



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Desenvolvimento de Métodos Inteligentes de Carregamento e Balanceamento para Sistemas de Armazenamento

Ricardo Lopes Velho

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
(2º ciclo de estudos)

Orientadora: Prof. Doutora Maria do Rosário Alves Calado

Covilhã, junho de 2017

Agradecimentos

Ao completar mais uma etapa da minha vida, surge inevitavelmente a necessidade de recordar o trajeto percorrido e deixar presente a minha gratidão a todos os que sob as mais diversas formas e diferentes contextos contribuíram para o sucesso deste trabalho.

À minha orientadora Professora Maria do Rosário Alves Calado, pela sua disponibilidade no esclarecimento das minhas dúvidas e a sua preciosa contribuição para que este trabalho se realizasse.

À pessoa que mais me ensinou e apoiou ao longo deste trabalho, Engenheiro José Pombo. Nunca irei esquecer todo o conhecimento que me transmitiu. Apesar de não ter qualquer obrigação de me ajudar, esteve todos os dias presente para me esclarecer todas as dúvidas que me surgissem. Uma pessoa incrível que tive o privilégio de conhecer. “Chefe”, mais uma vez, muito obrigado por tudo o que me ensinou quer a nível académico, quer a nível pessoal.

Ao Professor Sílvio Mariano por todos os conselhos e apoio concedidos ao longo do desenvolvimento do presente trabalho.

Aos docentes da Universidade da Beira Interior expresso a minha gratidão pelos conhecimentos transmitidos.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional e pela paciência. Por terem feito o possível e o impossível para me oferecerem esta oportunidade, acreditando e respeitando as minhas decisões e nunca deixando que as dificuldades acabassem com os meus sonhos.

Ao meu irmão, pelo exemplo que sempre foi para mim, pela grande amizade e apoio.

À minha namorada por todo o apoio ao longo de todos estes anos, amor, amizade e compreensão. Melhor pessoa não podia encontrar para me ajudar a ultrapassar todos os obstáculos que surgiram neste trajeto.

E por fim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

Entre a grande diversidade de baterias existentes tecnologicamente maduras, as baterias de íons de Lítio (Li-ion) tornaram-se populares devido à sua longevidade, alta densidade de energia, alta eficiência e não sofrerem de efeito de memória. Este trabalho tem como objetivo desenvolver novos métodos de carregamento que incluam balanceamento para sistemas de baterias de íons de Lítio. Este pode ser dividido em duas fases distintas: a primeira fase tem que ver com o desenvolvimento de toda a plataforma, a segunda fase refere-se ao desenvolvimento de novos algoritmos.

De forma resumida a primeira fase teve como objetivo desenvolver todo o *hardware* e *software* necessários para a criação de uma plataforma versátil e intuitiva onde fosse possível criar algoritmos de carregamento e balanceamento de forma eficiente. O sistema principal do *hardware* implementado trata-se do *Battery Management System* (BMS), responsável por toda a monitorização do *pack* de baterias utilizado.

A segunda fase do trabalho focou-se no desenvolvimento de novos algoritmos inteligentes de carregamento que incluam o balanceamento. A opção por esta abordagem refere-se ao facto de ser essencial controlar os desequilíbrios entre células durante o carregamento, resultando numa maior eficiência do sistema de armazenamento. Os resultados obtidos são comparados com os algoritmos tradicionais existentes na literatura.

Palavras-chave

Sistemas de armazenamento

Baterias Li-ion

Battery Management System (BMS)

Balanceamento de células

Algoritmos de carregamento com balanceamento

Abstract

Among the wide diversity of existing technologically mature batteries, lithium-ion (Li-ion) batteries have become popular because of their longevity, high energy density, high efficiency and lack of memory effect. This work aims to develop new charging methods that include balancing for lithium-ion battery systems. This can be divided into two distinct phases: the first phase has to do with the development of the entire platform; the second phase refers to the development of new algorithms.

Briefly in the first phase was developed all the hardware and software required to create a versatile and intuitive platform where it was possible to create charging and balancing algorithms. The main hardware implemented system is the Battery Management System (BMS), responsible for all the monitoring of the battery pack used.

The second phase of the work focused on developing new intelligent charging algorithms that include balancing. The option for this approach has to do with the fact that it is essential to control the imbalances between cells during charging, resulting in greater efficiency of the storage system. The obtained results are compared with the traditional algorithms present in the literature.

Keywords

Storage systems

Li-ion Battery

Battery Management System (BMS)

Cell Balancing

Charge Algorithms with Balancing

Sumário

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Palavras-chave.....	v
Abstract	vii
Keywords	vii
Sumário	ix
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas	xvii
Lista de Acrónimos e Abreviaturas.....	xix
Lista de Símbolos.....	xxi
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Motivação.....	2
1.3. Estrutura da Dissertação.....	3
1.4. Tipos de Baterias.....	4
1.4.1. Níquel Cádmio (NiCd).....	4
1.4.2. Hidreto Metálico de Níquel (NiMH).....	5
1.4.3. Chumbo Ácido.....	5
1.4.4. Iões de Lítio (Li-ion)	5
1.4.5. Comparação entre os Vários Tipos de Baterias.....	6
1.5. Modelos Matemáticos.....	7
1.5.1. Modelos Eletroquímicos	7
1.5.2. Modelos Estocásticos.....	7
1.5.3. Modelos Analíticos.....	8
1.5.4. Modelos Elétricos	8
2. Metodologias de Balanceamento.....	15
2.1. Introdução.....	15
2.2. Metodologias de Balanceamento Passivas	16
2.3. Metodologias de Balanceamento Ativas Baseadas em Condensadores.....	17
2.4. Metodologias de Balanceamento Ativas Baseadas em Conversores Isolados.....	20
2.5. Metodologias de Balanceamento Ativas Baseadas em Conversores Não Isolados.....	23
2.6. Resumo e Conclusões.....	25

3. Métodos de Carregamento	27
3.1. Introdução.....	27
3.2. Método de Carregamento Corrente Constante/Tensão Constante (CC/CV)	27
3.3. Método de Carregamento Multistage (MSCC)	28
3.4. Método de Carregamento Pulsado	29
3.5. Resumo e Conclusões.....	31
4. Hardware Desenvolvido.....	33
4.1. Introdução.....	33
4.2. Unidade de Controlo e Processamento.....	34
4.3. Unidade de Aquisição e Balanceamento	34
4.4. Unidade de Potência	38
5. Software Desenvolvido.....	39
5.1. Introdução.....	39
5.2. Unidade Auxiliar de Controlo	39
5.2.1. Função Identificação.....	41
5.2.2. Função Scan Tensão.....	42
5.2.3. Função Scan Temperatura	43
5.2.4. Função Set PWM	44
5.2.5. Função Set Balanceamento	45
5.3. Unidade Principal de Controlo.....	46
5.3.1. Função Get Trama Balance Time Register	50
5.3.2. Função Get Trama Balance Status Register.....	50
6. Algoritmos Desenvolvidos	51
6.1. Algoritmo Multistage Adaptativo	51
6.2. Algoritmo Look up Table (LUT) com Interpolação Trilinear	53
6.2.1. Algoritmo de Carregamento e Balanceamento.....	53
6.2.2. Algoritmo de Estimação do Estado de Carga	56
6.3. Algoritmo baseado em Redes Neurais	59
6.3.1. Redes Neurais	59
6.3.2. Particle Swarm Optimization (PSO)	61
6.3.3. Algoritmo Implementado.....	62
7. Resultados Experimentais	67
7.1. Algoritmo Multistage Adaptativo	67
7.1.1. Caso 1 - Baterias com Elevado Número de Ciclos.....	67
7.1.2. Caso 2 - Baterias com Reduzido Número de Ciclos.....	69
7.1.3. Análise da Eficiência do Algoritmo Multistage Adaptativo	71
7.2. Algoritmo Look up Table (LUT) com Interpolação Trilinear	73

7.2.1. Caso 1 - Carregamento com Reduzido Desequilíbrio entre Células.....	74
7.2.2. Caso 2 - Carregamento com Substancial Desequilíbrio entre Células	76
7.2.3. Análise da Eficiência do Algoritmo LUT com Interpolação Trilinear	78
7.3. Algoritmo Baseado em Redes Neurais	82
7.3.1. Análise da Eficiência do Algoritmo Baseado em Rede Neurais	85
8. Conclusões e Trabalhos Futuros	89
8.1. Considerações Finais	89
8.2. Trabalhos Futuros.....	91
Referências Bibliográficas.....	93
A. Publicações Científicas.....	101

Lista de Figuras

Figura 1.1: Diagrama comparativo das várias tecnologias existentes.	2
Figura 1.2: Modelo baseado no circuito equivalente de <i>Thévenin</i>	9
Figura 1.3: Modelo de <i>Randles</i>	10
Figura 1.4: Diagrama de <i>Nyquist</i> para o modelo de <i>Randles</i> típico.	11
Figura 1.5: Modelo de <i>Randles</i> modificado (adição do efeito de transferência de massa).	12
Figura 1.6: Diagrama de <i>Nyquist</i> para o modelo de <i>Randles</i> modificado.	13
Figura 1.7: Modelo baseado em <i>Runtime</i> : a) Representação do circuito elétrico que traduz o comportamento transitório da bateria; b) Representação do circuito elétrico que traduz o estado de carga da bateria; c) Representação do circuito elétrico que traduz a tensão aos terminais da bateria.....	14
Figura 2.1: Metodologias de balanceamento.....	16
Figura 2.2: Metodologia de balanceamento <i>switched shunt resistor</i> : a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.	16
Figura 2.3: Metodologia de balanceamento <i>switched capacitor</i> : a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.	17
Figura 2.4: Metodologia de balanceamento <i>double tiered switched capacitor</i> : a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.....	18
Figura 2.5: Metodologia de balanceamento <i>single switched capacitor</i> : a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.	19
Figura 2.6: Metodologia de balanceamento <i>series-parallel switched capacitor</i> : a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.....	19
Figura 2.7: Metodologia de balanceamento <i>modularized switched capacitor</i> : a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.....	20
Figura 2.8: Metodologia de balanceamento <i>multi-winding transformer</i> : a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.....	21
Figura 2.9: Metodologia de balanceamento <i>multiple transformer</i> : a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.	21
Figura 2.10: Metodologia de balanceamento <i>single switched transformer</i> : a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.....	22
Figura 2.11: Metodologia de balanceamento com base no conversor DC-DC isolado <i>dual active bridge</i> : a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.	23
Figura 2.12: Metodologia de balanceamento com base no conversor DC-DC não isolado <i>buck boost</i> : a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.	24
Figura 2.13: Metodologia de balanceamento com base no conversor DC-DC não isolado <i>cuk</i> : a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.	24
Figura 2.14: Metodologia de balanceamento com base no conversor DC-DC não isolado <i>full bridge</i> : a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.	25

Figura 2.15: Diagrama comparativo das várias metodologias de balanceamento.	26
Figura 3.1: Método de carregamento Corrente Constante/Tensão Constante.	28
Figura 3.2: Método de carregamento <i>Multistage</i>	29
Figura 3.3: Método de carregamento pulsado: a) VFPC; b) VDPC.	30
Figura 3.4: Diagrama comparativo dos vários métodos de carregamento.	31
Figura 4.1: Representação em blocos da topologia utilizada.	33
Figura 4.2: Circuito elétrico dos dispositivos ISL94212 que formam a cadeia.	35
Figura 4.3: Exemplo de comunicação entre 3 dispositivos.	36
Figura 4.4: Representação do circuito de balanceamento.	36
Figura 4.5: Representação detalhada do circuito de balanceamento implementado ($C_f = 22\text{nF}$, $C_1 = 10\text{nF}$, $R_f = 1\text{k}\Omega$, $R_1 = 330\text{k}\Omega$, $R_2 = 10\text{k}\Omega$, $R_b = 33\Omega$).	37
Figura 4.6: Representação do circuito de monitorização de temperatura implementado.	38
Figura 4.7: Representação do circuito de potência implementado.	38
Figura 5.1: Fluxograma do programa implementado na unidade auxiliar de controlo.	40
Figura 5.2: Fluxograma da função identificação implementada.	42
Figura 5.3: Fluxograma da função <i>scan</i> tensão implementada.	43
Figura 5.4: Fluxograma da função <i>scan</i> temperatura implementada.	44
Figura 5.5: Fluxograma da função <i>set</i> PWM implementada.	45
Figura 5.6: Fluxograma da função <i>set</i> balanceamento implementada.	46
Figura 5.7: Fluxograma do algoritmo implementado - Primeiro segmento.	47
Figura 5.8: Fluxograma do algoritmo implementado - Segundo segmento.	48
Figura 5.9: Fluxograma do algoritmo implementado - Terceiro segmento.	49
Figura 5.10: Fluxograma do algoritmo implementado - Quarto segmento.	50
Figura 6.1: Representação gráfica da metodologia de balanceamento implementada.	53
Figura 6.2: Representação da <i>Look up Table</i> do algoritmo implementado.	54
Figura 6.3: Perfil do SOC e tensão vs. capacidade de descarga durante o processo de descarregamento.	57
Figura 6.4: Perfil de SOC e tensão vs. SOC durante o carregamento, para dois testes experimentais distintos: a) uma célula com reduzido tempo de balanceamento; b) uma célula com elevado tempo de balanceamento.	59
Figura 6.5: Arquitetura característica da rede neuronal MLP.	60
Figura 6.6: Representação gráfica da evolução das partículas.	62
Figura 6.7: Representação da rede neuronal em cascata.	64
Figura 6.8: Representação da rede neuronal <i>Multilayer Perceptron</i>	64
Figura 6.9: Fluxograma representativo do algoritmo de treino utilizado.	65
Figura 7.1: Perfil de corrente e erro entre a tensão desejada (4.2V) e o máximo das tensões das células.	68
Figura 7.2: Perfil de tensão individual das células.	68
Figura 7.3: Perfil de tensão individual das células, número de células em balanceamento e tempo de balanceamento por célula.	69

Figura 7.4: Perfil de corrente e erro entre a tensão desejada e o máximo das tensões, caso de estudo 2.	69
Figura 7.5: Perfil de tensão individual das células, caso de estudo 2.	70
Figura 7.6: Perfil de tensão individual das células, número de células em balanceamento e tempo de balanceamento por célula, caso de estudo 2.	71
Figura 7.7: Perfil de corrente e erro entre a tensão desejada (4.2V) e o máximo das tensões das células, <i>Multistage</i> tradicional.	72
Figura 7.8: Perfil de tensão individual das células, <i>Multistage</i> tradicional.	72
Figura 7.9: Perfil de tensão individual das células, número de células em balanceamento e tempo de balanceamento por célula, <i>Multistage</i> tradicional.	73
Figura 7.10: Perfil de corrente e parâmetros do carregamento.	74
Figura 7.11: Perfil de tensão individual das células.	75
Figura 7.12: Perfil de tensão individual das células, número de células em balanceamento e tempo de balanceamento por célula.	76
Figura 7.13: Perfil do SOC e da tensão vs. SOC ao longo do carregamento.	76
Figura 7.14: Perfil de corrente e parâmetros do carregamento, caso de estudo 2.	77
Figura 7.15: Perfil de tensão individual das células, caso de estudo 2.	77
Figura 7.16: Perfil de tensão individual das células, número de células em balanceamento e tempo de balanceamento por célula, caso de estudo 2.	78
Figura 7.17: Perfil do SOC e da tensão vs. SOC ao longo do carregamento, caso de estudo 2.	78
Figura 7.18: Perfil de corrente e parâmetros do carregamento, algoritmo <i>Multistage</i> tradicional.	79
Figura 7.19: Perfil de tensão individual das células, algoritmo <i>Multistage</i> tradicional.	80
Figura 7.20: Perfil de tensão individual das células, número de células em balanceamento e tempo de balanceamento por célula, algoritmo <i>Multistage</i> tradicional.	81
Figura 7.21: Perfil do SOC e da tensão vs. SOC ao longo do carregamento, algoritmo <i>Multistage</i> tradicional.	81
Figura 7.22: Perfil de corrente e parâmetros do carregamento.	83
Figura 7.23: Perfil de tensão individual das células.	84
Figura 7.24: Perfil de tensão individual das células, número de células em balanceamento e tempo de balanceamento por célula.	84
Figura 7.25: Perfil do SOC e da tensão vs. SOC ao longo do carregamento para o algoritmo proposto e o método tradicional de Coulomb.	85
Figura 7.26: Perfil de corrente e parâmetros do carregamento, <i>Multistage</i> tradicional.	86
Figura 7.27: Perfil de tensão individual das células, <i>Multistage</i> tradicional.	86
Figura 7.28: Perfil de tensão individual das células, número de células em balanceamento e tempo de balanceamento por célula, <i>Multistage</i> tradicional.	87

Lista de Tabelas

Tabela 1.1: Análise comparativa dos vários tipos de baterias (baseada em [6], [7]).	6
Tabela 1.2: Análise comparativa dos vários tipos de modelos elétricos (baseada em [16]).	8
Tabela 5.1: Breve descrição das funções implementadas na unidade auxiliar de controlo.	41
Tabela 7.1: Análise comparativa entre o algoritmo <i>Multistage</i> tradicional e o algoritmo <i>Multistage</i> Adaptativo.	73
Tabela 7.2: Análise comparativa entre o algoritmo <i>Multistage</i> tradicional e o algoritmo LUT com Interpolação Trilinear.	82
Tabela 7.3: Análise comparativa entre o algoritmo <i>Multistage</i> tradicional e o algoritmo baseado em Redes Neurais.	87

Lista de Acrónimos e Abreviaturas

AC	<i>Alternating current</i>
ACK	<i>Acknowledge</i>
ADC	<i>Analog-to-digital converter</i>
BC	<i>Boost charger</i>
BMS	<i>Battery management system</i>
BP	<i>Back-propagation</i>
CAN	<i>Controller area network</i>
CC/CV	<i>Constant current/constant voltage charging method</i>
CCPA	<i>Counter-compare A register</i>
CM	<i>Charge mode</i>
CRC	<i>Cyclic redundancy check</i>
DAB	<i>Dual active bridge</i>
DC	<i>Direct current</i>
DESA	<i>Dependable, Efficient, Scalable Architecture</i>
DL	<i>Double-loop control charger</i>
EIS	<i>Electrochemical impedance spectroscopy</i>
ESS	<i>Energy storage system</i>
FCDM	<i>Full charge detect mode</i>
FL	<i>Fuzzy logic</i>
GP	<i>Grey-predicated control</i>
GPIO	<i>Global purpose input / output</i>
I ² C	<i>Inter-integrated circuit</i>
KibaM	<i>Kinetic battery model</i>
Li-ion	<i>Lithium-ion</i>
LUT	<i>Lookup table</i>
MLP	<i>Multilayer perceptron</i>
MSCC	<i>Multistage charging method</i>
MSE	<i>Mean squared error</i>
NiCd	<i>Nickel-cadmium</i>
NiMH	<i>Nickel-metal hybride</i>
NN	<i>Neural network</i>
PLL	<i>Phase-locked loop control</i>
PSO	<i>Particle swarm optimization</i>
PWM	<i>Pulse-width modulation</i>
RAM	<i>Random access memory</i>
ROM	<i>Read only memory</i>
SCI	<i>Serial communication interface</i>
SCPI	<i>Standard commands for programmable instruments</i>

SM	<i>Search mode</i>
SOC	<i>State of charge</i>
SOH	<i>State of health</i>
SPI	<i>Serial peripheral interface</i>
TBCTL	<i>Time-base control register</i>
TBPRD	<i>Time-base period register</i>
TC	<i>Trickle charge</i>
USART	<i>Universal synchronous asynchronous receiver transmitter</i>
USB	<i>Universal serial bus</i>
VDPC	<i>Variable duty pulse current</i>
VFPC	<i>Variable frequency pulse charge</i>

Lista de Símbolos

Do alfabeto latino:

A_w	Coeficiente de Warburg
b_1/b_2	Bias da camada escondida e da camada de saída
$c1/c2$	Constantes positivas de aceleração usadas para ajustar as contribuições individuais e coletivas na atualização das velocidades
C	Capacidade nominal da célula
$C_{capacity}$	Capacidade total da bateria
C_o	Número de Coulombs por segundo
$C_{transient}$	Condensador ilustrativo do comportamento transitório da bateria
d	Vetor de dados de saídas desejadas
d_o	Dimensão do problema de otimização
dv	Tensão desejada
f_k	Função objetivo no instante de tempo k
F	Desempenho de cada partícula do algoritmo PSO
F_1/F_2	Funções de ativação da camada escondida e de saída
g_{best}	Melhor desempenho de todas as partículas
i	Célula do pack
I	Entradas do problema na rede neuronal
I_{bat}	Corrente de descarga
I_{charge}	Corrente de carregamento
I_{min}	Valor mínimo de corrente
I_r	Entradas do problema na rede neuronal r , pertencente a uma rede com arquitetura em cascata
$I_{trickle}$	Valor reduzido de corrente de carregamento
IW_1	Pesos correspondentes às conexões entre a camada de entrada e a escondida
k	Instante de tempo
L_{ner}	Número de neurónios na camada escondida na rede neuronal r , pertencente a uma rede com arquitetura em cascata
L_{series}	Indutância do eletrodo
LW_2	Pesos correspondentes às conexões entre a camada escondida e a de saída
m	Número de módulos do pack
n	Número de células do pack
nc	Número de ciclos de carga/descarga
N	Amostras do conjunto de entrada da rede neuronal
N_c	Número de redes em cascata
N_d	Número de dispositivos ISL94212
N_t	Conjunto de treino

N_v	Conjunto de validação
o_r	Número de saídas da rede neuronal r , pertencente a uma rede com arquitetura em cascata
p	Número de packs
p_{best}	Melhor desempenho de cada partícula
Q_{max}	Capacidade máxima da célula
r	Rede pertencente a uma rede com arquitetura em cascata
R_b	Resistência de balanceamento
$R_{self-discharge}$	Resistência ilustrativa do fenômeno de auto descarga da bateria
R_{series}	Resistência interna da bateria
$R_{transient}$	Resistência ilustrativa do comportamento transitório da bateria
S_1/S_2	Saídas dos neurónios da camada escondida e da camada de saída
$SOC_{i,k}$	SOC da célula i , no instante de tempo k
$SOC_{p,k}$	SOC do pack p , no instante de tempo k
$time_{bal}$	Tempo de balanceamento
T_k	Temperatura do pack no instante de tempo k
T_s	Tempo de amostragem
$V_{b,i,k}$	Tensão durante o balanceamento da célula i , no instante de tempo k
v_k	Velocidade da partícula no instante de tempo k
V_{charge}	Tensão de carregamento
$V_{i,k}$	Tensão da célula i no instante de tempo k
V_{lost}	Queda de tensão para perdas internas
V_{OC}	Tensão em circuito aberto
V_{sense}	Entrada da fonte programável
V_{SOC}	Tensão entre 0 e 100% correspondente ao estado de carga da bateria
$V_{trickle}$	Valor crítico (mínimo) de tensão
x	Dispositivo ISL94212 presente na cadeia de dispositivos
x_e	Vetor de dados de entrada
$x_{g_{best}}$	Melhor posição alcançada por todas as partículas
x_k	Posição da partícula no instante de tempo k
$x_{p_{best}}$	Melhor posição alcançada pela partícula
Z_{bat}	Impedância eletroquímica da bateria
x_{max}	Limite máximo possível para a partícula
x_{min}	Limite mínimo possível para a partícula
x_{new}	Inicialização dos pesos e bias das partículas
y_i	Saída desejada para a rede neuronal
\hat{y}_i	Saída da rede neuronal
Z_W	Impedância de Warburg

Do alfabeto grego:

α_1/α_2	Fatores aleatórios no intervalo de $[0,1]$
γ_k	Diferença entre tensão desejada e a tensão das células no instante de tempo k
δ_k	Desvio padrão das tensões das células no instante de tempo k
θ	Fator de inércia
ξ_k	Média das tensões das células no instante de tempo k
ϕ_k	Diferença entre a tensão desejada e a média das tensões das células no instante de tempo k
Ψ_k	Desequilíbrio entre células no instante de tempo k
ω	Frequência angular

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo tem como objetivo enquadrar o tema da Dissertação no contexto atual. Para uma melhor compreensão da temática abordada neste documento é apresentada uma breve comparação entre os vários tipos de baterias existentes e os seus modelos matemáticos. Por fim, é exposta a motivação para a realização deste trabalho e uma descrição simples da estrutura do documento em cada capítulo.

1.1. Enquadramento

No contexto de um desenvolvimento sustentável, é evidente a aposta numa produção descentralizada de energia elétrica, tendo por base, um *mix* de tecnologias de produção com origens renováveis. No entanto, a maioria das tecnologias de produção de energia elétrica através de fontes renováveis pelas suas características intrínsecas, como a sua variabilidade, representam um enorme desafio na manutenção do equilíbrio do sistema elétrico de modo a garantir a sua estabilidade e confiabilidade.

Atualmente, a estabilidade do sistema elétrico nacional é conseguida principalmente com recurso a tecnologias de produção convencionais (combustíveis fósseis). Diversos esforços e estudos têm sido realizados na procura de soluções alternativas, como por exemplo, a integração de sistemas de armazenamento de energia (ESS), deslocamento de cargas (*demand response*), interconexão com redes externas, entre outras [1]. De entre o leque variado de soluções possíveis e viáveis, os ESS têm sido reconhecidos como uma das abordagens mais promissoras, possibilitando, ainda mais, a penetração de energias renováveis no sistema elétrico nacional, sem comprometer a sua eficiência, qualidade e estabilidade.

Em particular, a utilização dos sistemas ESS de uma forma distribuída garantindo assim a estabilidade e sobretudo a qualidade no sistema elétrico nacional, assim como possibilitando que cada consumidor produtor possa atuar como *player*, possibilitando o controlo das suas instalações, de forma a gerir os seus recursos e consumos, torna-se inevitável num futuro próximo.

Atualmente existem várias tecnologias utilizadas nos sistemas de armazenamento de energia, ainda que, nem todas se encontrem em níveis semelhantes de maturidade tecnológica. A Figura 1.1 ilustra as várias tecnologias existentes, tendo em conta os níveis de maturidade em função do investimento inicial e do risco tecnológico [2].

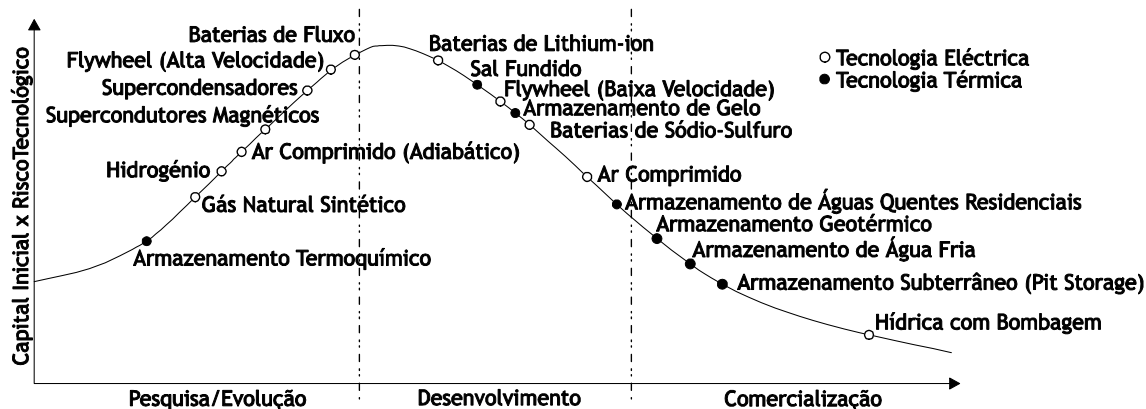


Figura 1.1: Diagrama comparativo das várias tecnologias existentes.

Assim sendo, esta Dissertação assenta nesta problemática, na qual é desenvolvido um sistema ESS bem como o seu sistema de monitorização, introduzindo novos algoritmos que otimizem o seu carregamento e balanceamento, conduzindo a uma maior longevidade e desempenho do ESS [3]. Neste trabalho será desenvolvido um sistema de armazenamento de energia baseado em baterias. A fim de perceber, de forma mais pormenorizada, os vários tipos de baterias existentes e quais as suas características, vantagens e desvantagens, foi inicialmente realizada uma revisão bibliográfica acerca do tema.

1.2. Motivação

Com o objetivo de desenvolver soluções mais capazes e robustas ao nível do armazenamento de energia, tem havido nos últimos anos um esforço significativo de investigação sobre a temática. Estes esforços devem-se em grande percentagem aos veículos elétricos e à necessidade de armazenar a energia proveniente das energias renováveis.

Existem vários trabalhos e contribuições científicas sobre sistemas de armazenamento de energia e todas as temáticas que os envolvem. De uma forma geral, os trabalhos focam-se principalmente nas baterias de íons de Lítio, os seus métodos de carregamento, metodologias de balanceamento, modelos matemáticos e aspetos químicos. Porém existem poucos estudos que conjuguem os métodos de carregamento com as metodologias de balanceamento para *packs* com um elevado número de células em série.

Este documento pretende assim apresentar um sistema capaz de implementar métodos de carregamento que incorporem metodologias de balanceamento para um *pack* de baterias. Para

tal, além da revisão do estado de arte, apresenta-se um *Battery Management System (BMS)*, propostas de algoritmos de carregamento com balanceamento incorporado e resultados experimentais. Este trabalho revela-se, por isso, na opinião do autor, de extrema importância uma vez que propõe soluções sobre um tema de grande relevância na atualidade. Procura assim contribuir para o reforço do conhecimento sobre este tipo de sistema de armazenamento.

1.3. Estrutura da Dissertação

Este documento está centrado em oito capítulos independentes, seguidos das referências bibliográficas e anexos. Apresenta-se de seguida uma breve descrição de cada capítulo:

- **Capítulo 1 - Introdução**

Este capítulo tem como objetivo enquadrar a temática da dissertação num contexto atual e introduzir conceitos base, fulcrais na compreensão do restante documento. Está organizado em 5 secções, onde é apresentado um breve enquadramento do tema, a motivação na realização deste trabalho e de que modo se encontra organizado o documento. De seguida é apresentada uma comparação entre os vários tipos de baterias e os seus modelos matemáticos.

- **Capítulo 2 - Metodologias de Balanceamento**

Este capítulo aborda as várias metodologias de balanceamento disponíveis na literatura. Está organizado em 6 secções, onde é realizada uma breve introdução, descritas as várias metodologias para cada um dos grandes grupos existentes na literatura e por último são apresentadas algumas conclusões.

- **Capítulo 3 - Métodos de Carregamento**

Este capítulo aborda os vários métodos de carregamento apresentados na literatura. Está organizado em 5 secções, onde é realizada uma breve introdução, descritos os vários métodos existentes, bem como algumas variantes destes e apresentadas algumas conclusões.

- **Capítulo 4 - *Hardware* Desenvolvido**

Este capítulo descreve de forma pormenorizada o *hardware* desenvolvido neste trabalho. Está organizado em 4 secções. Na primeira secção é apresentada uma visão geral da arquitetura proposta, enunciando cada bloco constituinte da mesma. Nas seguintes secções são descritos detalhadamente cada um dos blocos, suas características, funções e como se interligam.

- **Capítulo 5 - Software Desenvolvido**

Este capítulo descreve detalhadamente os algoritmos implementados na unidade principal de controlo e na unidade auxiliar de controlo. Está dividido em 3 secções, a primeira responsável por uma breve introdução ao ambiente de desenvolvimento das mesmas e qual a sua finalidade. A segunda secção, é dividida em 5 subsecções em que cada uma delas representa uma função implementada na unidade auxiliar de controlo. Já a terceira e última secção apresenta todo o algoritmo implementado na unidade principal de controlo.

- **Capítulo 6 - Algoritmos Desenvolvidos**

Neste capítulo são descritos de forma detalhada os vários algoritmos de carregamento/balanceamento desenvolvidos. Está dividido em 3 secções, cada uma correspondente a um algoritmo.

- **Capítulo 7 - Resultados Experimentais**

O capítulo 7 tem como objetivo apresentar os resultados experimentais obtidos para cada um dos algoritmos desenvolvidos. Está dividido em 3 secções, sendo, tal como no capítulo anterior, referentes aos três algoritmos desenvolvidos.

- **Capítulo 8 - Conclusões e Trabalhos Futuros**

O último capítulo expõe as conclusões finais sobre o presente documento. Destaca a importância do estudo desta temática e a relevância das conclusões obtidas neste trabalho. São ainda apresentadas algumas ideias de trabalhos futuros relevantes para um tema cada vez mais em foco e de grande importância.

1.4. Tipos de Baterias

Nesta secção são descritas as várias tecnologias de baterias frequentemente utilizadas nas diversas aplicações do quotidiano. Quando se comparam vários tipos de baterias existem diversas considerações a ter em conta. Alguns exemplos são: a densidade de energia (quantidade de energia armazenada por quantidade de massa), o número de ciclos de vida (quantidade de ciclos de carga/descarga), o impacto ambiental, a segurança, o custo, a tensão disponível e as características de carga/descarga [4].

1.4.1. Níquel Cádmio (NiCd)

As baterias de Níquel Cádmio representam uma tecnologia madura utilizada durante várias décadas com o intuito de criar baterias recarregáveis para aplicações móveis. Possui como vantagens o facto de deter um custo reduzido, altas taxas de descarga, robustez em descargas

elevadas, elevado número de ciclos, tolerância às variações de temperatura e alta densidade de energia [2]. No entanto, a sua baixa densidade de energia e a sua toxicidade constituem desvantagens na sua utilização [4]. Estas têm vindo a sofrer algumas melhorias através da introdução de material mais ativo, o que levou ao aumento da sua capacidade em cerca de 60%, e conseqüente aumento da sua resistência interna e redução do número de ciclos [1].

1.4.2. Hidreto Metálico de Níquel (NiMH)

Uma outra variante das baterias baseadas em níquel refere-se às baterias de Hidreto Metálico de Níquel (NiMH). As primeiras pesquisas revelaram problemas devido à instabilidade do metal híbrido e como resultado, foram desenvolvidas principalmente para satélites. A descoberta de novas ligas de hidreto, as quais proporcionam uma maior estabilidade e cerca de duas vezes a densidade de energias das baterias NiCd, veio revolucionar as baterias NiMH. Estas possuem ainda a vantagem de ter um baixo impacto ambiental. No entanto têm menores ciclos de vida, têm um maior custo e são pouco eficientes a altas taxas de descarga quando comparadas com as baterias de Níquel Cádmio [1], [4].

1.4.3. Chumbo Ácido

As baterias de chumbo ácido representam uma tecnologia madura, com especial utilização na indústria automóvel. As suas principais desvantagens têm a ver com a baixa *performance* a temperaturas reduzidas, o peso elevado, o baixo número de ciclos e o impacto ambiental [2]. São bastante utilizadas para aplicações de maior potência onde o peso é desprezado. Estas podem ser divididas em dois tipos de construções distintas. O primeiro refere-se às baterias inundadas; estas permitem, após a secagem do líquido formado pelos eletrólitos, que os utilizadores tenham acesso às células individuais, podendo adicionar água destilada. O segundo tipo consiste nas baterias seladas, estas não permitem o acesso às células individuais, no entanto a estrutura interna destas é muito idêntica às baterias do tipo inundado. O fabricante tem de garantir que a bateria possui ácido suficiente nos compartimentos das células, a fim de conseguir tolerar as reações químicas em condições normais de utilização [1].

1.4.4. Iões de Lítio (Li-ion)

As baterias de Iões de Lítio são uma das tecnologias com maior crescimento na atualidade, possuindo densidades de energia maiores e ciclos de vida cerca de duas vezes superiores às baterias NiMH. Diferem pelo facto de serem mais sensíveis a altas correntes de descarga, são mais caras que as baterias NiMH e exigem monitorização constante [1], [4]. Uma outra vantagem consiste no facto de não sofrerem de efeito de memória, termo que define a degradação da capacidade da bateria quando é parcialmente carregada ou descarregada [5]. Este tipo de baterias tem vindo a ganhar grande relevância nas mais diversas aplicações presentes no quotidiano, devido às várias vantagens que possui quando comparadas com as restantes.

1.4.5. Comparação entre os Vários Tipos de Baterias

Após uma breve descrição dos principais tipos de baterias existentes, é possível comprovar que as baterias de lões de Lítio oferecem a melhor solução para o sistema de armazenamento pretendido. A fim de se obter uma visão mais clara e esclarecedora são apresentadas as principais características de cada tipo na Tabela 1.1.

Tabela 1.1: Análise comparativa dos vários tipos de baterias (baseada em [6], [7]).

