença parcial de 500mV entre células adjacentes.

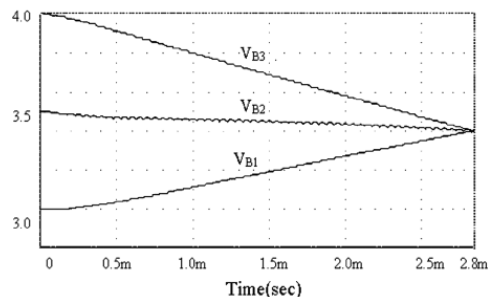
Tabela 6.2: Comparação entre os métodos simulados em [36] e o sistema aqui projetado

	<i>Buck-Boost QRZCS</i>	<i>Modified QRZCS</i>	<i>Flying LC</i>
Parâmetros	L=273uH & Li=Lj=59.2uH C=1.66uF	L=273uH & Lr=59.2uH C=1.66uF	L=9.2uH C=9.91uF
Componentes	4 MOSFETs 4 díodos 6 bobinas 2 condensadores	4 MOSFETs 2 bobinas 2 condensadores	12 MOSFETs 1 bobina 1 condensador
Frequência	16.67kHz	16.67kHz	16.67kHz
Corrente média	0.95A	1.07A	5.93 A
Tempo de Equalização	3.6ms	[2.8 3.2] ms	0.71ms
Transferência entre células	Adjacentes	Adjacentes	Quaisquer
MOSFETs ativos	2	2	4

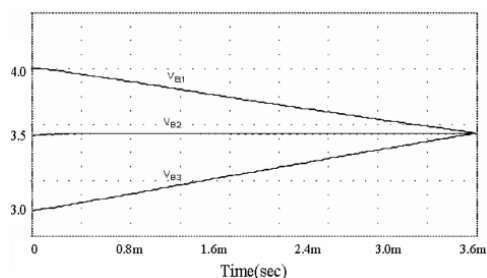
As Figuras 6.9a, 6.9b e 6.9c apresentam o comportamento dos sistemas sob comparação.



(a) Buck-Boost Equalizer



(b) Modified QRZCS equalizer



(c) Buck-boost QRZCS equalizer

Figura 6.9: Resultados da simulação de três sistemas de balanceamento distintos em steady-state, para variação máxima de 1V

A Figura 6.10a mostra os resultados obtidos pelo sistema desenvolvido, considerando os parâmetros da Tabela 6.2 e permite uma comparação paralela com os apresentados pela Figura 6.9.

Desta análise, o sistema de três células projetado, destaca-se positivamente pela rapidez de equalização. Embora ideal, apresenta resultados de simulação superiores, isto é, o tempo de equalização é cerca de três a cinco vezes menor que os propostos em [36]. Já em termos de rendimento,

o mesmo sistema apresenta fraquezas devido ao número de MOSFETs que exige ligados, a cada ciclo de transferência de energia.

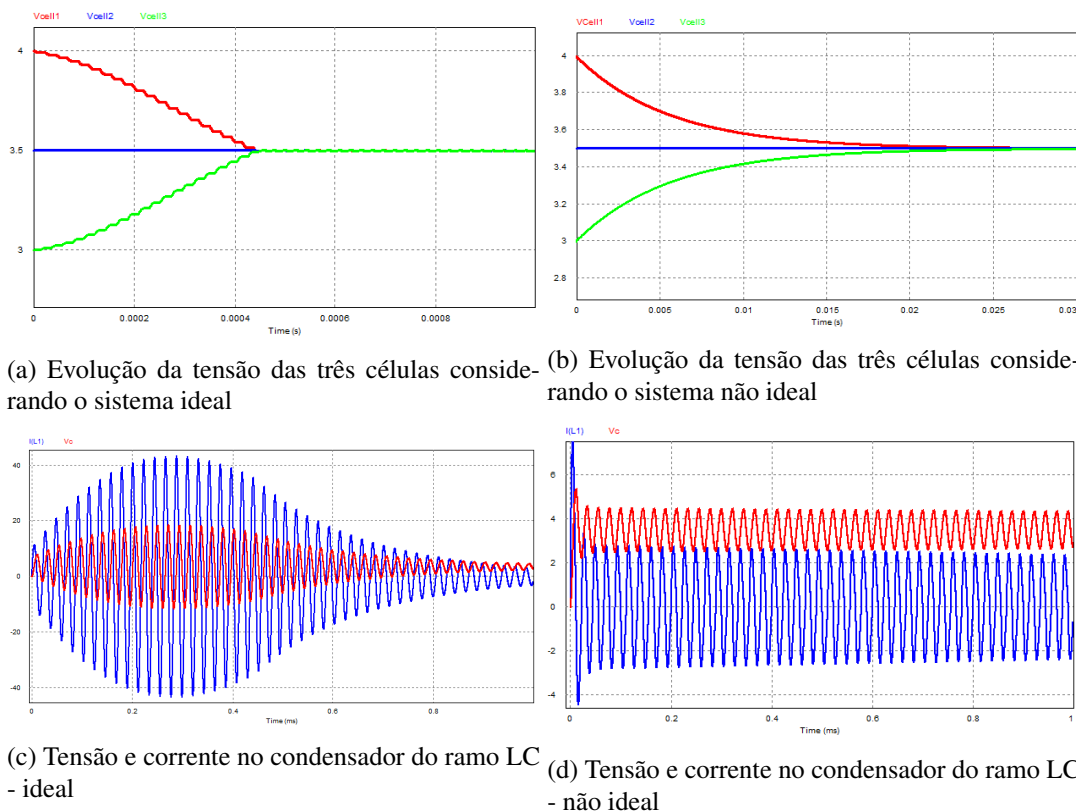


Figura 6.10: Resultados da simulação do circuito de três células em série ideal e não ideal

A Figura 6.10b mostra o comportamento do sistema quando são inseridas as resistências dos semicondutores e uma resistência representativa daquela adicionada pelos fios de ligação. A principal diferença centra-se no tempo que o sistema leva até que as tensões entre células sejam iguais. As Figuras 6.10c e 6.10d justificam essa diferença pelos níveis de tensão do condensador e corrente na bobina, do ramo LC.

Por outro lado, e considerando a introdução de elementos resistivos, a capacidade de balanceamento estará limitada pela queda de tensão nos semicondutores, que ditará a diferença mínima dos valores de tensão entre células. Note-se que, a inversão da tensão aos terminais do condensador, no caso exposto na Figura 6.10c, faz com que a tensão chegue a ultrapassar o dobro do valor da célula a ele ligada. Isto porque, também ele, se torna equivalente a uma fonte de tensão adicional.

6.1.3 Seis células

A topologia desenhada para as seis células em série surge como alternativa estratégica àquela desenhada para apenas três. Isto é, como já foi referido no capítulo 4 é possível através deste esquema construir séries de células com o intuito de aumentar a tensão final do condensador auxiliar.

A simulação foi efetuada admitindo que apenas se construíam séries de três células (representadas pela linha contínua da Figura 5.2), seguindo um algoritmo do género:

Algoritmo 1: Seleção das células envolvidas nas transferências de energia

Start : Identifica célula de maior e menor tensão

1: Se carga

 Seleciona série que englobe célula de maior tensão

 Mantém série durante todo o ciclo de carga

2: Se descarga

 Seleciona célula de menor tensão

 Mantém transferência de energia para essa célula durante todo o ciclo

Return

O resultado ilustrado pela Figura 6.12, mostra a resposta do sistema quando aplicado a uma série de seis células em que a célula de maior tensão apresenta uma diferença máxima de 500mV para aquela de menor tensão, e em que as células adjacentes se diferenciam em 100mV.

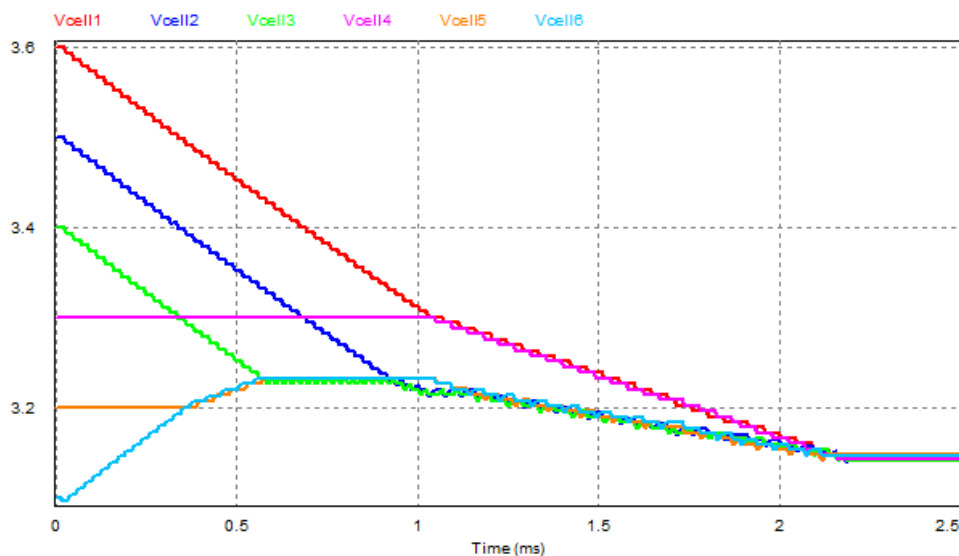


Figura 6.11: Resultado da simulação do circuito de balanceamento para seis células aplicando o Algoritmo 1

A utilização de um conjunto de 3 células para carregar o condensador faz com que o pico de tensão, mesmo sob efeito dos elementos resistivos, seja significativamente alto (cerca de 10V) para promover transferências de energia rápidas, registando valores de pico de corrente na ordem dos 10A e valores médios na ordem dos 4A.

