

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Sistema de Equilíbrio de Células de Bateria de Iões de Lítio do FEUP VEC

Diogo Teófilo Videira Viana Carneiro

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Armando Sousa Araújo (Prof. Doutor)

24 de Julho de 2019

Resumo

Hoje em dia assistimos a um grande desenvolvimento das indústrias associado à energia elétrica, devido aos problemas consequentes da utilização excessiva dos combustíveis fósseis. Assim sendo, a substituição destes combustíveis pela energia elétrica é bastante evidente, dando-se às baterias enorme importância, sendo elas uma fonte de armazenamento elétrico.

No entanto, estes componentes eletroquímicos possuem características com limitações de funcionamento. Como uma bateria é composta por várias células, e, visto que estas não são iguais nas suas características, desencadeia-se o desequilíbrio nas suas cargas, comprometendo a autonomia da bateria.

Devido a estas desigualdades nas cargas e a limitações impostas pelas células, como temperatura de funcionamento ou tolerância à sobrecarga, entre outras, o desenvolvimento de sistemas de gestão de baterias tem vindo a evoluir e com as diferenças entre cargas nas células, torna-se necessária a integração de sistemas de balanceamento nos sistemas de gestão.

Ao longo desta dissertação será apresentada uma revisão bibliográfica dos sistemas de armazenamento de energia e também sobre sistemas de equilíbrio ativos de células de baterias. Serão apresentados e explicados métodos existentes para combater as diferenças nas cargas das células. Esta dissertação, irá centrar-se no estudo e implementação de um dos sistemas de transferência de energia expostos.

Abstract

Nowadays we see a great development of the industries associated to the electric power, due to the consequent problems of the excessive use of the fossil fuels. Thus, the substitution of these fuels by electric energy is quite evident, giving the batteries enormous importance, being they a source of electrical storage.

However, these electrochemical components have characteristics with operating limitations. As a battery is composed of several cells, and since these are not the same in their characteristics, unbalance in their loads is triggered, compromising the battery's autonomy.

Due to these inequalities in loads and limitations imposed by cells, such as operating temperature or overload tolerance, among others, the development of battery management systems has been evolving and with the differences between charges in the cells, it becomes necessary the integration of balancing systems into management systems.

Throughout this dissertation will be presented a bibliographical review of energy storage systems and also on systems of active balance of cells of batteries. Existing methods will be presented and explained to combat differences in cell loads. This dissertation will focus on the study and implementation of one of the exposed energy transfer systems.

Agradecimentos

Começo por agradecer ao meu orientador, o Professor Doutor Armando Sousa Araújo pela disponibilidade e esforço que demonstrou ao longo do semestre, recordando alguns momentos em que a sua ajuda teve um papel importante para ajudar na resolução de alguns obstáculos.

Em segundo, aos meus pais, irmã e cunhado pelos sacrifícios feitos de modo a concederem-me uma formação superior.

Agradeço à Sara, pela paciência que lhe exigiu, não só ao longo desta dissertação como também ao longo do percurso académico.

Depois, agradeço aos amigos e colegas do laboratório, I105, Xavier e Rafael, entre outros pela ajuda fornecida para o desenvolvimento do projeto.

Agradeço aos meus primeiros amigos na faculdade que contribuíram para a conclusão deste percurso académico, mas também aos meus amigos de Viana do Castelo pelo apoio dado.

Muito obrigado,

Diogo Teófilo Videira Viana Carneiro

*“It’s fine to celebrate success
But it is more important to heed the lessons of failure.”*

Bill Gates

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura do Documento	2
2	Revisão Bibliográfica	3
2.1	Introdução à bateria	3
2.1.1	Bateria de Iões de Lítio	5
2.1.2	Modelização da Bateria	7
2.2	Sistemas de Gestão de Baterias	7
2.2.1	Sistemas de equilíbrio de células de baterias	9
2.3	Métodos Ativos	11
2.3.1	Cell bypass	11
2.3.2	Cell to Cell	13
2.3.3	Cell to Pack	16
2.3.4	Pack to Cell	19
2.3.5	Cell to Pack to Cell	23
2.4	Análise de mercado	27
2.5	Conclusão	28
3	Sistema de Equilíbrio	29
3.1	Circuito RC	29
3.2	Sistema	30
3.3	Modelos de simulação	31
3.3.1	Duas células em série	32
3.3.2	Três células em série	32
3.3.3	Comparação dos esquemas	34
3.4	Parametrização e dimensionamento	34
3.4.1	Bateria	34
3.4.2	Semicondutores	35
3.5	Funcionamento	35
3.6	Conclusão	37
4	Análise Computacional	39
4.1	Duas células	39
4.1.1	Cálculos teóricos	40
4.1.2	Simulações computacionais	41
4.2	Seis células	44

4.2.1	Simulações computacionais	45
4.3	Conclusão	49
5	Proposta de Implementação	51
5.1	Implementação	51
5.1.1	Implementação do circuito de potência	51
5.1.2	Implementação do circuito de controlo	52
5.1.3	Implementação do circuito de geração do sinal de controlo para o <i>driver</i> .	54
5.1.4	Circuito de alimentação	55
5.1.5	Circuito de aquisição das tensões das células	55
5.1.6	Integração dos subsistemas	55
5.2	Resultados	58
5.3	Conclusão	60
6	Conclusão e Trabalhos futuros	61
6.1	Conclusão	61
6.2	Trabalhos futuros	62
	Referências	63

Lista de Figuras

2.1	Processo eletroquímico das baterias e constituição genérica, [1]	4
2.2	Comparação das diferentes tecnologias de baterias de íões de lítio, [2]	6
2.3	Modelos elétricos equivalentes de uma bateria, [3]	7
2.4	Características de um BMS, [4]	8
2.5	Sistemas de equilíbrio de baterias, [5]	9
2.6	Método passivo, <i>shunt</i> de resistência fixa, [5]	10
2.7	Classificação dos vários tipos de métodos ativos, [5]	11
2.8	Métodos da categoria <i>Cell Bypass</i> [5]	12
2.9	Método <i>Switched capacitor</i> , [5].	13
2.10	Método <i>Double-tiered switching capacitor</i> , [5].	14
2.11	Método <i>Cúk converter</i> , [5].	15
2.12	Método <i>PWM controlled converter</i> , [5].	15
2.13	Método <i>QuasiResonant/Resonant converter</i> , [5].	16
2.14	Método <i>Shunt inductor</i> , [5].	17
2.15	Método <i>Boost shunting</i> , [5].	17
2.16	Método <i>Multiple transformers</i> , [5].	18
2.17	Método <i>Multisecondary windings transformer</i> , [5].	19
2.18	Método <i>Switched transformer</i> , [5].	19
2.19	Método <i>Voltage multiplier</i> , [5].	20
2.20	Método <i>Full-bridge converter</i> , [5].	21
2.21	Método <i>Multiple transformers</i> , [5].	22
2.22	Método <i>Multisecondary windings transformer</i> , [5].	22
2.23	Método <i>Switched transformer</i> , [5].	23
2.24	Método <i>PWM controlled converter</i> , [5].	23
2.25	Método <i>Single switched capacitor</i> , [5].	24
2.26	Método <i>Single switched inductor</i> , [5].	25
2.27	Método <i>Bidirectional multiple transformers</i> , [5].	25
2.28	Método <i>Bidirectional multisecondary windings transformer</i> , [5].	26
2.29	Método <i>Bidirectional switched transformer</i> , [5].	26
2.30	Gráfico de preços de sistemas de equilíbrio digitais, [6]	27
2.31	Gráfico de preços de sistemas de equilíbrio analógicos, [6]	27
3.1	Gráfico da carga do condensador, [7].	30
3.2	Double-tiered Switching Capacitor,[8].	31
3.3	Esquema de montagem do interruptor bidirecional.	32
3.4	Esquema do sistema de equilíbrio para duas células em série.	32
3.5	Esquema do sistema de equilíbrio para três células em série.	33
3.6	Controlo dos interruptores bidirecionais,[8].	35

3.7	Transferência de energia dos condensadores da primeira camada.	36
3.8	Transferência de energia dos condensadores da segunda camada.	36
4.1	Esquema implementado no PSIM	40
4.2	Fluxograma dos cálculos numéricos para obtenção dos valores teóricos	40
4.3	Evolução das tensões das células em 30 minutos.	42
4.4	Forma de onda da corrente do condensador de 10mF a 1kHz	43
4.5	Esquema implementado no PSIM	45
4.6	Evolução das tensões das células em 30 minutos.	46
4.7	Comparação das correntes dos condensadores.	47
4.8	Gráficos comparativos do mesmo circuito para várias frequências num intervalo de 30 minutos.	48
5.1	Esquema de implementação de controlo com o IR2110.	52
5.2	Esquema do <i>driver</i> HCPL3120 e imagem do conversor DC/DC IL1215s	53
5.3	Esquema de implementação do circuito de controlo com o HCPL3120 com o MOSFET de sinal BS170.	53
5.4	Imagem do Arduino Nano e esquema do <i>buffer</i> CD4050BE	54
5.5	Circuito de geração do sinal de controlo para o <i>driver</i>	54
5.6	Imagem do Regulador de tensão PTN 7800 e esquema de montagem.	55
5.7	Esquema de divisor de tensão para obter a tensão das células.	56
5.8	Montagem em <i>breadboards</i> e em PCB.	57
5.9	Resultados dos sinais de controlo à saída do Arduino (dois sinais) e à saída do <i>buffer</i> (comparação com o sinal do arduino).	58
5.10	Comparação do sinal à saída do <i>buffer</i> com a saída do <i>driver</i> HCPL 3120, amarelo e verde respetivamente	58
5.11	Resultados experimentais do sistema para frequências de 10kHz e 20kHz, respetivamente.	59

Lista de Tabelas

2.1	Tabela comparativa de vários modelos de baterias, [2]	5
2.2	Tabela comparativa de vários modelos de baterias de íões de lítio, [2]	6
3.1	Tabela comparativa dos esquemas apresentados	34
4.1	Tabela comparativa com os condensadores 10mF, 100mF e 120mF	41
4.2	Tabela comparativa	44

Abreviaturas e Símbolos

BMS	Battery Management System
Li-ion	Iões de lítio
SC	Switching capacitor
DTSC	Double-tiered switching capacitor
μC	Micro-controlador
PSIM	Programa de simulação <i>PowerSim</i>
SoC	State-of-Charge (Estado de carga)
SoH	State-of-Health (Estado de saúde)
VE	Veículo Elétrico
PWM	Pulse Width Modulation
PCB	Printed Circuit Board

Capítulo 1

Introdução

Atualmente, as baterias têm um grande impacto na nossa vida, uma vez que a sua utilização está presente em muitos equipamentos existentes no nosso quotidiano, desde dispositivos móveis até aos inovadores veículos híbridos e elétricos.

Relativamente aos últimos, há uma aposta muito forte no desenvolvimento dos veículos elétricos, nos dias de hoje. A procura é muita, devida à preocupação do ser humano com o aquecimento global mas também, do decorrente término previsível dos combustíveis fósseis.

Os VE's têm um obstáculo - a autonomia. Apesar dos esforços, as baterias atualmente não têm uma autonomia desejável, o que prejudica a evolução das vendas no mercado automóvel e o funcionamento das mesmas, por vezes, não é o melhor.

Assim, surgiu uma área de investigação em que o principal foco é melhorar as características das baterias assim como aumentar a sua autonomia.

Uma bateria é composta por várias células, sendo que estas poderão estar em paralelo e/ou em série com outras. Como as células são componentes químicos, as suas características vão-se alterando ao longo do seu tempo de vida, fazendo com que se desequilibrem, podendo tornar a bateria instável.

Para combater isto, têm-se estudado sistemas de equilíbrio de células de baterias, mais propriamente, sistemas baseados em métodos ativos, pois estes transferem energia das células com mais carga para as células com menor carga, havendo um desperdício mínimo de energia.

1.1 Motivação

Os sistemas de equilíbrio de células de baterias, têm uma grande importância, havendo um destaque nos sistemas ativos que são utilizados nas baterias de íões de lítio.

Para além dos referenciados, existem também os sistemas passivos que são utilizados para baterias de chumbo-ácido ou à base de níquel. Os sistemas desta categoria limitam-se a descarregar as células que contêm mais carga, para que assim, possuam o mesmo nível da que estiver com menor carga. Em suma, os sistemas passivos desperdiçam energia para manter as células equilibradas.

Os métodos que existem na categoria dos métodos ativos, permitem a transferência de energia entre células, de modo a que haja o mínimo desperdício, aumentando assim o ciclo de vida da bateria e a sua autonomia.

Resumidamente, é de grande importância a realização de um estudo que leve ao entendimento do funcionamento dos sistemas de equilíbrio ativos e ao seu impacto na autonomia das baterias.

1.2 Objetivos

Nesta dissertação pretende-se o desenvolvimento de um sistema de equilíbrio de baterias de iões lítio, de forma mais pormenorizada, os objetivos são: o estudo do estado da arte relativo a sistemas de equilíbrio de baterias, escolha do sistema a implementar e estudo e dimensionamento do sistema a implementar.

1.3 Estrutura do Documento

Para além da introdução, esta dissertação contém mais cinco capítulos.

No capítulo 2, é feita a revisão bibliográfica sobre as baterias, seguindo-se o estudo de sistemas *Battery Management System* (BMS) e por fim a apresentação e explicação dos métodos encontrados, embora resumidamente.

No capítulo 3, faz-se um estudo breve sobre o funcionamento do sistema a implementar.

De seguida, o capítulo 4 apresenta a análise dos resultados obtidos nas simulações.

No capítulo 5 é exposta a implementação do sistema a desenvolver, assim como os seus resultados. Por último, no capítulo 6, serão apresentadas as conclusões ao trabalho desenvolvido nesta dissertação e algumas sugestões que poderiam ser realizadas no futuro.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

No presente capítulo dá-se a conhecer o estudo do estado da arte importante assim como pertinente no âmbito desta dissertação. Para tal, realizou-se um trabalho de pesquisa bibliográfica que permitiu a consolidação dos conceitos em questão.

As baterias têm um papel importante nos veículos elétricos. Estas são a fonte de energia para todo o sistema e é a sua capacidade de armazenamento que determina a eficiência dos VEs. As baterias de iões de lítio são das tecnologias mais promissoras. Sistemas de baterias requerem o uso de sistemas de gestão de baterias, ou BMS, em inglês *Battery Management System*, que monitoriza o estado de saúde e carga, assim como garante o funcionamento dentro de limites de segurança e otimiza a utilização da capacidade disponível.

Os componentes principais para um sistema de equilíbrio são explorados. Começando por uma breve introdução às baterias, na Secção 2.1. Após a revisão sobre as baterias, é feito um breve resumo sobre sistemas de gestão de baterias e posteriormente, um estudo sobre os métodos de equilíbrio existentes, abordando de forma generalizada os métodos passivos e explicando os sistemas ativos existentes e os seus modos de funcionamento.

2.1 Introdução à bateria

A bateria é um dispositivo eletroquímico que converte a energia química armazenada em energia elétrica. Apesar do termo "bateria" ser muitas vezes utilizado, uma unidade eletroquímica é chamada de "célula". Uma bateria é composta por uma ou mais células ligadas em série e/ou em paralelo.

Uma bateria é constituída por dois elétrodos, o eletrólito, que é o meio responsável pela condução dos iões e o separador que divide fisicamente as secções com as diferentes polaridades. As partes ativas no processo eletroquímico das baterias são os elétrodos, ânodo e cátodo. Na Figura 2.1 está ilustrado o processo eletroquímico da bateria e a sua constituição.

Atualmente, as baterias ainda apresentam algumas limitações, mas têm sido utilizadas de forma intensiva como principal componente de armazenamento de energia nos veículos. A escolha do tipo de bateria é um fator chave para o dimensionamento do sistema que as abrange, e

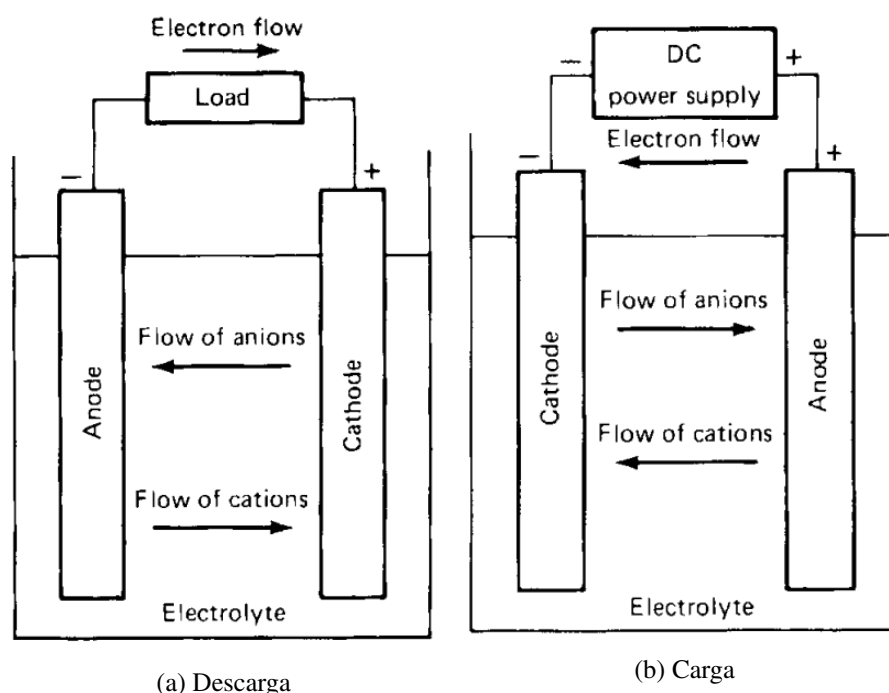


Figura 2.1: Processo eletroquímico das baterias e constituição genérica, [1]

por isso, deverão ser tidos em conta aspetos como capacidade ou a tensão nominal. Outros fatores também entram na decisão, tais como: Densidade Energética (quantidade de energia armazenada por unidade de massa), Auto-descarga (taxa de descarregamento quando não está em uso), Ciclo de Vida (número de ciclos de carga e descarga na vida da bateria) e Custo.

Cada tipo de bateria tem as suas vantagens e desvantagens, fazendo com que em certas condições seja a mais indicada e noutras não aconselhada. As famílias de baterias mais conhecidas são as de Chumbo (*Lead-Acid*), Níquel e Lítio, [1, 2, 9, 10, 11, 12, 13].

As baterias de chumbo são o material eletroquímico recarregável mais antigo e apesar dos riscos ambientais que estas representam, o elevado uso destas deve-se ao baixo custo, à facilidade de construção e por terem uma elevada tolerância às sobrecargas. Contudo, o ciclo de vida é bastante limitado, têm baixo rendimento a temperaturas baixas e baixa densidade energética.

Relativamente às baterias baseadas em Níquel, temos dois tipos mais presentes, as baterias *Nickel-Metal Hydride* e *Nickel-Cadmium*. Na primeira, verifica-se uma densidade energética duas vezes superior às baterias de chumbo. O uso destas tem a vantagem de os seus componentes serem menos prejudiciais para o ambiente, podendo ser recicláveis, podem operar numa maior gama de temperaturas e têm a capacidade de funcionamento com altas tensões. Relativamente à bateria de Níquel-Cádmio, esta pode ser reciclável e tem um longo tempo de vida. Porém, o seu preço é muito elevado tornando difícil justificar a sua utilização.

Comparativamente com estas, as baterias de lítio mostram-se como as mais promissoras e a escolha mais indicada para a produção dos VE's. Estas têm elevada densidade energética, eficiência, número de ciclos e uma taxa de auto-descarga muito baixa. Porém têm uma baixa tolerância à sobrecarga, são sensíveis a altas temperaturas, resultando numa degradação mais rápida, [13, 14, 15].

A Tabela 2.1, apresenta a comparação de alguns tipos de baterias em alguns dos fatores mais decisivos para o dimensionamento de sistemas.

Tabela 2.1: Tabela comparativa de vários modelos de baterias, [2]

Tipo de Bateria	Chumbo-ácido	Ni-Cd	Ni-MH	Iões de Lítio
Densidade Energética (Wh/kg)	30 - 50	45 - 80	60 - 120	110 - 160
Densidade de Potência (W/kg)	180	150	250 - 1000	1800
Tensão Nominal	2V	1.25V	1.25V	3.6V
Tolerância à sobrecarga	Elevada	Moderada	Baixa	Muito Baixa
Auto-descarga	Baixa	Moderada	Elevada	Muito Baixa
Temperatura de Operação	-20 a 60°C	-40 a 60°C	-20 a 60°C	-20 a 60°C
Ciclo de Vida	200 - 300	1500	300 - 500	500 - 1000

Temos ainda as baterias de polímero de lítio, que também são chamadas de baterias sólidas. Estas baterias, contêm sais de lítio retidos num polímero sólido ao invés de solventes, eletrólito, como por exemplo, óxido de polietileno. Além da maior segurança comparativamente com as solventes, estas são mais adaptáveis a diferentes formatos, permitem taxas de descarga mais elevadas e o uso a altas temperaturas.

Têm como vantagens de utilização o elevado potencial eletroquímico, o reduzido peso, a elevada densidade de energia e o longo tempo de vida, [15, 16].

2.1.1 Bateria de Iões de Lítio

As baterias com base em lítio surgiram por volta do ano de 1960. Com o aparecimento destas, foram desenvolvidos alguns modelos com diferentes cátodos, mas devido à instabilidade do material, estes projetos tiveram de ser abandonados. Até que em 1991, desenvolvida pela *Sony Inc*, as primeiras baterias de lítio foram comercializadas, [16].

O metal lítio é um material atrativo para elétrodo devido ao seu baixo peso, boa condutividade, entre outros fatores. Graças a estas características, as baterias de lítio dominam o desenvolvimento de baterias de alto desempenho.

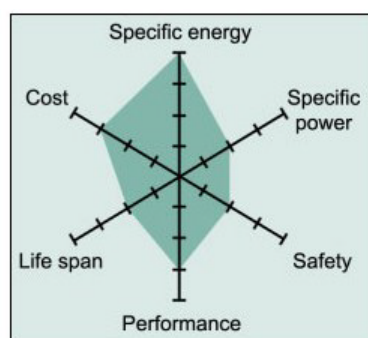
Como já referido, as baterias de lítio têm excelentes características comparativamente com outros tipos. Contudo, é necessário que o funcionamento destas baterias esteja dentro de certos limites de tensão, inferior e superior, tornando, assim, a monitorização indispensável.

O cátodo ou o elétrodo positivo, é a principal fonte de todos os iões de lítio numa bateria de lítio. Para fornecer uma grande capacidade de energia, o material deve ser capaz de conter uma elevada quantidade de lítio. Além disso, o material deve conseguir armazenar e fornecer esse lítio sem sofrer grandes mudanças estruturais, permitindo um número longo de ciclos de vida.