Tipo/Parâmetro	NiCd	NiMH	Chumbo Ácido	Li-ion
Tensão (V)	1.2	1.2	2	4.2
Densidade Energética (Wh/Kg)	55	80	40	135
Ciclos de Vida	1200	800	400	1000
Auto Descarga/Mês (%)	20	30	5	10
Gama de Temperaturas (°C)	-40 a 60	-20 a 60	-20 a 60	-20 a 60
Efeito de Memória	Sim	Sim	Não	Não
Resistência Interna (mΩ)	150	250	<100	200
Tempo de Carregamento Rápido (h)	1	2-4	8-16	2-4
Tolerância a Sobrecarga	Moderada	Baixa	Alta	Muito baixa
Necessidade de Manutenção (meses)	1 a 2	2 a 3	3 a 6	Não
Toxicidade	Elevada	Baixa	Elevada	Baixa
Reciclável	Difícil	Sim	Difícil	Sim
Custo de Aquisição (€)	≈50	≈60	≈25	≈90

Através da Tabela 1.1 é facilmente perceptível que a melhor solução existente incide sobre as baterias de lões de Lítio. Apresentam algumas desvantagens, como a reduzida tolerância à sobrecarga (requer monitorização constante) e o custo de aquisição elevado. No entanto, essas desvantagens são compensadas pelas diversas vantagens quando comparadas com as restantes. Assim neste trabalho serão utilizadas baterias de lões de Lítio no sistema de armazenamento de energia. Após esta análise, torna-se agora importante estudar os modelos matemáticos das mesmas com o objetivo de compreender de forma mais detalhada a sua constituição e os fenómenos que nelas ocorrem.

1.5. Modelos Matemáticos

Na literatura podem ser encontradas diferentes abordagens com o intuito de obter um modelo fiável e detalhado. Este deve ser capaz de representar, com detalhe, o comportamento dos diferentes tipos de baterias sob diversas condições de funcionamento [8].

Deste modo é possível agrupar os vários tipos de modelos existentes em quatro categorias distintas, são elas: modelos eletroquímicos, modelos estocásticos, modelos analíticos e modelos elétricos.

1.5.1. Modelos Eletroquímicos

Os modelos eletroquímicos baseiam-se nos processos químicos que ocorrem na bateria, requerendo um profundo conhecimento da composição química e propriedades dos diversos materiais, uma grande quantidade de parâmetros e um elevado tempo computacional devido à sua complexidade. Estes são considerados os modelos que com maior detalhe representam o comportamento da bateria, sendo por isso frequentemente utilizados como modelos referência [4].

Um exemplo deste tipo de modelação é o apresentado pelos autores em [9], [10]. Estes desenvolveram um modelo eletroquímico para células Li-ion, em que é considerado o transporte unidirecional de iões de Lítio a partir do eléctrodo negativo para o eléctrodo positivo. Através da resolução das equações obtidas a partir deste modelo é possível obter a tensão e a corrente em função do tempo, a concentração salina, a taxa de reacção e a densidade de corrente no eletrólito em função do tempo e da posição da célula.

1.5.2. Modelos Estocásticos

Os modelos estocásticos representam o comportamento da bateria de forma abstrata, descrevendo-a por um número finito de estados (capacidade). De uma forma sucinta, dependendo da corrente de carga/descarga, a cada instante de tempo é calculado, em função de uma probabilidade, o número de estados recuperados/consumidos [11], [12].

Um dos modelos primeiramente criados foi desenvolvido em [13], [14], utilizando cadeias de *Markov* para modelar o processo de descarregamento de uma bateria. Para tal é considerada a capacidade teórica da bateria como sendo o número máximo de unidade de carga que esta é capaz de fornecer, para um determinado valor de corrente. Resultados demonstram que os grandes benefícios deste modelo são obtidos quando é utilizado o método de descarga por pulsos. Ainda assim, estes modelos possuem limitações, uma vez que apenas o efeito de recuperação é considerado.

1.5.3. Modelos Analíticos

Com o intuito de mitigar as desvantagens dos modelos eletroquímicos, e mantendo uma boa aproximação, os modelos analíticos recorrem a um conjunto reduzido de equações que traduzem as principais características de uma bateria. Tornando estes modelos computacionalmente eficientes e flexíveis, podendo facilmente ser aplicados para os diferentes tipos de baterias existentes [4], [15]. Os principais modelos analíticos encontrados na literatura são o modelo cinético *KibaM* (*Kinetic Battery Model*) e o modelo de difusão (*Rakhmatov and Vrudhula's Diffusion Model*) [15].

1.5.4. Modelos Elétricos

Nos modelos elétricos a bateria é descrita na forma de circuito elétrico, baseando-se na combinação de componentes elétricos para representar o seu comportamento. Uma ampla variedade de modelos, com diferentes graus de complexidade podem ser encontrados na literatura. Como apresentado em [16] os modelos elétricos podem ser divididos em três grandes grupos: modelos baseados no circuito equivalente de *Thévenin*, modelos baseados na Impedância e modelos baseados em *Runtime*. Na Tabela 1.2 é apresentada uma breve comparação entre as três categorias referidas anteriormente.

Tabela 1.2: Análise comparativa dos vários tipos de modelos elétricos (baseada em [16]).

Capacidade de representação	Modelo baseado no circuito equivalente de <i>Thévenin</i>	Modelo baseado na Impedância	Modelo baseado em <i>Runtime</i>
Corrente contínua (DC)	Não	Não	Sim
Corrente alternada (AC)	Limitado	Sim	Não
Transitório	Sim	Limitado	Limitado
<i>Runtime</i>	Não	Não	Sim

- **Modelo Baseado no Circuito Equivalente de *Thévenin***

Este modelo tem por base uma resistência em série (R_{series}), um bloco formado pela resistência $R_{transient}$ e pelo condensador $C_{transient}$, uma resistência $R_{self-discharge}$ e a tensão em circuito aberto V_{OC} , como ilustrado na Figura 1.2. Através deste modelo é possível prever a resposta da bateria a eventos de carga momentâneos para um determinado estado de carga, considerando a tensão em circuito aberto constante. No entanto este tipo de modelo não traduz as variações de tensão na bateria em estado estacionário, ou seja, a resposta DC, assim como a informação acerca do tempo de vida [16]. Nesta topologia, a resistência $R_{self-discharge}$ representa o fenómeno de auto descarga da bateria, a resistência R_{series} corresponde à resistência interna

da bateria e o bloco constituído pelos componentes $R_{transient}$ e $C_{transient}$ representa o comportamento transitório da bateria e a constante de tempo para condições momentâneas.

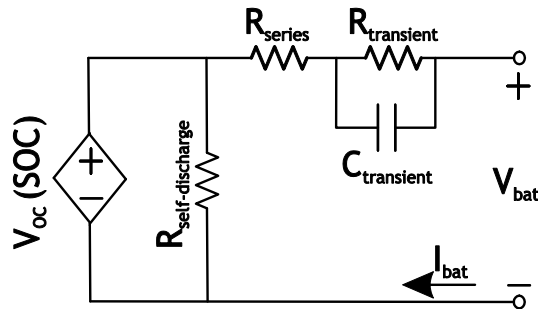


Figura 1.2: Modelo baseado no circuito equivalente de *Thévenin*.

Como descrito em [16] existem diversas variantes deste modelo, algumas apresentando melhorias devido à inclusão de componentes para a previsão do tempo de vida da bateria, no entanto, estes possuem igualmente algumas desvantagens. Por exemplo, em [17] é utilizado um condensador variável substituindo o V_{oc} para representar a tensão não-linear em circuito aberto. Este facto implica a determinação dos parâmetros do condensador, necessitando de calcular o integral da tensão da bateria para obter o seu estado de carga. Já em [18] a relação não-linear entre a tensão em circuito aberto e o estado de carga é modelada, no entanto, o comportamento transitório da bateria não é tido em conta. Em [19], [20] são necessárias equações matemáticas adicionais para obter o estado de carga (SOC) da bateria e prever o tempo de vida da mesma. Ainda em [21] é utilizada uma rede complexa, extraída do processo físico para modelar a tensão em circuito aberto; esta abordagem torna o modelo bastante mais complexo. Após a análise do modelo baseado no circuito equivalente de *Thévenin* e das suas variantes, é perceptível que nenhuma destas consegue prever o tempo de vida da bateria de forma simples e prática [16].

- **Modelo Baseado na Impedância**

Modelos baseados na Impedância empregam o método de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) para obter um modelo equivalente da impedância AC no domínio da frequência. Na literatura podemos encontrar diversos trabalhos que estudam a EIS. Esta tem sido utilizada com o objetivo de definir as propriedades eletroquímicas da bateria e compreender as características das baterias em corrente alternada [22]. Assim vários métodos de carregamento têm sido desenvolvidos com o intuito de encontrar a frequência para a qual a impedância da bateria atinge o valor mínimo no EIS. Esta frequência é denominada por *minimum-ac-impedance frequency* [22].

A impedância refere-se à oposição que um determinado circuito apresenta à passagem de uma determinada corrente. Deste modo, torna-se importante minimizar a impedância eletroquímica

da célula, conseguindo assim otimizar a corrente de carregamento. Os dados relativos à EIS são analisados através de modelos elétricos de maior ou menor complexidade, como por exemplo o ilustrado na Figura 1.3, designado por modelo de *Randles* [23], [24].

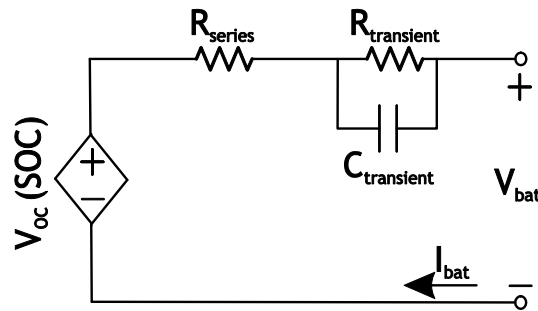


Figura 1.3: Modelo de *Randles*.

O modelo de *Randles* é um modelo bastante simplificado e frequentemente encontrado na literatura. Este é baseado na utilização da resistência R_{series} (resistência interna da bateria), da resistência $R_{transient}$, do condensador $C_{transient}$ (estes dois últimos representam o comportamento transitório da bateria) e da fonte de tensão V_{OC} (tensão em circuito aberto). Através da análise do circuito podemos calcular o espectro de impedância, para vários valores de frequência angular (ω), através da seguinte equação:

$$Z_{bat}(\omega) = R_{series} + \frac{R_{transient}}{1 + (\omega R_{transient} C_{transient})^2} + j \frac{\omega R_{transient}^2 C_{transient}}{1 + (\omega R_{transient} C_{transient})^2} \quad (1.1)$$

Através de uma análise detalhada da equação é possível perceber que para altas frequências o segundo e terceiro termos tendem para valores nulos, sendo apenas observada a componente R_{series} . Já para frequências baixas irá fluir alguma corrente pela resistência $R_{transient}$ e pelo condensador $C_{transient}$. A Figura 1.4 ilustra um diagrama de *Nyquist* para o modelo de *Randles* típico. É possível obter informações mais detalhadas acerca da impedância numa célula traçando este no plano complexo, com as componentes real e imaginária (invertida) nos eixos horizontal e vertical, respetivamente, para diferentes valores de ω .

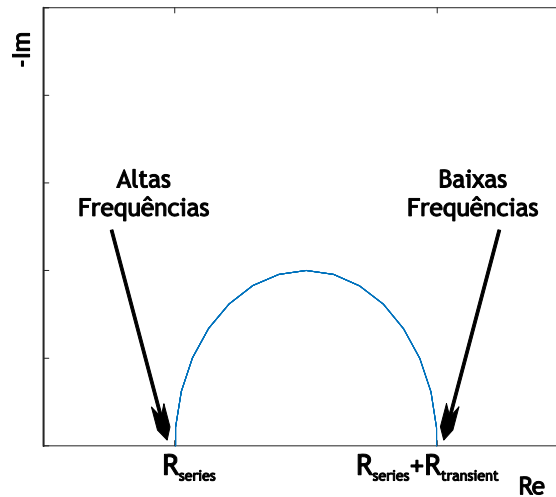


Figura 1.4: Diagrama de Nyquist para o modelo de Randles típico.

Assim, é possível concluir que o valor máximo do semicírculo é encontrado à frequência ilustrada pela seguinte equação:

$$\omega = \frac{1}{R_{transient} C_{transient}} \quad (1.2)$$

Substituindo a expressão (1.2) na expressão (1.1) obtém-se a impedância eletroquímica correspondente a frequência encontrada através da expressão (1.2):

$$Z_{bat} = R_{series} + \frac{R_{transient}}{2} + j \frac{R_{transient}}{2} \quad (1.3)$$

Tal como descrito acima, através da Figura 1.4 pode-se concluir que para altas frequências a impedância eletroquímica é dada apenas por R_{series} . Já para baixas frequências é obtida através da soma de ambas as resistências presentes no circuito. No entanto, a baixa frequência, o circuito apresentado anteriormente não é totalmente correto, uma vez que devem ser tidos também em conta os efeitos da transferência de massa. A impedância de transferência de massa é representada através do elemento de Warburg. Assim o circuito equivalente da célula é ilustrado na Figura 1.5, [22], [25], [26], [27].

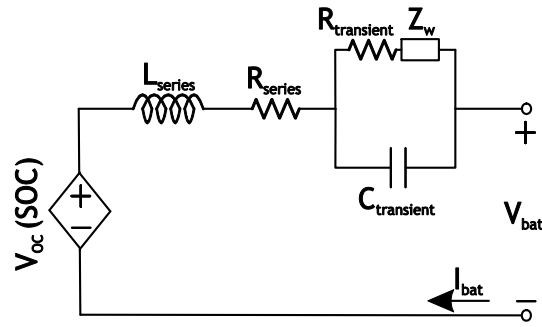


Figura 1.5: Modelo de *Randles* modificado (adição do efeito de transferência de massa).

O circuito equivalente conta com a adição da indutância L_{series} , a qual representa a indutância do elétrodo e da impedância de *Warburg*. O elemento de *Warburg* refere-se à difusão do processo de espectroscopia dielétrica, sendo este um elemento de fase constante. A impedância de *Warburg* é dada pela seguinte equação, na qual a variável A_W representa o coeficiente de *Warburg* e ω a frequência angular.

$$Z_W = \frac{A_W}{\sqrt{\omega}} + \frac{A_W}{j\sqrt{\omega}} \quad (1.4)$$

Deste modo a impedância eletroquímica pode ser representada pela seguinte equação:

$$Z_{bat} = a + jb \quad (1.5)$$

onde,

$$a = R_{series} + \frac{\left(\frac{1}{\omega C_{transient}}\right)^2 \left(R_{transient} + A_W \omega^{-\frac{1}{2}}\right)}{\left(R_{transient} + A_W \omega^{-\frac{1}{2}}\right)^2 + \left(A_W \omega^{-\frac{1}{2}} - \left(\frac{1}{\omega C_{transient}}\right)^2\right)} \quad (1.6)$$

$$b = \omega L_{series} - \frac{\frac{1}{\omega C_{transient}} \left[\left(A_W \omega^{-\frac{1}{2}}\right)^2 + A_W \omega^{-\frac{1}{2}} \frac{1}{\omega C_{transient}} + \left(R_{transient} + A_W \omega^{-\frac{1}{2}}\right)^2 \right]}{\left(R_{transient} + A_W \omega^{-\frac{1}{2}}\right)^2 + \left(A_W \omega^{-\frac{1}{2}} - \frac{1}{\omega C_{transient}}\right)^2} \quad (1.7)$$

Através das equações anteriores pode-se mais uma vez representar a impedância eletroquímica com recurso ao diagrama de *Nyquist*, ilustrado na Figura 1.6.

O diagrama apresenta um comportamento indutivo no 4º quadrante e um comportamento capacitivo no 1º quadrante. A região capacitiva pode ser decomposta em duas. A região para baixas frequências é caracterizada por um comportamento linear, que tipicamente aparece com um ângulo de 45°, relacionada com a difusão e transporte de massa (representada pela impedância de *Warburg*). A região para frequências intermédias é designada como região de transferência de carga [22], [27], [28].

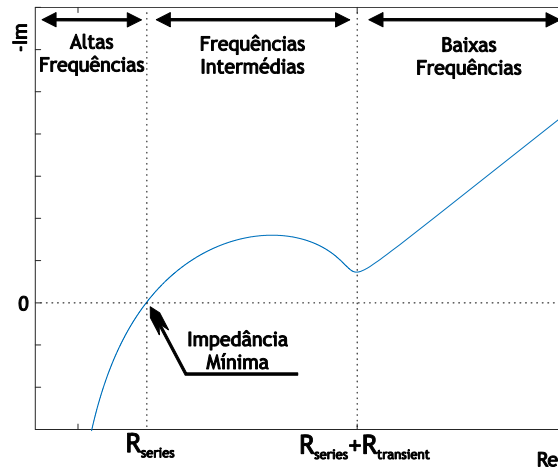


Figura 1.6: Diagrama de Nyquist para o modelo de Randles modificado.

A impedância eletroquímica mínima é encontrada quando a curva intercepta o eixo horizontal (componente imaginária nula). No entanto, a curva apresentada na Figura 1.6 está diretamente relacionada com vários parâmetros, como a temperatura [29], [30], [31], o número de ciclos [28], [32], o estado de carga [28], [31], [32], [33] e o tipo de célula (construção) [34].

- **Modelo Baseado em Runtime**

Segundo [16], os modelos baseados em *Runtime*, Figura 1.7, utilizam uma rede de circuitos para simular o tempo de vida da bateria e a resposta DC aquando de descargas contínuas. No entanto quando se trata de descargas variáveis, este tipo de modelo não consegue simular com precisão nem o tempo de vida, nem a resposta DC da bateria.

Na Figura 1.7 é possível identificar que o modelo baseado em *Runtime* é constituído por três partes distintas. Na Figura 1.7 a) é representado o circuito elétrico que traduz o comportamento transitório da bateria, através da resistência $R_{transient}$ e do condensador $C_{transient}$. Já na Figura 1.7 b) é representado o circuito elétrico que traduz o estado de carga da bateria. A tensão V_{SOC} está compreendida entre 0 e 100%, representando assim o SOC da bateria. Para tal, é utilizada uma resistência $R_{self-discharge}$, uma tensão V_{lost} e um condensador $C_{capacity}$. A corrente I_{bat} representa a corrente de descarga da bateria. A Figura 1.7 c), representa o circuito elétrico que traduz a tensão aos terminais da bateria que depende da corrente I_{bat} , da resistência R_{series} , que modela a resistência interna da bateria.

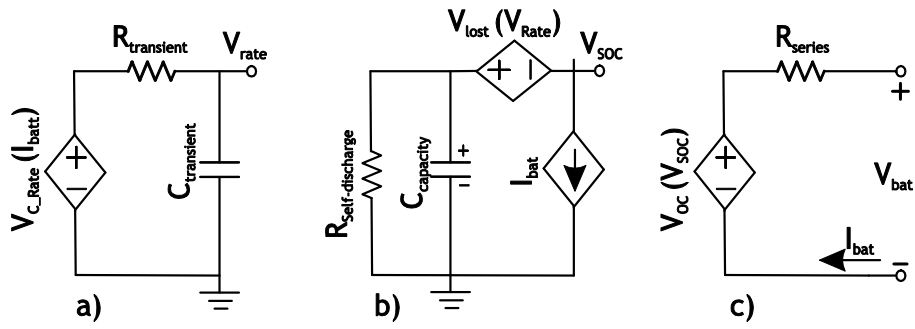


Figura 1.7: Modelo baseado em *Runtime*: a) Representação do circuito elétrico que traduz o comportamento transitório da bateria; b) Representação do circuito elétrico que traduz o estado de carga da bateria; c) Representação do circuito elétrico que traduz a tensão aos terminais da bateria.

Capítulo 2

Metodologias de Balanceamento

Neste capítulo são abordadas as várias metodologias de balanceamento descritas na literatura. É apresentada uma breve introdução, onde são relatados alguns conceitos relevantes para uma melhor compreensão do capítulo. De seguida são expostas as várias metodologias de balanceamento, de acordo com as categorias a que pertencem e uma breve comparação entre elas.

2.1. Introdução

Na literatura é possível encontrar várias metodologias de balanceamento, como ilustrado na Figura 2.1, conceptualmente subdivididas em metodologias passivas e ativas. Estas podem ser executadas em três períodos distintos: períodos de carregamento, períodos de descarregamento e nos períodos inativos (sem qualquer atividade no *pack*).

No balanceamento passivo, o excesso de energia é dissipado na forma de calor através de elementos resistivos. Já as metodologias de balanceamento ativas recorrem a circuitos externos, os quais permitem transferência de energia entre células. Esta pode ser realizada com base em condensadores ou conversores, podendo estes últimos ser isolados ou não isolados [35]. No que diz respeito ao modo como é realizada a transferência de energia, os métodos ativos podem ainda ser agrupados como em [36], [37]:

- *Cell to cell*-a transferência de energia é realizada entre células de forma seletiva ou entre células adjacentes;
- *Cell to pack*-a transferência de energia é realizada de forma unidirecional sendo extraída seletivamente da célula com excesso de energia e entregue ao *pack* de baterias;
- *Pack to cell*-a transferência de energia é realizada de forma unidirecional sendo extraída do *pack* de baterias e entregue de forma seletiva às células;
- *Cell to pack to cell*-a transferência de energia é realizada de forma bidirecional, podendo ser *cell to pack* e/ou *pack to cell*.

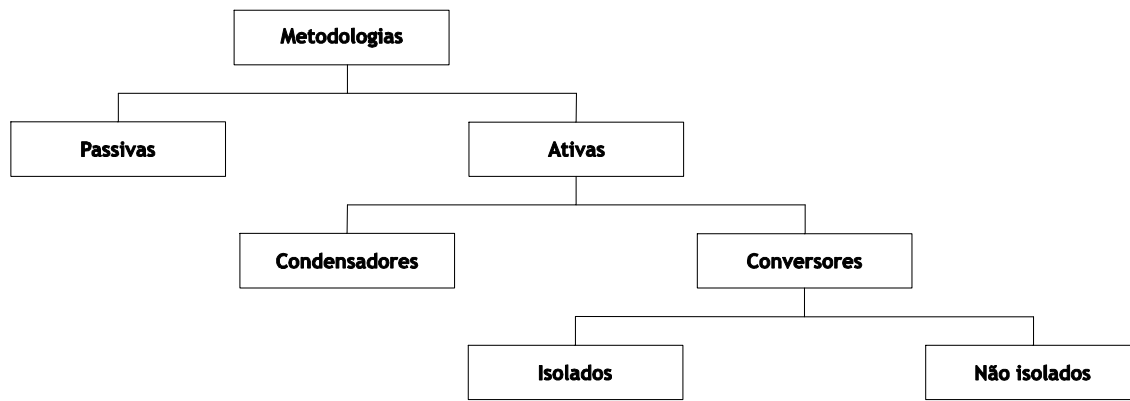


Figura 2.1: Metodologias de balanceamento.

2.2. Metodologias de Balanceamento Passivas

A Figura 2.2 ilustra a metodologia passiva mais comum, designada por *switched shunt resistor* [35], [37]-[39]. Trata-se de uma metodologia amplamente utilizada na indústria automóvel devido à sua simplicidade, custo, eficiência, volume, peso, robustez e confiabilidade [37]. A aplicação desta ocorre nos períodos de carregamento ou nos períodos inativos da bateria (*pack*). Consiste numa metodologia *cell bypass*, em que a cada célula constituinte do *pack* está associada uma resistência de balanceamento e a um interruptor controlado pelo *Battery Management System*.

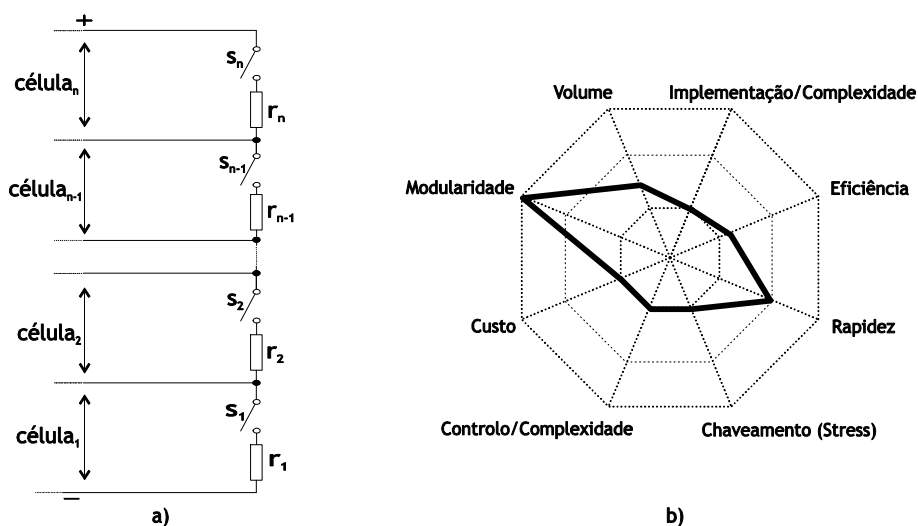


Figura 2.2: Metodologia de balanceamento *switched shunt resistor*: a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.

Na sua essência, o BMS monitoriza a tensão ou o estado de carga de cada célula, proporcionando um caminho alternativo para a corrente até que todas as células tenham a mesma tensão ou

SOC. A principal desvantagem deste método é o facto de a energia ser dissipada na forma de calor.

Na literatura podem ainda ser encontradas outras metodologias passivas com menor expressão e relevância, como por exemplo, *fixed shunt resistor*, *shunt resistor* e *complete shunting* [37], [38].

2.3. Metodologias de Balanceamento Ativas Baseadas em Condensadores

São várias as metodologias ativas baseadas em condensadores expostas na literatura. A Figura 2.3 ilustra uma de muitas, que se baseia na transferência de energia entre células adjacentes, designada como *switched capacitor* [35], [37]-[40]. Trata-se de uma metodologia *cell to cell* que recorre a $n - 1$ condensadores e a $2n$ interruptores para balancear n células constituintes do *pack*.

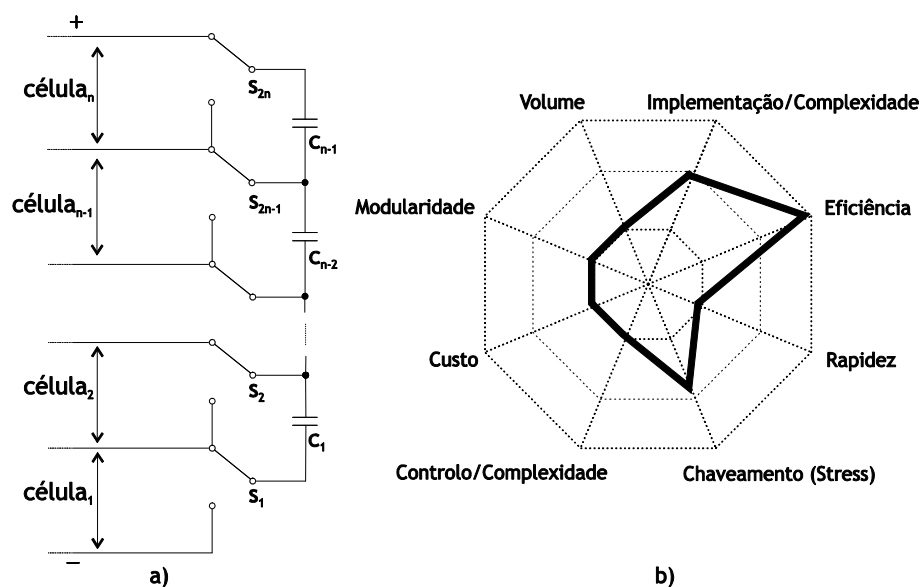


Figura 2.3: Metodologia de balanceamento *switched capacitor*: a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.

A aplicação desta metodologia pode ocorrer nos períodos inativos do *pack* assim como nos períodos de carregamento e descarregamento. Basicamente o BMS comuta os interruptores ciclicamente a uma frequência fixa e predefinida, carregando os condensadores através das células com maior tensão, disponibilizando a energia armazenada para as células com menor tensão. A principal desvantagem desta metodologia reside no elevado tempo de balanceamento, o qual é acentuado quando existem células desequilibradas nas extremidades do *pack*, uma vez que esta apenas permite transferência de energia entre células adjacentes. A principal vantagem desta metodologia é o facto de não exigir um controlo complexo.

Várias variantes podem ser encontradas para mitigar as desvantagens apresentadas, como por exemplo, a metodologia proposta em [41] designada por *chain structure of switched capacitor*. Esta introduz uma ligação adicional (condensador) entre as extremidades do *pack*.

Outra variante, frequentemente encontrada na literatura, é designada por *double tiered switched capacitor*, ilustrada na Figura 2.4 [35], [37]-[40]. Trata-se de uma metodologia *cell to cell* que recorre a $2n - 3$ condensadores e a $2n$ interruptores para balancear n células constituintes do *pack*. Esta possui um princípio de funcionamento semelhante à anterior, e tem como objetivo otimizar o tempo de balanceamento. Essa otimização é conseguida através da introdução de dois níveis de condensadores, possibilitando uma maior rapidez na transferência de energia entre células mais afastadas.

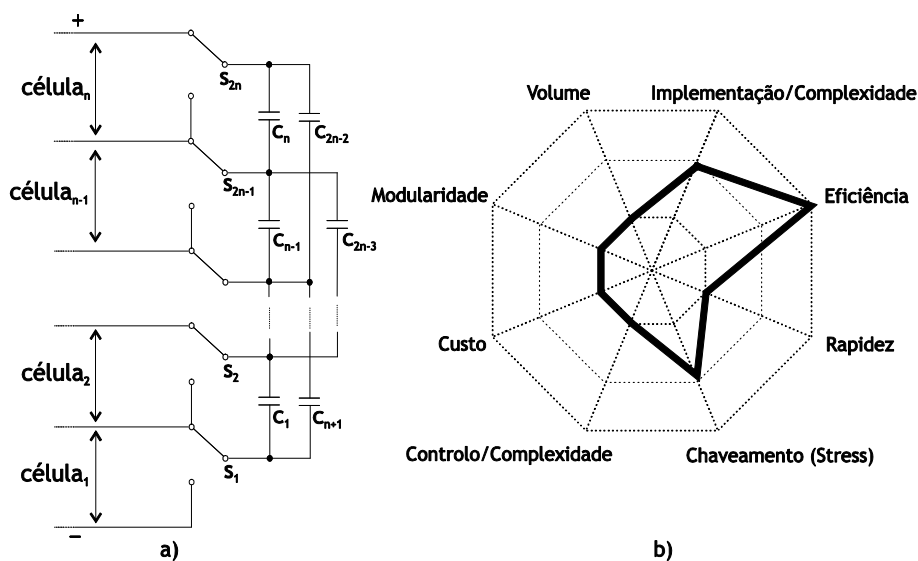


Figura 2.4: Metodologia de balanceamento *double tiered switched capacitor*: a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.

Uma outra metodologia existente na literatura é ilustrada na Figura 2.5, designada por *single switched capacitor* [35], [37]-[40]. É uma metodologia *cell to cell* que recorre a um único condensador e a $n + 5$ interruptores para balancear n células que constituem o *pack*. Também esta pode ser executada nos três períodos de funcionamento referidos anteriormente. A principal vantagem é o facto de permitir a transferência de energia entre células seletivamente.

Outro conceito apresentado na literatura, ilustrado na Figura 2.6, é designado como *series-parallel switched capacitor* [42]. Refere-se a uma metodologia *cell to cell* recorrendo a n condensadores e a $4n$ interruptores para balancear n células constituintes do *pack*. Pode ser executada nos períodos inativos e nos períodos de carregamento e descarregamento. Permite alterar a ligação dos condensadores de balanceamento colocando-os em série ou paralelo com a célula que tem maior tensão.

Em [43] os autores propõem uma outra metodologia, designada como *automatic switched capacitor* com o princípio de funcionamento semelhante à *double tiered switched capacitor* diferindo apenas na topologia.

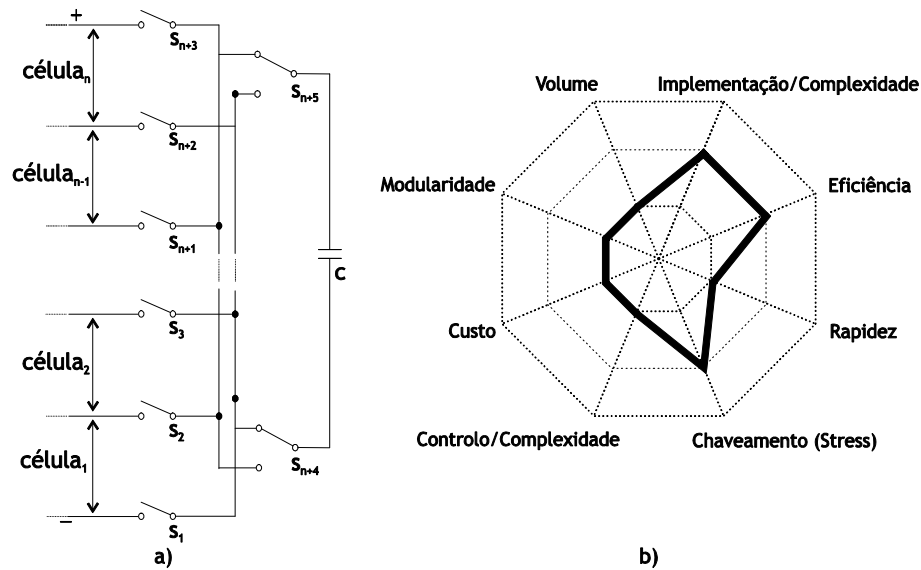


Figura 2.5: Metodologia de balanceamento *single switched capacitor*: a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.

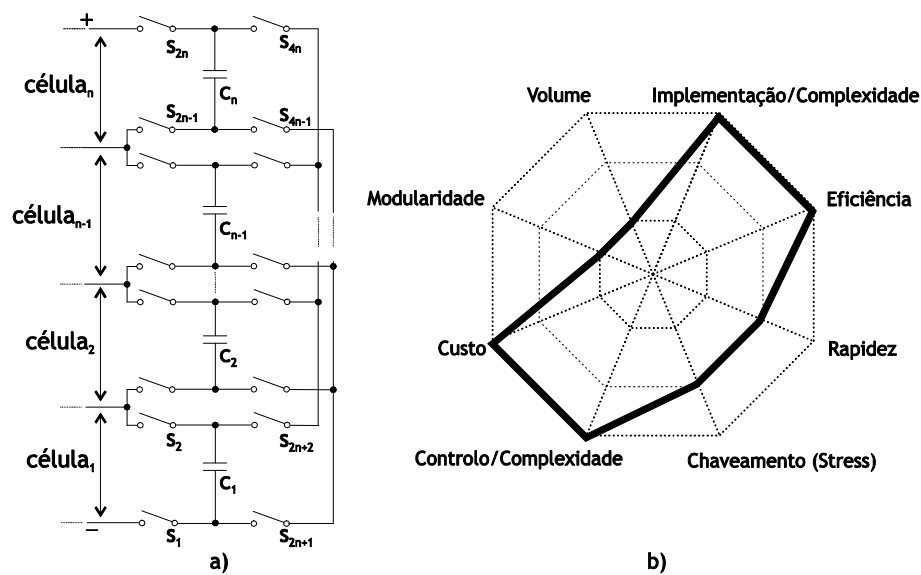


Figura 2.6: Metodologia de balanceamento *series-parallel switched capacitor*: a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.

Para concluir a revisão bibliográfica sobre metodologias ativas baseadas em condensadores, é ilustrada na Figura 2.7, a metodologia designada por *modularized switched capacitor* [35], [44]. Nesta o *pack* é dividido em m módulos sendo necessários $n - 1$ condensadores e $2n + 2m$ interruptores para balancear n células que constituem o *pack*.

Tal como nas anteriores este pode ser executado nos três períodos de funcionamento. A introdução de dois níveis de condensadores permite, no primeiro nível, uma transferência de energia *cell to cell* entre células adjacentes, e no segundo nível, uma transferência de energia entre módulos. Esta característica permite uma otimização do tempo de balanceamento.