No entanto, e retornando para as séries que o esquema das seis células possibilita, conclui-se que haverá momentos críticos em que não será possível selecionar uma série sem comprometer o objetivo do sistema. Isto porque, a partir de determinado momento não haverá nenhuma série de

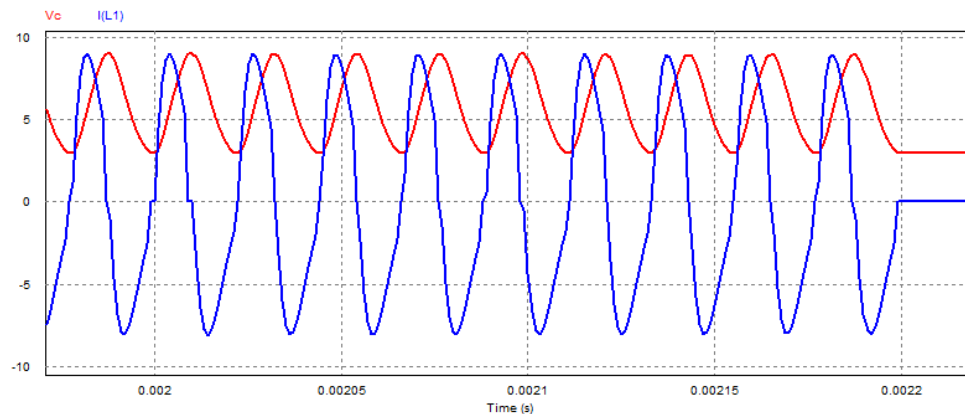


Figura 6.12: Tensão no condensador aplicando Algoritmo 1

células que não englobe a célula de menor tensão. Tal deve-se ao facto de não haver nenhuma série de células cuja utilização para carregamento do condensador auxiliar não torne uma dessas células na mínima, e por isso alvo do ciclo seguinte de descarga do condensador. No entanto, e devido às não idealidades do sistema, embora receba energia, a tensão dessa célula não é compensada o suficiente e o sistema entra num modo essencialmente dissipativo em relação aos níveis de tensão.

Embora a tensão aos terminais da célula decresça, em termos energéticos os valores envolvidos em ambos os modos são equivalentes, a menos das perdas geradas pelos elementos resistivos.

Analisando um momento qualquer de carga e descarga verificou-se que a variação de tensão ΔV seria equivalente para as células tanto envolvidas na carga, como na descarga.

Assim sendo, uma célula ao estar envolvida em ambos os momentos não verá a sua tensão alterada embora a sua energia aumente pois, embora ceda uma porção dessa energia, recebe o equivalente de três.

De forma a contornar este resultado, de forma adaptada do algoritmo 1, surge algoritmo 2.

Algoritmo 2: Seleção das células envolvidas nas transferências de energia

Start : Identifica célula de maior e menor tensão

1: Se carga

Seleciona série que englobe célula de maior tensão

Série engloba a de menor tensão?

Se não: Mantém série durante todo o ciclo de carga

Se sim: Seleciona apenas a célula de maior tensão e mantém seleção até final do ciclo de carga

2: Se descarga

Seleciona célula de menor tensão

Mantém transferência de energia para essa célula durante todo o ciclo

Return

Passou assim a ser possível transitar entre os dois modos de transferência: série-célula e célula-célula (ao estilo de *pack-to-cell* e *cell-to-cell*, respetivamente). A Figura 6.13 mostra o comporta-

mento do sistema sob controlo do Algoritmo 2 e realça essencialmente a transição entre os dois modos a par da velocidade de ambas, carga e descarga das células.

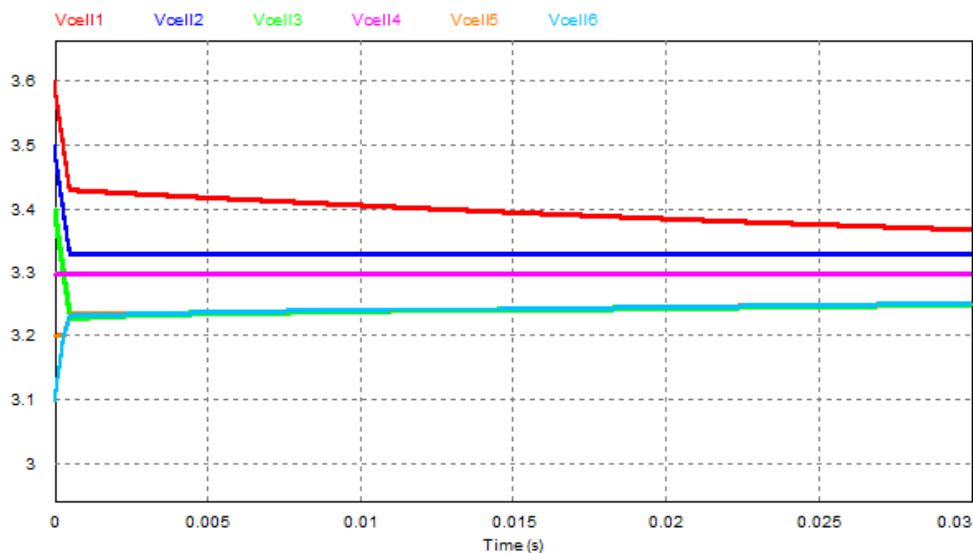


Figura 6.13: Resultado da simulação do circuito de balanceamento para seis células

Os valores de corrente e tensão que se registam, respetivamente na bobina e no condensador do ramo auxiliar, são equiparados aos registados quando se adota o algoritmo 1 até ao momento em que se transita entre um modo de carga e outro. Nesse momento estes valores sofrem uma diminuição significativa (os valores da corrente atingem picos de $200mA$ e os valores de tensão picos de $3,3V$) o que torna o processo extremamente lento.

De forma a avaliar a pertinência deste esquema funcionando sob regime permanente aplicou-se o esquema das três células, estendendo-o a seis células.

Assim, e fazendo uma análise paralela entre as Figuras 6.13 e 6.14, pode concluir-se que o esquema alternativo das seis células não apresenta vantagens a longo prazo sob este regime de funcionamento, tornando o processo mais demorado.

Os valores tanto de tensão como de corrente obtidos no condensador e na bobina, respetivamente, são significativamente superiores no caso onde se adotam séries. Essa escolha justifica o resultado obtido por aumentar 3 vezes a tensão colocada aos terminais do ramo LC, menos a queda associada aos semicondutores e fios de ligação.

No entanto, é de salientar que nenhum dos algoritmos aqui aplicados é considerado muito complexo, e que por isso um estudo mais aprofundado deste sistema, alvo de um algoritmo em malha fechada do género do exemplificado no capítulo 5, poderia contornar esta situação.

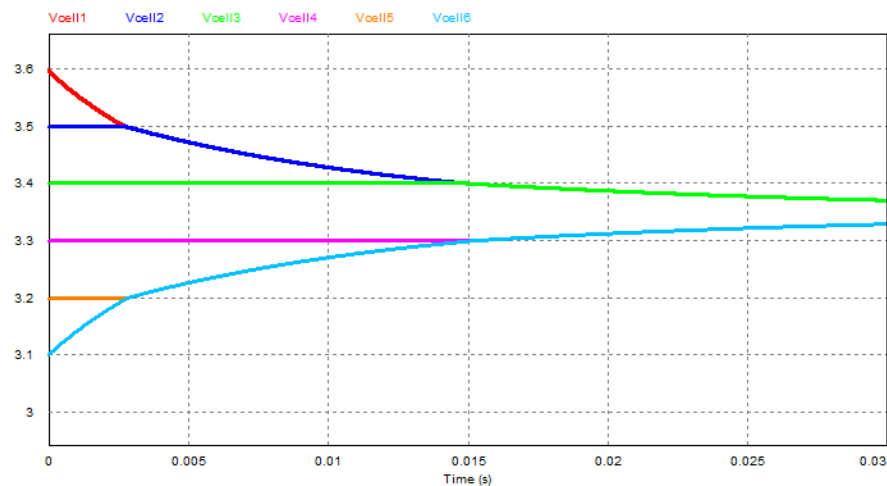


Figura 6.14: Resultado da simulação do circuito de balanceamento para seis células aplicando o esquema da Figura 4.2

6.2 Descarga

A descarga de uma bateria (sem considerar a sua auto-descarga) é o modo que permite, ao sistema que integra, tirar proveito da sua energia. Assim, um processo deste tipo mais eficiente permitirá um melhor aproveitamento da mesma.

O sistema de balanceamento tem por isso um papel fundamental no sentido de atingir este objetivo. O esquema das duas células em série não será tido em conta aquando desta análise por se considerar redundante, face ao estudo das restantes, três e seis células em série, respetivamente.

6.2.1 Três células

As simulações foram efetuadas de forma a validar o projeto do sistema em estudo aquando um momento de descarga, assumindo uma corrente contínua de 1 A. Assumiu-se, para este teste, que o sistema partia com tensões de 3,7 V, 3,5V e 3,2V. A tensão final de cada uma das células individualmente não deveria ultrapassar o seu limite inferior, isto é cerca de 2,1V.

Serve este teste para comprovar esta imposição e mostrar que fazendo atuar um sistema de balanceamento será possível usufruir da energia da bateria de forma otimizada.

A tensão aos terminais de condensador acompanha o traçado das tensões das células, denotando o estreitamento expectável da sua oscilação, com a aproximação ao equilíbrio das tensões.

Por análise dos resultados expostos pode-se verificar que o comportamento descrito pela Figura 6.15 face àquele descrito pela Figura 6.16 justifica o emprego de sistemas de balanceamento e as vantagens que a sua prática acarreta. Note-se pela Figura 6.16 que as células 1 e 2 apresentam valores de tensão em 500mV e 300mV superiores à célula 3, respetivamente. Esta diferença é

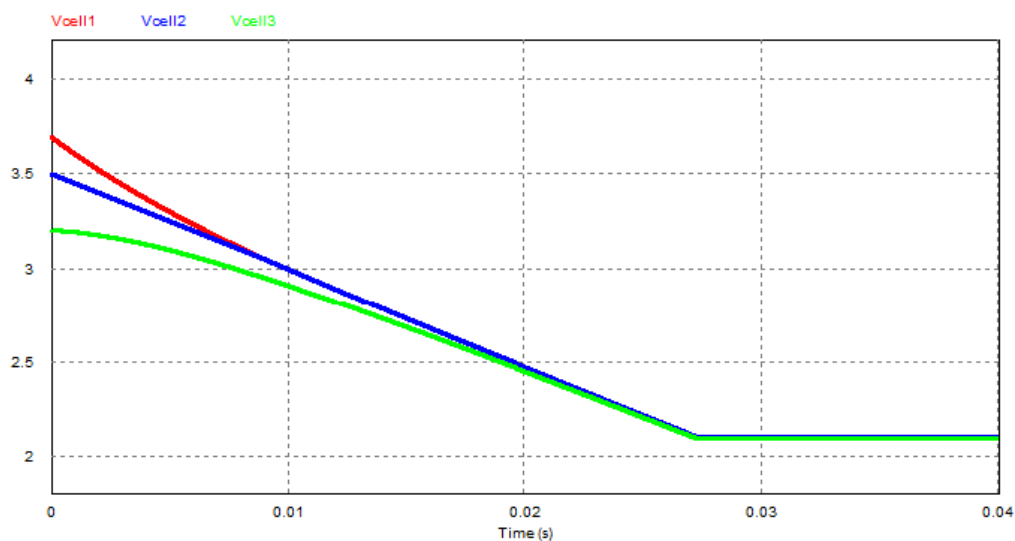


Figura 6.15: Descarga de uma bateria de três células sob efeito do sistema de balanceamento