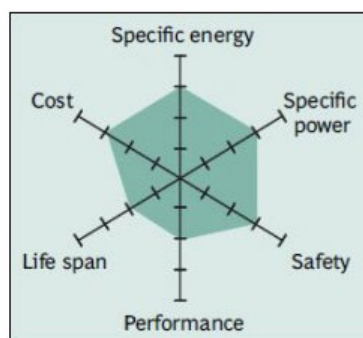
Dentro da gama de baterias de íões de lítio, existem alguns modelos com diferenças ao nível de material no cátodo. Estas diferenças fazem com que os modelos tenham algumas distinções em relação à tensão nominal, ao ciclo de vida, ao preço, entre outros. Exemplos destes modelos, temos: *Lithium Cobalt Oxide* (LCO), *Lithium Manganese Oxide* (LMO), *Lithium Iron Phosphate* (LFP) e *Lithium Mixed Nickel-Manganese-Cobalt Oxide* (NMC). A Tabela 2.2 e Figura 2.2 apresentam comparações dos modelos apresentados.

Tabela 2.2: Tabela comparativa de vários modelos de baterias de íões de lítio, [2]

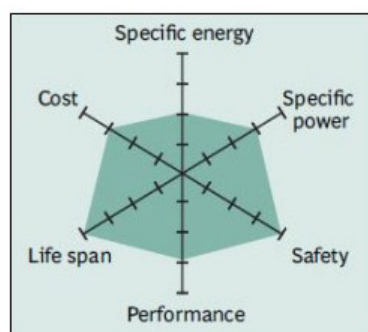
Especificações	LCO	LMO	LFP	NMC
Tensão Nominal	3.90V	3.70V	3.40V	3.60-3.70V
Limite de Carga	4.20V	4.20V	3.60V	4.20V
Ciclo de Vida	500	500-1000	1000-2000	1000-2000
Temperatura de funcionamento	Média	Média	Boa	Baixa
Energia Específica	155	100-120	160	200
Potência Específica	1C	10C, 40C	35C	10C
Segurança	Fraca	Média	Muito Boa	Boa
Custo	Elevado	Baixo	Moderado	Moderado



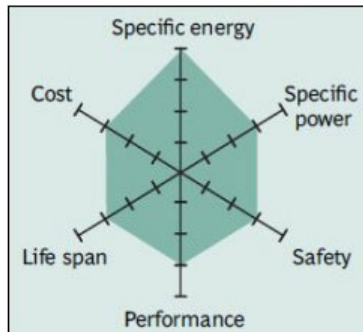
Lithium Cobalt Oxide (LCO)



Lithium Manganese Oxide (LMO)



Lithium Iron Phosphate (LFP)



Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC)

Figura 2.2: Comparação das diferentes tecnologias de baterias de íões de lítio, [2]

2.1.2 Modelização da Bateria

Os modelos elétricos equivalentes têm uma forte importância para a simulação de sistemas de tração dos carros elétricos e na estimação de estados de carga e saúde da bateria para o desenvolvimento de sistemas de gestão, BMS. Uma bateria contendo características dinâmicas e estáticas deve ser representada por modelos que traduzam o seu comportamento da melhor forma. Os mais utilizados são os modelos eletroquímicos e de circuito equivalente, os modelos elétricos são os que mais interessam no âmbito desta dissertação, visto que são constituídos por componentes resistivos, capacitivos e fontes de tensão.

Para os sistemas de gestão de baterias, os modelos eletroquímicos não são muito desejáveis, uma vez que são usadas equações diferenciais parciais, e tendo um grande número de parâmetros desconhecidos, estes modelos requerem muito processamento e memória. Tipicamente, nos modelos de circuito equivalente, utilizam-se condensadores com grande capacidade ou fontes de tensão ideais para descrever a tensão em circuito aberto, os restantes componentes simulam a resistência interna e efeitos não-lineares, como por exemplo, tensão terminal dinâmica.

Relativamente aos modelos de circuito equivalente, são mais usados os seguintes, [3]:

- Modelo de Rint - fonte de tensão ou condensador em série com uma resistência, Figura 2.3a;
- Modelo de Thevenin - ao modelo anterior é acrescentado em série um circuito RC paralelo, Figura 2.3b;
- Modelo DP - ao modelo Thevenin é adicionado em série outro RC paralelo, Figura 2.3c;

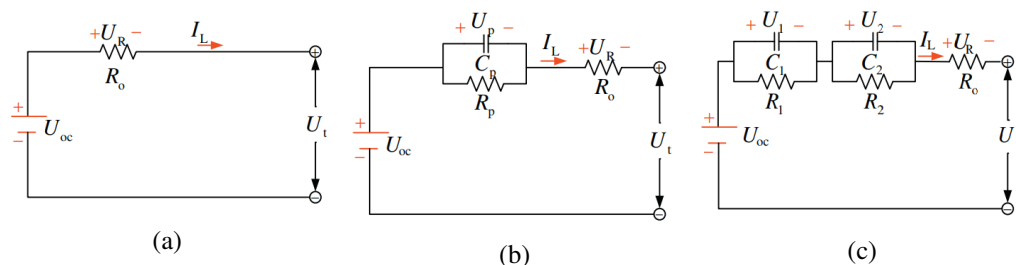


Figura 2.3: Modelos elétricos equivalentes de uma bateria, [3]

No decorrer desta dissertação, será utilizado o primeiro modelo, Modelo de Rint, por ser um sistema mais simples comparando com os restantes e também por ser o mais indicado, uma vez que este estudo não tem como objetivo estimar os estados de carga e saúde da bateria para um BMS, mas sim a implementação de um sistema de equilíbrio de baterias.

2.2 Sistemas de Gestão de Baterias

Com o crescente desenvolvimento nas baterias recarregáveis, é exigido, também, uma evolução nos sistemas de gestão de baterias. Estes sistemas são importantes porque, como já referido, as baterias devem trabalhar dentro de certos pontos de funcionamento, para as tornar mais seguras.

As funções destes sistemas passam pela monitorização das tensões das células, da corrente de entrada e saída, da temperatura da bateria. Também passa pela estimação do estado de carga (*SoC* - *State of Charge*) e do estado de saúde (*SoH* - *State of Health*) e pela otimização da carga disponível na bateria.

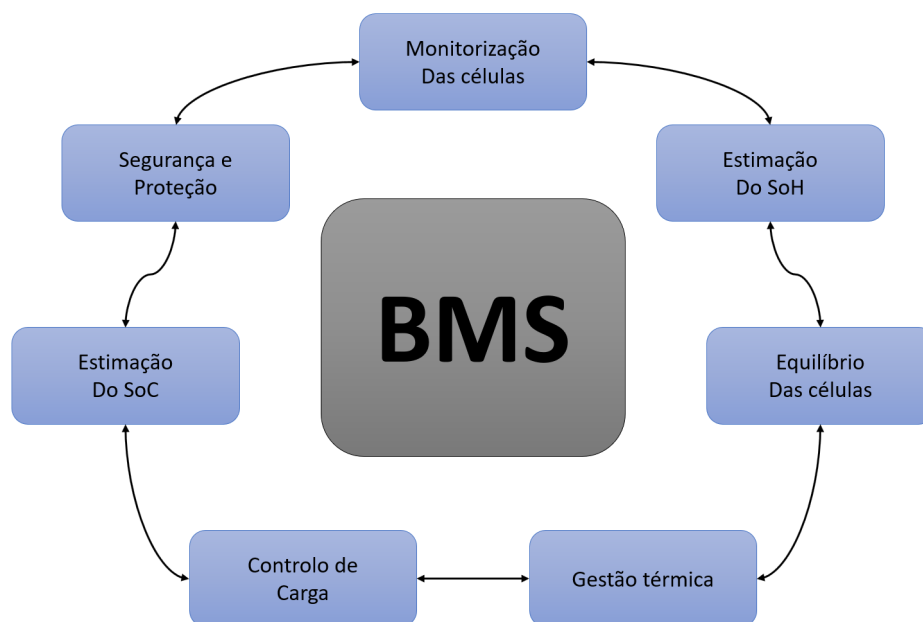


Figura 2.4: Características de um BMS, [4]

- **Monitorização das células** - aquisição das tensões das células, da corrente da bateria e temperatura das células;
- **Segurança e proteção** - garantir a segurança da bateria e a proteção de operações em condições que são prejudiciais para o utilizador e para a bateria;
- **Estimação do SoC** - indicador que representa a carga armazenada disponível comparativamente com a bateria totalmente carregada. A precisão da estimação é necessária, não só para a otimização da bateria, mas também para proteger a bateria de ir além do limite de descarga e do limite de carga;
- **Controlo de carga** - limita a taxa de descarga da bateria. Faz a gestão, otimiza e protege o regime de carga quando não está a ser utilizado o carregador específico;
- **Gestão térmica** - A temperatura é uma variável importante para a segurança de utilização. A bateria deve ser utilizada numa gama de temperatura, pois a eficiência da bateria também é afetada devido à degradação da bateria. Assim sendo, é necessário ao BMS controlo da sobre a temperatura;

- **Equilíbrio das células** - discrepâncias entre cargas das células na bateria, põem em causa o funcionamento e a autonomia da bateria, assim, um sistema de equilíbrio é importante para manter as células todas equalizadas;
- **Estimação do SoH** - estima o número de vezes que a bateria pode ser descarregada e carregada até ao término da sua vida;

2.2.1 Sistemas de equilíbrio de células de baterias

As baterias sem um sistema de equilíbrio de células necessitam de especial atenção, uma vez que existe possibilidade de se sobrecarregarem, de haver uma insuficiência da carga ou até mesmo, descarga além do ponto apropriado.

Os métodos de equilíbrio de baterias podem ser divididos em três grupos: seleção de células, método passivo e método ativo, como mostra a Figura 2.5.

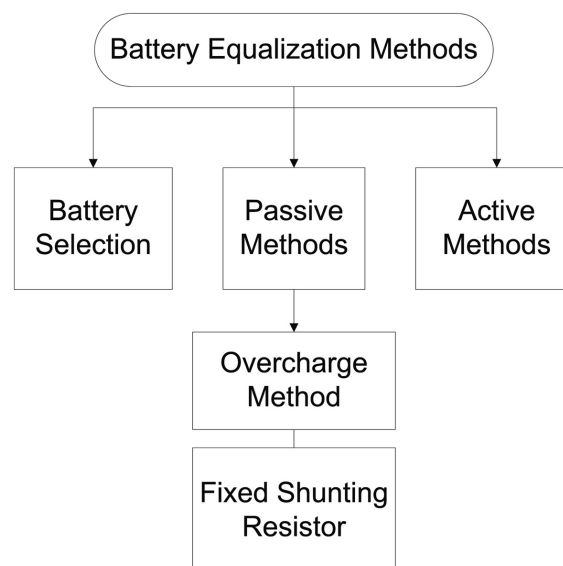


Figura 2.5: Sistemas de equilíbrio de baterias, [5]

2.2.1.1 Seleção de células

De uma forma geral, é feita uma seleção de células com as mesmas propriedades.

Uma primeira abordagem é obter as células com uma capacidade média semelhante, descarregando-as a diferentes regimes de corrente. O segundo procedimento é aplicado às células selecionadas na primeira abordagem. Correntes pulsadas de carga e/ou descarga são aplicadas para diferentes pontos de estado de carga e serão escolhidas as células com a mesma variação da tensão.

Este método não é suficiente para manter uma série de células, uma vez que a auto-descarga, de cada uma, pode variar ao longo do ciclo de vida, [5].

2.2.1.2 Método passivo

O método passivo, pode ser caracterizado em dois sub-métodos: sobrecarga e *shunt* de resistência fixa, [5]. No primeiro, as células são carregadas até que todas atinjam o ponto máximo de carregamento. Uma vez alcançado esse ponto, a energia que estas recebem é convertida em calor pelos elementos resistivos. Na segunda parte, utilizam-se resistências (elemento passivo) em paralelo com as células, descarregando continuamente da corrente em todas as células de modo a que todas tenham o mesmo nível de tensão, como mostra circuito representado na Figura 2.6.

Este método só pode ser utilizado em baterias de chumbo-ácido ou com base em níquel, pois são as únicas que podem ser sobrecarregadas sem que ocorram danos permanentes, contrariamente às baterias de íões de lítio. O método passivo não pode ser utilizado muitas vezes, pois poderá causar eventuais danos nas baterias, uma vez que degrada a vida e o desempenho das mesmas.

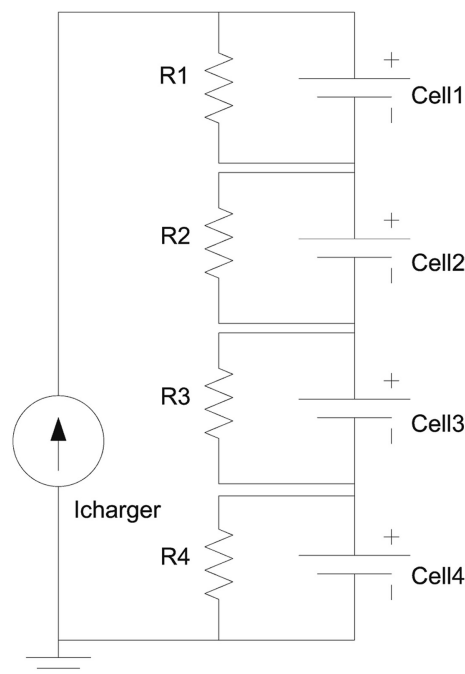


Figura 2.6: Método passivo, *shunt* de resistência fixa, [5]

2.2.1.3 Métodos ativos

Os sistemas que estão incluídos na vertente de métodos ativos são os mais aconselhados a serem aplicados nas baterias de íões de lítio.

Estes sistemas fazem a transferência de energia das células mais carregadas para as que têm a carga mais baixa, para isso, são utilizados condensadores e/ou bobinas, ou transformadores, que são elementos que armazenam energia.

Existem muitos métodos de sistemas de equilíbrio que podem ser divididas nas cinco categorias seguintes: cell bypass, cell to cell, cell to pack, pack to cell e por último cell to pack to cell, como exposto na Figura 2.7.

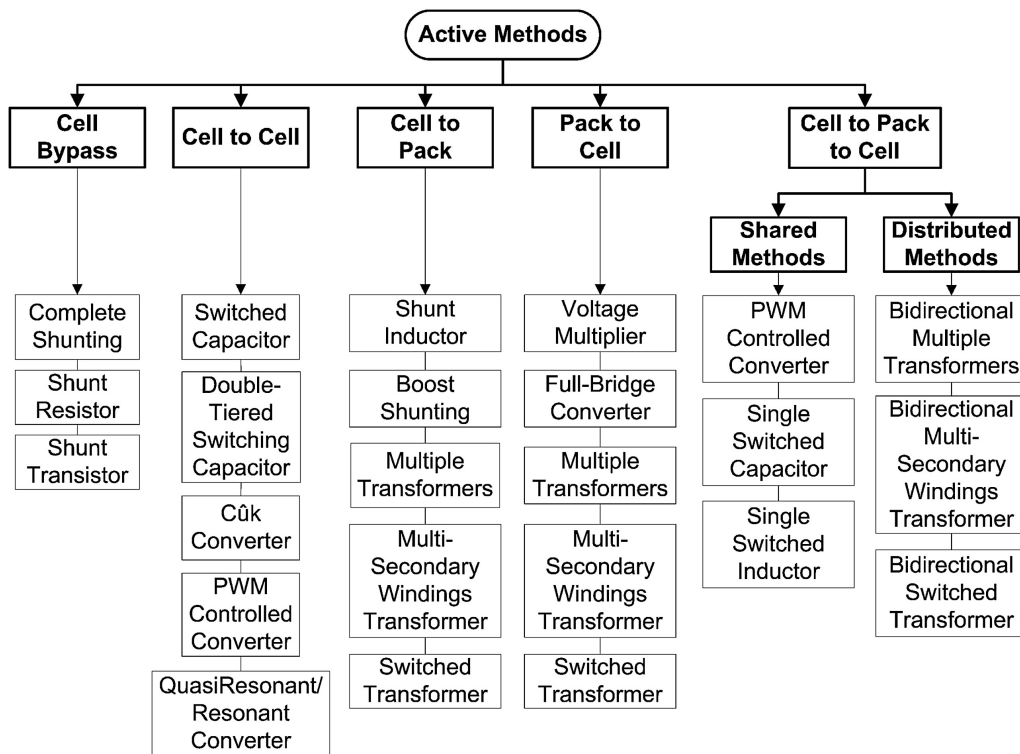


Figura 2.7: Classificação dos vários tipos de métodos ativos, [5]

De seguida serão apresentados os métodos referidos na figura, fazendo um breve resumo do funcionamento de cada um.

2.3 Métodos Ativos

2.3.1 Cell bypass

Nesta categoria, as correntes das células são ignoradas quando estas atingem as tensões limite superiores. Nesta categoria encontram-se os métodos:

2.3.1.1 Shunt resistor

Para este sistema, é implementada uma resistência em série com interruptor paralelamente a cada célula que compõem a bateria, como exemplificado na Figura 2.8a.

No controlo dos interruptores, podemos ter dois modos diferentes. Num primeiro, todos os interruptores estão sincronizados pelo mesmo sinal de controlo, ou seja, ligam-se e desligam-se simultaneamente. Num segundo, cada célula é monitorizada e em caso de desequilíbrio entre células, é averiguado se o interruptor referente à célula em questão deve ser ligado ou não. Quando ligado, deixa de existir corrente na célula passando pela resistência. Deste modo, podemos ter um balanceamento das células enquanto a bateria está carregamento.

Apesar de ser um método com baixo custo de implementação, só deve ser utilizado em aplicações de baixa potência, uma vez que tem elevada dissipação de energia devido aos elementos passivos (resistências).

2.3.1.2 Complete shunting

Neste método, cada célula é controlada por dois interruptores como demonstrado na Figura 2.8b.

Uma célula é desligada do circuito quando chega ao ponto máximo de tensão, no caso de estar a ser carregada, ou mínimo, no caso de descarregada, ou chegando a um valor de referência, caso assim se queira.

Este método tem um baixo custo de implementação, é muito eficiente e tem a particularidade de ser modular. Contudo, só pode ser utilizado em aplicações de baixa potência, uma vez que para correntes mais elevadas, a eficiência do método será menor devido à resistência do interruptor.

2.3.1.3 Shunt transistor

Tem uma ideologia semelhante ao método *Shunt resistor*, onde temos um transístor paralelo a cada célula, exemplificado na Figura 2.8c. Durante o carregamento, caso uma célula chegue ao estado de 100% de carga, o transístor é ligado criando, assim, uma passagem para a corrente.

Comparando com o primeiro modo de funcionamento descrito no método *Shunt resistor*, temos menos perdas de energia, e em relação ao segundo modo, não necessita de um controlo inteligente, o que resultará em menos custos.

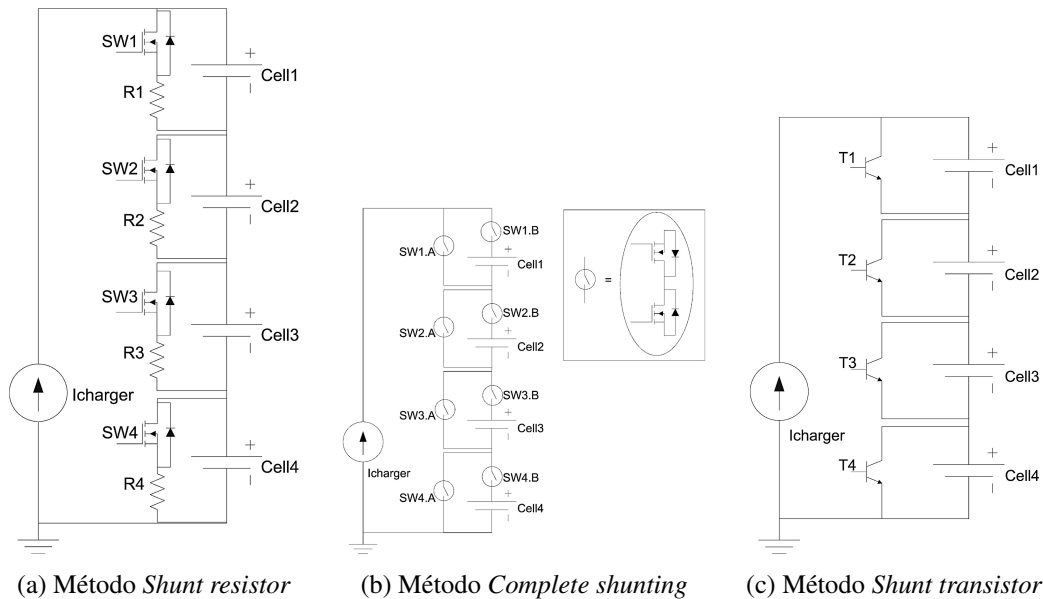


Figura 2.8: Métodos da categoria *Cell Bypass* [5]

2.3.2 Cell to Cell

Em relação a esta categoria, os métodos existentes transferem a energia extra da célula com mais carga para a célula com menos carga.

2.3.2.1 Switched capacitor

Nesta topologia, temos um grupo de condensadores em linha, como exemplificado na Figura 2.9. Este método, é possível de implementar para um número indeterminado de células, porém, o tempo de balanceamento é demorado e é de salientar que o número de condensadores é igual ao número de células menos uma unidade, tornando-se por vezes um circuito extenso.

Experimentalmente, os interruptores são implementados através do recurso a dois MOSFET's. O controlo destes é feito de forma sincronizada, fazendo com que o condensador esteja ligado à célula de cima ou à célula de baixo, transferindo a carga de uma para a outra.

Como já referido, este sistema pode ser utilizado para um número arbitrário de células, ou seja, é um método modular. Pode também ser utilizado para qualquer tipo de bateria, como as de chumbo-ácido ou à base de níquel. É de salientar que não existe necessidade de um controlo em malha fechada. Assim que as células estejam equilibradas, o circuito tem um consumo mínimo, [17].

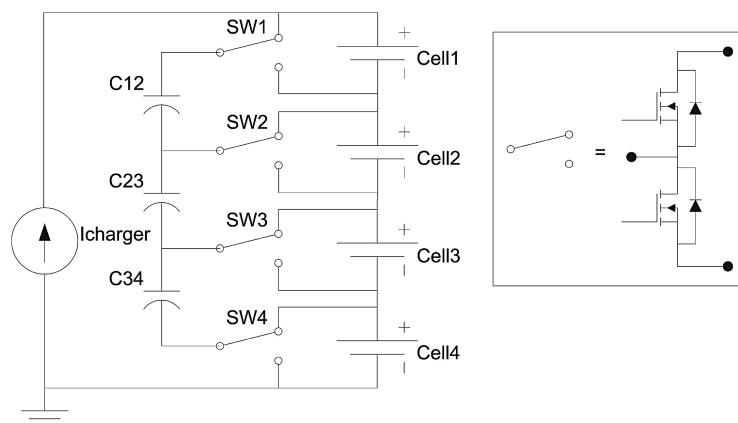


Figura 2.9: Método *Switched capacitor*, [5].