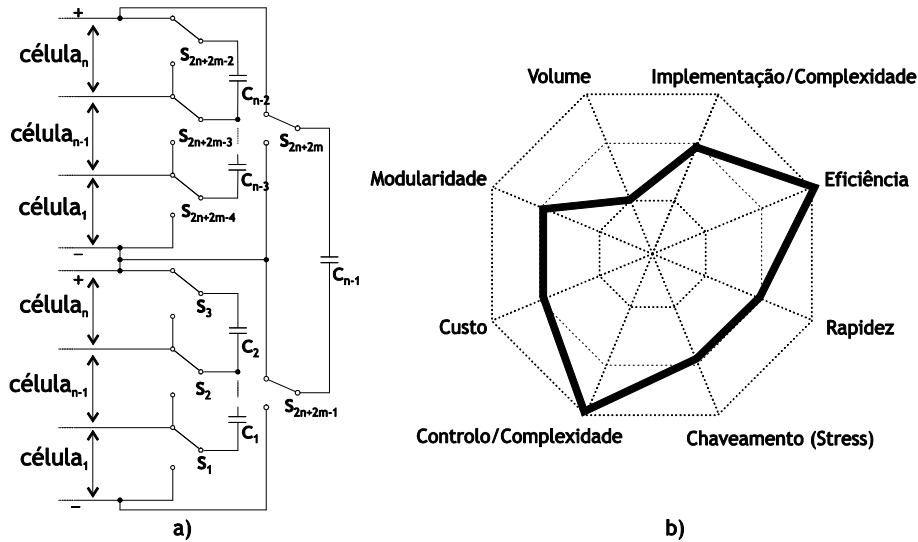


Figura 2.7: Metodologia de balanceamento *modularized switched capacitor*: a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.

2.4. Metodologias de Balanceamento Ativas Baseadas em Conversores Isolados

As metodologias de balanceamento ativas baseadas em conversores isolados baseiam-se nos princípios de funcionamento de conversores DC-DC isolados para realizar o balanceamento entre células.

Um exemplo deste tipo de metodologia é apresentado na Figura 2.8, designada como *multi-winding transformer* [37]-[39]. Esta recorre a um transformador com n secundários para balancear as n células constituintes do *pack*. Trata-se por isso de uma metodologia *pack to cell* que se baseia nos princípios de funcionamento do conversor DC-DC *flyback*. Ao ligar o interruptor S_1 a energia é extraída do *pack* e armazenada no enrolamento primário do transformador, sendo posteriormente distribuída pelos enrolamentos secundários.

Na literatura pode ainda ser encontrada uma outra variante, baseada nos princípios de funcionamento do conversor DC-DC *forward* [35], [45]. A alteração baseia-se na introdução de interruptores ao invés dos díodos. Possibilitando assim a transferência de energia em ambos os sentidos (*bidirecional*), isto é, *cell to pack to cell*.

Uma outra metodologia frequentemente encontrada na literatura consiste na utilização de múltiplos transformadores, denominada por *multiple transformer* [35], [37], ilustrada na Figura 2.9. Esta recorre a n transformadores e $n + 1$ interruptores para balancear n células constituintes do *pack*. O enrolamento secundário de cada transformador é ligado a cada célula do *pack* e o enrolamento primário ligado em paralelo. Trata-se de uma metodologia *pack to cell* que possibilita a transferência de energia seletivamente.

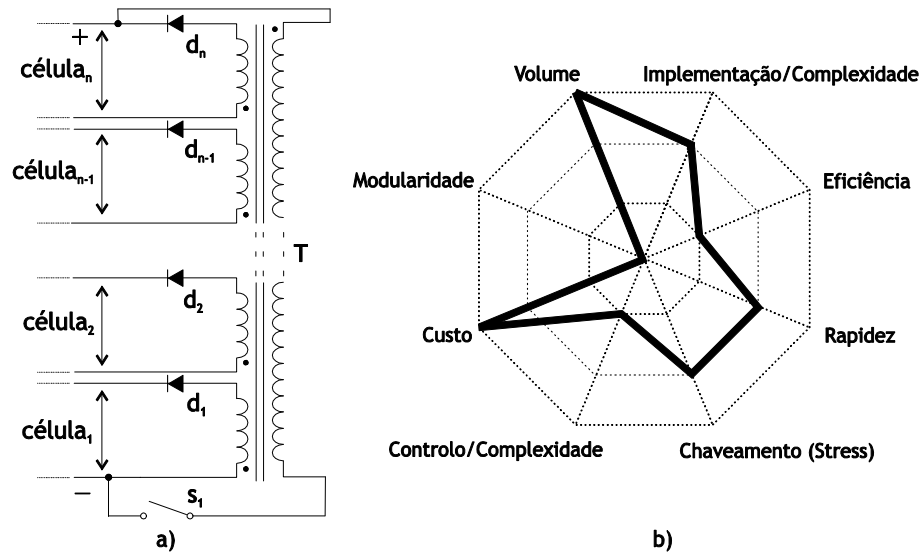


Figura 2.8: Metodologia de balanceamento *multi-winding transformer*: a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.

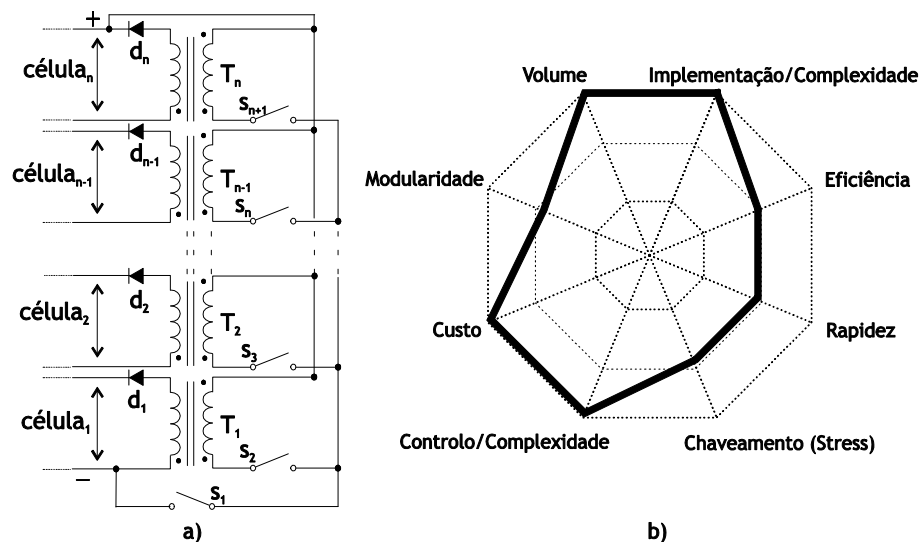


Figura 2.9: Metodologia de balanceamento *multiple transformer*: a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.

Também para esta metodologia são facilmente encontradas variantes, por exemplo em [44] os autores optam por modularizar o sistema, dividindo-o em pequenos módulos, associando a cada

módulo um transformador. Já em [46] é proposta uma topologia similar, em que os diodos são substituídos por interruptores, conseguindo assim uma transferência de energia bidirecional.

Outra metodologia descrita é apresentada na Figura 2.10, designada como *single switched transformer* [39]. Trata-se de uma metodologia *pack to cell* que recorre a um único transformador e a $4n + 1$ interruptores para balancear n células que constituem o *pack*. Na sua essência, o princípio de funcionamento é semelhante à metodologia anterior permitindo seletivamente direcionar a transferência de energia. Esta surge também na literatura como uma topologia *cell to pack*, possibilitando a transferência de energia da célula com maior energia para o *pack* [48].

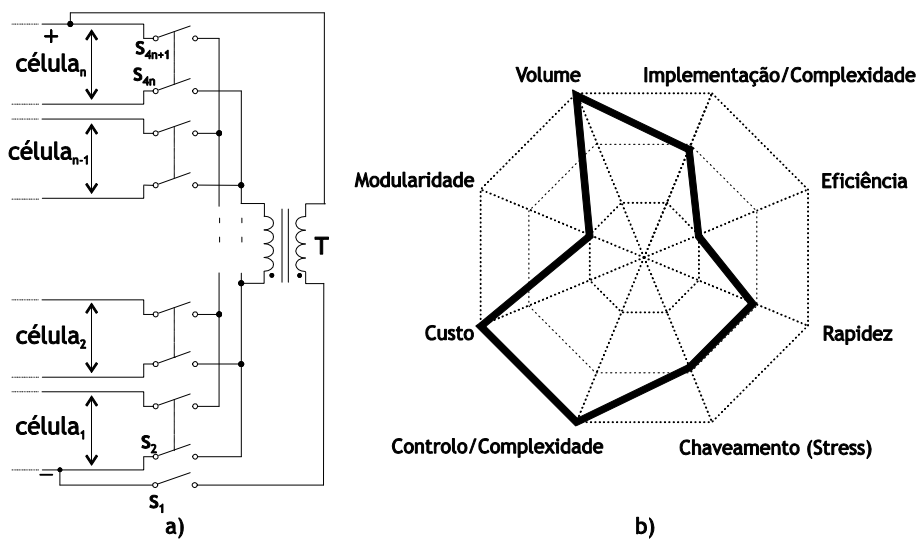


Figura 2.10: Metodologia de balanceamento *single switched transformer*: a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.

Para concluir a revisão bibliográfica sobre metodologias ativas baseadas em conversores isolados, é ilustrada na Figura 2.11 uma outra que recorre a um conversor DC-DC isolado *dual active bridge* (DAB) para cada célula que constitui o *pack* [49], [50]. A aplicação desta pode ser executada nos períodos inativos do *pack*, assim como nos períodos de carregamento e descarregamento, sendo que para tal são necessários n transformadores e $8n$ interruptores para balancear n células que constituem o *pack*. Os conversores DAB são interligados com um barramento *low voltage*, permitindo o fluxo de energia nos dois sentidos (bidirecional).

Todas as metodologias apresentadas nesta secção podem ser executadas nos períodos de carregamento, descarregamento e nos períodos inativos do *pack*, desde que sejam bidirecionais, ou seja, permitam a transferência de energia em ambos os sentidos. As metodologias unidirecionais apenas podem ser executadas no período de carregamento e nos períodos inativos do *pack*.

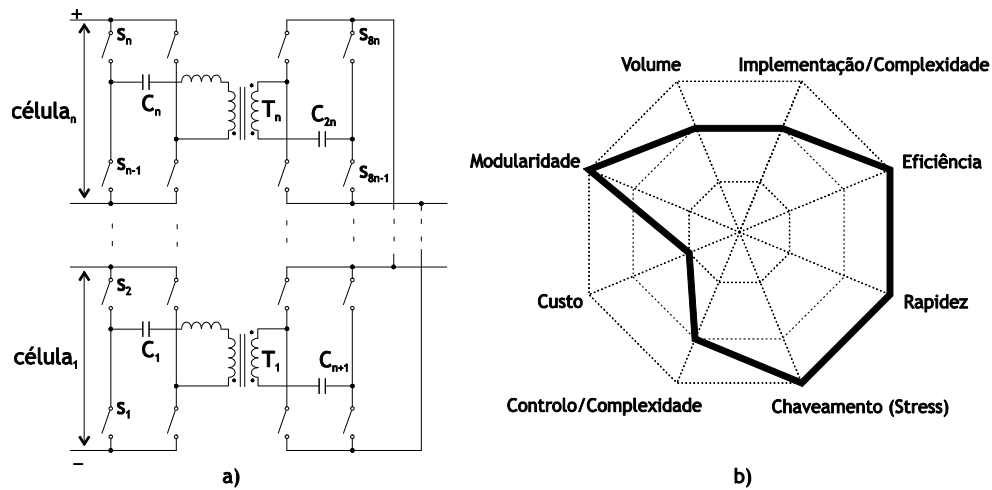


Figura 2.11: Metodologia de balanceamento com base no conversor DC-DC isolado *dual active bridge*: a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.

2.5. Metodologias de Balanceamento Ativas Baseadas em Conversores Não Isolados

As metodologias de balanceamento ativas baseadas em conversores não isolados são amplamente referenciadas na literatura e fundamentam-se nos princípios de funcionamento dos conversores DC-DC não isolados (como por exemplo, conversores *buck*, *boost*, *buck-boost*, *cuk*, entre outros) para realizar o balanceamento das células que constituem o *pack*.

Um exemplo deste tipo de metodologia é apresentado na Figura 2.12, que recorre a n conversores DC-DC *buck-boost* para balancear as n células que constituem o *pack* [35], [51]. A aplicação desta metodologia pode ser executada nos períodos de carregamento, descarregamento e inativos do *pack*, permitindo a transferência de energia em ambos os sentidos (bidirecional).

São diversas as variantes desta metodologia presentes na literatura, com maior ou menor complexidade. Em [52] o autor apresenta uma topologia unidirecional baseada igualmente nos princípios de funcionamento do conversor *buck-boost*, no entanto esta apresenta a desvantagem de apenas permitir a transferência de energia entre células adjacentes. Já em [53] os autores baseiam-se no conversor DC-DC *interleaved*. Trata-se de uma metodologia bidirecional sendo necessários $n - 1$ conversores em paralelo para balancear as n células que constituem o *pack*.

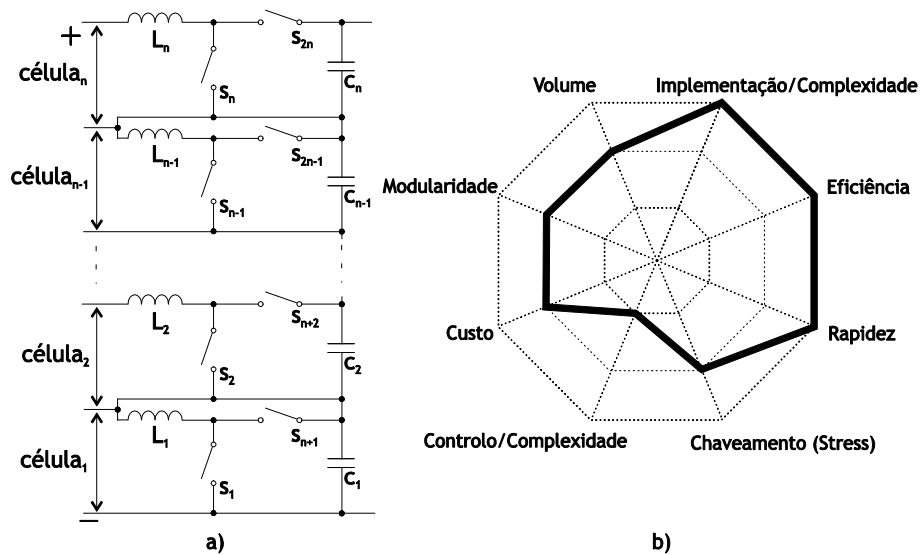


Figura 2.12: Metodologia de balanceamento com base no conversor DC-DC não isolado *buck boost*: a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.

Uma outra topologia existente é apresentada na Figura 2.13, baseia-se nos princípios de funcionamento do conversor DC-DC *cuk* [35], [47]. Refere-se a uma metodologia *cell to cell* que recorre a n condensadores e bobinas e $2n$ interruptores para balancear n células que constituem o *pack*. Quando comparada com a metodologia anteriormente apresentada tem a desvantagem de apenas permitir a transferência de energia entre células adjacentes.

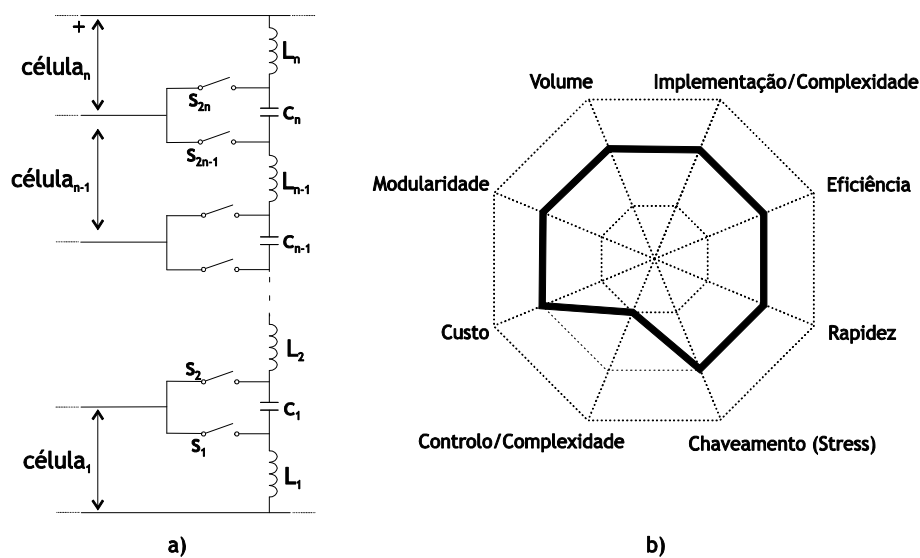


Figura 2.13: Metodologia de balanceamento com base no conversor DC-DC não isolado *cuk*: a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.

A Figura 2.14 introduz uma nova metodologia que se fundamenta no conversor DC-DC *full bridge* [35], [37], [54]. Na literatura alguns autores optam por modularizar o sistema dividindo o *pack* em pequenos módulos associando a cada módulo um transformador.

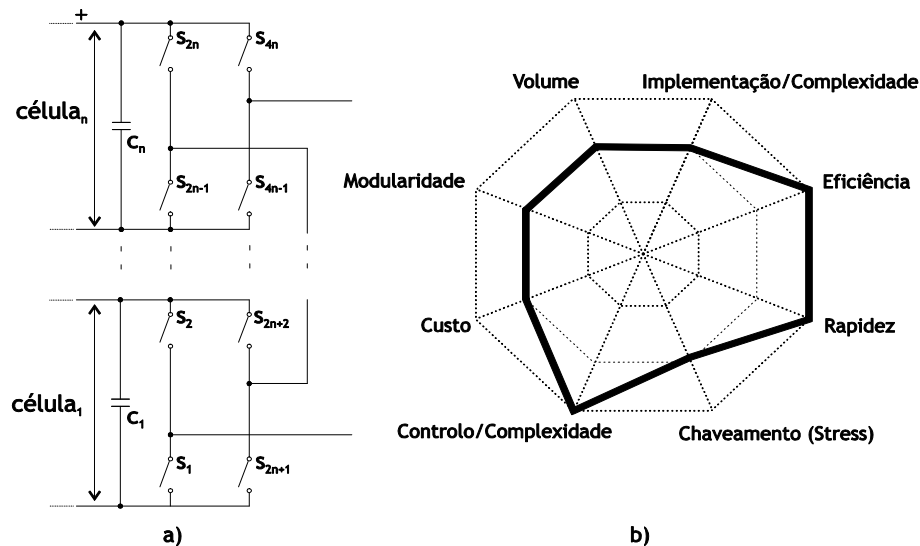


Figura 2.14: Metodologia de balanceamento com base no conversor DC-DC não isolado *full bridge*: a) Circuito equivalente; b) Propriedades da metodologia.

Outra tendência que vai surgindo na literatura consiste na utilização de topologias dinâmicas (reconfiguráveis). Em [55] os autores propõem uma topologia dinâmica que possibilita a derivação (*bypass*) das células, caso ocorra um desequilíbrio ou falha. Esta pode ser executada nos períodos de carregamento e de descarregamento do *pack*.

Ainda, uma outra variante consiste na reconfiguração das ligações do *pack* em tempo real. Por exemplo em [56] os autores propõem uma topologia que designam por *Dependable, Efficient, Scalable Architecture* (DESA) que possibilita uma reconfiguração *online* em função da carga.

Embora este tipo de metodologias sejam referidas na literatura como rápidas e eficientes, em termos de balanceamento, requerem um elevado número de interruptores que devem suportar correntes elevadas, o que aumenta exponencialmente o custo e tamanho, limitando assim a utilização deste tipo de metodologias a aplicações de baixa potência.

2.6. Resumo e Conclusões

Esta secção tem como objetivo permitir uma melhor compreensão dos vários métodos de balanceamento existentes na literatura, as suas vantagens e desvantagens. Ajuda também a perceber qual a metodologia mais adequada para este trabalho, tendo em conta os recursos disponíveis e o facto de se estar a trabalhar com *packs* com um elevado número de células em série. A Figura 2.15 compara as principais características das várias metodologias de balanceamento existentes.

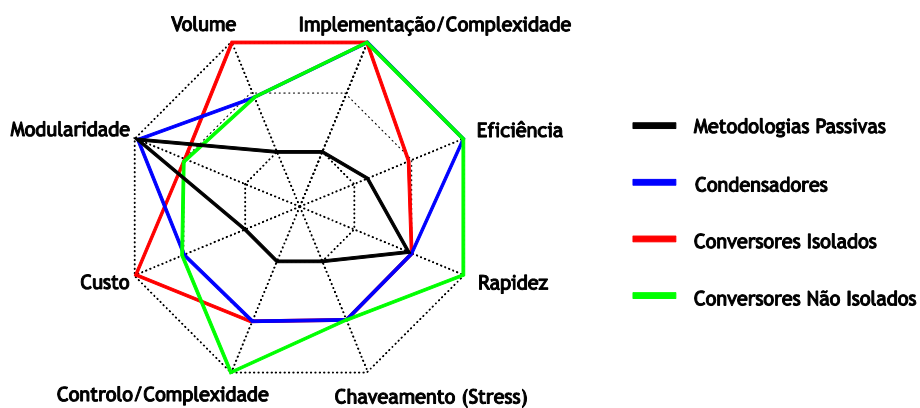


Figura 2.15: Diagrama comparativo das várias metodologias de balanceamento.

Após a análise das vantagens e desvantagens de cada uma das metodologias apresentadas e considerando o objetivo e limitações presentes neste projeto, a metodologia escolhida foi a *switched shunt resistor*. A sua seleção deveu-se ao facto de esta oferecer uma boa relação entre os vários parâmetros analisados e também porque para *packs* com um elevado número de células em série as metodologias ativas possuem a desvantagem de requererem um elevado custo de implementação e grandes dimensões.

Capítulo 3

Métodos de Carregamento

Este capítulo tem como objetivo exibir os vários métodos de carregamento existentes na literatura. Estes podem ser divididos em três grandes grupos, sendo que todos os restantes métodos derivam desses.

3.1. Introdução

Podemos encontrar na literatura diversos métodos de carregamento, com diferentes tipos de abordagens. Assim pode-se dividir os métodos de carregamento em três grandes grupos [57], [58], uma vez que todas as variantes apresentadas na literatura derivam destes:

- Método de carregamento Corrente Constante/Tensão Constante (CC/CV);
- Método de carregamento *Multistage* (MSCC);
- Método de carregamento pulsado.

3.2. Método de Carregamento Corrente Constante/Tensão Constante (CC/CV)

O método de carregamento CC/CV é amplamente referenciado na literatura devido à sua facilidade de implementação. Este método é caracterizado por três fases de implementação, como ilustrado na Figura 3.1. A primeira fase de implementação, denominada como *trickle charge* (TC), poderá ou não ocorrer no processo de carregamento. Tem como função elevar a tensão da célula até ao valor crítico ($V_{trickle}$), no caso desta se encontrar abaixo do mesmo. Nesta situação a célula deve ser carregada com uma corrente reduzida ($I_{trickle}$), com um valor típico de $0.1C$, em que C representa a capacidade nominal da célula [57]. Assim que o valor da tensão ultrapasse o $V_{trickle}$, o algoritmo comuta para a segunda fase do carregamento.

Na segunda fase de implementação, denominada como *constant current* (CC), a célula é sujeita a um período de carregamento a corrente constante, tal como o nome indica. O valor de corrente de carregamento (I_{charge}) pode variar entre $0.5C$ e $3.2C$, dependendo das especificações da célula em questão [57]. Quando o valor da tensão atinge o valor V_{charge} , o algoritmo comuta para a terceira e última fase de carregamento.

Nesta última fase, denominada como *constant voltage (CV)*, o algoritmo impõe um período de tensão constante à célula e a corrente decresce gradualmente. Esta fase termina quando a corrente de carregamento atinge um valor pré-definido (I_{min}), tipicamente $0.1C$, ou quando o tempo máximo de carregamento é excedido [57], [59].

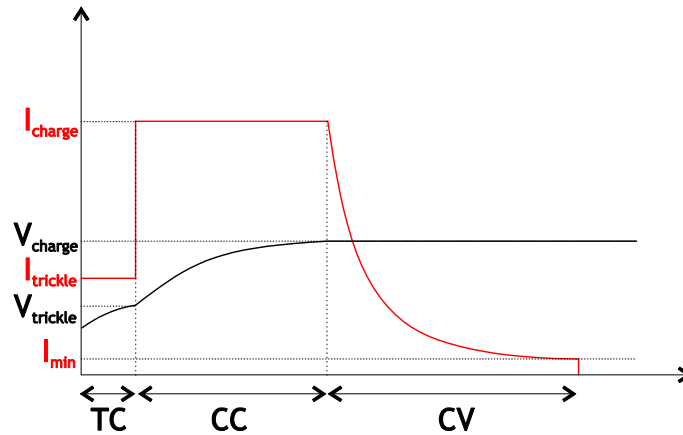


Figura 3.1: Método de carregamento Corrente Constante/Tensão Constante.

Para mitigar os problemas que este método apresenta, nomeadamente o tempo de carregamento, existem na literatura diversas propostas, como o *double-loop control charger (DL-CC/CV)* [57], o qual utiliza uma realimentação positiva e negativa e o *boost charger (BC-CC/CV)* [57], [60], [61], que utiliza um *boost* no início do carregamento, permitindo uma grande quantidade de energia armazenada num curto período de tempo. Existem duas outras topologias em que são usados métodos de controlo para implementar o algoritmo CC/CV. Uma das referidas topologias utiliza a lógica *Fuzzy (FL-CC/CV)* [57] e a outra o controlo *grey-predicated (GP-CC/CV)* [57], [62], [63]. Outra topologia baseada nos princípios de funcionamento do controlo *phase-locked loop (PLL-CC/CV)* é proposta em [57].

3.3. Método de Carregamento *Multistage (MSCC)*

O método de carregamento *Multistage* caracteriza-se pela utilização de diversos estágios de corrente de carregamento. Na Figura 3.2 é ilustrado um exemplo com 5 estágios de corrente.

A utilização deste método de carregamento levanta três questões, a primeira consiste na identificação do critério utilizado na transição de estágios de corrente, a segunda relativa à determinação da corrente ótima para cada estágio e a última no número ótimo de estágios definidos. O critério de transição entre estágios mais utilizado na literatura consiste no critério ilustrado na Figura 3.2, em que ocorre a mudança de estágio assim que a tensão da célula atinge a tensão V_{charge} [57].

Já relativamente à segunda questão, vários autores optam por algoritmos de otimização com o objetivo de obter a corrente de carregamento ótima para cada estágio. Por exemplo, em [64], [65] é utilizado o algoritmo de otimização PSO (*Particle Swarm Optimization*) e controladores *Fuzzy* para determinar os estágios ótimos que devem ser aplicados a cada instante de tempo, em que a função de aptidão depende do tempo de carregamento e da capacidade da célula. Relativamente à questão de qual o número ótimo de estágios de corrente, em [66] é realizado um estudo que indica o valor 5 como sendo o valor ótimo.

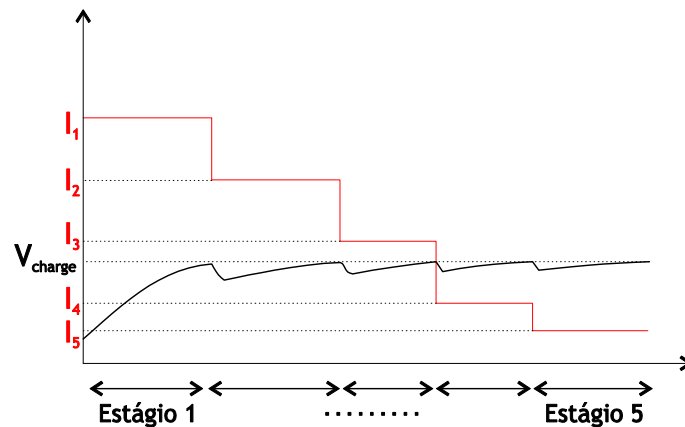


Figura 3.2: Método de carregamento *Multistage*.

Em [66] é proposto um método de carregamento *Multistage* em que o último estágio é realizado a tensão constante, com base na programação linear inteira para determinar o perfil ótimo de carregamento. De acordo com os resultados experimentais, o algoritmo proposto consegue uma redução no tempo de carregamento que varia entre 11.5% (com 4 estágios de corrente) e 18.27% (com 20 estágios de corrente) quando comparado com o algoritmo CC/CV.

Já em [67] é proposto um método de carregamento com 4 estágios de corrente baseado no método de *Taguchi* para determinar o perfil ótimo de carregamento. De acordo com os resultados experimentais, o algoritmo proposto consegue uma redução no tempo de carregamento de 22.5% quando comparado com o algoritmo CC/CV.

3.4. Método de Carregamento Pulsado

O método de carregamento pulsado, como o próprio nome indica, caracteriza-se pela utilização de corrente de carregamento pulsada, podendo ser subdividido em duas metodologias distintas, *variable frequency pulse charge* (VFPC) e *variable duty pulse current* (VDPC) [57], [68].

A ideia básica do VFPC é a de otimizar a frequência do pulso de corrente, minimizando a impedância da célula e conseqüentemente, maximizar a transferência de energia. Já a VDPC

maximiza a transferência de energia através de duas abordagens distintas, ou variando a amplitude do pulso através da fixação da largura do mesmo ou vice-versa.

Em [69] é proposto um método de carregamento VFPC composto por três modos de operação, *full charge detect mode* (FCDM), *search mode* (SM) e *charge mode* (CM), ilustrado na Figura 3.3 a). Resumidamente, o algoritmo inicia a sua operação no modo FCDM detetando o estado da célula, para tal é aplicada à célula uma tensão constante para monitorizar a corrente de carregamento. Concluída esta fase, o algoritmo comuta para o modo de operação SM. Neste, o algoritmo irá descobrir qual a frequência ótima, ou seja, a frequência para a qual a impedância interna da célula é mínima e por isso a corrente de carregamento é máxima. Assim que a frequência ótima é encontrada, o algoritmo entra no modo de operação CM, carregando a célula com a corrente de carregamento obtida. Este processo é repetido até que a célula se encontre totalmente carregada. De acordo com os resultados experimentais, o algoritmo proposto quando comparado com o algoritmo CC/CV consegue uma redução no tempo de carregamento de cerca de 24%.

Em [70] o autor propõe um método semelhante ao anterior mas baseado no VDPC, ilustrado na Figura 3.3 b). De acordo com os resultados experimentais, o algoritmo proposto quando comparado com o algoritmo CC/CV consegue uma redução de tempo de cerca de 3.4%.

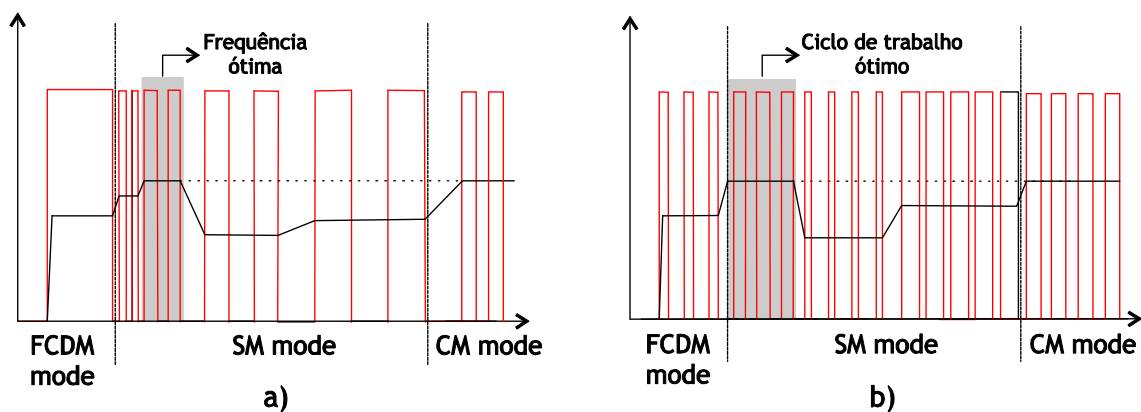


Figura 3.3: Método de carregamento pulsado: a) VFPC; b) VDPC.

Em [25] é proposto o método *sinusoidal-ripple-current charging* que se fundamenta também na minimização da impedância interna da célula, conseguindo assim a maximização da energia transferida. Tal como o nome indica, o perfil de corrente de carregamento utilizado é sinusoidal.

Ainda em [26] os autores propõem um outro método baseado no facto de à frequência ótima, o declive da curva tensão-frequência ser zero. Assim através de incrementos/decrementos na frequência, é encontrada a frequência ótima e iniciado o processo de carregamento.

3.5. Resumo e Conclusões

Esta secção apresenta uma análise dos vários métodos de carregamento existentes na literatura, bem como as suas variantes. Apresentam-se as características, vantagens e desvantagens de cada método. É também relevante acrescentar que na literatura são poucas as metodologias que integram o carregamento e o balanceamento, sendo que é bastante mais complexo desenvolver metodologias de carregamento com balanceamento para um *pack* de n células. A Figura 3.4 compara as principais características das várias metodologias de carregamento existentes.

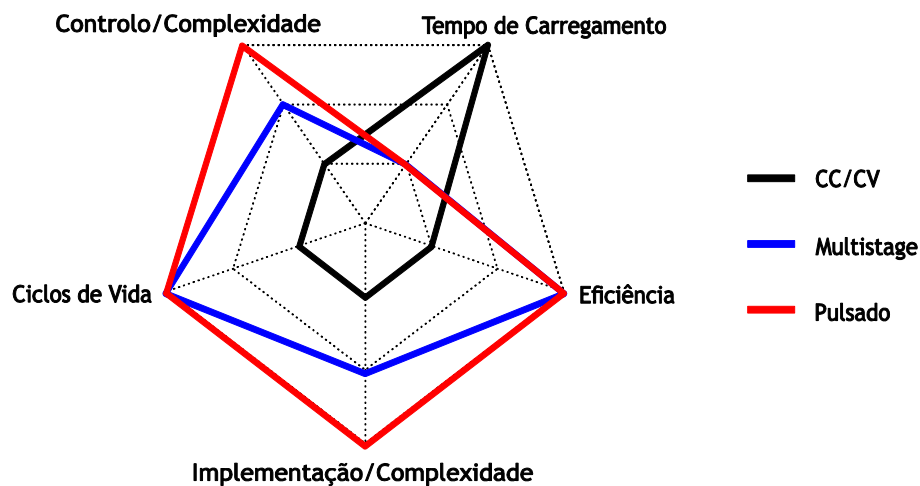


Figura 3.4: Diagrama comparativo dos vários métodos de carregamento.

Após a análise dos vários métodos de carregamento é possível comprovar que o método *Multistage* é o que apresenta melhor relação entre a eficiência, simplicidade de controlo e implementação, ciclos de vida das baterias e tempo de carregamento. Já o método de carregamento pulsado apresenta uma maior complexidade de controlo e implementação.

Importa ainda referir que após a revisão bibliográfica referente às metodologias de balanceamento e métodos de carregamento torna-se evidente a necessidade de estudar e desenvolver novos métodos de carregamento que incorporem metodologias de balanceamento para um *pack* com n células.

Capítulo 4

Hardware Desenvolvido

Neste capítulo é apresentado o hardware desenvolvido no decorrer deste trabalho. Este é, primeiramente, descrito de um modo genérico, focando o sistema como um todo. De seguida é exposto de forma detalhada cada bloco constituinte do sistema.

4.1. Introdução

A Figura 4.1 apresenta uma representação por blocos do hardware proposto para o desenvolvimento de novos métodos de carregamento que incluam as metodologias de balanceamento. Esta arquitetura pode ser dividida em três blocos fundamentais:

- Unidade de controlo e processamento;
- Unidade de aquisição e balanceamento;
- Unidade de potência.

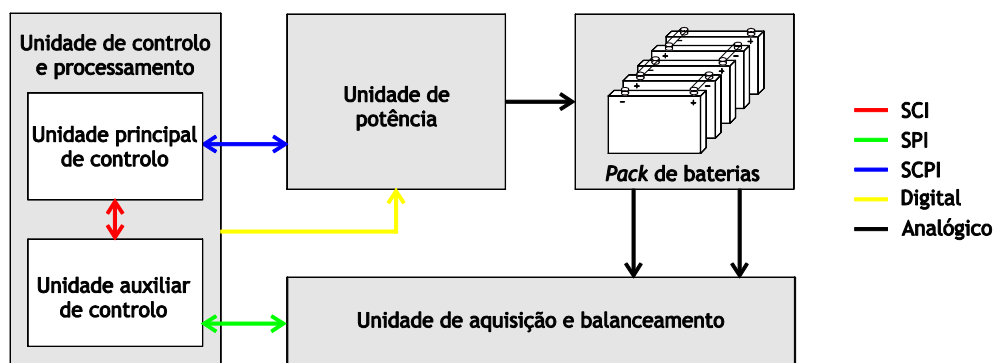


Figura 4.1: Representação em blocos da topologia utilizada.

4.2. Unidade de Controlo e Processamento

A unidade de controlo e processamento é composta por uma arquitetura centralizada que pode ser subdividida em dois subsistemas. Um dos referidos subsistemas é formado pela unidade principal de controlo, a qual se baseia no *software Matlab*. Esta escolha permite uma maior rapidez e flexibilidade no desenvolvimento de novos métodos de carregamento que integrem metodologias de balanceamento.