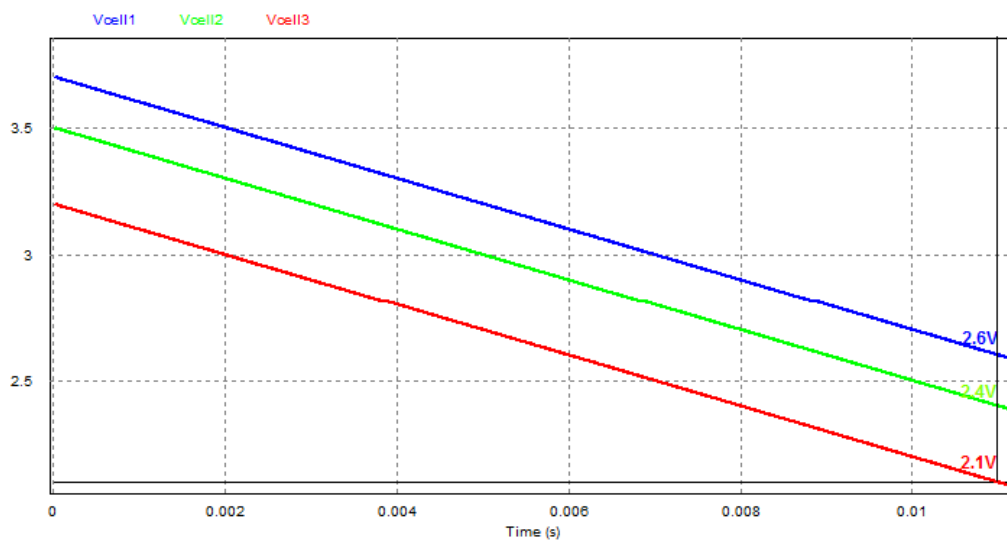


Figura 6.16: Descarga de uma bateria de três células não balanceada

mantida durante todo o processo de descarga impossibilitando um aproveitamento ótimo de toda a bateria.

Assim, para situações equivalentes, uma bateria que não disponha de um sistema de balanceamento associado só irá, em momentos de descarga, utilizar a máxima capacidade de uma das células, aquela que apresentar menor tensão, desprezando a capacidade das restantes.

6.2.2 Seis células

O mesmo teste, realizado para as seis células em série, serve essencialmente para mostrar a resposta do sistema numa situação mais crítica, isto é, que envolva um maior número de células.

As seis células aqui envolvidas partem de tensões que diferem no máximo 500mV.

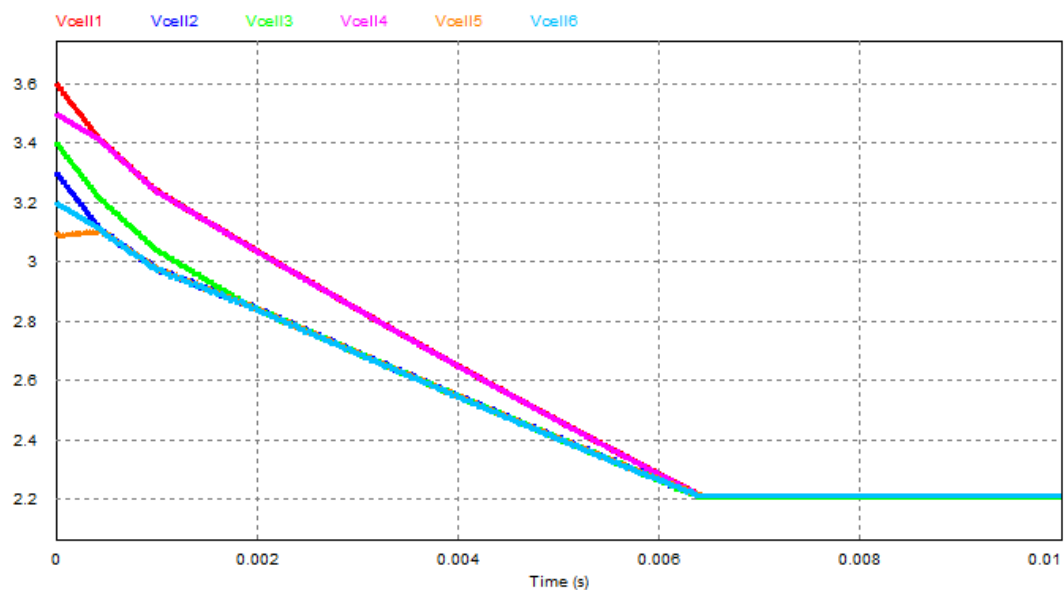


Figura 6.17: Tensão das seis células em série sujeitas a uma corrente de descarga de 1 A

O algoritmo empregue durante a simulação tira proveito das séries de células em todos os momentos de carga do condensador auxiliar (Algoritmo 1), e por isso apresenta, como já foi referido na secção anterior, uma taxa natural de descarga. Tal característica, como é visível quando comparadas as Figuras 6.15 e 6.17, torna o processo de descarga mais rápido, o que se traduz numa desvantagem clara do esquema estudado para as seis células em série.

As células serão percorridas em todos os momentos por uma corrente de -1A. Esta corrente sofrerá alterações mediante a intervenção da célula respetiva em momentos de carga e/ou descarga do condensador.

6.3 Carregamento

Em casos de carregamento da bateria, os sistemas de balanceamento surgem como aceleradores do processo. Isto é, garantindo que as células estão com a mesma carga, o carregamento é efetuado ao mesmo ritmo para todas e os níveis máximos são atingidos mais rapidamente. Considerou-se, para todos os testes uma corrente de carga de 1A e um limite máximo de tensão de 4,2V (característico de células de iões de lítio).

Deverá salientar-se que é ponto fulcral do sistema de balanceamento garantir que se alcança a equalização antes que se atinjam os valores limite estipulados. Assim, será importante assegurar os níveis de corrente com os quais tal acontece.

6.3.1 Três células

Semelhante ao que foi feito para o caso da descarga, foi efetuado um estudo do comportamento de três células em série sob efeito de uma corrente de carregamento.

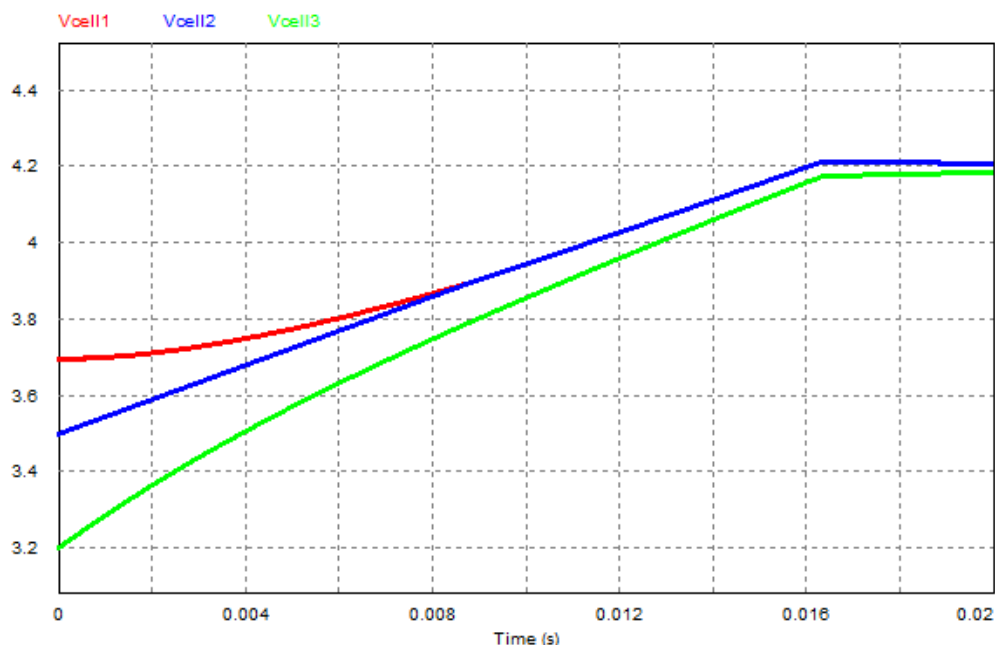


Figura 6.18: Resultado da simulação do circuito de balanceamento para três células - 1A corrente de carregamento

Por análise da Figura 6.18 e uma vez mais avaliando o sistema de balanceamento, agora sob ação de um regime de carga, denotam-se as vantagens, ou seja atinge-se o equilíbrio em tempo útil tornando possível utilizar a energia de forma eficiente.

A corrente de balanceamento apresenta um valor médio na ordem dos 300mA o que se traduz num valor máximo de 1,3A durante o processo de carregamento nas as células envolvidas nos diferentes momentos do balanceamento.

6.3.2 Seis células

Novamente, a simulação de um conjunto de seis células em série, em modo de carregamento, pretende demonstrar a resposta do sistema de balanceamento quando se adota este esquema como alternativa à extensão do aplicado às três células (Figura 4.2).

É de certa forma óbvio que o carregamento de seis células face a um de três células tende a ser mais lento. Todavia, os resultados da Figura 6.19 contrariam essa tendência, justificada pela possibilidade de criar séries de células a partir desta nova topologia adotada.

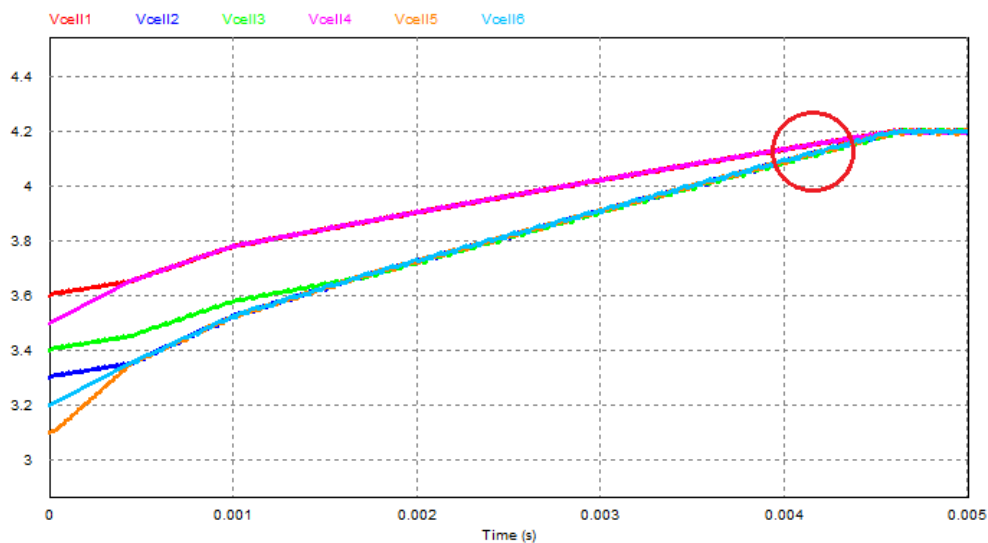


Figura 6.19: Resultado da simulação do circuito de balanceamento para seis células - 1A corrente de carregamento

As seis células em série atingem o equilíbrio praticamente a par do limite máximo estipulado de tensão, e ao fim de 0,005 segundos de simulação. Esta bateria, mesmo apresentando maior capacidade que uma com apenas 3 células, apresenta um carregamento 4 vezes mais rápido.