2.3.2.2 Double-tiered switching capacitor

Este sistema é muito semelhante ao *Switched capacitor*, sendo que a única diferença é a inclusão uma segunda camada de condensadores, para que o equilíbrio das células seja alcançado mais rapidamente. O circuito encontra-se exemplificado na Figura 2.10. Tal como no método anterior, os interruptores são controlados da mesma forma.

Este método faz com que a carga possa ser passada entre células que não estão diretamente ligadas, diminuindo o tempo de equalização entre as suas cargas, aumentando assim eficiência do processo, [18].

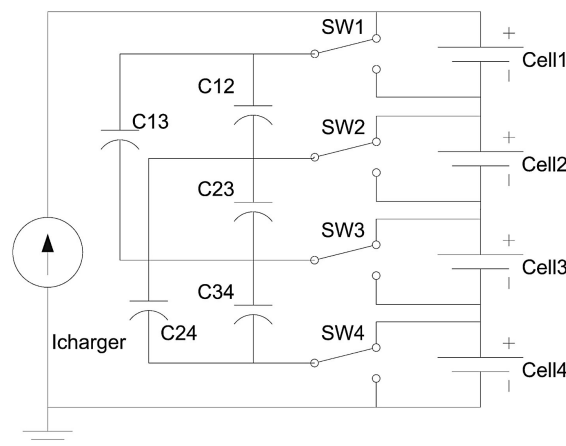


Figura 2.10: Método *Double-tiered switching capacitor*, [5].

2.3.2.3 Cûk converter

Aqui, Figura 2.11, o balanceamento das células, é, de uma forma geral, semelhante aos dois anteriores, pois utilizam um componente capacitivo para a transferência de energia entre células. Como o circuito já possui um outro nível de complexidade, é implementado, com recurso a um condensador, duas bobinas e dois interruptores.

Nesta topologia já é necessária a monitorização das tensões das células, resultando depois no controlo dos interruptores por sinais PWM. Estes sinais determinam a tempo de equalização das células, [18]. Quanto maior a frequência de comutação, menores são as correntes de balanceamento nas bobinas, resultando assim em menos perdas associadas a resistências, havendo assim uma maior eficiência.

Apesar da complexidade no controlo do sistema, este pode ser utilizado em aplicações de grandes potências [5].

2.3.2.4 PWM controlled converter

A topologia básica referente a este método é ilustrada na Figura 2.12 e deriva de um conversor abaixador/elevador, *Buck-Boost*.

Inicialmente, a energia da célula com mais carga é transferida para uma bobina, onde é armazenada, e depois é transferida para a célula adjacente que possui menos carga. A transferência da energia é ditada pelo controlo dos interruptores por sinais PWM.

Como no método referido anteriormente, este é adequado para aplicações de maiores potências, porém, possui uma implementação do controlo mais complexa.

2.3.2.5 QuasiResonant/Resonant converter

Este método é semelhante ao método *PWM controlled converter*, a diferença está na utilização de um circuito ressonante como exemplificado na Figura 2.13, [5].

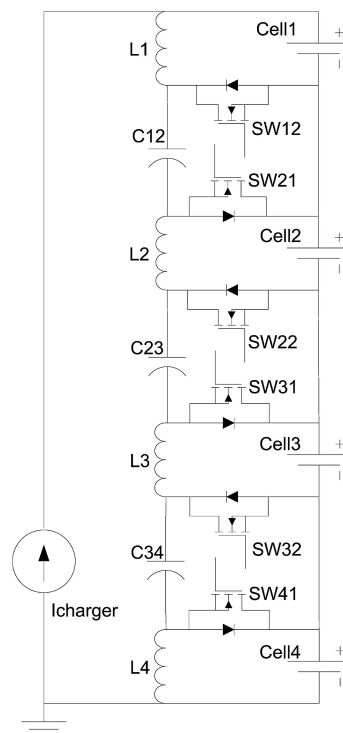


Figura 2.11: Método *Cûk converter*, [5].

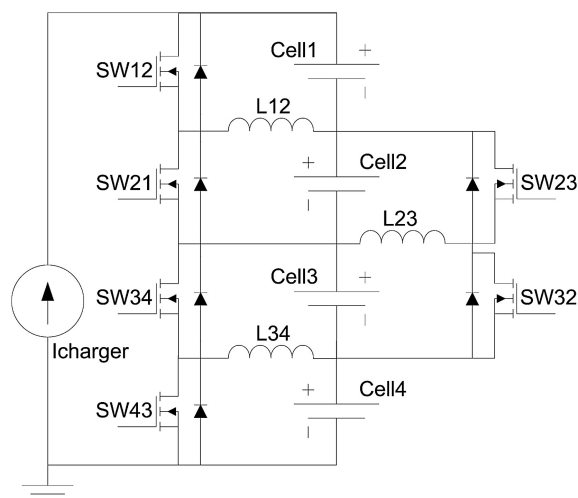


Figura 2.12: Método *PWM controlled converter*, [5].

Esta topologia, permite a redução de perdas relacionadas com as comutações e reduz a interferência eletromagnética. É um bom método para aplicar em sistemas de maior potência, mas tem um controlo muito complexo.

Pode sofrer algumas alterações, de maneira a reduzir perdas de energia quando o interruptor comuta para *ON* ou para *OFF*. Isto está relacionado com *Zero Current Transition* e *Zero Voltage Transition*, ZCT e ZVT, respetivamente.

Relativamente ao circuito ressonante, em vez de se utilizar um controlo inteligente que monitoriza e gera os sinais de comando para os interruptores, é utilizado um circuito ressonante que controla as comutações dos interruptores.

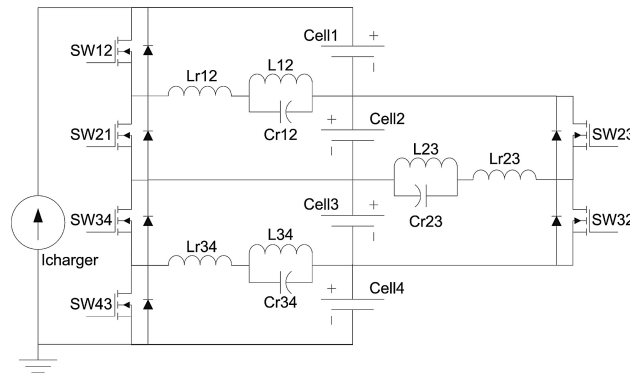


Figura 2.13: Método *QuasiResonant/Resonant converter*, [5].

2.3.3 Cell to Pack

Relativamente aos métodos apresentados nesta categoria, a energia da célula mais carregada é transferida para todo o conjunto de células da bateria.

2.3.3.1 Shunt inductor

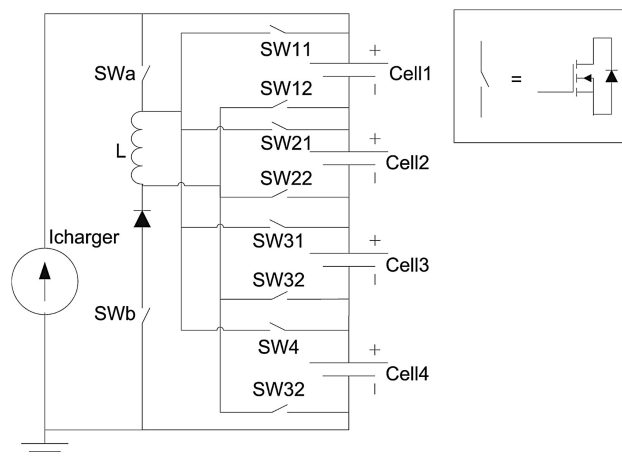
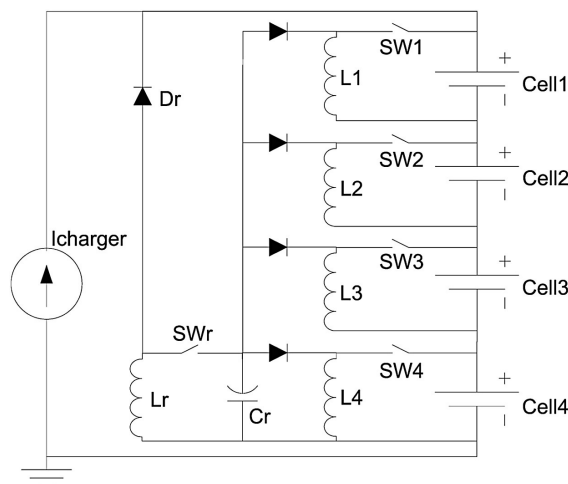
Neste método, Figura 2.14, quando uma célula é detetada por ter mais carga que as restantes, é ligada uma bobina em paralelo com a célula detetada de forma a armazenar essa carga extra que se encontra presente na célula. De seguida essa energia armazenada no indutor é transferida para a bateria, distribuindo-se pelas células que a compõem.

Este método pode ser aplicado para sistemas de maior potência, no entanto, tem como desvantagem o tempo de balanceamento, uma vez que apenas uma célula é ligada à bobina presente, [5].

2.3.3.2 Boost shunting

Tal como o nome indica, este modelo funciona como um conversor *boost*. Uma vez detetada a célula com mais energia, o interruptor associado a esta e o interruptor SW_r , como exemplificado na Figura 2.15, são controlados transferindo a energia dessa célula para as restantes, para isso, o controlo é feito por sinais PWM.

Tal como alguns métodos já referidos, este é adequado para aplicações de maior potência, porém a complexidade do controlo é elevada, [5].

Figura 2.14: Método *Shunt inductor*, [5].Figura 2.15: Método *Boost shunting*, [5].

2.3.3.3 Multiple transformers

Como mostra a Figura 2.16, temos um transformador para cada célula, estando o primário em série com um *switch* paralelamente ligado à célula. Na parte do secundário, temos um interruptor em série de forma a controlar a energia que é transferida para a bateria, [5].

Detetada na bateria a célula com mais carga, o funcionamento do sistema tem dois passos, o primeiro onde resulta a comutação do interruptor do primário para o estado ligado, desta forma a energia extra é armazenada como campo magnético no transformador. Depois disto, o interruptor é desligado e é ligado o que está em série com o secundário, fazendo com que a energia existente como campo magnético seja transferida para a bateria.

Apesar de ser um bom método para aplicações de maior potência, é um método caro com um controlo complexo de implementar e também é muito grande em dimensões físicas.

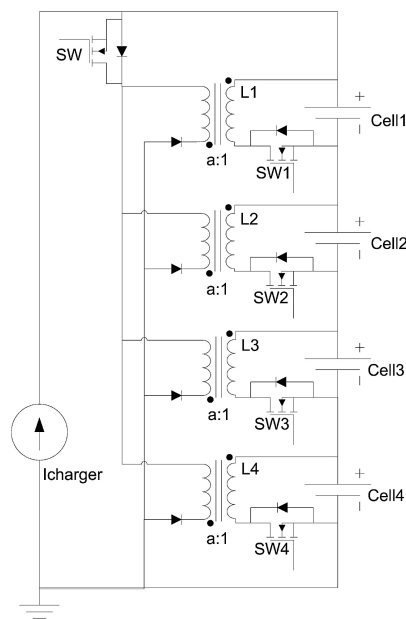


Figura 2.16: Método *Multiple transformers*, [5].

2.3.3.4 Multisecundary windings transformer

Este método é muito semelhante ao anterior, com a diferença de que só possui um transformador com múltiplos secundários, cada um ligado paralelamente a uma célula por um interruptor e apenas um enrolamento primário que permite a transferência de energia para a bateria, sendo também este, controlado por um *switch*.

Quando detetada a célula com mais carga, o interruptor desta liga-se, passando a estar presente no campo magnético a energia extra. De seguida, é desligado o interruptor da célula e é ligado o interruptor associado ao primário, transferindo a energia extra do campo magnético para o pack da bateria, [5].

Do mesma forma que o método anterior, este circuito tem um custo elevado e as suas proporções físicas são grandes, além disto a velocidade de equalização é lenta.

2.3.3.5 Switched transformer

Este método diferencia-se do *Multisecundary windings transformer* pelo simples facto de ter apenas uma bobina no secundário.

Cada célula está conectada ao secundário por dois interruptores e dois díodos, estes para orientar o sentido da corrente. Para transferir a energia da célula, são ligados os dois interruptores fazendo com que seja armazenada no campo magnético, de seguida é transferida para a bateria pelo primário.

Este método, tem um elevado custo os circuitos associados e tem dimensões grandes. Tem também um controlo complexo e a velocidade de equilíbrio da bateria é lenta, [5].

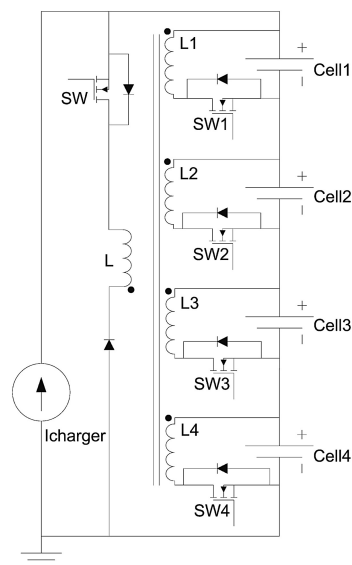


Figura 2.17: Método *Multisecondary windings transformer*, [5].

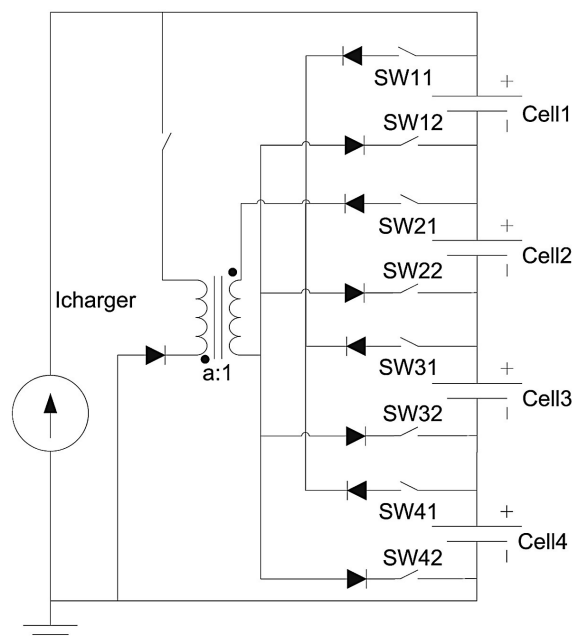


Figura 2.18: Método *Switched transformer*, [5].

2.3.4 Pack to Cell

Esta categoria, é exatamente o oposto da categoria anterior. Neste caso é retirada energia da bateria transferindo-a depois para a célula com menos carga.

2.3.4.1 Voltage multiplier

Neste sistema, a sua implementação possui um número de condensadores igual ao das células, o dobro de díodos e um interruptor controlado por uma onda quadrada, como ilustrado na Figura

2.19, [19].

Num primeiro instante, quando o sinal do interruptor está a *ON*, as células são descarregadas pelos díodos com numeração par, presentes na figura, carregando os condensadores. No segundo instante, quando o sinal de controlo passa a *OFF*, a corrente do carregador é distribuída pelos condensadores e através dos díodos com numeração ímpar as células são carregadas com mais ou menos corrente consoante o seu nível de carga em relação à tensão média da bateria, fornecendo mais às células com menor tensão. Depois de equilibradas, a corrente de carregamento é igualmente distribuída para toda a bateria, [5].

Este método tende a ter grandes perdas quando a corrente é desigualmente distribuída pelas células. Apesar disto, pode ser utilizado em aplicações de grande potência, tem um custo reduzido e tem uma boa eficiência se a frequência de comutação for suficientemente alta para reduzir a resistência equivalente e se a tensão nas células for suficientemente alta para desprezar as quedas de tensão dos díodos.

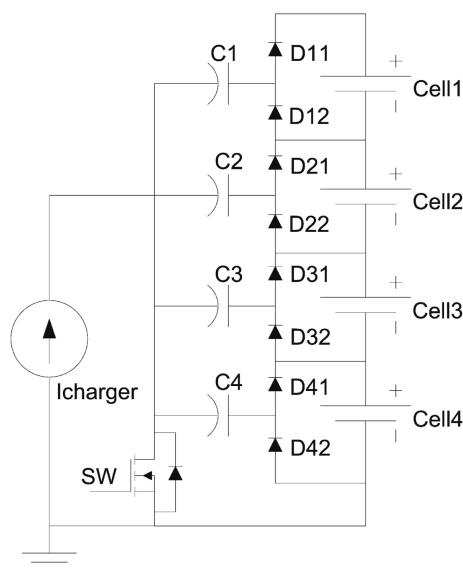


Figura 2.19: Método *Voltage multiplier*, [5].

2.3.4.2 Full-bridge converter

Este método, tal como o nome indica é baseado nos conversores de ponte completa. Como os restantes métodos desta categoria, a energia proveniente da bateria é transferida individualmente para cada célula, [5] e [20].

O conversor pode funcionar em modo AC/DC, tornando-se um sistema *plug-in*, isto é, um sistema que pode ser diretamente carregado da rede, o que o faz ser apetecível, pode ainda, ser controlado para um funcionamento DC/DC.

Tem como vantagem ser um sistema modular, permitindo alterar a bateria, aumentando ou reduzindo a capacidade, sem necessidade de modificar o que já estava implementado. É também

um método eficiente e é adequado para aplicações de maior potência, contudo, o controlo tem uma complexidade muito elevada.

Na Figura 2.20 é dado um exemplo de configuração do método.

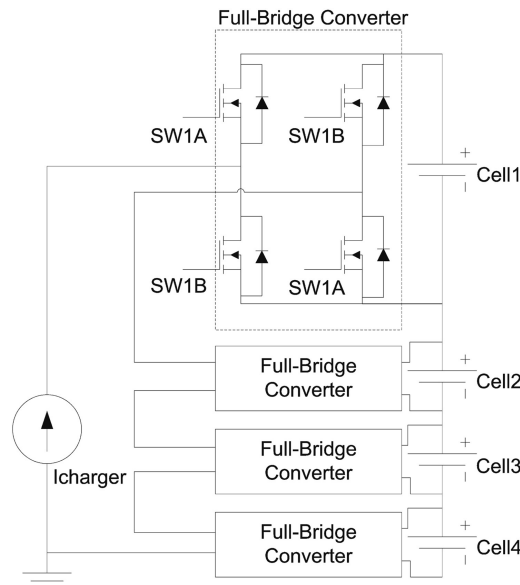


Figura 2.20: Método *Full-bridge converter*, [5].

2.3.4.3 Multiple transformers

Nesta topologia, como mostra o exemplo na Figura 2.21, a corrente da bateria é transferida pela comutação do interruptor para os enrolamentos primários de todos os transformadores, introduzindo uma corrente de indução no secundário de todos os transformadores.

Cada célula recebe uma corrente de carga inversamente proporcional ao seu estado de carga. Isto devido à célula com menos carga fazer com que no enrolamento secundário haja uma reactância menor, o que leva a uma corrente de carga maior, [21].

Esta topologia é aconselhada para sistemas de maior potência, porém, tem um custo elevado e dimensões grandes. Este método é semelhante ao que irá ser apresentado a seguir, tendo como vantagem ser modular facilitando alterações nas capacidades das baterias, [22].

2.3.4.4 Multisecundary windings transformer

Este método é muito semelhante com o anteriormente descrito, contudo, apenas temos um transformador com múltiplos secundários, cada um destinado a uma célula. A na Figura 2.22 apresenta uma estrutura *flyback*, existe ainda uma estrutura *forward*, que não se encontra representada, [22].

Como explicado no método anterior, quando o interruptor está ativado, alguma energia da bateria é armazenada no fluxo magnético do transformador. Depois, com o interruptor desligado, maior parte da corrente induzida é transferida para as células com menor carga, [23].

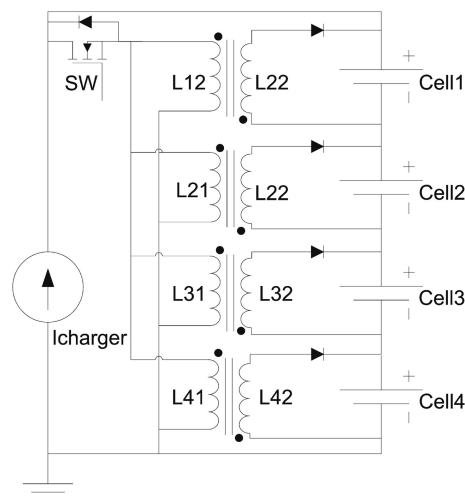


Figura 2.21: Método *Multiple transformers*, [5].

Como na topologia anterior, esta também tem uma implementação dispendiosa e tem dimensões grandes.

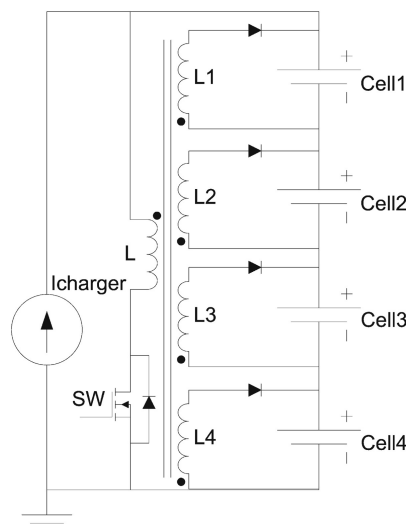


Figura 2.22: Método *Multisecundary windings transformer*, [5].

2.3.4.5 Switched transformer

Aqui, temos um transformador com um enrolamento primário e um secundário. Neste caso, o importante é o controlo dos interruptores em todas as células. O controlo é que dita para que célula é que vai a energia que estará armazenada no transformador.

Apesar de este método ser rápido a equilibrar as células, tem um custo elevado, tem uma eficiência mais baixa devido às perdas de comutação dos interruptores e é complexo de implementar a nível de controlo, [24].

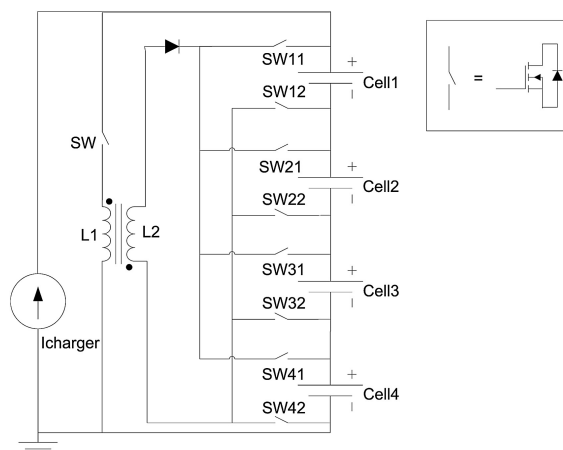


Figura 2.23: Método *Switched transformer*, [5].