O outro subsistema pertencente à unidade de controlo e processamento é composto pelo microcontrolador TMS320F28069 da *Texas Instruments* (unidade auxiliar de controlo). É um microcontrolador de 32 bits de vírgula flutuante, capaz de realizar tarefas matemáticas complexas, uma vez que possibilita o processamento em paralelo. Possui uma frequência de *clock* de 90MHz, com uma memória RAM de 100kb e ROM de 2kb e ainda uma memória flash de 256kb. Dispõe ainda de 16 canais PWM, 16 canais de ADC com 12 bits e de protocolos de comunicação I²C, USB, CAN, SCI e SPI.

A unidade auxiliar proporciona uma maior versatilidade na interligação da unidade principal de controlo (*Matlab*) com as restantes unidades, recorrendo-se para tal das quatro *Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter* (USART) que o microcontrolador disponibiliza.

A unidade principal de controlo comunica diretamente com o sistema de potência (fonte programável DC SL 500-5.2 da *Magna-Power Electronics*) através do protocolo de comunicação série assíncrono *Standard Commands for Programmable Instruments* (SCPI). Todas as restantes comunicações são realizadas para o sistema auxiliar de controlo através do protocolo de comunicação série assíncrono RS-232.

4.3. Unidade de Aquisição e Balanceamento

A escolha para a unidade de aquisição e balanceamento recaiu no dispositivo ISL94212 da *Intersil* o qual possibilita a sua ligação em cadeia até a um máximo de 14 dispositivos, suportando sistemas até 168SnP (168 células em série e n células em paralelo), assim como extensas funções de monitorização. Cada dispositivo é capaz de monitorizar 12 células.

A Figura 4.2 apresenta o sistema implementado neste trabalho, o qual possibilita a monitorização e controlo de um sistema 24SnP. Para este trabalho foi implementado um sistema 24S1P perfazendo uma potência nominal de aproximadamente 230W/h.

A posição de cada dispositivo na cadeia é definida pelas entradas COMMS SELECT 1 e COMMS SELECT 2 de cada dispositivo, em que o dispositivo principal ocupa a primeira posição da cadeia, funcionando como mestre para fins de comunicação. Este dispositivo comunica com a unidade

de controlo e processamento através do sistema auxiliar de controlo, recorrendo para tal ao protocolo de comunicação SPI.

Entre dispositivos, as comunicações em cadeia são realizadas com recurso a um protocolo de comunicação proprietário bidirecional com acoplamento AC, cuja taxa de transmissão é definida pelas entradas COMMS RATE 0 e COMMS RATE 1 de cada dispositivo.

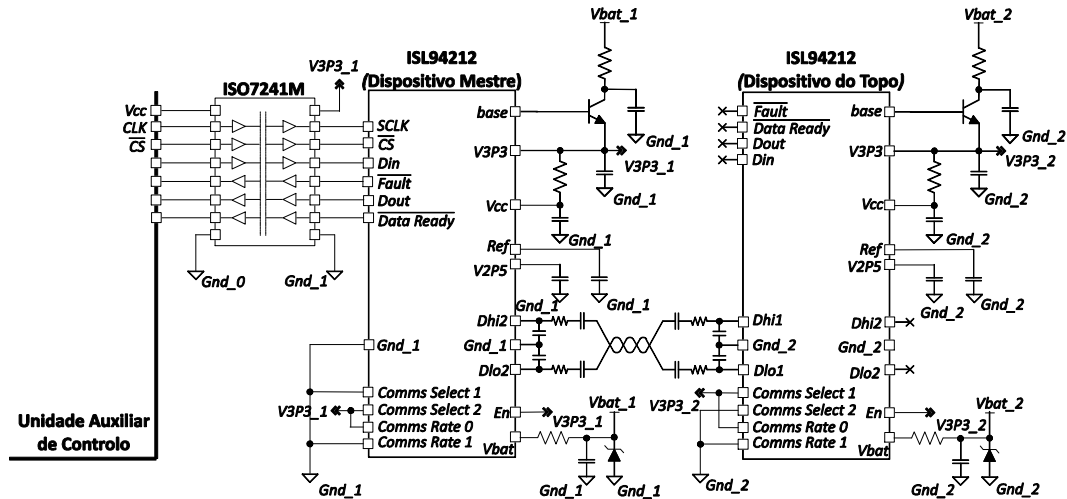


Figura 4.2: Circuito elétrico dos dispositivos ISL94212 que formam a cadeia.

Todas as comunicações em cadeia são transmitidas de dispositivo para dispositivo, de tal forma que todos recebam a mesma informação, decodificando a mensagem e respondendo conforme solicitado.

As comunicações provenientes do sistema auxiliar de controlo são redirecionadas pelo dispositivo mestre (dispositivo que ocupa a primeira posição da cadeia) para o barramento com a inclusão de N_d clocks, sendo N_d o número de dispositivos que formam a cadeia. O último dispositivo, caso não seja o dispositivo endereçado, ou caso, lhe seja solicitado um pedido de escrita, responde com um *Acknowledge* (ACK) com a inclusão de N_d clocks. Caso este seja o dispositivo endereçado e lhe seja solicitado um pedido de leitura, responde com os dados solicitados com a inclusão de N_d clocks.

Por outro lado, os dispositivos endereçados, que não se situem no topo da cadeia, esperam pela resposta do dispositivo a montante (ACK) para disponibilizarem os dados no barramento caso lhe seja solicitado um pedido de leitura. Se lhe for solicitado um pedido de escrita, este responde com um ACK.

Importa ainda salientar que todas as comunicações entre o dispositivo mestre e o sistema auxiliar de controlo utilizam um *Cyclic Redundary Check* (CRC) de 4 bits cuja forma polinomial é de $1 + x + x^4$.

A Figura 4.3 ilustra um exemplo de comunicação entre o sistema auxiliar de controlo e uma cadeia formada por 3 dispositivos. Neste exemplo é solicitado ao dispositivo intermédio um pedido de leitura.

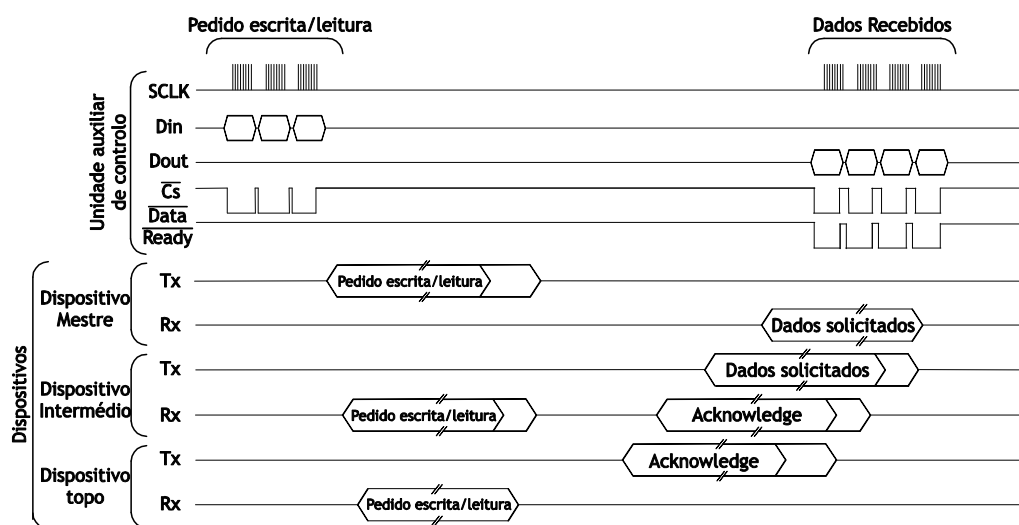


Figura 4.3: Exemplo de comunicação entre 3 dispositivos.

Outra característica do dispositivo ISL94212 é a possibilidade e facilidade de, recorrendo a circuitos externos, implementar metodologias de balanceamento, como ilustrado na Figura 4.4. Para tal o dispositivo disponibiliza conversores analógicos digitais (ADC) para monitorizar quer a tensão da cadeia, com uma resolução de $\pm 180\text{mV}$, quer a tensão individual de cada célula, com uma resolução de $\pm 10\text{mV}$. O dispositivo possui também saídas dedicadas para a ativação / desativação dos interruptores (*Mosfet*) necessários para a realização de metodologias de balanceamento.

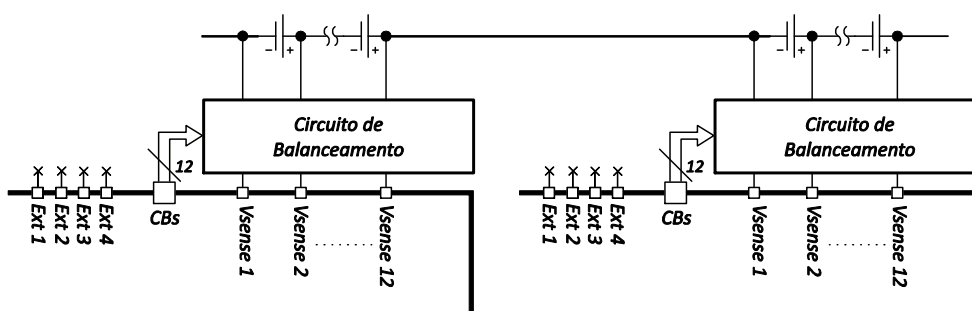


Figura 4.4: Representação do circuito de balanceamento.

Para uma montagem em que se utilize a metodologia de balanceamento passiva *switched shunt resistor*, descrita detalhadamente no Capítulo 2, o dispositivo, através da programação dos seus registos internos, disponibiliza três modos de operação, o *timed mode*, o *auto balance mode* e o *manual mode*.

No modo de operação *timed mode* é a unidade principal de controlo que define a duração do balanceamento (intervalo compreendido entre 33 segundos e 42.5 minutos) assim como o início do balanceamento das células. No *manual mode* a unidade principal de controlo define o início e o fim do período de balanceamento das células. Para finalizar, no *auto balance mode* o dispositivo executa o balanceamento autonomamente de forma inteligente, em função do estado de carga no instante de tempo k , do estado de carga pretendido, da impedância do circuito de balanceamento e do tempo de amostragem.

A Figura 4.5 ilustra com detalhe o sistema de balanceamento utilizado neste trabalho, tratando-se da metodologia de balanceamento passiva *switched shunt resistor*. Para esta montagem foi utilizada uma resistência de balanceamento.

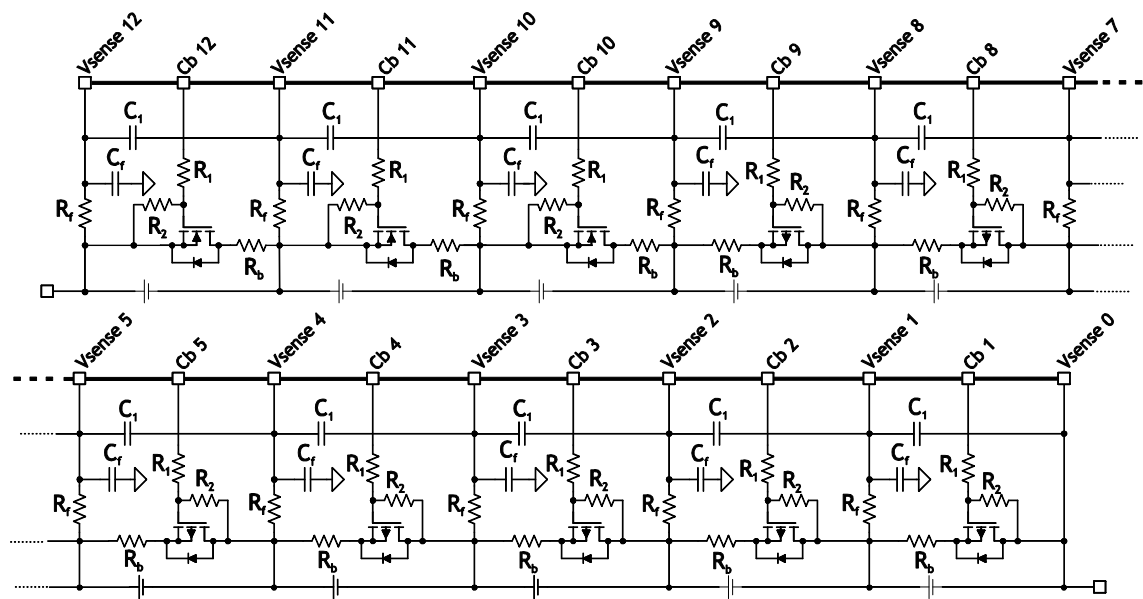


Figura 4.5: Representação detalhada do circuito de balanceamento implementado ($C_f = 22\text{nF}$, $C_1 = 10\text{nF}$, $R_f = 1\text{k}\Omega$, $R_1 = 330\text{k}\Omega$, $R_2 = 10\text{k}\Omega$, $R_b = 33\Omega$).

Uma vez que o dispositivo ISL94212 apenas permite a monitorização de quatro sensores de temperatura, implementou-se o sistema ilustrado na Figura 4.6. Este possibilita a leitura das temperaturas das células de modo mais preciso (1 sensor por cada 2 células). Tendo em conta as limitações da unidade auxiliar de controlo que apenas disponibiliza 16 portas analógicas, recorreu-se ao *multiplexer* analógico CD74HC4067.

O valor da temperatura é extrapolado usando a equação de *Steinhart-Hart* recorrendo ao termistor NTC de 10k *Ultimate Thinness* da *Semitec*.

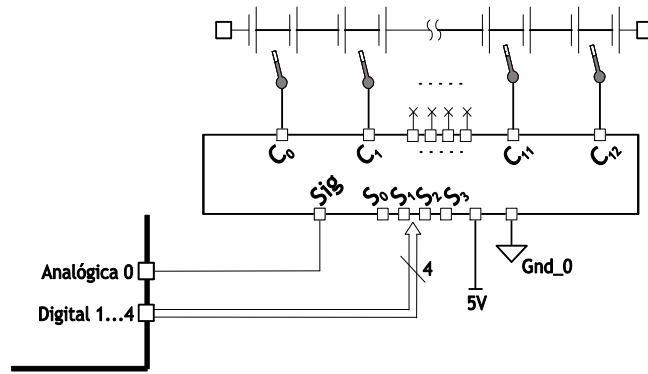


Figura 4.6: Representação do circuito de monitorização de temperatura implementado.

4.4. Unidade de Potência

A Figura 4.7 ilustra a unidade de potência implementada neste trabalho. Esta baseia-se fundamentalmente na fonte programável DC SL 500-5.2, a qual comunica diretamente com a unidade principal de controlo através do protocolo de comunicação SCPI.

Para garantir o fluxo de corrente apenas num sentido, foi introduzido na unidade de potência um diodo cuja queda de tensão é compensada através das entradas V_{sense} da fonte programável.

Já com o objetivo de tornar possível a implementação de métodos de carregamento baseados no VFPC e no VDPC, descritos no Capítulo 3, introduziu-se o interruptor (*Mosfet*) cujo sistema de disparo é ilustrado na Figura 4.7. Trata-se de um sistema de disparo isolado baseado no acoplador ótico TLP152, que permite obter uma frequência de comutação máxima de 250kHz.

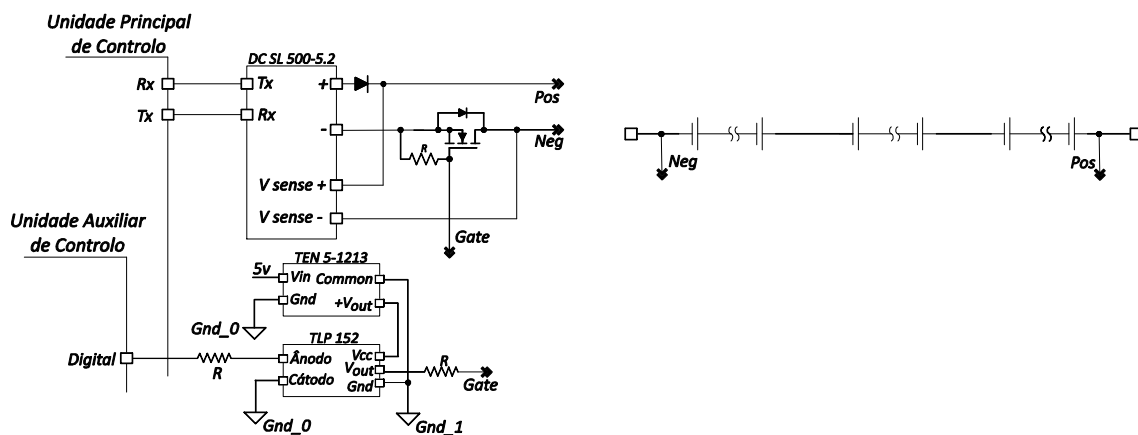


Figura 4.7: Representação do circuito de potência implementado.

Capítulo 5

Software Desenvolvido

Neste capítulo é descrito o software desenvolvido neste trabalho. Este é dividido na unidade principal de controlo e na unidade auxiliar de controlo. Através das duas plataformas é efetuado todo o controlo e processamento do sistema.

5.1. Introdução

Todos os algoritmos implementados na unidade auxiliar de controlo foram realizados no *Code Composer Studio* versão 6 da *Texas Instruments* em linguagem C. Optou-se por dividir o algoritmo implementado em funções, de modo a tornar-se mais intuitivo e de fácil compreensão. Por outro lado, os algoritmos implementados na unidade principal de controlo foram desenvolvidos em ambiente de programação *Matlab*. Optou-se por apresentar o fluxograma principal, algoritmo implementado na unidade principal de controlo, em quatro segmentos. Esta opção deve-se ao facto de este ser extenso, possibilitando-se assim uma melhor compreensão com uma análise por segmentos.

5.2. Unidade Auxiliar de Controlo

O fluxograma, ilustrado na Figura 5.1, representa o algoritmo implementado no microcontrolador. Este é constituído por um programa principal, em que numa primeira fase, são inicializadas todas as variáveis, configurados os periféricos utilizados, os módulos de comunicação série SPI e SCI e todas as interrupções.

Finalizadas as configurações iniciais, o algoritmo entra em *loop* infinito, aguardando pela trama de comunicações proveniente da unidade principal de controlo através do protocolo de comunicação SCI. O primeiro byte da trama é interpretado pela unidade auxiliar, tendo como função desencadear uma das cinco funções disponíveis.

O programa é ainda composto por duas rotinas de interrupções. A rotina de interrupção SCI associada ao módulo de comunicação SCI, responsável pela leitura da trama de comunicações provenientes da unidade principal de controlo. Já a rotina de interrupção SPI, é uma rotina de

interrupção por *hardware*, associada ao flanco descendente da GPIO20. A entrada GPIO20 é configurada como entrada associada à saída do dispositivo mestre (*data ready*), indicando que os dados estão disponíveis.

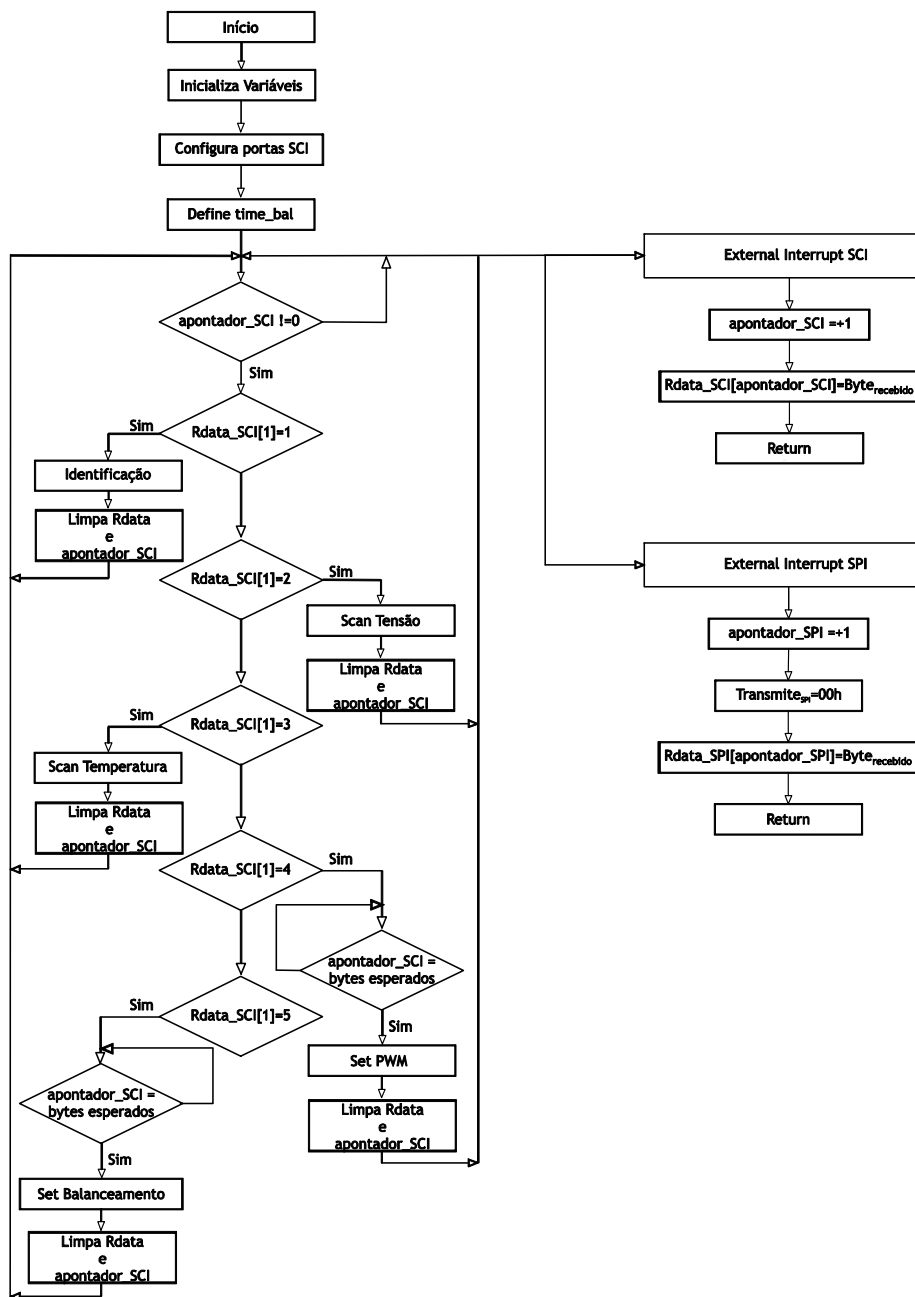


Figura 5.1: Fluxograma do programa implementado na unidade auxiliar de controle.

A Tabela 5.1 apresenta uma breve descrição das funções implementadas, assim como, a dimensão da trama de comunicações proveniente da unidade principal de controle. É também indicado qual o byte de comando que desencadeia cada uma das funções.

Tabela 5.1: Breve descrição das funções implementadas na unidade auxiliar de controlo.

Função	Dimensão da trama	Byte de comando	Descrição
Identificação	1	01h	Responsável por identificar o número de dispositivos usados
Scan Tensão	1	02h	Responsável pela leitura das tensões nas células
Scan Temperatura	1	03h	Responsável pela leitura das temperaturas nas células
Set PWM	7	04h	Responsável pela definição da frequência e do ciclo de trabalho
Set Balanceamento	8 (por dispositivo)	05h	Responsável pela seleção das células e do tempo de balanceamento

5.2.1. Função Identificação

A função identificação é responsável pela identificação do número de dispositivos e a sua posição na cadeia (dispositivos ISL94212). Resumidamente, este procedimento é inicializado transmitindo através do protocolo de comunicação SPI uma trama de 3 bytes (trama 1) para o dispositivo mestre. Assim que o dispositivo é endereçado, este responde com uma trama formada por 4 bytes (trama 2), a qual indica que o processo foi realizado com sucesso (ACK, bits [23:28]), assim como a sua posição na cadeia (bits [17:18]). Os bits [17:18] correspondem às entradas COMMS SELECT 1 e COMMS SELECT 2.

Recebida a resposta do dispositivo esta é decodificada e verificada através do CRC, permitindo concluir se o processo foi realizado com sucesso. Este processo é repetido para cada dispositivo, atribuindo diferentes endereços a cada dispositivo. O processo é concluído quando os bits [17:18] da trama recebida contiverem o valor 10b, o que significa que o dispositivo endereçado se encontra no topo da cadeia, não existindo mais dispositivos. Quando o dispositivo do topo da cadeia é identificado, o processo é concluído atribuindo 3Fh para o registo de endereçamento (trama 3).

Esta rotina devolve à unidade principal de controlo um byte que representa o número de dispositivos que formam a cadeia. A Figura 5.2 ilustra a função identificação implementada, bem como exemplos das tramas de comunicações referidas anteriormente.

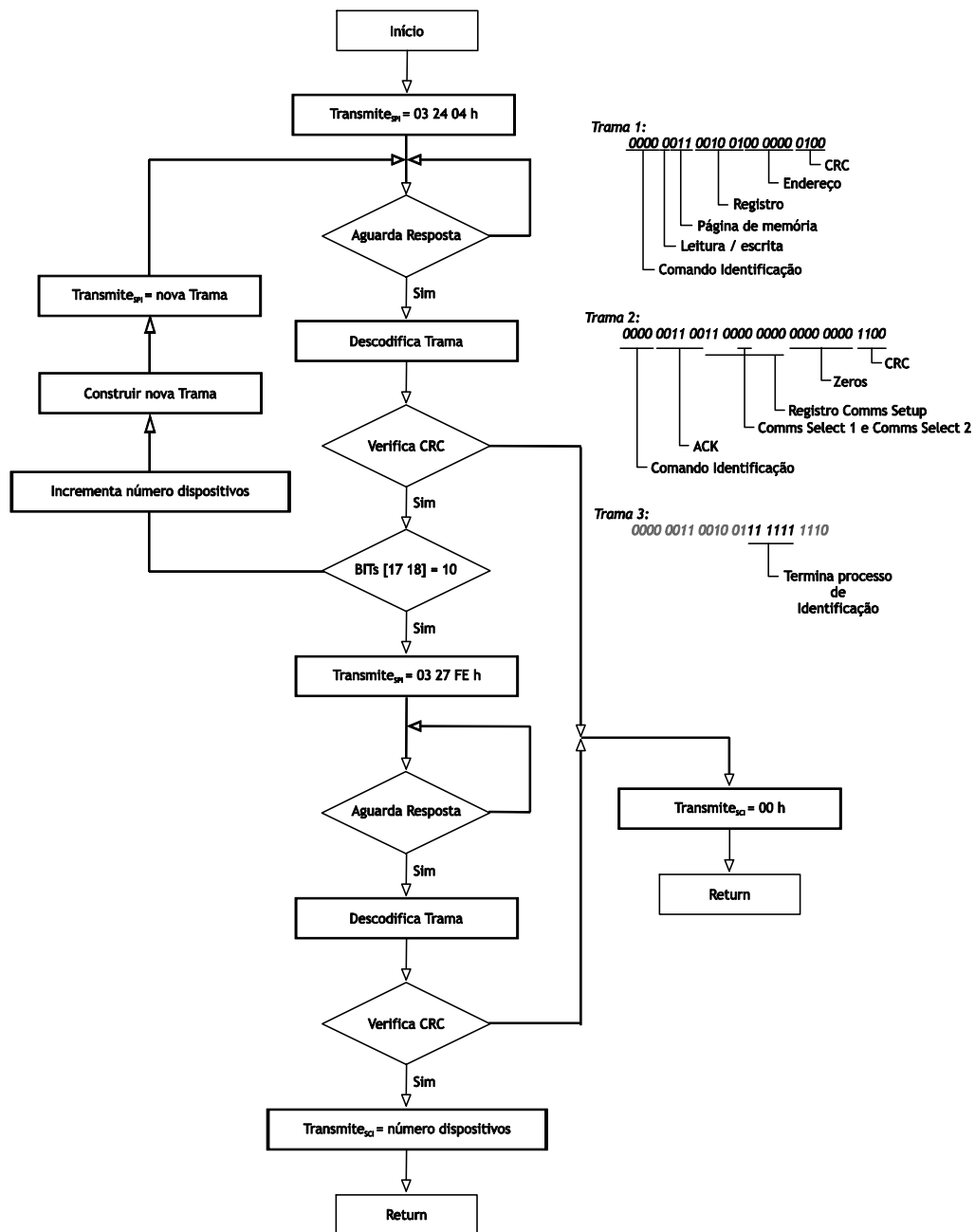


Figura 5.2: Fluxograma da função identificação implementada.

5.2.2. Função Scan Tensão

A função *scan* tensão é responsável pela leitura das tensões das células que constituem o *pack* de baterias. Este processo é inicializado, novamente, transmitindo uma trama formada por 3 bytes (trama 1), solicitando a obtenção do valor das leituras. Estas correspondem a uma trama de comunicações de 40 bytes (trama 2).

Assim que a trama é recebida, esta é direcionada para a unidade principal de controlo devolvendo 40 bytes por cada dispositivo que forma a cadeia. A Figura 5.3 ilustra a função *scan* tensão implementada, assim como exemplos das tramas de comunicações.

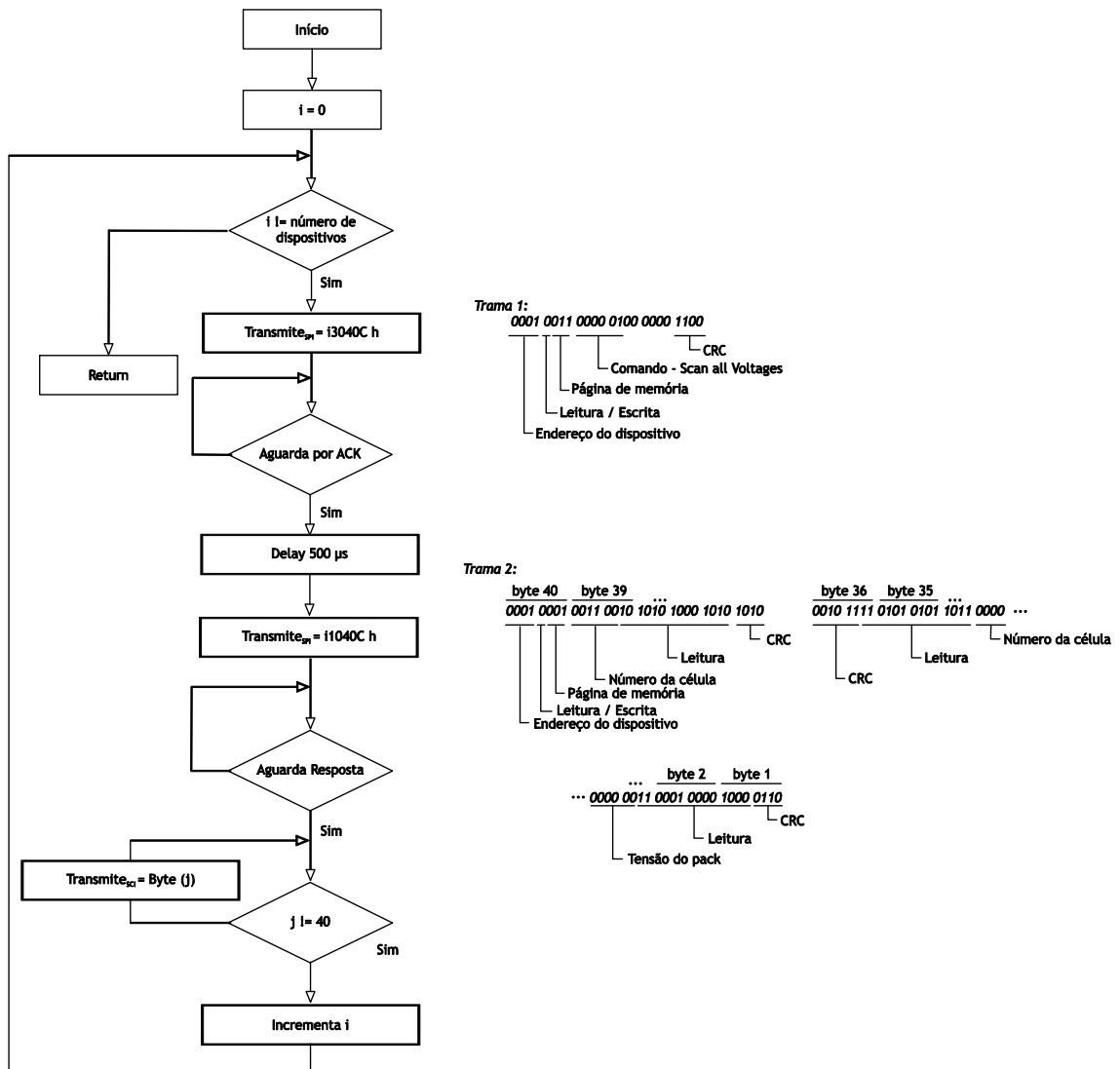


Figura 5.3: Fluxograma da função *scan* tensão implementada.

5.2.3. Função *Scan* Temperatura

A função *scan* temperatura é responsável pela obtenção da temperatura das células que constituem o *pack*. Ciclicamente este processo seleciona o canal de leitura desejado através das entradas S1, S2, S3 e S4 do *multiplexer* analógico CD74HC4067. Uma vez selecionado o canal desejado, é forçada a leitura da unidade auxiliar de controlo. Devido ao facto de se tratar de um ADC de 12 bits, o valor da conversão é decomposto numa trama de 2 bytes e direccionada para a unidade principal de controlo através do protocolo de comunicação série SCI.

Este processo é repetido para todos os dispositivos presentes na cadeia, devolvendo à unidade principal de controlo 24 bytes por cada dispositivo. A Figura 5.4 ilustra a função *scan* temperatura implementada assim como um exemplo da trama de comunicação.

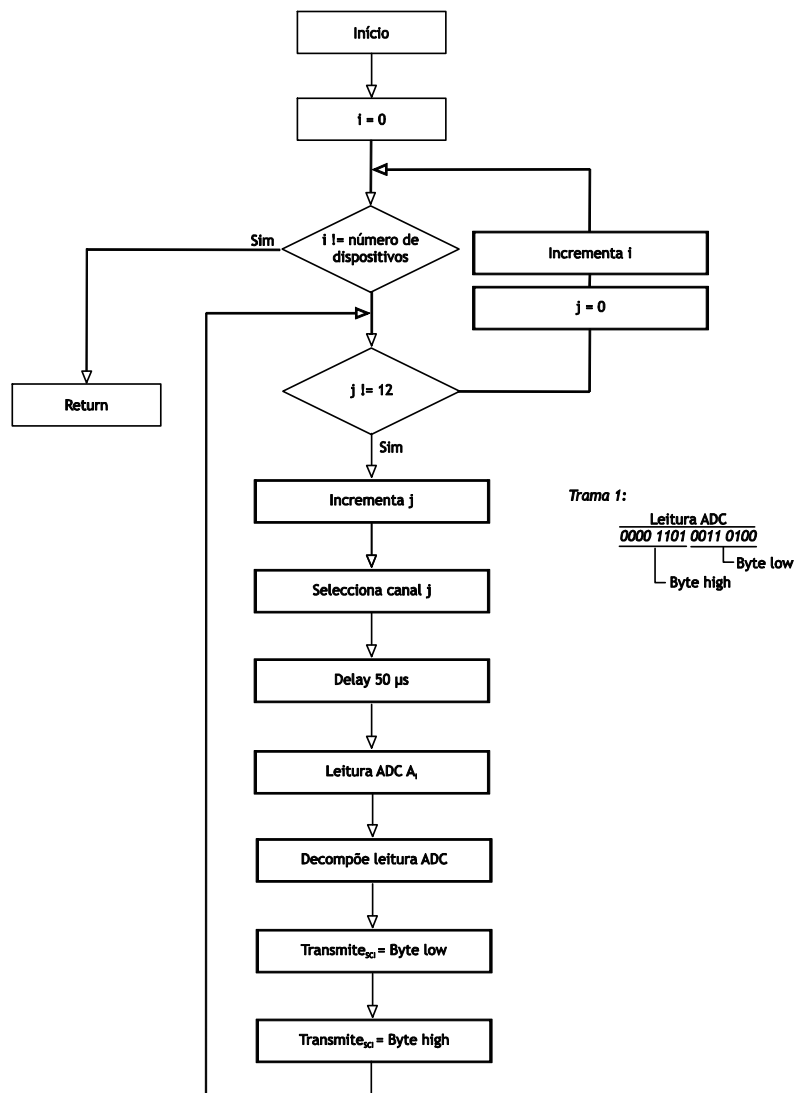


Figura 5.4: Fluxograma da função *scan* temperatura implementada.

5.2.4. Função *Set* PWM

Outra função implementada neste trabalho refere-se à função *set* PWM. Esta é responsável pela configuração da frequência e do ciclo de trabalho da unidade de potência. A função *set* PWM é inicializada assim que a unidade auxiliar de controlo recebe uma trama de comunicações formada por 7 bytes provenientes da unidade principal de controlo.