A Figura 6.20 mostra de forma mais pormenorizada as transferências de energia entre células. As células de maior tensão apresentam um traçado semelhante, distinguindo momentos de inatividade, isto é, de declive positivo onde apenas atua a corrente de carregamento e momentos de cedência de energia, de declive negativo.

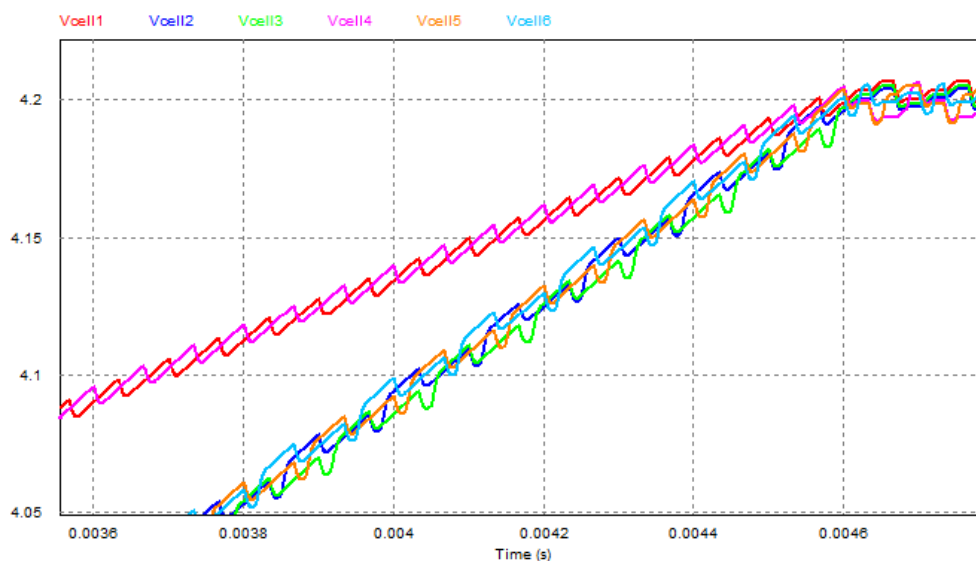


Figura 6.20: Ampliação da zona marcada na Figura 6.19

Estes resultados tornam a topologia aplicada às seis células (Figura 4.3) bastante promissora quando aplicada a regimes de carregamento.

A criação de séries de três células faz com que a taxa de carga ou descarga de cada uma dessas células, seja maior que aquele onde apenas se usa uma célula como interveniente para cada um dos modos.

6.4 Conclusão

O projeto e posterior conceção de um sistema requer que, em ambiente de simulação, se criem situações realistas do circuito de modo a melhor prever o seu funcionamento em regime experimental. As baterias são habitualmente estudadas segundo três estados distintos: o de regime permanente, o de descarga e o de carregamento.

Estudar o comportamento de um sistema de balanceamento aplicado a uma bateria sob o efeito de cada um destes estados é matéria indispensável para o validar.

O primeiro é o estado menos importante de uma bateria típica e aquele em que os efeitos do balanceamento são menos acentuados.

Os que se seguem, e que representam o funcionamento dinâmico que uma bateria normalmente assume, carga ou descarga, demonstram a adequabilidade de um sistema de balanceamento.

Os resultados obtidos ao longo deste capítulo permitem concluir acerca da eficácia dos três esquemas propostos no capítulo 4 para os três estados de funcionamento considerados.

Em regime permanente, e sob um algoritmo de controlo mais complexo, o circuito de das duas células (Figura 4.1) destaca-se pela maior velocidade de equalização. Já o de três células em série (Figura 4.2), estendida a seis células, justifica a sua aplicação quando comparada diretamente com a topologia alternativa projetada originalmente para seis (Figura 4.3).

Já em termos de carregamento, o esquema das seis células permite um carregamento cerca de quatro vezes mais rápido do que aquele aplicado às três células, que seria naturalmente mais rápido face ao número. No entanto, o mesmo acontece em momentos de descarga, o que neste caso representa uma desvantagem evidente, tornando o esquema aplicado às três células vitorioso.

Da análise dos diferentes resultados em função de regimes de funcionamento diferentes, é possível tirar diferentes ilações sobre a problemática associada a sistemas de balanceamento, e em concreto ao sistema projetado no decorrer desta dissertação:

- Deverá haver um compromisso entre o valor do *duty-cycle* dos sinais de comando, a rapidez de equalização e o rendimento associado ao sistema;

Se a comutação for feita em períodos de corrente não nula, isto é, adotando valores de *duty-cycle* diferentes para os momentos de carga e descarga do condensador auxiliar, o rendimento do sistema será menor face ao aumento direto das perdas de comutação. No entanto, essa mesma estratégia permite ao sistema atingir o equilíbrio mais rapidamente.

- A validação de um sistema deste tipo deverá passar por estudar em pormenor a sua resposta tanto em casos de carga como de descarga.

Poderão surgir diferenças chave que comprometam o funcionamento do sistema face a um estado de carga ou de descarga. A velocidade com que o sistema de balanceamento atua pode contribuir para uma avaliação vantajosa em momentos de carregamento mas, notoriamente desvantajosa em momentos de descarga, que normalmente não se querem acelerados.

Os resultados obtidos permitem tirar conclusões específicas acerca do carácter pertinente do sistema sob análise e desenvolvimento nesta dissertação. O uso de um ramo LC como armazenador de energia permitirá regular os níveis de corrente e tensão de forma intuitiva. Esta regulação está diretamente relacionada com os sinais responsáveis pela comutação dos transístores e com as diferenças de tensão criadas pelos caminhos de corrente propostos.

Finalmente, a Tabela 6.3 permite destacar as vantagens e desvantagens associadas a cada um dos esquemas propostos no capítulo 4 sob diferentes regimes de funcionamento.

Tabela 6.3: Análise comparativa dos resultados para os três esquemas

Esquema	Regime permanente	Descarga	Carregamento
<i>Duas células</i>	Funciona bem quando assume valores de <i>duty-cycle</i> distintos entre os modos de carga e descarga do intermediário. Esta técnica entra no entanto em conflito direto com o rendimento.	-	-
<i>Três células</i>	O processo é extremamente demorado mas a tensão final das células tende para o valor da sua média inicial o que traduz um rendimento próximo dos 100%	Ambos os modos funcionam de forma concordante e conseguem, em tempo útil, isto é, sem ultrapassar os limites de tensão, atingir o equilíbrio.	
<i>Seis células</i>	Embora inicialmente mais rápido é a longo prazo desvantajoso face ao anterior. Para ter um funcionamento competitivo este esquema exige um algoritmo mais complexo e adaptado às várias fases do processo	A descarga, feita aplicando o algoritmo 1 proposto, assume uma taxa acelerada quando comparada com o esquema alternativo (o aplicado às três células) destornando mais uma vez este esquemático.	O carregamento por sua vez assume a mesma aceleração o que neste caso contribui para a saída vitoriosa desta topologia. A sua aplicação permitirá carregamentos mais rápidos ao mesmo tempo que garante o equilíbrio de todas as células

Capítulo 7

Ensaaios práticos

Devidamente simulado o sistema em ambiente computacional, pode partir-se para uma implementação prática com os resultados esperados justamente clarificados. Assim, este capítulo apresenta os resultados obtidos em quatro testes distintos, aplicados a um sistema de duas células em série.

Os resultados centram-se na demonstração do carácter de oscilação do ramo LC aplicado e a sua contribuição no sentido de atingir a equalização entre células.

7.1 Diagrama de blocos

A primeira fase dos ensaios experimentais partiu do desenho da montagem de forma simplificada, recorrendo a um diagrama de blocos.

Desta forma, a implementação prática seguiu o esquema representado na Figura 7.1.

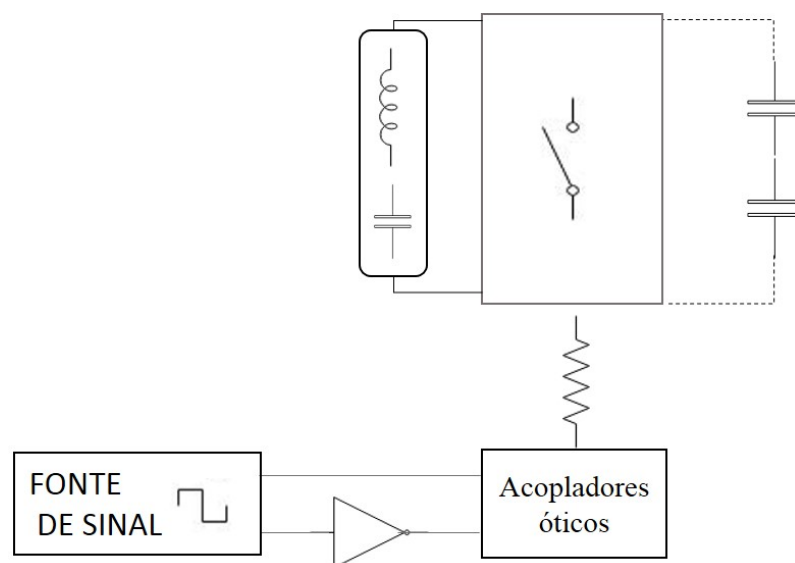


Figura 7.1: Diagrama de blocos ilustrativo da montagem efetuada

A cada um dos blocos representados cabe uma função fundamental na obtenção dos resultados esperados, mantendo a funcionalidade da montagem. Do esquema de blocos é importante referir que a fonte de sinal de comando se encontrava sintonizada com o valor da frequência de ressonância estipulada pelo ramo LC escolhido.