2.3.5 Cell to Pack to Cell

Por último nesta categoria, os sistemas transferem a energia de células seleccionadas para as células alvo.

2.3.5.1 PWM controlled converter

Neste método, temos a conexão das célula a um condensador através de conversores *buck-boost*. No modelo apresentado na Figura 2.24, temos $N-1$ conversores para N células. Em cada conversor, a tensão de entrada é representada pela a tensão composta referente a um grupo de células da bateria, e a tensão de saída é representada pela tensão das restantes células, [5].

As correntes de equalização dependem do desbalanceamento dos potenciais de tensão nos terminais dos indutores.

Tem desvantagens como o complexo controlo de funcionamento, dimensões físicas grandes e o custo elevado.

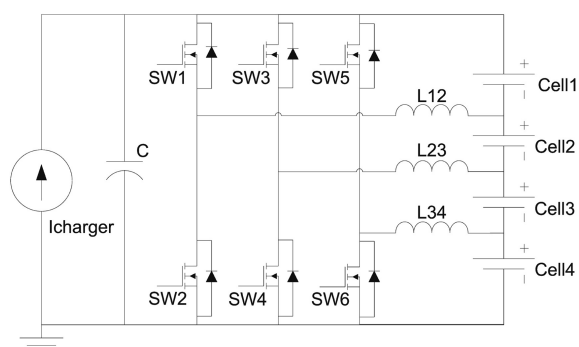


Figura 2.24: Método *PWM controlled converter*, [5].

2.3.5.2 Single switched capacitor

Este método é baseado no referido anteriormente *Switched capacitor*, mas este tem a particularidade de ter, apenas, um condensador na implementação, como exemplificado na Figura 2.25.

Primeiramente, é detetada a célula com mais carga e através dos interruptores, o condensador é colocado em paralelo, fazendo-o com que fique com a mesma tensão que a célula. De seguida, os interruptores são desligados e são ligados os da célula com menos carga, desta forma, a carga armazenada no condensador é transferida para a célula.

É um método de baixo custo e com alta eficiência para aplicações de grande potência, porém, é um método com uma velocidade de equalização baixa, uma vez que as células são equilibradas individualmente, [5].

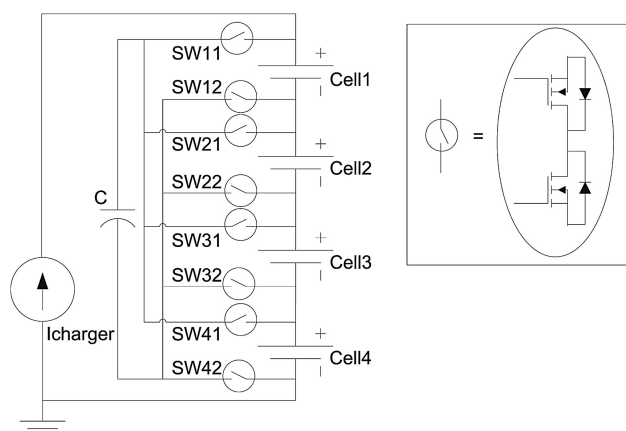


Figura 2.25: Método *Single switched capacitor*, [5].

2.3.5.3 Single switched inductor

Este método é muito semelhante ao método *Single switched capacitor*, a única diferença é que em vez de um condensador a armazenar a energia temos uma bobina.

As vantagens e desvantagens deste método são os mesmo que o anterior, [5].

2.3.5.4 Bidirectional multiple transformers

Este permite a transferência de uma célula para o pack de células que compõem a bateria e vice-versa. Como demonstrado na Figura 2.27, temos um *switch* em série com cada enrolamento dos transformadores, de forma a ser possível a transferência bidirecional da energia.

Durante o carregamento das células, o excesso de carga de cada célula é transferido para a bateria. Quando se encontra a descarregar, caso seja detetada uma célula mais fraca, é transferida energia da bateria para essa célula, [5].

As vantagens deste método são a combinação das vantagens existentes do método *Mutiple transformers* apresentado na categoria *Cell to Pack* com o da categoria *Pack to Cell*.

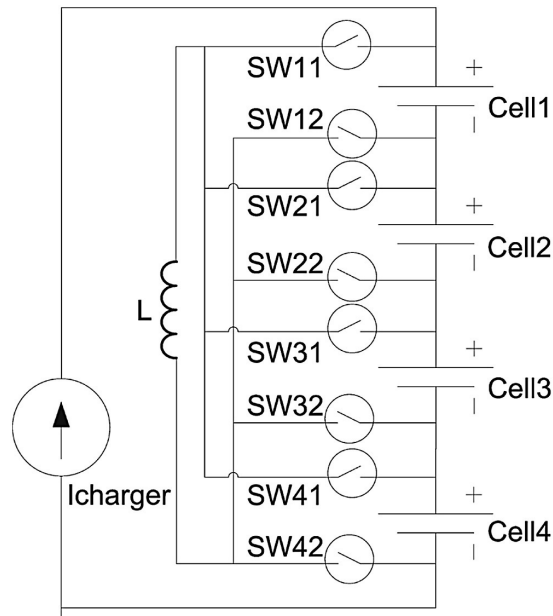


Figura 2.26: Método *Single switched inductor*, [5].

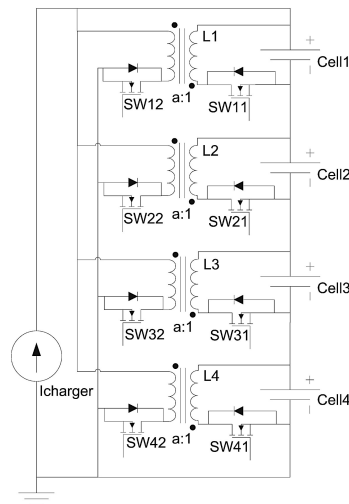


Figura 2.27: Método *Bidirectional multiple transformers*, [5].

2.3.5.5 Bidirectional multisecondary windings transformer

Este é semelhante aos métodos *Multisecondary windings transformer* que se apresenta na categoria *Cell to Pack* e na categoria *Pack to Cell*. O sistema tem um primário em série com um interruptor e tem cada célula ligada paralelamente a um secundário, também este, em série com um *switch*, como exemplificado na Figura 2.28.

Um vez detetado um desequilíbrio, este método permite a transferência de energia da bateria para a célula detetada com menos carga, ou então, permite que a célula mais carregada transfira essa energia extra para o transformador que depois irá distribuir para o pack todo. Há também a possibilidade de transferir diretamente de uma célula para outra, [5].

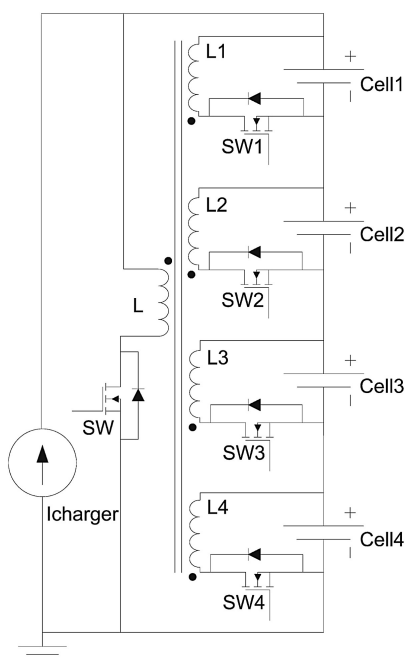


Figura 2.28: Método *Bidirectional multisecondary windings transformer*, [5].

2.3.5.6 Bidirectional switched transformer

Este método é muito semelhante aos referidos *Switched transformer* que se encontram nas categorias *Cell to Pack* e *Pack to Cell*. Tem a vantagem de ser bidirecional, uma vez que não tem díodos para controlar o modo de equilíbrio, como demonstrado na Figura 2.29.

Nesta topologia, caso haja uma célula com mais carga, é transferida a energia extra para a bateria, caso seja detetada uma célula com menos, alguma energia da bateria é transferida para a célula de modo a equilibra-la com as restantes.

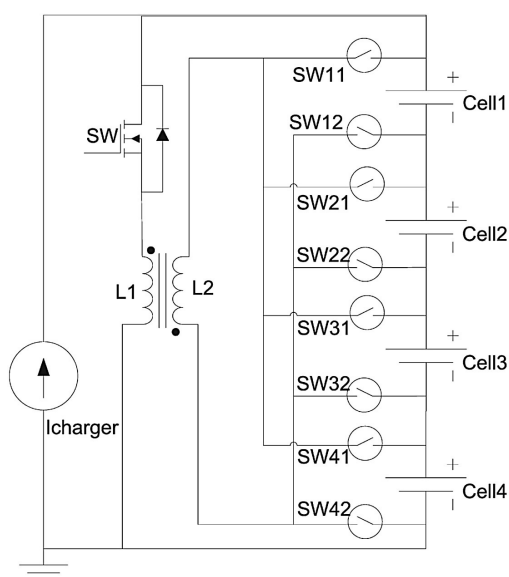


Figura 2.29: Método *Bidirectional switched transformer*, [5].

2.4 Análise de mercado

Nesta dissertação, como o objetivo é a implementação de um sistema de equilíbrio de células de baterias de baixo custo, fez-se uma análise de mercado com base nos sistemas disponíveis já desenvolvidos, para comparar com o sistema que será apresentado neste documento.

Com esta análise, verificou-se que existem vários modelos quer digitais ou analógicos numa gama de preços muito grande. As Figuras 2.30 e 2.31 ilustram o exposto.

Na Figura 2.30 apresenta-se um gráfico referente ao preço de sistemas de balanceamento digitais em função do número de células em série. Na Figura 2.31, apresenta-se o gráfico de preços de sistemas de equilíbrio analógicos relativamente ao número de séries, as linhas mais grossas representadas nesse mesmo gráfico referenciam os sistemas de equilíbrio.

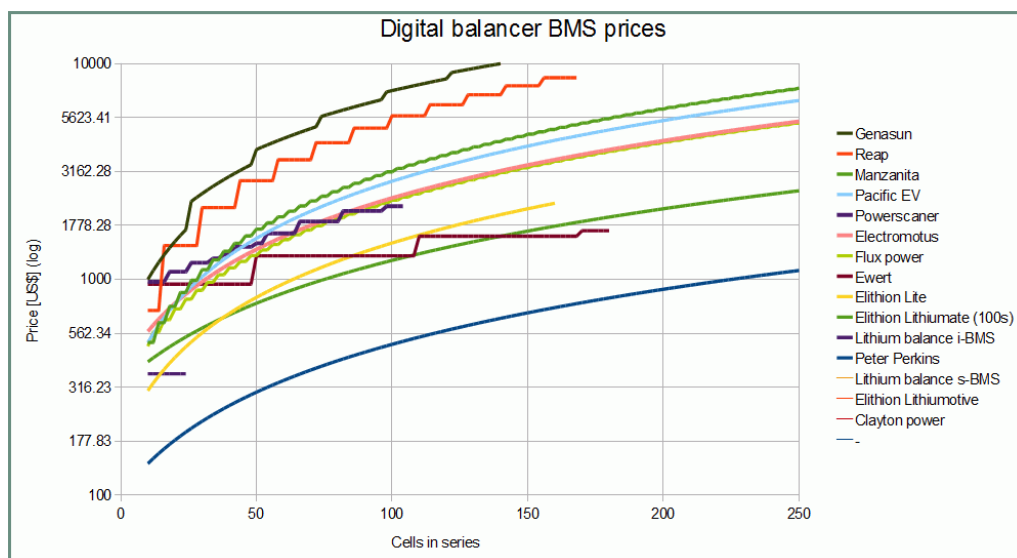


Figura 2.30: Gráfico de preços de sistemas de equilíbrio digitais, [6]

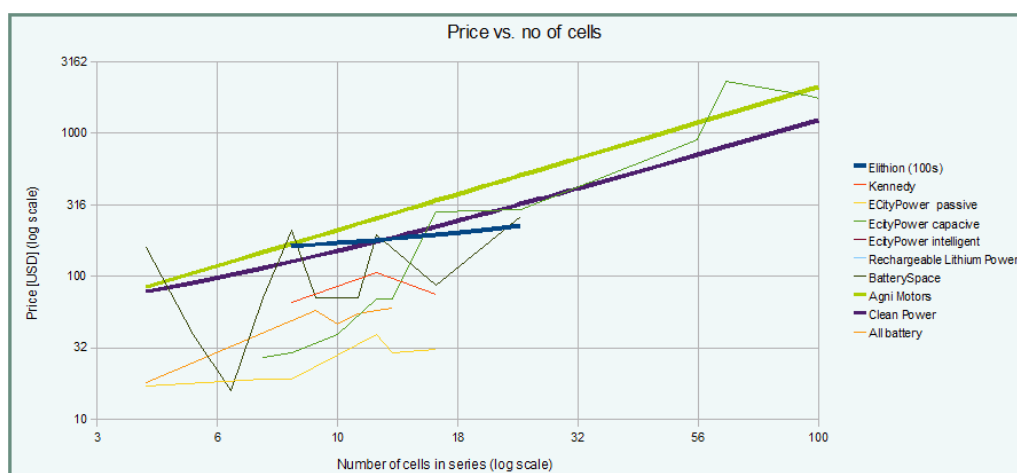


Figura 2.31: Gráfico de preços de sistemas de equilíbrio analógicos, [6]

Nesta pesquisa, verificou-se que os sistemas mais económicos ou são sistemas de balanceamentos passivos, onde não há reaproveitamento da energia extra armazenada nas células com mais carga, ou são sistemas compostos por módulos e o referente preço é relativo a cada módulo. É de salientar ainda, que os sistemas de valor mais elevado, são sistemas que já realizam a gestão da bateria.

2.5 Conclusão

Ao longo deste capítulo, vimos que as baterias apresentam condições variáveis, quer relacionadas com o tipo de bateria mas também com as suas características resistivas e capacitivas. É de grande importância considerar estas características quando se faz a escolha e projeto de um sistema de balanceamento.

Depois da análise feita aos vários modelos de baterias, compreende-se o interesse demonstrado em torno das baterias de íões de lítio para sistemas de veículos elétricos ou até mesmo para sistemas de energias renováveis. Estas contêm características muito apetecíveis, como elevada densidade energética o que leva a baixo peso, elevada eficiência e um longo ciclo de vida. Contudo, a necessidade de funcionamento em condições limitadas, as diferenças entre células a nível interno que traduzem em diferentes valores de capacidade e estado carga. Estas diferenças ou estes entraves, remetem para a diminuição do tempo de vida das baterias. Assim sendo, é bastante compreensível o esforço dedicado em melhorar os sistemas de gestão de baterias, devido à obrigatoriedade de funcionamento em condições limitadas por parte destas baterias e com isto, melhorar, também, os sistemas de balanceamento ativo de forma a compensar as diferenças relatadas entre células.

Passando para o estudo de sistemas de balanceamento estudados, existem sempre prós e contras em todos eles. Métodos baseados em bobinas/transformadores, têm fortes vantagens por ser possível fazer um controlo da corrente e por ser possível tirar proveito da razão de transformação de forma a ter uma tensão de saída desejada. Porém, estes sistemas têm perdas magnéticas significativas e devido às dimensões que os bobinas necessitam de ter, estes tornam-se sistemas com grandes proporções, o que os torna pouco desejáveis.

Já os métodos com base em conversores, têm como principal vantagem o tempo que necessitam para equilibrar as células. No entanto, estes têm um custo muito elevado e a dificuldade da implementação do controlo é igualmente elevada.

Por fim, os métodos baseados em condensadores têm um controlo simples, têm um custo mais baixo e têm boa eficiência. Todavia, estes sistemas são mais lentos a equilibrar.

Concluindo este capítulo, para a escolha de um sistema de equilíbrio de células de baterias deve-se ter em conta a razão de custo/eficiência. Dependendo dos casos e dos projetos em causa a rapidez de equilíbrio é um fator muito importante, para aplicações automóveis é decisivo.

Capítulo 3

Sistema de Equilíbrio

Finalizada a devida revisão bibliográfica, a propósito dos métodos de sistemas de equilíbrio existentes, decidiu-se por concretizar experimentalmente um sistema de equilíbrio com base em condensadores.

O sistema que se pretende desenvolver deverá ser implementado com base no funcionamento de um circuito deste tipo e assumir que não existem idealidades nos componentes.

Deste modo, é importante existirem alguns requisitos que o projeto deverá cumprir, de forma a tornar a sua aplicação funcional e que satisfaça o objetivo final. Este sistema deverá balancear a carga das células de forma ativa, de modo a maximizar o rendimento da bateria; a sua utilização deve ser prática e as suas dimensões mínimas.

Assim sendo, é importante que o sistema consiga transferir energia de umas células para as outras, a parametrização dos componentes tendo em consideração as frequências que serão impostas, a escolha dos semicondutores é igualmente importante, na medida que, devem minimizar as perdas e quedas de tensão.

Este capítulo tenciona explicar como é transferida a carga de uma bateria para a outra através da utilização de condensadores e apresentar o funcionamento do sistema proposto, a topologia a implementar. De seguida, é apresentado o esquema do sistema de balanceamento a desenvolver para duas e três células em série e uma pequena comparação entre sistemas com uma camada de condensadores e com duas camadas. Posteriormente, será feita uma parametrização, dimensionamento e explicação do funcionamento do sistema de equilíbrio escolhido.

3.1 Circuito RC

Como se sabe, o condensador é um componente que armazena energia de valor diretamente proporcional à tensão aos seus terminais. A energia armazenada no condensador pode ser calculada pela equação, 3.1:

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

A variação de tensão do condensador dada por ΔV , será o valor da diferença de tensão entre a tensão final do condensador e a tensão de onde este partiu.

O valor da carga armazenada no condensador para cada comutação no equilíbrio das células, é calculado pelo produto da capacidade do condensador com a diferença de tensão entre a célula com mais carga e os terminais do condensador, como apresentado na expressão 3.3.

$$Q = C\Delta V \quad (3.2)$$

Uma vez que se trata de um circuito com condensador, podemos definir a equação que rege o funcionamento do sistema como sendo:

$$I_C = C \frac{dV_C}{dt} \quad (3.3)$$

Porém, a taxa de carregamento do condensador não é linear. Por estas razões é importante referir que o tempo de carga do condensador até ao seu ponto máximo é cerca de cinco vezes a constante de tempo do condensador. Esta constante de tempo do elemento capacitivo é dada pela fórmula 3.4 e significa o tempo que o condensador demora a carregar 63,2% da sua capacidade total. A Figura 3.1 apresenta a curva da tensão do condensador no carregamento:

$$\tau = R * C \quad (3.4)$$

$$T_{total} = 5 * \tau \quad (3.5)$$

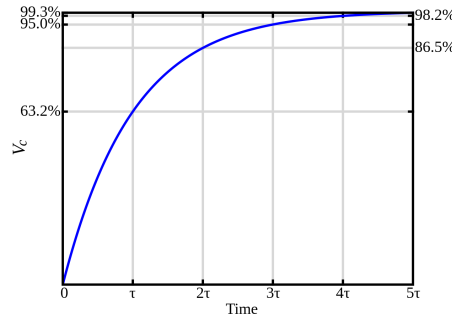


Figura 3.1: Gráfico da carga do condensador, [7].

3.2 Sistema

Como já referido, estes sistemas com base em condensadores tendem a ser relativamente lentos, sendo uma desvantagem em relação a outros. Assim sendo, tornou-se desafiante a concretização de um sistema deste género de modo a tentar melhorar a rapidez de equilíbrio. A topologia em questão será *Double-tiered Switching Capacitor*, pela facilidade em adquirir o material necessário e porque o sistema não é demasiado complexo de implementar.

Este método, assim como a versão mais simples *Switched Capacitor*, baseia-se na comutação de condensadores entre as células adjacentes que constituem uma bateria. São utilizadas duas linhas de ação de condensadores de forma a balancear mais rapidamente as células da bateria, em comparação com o *Switched Capacitor*. Os condensadores, devido às suas características, transferem energia da célula com tensão mais alta para a célula com tensão mais baixa, independentemente da célula seguinte ou anterior ao par em que atua.

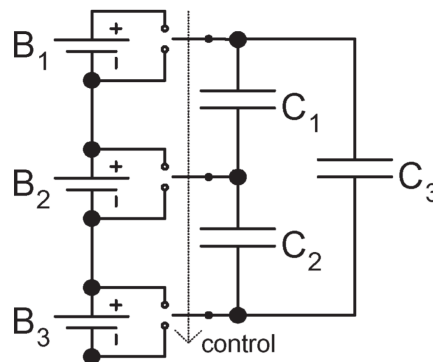


Figura 3.2: Double-tiered Switching Capacitor,[8].

3.3 Modelos de simulação

Quando se tenciona executar uma análise de um circuito é necessário a modelização do mesmo, usando software de simulação computacional.

Para este caso, o programa de simulação utilizado foi o *PowerSim*, para o desenvolvimento do sistema de equilíbrio para um conjunto de duas, três e seis células em série.

O percurso da corrente entre as células da bateria e os componentes de armazenamento de energia é essencial para a operação do método de balanceamento. Uma vez que existem dois sinais de comando para os vários interruptores do sistema, é necessário o desenvolvimento de um circuito que permita este funcionamento.

Toda a bibliografia encontrada até à escrita deste documento, refere a utilização de interruptores bidirecionais, como se se tratasse de um componente, contudo, na realidade, a característica de interruptor bidirecional surge da exploração do esquema de dois MOSFET's ligados em anti-série, ou seja, *sources* comuns, permitindo que o sinal de comando para os dois seja o mesmo, como exemplificado na Figura 3.3.

A metodologia de *switch* bidirecional é uma alternativa adequada ao uso de díodos, uma vez que estes possuem uma queda de tensão grande desfavorecendo-os no dimensionamento de sistemas de equilíbrio. No entanto, haverá, também, quedas de tensões associadas aos semicondutores utilizados, contudo, estas serão significativamente mais reduzidas comparativamente aos díodos.

Uma vez que para o par de transístores, temos o mesmo sinal de controlo, isto é, os dois ligam-se e desligam-se simultaneamente, nos seguintes e futuros esquemas será considerado o par de MOSFET's como um *switch*.

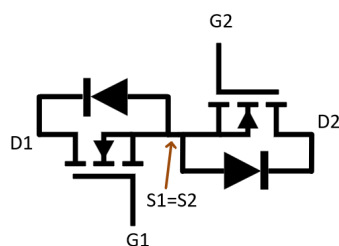


Figura 3.3: Esquema de montagem do interruptor bidirecional.