A trama é constituída pelos valores dos registos *Time-Base Period Register* (TBPRD), *Time-Base Control Register* (TBCTL) e *Counter-Compare A Register* (CCPA) do módulo ePWM. Os registos apresentados são necessários para definir a frequência e o ciclo de trabalho desejados. A Figura 5.5 ilustra a função *set* PWM implementada assim como um exemplo da trama de comunicação.

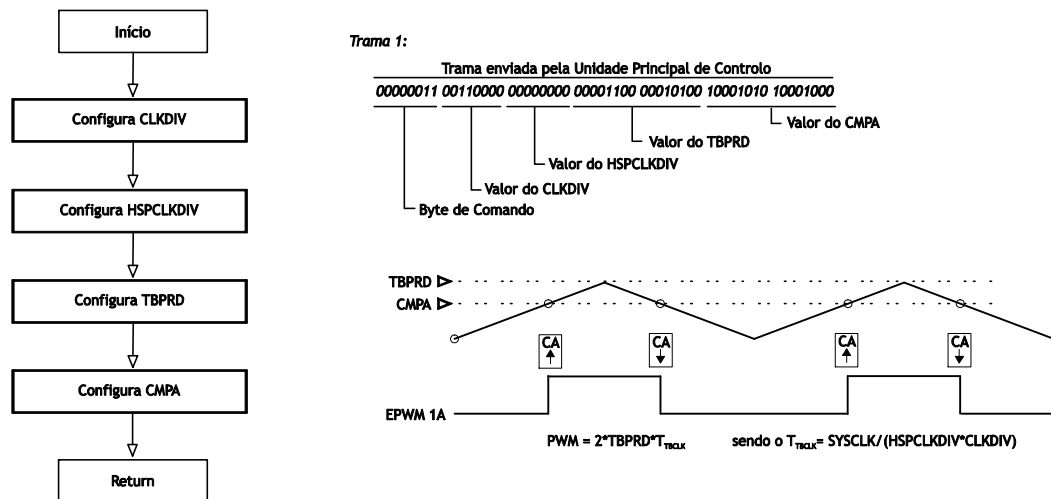


Figura 5.5: Fluxograma da função set PWM implementada.

5.2.5. Função Set Balanceamento

Por último, a função set balanceamento é responsável pela definição do tempo de duração do processo de balanceamento e pela definição das células a balancear. O processo é inicializado com uma trama de 8 bytes por dispositivo, provenientes da unidade principal de controle. Esta é formada pelos valores dos registos *Balance Time Register* e *Balance Status Register*.

Resumidamente, a função é iniciada configurando o registo *Balance Setup Register* (trama 1) do dispositivo x , o qual irá definir o modo de balanceamento como *Time Mode*. Assim que o dispositivo x é endereçado, responde com uma trama de 4 bytes (ACK) indicando que o processo foi realizado com sucesso. De seguida é configurado o registo *Balance Time Register* com a duração do processo de balanceamento.

Assim que o processo é realizado com sucesso é configurado o registo *Balance Status Register* que irá definir quais as células do dispositivo x sujeitas a balanceamento.

Após a configuração ser concluída com sucesso, o processo de balanceamento é iniciado através do comando *Enable*. Este processo é repetido para todos os dispositivos que formam o *pack* de baterias. A Figura 5.6 ilustra a função set balanceamento implementada assim como exemplos das tramas de comunicação.

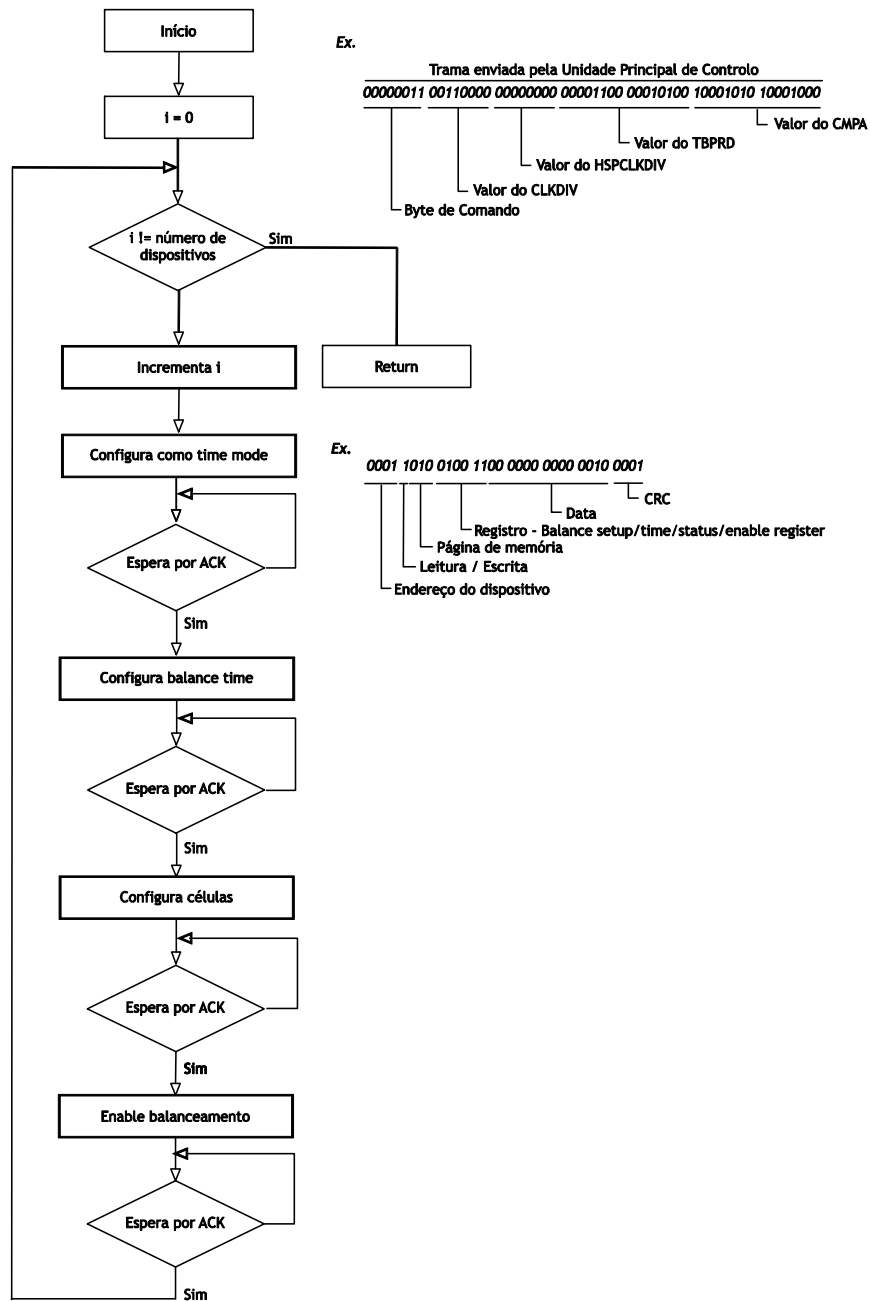


Figura 5.6: Fluxograma da função *set balanceamento* implementada.

5.3. Unidade Principal de Controlo

O primeiro segmento do fluxograma do algoritmo implementado na unidade principal de controlo, ilustrado na Figura 5.7, é responsável pelas configurações iniciais, assim como pela requisição à unidade auxiliar de controlo do número de dispositivos presente na cadeia (dispositivos ISL94212).

Inicialmente são definidas todas as variáveis, configuradas as portas de comunicação SCI e definido o tempo de duração do processo de balanceamento ($time_{bal}$). Após concluídas as

tarefas referidas anteriormente, é enviado o byte de comando (01h) responsável por desencadear a função identificação na unidade auxiliar de controlo. Sabendo que esta rotina devolve um byte que corresponde ao número de dispositivos presentes na cadeia, a unidade principal de controlo aguarda pela resposta da unidade auxiliar de controlo.

Caso a resposta seja diferente de 0, o algoritmo prossegue para o segundo segmento do algoritmo. Caso contrário, o algoritmo realiza mais duas tentativas. Se o número máximo de tentativas for alcançado é apresentada uma mensagem de erro e interrompido o processo.

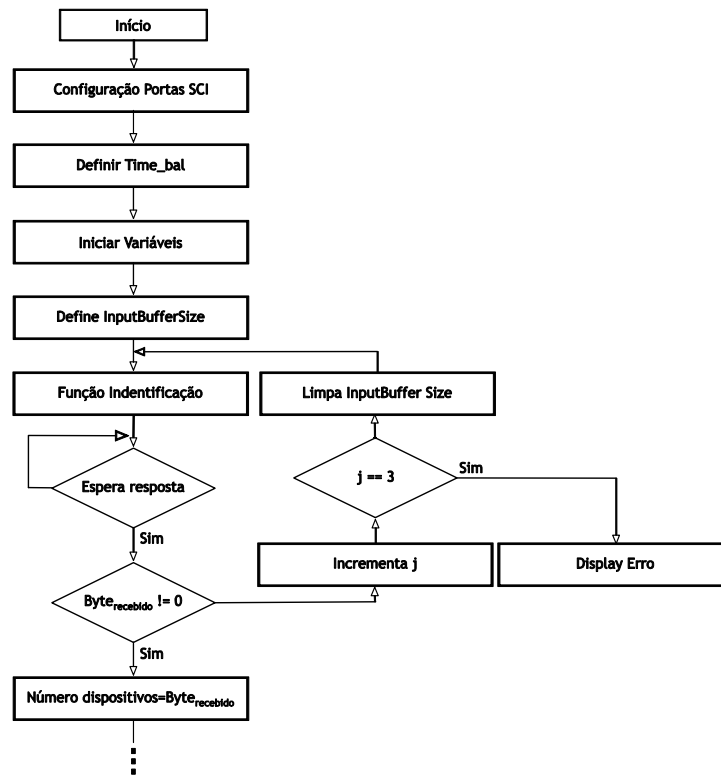


Figura 5.7: Fluxograma do algoritmo implementado - Primeiro segmento.

O segundo segmento do algoritmo, ilustrado na Figura 5.8, inicialmente é responsável pela aquisição das tensões e temperaturas das células do *pack*. Para tal é enviado o byte de comando 02h com o objetivo de desencadear a função *scan* tensão na unidade auxiliar de controlo. A dimensão do *buffer* de entrada da porta SCI é definido como 40 bytes por cada dispositivo.

Realizada a aquisição das tensões, o algoritmo, envia o byte de comando 03h o qual vai ativar a função *scan* temperatura. Nesta situação, a dimensão do *buffer* de entrada da porta SCI é definido como 24 bytes por cada dispositivo.

Terminadas as leituras iniciais, o algoritmo entra em ciclo infinito até que os critérios de paragem selecionados, explicados detalhadamente no Capítulo 6, sejam verificados. Quando esta situação ocorre, o algoritmo comunica com a unidade de potência (fonte programável DC

SL 500-5.2) através do protocolo de comunicação SCPI, com o comando STOP. Caso os critérios de paragem não se verifiquem o algoritmo transita para o terceiro segmento.

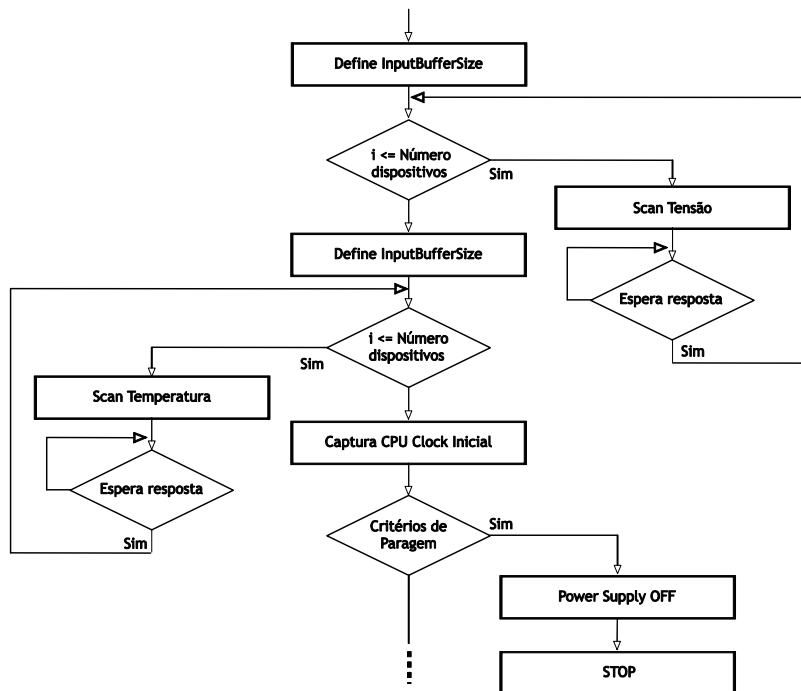


Figura 5.8: Fluxograma do algoritmo implementado - Segundo segmento.

O terceiro segmento do algoritmo, ilustrado na Figura 5.9, começa por impor à unidade de potência a tensão com o valor de $4.2 * 12 * N_d$, em que a variável N_d representa o número de dispositivos ISL94212 presentes na cadeia.

De seguida, o algoritmo escolhe qual o método de carregamento desenvolvido a executar. Optou-se por utilizar um fluxograma genérico, comum a todos os métodos desenvolvidos, de modo a tornar o algoritmo mais perceptível. O algoritmo apresentado (quatro segmentos) está conceptualmente correto para todos os algoritmos desenvolvidos, sendo apenas necessárias pequenas alterações, não justificando assim a inclusão de todo o fluxograma para cada um deles.

Uma vez que o balanceamento das células influencia as leituras das tensões, foi criado um desfasamento de 5 segundos entre a duração do processo de balanceamento (definido como 1 minuto) e a aquisição dos valores. Deste modo, a aquisição das leituras das tensões das células é realizada com uma frequência definida por $1/time_{bal} + 5$. Obtidas as tensões das células, é desencadeada a função *scan* temperatura com o objetivo de adquirir as temperaturas. Com todos os processos de leitura finalizados, o algoritmo transita para o quarto e último segmento.

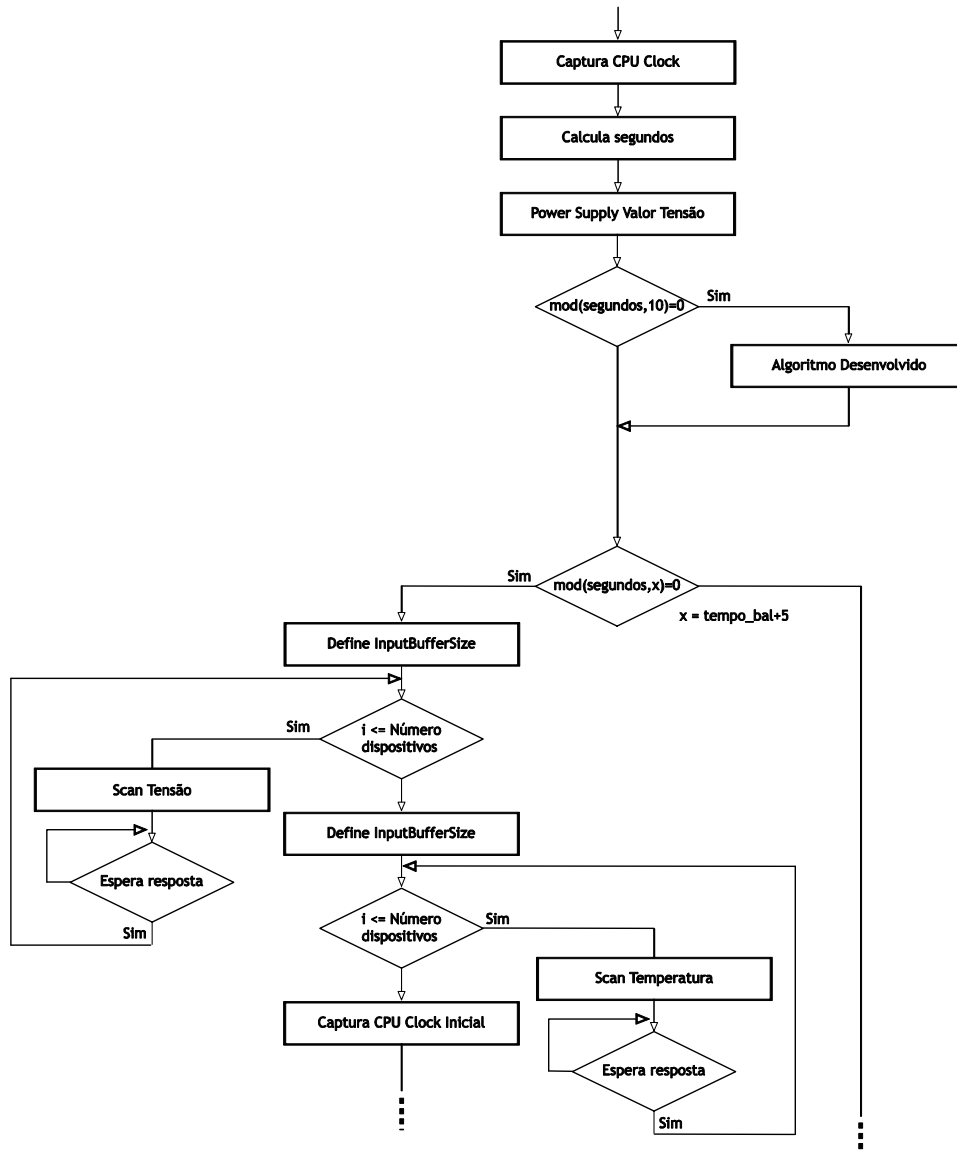


Figura 5.9: Fluxograma do algoritmo implementado - Terceiro segmento.

Por último, o quarto segmento, ilustrado na Figura 5.10, é responsável pela determinação de quais as células que se pretende balancear. Para tal é formado um vetor linha com dimensão $12 * N_d$. Este é formado com os valores um e zero, caso se verifiquem, ou não, as condições de balanceamento previamente definidas, explicadas em detalhe no Capítulo 6.

Formado o vetor, o algoritmo prossegue para as funções Get Balance Time Register e Get Balance Status Register, cuja descrição dos algoritmos adjacentes será detalhada no decorrer do capítulo. Estas funções devolvem 4 bytes por cada dispositivo. Assim que estes bytes são determinados, é contruída a trama de comunicações e transmitida para a unidade auxiliar de controlo.

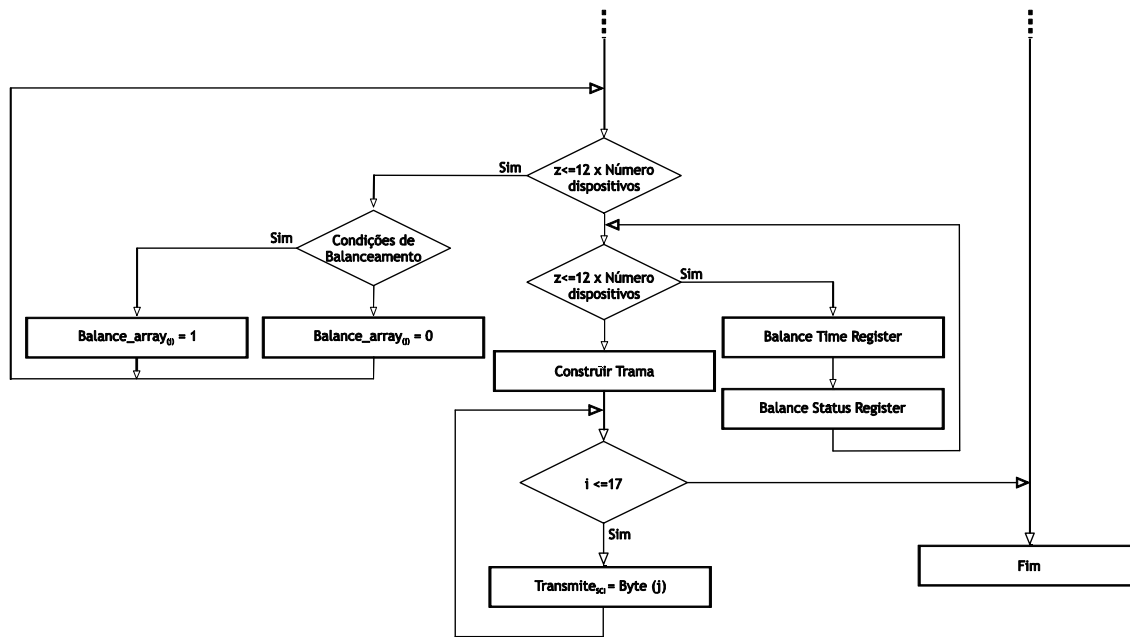


Figura 5.10: Fluxograma do algoritmo implementado - Quarto segmento.

5.3.1. Função *Get Trama Balance Time Register*

O processo de balanceamento pode ser configurado com uma duração que pode variar entre os 0.33 e os 42.33 minutos. Este tempo pode ser selecionado através dos bits [14:8] do registo *Balance Time Register* de cada dispositivo.

Inicialmente, o algoritmo determina o número de vezes em que o $time_{bal}$ é divisível por 0.33 minutos (base temporal). Uma vez determinada a operação, esta é convertida para binário e realizada a concatenação dos bytes. Para finalizar, é calculado o CRC. Este processo é repetido para todos os dispositivos presentes na cadeia, devolvendo 4 bytes por cada dispositivo.

5.3.2. Função *Get Trama Balance Status Register*

A função *Get Trama Balance Status Register* contém a informação de quais as células a balancear, através dos bits [16:5] do registo *Balance Status Register*, de cada dispositivo.

O algoritmo decompõe o vetor de balanceamento, calculado no quarto segmento, e realiza a concatenação dos bytes. Uma vez concluída a concatenação, é calculado o CRC. O processo é repetido para todos os dispositivos presentes na cadeia devolvendo 4 bytes por cada dispositivo.

Capítulo 6

Algoritmos Desenvolvidos

Neste capítulo são apresentados os vários algoritmos desenvolvidos. Estes combinam métodos de carregamento e metodologias de balanceamento para packs com um elevado número de células em série.

6.1. Algoritmo *Multistage* Adaptativo

Quando se pretende desenvolver métodos de carregamento para baterias é essencial existir comunicação entre o carregador e o BMS. Caso essa comunicação não ocorra, o carregador não fornece qualquer proteção, mas sim, uma falsa sensação de segurança podendo mesmo levar à danificação do *pack*. O carregador por si só e sem conhecimento quer das tensões das células individuais, quer das correntes de balanceamento, torna-se uma solução imprudente no que diz respeito à proteção de um *pack* de baterias [3]. Uma outra solução disponível é a incorporação no próprio carregador de um BMS capaz de efetuar todas as medições necessárias.

O algoritmo *Multistage* Adaptativo aqui proposto baseia-se no método de carregamento tradicional *Multistage*, devido a este possuir uma boa relação entre eficiência, simplicidade, versatilidade e tempo de carregamento [64]. Também para este algoritmo, tal como no tradicional *Multistage*, é necessária uma escolha prévia do número de patamares de corrente. Assim, foram selecionados cinco patamares de corrente, com base no estudo realizado por [66]. Neste trabalho os autores avaliam o efeito de diferentes números de patamares no tempo de carregamento e na sua eficiência.

Foi ainda necessário definir quais os valores para cada um dos patamares de corrente selecionados. Para tal, teve-se em conta o tipo de bateria, o estado das células que constituem o *pack* e a corrente de balanceamento do sistema implementado. Deste modo, o patamar de corrente máximo (maior corrente de carregamento) foi escolhido com base no manual das baterias. Já o patamar de corrente mínimo foi selecionado tendo em conta a corrente de balanceamento. Os restantes patamares foram interpolados em função do erro das tensões das células para a tensão desejada.

Assim, o algoritmo proposto pode ser formulado matematicamente através das seguintes expressões:

$$\text{Min } f_k(\gamma_k) \quad (6.1)$$

sujeito a:

$$V_{i,k} \leq 4.25 \quad (6.2)$$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{i,k} \geq dv \ \& \ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{i,k} - 0,01 \leq V_{i,k} \leq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{i,k} + 0,01 \quad (6.3)$$

em que:

$$f_k(\gamma_k) = \begin{cases} 1.5 & \text{se } \gamma_k \geq 0.3 \\ 0.8 & \text{se } 0.3 > \gamma_k > 0.15 \\ 0.6 & \text{se } 0.15 \geq \gamma_k > 0.1 \\ 0.4 & \text{se } 0.1 \geq \gamma_k > 0.02 \\ 0.2 & \text{se } \gamma_k \leq 0.02 \end{cases} \quad (6.4)$$

com:

$$\gamma_k = dv - \max(V_{i,k}) \quad (6.5)$$

Para além das equações relativas ao método de carregamento, é ainda necessário ter em conta a metodologia de balanceamento incorporada no algoritmo proposto. Assim, a tomada de decisão sobre quais as células que devem entrar em balanceamento recai sobre a equação seguinte:

$$V_{i,k} \geq \xi_k + \frac{\delta_k}{2} \quad (6.6)$$

Nas equações anteriores as variáveis representam:

- f_k : Função objetivo no instante de tempo k ;
- γ_k : Diferença entre a tensão desejada e a tensão das células no instante de tempo k ;
- $V_{i,k}$: Tensão da célula i no instante de tempo k ;
- dv : Tensão desejada (4.2V);
- n : Número de células que constituem o *pack* de baterias;
- ξ_k : Média das tensões das células no instante de tempo k ;
- δ_k : Desvio padrão das tensões das células no instante de tempo k .

Assim, as expressões (6.1) a (6.6) são interpretadas da seguinte forma:

- A expressão (6.1) representa a formulação matemática do algoritmo proposto, tratando-se da minimização do erro das tensões nas células para a tensão desejada (4.2V), conseguindo-se assim também uma minimização do tempo de carregamento;
- A expressão (6.2) representa um critério de paragem em que caso a tensão de alguma célula ultrapasse os 4.25V o carregamento é imediatamente interrompido;

- A expressão (6.3) representa o segundo critério de paragem do algoritmo. Se por um lado, na expressão descrita anteriormente se tratava de uma condição de segurança, esta representa uma premissa em que são considerados resultados aceitáveis para o carregamento, ou seja, quando todas as células se encontram dentro do intervalo de tensões estabelecido o carregamento é finalizado com sucesso. Ambos os critérios de paragem foram selecionados tendo em conta o manual das baterias utilizadas [71];
- A expressão (6.4) representa os vários valores de tensão que a função poderá tomar, para os vários valores de erro possíveis;
- A expressão (6.5) representa o erro entre a tensão desejada (4.2V) e o máximo das tensões das células;
- A expressão (6.6) representa a condição para a qual as células são sujeitas ou não ao balanceamento. Caso a condição seja verdadeira para uma determinada células, esta irá balancear, como ilustrado na Figura 6.1.

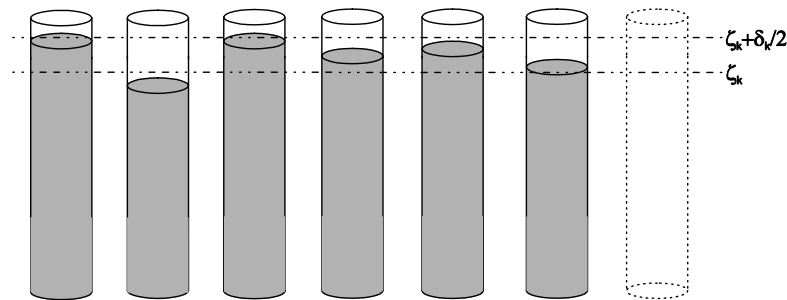


Figura 6.1: Representação gráfica da metodologia de balanceamento implementada.

6.2. Algoritmo Look up Table (LUT) com Interpolação Trilinear

Para uma melhor gestão e eficiência no processo de carregamento é essencial que o algoritmo determine a corrente de carregamento em função do estado atual do *pack* de baterias e não de condições pré-estabelecidas. Neste algoritmo foi também introduzido um outro algoritmo responsável pela estimação do estado de carga do *pack*.

6.2.1. Algoritmo de Carregamento e Balanceamento

O algoritmo de carregamento proposto tem por base a construção de uma *Look up Table* (LUT), ilustrada na Figura 6.2, na qual são introduzidos valores para a corrente de carregamento tendo em conta três parâmetros relativos ao estado do *pack* de baterias: diferença entre a tensão desejada e a média das tensões das células, desequilíbrio entre células e a temperatura do *pack*. Deste modo, o algoritmo proposto determina a corrente de carregamento ótima para o estado atual do *pack* de baterias, ou seja, a corrente é definida em tempo real. Uma das vantagens do algoritmo proposto é o facto da tabela poder ser construída tendo em consideração diversos pressupostos, isto é, privilegiando o tempo de carregamento ou a

longevidade do *pack*, ou seja, o utilizador tem a possibilidade de escolher qual o perfil de carregamento adequado. A longevidade do *pack* é principalmente influenciada pelas elevadas temperaturas, elevadas correntes, sobrecarga e descargas profundas. Neste trabalho foi realizado um *trade-off* entre o tempo de carregamento e a longevidade do *pack*.

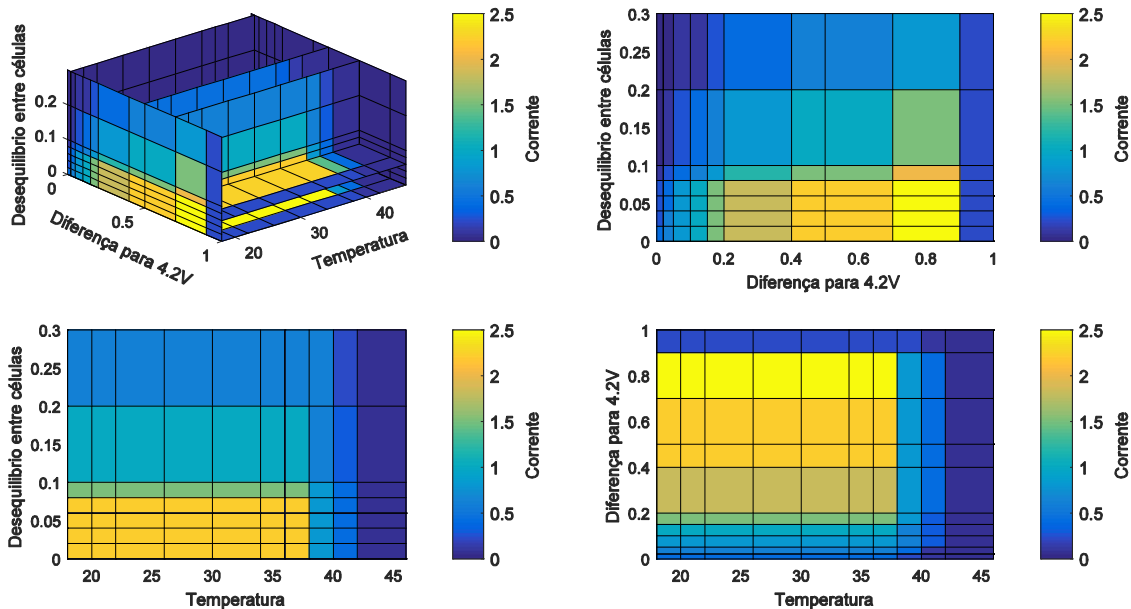


Figura 6.2: Representação da *Look up Table* do algoritmo implementado.

A Figura 6.2 ilustra vários cortes da tabela onde é possível analisar a relação existente entre os vários parâmetros. Deste modo, é possível compreender que aquando da construção desta foi necessário ter em conta várias premissas, sendo elas:

- A temperatura condiciona de forma mais acentuada a corrente de carregamento quando se eleva para determinados valores. Ou seja, até aos 38°C é considerada uma temperatura segura não sendo por isso necessário diminuir a corrente de carregamento. A partir dos 38°C são consideradas temperaturas de risco e por isso a corrente é reduzida para que a temperatura possa também diminuir. Caso esta atinja os 45°C o carregamento é interrompido por questões de segurança [72];
- A diferença entre as tensões das células tem um carácter mais preponderante na escolha da corrente. Ou seja, quando a diferença entre as tensões das células é pequena a corrente de carregamento não é significativamente influenciada. Já quando a diferença entre as tensões das células é elevada; é necessário ter em conta a diferença entre a média das tensões das células e a tensão desejada. Assim, quando a diferença para 4.2V (tensão desejada) é elevada a corrente de carregamento apenas sofre um pequeno decréscimo, quando comparada com a situação em que a diferença entre células é reduzida. Já quando a tensão das células se aproxima da tensão

desejada a corrente é reduzida com o objetivo de tentar corrigir o desequilíbrio existente. Este fenómeno é justificado devido ao balanceamento ser bastante mais eficaz no topo do carregamento, apesar de útil ao longo de todo o carregamento. A corrente de carregamento no fim do processo é definida com um valor reduzido devido a ser essencial para a eliminação de desequilíbrios ter uma corrente de carregamento inferior à corrente de balanceamento. Os reduzidos valores de corrente no fim do carregamento são também importantes devido à necessidade de reduzir a queda de tensão nas células com o objetivo de obter leituras de tensão corretas;

- O último parâmetro analisado é a diferença entre a tensão desejada e a tensão das células. Começou por ser definido um primeiro valor de corrente para a situação em que a tensão das células se encontra abaixo de um valor limite (3.2V). Este processo corresponde à fase *trickle charge* no método CC/CV, explicada na Secção 1, sendo assim necessário carregar as células com uma corrente reduzida. Após ultrapassar essa tensão é possível efetuar o carregamento com corrente elevada, sendo esta reduzida gradualmente. Este facto só se verifica se o desequilíbrio entre as células for reduzido e a temperatura estiver abaixo dos 38°C; caso estas condições não se verifiquem a corrente irá sofrer uma redução, como já explicado nos pontos anteriores.

Com a tabela formada é ainda importante referir quais os critérios de paragem estabelecidos e quais as ordens de balanceamento. Assim, foram selecionados os mesmos critérios de paragem que no algoritmo anteriormente descrito: a expressão (6.2) representa uma condição de segurança, não permitindo que a tensão das células ultrapasse o valor de 4.25V e a expressão (6.3) representa uma condição para a qual os resultados obtidos são considerados aceitáveis e consequentemente, o carregamento é concluído com sucesso.

Já no que diz respeito às ordens de balanceamento, ou seja, quais as células a balancear, a decisão é efetuada através de uma análise estatística. Esta análise tem em conta a tensão individual das células ($V_{i,k}$), a média das tensões das células (ξ_k), o desvio padrão das tensões (ξ_k) e a diferença entre a tensão desejada e a média das tensões nas células (ϕ_k). Assim, ao longo do carregamento, o valor limite para o qual as células entram em balanceamento vai sendo reduzido, uma vez que o balanceamento é também mais eficaz no topo do carregamento. Este critério pode ser representado pelas primeiras quatro equações da expressão (6.7).

No entanto, dois critérios adicionais foram implementados na expressão (6.7) com o objetivo de tornar o balanceamento mais eficaz. O primeiro critério permite desativar o balanceamento quando a diferença entre a tensão desejada e a média das tensões é reduzida ($<0.01V$) e o desequilíbrio entre células se encontra dentro do critério de paragem ($<0.01V$). O segundo critério, última condição da expressão (6.7), obriga as células a entrar em balanceamento caso a sua tensão seja igual ou superior a 4.2V, para que estas não excedam a tensão desejada.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{i,k} \geq \xi_k + \delta_k \text{ if } \phi_k \geq 0.2 \\ V_{i,k} \geq \xi_k + \delta_k * 0.8 \text{ if } 0.2 > \phi_k \geq 0.1 \\ V_{i,k} \geq \xi_k + \delta_k * 0.6 \text{ if } 0.1 > \phi_k \geq 0.05 \\ V_{i,k} \geq \xi_k + \delta_k * 0.4 \text{ if } 0.05 > \phi_k \geq 0.01 \\ V_{i,k} \geq \xi_k + \delta_k * 0.4 \text{ if } \phi_k < 0.01 \ \& \ \Psi_k > 0.01 \\ V_{i,k} \geq 4.2 \end{array} \right. \quad (6.7)$$

Na expressão (6.7), as variáveis são:

- $V_{i,k}$: Tensão da célula i no instante de tempo k ;
- ξ_k : Média das tensões das células no instante de tempo k ;
- δ_k : Desvio padrão das tensões das células no instante de tempo k .
- ϕ_k : Diferença entre a tensão desejada e a média das tensões das células no instante de tempo k ;
- Ψ_k : Desequilíbrio entre células no instante de tempo k .

Após a explicação de quais as restrições a respeitar aquando da construção da LUT, quais os critérios de paragem e quais as ordens de balanceamento, importa agora perceber como irá ser determinada a corrente de carregamento para valores não pré-estabelecidos na tabela. Para tal, foi implementado o algoritmo da interpolação trilinear. Este, através dos três parâmetros referidos anteriormente, determina o valor da corrente de carregamento ótimo.