As duas ondas geradas correspondem a 2 ondas complementares (uma diretamente da fonte de sinal e a outra resultante da sua negação, a partir de um circuito integrado próprio), ambas com *duty-cycle* de 50% conforme mostra a Figura 7.2.

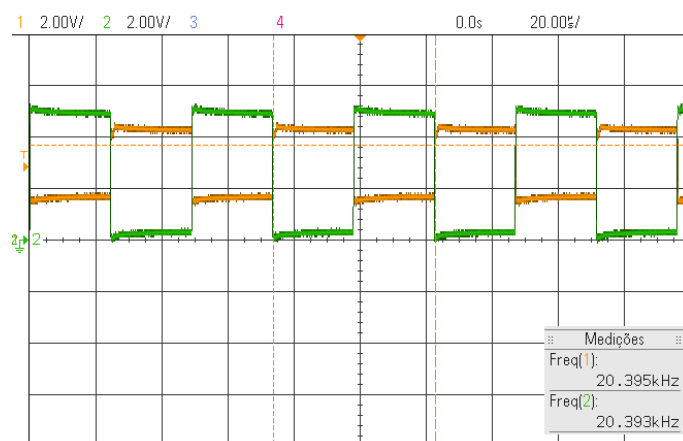


Figura 7.2: Exemplo dos sinais de comando responsáveis por comandar os transístores 1 e 3, e 2 e 4 - (correspondentes ao TESTE 2)

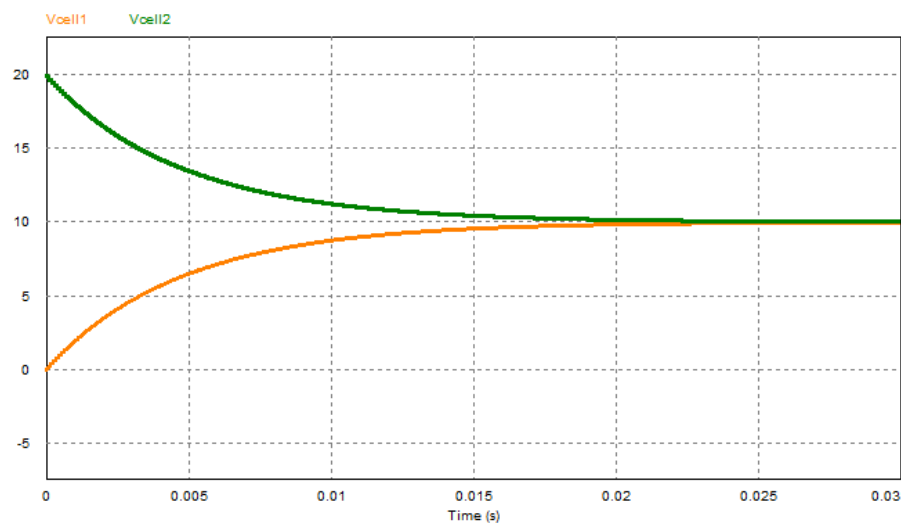
7.2 Resultados

Os resultados presentes nesta secção foram obtidos usando os valores da Tabela 7.1, na qual constam alguns dados de análise relevante.

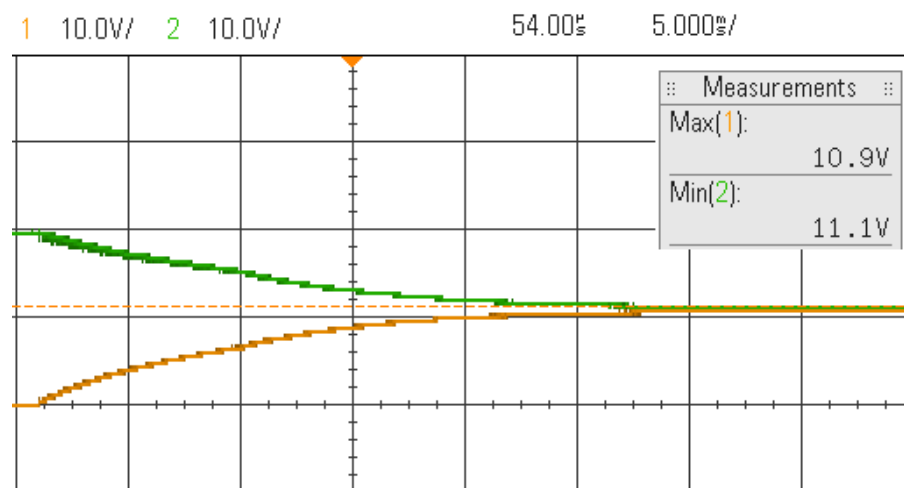
Tabela 7.1: Dados relativos aos resultados experimentais

	Parametrização					Valores					
	Ramo		Bateria		Frequência	Estipulados		Esperados		Obtidos	
	L	C	Ccell1	Ccell2		Vc1	Vc2	Vcmax	Ipk	Vcmax	Ipk
TESTE 1	3uH	10uF	4700uF	4700uF	30kHz	20V	0	40V	36,51 A	32,8V	24,3A
TESTE 2	3uH	20uF	4700uF	4700uF	20,5kHz	20V	0	40V	51,64 A	31V	62,3A
TESTE 3	3uH	5uF	4700uF	4700uF	41kHz	20V	0	40V	25,82 A	41V	25,5A
TESTE 4	3uH	10uF	9400uF	9400uF	30kHz	20V	0	40V	36,51 A	38,1V	42,5A

O primeiro teste, TESTE 1, foi efetuado assumindo características semelhantes às do ambiente de simulação, a fim de melhor prever o comportamento do sistema. A Figura 7.3 permite comparar os resultados computacionais e experimentais.



(a)



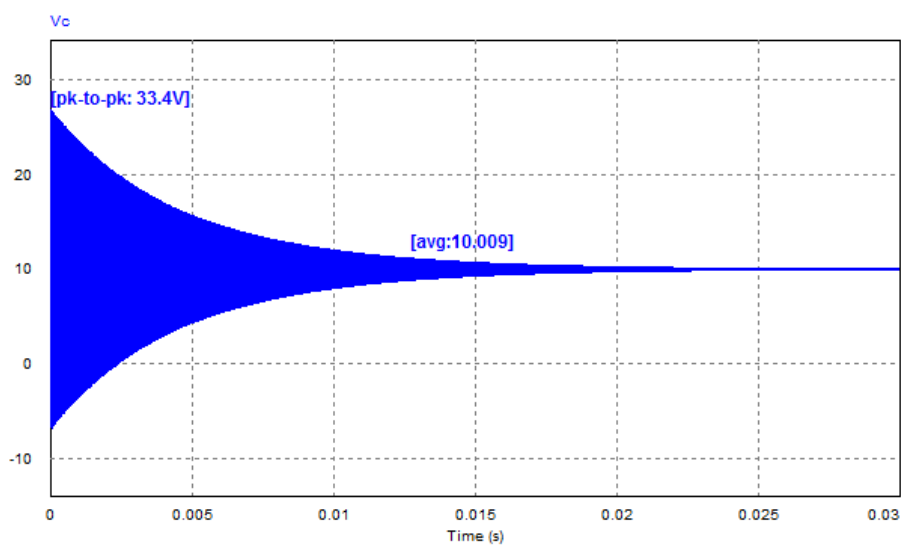
(b)

Figura 7.3: Confronto dos resultados computacionais (a) e práticos (b) relativos à tensão das duas células sob efeito do circuito de balanceamento - TESTE 1

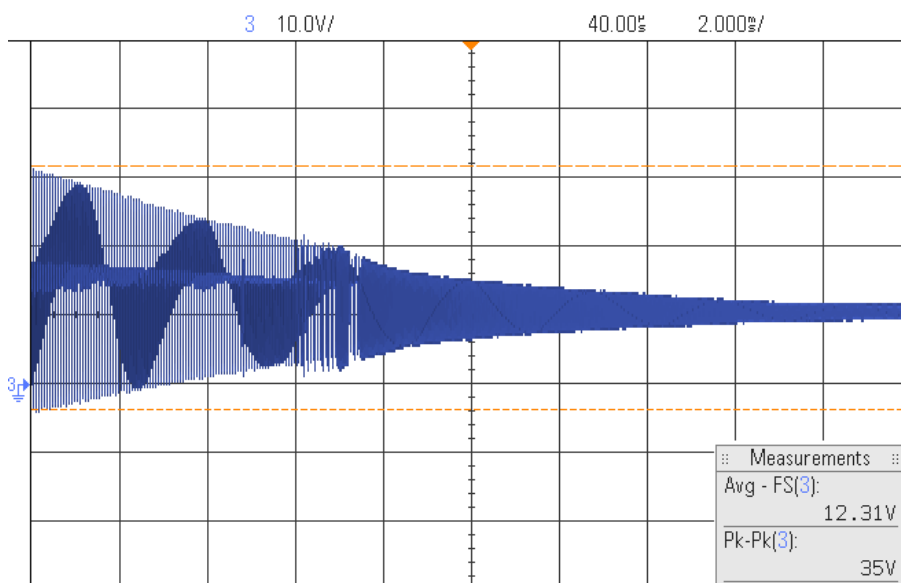
Repare-se que o tempo de equalização é sensivelmente o mesmo para os dois conjuntos de curvas da Figura 7.3. A simulação mostra que, após cinco períodos de 5ms, se atinge a equalização, enquanto o resultado experimental mostra precisar de seis períodos do mesmo tempo para atingir o mesmo objetivo.

Tal diferença deve-se essencialmente à falta de precisão associada à resistência equivalente (assumida $0,2\Omega$) inserida no circuito, de forma a simular os cabos de ligação, para além da resistência dos elementos semicondutores.