3.3.1 Duas células em série

Inicialmente, foi implementado um circuito com duas células em série com um condensador a fazer a transferência de energia.

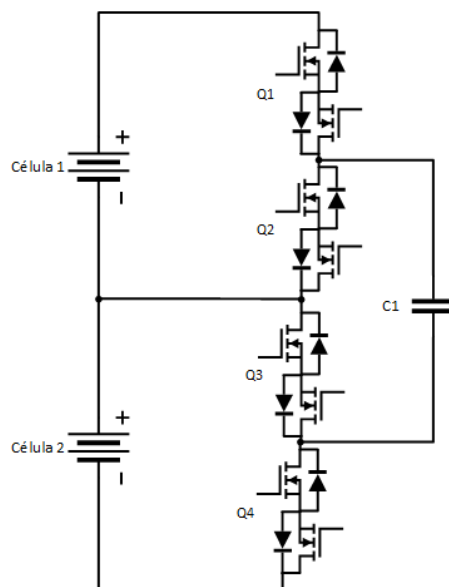


Figura 3.4: Esquema do sistema de equilíbrio para duas células em série.

Neste esquema de equilíbrio não é necessário a monitorização das tensões de cada célula da bateria. Uma vez que o condensador carrega-se para o valor da tensão da célula com mais carga e descarrega-se para a tensão da célula com menos carga, apenas é preciso dois sinais de comando, um para os interruptores Q1, Q3 e outro para os *switches* Q2 e Q4. Na secção 3.5 será exemplificado o controlo do sistema.

No esquema aqui aplicado, temos apenas um condensador para fazer a transferência de energia entre as duas células adjacentes, ilustrado na Figura 3.4. Com apenas duas células, este sistema de balanceamento é idêntico à topologia *Switched Capacitor*, visto que este é seu derivado.

3.3.2 Três células em série

Com a terceira célula em série, o esquema já está de acordo com a topologia que se pretende implementar. Temos na primeira camada, dois condensadores para fazer a transferência de energia

entre células adjacentes e temos uma segunda camada onde se faz a transferência de energia entre as duas células em série superiores com as duas em série inferiores, sendo a célula do meio comum para a carga e descarga do condensador, Figura 3.5. Desta forma, a variação de tensão que ditará a transferência de carga será entre a célula mais carregada e a célula mais descarregada, entre as três.

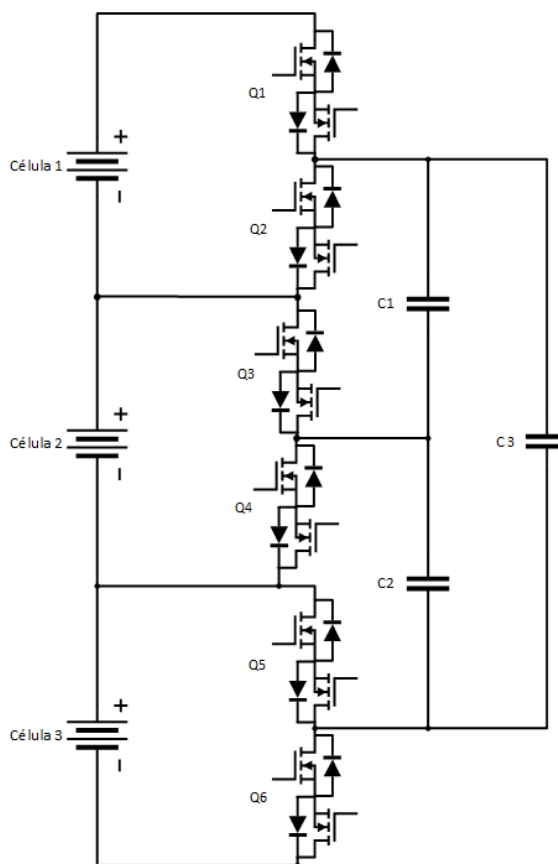


Figura 3.5: Esquema do sistema de equilíbrio para três células em série.

Para aplicações como VE's ou sistemas de produção de energia renovável, duas ou três células em série a formar uma bateria não serão suficientes para os níveis de tensão que estes necessitam. Deste modo, o design de um circuito de equalização para uma bateria com seis células em série, que é equivalente a uma bateria de 24V, seria já um esquema mais próximo do que poderia ser implementado em sistemas com alguma potência.

O esquema do circuito a implementar para seis células em série é semelhante ao esquema com três acrescentando, apenas, os condensadores e os interruptores bidirecionais em falta.

3.3.3 Comparação dos esquemas

Na Tabela 3.1, são apresentadas as principais diferenças entre os esquemas acima analisados relativamente ao número de condensadores utilizados, número total de MOSFET's aplicados em cada sistema. Também é comparada a possibilidade de balanceamento a partir de células em série, a velocidade de equilíbrio, tamanho do sistema, custo e se são modulares.

Relativamente ao tamanho, as diferenças serão fundamentalmente o número de condensadores a serem utilizados. Desta forma, e verificando a análise dos dois esquemas pela Tabela 3.1, temos a possibilidade de fazer uma seleção do esquema a utilizar. Se a dimensão do sistema for um aspeto importante, então a utilização do primeiro esquema, onde só temos uma camada de condensadores, é a mais indicada, e o mesmo referente ao custo de implementação. Por outro lado, se a velocidade de equilíbrio é algo a ter em conta, então o segundo esquema é mais apropriado.

Tabela 3.1: Tabela comparativa dos esquemas apresentados

Esquema	<i>Single-tier</i>	<i>Double-tier</i>
nº de Condensadores	$n/2$	$2n-3$
nº total MOSFET's	$4n$	$4n$
Série de Células	Não	Sim
Velocidade	Muito Lento	Lento
Eficiência	Alta	Alta
Tamanho	+	++
Custo	€	€€
Modular	Sim	Sim

n - número de células;

3.4 Parametrização e dimensionamento

3.4.1 Bateria

Para a execução de simulações, as baterias podem ser modeladas, no software, por um condensador de elevada capacidade e por uma resistência série, *Modelo de Rint* descrito no ponto 2.1.2. A capacidade da célula é calculada da seguinte forma:

$$C_{célula} = \frac{Q}{\Delta V} \quad (3.6)$$

Sabe-se que a carga de uma célula é dada pelo produto da capacidade da célula da bateria em Ah por 3600 coulombs, isto porque, $1Ah = 3600C$. É de referir que as células que se vão utilizar têm uma capacidade de $10Ah$. Uma vez que esta dissertação tem como foco um sistema para células de iões de lítio, assume-se que a variação de tensão máxima é de 1,2V, visto que as

tensões limite são 4,2V e 3V, máxima e mínima, respetivamente. Com isto, tem-se a capacidade equivalente da célula dada pela equação seguinte:

$$C_{célula} = \frac{10 * 3600}{4,2 - 3} = 30000F \quad (3.7)$$

3.4.2 Semicondutores

Para a implementação de um sistema destes, os semicondutores a utilizar deverão cumprir certos requisitos. Dado que um sistema de balanceamento deve ser rápido, os semicondutores também o deverão ser. Para cumprir o papel de interruptor, podem ser utilizados MOSFET's ou IGBT's (para tensões elevadas), contudo os MOSFET's têm uma baixa resistência interna, funcionam a frequências elevadas, têm uma velocidade de comutação rápida e condução em ambos sentidos. Em suma, a escolha de MOSFET's para esta aplicação é a mais indicada.

3.5 Funcionamento

No controlo para a topologia do sistema de equilíbrio escolhido, temos dois estados. O estado A em que condensadores estão ligados às células ímpares pelos interruptores e o estado B em que condensadores estão ligados às células pares. Entre os dois estados temos um pequeno intervalo de tempo com os comandos a zero, *dead-time*, de modo a prevenir curto-circuito. A Figura 3.6 ilustra o exposto.

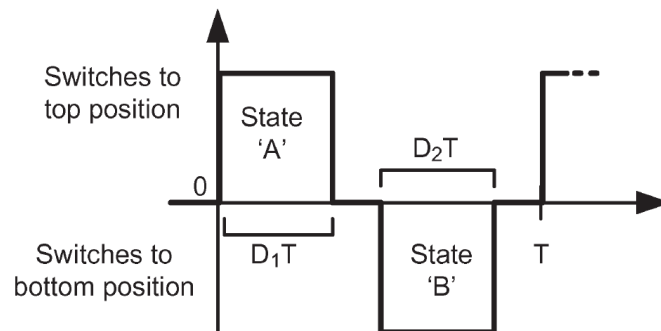


Figura 3.6: Controlo dos interruptores bidirecionais,[8].

A transferência de energia é sempre feita de uma célula para uma vizinha, em relação à primeira linha de condensadores. Já na segunda camada, a transferência de energia é feita de uma célula para uma outra que não esteja imediatamente ligada.

Explicando o método e começando pela primeira camada, como exemplificado na Figura 3.7, assumindo que a Célula 1 tem mais carga que a Célula 2, e esta mais que a Célula 3, no estado A do controlo, o condensador C1 irá carregar-se até à tensão da Célula 1 e o condensador C2 até à tensão da Célula 2, Figura 3.7a. No estado B, os condensadores C1 e C2 vão-se descarregar para as Células 2 e 3, respetivamente, Figura 3.7b.

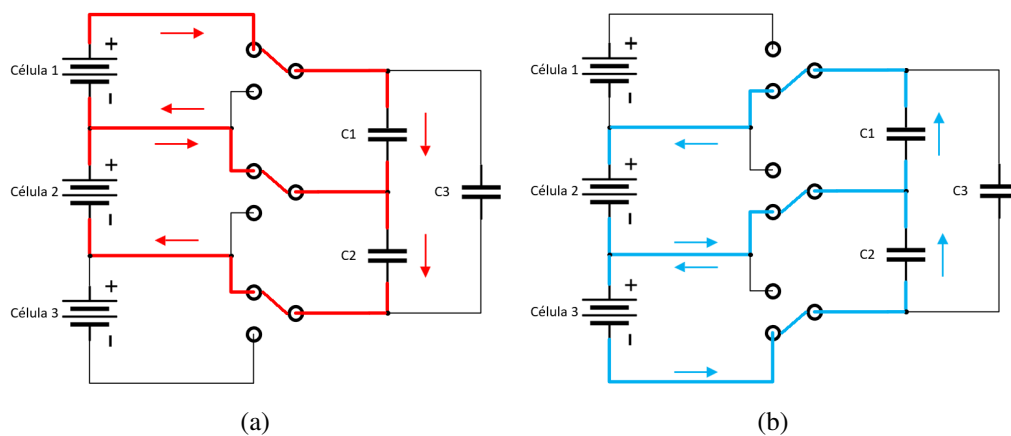


Figura 3.7: Transferência de energia dos condensadores da primeira camada.

Relativamente à segunda camada, esta tem um funcionamento semelhante. A diferença surge no condensador, sendo que este, carregar-se-á com a tensão igual à série da Célula 1 com a 2, e descarregar-se-á para a série Célula 2 e 3, Figura 3.8.

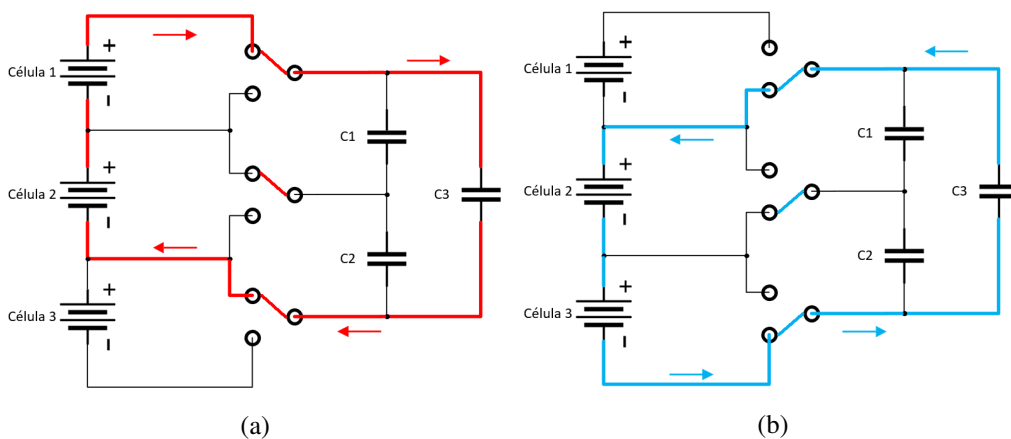


Figura 3.8: Transferência de energia dos condensadores da segunda camada.

3.6 Conclusão

A conceção de um sistema deve reger-se pelo conjunto de requisitos estabelecidos, os quais devem ser revistos e verificados assim como se deve ainda averiguar se o sistema os cumpre, bem como analisar o funcionamento do sistema a implementar.

No planeamento do sistema de balanceamento referido neste capítulo, deve-se destacar algumas conclusões como a importância da escolha dos semicondutores a utilizar. Uma vez que o número destes componentes usados no sistema será grande, é necessário que a perda de energia em cada um deles seja ser mínima. Como apresentado, este sistema não necessita de um controlo complexo, porque, ao comutar os condensadores entre células, a energia será naturalmente transferida da célula com mais carga para a que tem menos carga.

O modelo de circuito equivalente das baterias escolhido para as simulações a serem feitas no programa *PSIM*, tem igual importância, de maneira que sem este não se teria uma melhor aproximação a uma bateria com características semelhantes, de modo a que os resultados das simulações sejam mais próximos da realidade.

Na fase que se segue no projeto do sistema será feita a análise de resultados teóricos e simulados.

Capítulo 4

Análise Computacional

Neste capítulo serão apresentados resultados teóricos para o dimensionamento e verificação da rapidez de equilíbrio. Serão também, fornecidos dados sobre simulações realizadas em ambiente computacional. A ferramenta de simulação utilizada é o *PSIM*. Os esquemas dos circuitos a simular foram descritos no Capítulo 3.

Numa fase inicial, serão analisados resultados teóricos e simulados do sistema de balanceamento aplicado a um par de células em série. Nos cálculos teóricos, foi assumido que os componentes são ideais. Nas simulações efetuadas pelo programa de simulação foram consideradas as perdas de todos os componentes.

Dado que se trata de um sistema de balanceamento e que o propósito destes sistemas é manter as células das baterias equilibradas, assume-se que estes funcionem quando existe uma diferença de tensão baixa, para manter a bateria estável. Deste modo, para os cálculos teóricos e para as simulações considerou-se uma diferença de tensão entre as células de 60mV, que equivale cerca de 5% da variação total de tensão de uma célula.

Para os cálculos e simulações, foram utilizados valores de condensadores com 10mF, 100mF e 120mF, para se verificar a influência destas capacidades na transferência de energia. O valor do condensador de 120mF foi selecionado a partir de uma pesquisa em busca de uma capacidade elevada com características físicas semelhantes.

4.1 Duas células

Tal como o nome indica, esta secção destina-se a apresentar resultados obtidos por cálculos e simulações do circuito referente a duas células em série. Estes resultados estão associados a diferentes implementações de condensadores e também de diferentes valores no sinal de comando.

Para os cálculos e simulações, assumiu-se que a célula 1 está com tensão de 4,00V e a célula 2 com 3,94V. O esquema implementado no simulador está representado na Figura 4.1.

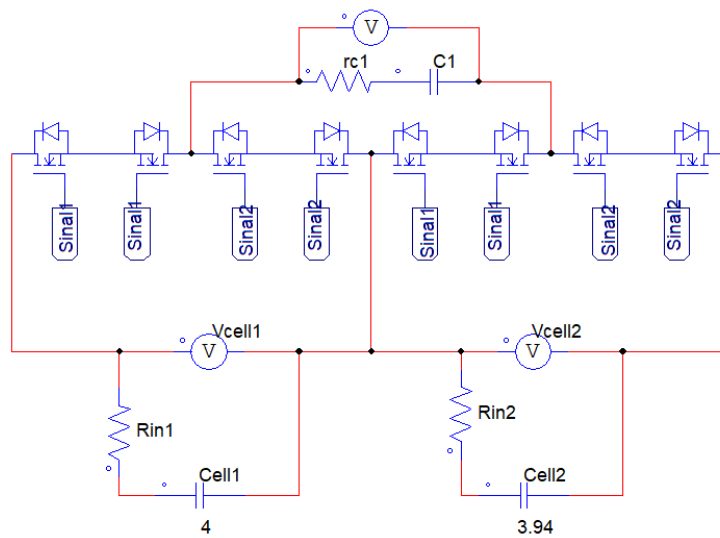


Figura 4.1: Esquema implementado no PSIM

4.1.1 Cálculos teóricos

Considerando que o circuito é ideal, a transferência de energia pode ser calculada pelas fórmulas apresentadas no Capítulo 3 na seção 3.1. Como referido, será feito o equilíbrio entre células quando estas têm uma diferença de tensão de 60mV.

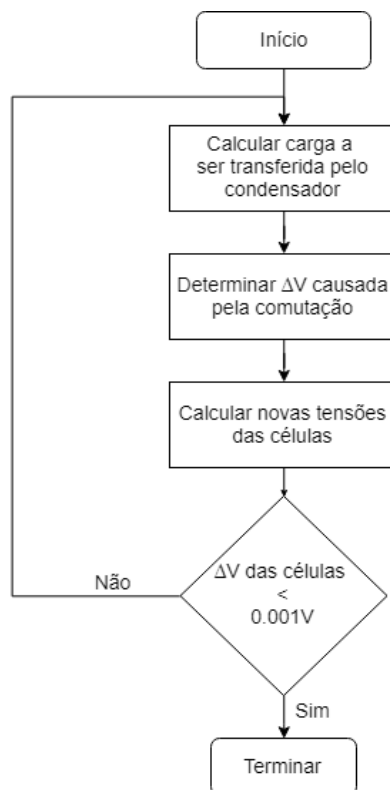


Figura 4.2: Fluxograma dos cálculos numéricos para obtenção dos valores teóricos

Inicialmente, calcula-se a carga que o condensador irá transferir da célula 1 para a 2. De seguida, determinou-se a variação da tensão causada por esta comutação na bateria. Depois, à tensão da célula 1 subtraiu-se esta variação da tensão e à célula 2 somou-se. Foram feitas múltiplas iterações desta ordem de cálculos até que a variação final entre as duas células fosse inferior a 1mV. Na Figura 4.2 está ilustrado o fluxograma do código implementado.

Este procedimento foi realizado para os três valores de condensadores e para três valores de frequência de comutação do sinal de controlo, 1kHz, 10kHz e 20kHz.

$$\Delta Q_1 = C_{c1} * \Delta V_{(1 \rightarrow 2)} \quad (4.1)$$

$$\Delta V_1 = \frac{\Delta Q_1}{C_{bateria}} \quad (4.2)$$

$$V_{b1nova} = V_{b1antiga} - \Delta V_1 \quad (4.3)$$

$$V_{b2nova} = V_{b2antiga} + \Delta V_1 \quad (4.4)$$

Tabela 4.1: Tabela comparativa com os condensadores 10mF, 100mF e 120mF

Condensador	Número total de comutações	Tempo total a 1kHz	Tempo total a 10kHz	Tempo total a 20kHz
10mF	6141515	6141,5	614,2	307,1
100mF	614150	614,2	61,4	30,7
120mF	511792	511,8	51,3	25,6

tempo total de equilíbrio em segundos;

Na Tabela 4.1, estão apresentados a comparação dos valores teóricos obtidos.

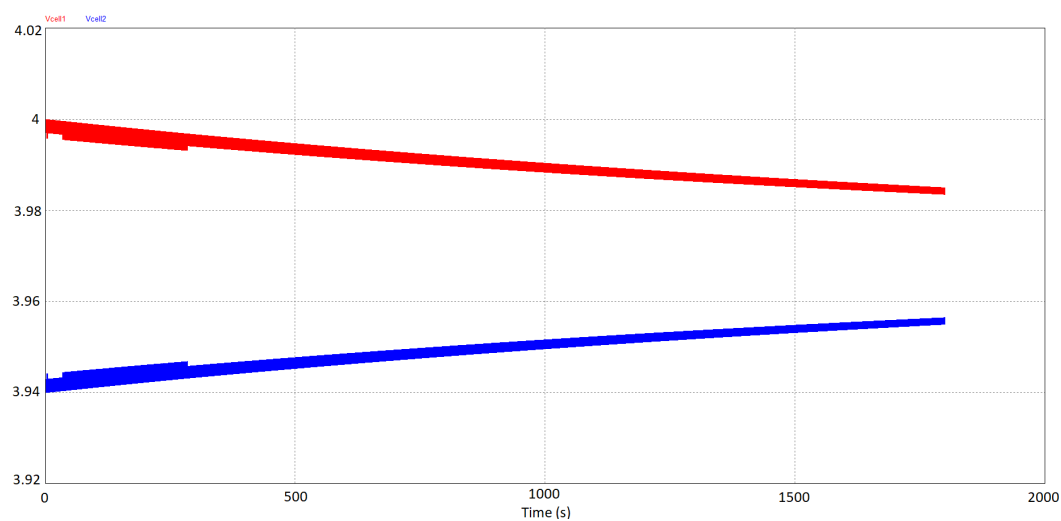
Como se tratam de cálculos teóricos num ambiente onde os componentes são ideais, temos valores diferentes da realidade, de acontecer tendo em conta que, experimentalmente, existem perdas nos interruptores, nos condensadores, na bateria e até mesmo nos condutores de ligação que ligam todos estes componentes.

4.1.2 Simulações computacionais

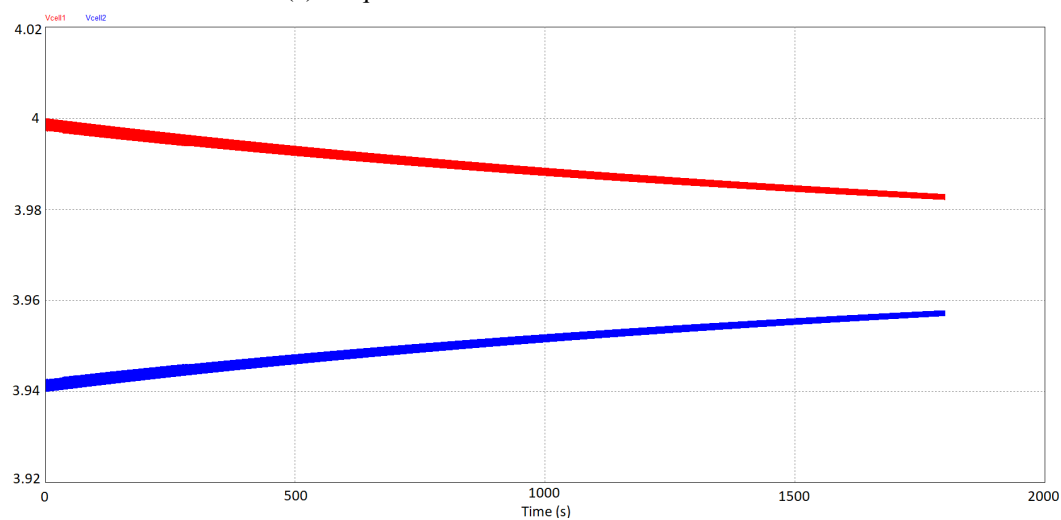
Neste ponto, serão apresentados os resultados de simulação do sistema de equilíbrio com duas células em série, para diferentes condensadores e para diferentes frequências nos sinais de controlo.