6.2.2. Algoritmo de Estimação do Estado de Carga

A fim de estimar o estado de carga (SOC) presente no *pack* de baterias, recorreu-se ao método de *Coulomb*, frequentemente encontrado na literatura. Para o período de descarga é utilizado o método de *Coulomb* tradicional, no entanto para o período de carregamento é necessário considerar o balanceamento na estimação do SOC.

- **Estimação do SOC no Período de Descarga**

No período de descarga o SOC é estimado através do método de *Coulomb* direto, não sendo necessária qualquer modificação. Assim o algoritmo subtrai sucessivamente um determinado número de coulombs ao SOC total. Esta operação é realizada tendo por base um tempo de amostragem de 70 segundos, ou seja, a cada período de amostragem são retirados um número determinado de coulombs, relacionados com a corrente de descarga no momento. O procedimento de estimação do SOC no período de descarga pode ser representado pelas seguintes equações:

$$SOC_{i,k} = SOC_{i,k} - \sum_{i=1}^n I_{bat} * T_s * C_o \quad (6.8)$$

$$SOC_{p,k} = \sum_{i=1}^n \frac{SOC_{i,k}}{n} \quad (6.9)$$

Nas equações (6.8) e (6.9), as variáveis são:

- $SOC_{i,k}$: SOC da célula i , no instante de tempo k ;
- $SOC_{p,k}$: SOC do *pack* p , no instante de tempo k ;
- I_{bat} : Corrente de descarga;
- n : Número de células que constituem o *pack* de baterias;
- T_s : Tempo de amostragem;
- C_o : Número de coulombs por segundo.

A Figura 6.3 apresenta o perfil do SOC ao longo do processo de descarga e o perfil da tensão vs. a capacidade de descarga. Para o processo foi utilizada uma carga eletrônica (Chroma 63802) com uma corrente de descarga de 0.1A (I_{bat}). Verifica-se um comportamento esperado para o perfil do SOC atingindo o valor 0 após 26 horas, correspondente a uma capacidade de descarga de 2600mAh e a uma tensão de aproximadamente 3.2V.

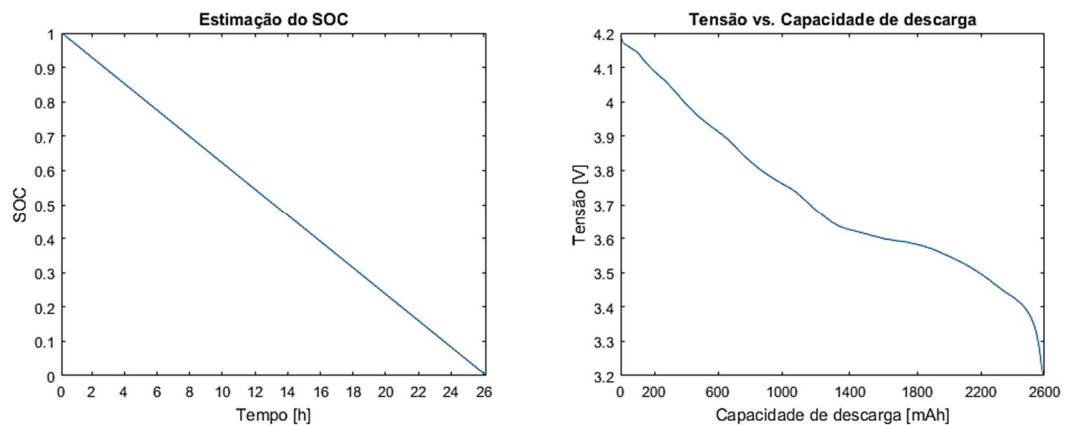


Figura 6.3: Perfil do SOC e tensão vs. capacidade de descarga durante o processo de descarregamento.

- **Estimação do SOC no Período de Carregamento**

No período de carregamento a estimação do SOC revela-se um pouco mais complexa, devido à presença do balanceamento aquando da realização do carregamento das baterias. Assim, é necessário retirar ao SOC de cada célula os coulombs consumidos caso esta tenha estado com o balanceamento ativo. Ou seja, quando uma determinada célula se encontra em balanceamento é realizada uma leitura da sua tensão durante o período de balanceamento (60 segundos), a fim de calcular a corrente de balanceamento. Com o valor de corrente, é realizado o cálculo do SOC através do método de *Coulomb* direto e subtraído o valor obtido ao valor do SOC da célula. Este processo pode ser representado pelas seguintes equações:

$$SOC_{i,k} = \sum_{i=1}^n I_{charge_k} * T_s * C_o - \sum_{i=1}^n \frac{V_{b,i,k}}{R_b} * time_{bal} * C_o \quad (6.10)$$

$$SOC_{p,k} = \sum_{i=1}^n \frac{SOC_{i,k}}{n} \quad (6.11)$$

Nas equações (6.10) e (6.11), as variáveis são:

- $SOC_{i,k}$: SOC da célula i , no instante de tempo k ;
- $SOC_{p,k}$: SOC do $pack$ p , no instante de tempo k ;
- I_{charge_k} : Corrente de carregamento, no instante de tempo k ;
- n : Número de células que constituem o $pack$ de baterias;
- T_s : Tempo de amostragem;
- C_o : Número de coulombs por segundo;
- $V_{b,i,k}$: Tensão da célula i durante o balanceamento, no instante de tempo k ;
- $time_{bal}$: Tempo de balanceamento;
- R_b : Valor da resistência de balanceamento.

A Figura 6.4 ilustra o procedimento de estimação do SOC proposto no decorrer de um carregamento completo, para duas situações distintas. Na primeira situação, foi selecionada uma célula sujeita a balanceamento, concentrado no fim do processo de carregamento. Na segunda situação, foi selecionada uma célula sujeita a um tempo superior de balanceamento, realizado ao longo de todo o processo de carregamento. Essa característica é perceptível quando comparadas as áreas a cinzento que refletem a quantidade de energia desperdiçada com o balanceamento. Em ambas as situações, o algoritmo de estimação do SOC proposto apresenta excelentes resultados. O SOC estimado pelo método de Coulomb tradicional (sem correção de energia dissipada) em ambas as situações é de 1.036, apresentando um erro de 3.6%. O algoritmo proposto (com correção de energia dissipada), para a primeira situação, o SOC é de 1.009 a que corresponde um erro de 0.9%. Já na segunda situação, o SOC estimado é de 1.01, com um erro de 1%.

A utilização de metodologias de balanceamento, quer ativas, quer passivas, obriga a correções no cálculo SOC das células e/ou do $pack$ de baterias. Outra característica que se pode observar na Figura 6.4, é que o balanceamento é mais eficaz no fim do carregamento. Este facto verifica-se porque essa fase do carregamento obriga a uma menor corrente de carregamento e as células apresentam uma tensão superior, o que resulta numa maior corrente de balanceamento.

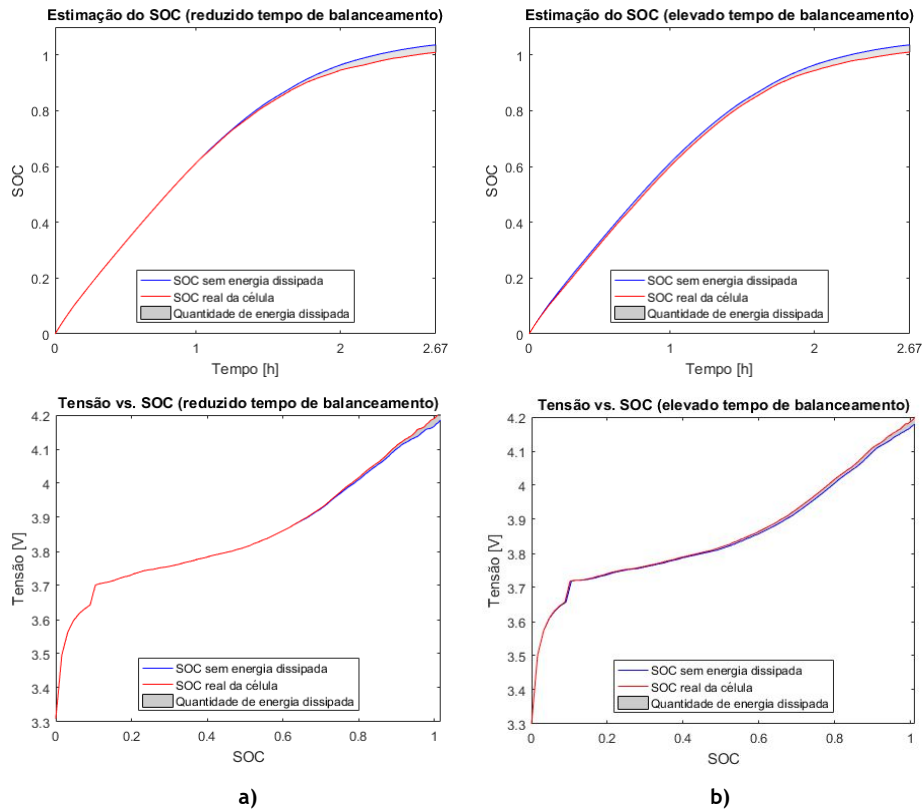


Figura 6.4: Perfil de SOC e tensão vs. SOC durante o carregamento, para dois testes experimentais distintos: a) uma célula com reduzido tempo de balanceamento; b) uma célula com elevado tempo de balanceamento.

6.3. Algoritmo baseado em Redes Neurais

Tal como no algoritmo anterior, também este algoritmo proposto tem por base o estado atual do *pack* de baterias e não, condições pré-estabelecidas. No entanto, devido à utilização de redes neurais este tem a capacidade de aprender e tomar decisões tendo por base a sua aprendizagem. Este comportamento potencia resultados muito promissores, necessitando apenas de conjuntos de treino abrangentes e bem representativos das diversas premissas para uma correta aprendizagem da rede. De seguida é feito um pequeno enquadramento das redes neurais e do algoritmo PSO, utilizado para o treino da rede.

6.3.1. Redes Neurais

As redes neurais são sistemas altamente dinâmicos de computação adaptativa de processamento paralelo de informação. Estes são inspirados nas características de processamento de informação encontradas nos neurónios biológicos e nas suas interconexões, para intuir e inferir a partir de dados escassos, incompletos ou confusos. Várias são as arquiteturas, bem como os métodos de treino, com princípios de funcionamento e técnicas totalmente distintas, mantendo comum entre si o bloco básico (neurónio artificial) e o paralelismo de processamento.

A grande maioria das publicações utiliza a arquitetura de rede, representada na Figura 6.5, designada por *Multilayer Perceptron* (MLP). Por exemplo em [73], [74], é utilizada uma arquitetura em que o fluxo de informação ocorre nas camadas de neurónios, sem que exista realimentação, isto é, sem que ocorra retorno da informação da saída para a entrada.

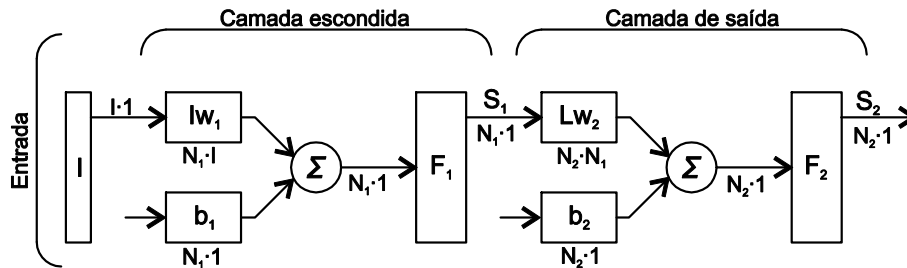


Figura 6.5: Arquitetura característica da rede neuronal MLP.

De acordo com a Figura 6.5 a saída dos neurónios da camada escondida e da camada de saída podem ser representados pelas equações (6.12) e (6.13), respetivamente.

$$S_1 = F_1 * (Iw_1 * I + b_1) \quad (6.12)$$

$$S_2 = F_2 * (Lw_2 * S_1 + b_2) \quad (6.13)$$

onde, S_1 e S_2 representam as saídas dos neurónios das camadas escondida e de saída, F_1 e F_2 as funções de ativação, Iw_1 os pesos correspondentes às conexões entre a camada de entrada e a camada escondida, I as entradas do problema, Lw_2 os pesos correspondentes às conexões entre a camada escondida e a camada de saída e b_1 e b_2 as *bias* dos neurónios das camadas correspondentes. A função de ativação serve de *threshold*. Alguns exemplos são a função de *Heaviside*, a função sigmoide, a função Gaussiana, a função tangente hiperbólica e a função *Spline*. Uma outra característica relevante nas redes neuronais são os métodos de treino. Estes podem ser divididos, de um modo geral, em duas classes fundamentais:

- Métodos de treino supervisionados, em que as entradas e saídas desejadas para a rede neuronal são fornecidas por um supervisor externo. Estes métodos de treino podem ser implementados de duas formas distintas, *online* e *offline*. Nos métodos de treino *online*, o conjunto de dados é dinâmico e a rede neuronal sofre um processo de aprendizagem contínuo. Contudo a implementação deste método envolve um maior tempo computacional, enquanto que nos métodos supervisionados *offline* é o seu treino que envolve um maior tempo computacional.
- Métodos de treino não supervisionados, a rede neuronal tem que intuir e inferir sem nenhuma referência externa, relações ou padrões dos dados de entrada. Este método de treino não possui nenhum conhecimento *a priori* das células da rede neuronal.

São diversos os métodos de treino ditos clássicos que se podem encontrar na literatura com maior ou menor popularidade e/ou complexidade. Estes são algoritmos que privilegiam uma exploração local (baseados no gradiente), como por exemplo, *Back-Propagation*, *Levenberg-Marquardt*, descida do gradiente, gradiente conjugado, entre outros. Um dos mais populares é o método de treino supervisionado *offline*, designado por *Back-Propagation* (BP) [75], [76], que consiste em dois procedimentos. Um primeiro onde é realizado um deslocamento para a frente, através da rede, para calcular as saídas de cada elemento neuronal da camada de saída. Um segundo onde se calcula o respetivo erro, que se propaga a partir da camada de saída até à camada de entrada, e onde os pesos das conexões das diversas camadas vão sendo modificados em função do erro.

Embora estes métodos sejam bastante eficientes numa exploração local, podem, no entanto, convergir prematuramente para mínimos locais e requerem um elevado esforço computacional. A sua eficiência é fortemente dependente do posicionamento inicial. Com o intuito de mitigar as referidas desvantagens vários autores optam pela utilização de algoritmos de inteligência artificial que privilegiam uma exploração global e local. Alguns exemplos deste tipo de abordagem são: PSO [77], [78], algoritmos genéticos [79], evolução diferencial [80], *Simulated Annealing* [81], *Cuckoo Search* [82], *Bacterial Foraging Optimization* [83] e *Bat Inspired Algorithm* [84].

Outro aspeto não consensual na literatura que influencia o desempenho e eficiência das redes neuronais é o seu dimensionamento. Ou seja, a definição do número de camadas (camadas escondidas) e do número de neurónios. Na ausência de um paradigma ótimo, para solucionar esta questão, diversas metodologias podem ser encontradas na literatura. Segundo [85] as metodologias existentes na literatura podem ser agrupadas em quatro categorias: tentativa e erro, heurísticas, de busca exaustiva e algoritmos de *pruning and constructive*. Por exemplo em [86] o autor formulou um método heurístico para determinar o número de neurónios na camada escondida. Já em [85], o autor recorreu aos algoritmos de inteligência artificial para determinar a melhor arquitetura e dimensionamento da rede.

6.3.2. Particle Swarm Optimization (PSO)

O algoritmo *Particle Swarm* é inspirado nos princípios de funcionamento de cooperação e comportamento em sociedade, este possui uma população de partículas onde cada uma delas representa uma solução possível. Associada a cada posição existe uma velocidade, ajustada através de uma equação de atualização que considera o histórico das experiências individuais e coletivas. Ou seja, a experiência da própria partícula e a experiência das outras partículas presentes na população. A velocidade de cada partícula e a nova posição são expressas pelas seguintes equações:

$$v_k = \theta v_{k-1} + c_1 \alpha_1 (x_{p_{best}} - x_k) + c_2 \alpha_2 (x_{g_{best}} - x_k) \quad (6.14)$$

$$x_{k+1} = x_k + v_k \quad (6.15)$$

onde, v_k é a velocidade da partícula no instante de tempo k , x_k é a posição da partícula no instante de tempo k , θ é o fator de inércia, c_1 e c_2 constantes relativas aos pesos, α_1 e α_2 fatores aleatórios no intervalo de $[0,1]$, $x_{p_{best}}$ a melhor posição alcançada pela partícula e $x_{g_{best}}$ a melhor posição alcançada por todas as partículas.

A ideia base é evoluir as partículas de maneira a que estas percorram o espaço em busca de uma solução ótima. O conceito do algoritmo consiste em avaliar a cada iteração o desempenho de cada partícula da população através de uma função de aptidão pré-definida e mudar a velocidade de cada partícula em direção ao seu melhor desempenho até ao momento (p_{best}), bem como em direção ao melhor desempenho das outras partículas presentes na população (g_{best}), como ilustrado na Figura 6.6.

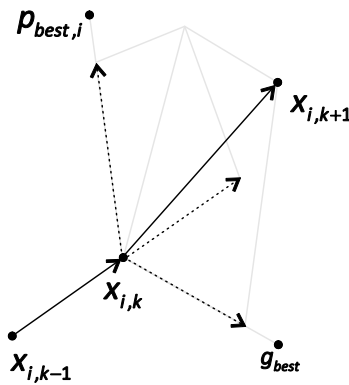


Figura 6.6: Representação gráfica da evolução das partículas.

Um aspeto relevante que influencia o desempenho do algoritmo é a sua topologia, ou seja, a forma como as partículas comunicam entre si. Existem várias topologias presentes na literatura, como por exemplo: topologia em estrela, topologia em anel, topologia em *cluster*, topologia *Von Neumann* e uma outra em que a conexão/comunicação é realizada através de uma partícula central e todas as outras se encontram isoladas entre si [87], [88].

6.3.3. Algoritmo Implementado

O algoritmo proposto baseia-se na utilização de redes neuronais (NN) para estimar a corrente de carregamento, o SOC do *pack* de baterias e as ordens de balanceamento. Para tal, são utilizadas duas arquiteturas distintas: uma rede neuronal *Multilayer Perceptron* para estimar as ordens de balanceamento e uma rede neuronal em cascata para estimar a corrente de

carregamento e o SOC do *pack*. Cada rede neuronal pertencente à arquitetura em cascata tem uma estrutura *Multilayer Perceptron*.

Assim, a primeira rede pertencente à arquitetura em cascata é responsável pela estimação da corrente de carregamento e a segunda pela estimação do SOC. A primeira NN (NN_1) representada na Figura 6.7, tem como entradas a diferença entre a tensão desejada e a média das tensões das células (γ_k), o desequilíbrio entre as tensões das células (Ψ_k) e a temperatura do *pack* (T_k). Assim, através das três entradas da rede, esta deverá estimar a corrente de carregamento (I_{charge}). Para tal, foram criados conjuntos de teste para treinar a rede, de modo a que esta se comporte como esperado. Assim, com a redução do valor da entrada γ_k , a corrente de carregamento deve também ser reduzida. Ou seja, com o aproximar das tensões das células à tensão desejada, a corrente de carregamento deve ser reduzida para que o balanceamento seja mais eficaz e as leituras das tensões das células sejam mais próximas do valor real, e não influenciadas pela queda de tensão nas células. Já o desequilíbrio entre células deve também influenciar a corrente de carregamento ao longo de todo o processo de carregamento. Assim, com o aumento do desequilíbrio, a corrente deve diminuir e vice-versa. Esta premissa tem como objetivo reduzir os desequilíbrios entre células. Por último, a temperatura acima dos 38°C deve condicionar de forma mais acentuada a corrente de carregamento. Uma vez que abaixo do valor referido, as temperaturas são consideradas seguras, não é necessário reduzir a corrente. Deste modo, a rede neuronal deve estimar a corrente de carregamento de acordo com os valores das três entradas, respeitando e relacionando as suas variações.

A segunda NN (NN_2), representada na Figura 6.7 tem como entradas a saída da NN_1 (corrente de carregamento), a média das tensões das células (ξ_k) e o SOC das duas iterações anteriores (SOC_{k-1} e SOC_{k-2}). Relacionando as quatro entradas da rede, esta deve ser capaz de estimar de forma eficaz o estado de carga do *pack* de baterias. Optou-se pela utilização de uma rede neuronal em cascata devido ao facto de a corrente de carregamento influenciar de forma direta o estado de carga, sendo por isso importante que esta seja uma das entradas da rede.

Para estimar as ordens de balanceamento foi utilizada uma rede neuronal *Multilayer Perceptron* (NN_3), representada na Figura 6.8. Esta tem como entradas a média das tensões das células (ξ_k), a tensão de cada célula ($V_{i,k}$) e o desvio padrão das tensões das células (δ_k). Foi criado um conjunto de teste que retrate as premissas requeridas para o balanceamento, ou seja, com a proximidade da tensão das células à tensão desejada pretende-se que o valor limite para o qual uma determinada célula entra em balanceamento seja menor. Assim, no topo do carregamento, onde o balanceamento é mais eficaz, pretende-se que este seja mais exigente, reduzindo de forma significativa os desequilíbrios presentes. No referido conjunto de teste, foram ainda incluídas situações em que quando uma determinada célula atinja a tensão de 4.2V, entre em balanceamento. Estas situações têm como objetivo evitar que as tensões das células se elevem acima da tensão desejada.

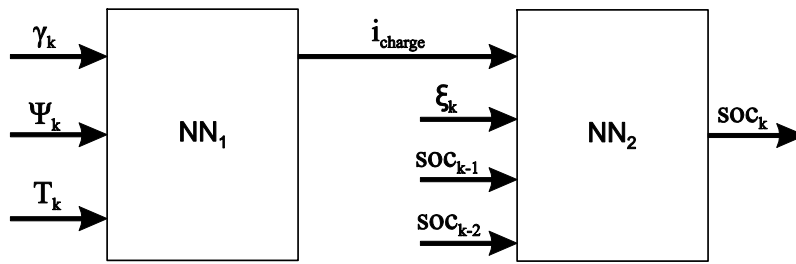


Figura 6.7: Representação da rede neuronal em cascata.

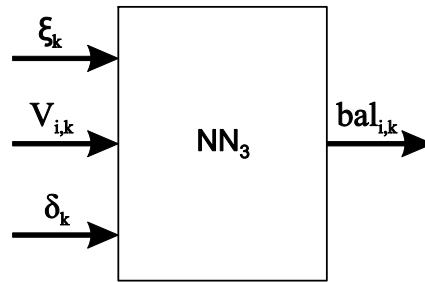


Figura 6.8: Representação da rede neuronal *Multilayer Perceptron*.

Tal como nos algoritmos desenvolvidos apresentados anteriormente, também neste os critérios de paragem têm como base as expressões (6.2) e (6.3).

- **Algoritmo de Treino**

O método de treino utilizado refere-se a um método supervisionado, *offline*, que recorre ao algoritmo de otimização PSO para ajustar/otimizar os parâmetros da rede neuronal (pesos das conexões entre neurónios e *bias* dos neurónios pertencentes à camada escondida e à camada de saída). Conceptualmente e sucintamente, a Figura 6.9 ilustra o método de treino utilizado.

Inicialmente, o conjunto de vetores de dados de entrada, formado por N amostras $\{x_{e_1}, d_1\}, \dots, \{x_{e_N}, d_N\}$, onde x_e é o vetor de dados de entrada e d é o vetor de dados de saídas desejadas, são normalizados entre -1 e 1 através do método de normalização *Min-Max*, garantindo assim um conjunto de dados com média igual a zero e desvio padrão igual a um. De seguida, o conjunto de vetores de dados de entrada foi dividido em dois conjuntos: o conjunto de treino (N_t) e o conjunto de validação (N_v), constituídos por 75% e 25% dos dados do conjunto de vetores de entrada, respetivamente.

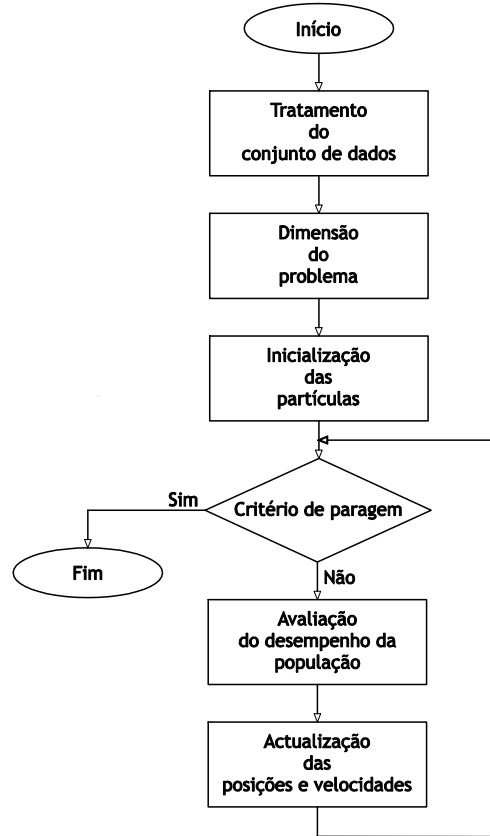


Figura 6.9: Fluxograma representativo do algoritmo de treino utilizado.

A dimensão do problema de otimização (d_o) é determinada pela equação (6.16). Esta depende da arquitetura seleccionada, isto é, do número de redes em cascata (N_c), do número de entradas do problema (I_r) do número de neurónios pertencentes à camada escondida (L_{ne_r}) e do número de saídas (o_r), onde r representa uma rede neuronal pertencente a uma rede com arquitetura em cascata.

$$d_o = \sum_{r=1}^{N_c} L_{ne_r} * I_r + o_r * L_{ne_r} + L_{ne_r} + o_r \quad (6.16)$$

A codificação de cada partícula pertencente à população é representada na equação (6.17). Esta é formada pelos pesos das conexões entre neurónios, a *bias* dos neurónios pertencentes à camada escondida e à camada de saída, de cada rede que constitui a arquitetura. A inicialização das partículas é realizada através do método *Nguyen-Widrow* [89].

$$x_{new} = \left(\underbrace{IW_{N_{c11}}, \dots, IW_{N_{cLl}}}_{\text{Pesos nas camadas de entrada e escondida}}, \underbrace{LW_{N_{c21}}, \dots, LW_{N_{cOL}}}_{\text{Pesos na camada de saída}}, \underbrace{b_{N_{c1}}, \dots, b_{N_{cL}}, b_{N_{cO}}}_{\text{Bias dos neurónios das camadas escondida e de saída}} \right) \quad (6.17)$$

O desempenho de cada partícula é avaliado através do erro quadrático médio (MSE), do conjunto de treino, de cada rede neuronal (N_c) que forma a arquitetura. Este pode ser expresso pela equação (6.18).

$$F = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} MSE_i \quad (6.18)$$

onde,

$$MSE = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (6.19)$$

em que, \hat{y}_i é a saída da rede neuronal e y_i é a saída desejada para a rede neuronal.

A atualização das velocidades e conseqüentemente da nova posição de cada partícula pertencente à população são determinadas através das equações (6.14) (6.15), respetivamente. Contudo, durante as sucessivas iterações, foi implementada a estratégia hiperbólica proposta por [90]. Nesta estratégia, caso algum dos limites (superior ou inferior) seja ultrapassado, o movimento da partícula é modificado garantindo que o novo posicionamento se encontra dentro do espaço de procura. Esse procedimento é expresso pelas equações (6.20) e (6.21).

$$v_{k+1} = \frac{v_{k+1}}{1 + \left| \frac{v_{k+1}}{x_{max} - x_k} \right|} \quad \text{if } v_{k+1} > 0 \quad (6.20)$$

$$v_{k+1} = \frac{v_{k+1}}{1 + \left| \frac{v_{k+1}}{x_k - x_{min}} \right|} \quad \text{if } v_{k+1} < 0 \quad (6.21)$$

Nas equações (6.20) e (6.21), as variáveis representam:

- v_{k+1} : Velocidade da partícula no instante de tempo $k + 1$;
- x_{max} : Limite máximo possível para a partícula;
- x_k : Posição da partícula no instante de tempo k ;
- x_{min} : Limite mínimo possível para a partícula;

O critério de paragem consiste no número máximo de iterações permitidas ou na técnica de paragem pelo conjunto de validação. Esta baseia-se no cálculo do MSE do conjunto de validação em cada iteração. Assim que este apresente um comportamento crescente durante um determinado número de verificações (20 iterações) é finalizado o treino. O objetivo desta técnica é descobrir o momento exato em que a rede neuronal começa a perder a capacidade de generalização.

Capítulo 7

Resultados Experimentais

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos com a aplicação de cada algoritmo desenvolvido, bem como uma comparação entre os algoritmos desenvolvidos e o algoritmo Multistage tradicional.

7.1. Algoritmo *Multistage* Adaptativo

Para testar o algoritmo implementado foram utilizados dois tipos distintos de células, as células SANYO UR18650F-SCUD-3 [71] com um grande número de ciclos de carga/descarga (caso 1) e as células SAMSUNG ICR18650-26H 2600mAh [72] com reduzidos ciclos de carga/descarga (caso 2).

7.1.1. Caso 1 - Baterias com Elevado Número de Ciclos

A Figura 7.1 ilustra o perfil de corrente e o erro entre a tensão desejada e o máximo das tensões das células ao longo de todo o processo de carregamento. Ao analisar o perfil de corrente podemos comprovar uma necessidade constante de ajustar os patamares de corrente após as transições entre estes. Este fenómeno é justificado pelo gráfico representativo do erro, já que quando ocorre a transição entre patamares de corrente existe uma grande oscilação nas tensões das células, resultando na necessidade de um constante ajuste dos patamares até que as tensões estabilizem.

A elevada oscilação nas tensões das células quando ocorrem variações na corrente de carregamento é justificada pelo elevado número de ciclos de carga/descarga a que as células estiveram sujeitas. O elevado número de ciclos resulta num aumento da resistência interna das células, provocando maiores oscilações nas tensões que em células com poucos ciclos de carga/descarga.

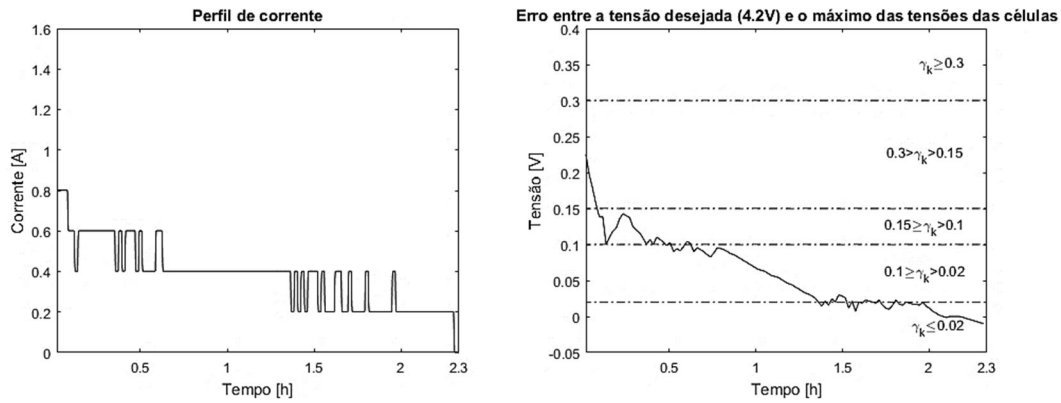


Figura 7.1: Perfil de corrente e erro entre a tensão desejada (4.2V) e o máximo das tensões das células.

A Figura 7.2 ilustra o comportamento das tensões individuais das células no decorrer do carregamento. Tal como ilustrado na Figura 7.1, é notória uma grande oscilação nas tensões das células ao longo de todo o processo de carregamento. Apesar da referida oscilação, o carregamento é concluído com todas as células a respeitarem os critérios de paragem. Deste modo o carregamento é finalizado com sucesso, apesar dos elevados desequilíbrios presentes durante todo o processo.

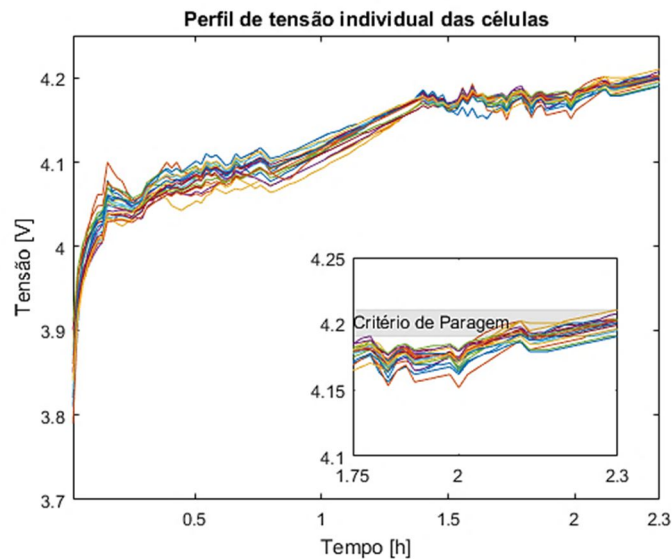


Figura 7.2: Perfil de tensão individual das células.

A Figura 7.3 apresenta diversos dados acerca do processo de balanceamento durante o carregamento. Através do gráfico ilustrativo do número de células em balanceamento é possível comprovar que durante todo o carregamento existiu sempre um grande número de células a balancear. Este facto é facilmente justificado pelo grande desequilíbrio entre células presente ao longo do tempo de carregamento. Por outro lado, ao analisar o tempo de balanceamento por célula, é perceptível um maior tempo por parte de algumas células quando comparadas com

as restantes. Este fenómeno ocorre devido a essas células se encontrarem com tensão superior às restantes em grande parte do tempo de carregamento, necessitando assim de um constante balanceamento para que se consiga minimizar o desequilíbrio entre células.

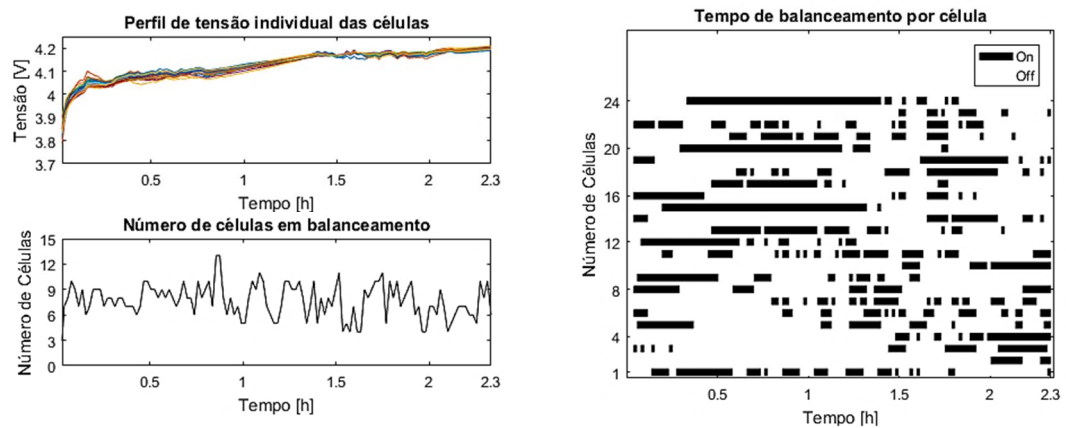


Figura 7.3: Perfil de tensão individual das células, número de células em balanceamento e tempo de balanceamento por célula.

7.1.2. Caso 2 - Baterias com Reduzido Número de Ciclos

Através da análise da Figura 7.4 é facilmente perceptível a presença de um perfil de corrente com reduzidas correções no patamar de corrente, justificado por um perfil de erro com oscilações praticamente insignificantes. Assim, quando comparados com os perfis apresentados no caso de estudo 1, é notória uma oscilação no erro bastante mais reduzida, justificada por células com uma resistência interna mais baixa. É ainda possível afirmar que para células com reduzido número de ciclos, o algoritmo proposto aproxima-se do algoritmo *Multistage* tradicional, diferindo essencialmente no critério de transição entre patamares. A grande vantagem do algoritmo proposto verifica-se na otimização da transição entre patamares de corrente, mais notória quando aplicado a células com grande número de ciclos.