As curvas de tensão ilustradas na Figura 7.4 mostram também elas um comportamento semelhante entre o previsto pela simulação e o efetivamente obtido na prática. As diferenças devem-se, uma vez mais, aos componentes resistivos associados aos semicondutores, neste caso projetados



(a)



(b)

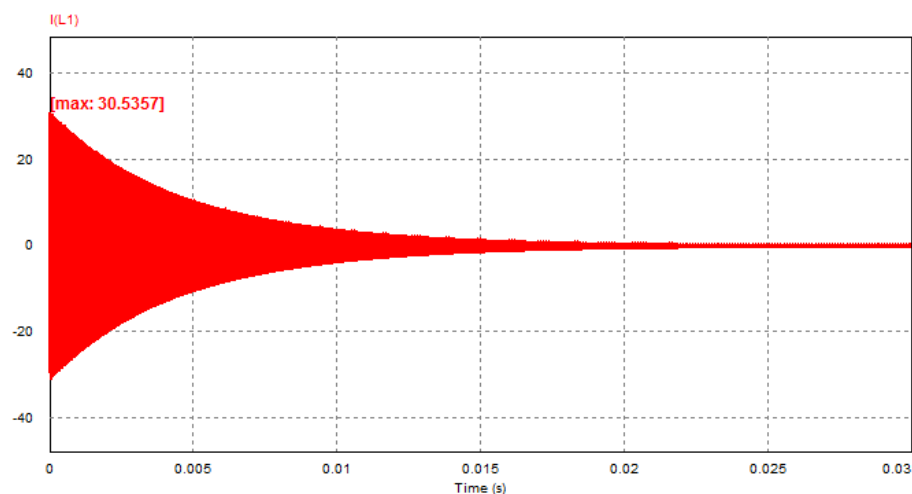
Figura 7.4: Confronto dos resultados computacionais (a) e práticos (b) relativos à tensão aos terminais do condensador auxiliar do ramo LC - TESTE 1

acima do valor admitido pela via experimental.

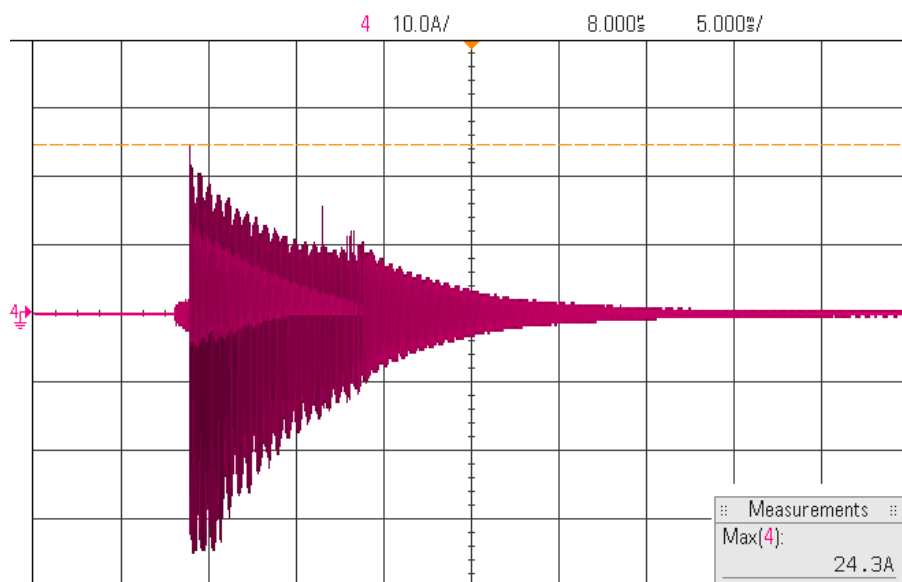
O valor médio da tensão no condensador tende para o valor médio da tensão nas células. Este valor é superior em ambiente de simulação porque também a corrente é maior.

A Figura 7.5 permite uma comparação equivalente à realizada para os valores de tensão, agora para valores de corrente na bobina do ramo LC projetado.

As diferenças relativas aos valores máximos da corrente nos dois casos devem-se, uma vez mais, à imprecisão da resistência equivalente. O nível de corrente obtido, por ser menor, permite concluir acerca da minimização da mesma face à situação real. No entanto, a proximidade de



(a)



(b)

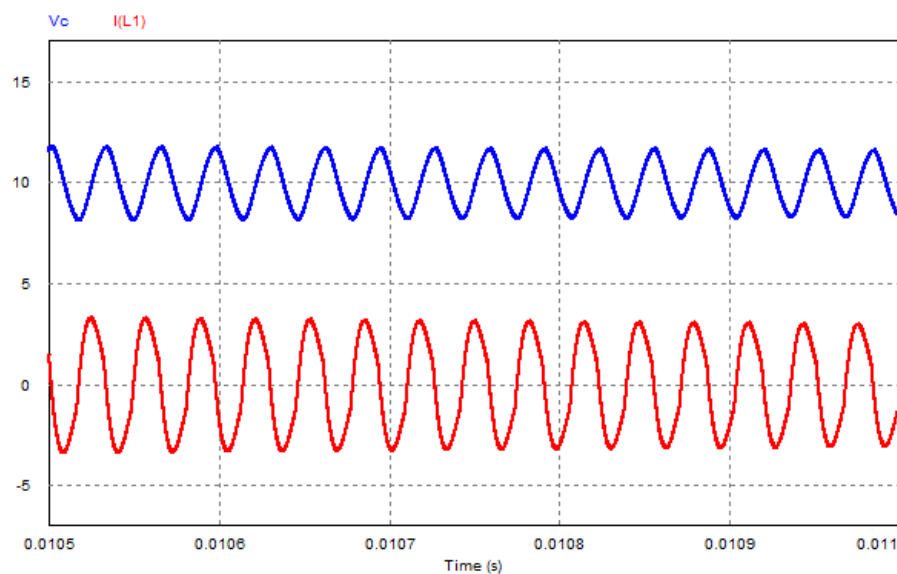
Figura 7.5: Confronto dos resultados computacionais (a) e práticos (b) relativos à corrente da bobina pertencente ao ramo LC - TESTE 1

ambos os valores permite a confiança do ambiente de simulação.

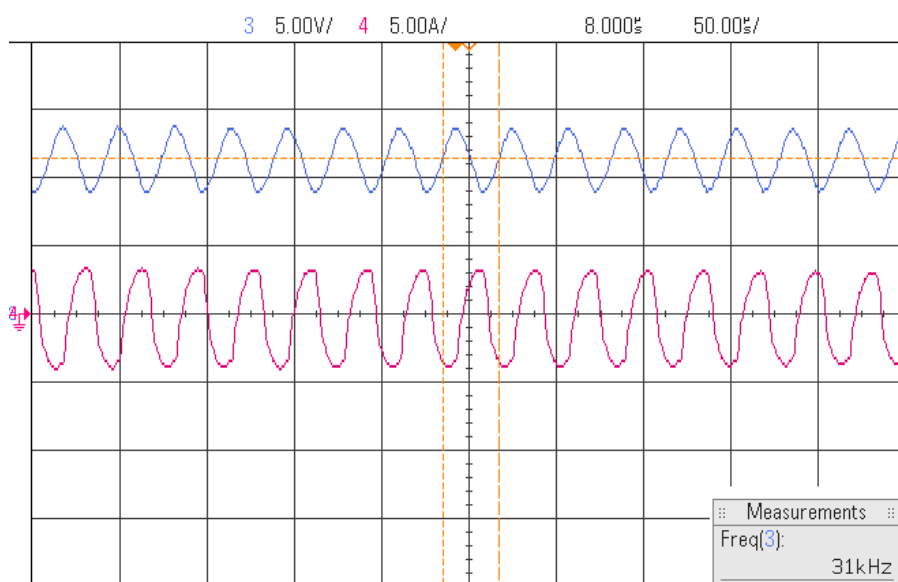
Por fim, foram comparados os valores de tensão e corrente em situações equivalentes. Esta comparação serve principalmente para comprovar os momentos de comutação dos transístores, de acordo com a frequência de ressonância, imposta pelos componentes L e C escolhidos.

Por análise paralela das Figuras 7.6a e 7.6b conclui-se acerca da sua semelhança. Pode ver-se que, para o mesmo período de tempo, o número de ciclos presentes é equivalente. A frequência de comutação faz corresponder o máximo da tensão com o ponto em que a corrente se anula, confirmando o funcionamento de circuitos LC não ideais, descrito no capítulo 3.

Como segundo teste, TESTE 2, colocou-se um condensador de igual capacidade em paralelo



(a)

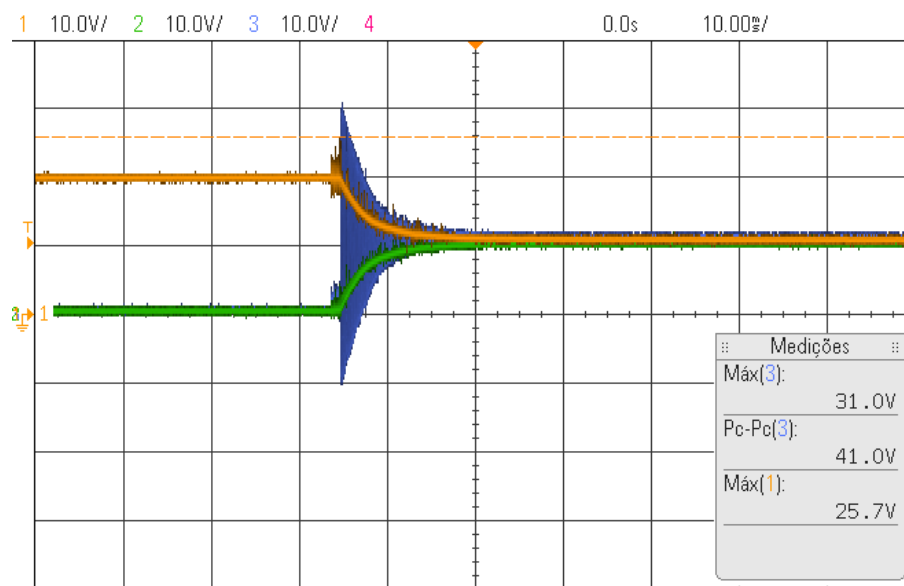


(b)

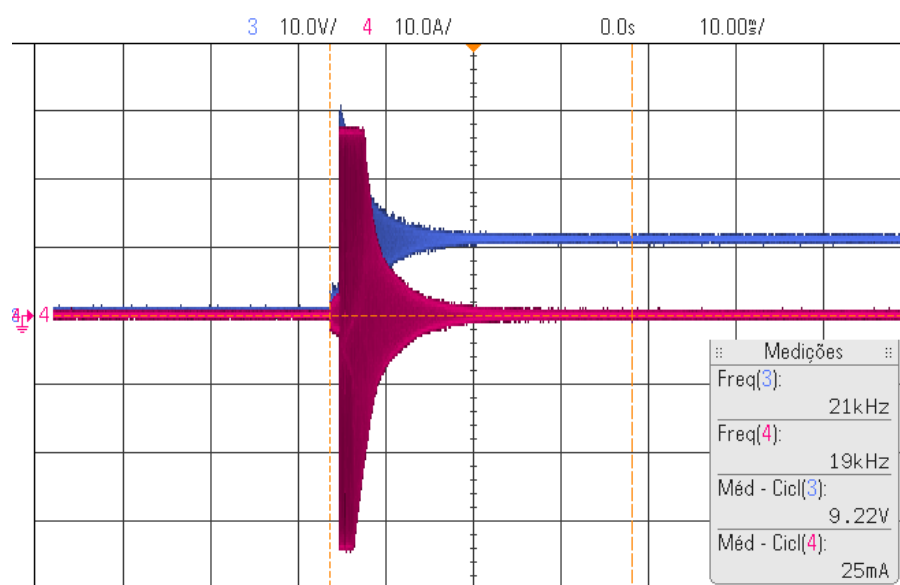
Figura 7.6: Confronto dos resultados computacionais (a) e práticos (b) relativos à tensão e corrente do condensador e bobina, respetivamente - TESTE 1

com o já empregue. Este teste permitiu portanto, duplicar a capacidade equivalente do condensador e mostrar as diferenças na resposta do circuito. Assim, para uma variação de tensão equivalente, ΔV , tem-se o dobro da energia transferida.