Nas figuras 4.3a, 4.3b e 4.3c, podemos constatar as diferenças que os três condensadores com distintos valores de capacidade apresentam na rapidez de equilíbrio.

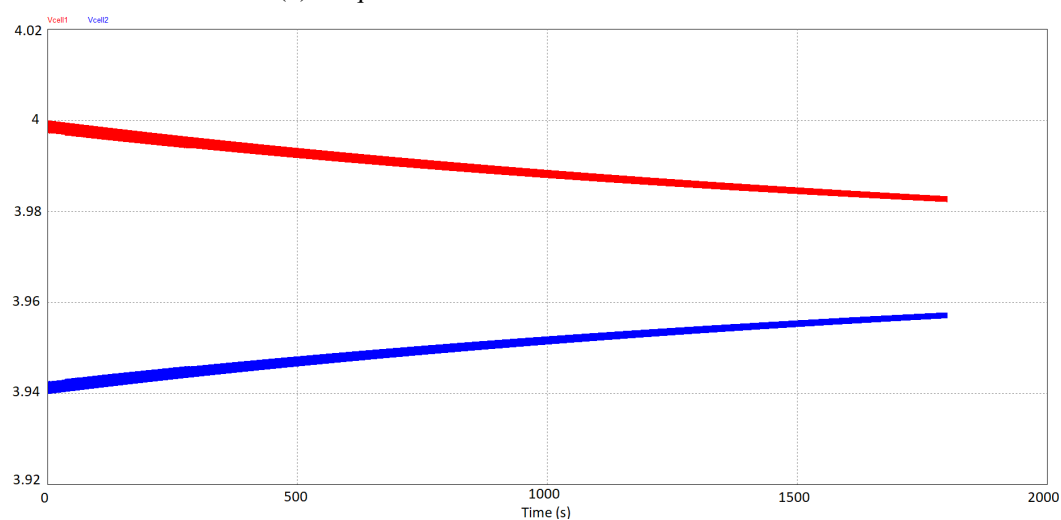
Representadas nas figuras estão as tensões das células 1 e a célula 2, vermelho e azul respetivamente, com um sinal de controlo de 1kHz para um condensador de 10mF, 100mF e por último 120mF, Figura 4.3a, 4.3b e 4.3c, respetivamente.



(a) Frequência de 1kHz e condensador 10mF



(b) Frequência de 1kHz e condensador 100mF



(c) Frequência de 1kHz e condensador 120mF

Figura 4.3: Evolução das tensões das células em 30 minutos.

Analisando a evolução das tensões para os diferentes condensadores, pode-se verificar que existe uma ligeira aproximação das tensões para os gráficos com os condensadores de 100mF e 120mF comparativamente com o gráfico do de 10mF, contudo entre estes dois, não existe uma diferenciação visível. Estas distinções devem-se à capacidade dos componentes, visto que com uma capacidade maior, existe uma transferência de energia maior, logo o equilíbrio dá-se mais rapidamente. Contudo entre os elementos de maior capacidade, um aumento de 20% relativamente ao de 100mF não traz mudanças significativas que compensem a diferença de preço entre os dois.

Pelas simulações realizadas, podemos ainda visualizar as correntes nos condensadores e com estas calcular as cargas transferidas entre as duas células.

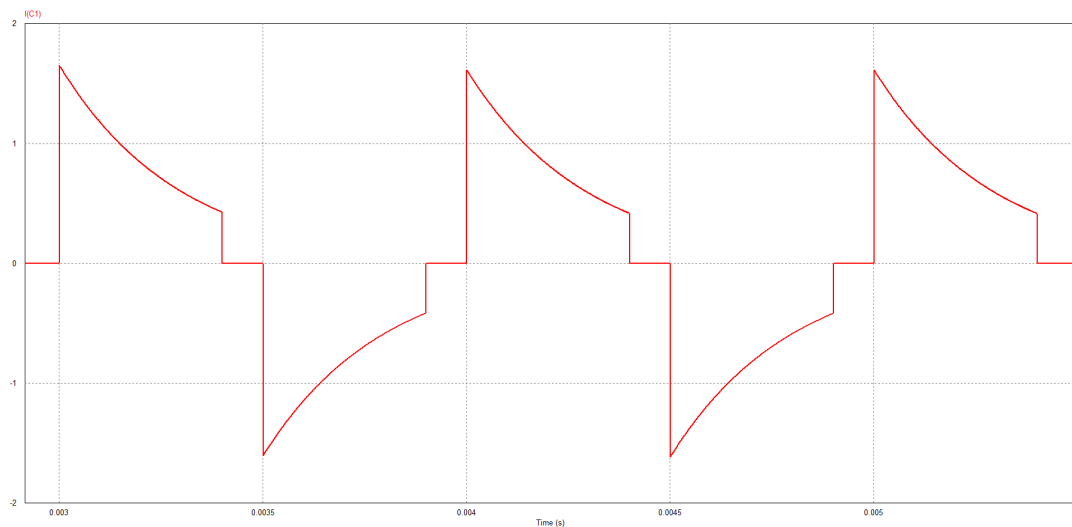


Figura 4.4: Forma de onda da corrente do condensador de 10mF a 1kHz

Pelo simulador foram obtidos os valores do pico máximo e do ponto imediatamente antes do *dead-time* dos controlos e retirou-se ainda o valor do intervalo de tempo entre eles. Desta forma, adquiriram-se os seguintes resultados:

$$I_{Max} = 1,651A$$

$$I_2 = 0,429A$$

$$\Delta t = 0,396ms$$

Como a carga do condensador pode ser calculada no gráfico da corrente pela área da mesma, (visto que se assemelha a um trapézio), temos a seguinte equação:

$$Q = area \quad (4.5)$$

$$Area = \frac{B_{maior} + b_{menor}}{2} altura \quad (4.6)$$

$$Q = \frac{1,651 - 0,429}{2} 0,396 * 10^{-3} = 0,41mC \quad (4.7)$$

Fazendo os mesmos cálculos para os condensadores seguintes, teremos uma transferência de carga de $Q = 0,43mC$ e $Q = 0,43mC$ para os condensadores de 100mF e 120mF respetivamente.

Pelos valores aqui calculados podemos concluir que o condensador de 120mF não é uma mais valia para o sistema em comparação com o condensador de 100mF. Deste modo, para as simulações seguintes, não será referenciado.

Fazendo a comparação para uma frequência de sinal de controlo maior, verificou-se que para os mesmos cálculos, a carga transferida pelos elementos capacitivos de 10mF e 100mF foi aproximadamente dez vezes menos para uma frequência de 10kHz e vinte vezes menos para a frequência de 20kHz. Transpondo isto para uma Tabela, temos:

Tabela 4.2: Tabela comparativa

Condensador	10mF	100mF
Carga transferida a 1kHz	$4,1 * 10^{-4}C$	$4,3 * 10^{-4}C$
Carga transferida a 10kHz	$3,9 * 10^{-5}C$	$4,1 * 10^{-5}C$
Carga transferida a 20kHz	$2,0 * 10^{-5}C$	$2,0 * 10^{-5}C$

Visto que o tempo de carregamento de um condensador é inversamente proporcional à sua capacidade, para 63,2% da carga total de um condensador, o tempo é dado pela equação da constante de tempo, expressa em 3.4. Ao aumentar a frequência do sinal o condensador terá menos tempo para carregar, no entanto, ao aumentar a frequência a transferência de carga será feita mais vezes.

Contudo, haverá um momento em que ao aumentar a frequência não existirá vantagens. Analisando a Tabela 4.2, verificamos que para a frequência de 20kHz a carga transferida no condensador de 10mF igualou a carga transferida no de 100mF.

4.2 Seis células

Como o nome indica, esta secção destina-se a apresentar resultados obtidos no esquema referente a seis células em série. Da mesma forma como na secção 4.1, foram produzidas simulações para as três frequências e para os mesmos dois condensadores, uma vez que o terceiro, o de 120mF, não oferece melhorias significativas como verificado no esquema anterior.

Para este caso, assumiu-se que a célula 1 está com tensão de 4,00V, célula 2 com 3,99V, célula 3 com 3,94V, célula 4 com 4,00V, célula 5 com 3,94V e a célula 6 com 4,00V. Todas as células dentro da variação de tensão de 60mV. O circuito implementado está representado na Figura 4.5.

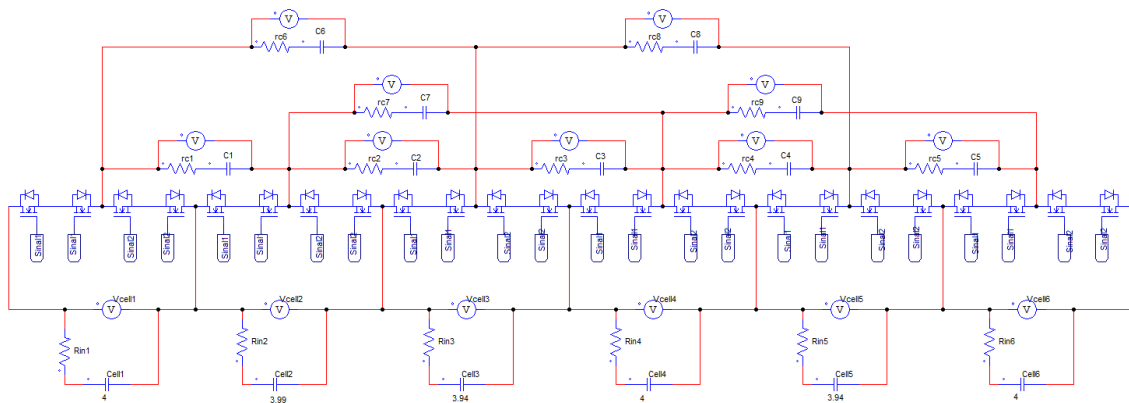
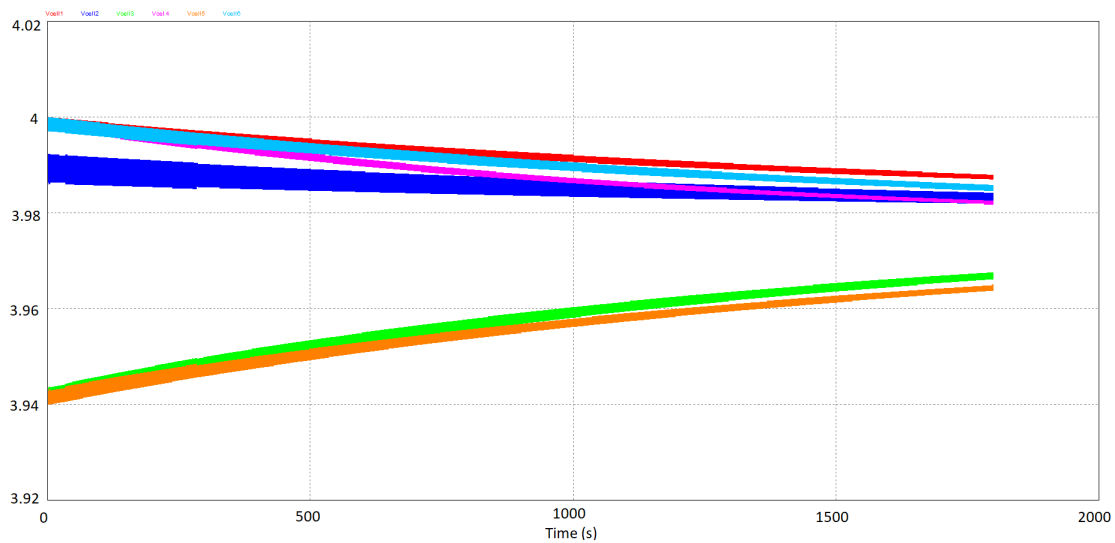


Figura 4.5: Esquema implementado no PSIM

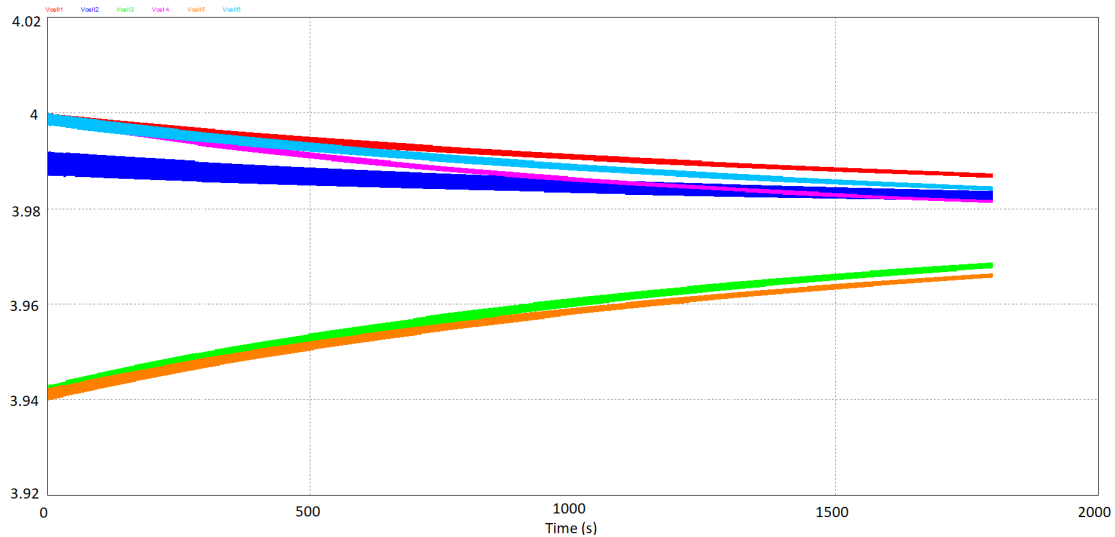
4.2.1 Simulações computacionais

Assim como anteriormente, aqui serão apresentadas as simulações referentes ao sistema com seis células em série. Nas figuras 4.6a e 4.6b, podemos verificar as diferenças para os dois condensadores. As simulações apresentadas referem-se a um sinal de controlo de 1kHz.

Representadas nas figuras estão as tensões das células 1 a vermelho, 2 a azul, 3 a verde, 4 a rosa, 5 a laranja e por último célula 6 a azul claro.



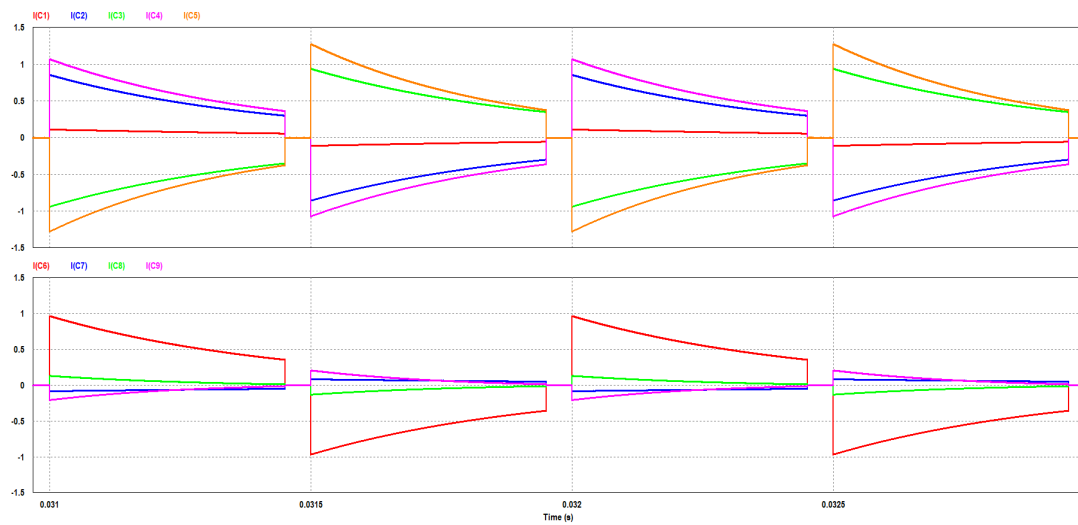
(a) Frequência de 1kHz e condensadores 10mF



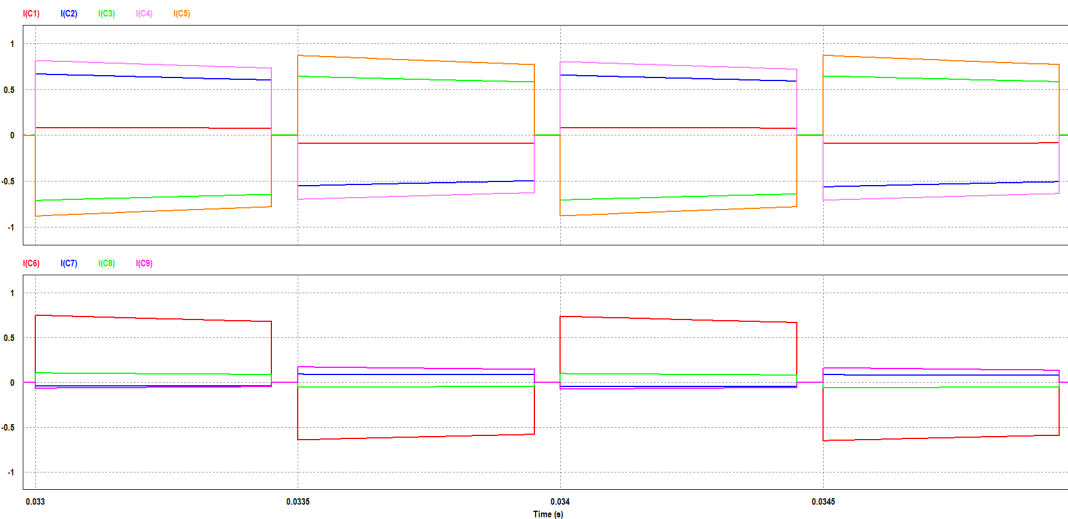
(b) Frequência de 1kHz e condensadores 100mF

Figura 4.6: Evolução das tensões das células em 30 minutos.

Analisando os gráficos gerados nas simulações para uma frequência de 1kHz, verifica-se que o sistema com os condensadores de 100mF executa um equilíbrio ligeiramente melhor do que o sistema com os condensadores de 10mF. Mais uma vez, isto é possível porque as cargas armazenadas nos condensadores de 100mF são maiores do que as que são armazenadas nos de 10mF, podendo ser visível nas áreas nos gráficos das correntes nas figuras 4.7a e 4.7b. Como explicado, na análise do sistema para duas células em série, pelas áreas nos gráficos das correntes podemos calcular a carga transferida pelos condensadores.



(a) Condensadores 10mF

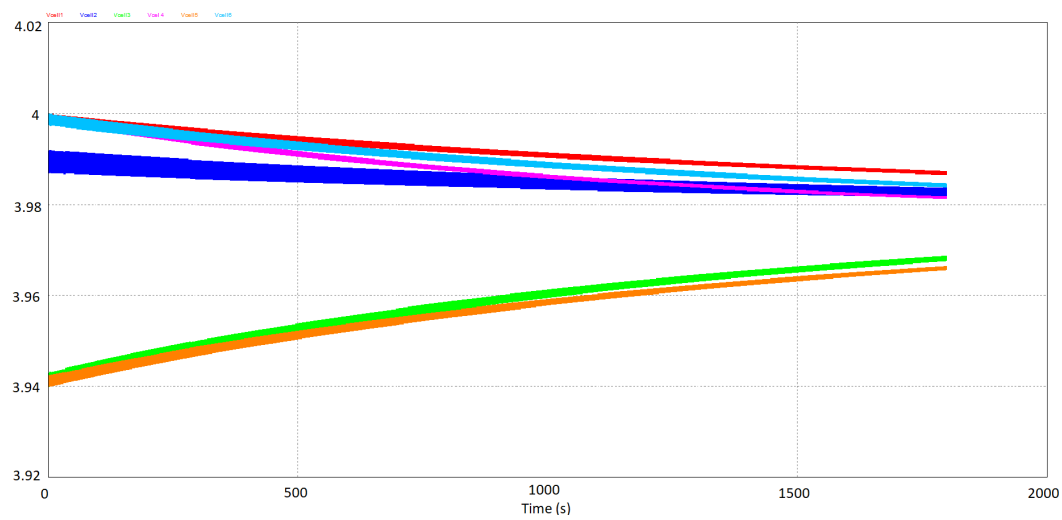


(b) Condensadores 100mF

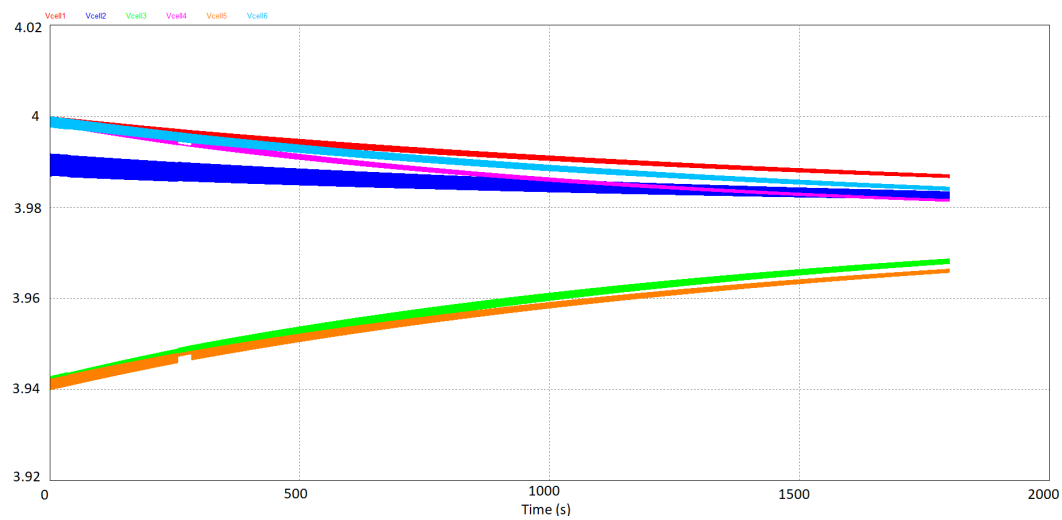
Figura 4.7: Comparação das correntes dos condensadores.