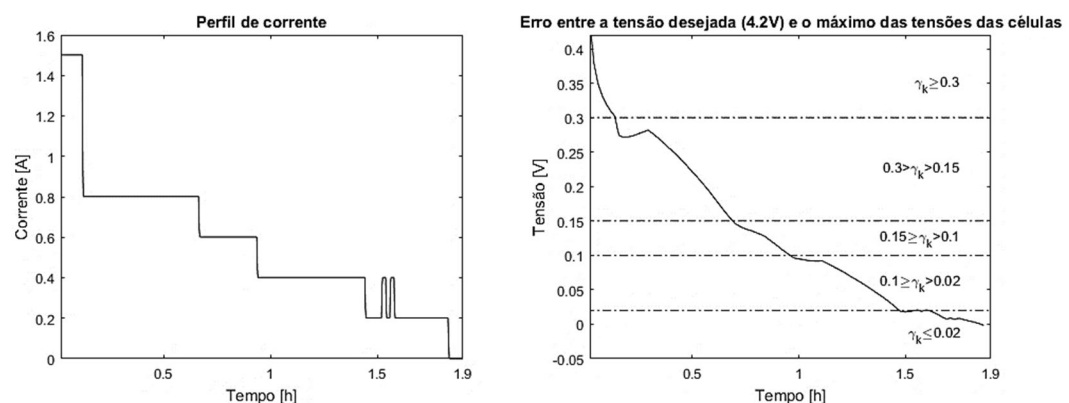


Figura 7.4: Perfil de corrente e erro entre a tensão desejada e o máximo das tensões, caso de estudo 2.

Através da Figura 7.5 é possível analisar o perfil das tensões individuais das células durante o processo de carregamento. Deste modo, é perceptível um comportamento idêntico entre células, apesar de existir algum desequilíbrio entre elas. Quando comparado com a figura análoga e referente ao caso de estudo 1, é notório um perfil de tensão bastante mais regular, não se verificando praticamente oscilações bruscas nas tensões. É ainda visível que para este caso de estudo o critério de paragem foi também cumprido, obtendo-se um desequilíbrio mais reduzido que no caso anterior.

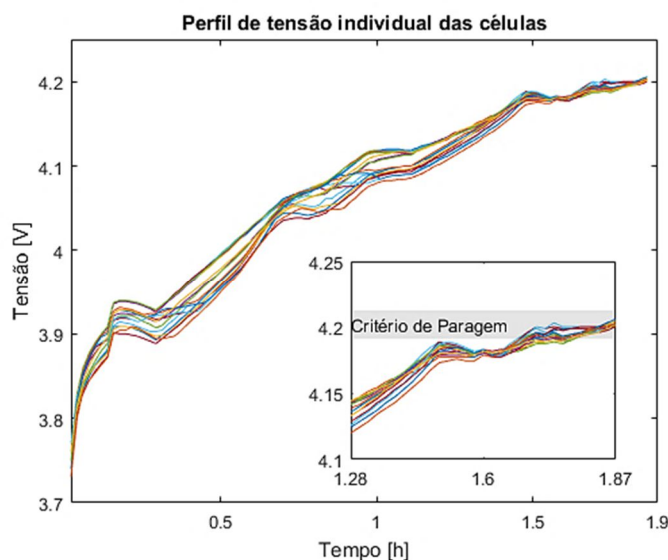


Figura 7.5: Perfil de tensão individual das células, caso de estudo 2.

Através da análise da Figura 7.6 é possível comprovar um processo de balanceamento distinto do caso de estudo anterior. Esta distinção é desde logo visível quando analisado o número de células em balanceamento durante o carregamento. No início do carregamento nenhuma célula se encontrava em balanceamento, sendo que a partir das 0.5 horas todas as 12 primeiras células entraram em balanceamento. Já no fim do carregamento foram as últimas 12 células a estar em constante balanceamento.

É ainda relevante afirmar que nos dois casos de estudo verificou-se que o balanceamento no topo é bastante mais eficaz que no restante tempo de carregamento, uma vez que, no topo do carregamento ocorre uma clara redução nos desequilíbrios entre células. No entanto, o algoritmo de balanceamento implementado não tem em conta a zona em que se encontra o carregamento, e por isso, em determinadas situações torna-se pouco eficiente, colocando um número elevado de células em balanceamento no início do carregamento (zona em que o balanceamento é menos eficaz).

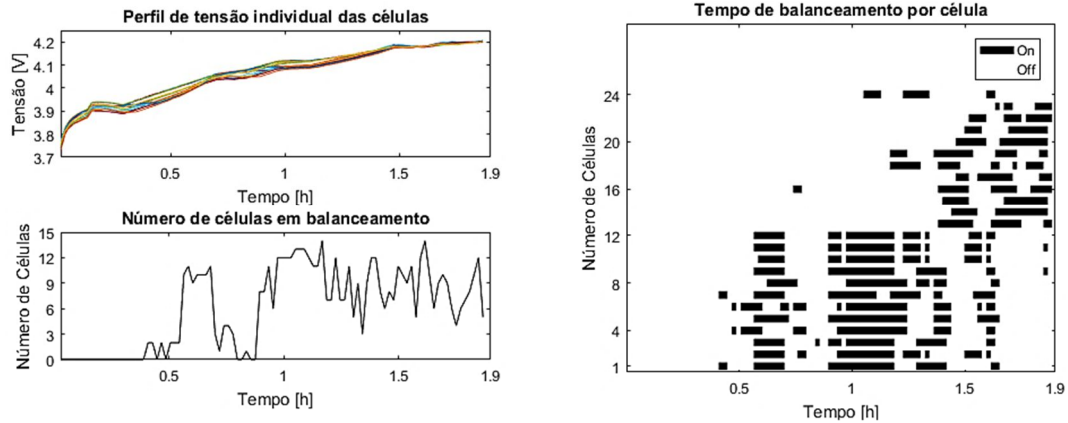


Figura 7.6: Perfil de tensão individual das células, número de células em balanceamento e tempo de balanceamento por célula, caso de estudo 2.

7.1.3. Análise da Eficiência do Algoritmo *Multistage* Adaptativo

Com o objetivo de validar a eficiência do algoritmo proposto, foi efetuado um ensaio experimental para o método *Multistage* tradicional. Este, foi realizado nas mesmas condições que o algoritmo proposto (critérios de paragem, critérios de balanceamento e condições iniciais). O *Multistage* tradicional foi implementado com cinco patamares de corrente, com valores de corrente de 1.5A, 0.8A, 0.6A, 0.4A e 0.2A. O critério de transição utilizado consiste no facto de que, quando uma determinada células atinge os 4.2V, ocorre a referida passagem (critério de transição tradicional).

A Figura 7.7 apresenta o perfil de corrente de carregamento e o erro entre a tensão desejada e a máxima tensão das células para o *Multistage* tradicional. Observando o primeiro gráfico, é visível a primeira transição entre patamares de corrente. No entanto, a tensão das células excede a tensão desejada (4.2V) e mantém-se acima desse valor durante 5.8 minutos. Devido a este facto e ao *sampling time* ser de 70 segundos, o algoritmo apenas se mantém uma iteração nos segundo, terceiro e quarto patamares de corrente. Este comportamento verifica-se devido às células terem sido sujeitas a um número reduzido de ciclos de carga/descarga, possuindo por isso uma baixa resistência interna, resultando na não existência de variações instantâneas na tensão das células.

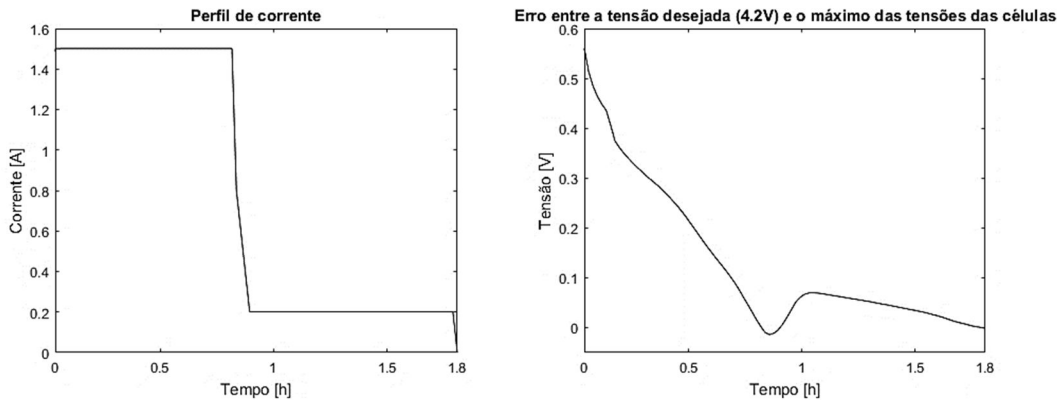


Figura 7.7: Perfil de corrente e erro entre a tensão desejada (4.2V) e o máximo das tensões das células, *Multistage* tradicional.

A Figura 7.8 apresenta as tensões individuais das células ao longo do carregamento. É visível a presença de reduzidos desequilíbrios entre células em todo o carregamento, concluindo-o por isso de acordo com os critérios de paragem (média das tensões de 4.2016V e desequilíbrio entre células de 0.01V). É também perceptível a existência de um declive bastante acentuado até ao momento da primeira transição, justificado pelas elevadas correntes de carregamento.

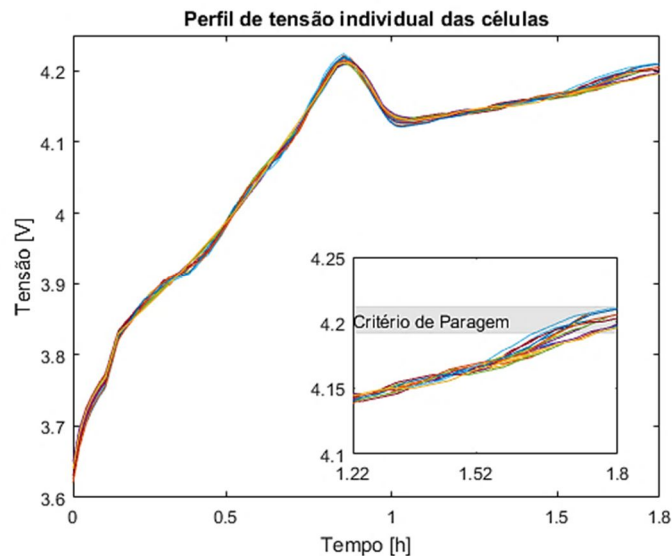


Figura 7.8: Perfil de tensão individual das células, *Multistage* tradicional.

Por último, a Figura 7.9 apresenta os dados relativos ao balanceamento existente durante todo o processo de carregamento. É visível a presença de um número considerável de células com balanceamento ativo ao longo de todo o carregamento. Tal como referido anteriormente, o excessivo balanceamento presente numa fase inicial do carregamento torna este processo menos eficiente.

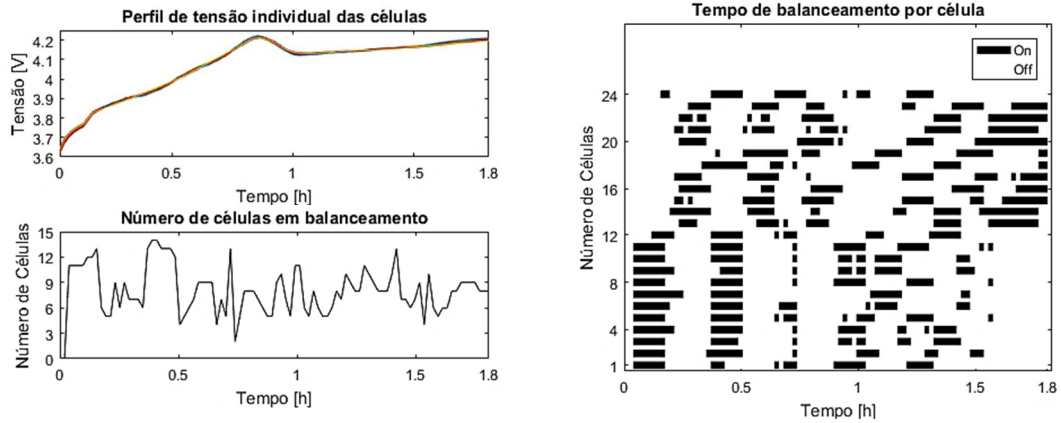


Figura 7.9: Perfil de tensão individual das células, número de células em balanceamento e tempo de balanceamento por célula, *Multistage* tradicional.

A Tabela 7.1 apresenta os vários parâmetros analisados nos carregamentos com ambos os algoritmos. Importa ainda referir que esta análise comparativa é realizada para o caso de estudo 2.

Tabela 7.1: Análise comparativa entre o algoritmo *Multistage* tradicional e o algoritmo *Multistage* Adaptativo.

Função	Tempo de carregamento	Desequilíbrio entre células no fim do carregamento	Aumento de temperatura
Algoritmo <i>Multistage</i> tradicional	1.8h	0.0143V	5.78°C
Algoritmo <i>Multistage</i> Adaptativo	1.67h	0.01V	4.6°C

Através da análise da Tabela 7.1 conclui-se a obtenção de melhores resultados para o algoritmo proposto. Relativamente ao tempo de carregamento o algoritmo *Multistage* Adaptativo apresenta uma redução de 7.2% quando comparado com o método tradicional. Também na temperatura se verificam melhores resultados, com uma redução de 20.4% com o algoritmo proposto. O desequilíbrio entre células no fim do carregamento apresenta resultados similares, sendo que ambos os carregamentos terminam dentro dos critérios de paragem pré-estabelecidos.

7.2. Algoritmo Look up Table (LUT) com Interpolação Trilinear

Para testar o algoritmo implementado foram utilizadas as células SAMSUNG ICR18650-26H 2600mAh [72]. São analisados dois casos de estudo distintos: o caso de estudo 1 apresenta um

carregamento em que houve um reduzido desequilíbrio entre células, já o caso de estudo 2 ilustra um carregamento com um substancial desequilíbrio entre células.

7.2.1. Caso 1 - Carregamento com Reduzido Desequilíbrio entre Células

A Figura 7.10 ilustra o perfil da corrente de carregamento e a variação dos parâmetros necessários para a sua determinação (diferença entre a tensão desejada e a tensão das células, desequilíbrio entre células e temperatura do *pack*). No início do carregamento, é visível um aumento na corrente de carregamento. Este comportamento deve-se fundamentalmente ao desequilíbrio entre células (0.11V) provocando uma penalização na corrente de carregamento (1.42A). Com a redução do desequilíbrio (0.0375V nas 0.078 horas) a corrente de carregamento foi sendo gradualmente aumentada até ao valor de 2.105A. No restante carregamento, verifica-se que a corrente apresenta um comportamento como esperado, diminuindo progressivamente. Neste caso de estudo, devido ao desequilíbrio entre células ser reduzido e a temperatura do *pack* não atingir valores de risco, a corrente apenas é fortemente influenciada pela diferença entre a tensão desejada e a tensão das células. A temperatura apresenta um gradiente de 10.47°C ao atingir o valor máximo de 33.43°C.

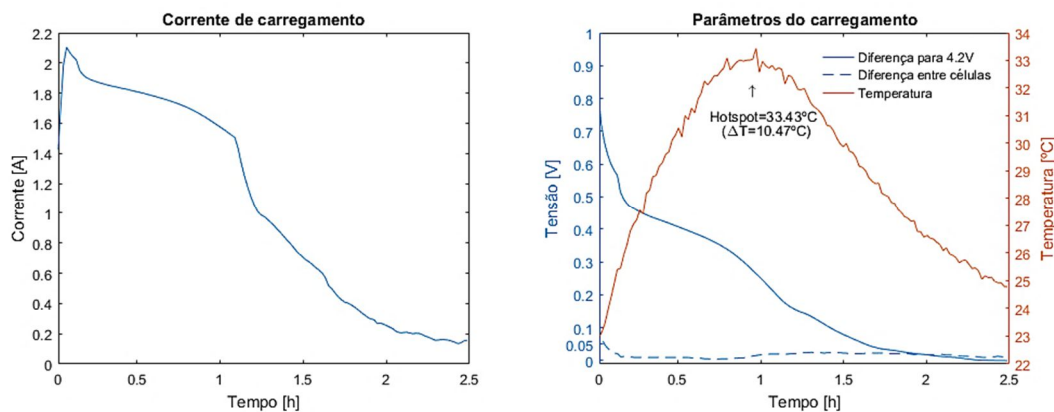


Figura 7.10: Perfil de corrente e parâmetros do carregamento.

A Figura 7.11 apresenta a tensão individual de cada célula ao longo de todo o processo de carregamento. É perceptível um perfil correto das tensões, apresentando uma fase inicial com um declive acentuado e de seguida um aumento gradual. Observa-se também um ligeiro aumento no desequilíbrio a partir da 1ª hora, sendo que este é pouco relevante, não condicionando assim o carregamento. Como ilustrado no gráfico, no fim do carregamento os critérios de paragem foram cumpridos, terminando assim o processo com sucesso. No fim do carregamento as células apresentavam um desequilíbrio de 0.0086V.

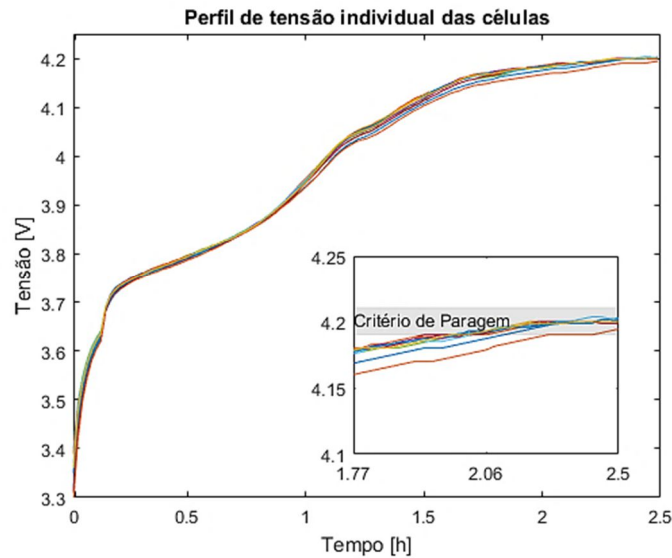


Figura 7.11: Perfil de tensão individual das células.

Através da análise da Figura 7.12 é possível retirar diversas conclusões acerca do processo de balanceamento neste caso de estudo. Deste modo, é visível um maior número de células com o balanceamento ativo no fim do balanceamento. Até cerca da 1.25 horas de carregamento eram poucas as células com o balanceamento ativo; o aumento no número de células em balanceamento a partir desta fase é justificado com um ligeiro aumento no desequilíbrio entre elas. Já no fim do carregamento é notório o grande número de células a balancear, justificado pelo facto de grande parte das células ultrapassar os 4.2V e assim, devido à ordem de balanceamento implementada, todas essas células entram em balanceamento. De seguida, devido a um processo de balanceamento eficaz, a diferença entre células foi reduzida e assim cumprida a ordem de balanceamento responsável pela desativação de qualquer balanceamento. No entanto, apesar da diferença entre células ser reduzida e de se cumprir o critério de paragem, a média das tensões das células era ainda inferior a 4.2V pelo que foi necessário aguardar 2.3 minutos pela verificação dessa mesma condição.

Por último a Figura 7.13 apresenta o perfil do SOC e o perfil da tensão vs. SOC durante todo o carregamento. É visível uma correta estimativa do estado de carga para este caso de estudo, obtendo-se no fim do carregamento um erro de 0.83%, sendo este um valor praticamente desprezável. Através da análise do gráfico da tensão vs. SOC é visível um perfil espectacular, atingindo o valor de unitário aos 4.2V com um erro reduzido, como descrito anteriormente.

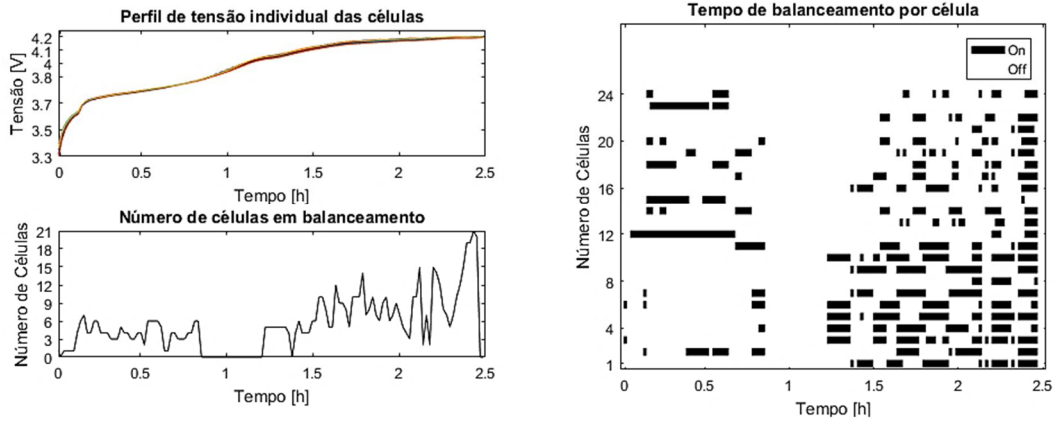


Figura 7.12: Perfil de tensão individual das células, número de células em balanceamento e tempo de balanceamento por célula.

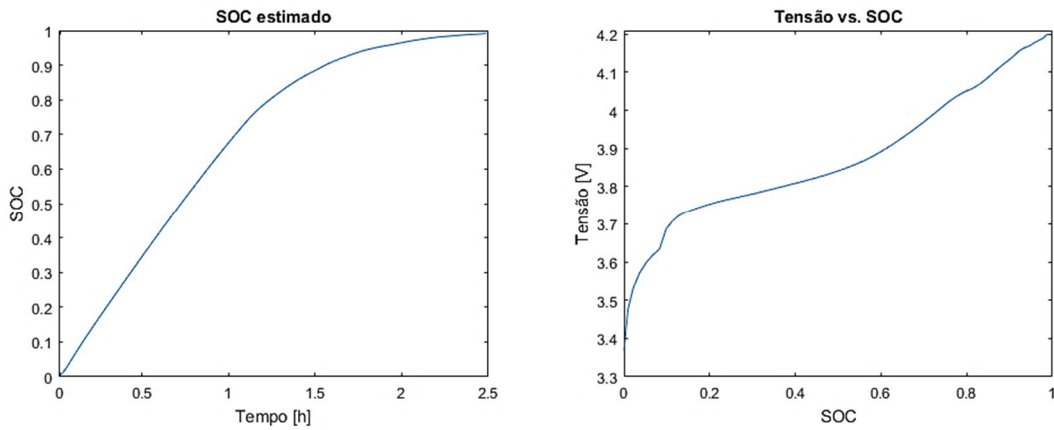


Figura 7.13: Perfil do SOC e da tensão vs. SOC ao longo do carregamento.

7.2.2. Caso 2 - Carregamento com Substancial Desequilíbrio entre Células

A Figura 7.14 apresenta a corrente de carregamento e os parâmetros do carregamento para o caso de estudo 2. Também para este caso de estudo se verifica um perfil de corrente de acordo com o esperado, durante o carregamento. Quando comparada com a corrente do caso de estudo anterior, é notória uma redução ao longo de todo o carregamento, justificada pela presença de desequilíbrios significativos. Tal como no caso anterior, também para esta situação a temperatura não condiciona a corrente de carregamento, uma vez que atinge o valor máximo de 31.62°C , correspondentes a um gradiente de $8,71^{\circ}\text{C}$. O gradiente de temperatura, quando comparado com o caso anterior, é mais reduzido devido à presença de correntes de carregamento também elas inferiores às obtidas anteriormente.

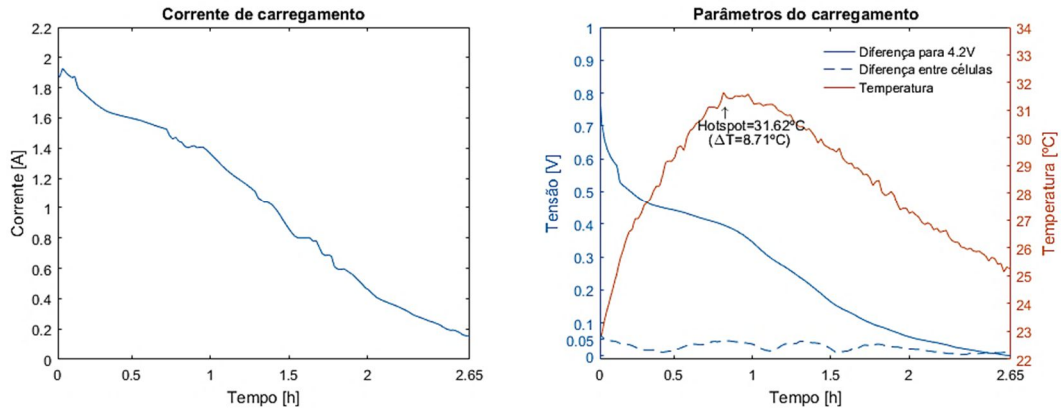


Figura 7.14: Perfil de corrente e parâmetros do carregamento, caso de estudo 2.

A Figura 7.15 apresenta as tensões individuais das células para o caso de estudo 2. Como referido anteriormente, é visível um maior desequilíbrio neste ensaio que no anterior. No entanto, o carregamento é igualmente concluído com sucesso, com um desequilíbrio entre células de 0.01V. Este facto comprova a capacidade de o algoritmo proposto lidar com elevados desequilíbrios, perdendo, no entanto, eficiência a nível de tempo de carregamento. Também para este caso de estudo, é apresentado um correto perfil da tensão para todas as células.

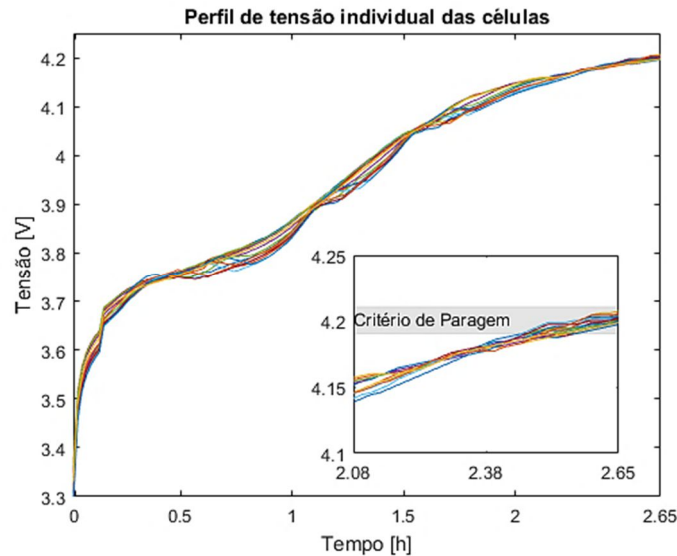


Figura 7.15: Perfil de tensão individual das células, caso de estudo 2.

A Figura 7.16 apresenta os dados relativos ao processo de balanceamento para o caso de estudo 2. Tal como no ensaio anterior, também neste é visível uma maior presença de balanceamento na fase final do carregamento. No fim do carregamento é evidenciado um perfil distinto do caso anterior. Neste caso de estudo, primeiramente foi cumprida a condição que desativa o balanceamento. De seguida, o desequilíbrio entre células aumentou deixando assim de se verificar a condição, passando a balancear todas as células com tensão igual ou superior a 4.2V.

Através de um correto balanceamento, o desequilíbrio foi novamente reduzido, verificando-se os critérios de paragem pré-estabelecidos, concluindo-se com sucesso o carregamento.

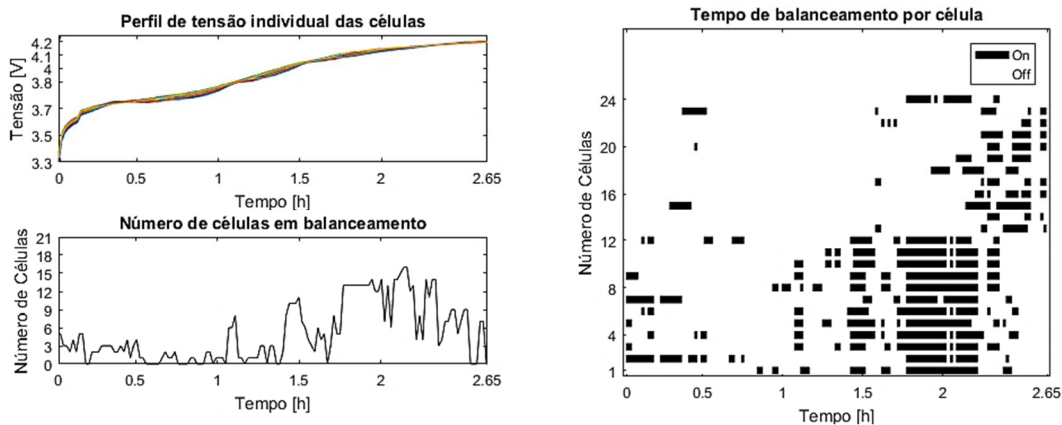


Figura 7.16: Perfil de tensão individual das células, número de células em balanceamento e tempo de balanceamento por célula, caso de estudo 2.

Por último são apresentados os dados relativos ao estado de carga, na Figura 7.17. Também para este caso de estudo se verifica uma correta estimação do SOC, concluindo-se o carregamento com um erro de 0.14%. O facto de que para ambos os casos de estudo, a estimação do estado de carga foi concluída com erros desprezáveis, permite validar o algoritmo proposto para estimação do SOC no período de carga. Analisando o gráfico relativo à tensão vs. SOC é mais uma vez visível uma correspondência quase perfeita entre os 4.2V e o SOC unitário.

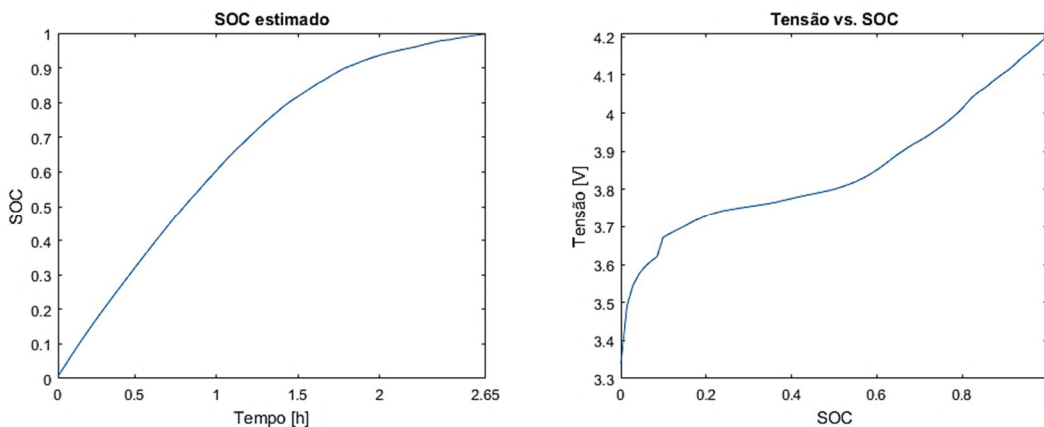


Figura 7.17: Perfil do SOC e da tensão vs. SOC ao longo do carregamento, caso de estudo 2.

7.2.3. Análise da Eficiência do Algoritmo LUT com Interpolação Trilinear

Com o objetivo de obter uma análise da eficiência do algoritmo proposto, foi implementado o método *Multistage* tradicional, para as mesmas condições (condições iniciais, critérios de paragem e critérios de balanceamento). Foram seleccionados cinco patamares de corrente, com valores de corrente de 2.5A, 1.25A, 0.6A, 0.3A e 0.15A. O critério de transição entre patamares

utilizado, é uma vez mais o tradicional, ou seja, a transição é realizada quando uma célula atinge a tensão de 4.2V.

A Figura 7.18 ilustra o perfil de corrente de carregamento e os parâmetros analisados ao longo do carregamento. Assim, é visível que o algoritmo transita do primeiro nível de corrente para o quarto. Isto ocorre devido ao facto das tensões das células excederem os 4.2V e não descenderem imediatamente desse valor. Ou seja, após a primeira transição entre patamares de corrente, a tensão das células mantém-se superior a 4.2V ao longo de 3.5 minutos; durante este período o algoritmo transita entre patamares de corrente. Ao fim dos 3.5 minutos, a corrente encontra-se no quarto patamar. Este fenómeno ocorre devido às células terem sido sujeitas a um reduzido número de ciclos de carga/descarga, tendo por isso uma baixa resistência interna, resultando na não existência de variações instantâneas na tensão. Neste ensaio é visível uma ligeira degradação quando comparado com o ensaio realizado para o mesmo algoritmo na secção 7.1.3. Ou seja, no ensaio anteriormente apresentado a corrente transitava do primeiro patamar para o último, com apenas uma iteração nos patamares intermédios. Neste ensaio a corrente transitou entre o primeiro patamar e o quarto, o que significa que existe uma variação na tensão das células superior à existente no ensaio anterior. Este facto justifica uma ligeira degradação das células.

Um outro detalhe de grande importância é o aumento de temperatura do *pack*. Devido ao elevado tempo de carregamento com correntes altas, a temperatura atinge valores de risco (39.86°C), correspondentes a um gradiente de 17.07°C. Este facto é importante, uma vez que são atingidas temperaturas de risco sem que o algoritmo as tenha em consideração. Por outro lado, o desequilíbrio entre células é reduzido ao longo de todo o processo de carregamento.

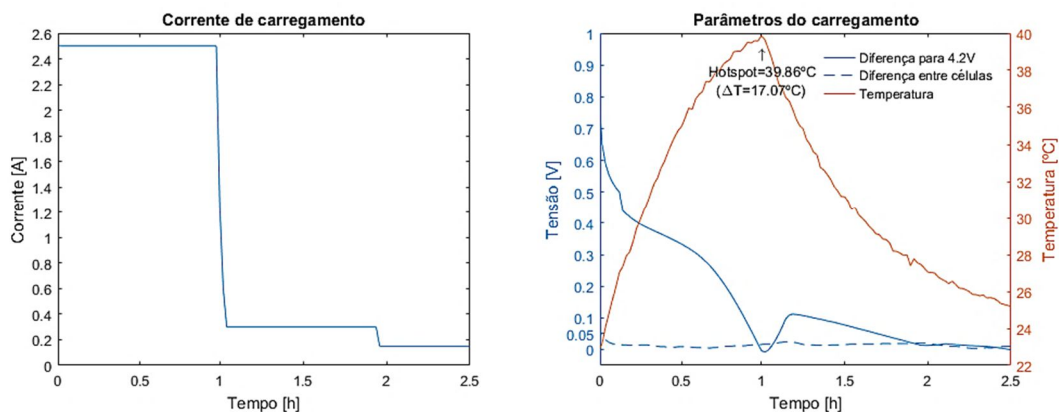


Figura 7.18: Perfil de corrente e parâmetros do carregamento, algoritmo *Multistage* tradicional.

Na Figura 7.19 são apresentadas as tensões individuais das células ao longo de todo o carregamento. Tal como referido anteriormente, é perceptível nesta figura a presença de reduzidos desequilíbrios durante o carregamento, terminando-o dentro dos critérios de paragem (desequilíbrio de 0.01V). A cerca da 1 hora após o início do carregamento é visível o

momento da transição entre patamares de corrente, provocando a sua descida acentuada, ainda que não seja imediata. A partir da 1ª hora, o carregamento decorreu como previsto, apenas sendo de referir a presença de uma célula a provocar um pequeno desequilíbrio, sendo este posteriormente anulado.

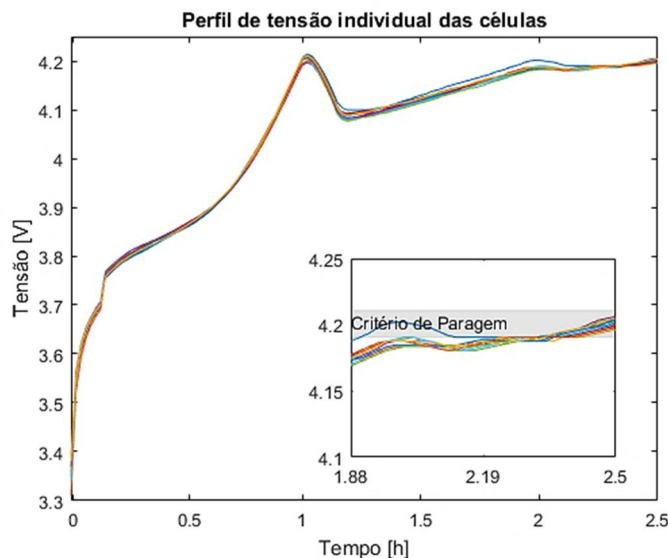


Figura 7.19: Perfil de tensão individual das células, algoritmo *Multistage* tradicional.