A Figura 7.7a confronta a tensão aos terminais do condensador auxiliar com a tensão final dos condensadores responsáveis por simular a bateria, denotando a tendência de todas as variáveis em estabilizar sob um ponto comum, o do valor médio da tensão inicial das células. Já a Figura 7.7b permite tirar conclusões sobre os valores de pico da corrente, a par dos máximos valores de tensão



(a)



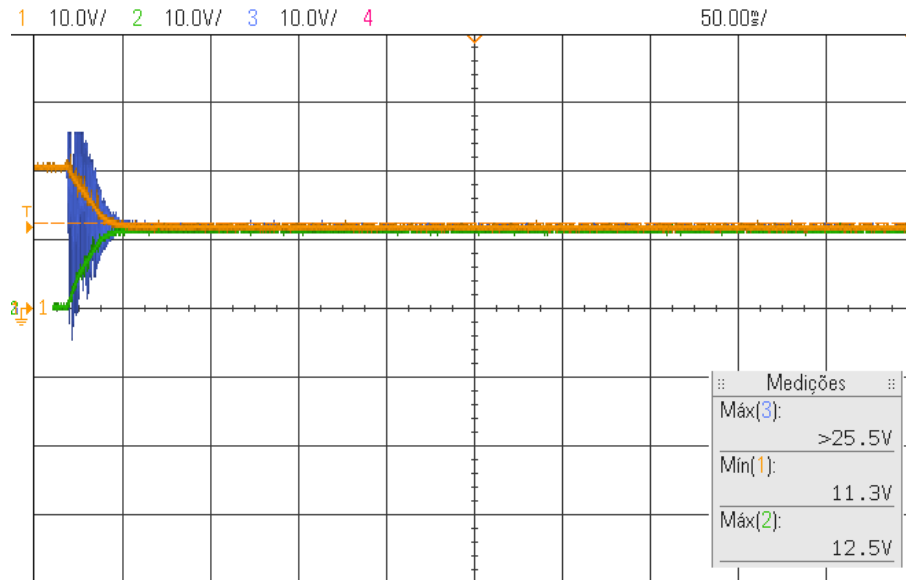
(b)

Figura 7.7: Confronto entre a dinâmica de equalização das tensões das células (C_{cell1} e C_{cell2}) e a tensão aos terminais do condensador auxiliar (a) e entre tensão e corrente em C e L, respectivamente (b) - TESTE 2

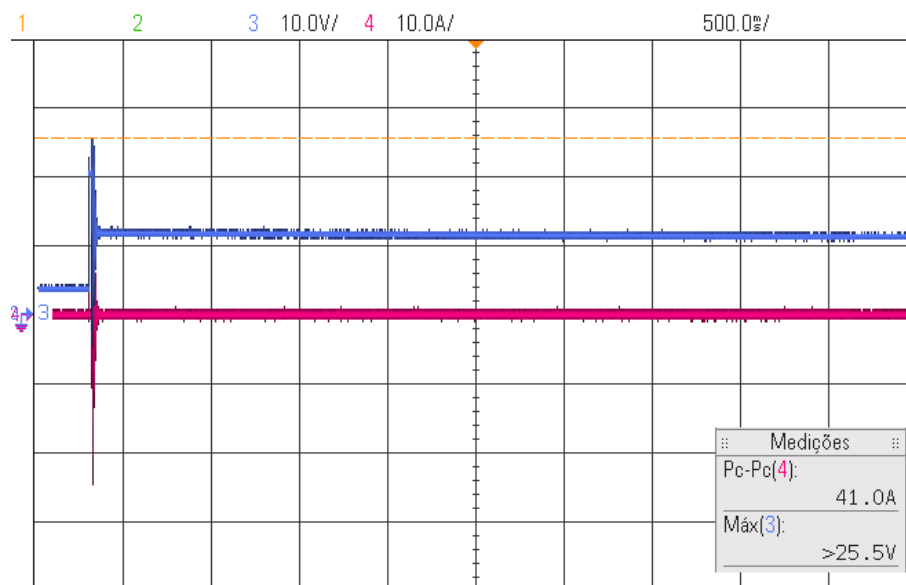
obtidos no condensador, e comparar esses resultados com aqueles previstos teoricamente. Note-se que a frequência de oscilação vai ao encontro da esperada, de acordo com o ramo LC utilizado, 20kHz.

O terceiro teste, TESTE 3, surge em tom de correspondência ao TESTE 2, sendo colocado neste caso um condensador em série com o já empregue. Assim, a comparação direta destes

resultados permite realçar as principais diferenças envolvidas na diminuição (TESTE 2) e aumento (TESTE 3) da capacidade do condensador.



(a)



(b)

Figura 7.8: Confronto entre a dinâmica de equalização das tensões das células (C_{cell1} e C_{cell2}) e a tensão aos terminais do condensador auxiliar (a) e entre tensão e corrente em C e L, respetivamente (b) - TESTE 3

A análise paralela entre as Figuras 7.7a e 7.8a permitir distinguir a velocidade de equalização, que se mostra muito maior no caso em que o condensador auxiliar é mais pequeno. Neste caso, e para um condensador de capacidade equivalente menor, para a mesma variação de tensão,

a quantidade de energia transferida será menor. Isto deve-se ao facto de o tempo de carregamento de um condensador aumentar proporcionalmente com a sua capacidade ($T = RC$), resultado também do aumento da frequência de ressonância do sistema. Assim, a equalização é atingida mais rapidamente, uma vez que se exigem menos ciclos de carga e descarga do mesmo.

Por fim, aumentou-se a capacidade das células, fazendo corresponder a cada uma o equivalente a dois condensadores iguais em paralelo.

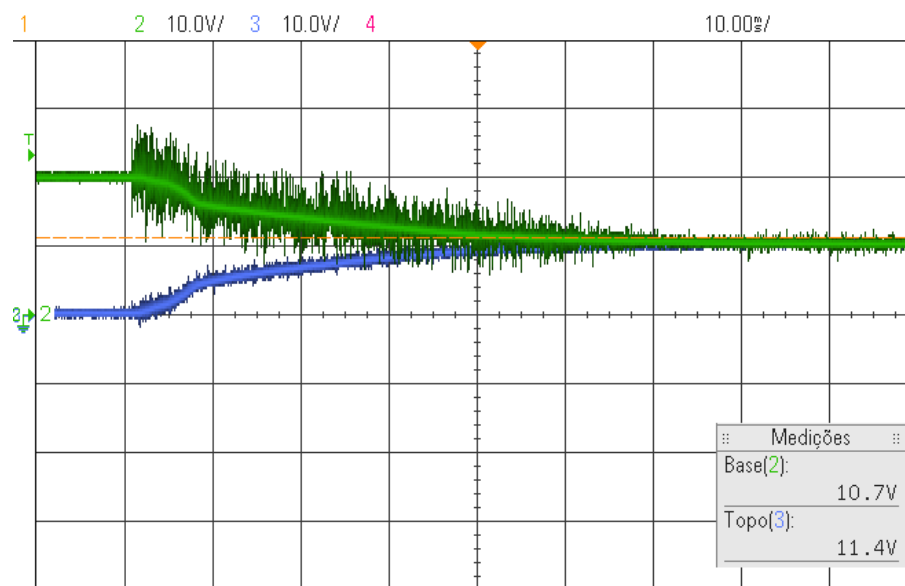


Figura 7.9: Resultado da equalização quando se aumenta a capacidade dos condensadores - TESTE 4

O resultado exposto na Figura 7.9, (note-se a escala de tempo aqui aplicada) mostra uma variação significativa na velocidade de equalização.

Novamente, este resultado corresponde ao esperado, de acordo com o que acontece no TESTE 3. No entanto, e face à magnitude evidentemente superior das capacidades envolvidas, esta duplicação da capacidade denota um decréscimo na velocidade de equalização ainda mais significativo.

7.3 Conclusão

Ao longo deste capítulo tornou-se clara a utilidade do sistema simulado, recorrendo ao programa PSIM, a partir de uma comparação entre os valores obtidos em ambos os casos, simulação e implementação prática.

Por outro lado, este capítulo teve como função clarificar e comprovar o princípio de funcionamento de um sistema LC não ideal, conforme apresentado no capítulo 3.

Começou-se por duplicar a capacidade de armazenamento de energia, TESTE 2, dada pelo primeiro teste,. Posteriormente, colocou-se um condensador em série, TESTE 3, o que diminuiu para metade essa mesma capacidade equivalente.

Confrontando ambos os resultados conclui-se que o tempo de equalização decresce significativamente de um caso para o outro. Isto porque, a modificação do valor de capacidade do ramo LC afeta diretamente a frequência de ressonância, assim como a velocidade de carga e descarga do condensador envolvido. Estes fatores em concordância, fazem com que a taxa de equalização seja muito maior para valores de capacidade inferiores, combinados com uma frequência de comutação maior, justificando por isso os resultados do TESTE 2.

Para além disso, foi possível comprovar experimentalmente a possibilidade de utilização deste circuito como armazenador de energia e elemento principal do sistema de balanceamento, projetado ao longo desta dissertação. Deve contudo salientar-se que estes resultados são apenas resultados intermédios uma vez que:

- Não foram diretamente aplicados a células de bateria mas utilizaram-se condensadores de grande capacidade para essa funcionalidade;
- Limitaram-se a transferências de energia *cell-to-cell* (não foram por isso, alvo de nenhum controlo complexo).

Capítulo 8

Conclusão e trabalhos futuros

8.1 Conclusão

A notoriedade que atualmente se verifica em sistemas baseados em baterias resulta numa motivação, cada vez mais acentuada, sob os assuntos que focam os principais problemas, restrições e exigências associados às mesmas. A bateria utilizada neste trabalho corresponde a um conjunto de células que, quando colocadas em série e paralelo, permitem atingir os valores de tensão e corrente requeridos na aplicação em jogo.