Com a análise feita aos gráfico, verificou-se que o sistema com os elementos capacitivos de 100mF tem um desempenho ligeiramente melhor em comparação com os condensadores de 10mF. Assim sendo, procedeu-se a simulações comparativas deste circuito com os condensadores de maior capacidade para diferentes valores de frequência, como ilustrado nas figuras 4.8a, 4.8b e 4.8c.

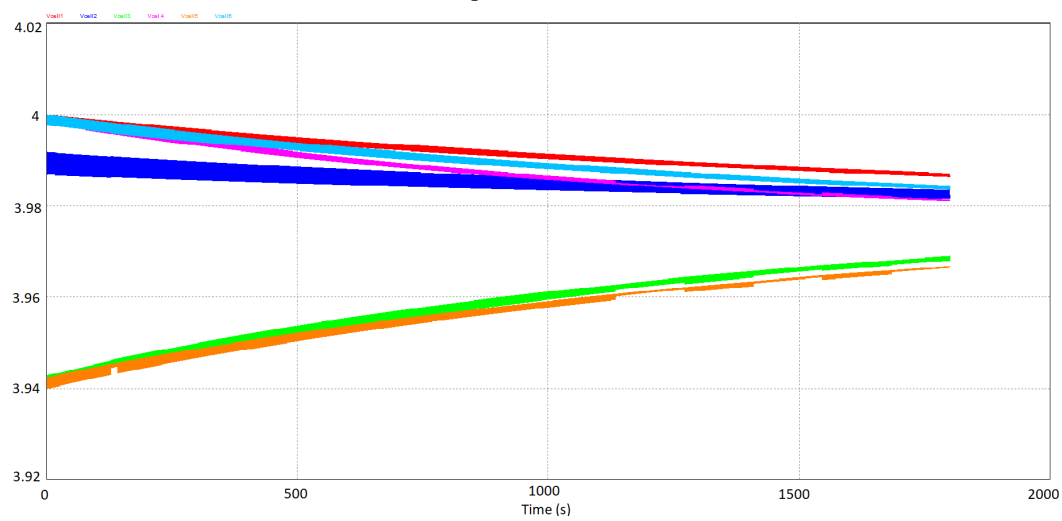
Analisando as simulações apresentadas, apurou-se que as diferenças não são perceptíveis. Deste modo, conclui-se que não existem razões para a utilização de uma frequência mais elevada nos sinais de controlo do sistema, visto que aparenta ser indiferente a utilização da frequência a um quilohertz ou a dez quilohertz.



(a) Frequência de 1kHz



(b) Frequência de 10kHz



(c) Frequência de 20kHz

Figura 4.8: Gráficos comparativos do mesmo circuito para várias frequências num intervalo de 30 minutos.

4.3 Conclusão

Os resultados obtidos pelo software de simulação são um ponto importante para a concretização de um projeto. Estas criam situações realistas ou próximas da realidade dos sistemas que se pretendem implementar, de modo a antever o funcionamento do projeto em ambiente experimental.

Como seria de esperar o sistema a implementar apresenta um comportamento lento. Os resultados obtidos neste capítulo permitem perceber as mudanças causadas pelo uso de diferentes elementos capacitivos no circuito de equilíbrio. Foi concluído que a utilização do condensador de 120mF não era significativamente vantajoso, uma vez que poucas diferenças iria realizar, assim como, as despesas causadas na implementação deste não era justificativa.

Concluiu-se, também, que a utilização de sinais de controlo com frequências de comutação muito elevadas não induz a melhorias na rapidez de balanceamento devido ao tempo que o condensador demora a armazenar energia.

Os resultados obtidos pelas simulações permitem concluir que a rapidez com que o sistema equilibra não é a sua vantagem. Um dos maiores problemas é devido às dimensões do sistema, isto é, se aumentássemos a capacidade para valores de ordem mais elevada, por consequência teríamos um balanceamento mais rápido, mas estes componentes com capacidades maiores têm dimensões físicas também maiores o que comprometeria a utilização destes sistemas.

Capítulo 5

Proposta de Implementação

Concluída a análise do comportamento do sistema de equilíbrio em ambiente de simulação, pode-se, por fim, partir para o desenvolvimento prático esperando resultados um pouco semelhantes aos obtidos computacionalmente.

Assim, num primeiro ponto, apresentado na secção 5.1, serão apresentados os componentes utilizados e os esquemas para a implementação do sistema. Na Secção 5.2 serão apresentados os testes realizados e os resultados obtidos.

5.1 Implementação

Nesta secção será apresentada a implementação do circuito de potência, do circuito de controlo, e do circuito de geração do sinal de controlo para o *driver*. Será tratado o circuito de alimentação e por fim a integração dos subsistemas num só.

5.1.1 Implementação do circuito de potência

Neste ponto, foram dimensionados os componentes a utilizar para fazer a transferência de energia entre as células. Para este sistema e com as análises feitas nas simulações, verificou-se que são necessários MOSFET's para tensões na ordem dos 15V, para correntes máximas de 10A e com resistências internas da ordem dos miliohms, sendo este o fator mais importante para o dimensionamento do sistema. Com a facilidade de acesso para uma maior rapidez de implementação e para testes, escolheu-se um MOSFET existente no laboratório com uma resistência interna de $3m\Omega$, o MOSFET em questão é PSMN3R0-60PS, [25].

Como nesta topologia de sistema de equilíbrio a base é a utilização de condensadores, é necessária a aquisição de condensadores. Com o surgimento de problemas com a data de entrega dos condensadores de valor 100mF, optou-se pela utilização de condensadores com uma capacidade de 10mF, uma vez que os resultados das simulações eram muito próximos.

5.1.2 Implementação do circuito de controlo

Visto que o sistema de equilíbrio inclui a utilização de interruptores, mais concretamente, a utilização de MOSFET's, é necessária a implementação de um circuito de controlo para os mesmos.

Com a utilização do esquema de interruptor bidirecional a partir do uso de MOSFET's em anti-série, tendo uma *source* comum, e tendo o mesmo sinal de controlo para os dois transístores, é necessária a implementação de um circuito isolado para o controlo dos transístores.

Para isso, começou-se por realizar testes práticos para a verificação do funcionamento do esquema dos MOSFET's em anti-série. Confirmado que o esquema é válido, passou-se para a implementação de um circuito de controlo a partir de um circuito integrado de *driver* IR2110, [26]. Visto que as *sources* dos MOSFET's não se encontram ligadas num ponto comum, foi necessária a utilização de *drivers* isolados com alimentação isolada de forma a criar uma massa isolada para cada par de MOSFET's. Como tal, foram utilizados opto-acopladores, TIL117 [27], para fornecer o sinal de comando ao *driver* que por sua vez estava a ser alimentado por dois conversores DC/DC isolados IL1215s, [28]. De seguida, o sinal entra no driver que faz o controlo dos MOSFET's. O esquema deste circuito de controlo dos MOSFET's está apresentado na Figura 5.1.

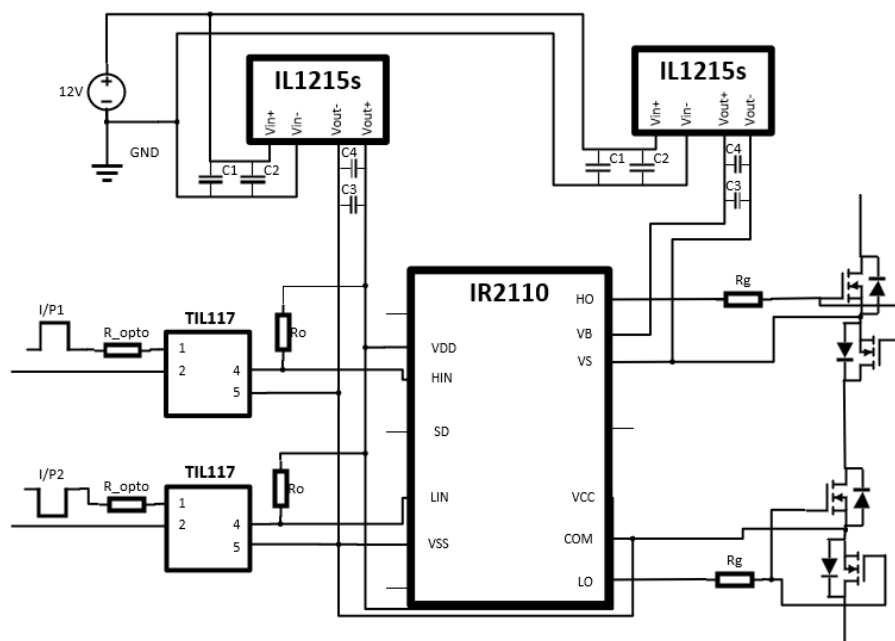


Figura 5.1: Esquema de implementação de controlo com o IR2110.

De seguida e depois de ter verificado o funcionamento do sistema, desenvolveu-se um novo circuito de controlo para tornar o sistema de equilíbrio mais compacto e mais simplista. Com a utilização dos opto-acopladores, no circuito anterior, compreendeu-se o modo de funcionamento destes componentes, e assim, decidiu-se por implementar o novo circuito de controlo onde o *driver* dos transístores é um opto-acoplador. Assim sendo, escolheu-se o *driver optocoupler*

HCPL3120, [29], pela existência destes componentes o laboratório. O esquema do circuito integrado HCPL3120 apresenta-se na Figura 5.2a. Na utilização deste integrado, a alimentação continuava a ser feita pelo conversor isolado IL1215s, Figura 5.2b, e o sinal de controlo era realizado através da utilização de um MOSFET de sinal, BS170 [30].

A representação deste circuito de controlo está apresentada na Figura 5.3, com a utilização do MOSFET de sinal BS170. Neste esquema, podemos observar que os dois opto-acopladores e o integrado IR2110 presentes no esquema anterior, foram substituídos pelo driver HCPL3120 e pelos MOSFET's BS170.

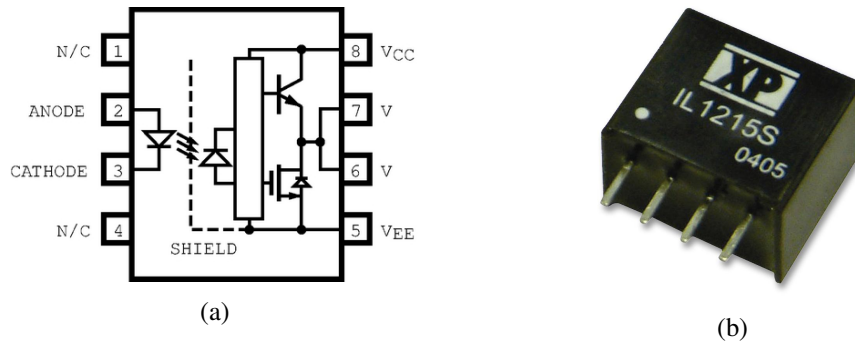


Figura 5.2: Esquema do *driver* HCPL3120 e imagem do conversor DC/DC IL1215s

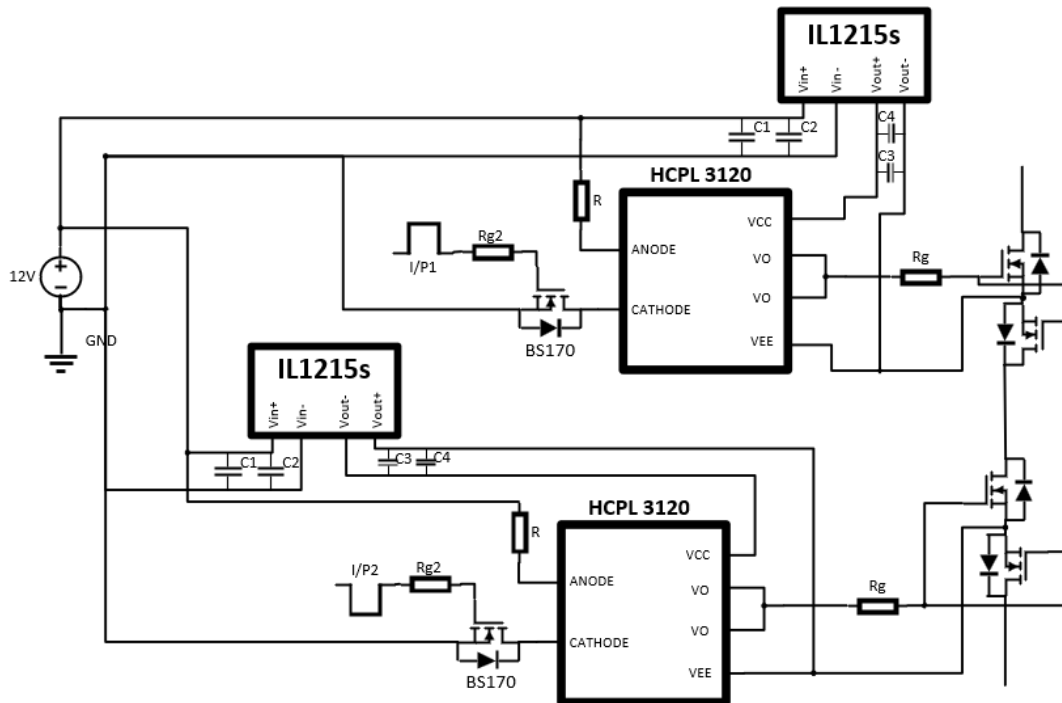


Figura 5.3: Esquema de implementação do circuito de controlo com o HCPL3120 com o MOSFET de sinal BS170.

5.1.3 Implementação do circuito de geração do sinal de controlo para o *driver*

Para o desenvolvimento do sinal de controlo do sistema foi utilizado uma placa de hardware programável, o Arduino Nano ilustrado na Figura 5.4a, [31].

Contudo, a utilização desta placa traz uma contrariedade. O facto de esta não fornecer valores de corrente suficientes para a utilização dos MOSFET's de sinal, como referenciados no ponto 5.1.2, passa a não ser a mais indicada. Para contornar o problema, resolveu-se testar o controlo recorrendo a um *buffer* CD4050BE, [32]. Neste esquema também é utilizado o MOSFET BS170. Na Figura 5.5 está proposto o circuito de sinal.

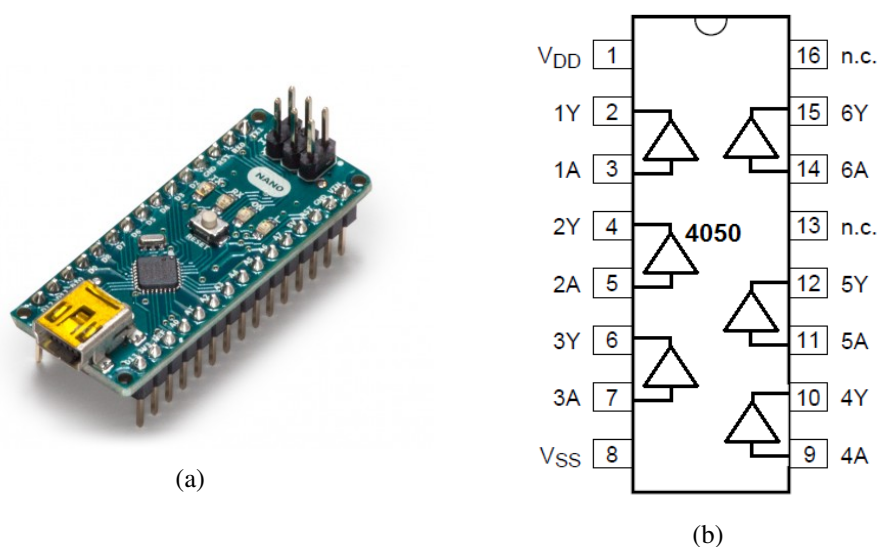


Figura 5.4: Imagem do Arduino Nano e esquema do *buffer* CD4050BE

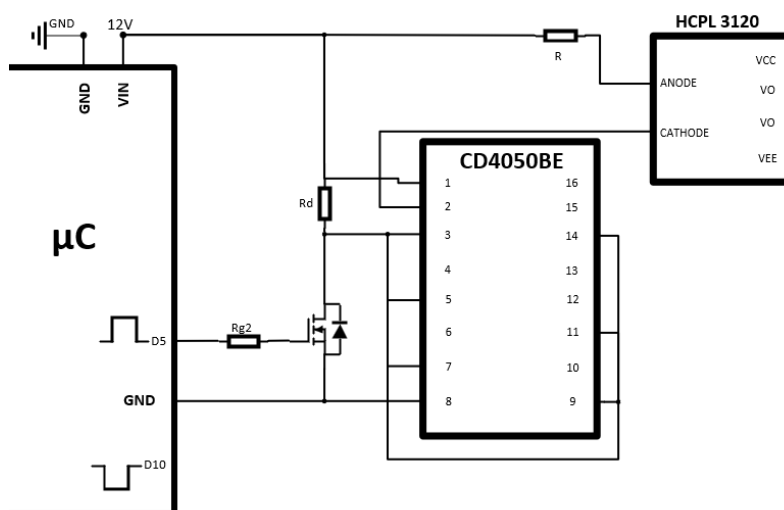


Figura 5.5: Circuito de geração do sinal de controlo para o *driver*.

Com este circuito de sinal, já é possível a utilização dos MOSFET's BS170 e o Arduino já possui corrente suficiente para fazer o controlo do sistema. Neste sistema de equilíbrio temos

doze interruptores bidirecionais e consequentemente temos também doze *drivers*. Metade destes *drivers* são controlados pelo sinal A, enquanto a outra metade é controlada pelo sinal B. Uma vez que um *buffer* tem seis saídas, com apenas dois integrados destes podemos assegurar o controlo total do sistema.

5.1.4 Circuito de alimentação

Para que o circuito de controlo fosse operacional, os conversores DC/DC isolados deveriam ser alimentados com 12V, por essa razão, seria necessário conseguir converter a energia fornecida pela bateria, que oferece na saída uma tensão de 24V, como tal, pensou-se em usar um regulador de tensão PTN 7800, [33] representado na Figura 5.6a.

Relativamente ao esquema de montagem, a inexistência de uma resistência com um valor específico para uma saída de 12V fez com que fosse necessário recorrer a um potenciômetro. O esquema de montagem está representado na Figura 5.6b.

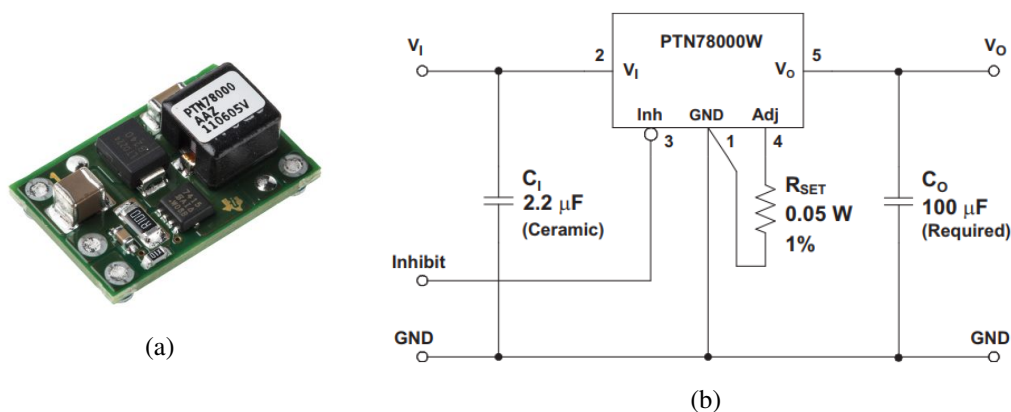


Figura 5.6: Imagem do Regulador de tensão PTN 7800 e esquema de montagem.

5.1.5 Circuito de aquisição das tensões das células

Apesar das vantagens de utilização do Arduino para criar o sinal de controlo serem favoráveis, visto que é relativamente simples, há desvantagens como as limitações de tensão nas portas analógicas já que o máximo de tensão que a porta pode receber é de 5V. Consequentemente, optou-se por implementar um divisor de tensão utilizando elementos resistivos, de modo a conseguir ter uma tensão das células nas suas portas analógicas dentro da gama de valores permitida. O esquema deste circuito encontra-se apresentado na Figura 5.7.

5.1.6 Integração dos subsistemas

Neste ponto, é apresentada a integração dos circuitos referenciados nos pontos anteriores. Inicialmente, o sistema foi implementado em placas de ensaio, *breadboard*, e depois de feita a verificação do funcionamento do sistema todo integrado fez-se o *design* para um circuito impresso.

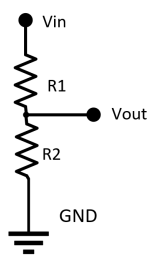
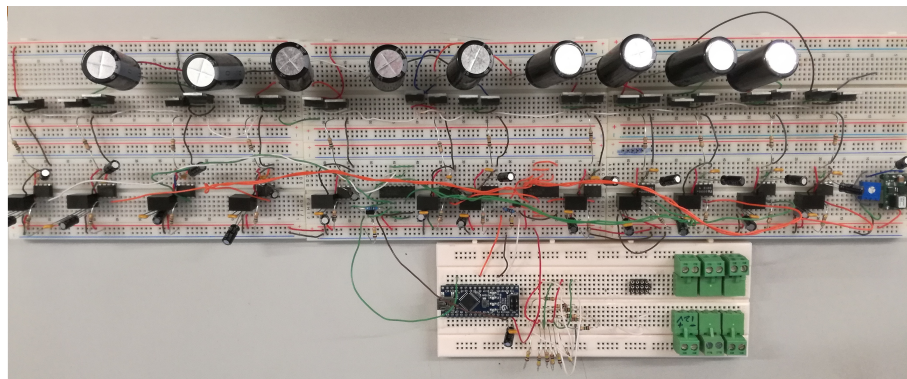


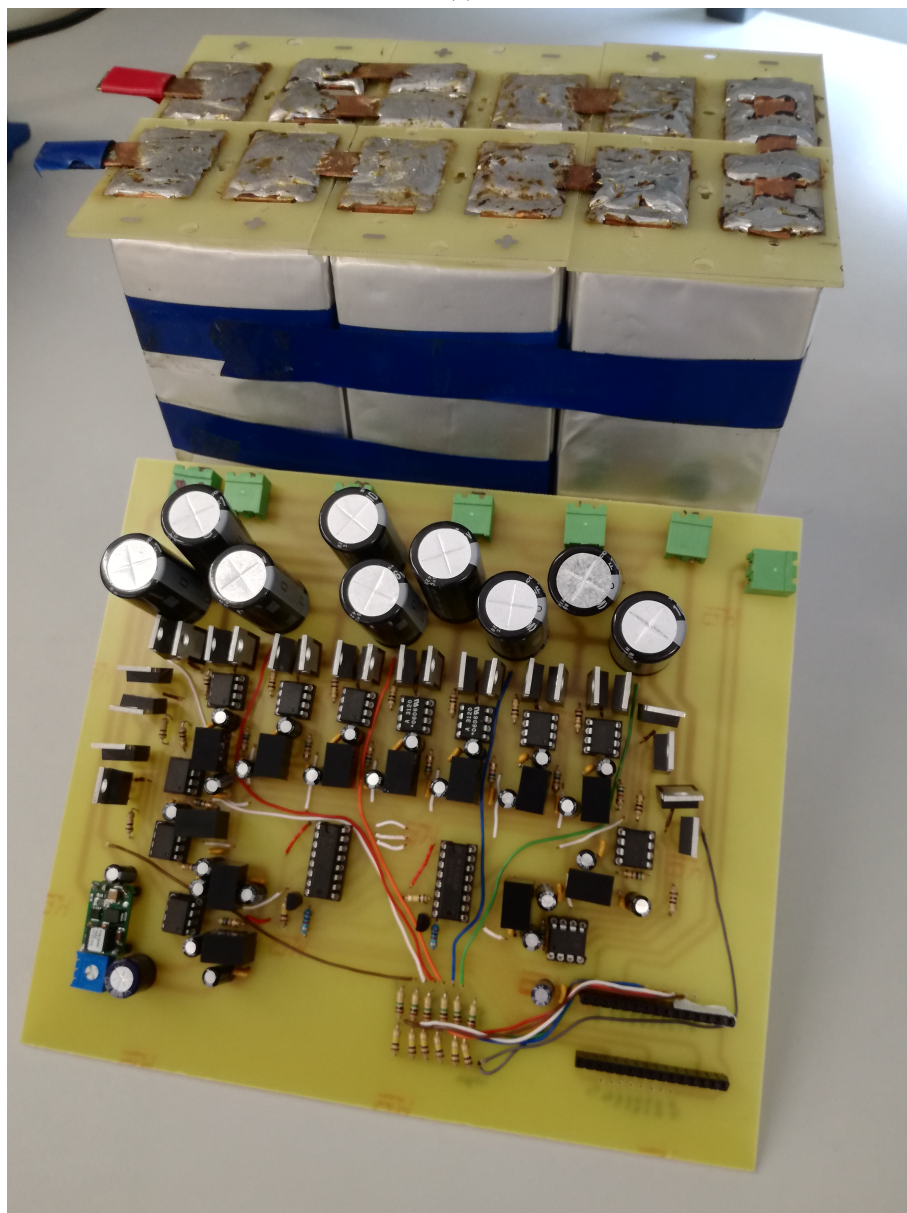
Figura 5.7: Esquema de divisor de tensão para obter a tensão das células.

O sistema foi testado numa bateria com uma tensão nominal de 22,2V, uma tensão máxima de 25,2V e com uma capacidade de 40Ah.

Na Figura 5.8a, encontra-se a apresentação do sistema nas placas de ensaio, e na Figura 5.8b, a montagem feita numa placa PCB.



(a)



(b)

Figura 5.8: Montagem em *breadboards* e em PCB.

5.2 Resultados

Como referido, antes da verificação do sistema como um todo, foi necessário realizar testes nas várias montagens. Começou-se pelo sinal de controlo vindo do Arduino. Representado na Figura 5.9a estão os dois sinais gerados à saída do micro-controlador. No seguimento, foi observado o resultado à saída do *buffer*. Obteve-se o que se encontra ilustrado na Figura 5.9b fazendo a comparação com o sinal vindo do Arduino.

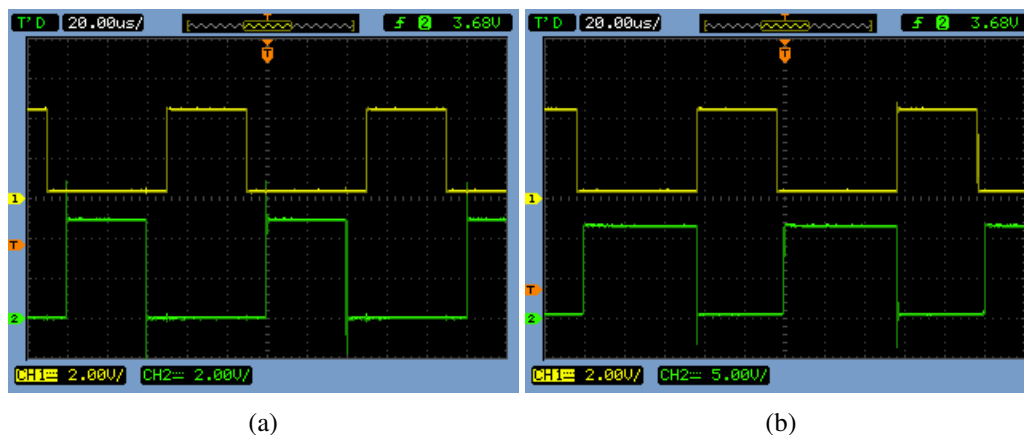


Figura 5.9: Resultados dos sinais de controlo à saída do Arduino (dois sinais) e à saída do *buffer* (comparação com o sinal do arduino).

Analisando as duas saídas, verifica-se que o sinal à saída do *buffer* é o inverso do sinal à saída do Arduino. Isto acontece porque foi utilizado um circuito *pull-up* na entrada do *buffer*, de modo que, o valor de tensão nessa entrada seja um valor definido. Com a validação destes sinais, implementou-se o circuito de controlo com o resultado apresentado na Figura 5.10, e pode-se verificar que na saída do *driver* o sinal de controlo está novamente invertido, ficando este semelhante à saída do Arduino mas com uma tensão superior.

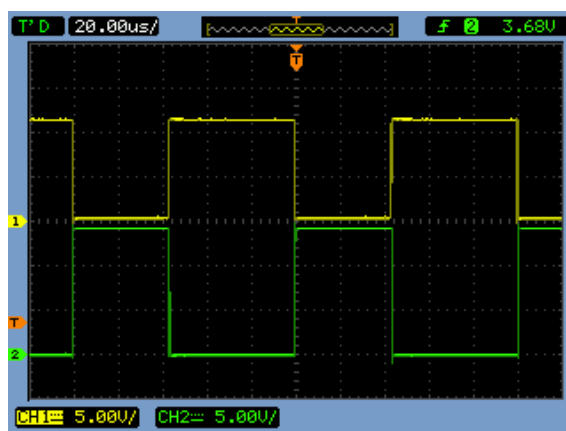
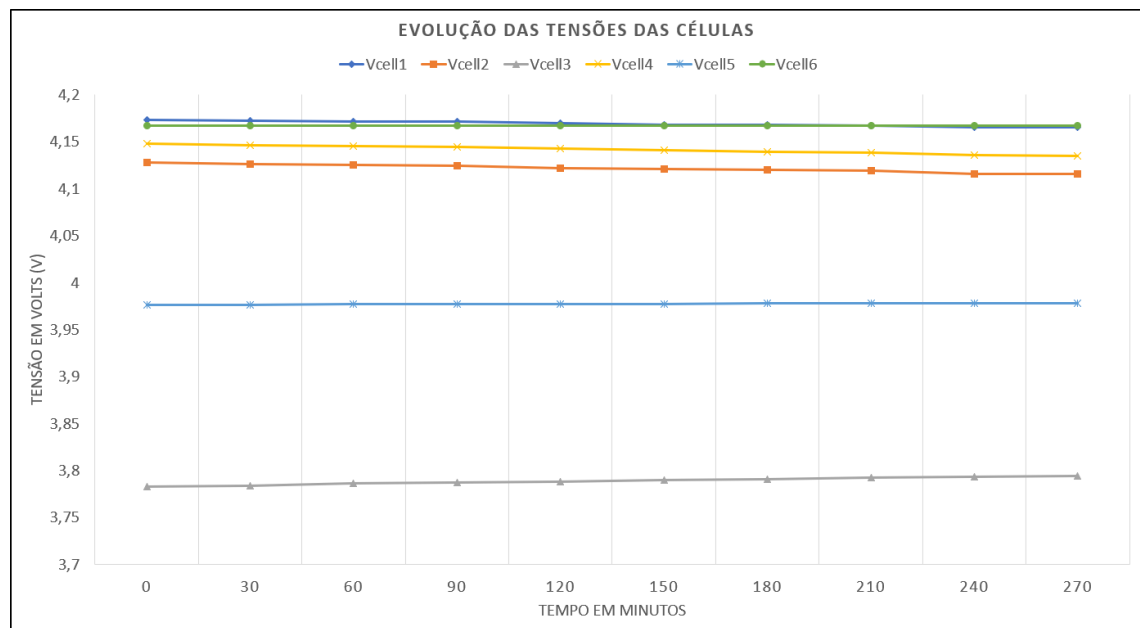


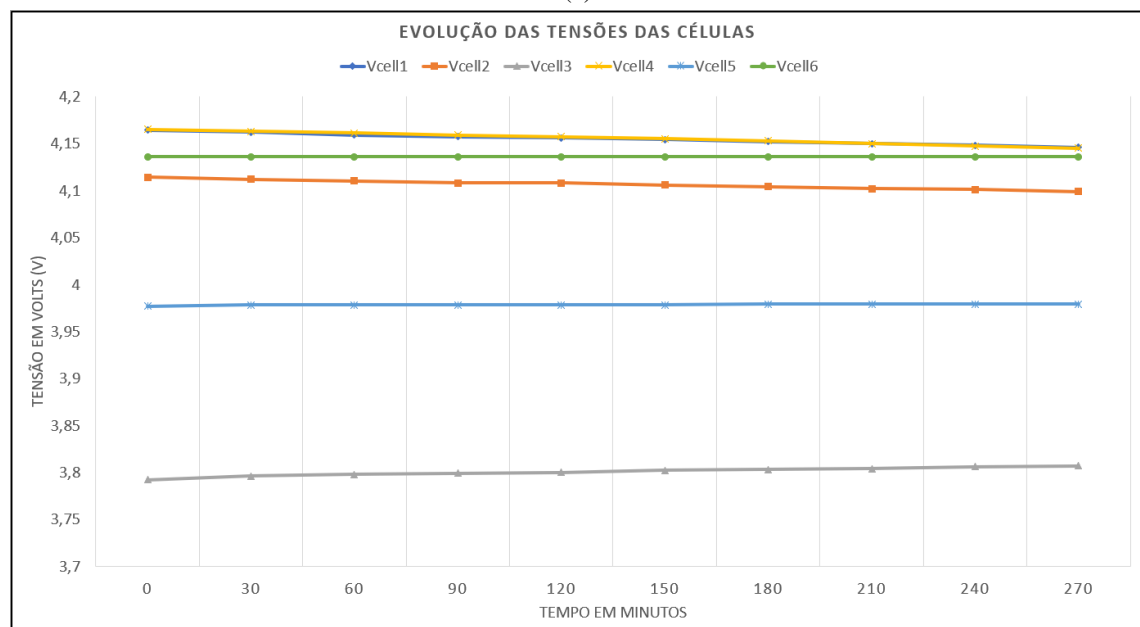
Figura 5.10: Comparação do sinal à saída do *buffer* com a saída do *driver* HCPL 3120, amarelo e verde respetivamente

Tendo concluído os testes de todos os subsistemas, foi realizada a integração de forma a obter o sistema completo. O resultado experimental do sistema de equilíbrio pode ser analisado nos gráficos presentes a seguir.

Os resultados experimentais foram obtidos através de medições realizadas em intervalos de trinta minutos.



(a)



(b)

Figura 5.11: Resultados experimentais do sistema para frequências de 10kHz e 20kHz, respectivamente.

Nas figuras apresentadas na Figura 5.11, podemos observar um ligeiro equilíbrio nas tensões das células.

O teste foi realizado para diferentes tensões daquelas simuladas no capítulo 4, uma vez que, criando uma variação de tensão entre as células de maior valor haveria um aumento da carga transferida entre estas, devido ao crescimento da corrente no condensador.

Pelas figuras comprova-se que o sistema de equilíbrio executa a sua função, contudo, verifica-se que o sistema está a demorar mais tempo do que era previsto.

5.3 Conclusão

Este capítulo teve como função descrever a montagem do sistema implementado e a comprovação do funcionamento do sistema de equilíbrio de células de baterias com o recurso a condensadores.

Fez-se a comparação experimental da rapidez de equilíbrio para os condensadores que executam o balanceamento de 10mF a frequências de 10kHz e de 20kHz.

Foi possível demonstrar experimentalmente esta alternativa para um sistema de equilíbrio de células de baterias, tendo os condensadores como principal componente do método, armazenando a energia a ser transferida.

Contudo, o sistema implementado deve ser revisto nas suas ligações e funcionamento de todos os circuitos uma vez que os resultados obtidos não estão de acordo com o que era previsto pelas simulações.

Capítulo 6

Conclusão e Trabalhos futuros

Este capítulo tem o intuito de apresentar as conclusões retiradas ao longo do trabalho que foi exposto neste documento. Adicionalmente, serão apresentadas algumas propostas para eventuais trabalhos futuros que possam ser realizados.

6.1 Conclusão

Esta dissertação propõe um método para um sistema de equilíbrio de células de baterias, visto que atualmente se verifica um aumento da utilização de baterias para diversos dispositivos, o que motiva a indústria a investir no desenvolvimento destes sistemas devido aos principais problemas que estas impõem.

Com o agravamento dos problemas ambientais por todo o globo, a tendência para a evolução da indústria automóvel segue no sentido da mobilidade elétrica, impulsionando ainda mais para a investigação tanto destes sistemas como também na evolução das baterias.

Como já foi referido neste documento, uns dos problemas na utilização de baterias são as suas limitações. O funcionamento destas deve permanecer dentro de certas gamas de valor, e com isto, revela-se que o desequilíbrio das células que compõe uma bateria põe em causa a autonomia e a vida desta. Assim, espera-se que os sistemas de balanceamento sejam capazes de enfrentar estes desequilíbrios. Nesta dissertação foram apresentados vários métodos que executam a equalização de células. Feito o estudo, analisou-se o funcionamento de um destes sistemas com o objetivo de pôr em prática o desenvolvimento do mesmo.

O sistema escolhido tem como base a utilização de condensadores como armazenador de energia para realizar a transferência entre células. Assim sendo, o estudo do funcionamento do condensador e do sistema, possibilitou um aprofundamento do conhecimento associado a estes assuntos. Isto, permitiu-nos concluir que seria necessário arquitetar o projeto tendo em conta a capacidade dos condensadores e das células das baterias e a frequência a utilizar.

Terminado o estudo do funcionamento do sistema de equilíbrio que foi escolhido para desenvolver nesta dissertação, realizou-se a simulação do mesmo sistema. Esta etapa é fundamental

para os dimensionamentos realizados para a execução prática do sistema permitindo a validação dos mesmos.

Relativamente à implementação do sistema, o circuito de controlo dos MOSFET's tornou-se um obstáculo devido aos isolamentos necessários. Para isso, foi preciso realizar vários testes com várias montagens, de modo a percorrer o caminho desejável para a implementação do sistema.

Nos resultados experimentais, verifica-se que o sistema cumpre o seu principal objetivo que é o equilíbrio de células de baterias confirmando as simulações realizadas. Contudo, a maior desvantagem deste método é a rapidez de equalização.

Para sistemas onde seja necessária uma ação imediata e rápida no balanceamento, este sistema, da maneira como está concebido, não é o mais indicado, contudo com as devidas correções no sistema desenvolvido nesta dissertação, de forma a obter os resultados esperados, ou com melhorias como na utilização de semicondutores com menores perdas, uma placa de circuito impresso de melhor qualidade, de modo a evitar perdas desnecessárias, tornar-se-ia justificável a utilização deste sistema para veículos elétricos, devido à eficiência do sistema. Em outras aplicações como sistemas de armazenamento de energias renováveis este sistema também possui condições favoráveis para o seu uso.

6.2 Trabalhos futuros

Para um trabalho deste tipo nunca se espera um tempo de desenvolvimento relativamente baixo. Assim, para a continuidade deste projeto e para o aperfeiçoamento deste, é possível realçar alguns pontos pelos quais será pertinente dar seguimento, tais como:

- Melhoramento da disposição e dos componentes de modo a diminuir o consumo do sistema;
- Melhorar o dimensionamento dos componentes e fazer uma análise de perdas, de forma a diminuir ainda mais as perdas associadas aos componentes;
- Estudar opções para os circuitos de controlo com a finalidade de diminuir o número de componentes a utilizar;
- Uma vez que o sistema tem como desvantagem a sua rapidez, a inclusão de outro componente de armazenamento de energia ou até a junção deste método com outra topologia existente, poderá acelerar o processo de equilíbrio do sistema;
- Aplicar um sistema de leitura de tensões das células, poderá tornar-se útil na medida de ligar e desligar o sistema quando necessário diminuindo o consumo de energia da bateria.

Referências

- [1] D. Linden. *Handbook of Batteries*. Electrical engineering. McGraw-Hill, 1995.
- [2] X. Chen, W. Shen, T. T. Vo, Z. Cao, e A. Kapoor. An overview of lithium-ion batteries for electric vehicles. Em *2012 10th International Power Energy Conference (IPEC)*, páginas 230–235, Dec 2012. doi:10.1109/ASSCC.2012.6523269.
- [3] 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*, 64:113 – 121, 2012. IREC 2011, The International Renewable Energy Congress. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890412001987>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.04.014>.
- [4] 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. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 7(2):4–16, June 2013. doi:10.1109/MIE.2013.2250351.
- [5] Javier Gallardo-Lozano, Enrique Romero-Cadaval, M. Isabel Milanes-Montero, e Miguel A. Guerrero-Martinez. Battery equalization active methods. *Journal of Power Sources*, 246:934 – 949, 2014. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775313013669>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.08.026>.
- [6] Li-ion bms. https://liionbms.com/php/bms_options.php?fbclid=IwAR03_JWZefeL_u8H_AQk_jjPnjqyvOTVUoTMJeJIbiodc3FyOe7DeYFxxzw.
- [7] Constante de tempo. https://pt.wikipedia.org/wiki/Circuito_RC.
- [8] A. C. Baughman e M. Ferdowsi. Double-tiered switched-capacitor battery charge equalization technique. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(6):2277–2285, June 2008. doi:10.1109/TIE.2008.918401.
- [9] A. Saez-de-Ibarra, A. Milo, H. Gaztañaga, I. Etxeberria-Otadui, P. Rodríguez, S. Bacha, e V. Debusschere. Analysis and comparison of battery energy storage technologies for grid applications. Em *2013 IEEE Grenoble Conference*, páginas 1–6, June 2013. doi:10.1109/PTC.2013.6652509.
- [10] S. M. Lukic, J. Cao, R. C. Bansal, F. Rodriguez, e A. Emadi. Energy storage systems for automotive applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(6):2258–2267, June 2008. doi:10.1109/TIE.2008.918390.
- [11] A. Khaligh e Z. Li. Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(6):2806–2814, July 2010. doi:10.1109/TVT.2010.2047877.

- [12] Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, e Yulong Ding. Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19(3):291 – 312, 2009. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S100200710800381X>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>.
- [13] H.A. Kiehne. *Battery Technology Handbook*. Electrical Engineering and Electronics. Taylor & Francis, 2003. URL: <https://books.google.pt/books?id=0uAkvnwTO1IC>.
- [14] Maria Mafalda Fernandes Machado. Análise e desenvolvimento de um sistema de equilíbrio de células de íões de lítio baseado num circuito ressonante. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [15] Agostinho Manuel Afonso da Rocha. Conversão de um renault twingo em veículo eléctrico: Sistema de alimentação. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [16] K. Ozawa. *Lithium Ion Rechargeable Batteries: Materials, Technology, and New Applications*. Wiley, 2012. URL: <https://books.google.pt/books?id=NkoqGSply7wC>.
- [17] C. Pascual e P. T. Krein. Switched capacitor system for automatic series battery equalization. Em *Proceedings of APEC 97 - Applied Power Electronics Conference*, volume 2, páginas 848–854 vol.2, Feb 1997. doi:10.1109/APEC.1997.575744.
- [18] A. Baughman e M. Ferdowsi. Double-tiered capacitive shuttling method for balancing series-connected batteries. Em *2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, páginas 109–113, Sep. 2005. doi:10.1109/VPPC.2005.1554531.
- [19] M. Uno e K. Tanaka. Single-switch multioutput charger using voltage multiplier for series-connected lithium-ion battery/supercapacitor equalization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(8):3227–3239, Aug 2013. doi:10.1109/TIE.2012.2203776.
- [20] C. Young, N. Chu, L. Chen, Y. Hsiao, e C. Li. A single-phase multilevel inverter with battery balancing. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(5):1972–1978, May 2013. doi:10.1109/TIE.2012.2207656.
- [21] D. V. Cadar, D. M. Petreus, e T. M. Patarau. An energy converter method for battery cell balancing. Em *33rd International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2010*, páginas 290–293, May 2010. doi:10.1109/ISSE.2010.5547305.
- [22] M. Daowd, N. Omar, P. Van Den Bossche, e J. Van Mierlo. Passive and active battery balancing comparison based on matlab simulation. Em *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, páginas 1–7, Sep. 2011. doi:10.1109/VPPC.2011.6043010.
- [23] V. L. Teofilo, L. V. Merritt, e R. P. Hollandsworth. Advanced lithium ion battery charger. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 12(11):30–36, Nov 1997. doi:10.1109/62.636803.
- [24] Stephen W. Moore e Peter J. Schneider. A review of cell equalization methods for lithium ion and lithium polymer battery systems. 02 2019.
- [25] Datasheet psmn3r0-60ps. <https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/PSMN3R0-60PS.pdf>.

- [26] Datasheet ir2110. <https://www.infineon.com/dgdl/ir2110.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c80333167e>.
- [27] Datasheet til117. <http://www.farnell.com/datasheets/87351.pdf>.
- [28] Datasheet il1215s. http://www.farnell.com/datasheets/1903634.pdf?_ga=2.255726991.663258211.1561068774-472148973.1540201768&_gac=1.149692930.1560875866.EAIaIQobChMI_rvq2rvz4gIVU53VCh2ZDA8UEAAYASAAEgJ6nPD_BwE.
- [29] Datasheet hcpl3120. <https://www.broadcom.com/docs/AV02-0161EN>.
- [30] Datasheet bs170. http://www.farnell.com/datasheets/2304244.pdf?_ga=2.54573740.663258211.1561068774-472148973.1540201768&_gac=1.49947538.1560875866.EAIaIQobChMI_rvq2rvz4gIVU53VCh2ZDA8UEAAYASAAEgJ6nPD_BwE.
- [31] Página do arduino. <https://store.arduino.cc/arduino-nano>.
- [32] Datasheet cd4050be. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd4050b.pdf>.
- [33] Datasheet ptn7800. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ptn78000w.pdf>.