O romper da mobilidade elétrica como solução permanente e totalmente capaz de substituir veículos utilizando motores de combustão é um dos principais impulsionadores desta tendência. Por outro lado, a potencialidade que os sistemas de energia renovável demonstram, embora ainda com falta de soluções para o armazenamento desta energia, são, também eles, impulsionadores da investigação sobre esta temática.

Especificamente, um dos problemas que emerge da vasta temática associada a baterias corresponde a sistemas de balanceamento. Destes sistemas espera-se que sejam capazes de contrariar as diferenças encontradas, a nível individual, entre o estado de carga das células que compõem uma bateria. No decorrer desta dissertação, e depois de convenientemente apresentados os principais intervenientes de sistemas deste tipo, assim como os objetivos a que estes se propõem e que têm de garantir, foi possível analisar e desenvolver um sistema particular.

Resultado do estudo, decidiu-se projetar um sistema de balanceamento que tiraria partido de um braço LC como elemento armazenador de energia e que deveria, por si só, permitir a transferência de energia entre diferentes números de células e assim concretizar o seu objetivo central: o equilíbrio da carga.

No seguimento desta decisão, o estudo de circuitos ressonantes ideais e não ideais permitiu a sedimentação do conhecimento associado ao seu funcionamento e das condicionantes que estes acarretam. Isto é, foi possível concluir que o sistema deverá ser projetado tendo em conta o seu coeficiente de amortecimento, a sua frequência de ressonância e os níveis de corrente pretendidos. Por outro lado, foi possível delinear as principais vantagens das quais o sistema poderá tirar partido. Destas destaca-se a possibilidade de prever com exatidão os momentos de máximo e mínimo

valor da tensão e corrente e assim tirar proveito de comutações a corrente nula.

A diversidade diretamente associada a sistemas de balanceamento, permitiu que se projetassem três esquemas distintos mas com propósitos equivalentes. Os três esquemas apresentados estão diretamente relacionados com o número de células que englobam: duas, três ou seis células em série. A cada um destes esquemas correspondem características diferentes, que os resultados apresentados no capítulo a eles destinado evidenciam.

Deverão salientar-se os resultados obtidos, para um funcionamento em regime permanente, das duas células em série que, mesmo considerando não idealidades, atingem a equalização em tempos satisfatoriamente curtos. O estudo das diferentes respostas deste mesmo circuito a períodos de comutação distintos, permite concluir acerca da sua influência e motivar a estruturação de um algoritmo de controlo mais complexo. O esquema proposto para seis células destaca-se, embora que negativamente, denotando o carácter vantajoso do esquema originalmente proposto para três células, aqui confrontado com a sua extensão para a inclusão de seis.

Relativamente aos resultados obtidos, para um funcionamento em regimes de descarga e carga da bateria, evidenciam-se os que englobam um maior número de células. O esquema proposto originalmente para três células demonstra um comportamento promissor em ambos os modos. Em contrapartida, o esquema das seis células mostra melhor desempenho em momentos de carregamento acelerando o processo em cerca de quatro vezes.

Os ensaios experimentais, que confirmaram as simulações do sistema de balanceamento baseado na utilização de um ramo ressonante, permitiram assim validar o ambiente de simulação adotado e acima de tudo avaliar a possibilidade de aplicação dos circuitos a uma situação real.

Pode dizer-se então, e em tom conclusivo, que os objetivos propostos para esta dissertação foram cumpridos na sua maioria e que, essencialmente, se considera que o trabalho desenvolvido verá utilidade e pertinência em projetos futuros.

8.2 Trabalhos Futuros

A um trabalho desta dimensão e, uma vez debruçado sobre esta temática, não se espera um ponto final.

“The reward for work well done is the opportunity to do more”

Jonas Salt

Assim, do trabalho desenvolvido e descrito ao longo deste documento é possível evidenciar alguns pontos aos quais será pertinente dar continuidade:

- Desenvolver um algoritmo de controlo focado na procura do ponto ótimo de funcionamento, diretamente relacionado com os períodos de comutação estipulados pelos sinais de comando;
- Aplicar os ensaios experimentais a baterias de íons de lítio e programar uma rotina de aquisição de dados e de controlo dos semicondutores que permita transitar entre diferentes modos;

- Estender a montagem a uma bateria de seis células e efetuar novos ensaios experimentais.

Referências

- [1] Jason Leadbetter e Lukas G. Swan. Selection of battery technology to support grid-integrated renewable electricity. *Journal of Power Sources*, 216(0), 2012.
- [2] S. M. Lukic, J. Cao, R. C. Bansal, F. Rodriguez, e A. Emadi. Energy storage systems for automotive applications. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 55(6), 2008.
- [3] S. T. Hung, Douglas C. Hopkins, e C. R. Mosling. Extension of battery life via charge equalization control. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 40(1), 1993.
- [4] I. Aizpuru, U. Iraola, J. M. Canales, E. Unamuno, e I. Gil. Battery pack tests to detect unbalancing effects in series connected li-ion cells. Em *Clean Electrical Power (ICCEP), 2013 International Conference on*.
- [5] K. B. Hatzell, A. Sharma, e H. K. Fathy. A survey of long-term health modeling, estimation, and control of lithium-ion batteries: Challenges and opportunities. Em *American Control Conference (ACC), 2012*.
- [6] H. Rahimi-Eichi, U. Ojha, F. Baronti, e M. Chow. Battery management system: An overview of its application in the smart grid and electric vehicles. *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, 7(2), 2013.
- [7] A. Khaligh e Li Zhihao. 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. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 59(6), 2010.
- [8] H. Ibrahim, A. Ilinca, e J. Perron. Energy storage systems—characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(5), 2008.
- [9] Martin Winter e Ralph J Brodd. What are batteries, fuel cells, and supercapacitors? *Chemical reviews*, 104(10), 2004.
- [10] N. Mohan, T.M. Undeland, e W.P. Robbins. *Power electronics: converters, applications, and design*. John Wiley & Sons (Hoboken, New Jersey, USA), 2003.
- [11] Jonathan W Kimball, Brian T Kuhn, e Philip T Krein. Increased performance of battery packs by active equalization. Em *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE*. IEEE.
- [12] Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, e Venizelos Efthimiou. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6–7), 2009.

- [13] Ramesh C Bansal. *Handbook of automotive power electronics and motor drives*. Taylor & Francis (Boca Raton, Florida, USA), 2005.
- [14] A. Saez-de Ibarra, A. Milo, H. Gaztanaga, I. Etxeberria-Otadui, P. Rodriguez, S. Bacha, e V. Debusschere. Analysis and comparison of battery energy storage technologies for grid applications. Em *PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble*.
- [15] Sun Liqing, C. C. Chan, Liang Ruchuan, e Wang Qingcai. State-of-art of energy system for new energy vehicles. Em *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE*.
- [16] Bruno Scrosati e Jürgen Garche. Lithium batteries: Status, prospects and future. *Journal of Power Sources*, 195(9), 2010.
- [17] A. A. Sayin e I. Yuksel. Li-ion battery modeling and battery management: A case study on renault fluence ze. Em *Electrical Machines and Power Electronics and 2011 Electromotion Joint Conference (ACEMP), 2011 International Aegean Conference on*.
- [18] B. Rosca, J. T. B. A. Kessels, H. J. Bergveld, e P. P. J. van den Bosch. On-line parameter, state-of-charge and aging estimation of li-ion batteries. Em *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2012 IEEE*.
- [19] Chris Naish, Ian McCubbin, Oliver Edberg, e Michael Harfoot. Outlook of energy storage technologies. *European Parliament's committee on Industry, Research and Energy (ITRE), Tech. Rep*, 2008.
- [20] I. Husain. *Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals*. Taylor and Francis, 2003.
- [21] Daniel Magalhaes. Modelo de baterias com aplicação em sistemas de gestão de baterias de veículos elétricos. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Fevereiro 2013.
- [22] M. Einhorn, W. Roßler, F. V. Conte, H. Popp, e J. Fleig. Charge balancing of serially connected lithium-ion battery cells in electric vehicles. *Elektrotechnik & Informationstechnik*, (Springer-Verlag 2012), 2012.
- [23] T. Denton. *Automobile Electrical and Electronic Systems*. Taylor and Francis, 2004.
- [24] Hongwen He, Rui Xiong, Hongqiang Guo, e Shuchun Li. Comparison study on the battery models used for the energy management of batteries in electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 64(0), 2012.
- [25] Languang Lu, Xuebing Han, Jianqiu Li, Jianfeng Hua, e Minggao Ouyang. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 226(0), 2013.
- [26] M. Einhorn, W. Roessler, e J. Fleig. Improved performance of serially connected li-ion batteries with active cell balancing in electric vehicles. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 60(6), 2011.
- [27] Javier Gallardo-Lozano, Enrique Romero-Cadaval, M. Isabel Milanes-Montero, e Miguel A. Guerrero-Martinez. Battery equalization active methods. *Journal of Power Sources*, 246(0), 2014.

- [28] Mohamed Daowd, Noshin Omar, Peter Van Den Bossche, e Joeri Van Mierlo. Passive and active battery balancing comparison based on matlab simulation. Em *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011 IEEE*. IEEE.
- [29] Mohamed Daowd, Mailier Antoine, Noshin Omar, Peter van den Bossche, e Joeri van Mierlo. Single switched capacitor battery balancing system enhancements. *Energies*, 6(4), 2013.
- [30] Stephen W Moore e Peter J Schneider. A review of cell equalization methods for lithium ion and lithium polymer battery systems. *SAE Publication*, 2001.
- [31] A. C. Baughman e M. Ferdowsi. Double-tiered switched-capacitor battery charge equalization technique. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 55(6), 2008.
- [32] M. Uno e K. Tanaka. Single-switch single-inductor equalization charger using a voltage multiplier for series-connected energy storage modules. Em *Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), 2011 IEEE 8th International Conference on*.
- [33] J. Cao, N. Schofield, e A. Emadi. Battery balancing methods: A comprehensive review. Em *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE*.
- [34] Sung Chang-hyeon, Lee Kyungmin, e Kang Bongkoo. Voltage equalizer for li-ion battery string using lc series resonance. Em *Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE*.
- [35] D. Satou, N. Hoshi, e J. Haruna. Consideration about novel cell voltage equalization circuit for battery / edlc. Em *ECCE Asia Downunder (ECCE Asia), 2013 IEEE*.
- [36] Yuang-Shung Lee e Cheng Guo-Tian. Quasi-resonant zero-current-switching bidirectional converter for battery equalization applications. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 21(5), 2006.