A Figura 7.20 apresenta os dados relativos ao balanceamento para o algoritmo *Multistage* tradicional. Através dos gráficos da figura é evidente um elevado número de células a balancear à 1 hora de carregamento. Este fenómeno ocorre devido a nesse instante ocorrer a transição entre patamares e por isso a grande maioria das células apresenta tensões superiores a 4.2V. Deste modo, é verificada a condição responsável por ativar o balanceamento para as células com tensão igual ou superior a 4.2V. No fim do carregamento, é perceptível um período em que não existiu qualquer célula em balanceamento (9.33 minutos). Isto ocorre devido a que no referido período do carregamento seja cumprida a condição de balanceamento responsável pela anulação do mesmo. Ou seja, neste período o desequilíbrio entre células era inferior a 0.01V e a diferença entre a tensão desejada e a média das tensões das células era também inferior a 0.01V. Deste modo, o balanceamento é interrompido e é necessário aguardar que a média das tensões atinja os 4.2V.

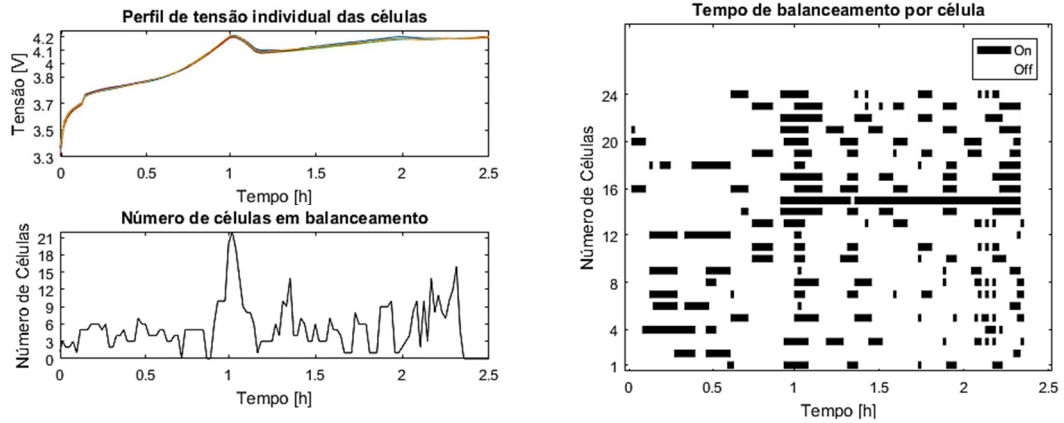


Figura 7.20: Perfil de tensão individual das células, número de células em balanceamento e tempo de balanceamento por célula, algoritmo *Multistage* tradicional.

A Figura 7.21 ilustra o perfil do SOC durante o carregamento e a média das tensões das células vs. SOC. Também para este algoritmo de carregamento é comprovada uma correta estimação do SOC, terminando o carregamento com um erro de 0.59%. Quando comparado com os anteriormente apresentados, este apresenta um maior declive até à 1^a hora de carregamento, devido às elevadas correntes. Perto deste instante de carregamento, o SOC encontrava-se a 0.9, aumentando lentamente durante o restante processo, devido às correntes serem reduzidas. Analisando o gráfico da média das tensões vs. SOC podem retirar-se as conclusões apresentadas anteriormente. À tensão de 4.2V (1^a hora de carregamento), o SOC está a cerca de 0.9; durante o restante processo, este aumenta até ao valor unitário, com o erro anteriormente referido.

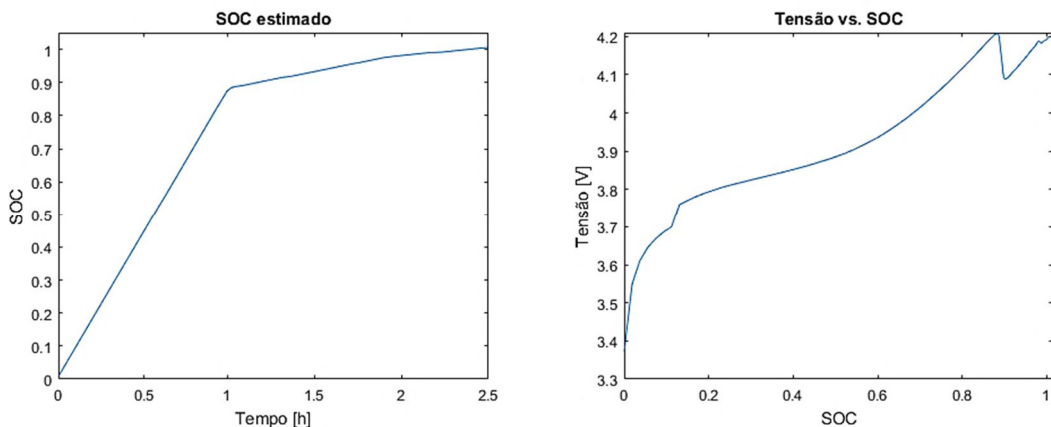


Figura 7.21: Perfil do SOC e da tensão vs. SOC ao longo do carregamento, algoritmo *Multistage* tradicional.

Para uma análise mais direta da eficiência do algoritmo LUT com Interpolação Trilinear, são apresentados na Tabela 7.2 os dados de maior importância obtidos durante o carregamento. Para esta comparação, é utilizado o caso de estudo 1 com a aplicação do algoritmo proposto.

Tabela 7.2: Análise comparativa entre o algoritmo *Multistage* tradicional e o algoritmo LUT com Interpolação Trilinear.

Função	Tempo de carregamento	Desequilíbrio entre células no fim do carregamento	Aumento de temperatura
Algoritmo <i>Multistage</i> tradicional	2.5h	0.01V	17.07°C
Algoritmo LUT com Interpolação Trilinear	2.48h	0.0086V	10.47°C

Por análise da Tabela 7.2 pode-se concluir que a grande vantagem da aplicação do algoritmo proposto é o menor aumento de temperatura. O algoritmo proposto apresenta uma redução de 38.6% quando comparado com o *Multistage* tradicional. Os tempos de carregamento são idênticos, tal como o desequilíbrio entre células. Importa ainda referir que o critério de transição entre patamares do algoritmo *Multistage* apresenta problemas para células com reduzidos números de ciclos, como explicado anteriormente. Este problema origina um período de sobrecarga nas células, o que conjugado com as elevadas temperaturas atingidas resulta numa diminuição do tempo de vida útil do *pack* de baterias. Este problema não se verifica para o algoritmo proposto.

Importa ainda referir que, a LUT do algoritmo proposto foi construída tendo por base um *trade-off* entre o tempo de carregamento e a degradação do tempo de vida útil das células. No entanto, esta permite uma otimização no tempo de carregamento, resultando em temperaturas mais elevadas e consequentemente numa redução do tempo de vida útil das células.

7.3. Algoritmo Baseado em Redes Neurais

Com o objetivo de testar o algoritmo proposto, foram utilizadas 24 células SAMSUNG ICR18650-26H 2600mAh [72].

A Figura 7.22 apresenta o perfil da corrente de carregamento e a variação dos parâmetros ao longo do processo de carregamento (temperatura do *pack*, diferença entre a tensão desejada e a média das tensões das células e desequilíbrio entre células). No início do carregamento a corrente apresenta um valor de 1.64A devido à presença de um desequilíbrio substancial entre células (0.07V). Após 4.67 minutos a corrente atingiu o valor máximo (2.18A) devido à redução do referido desequilíbrio (neste instante é de 0.03V). Durante o restante carregamento é visível um perfil bastante oscilatório na corrente. Este facto é justificado pelas variações no desequilíbrio entre células. Quando ocorre um aumento do desequilíbrio ocorre uma diminuição da corrente e vice-versa. O facto da corrente oscilar ao longo do carregamento constitui uma vantagem em termos de eficiência no tempo de carregamento, uma vez que esta acompanha o

estado atual do *pack*. Apesar dos elevados desequilíbrios presentes em todo o carregamento, estes são reduzidos no final do mesmo, terminando o processo com um desequilíbrio de 0.01V. A diferença entre a tensão desejada e a média das tensões das células apresenta o perfil espectável, isto é, com uma redução progressiva até ao fim do carregamento, tendo um maior declive quando as correntes de carregamento são mais elevadas. Por outro lado, a temperatura também não apresenta valores de risco para a bateria, uma vez que, atinge o valor máximo de 33.59°C, correspondente a um gradiente de 9.28°C.

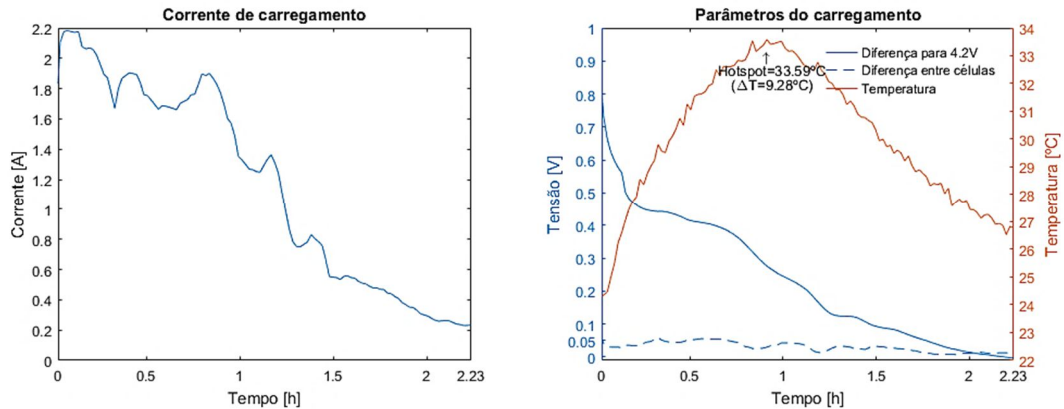


Figura 7.22: Perfil de corrente e parâmetros do carregamento.

A Figura 7.23 apresenta as tensões individuais das células ao longo do carregamento. Tal como referido anteriormente, é também visível a presença de grandes oscilações no desequilíbrio entre células, sendo que no fim do carregamento estes desequilíbrios são reduzidos. É também evidente o facto do declive relativo ao aumento das tensões ir reduzindo com o decorrer do carregamento, devido à redução da corrente e às tensões atingirem valores onde o seu aumento é mais lento. Como ilustrado no *zoom* da Figura 7.20 o carregamento é concluído com sucesso, cumprindo assim os critérios de paragem pré-estabelecidos (média das tensões das células de 4.203V e um desequilíbrio entre células de 0.01V).

A Figura 7.24 apresenta os dados relativos ao balanceamento das células efetuado ao longo do carregamento. A partir de cerca das 1.5 horas de carregamento houve um acréscimo no número de células com balanceamento ativo, justificado pelo facto do balanceamento ser mais eficaz no topo do carregamento. Até às 1.5 horas ocorreu um reduzido balanceamento, uma vez que este é pouco eficaz e apenas é realizado para atenuar e precaver maiores desequilíbrios. A partir desse instante, com a necessidade de reduzir o desequilíbrio no fim do carregamento, a rede neuronal tornou o balanceamento mais exigente, resultando num aumento do número de células com balanceamento ativo. Devido ao facto do balanceamento ser mais eficaz no topo e também devido às correntes de carregamento serem menores, o desequilíbrio é anulado com sucesso, como ilustrado na Figura 7.20. No fim do carregamento, todas as células entraram em balanceamento; este fenómeno é importante para que a tensão nas células não se eleve acima

dos 4.2V, ou seja, quando uma determinada célula atinge os 4.2V é forçada a entrar em balanceamento.

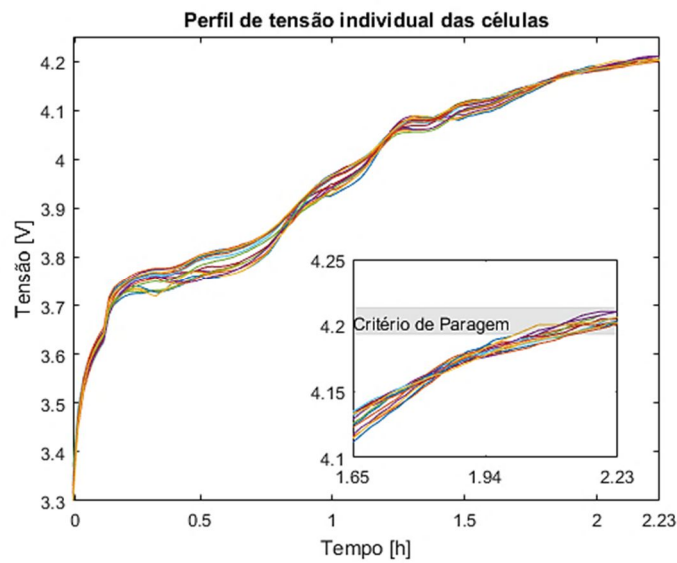


Figura 7.23: Perfil de tensão individual das células.

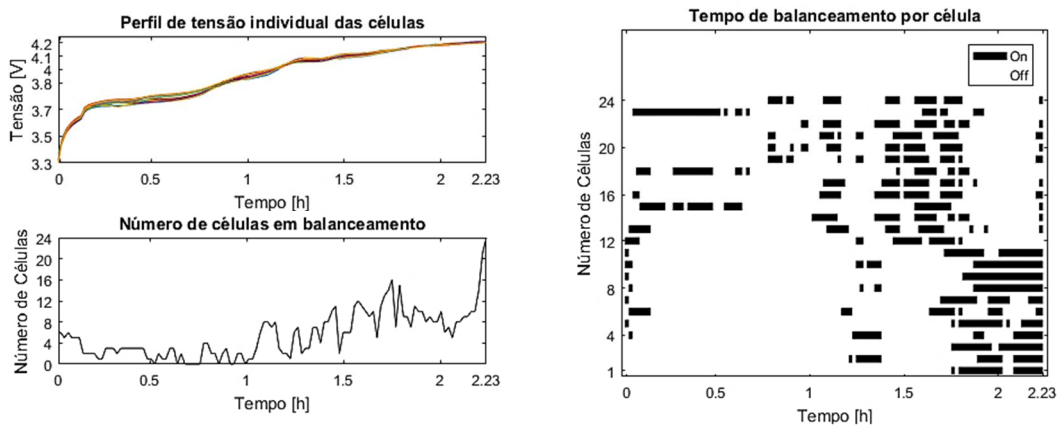


Figura 7.24: Perfil de tensão individual das células, número de células em balanceamento e tempo de balanceamento por célula.

Por último, a Figura 7.25 apresenta os dados relativos ao estado de carga do *pack* de baterias. Para uma validação dos resultados obtidos através do algoritmo proposto, estes são comparados com os resultados obtidos pelo método de *Coulomb* tradicional. Assim, verifica-se uma melhor estimacão por parte do algoritmo proposto, este facto é justificado pelo método de *Coulomb* tradicional não ter em conta a energia dissipada no balanceamento (apenas considera a energia fornecida). O algoritmo conclui a estimacão do SOC com o valor 0.996, correspondente a um erro de 0.4%. Jo o método de *Coulomb* conclui o processo com o valor 1.031, correspondente a um erro de 3.1%. Assim, comprova-se que o algoritmo utilizado neste trabalho apresenta

melhores resultados. Através da análise do gráfico que relaciona a tensão com o SOC, são mais uma vez comprovados os melhores resultados obtidos pelo algoritmo proposto.

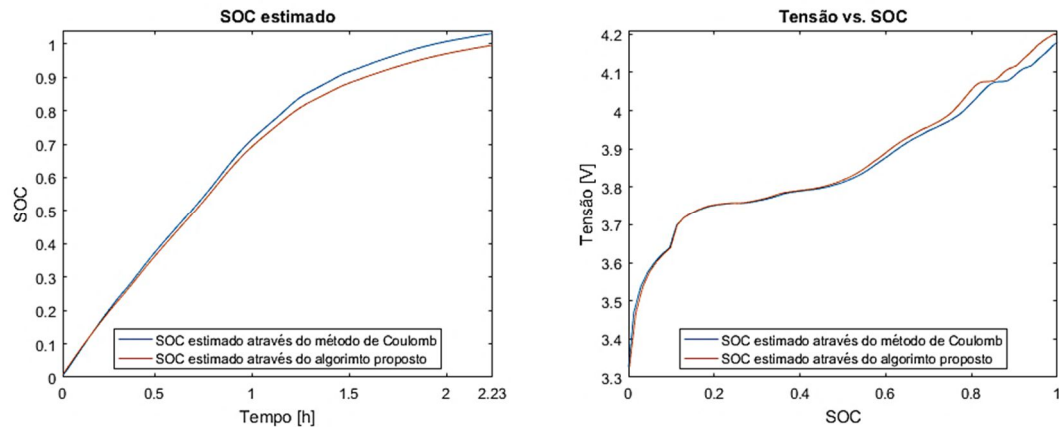


Figura 7.25: Perfil do SOC e da tensão vs. SOC ao longo do carregamento para o algoritmo proposto e o método tradicional de Coulomb.

7.3.1. Análise da Eficiência do Algoritmo Baseado em Rede Neurais

Para obter uma análise da eficiência do algoritmo proposto, os resultados obtidos são comparados com o método *Multistage* tradicional. A comparação é realizada nas mesmas condições que as do ensaio anterior (condições iniciais, critérios de paragem e algoritmo de balanceamento).

A Figura 7.26 apresenta o perfil da corrente de carregamento e os parâmetros de carregamento ao longo de todo o processo. Através da análise do primeiro gráfico é visível um comportamento semelhante ao do algoritmo *Multistage* apresentado na comparação efetuada na secção 7.2.3. No entanto, neste ensaio ocorreu um maior desequilíbrio entre células e a temperatura atingiu os 38.69°C, correspondentes a um gradiente de 13.84°C.

As tensões individuais das células ao longo do carregamento são apresentadas na Figura 7.27. É perceptível um maior desequilíbrio entre células entre cerca das 0.175 e as 0.506 horas. No restante tempo de carregamento, o desequilíbrio manteve-se baixo, concluindo-se o carregamento de acordo com os critérios de paragem (média das tensões de 4.2021V e desequilíbrio entre células de 0.01V).

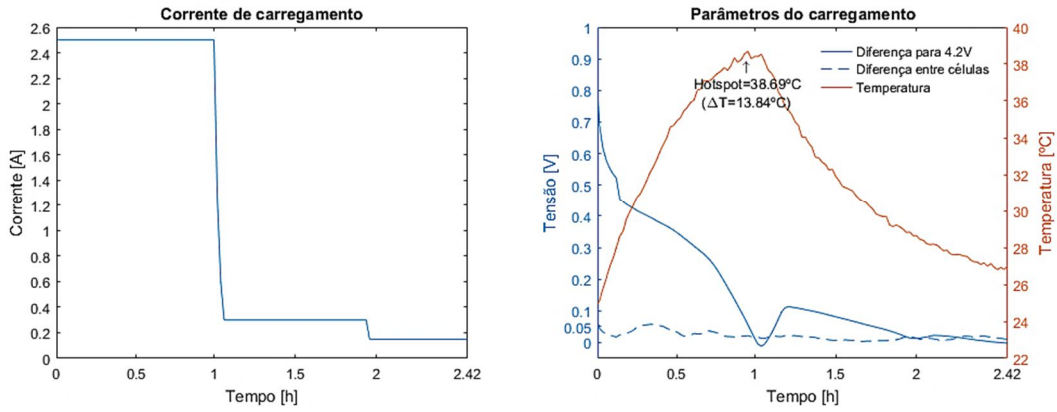


Figura 7.26: Perfil de corrente e parâmetros do carregamento, *Multistage* tradicional.

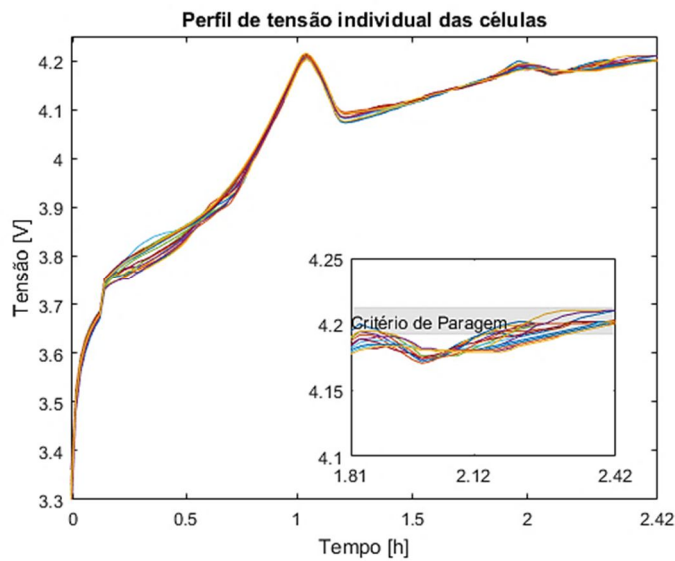


Figura 7.27: Perfil de tensão individual das células, *Multistage* tradicional.

Por último a Figura 7.28 apresenta os dados relativos ao balanceamento das células. Tal como esperado, no momento da transição entre patamares todas as células entram em balanceamento, devido ao facto de todas elas excederem a tensão de 4.2V. A partir da primeira transição entre patamares é visível um aumento do número de células em balanceamento. Este comportamento está de acordo com as premissas requeridas no treino da rede (balanceamento mais exigente no topo do carregamento). No fim do processo, todas as células entram novamente em balanceamento, devido a, tal como na primeira transição, excederem os 4.2V.

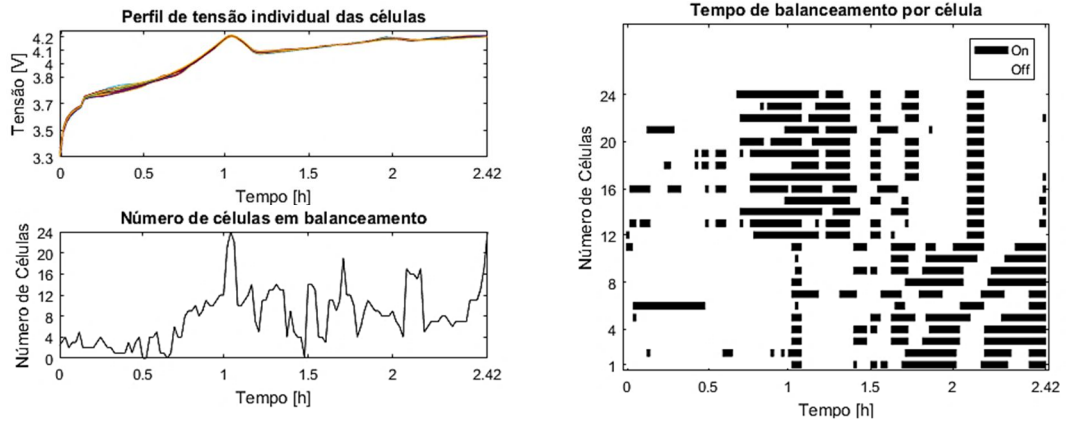


Figura 7.28: Perfil de tensão individual das células, número de células em balanceamento e tempo de balanceamento por célula, *Multistage* tradicional.

A Tabela 7.3 apresenta a comparação entre a eficiência do algoritmo proposto e o algoritmo *Multistage* tradicional.

Tabela 7.3: Análise comparativa entre o algoritmo *Multistage* tradicional e o algoritmo baseado em Redes Neurais.

Função	Tempo de carregamento	Desequilíbrio entre células no fim do carregamento	Aumento de temperatura
Algoritmo <i>Multistage</i> tradicional	2.42h	0.01V	13.84°C
Algoritmo baseado em Redes Neurais	2.23h	0.01V	9.28°C

Através da análise da Tabela 7.3 é perceptível uma melhor eficiência do algoritmo proposto. O algoritmo descrito proporciona uma redução de 10.8% no tempo de carregamento quando comparado com o método *Multistage* tradicional. O desequilíbrio entre células no fim do carregamento apresenta o mesmo valor para ambos os algoritmos, sendo que ambos terminam o carregamento dentro dos critérios de paragem. Relativamente ao aumento de temperatura, o algoritmo proposto permite uma redução de 45.64%. Deste modo, este algoritmo apresenta resultados excelentes, uma vez que se consegue uma redução no tempo de carregamento, com uma redução bastante significativa no aumento de temperatura. Assim, para além das referidas vantagens, obtém-se ainda uma menor degradação da condição das baterias e consequentemente uma maior longevidade das mesmas.

Capítulo 8

Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo são apresentadas as conclusões finais obtidas ao longo do trabalho exposto neste documento. São ainda apresentadas algumas ideias acerca de possíveis trabalhos futuros nesta temática.

8.1. Considerações Finais

O trabalho de investigação realizado e descrito neste documento conduz ao desenvolvimento de uma plataforma, na qual é possível desenvolver métodos de carregamento que incluam o balanceamento para sistemas de armazenamento baseados em baterias de íons de Lítio. Este pode ser dividido em duas fases: uma primeira em que foi desenvolvido todo o *hardware* e *software* necessários para o desenvolvimento da plataforma e uma segunda fase em que foram desenvolvidos algoritmos de carregamento que incluam o balanceamento. Através deste trabalho foi possível retirar diversas conclusões de grande importância para o desenvolvimento de algoritmos de balanceamento e carregamento.

Uma das conclusões primeiramente retiradas neste trabalho tem a ver com o facto de ser de extrema importância possuir uma monitorização constante do *pack* de baterias. A falta de comunicação entre o BMS e o carregador fornece uma falsa sensação de segurança, podendo originar a danificação do *pack*. O carregador por si só, sem conhecimento das tensões das células, é uma solução que, de certa forma, negligencia a proteção.

Relativamente à metodologia de balanceamento utilizada neste trabalho, conclui-se que esta, apesar de ser a que apresenta melhor relação entre os vários parâmetros, apresenta ainda algumas desvantagens. Devido ao facto de se tratar de uma metodologia passiva, em que a energia em excesso nas células não é transferida para as células com menor energia, mas apenas dissipada na forma de calor, esta apresenta baixa eficiência.

Ainda relativamente ao balanceamento, este é bastante mais eficaz no topo do carregamento. No entanto, este torna-se importante ao longo de todo o carregamento para que pequenos

desequilíbrios consigam ser minimizados ou pelo menos que estes se mantenham estáveis. Importa ainda referir que nos algoritmos de estimação do estado de carga, a energia dissipada pelo balanceamento tem que ser tida em conta. Assim, para uma correta estimação do SOC é necessário subtrair ao SOC total a energia que foi sendo dissipada ao longo do carregamento, para que no fim se obtenha uma estimação com o menor erro possível. Caso a referida energia não seja considerada, o SOC final irá ser consideravelmente superior ao valor unitário, dependendo da presença de balanceamento durante o carregamento.

No que diz respeito aos algoritmos de carregamento também várias conclusões podem ser obtidas com o trabalho realizado. Primeiramente e focando os métodos de carregamento presentes na literatura, o método *Multistage* tradicional apresenta diversos problemas. Este, quando testado para células com reduzido número de ciclos de carga/descarga, origina períodos de excesso de tensão nas células. Este fenómeno ocorre devido ao facto de células com reduzido número de ciclos terem uma resistência interna baixa e assim não sofrerem variações instantâneas na tensão. Com o critério tradicional de transição entre patamares de corrente, em que a transição ocorre quando uma determinada célula atinge a tensão de 4.2V, as células ficam sujeitas a períodos de sobretensão, já que a tensão não cai imediatamente com a transição entre patamares de corrente. Para além deste problema, também o facto de este método impor às células elevadas correntes durante longos períodos, ocorrem grandes aumentos na temperatura do *pack*, o que resulta numa degradação do tempo de vida das células.

Com o objetivo de anular os problemas apresentados, foi desenvolvido o algoritmo *Multistage* Adaptativo, em que a transição entre patamares é efetuada tendo em conta o erro entre a tensão desejada e as tensões das células. Assim o problema da sobretensão foi anulado e também a temperatura apresenta aumentos menores devido ao menor tempo de carregamento a correntes elevadas.

No entanto, aquando do desenvolvimento do algoritmo anteriormente referido, foi perceptível a necessidade de ser o próprio algoritmo a determinar a corrente de carregamento a cada instante, tendo por base o estado atual do *pack*. Este conceito apresenta uma inovação nos métodos descritos na literatura, uma vez que a corrente deixa de ser influenciada com base em condições pré-estabelecidas, passando a ter em conta os parâmetros atuais das células. Assim, ambos os algoritmos de carregamento desenvolvidos posteriormente ao algoritmo *Multistage* Adaptativo, apresentam ainda a vantagem de permitirem ao utilizador dar um maior privilégio ou ao tempo de carregamento, ou ao tempo de vida útil da bateria. Importa ainda referir a utilização do algoritmo PSO para treinar as redes do último algoritmo desenvolvido. Este procedimento tem uma maior complexidade quando utilizado para treinar redes com uma arquitetura em cascata.

Os três algoritmos propostos neste trabalho apresentam diversas vantagens relativamente aos já existentes na literatura, quer a nível de tempo de carregamento, quer a nível do menor aumento de temperatura e conseqüentemente numa menor degradação da condição do *pack*, resultando numa maior longevidade do mesmo.

Por último conclui-se que é essencial desenvolver e implementar algoritmos de carregamento que incorporem metodologias de balanceamento, com o objetivo de tornar o carregamento mais eficaz, aumentando também a eficiência do sistema de armazenamento em causa.

8.2. Trabalhos Futuros

Os resultados obtidos e a experiência adquirida ao longo do desenvolvimento deste trabalho permitem propor por um lado melhorias necessárias relativamente à plataforma implementada, por outro lado, diferentes abordagens no âmbito do tema estudado:

- Desenvolvimento de novas placas *plug-play*, com o objetivo de se obter um sistema integrado;
- Estudo e desenvolvimento de métodos de carregamento num contexto AC que incluam metodologias de balanceamento;
- Estudo e implementação de outro tipo de metodologias de balanceamento, dando especial atenção às topologias dinâmicas;
- Estudo mais detalhado dos vários parâmetros das células e quais as variações e influências durante o processo de carregamento.

A continuidade deste trabalho revela-se de extrema importância na aquisição de um maior conhecimento acerca do tema. É essencial alargar os conhecimentos numa área tão atual, continuando a analisar e estudar as diversas abordagens possíveis.

Referências Bibliográficas

- [1] S. Murtaza, J. Maqsood, M. Q. Baig, S. Ashraf, and T. A. Khan, "Comparison of Characteristics - Lead Acid , Nickel Based , Lead Crystal and Lithium Based Batteries," in *17th UKSIM-AMSS International Conference on Modelling and Simulation*, 2015, pp. 444-450.
- [2] H. Lopes, R. Garde, G. Fulli, W. Kling, and J. Pecas, "Characterisation of Electrical Energy Storage Technologies," *Energy*, vol. 53, pp. 288-298, 2013.
- [3] D. Andrea, *Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs*, 1st ed. 2010.
- [4] K. Lahiri, A. Raghunathan, S. Dey, and D. Panigrahi, "Battery-Driven System Design: A New Frontier in Low Power Design," in *Design Automation Conference, 2002. Proceedings of ASP-DAC 2002. 7th Asia and South Pacific and the 15th International Conference on VLSI Design. Proceedings.*, 2002, pp. 261-267.
- [5] A. Al-Haj Hussein and I. Batarseh, "A review of charging algorithms for nickel and lithium battery chargers," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 3, pp. 830-838, 2011.
- [6] B. University, "What's the Best Battery?," 2017. [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/archive/whats_the_best_battery. [Accessed: 13-Jun-2017].
- [7] Molicel, "Li-ion cell V.S. others." [Online]. Available: <http://www.molicel.com/hq/knowledge/knowledge1.html>. [Accessed: 13-Jun-2017].
- [8] C. Zhang, K. Li, S. Mcloone, and Z. Yang, "Battery Modelling Methods for Electric Vehicles - A Review," in *2014 European Control Conference (ECC)*, 2014, pp. 2673-2678.
- [9] M. Doyle, T. Fuller, and J. Newman, "Modeling of Galvanostatic Charge and Discharge of the Lithium/Polymer/Insertion Cell," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 140, no. 6, p. 1526, 1993.
- [10] J. Fuller, Thomas F. Doyle, Marc. Newman, "Simulation and Optimization of the Dual Lithium Ion Insertion Cell," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 141, no. 1, pp. 1-10, 1994.
- [11] V. Rao, G. Singhal, A. Kumar, and N. Navet, "Battery Model for Embedded Systems," in *18th International Conference on VLSI Design held jointly with 4th International Conference on Embedded Systems Design*, 2005, pp. 105-110.
- [12] D. Panigrahi T, D. Panigrahi, C. Chiasserini, S. Dey, R. Rao, A. Raghunathan, and K. Lahiri, "Battery Life Estimation of Mobile Embedded Systems," in *VLSI Design 2001. Fourteenth International Conference on VLSI Design*, 2001, pp. 57-63.
- [13] C. Chiasserini and R. Rao, "Pulsed Battery Discharge in Communication Devices," in *ACM Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, 1999, pp. 88-95.
- [14] C. F. Chiasserini and R. R. Rao, "A Model for Battery Pulsed Discharge with Recovery Effect," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC*, 1999, pp. 636-639.

- [15] M. R. Jongerden and B. R. Haverkort, "Which Battery Model to Use?," *IET Softw.*, vol. 3, no. 6, pp. 445-457, 2010.
- [16] M. Chen and G. A. Rincón-Mora, "Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 21, no. 2, pp. 504-511, 2006.
- [17] Z. M. Salameh, M. a. Casacca, and W. a. Lynch, "A Mathematical Model for Lead-Acid Batteries," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 7, no. 1, pp. 93-98, 1992.
- [18] M. Valvo, F. E. E. Wicks, D. Robertson, and S. Rudin, "Development and Application of an Improved Equivalent Circuit Model of a Lead Acid Battery," in *IECEC 96. Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 1996, vol. 2, pp. 1159-1163.
- [19] L. Gao, S. Liu, and R. A. Dougal, "Dynamic Lithium-Ion Battery Model for System Simulation," *IEEE Trans. Components Packag. Technol.*, vol. 25, no. 3, pp. 495-505, 2002.
- [20] M. Ceraolo, "New Dynamical Models of Lead-Acid Batteries," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 4, pp. 1184-1190, 2000.
- [21] M. C. Glass, "Battery Electrochemical Nonlinear/Dynamic SPICE Model," in *IECEC 96. Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 1996, vol. 1, pp. 292-297.
- [22] S.-Y. Cho, I.-O. Lee, J.-I. Baek, and G.-W. Moon, "Battery Impedance Analysis Considering DC Component in Sinusoidal Ripple-Current Charging," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 3, pp. 1-12, 2016.
- [23] G. Instruments, "Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy."
- [24] K. Van Berlo, "Electrical Impedance Spectroscopy of the Water/Nitrobenzene Interface," Utrecht, 2014.
- [25] L. R. Chen, S. L. Wu, D. T. Shieh, and T. R. Chen, "Sinusoidal-Ripple-Current Charging Strategy and Optimal Charging Frequency Study for Li-Ion Batteries," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 1, pp. 88-97, 2013.
- [26] A. A. Hussein, A. A. Fardoun, and S. S. Stephen, "An Online Frequency Tracking Algorithm Using Terminal Voltage Spectroscopy for Battery Optimal Charging," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 1, pp. 32-40, 2016.
- [27] S. Wu, H. Chen, S. Chou, and P. City, "Fast Estimation of State of Charge for Lithium-Ion Batteries," *Energies*, vol. 7, pp. 3438-3452, 2014.
- [28] M. Abdel, K. Trad, N. Omar, O. Hegazy, B. Mantels, G. Mulder, P. Van Den Bossche, and J. Van Mierlo, "Lithium-ion batteries: Evaluation study of different charging methodologies based on aging process," *Appl. Energy*, vol. 152, pp. 143-155, 2015.
- [29] T. Hang, D. Mukoyama, H. Nara, N. Takami, T. Momma, and T. Osaka, "Electrochemical impedance spectroscopy analysis for lithium-ion battery using Li₄Ti₅O₁₂ anode," *J. Power Sources*, vol. 222, pp. 442-447, 2013.
- [30] T. Momma, M. Matsunaga, D. Mukoyama, and T. Osaka, "Ac impedance analysis of

-
- lithium ion battery under temperature control,” *J. Power Sources*, vol. 216, pp. 304-307, 2012.
- [31] J. Gomez, R. Nelson, E. E. Kalu, M. H. Weatherspoon, and J. P. Zheng, “Equivalent circuit model parameters of a high-power Li-ion battery: Thermal and state of charge effects,” *J. Power Sources*, vol. 196, no. 10, pp. 4826-4831, 2011.
- [32] L. Co and O. Mn, “Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Study of LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O₂ for Li-ion Batteries,” *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 7, pp. 345-353, 2012.
- [33] T. Osaka, T. Momma, D. Mukoyama, and H. Nara, “Proposal of novel equivalent circuit for electrochemical impedance analysis of commercially available lithium ion battery,” *J. Power Sources*, vol. 205, pp. 483-486, 2012.
- [34] J. Kim, J. Shin, C. Chun, and B. H. Cho, “Stable Configuration of a Li-Ion Series Battery Pack Based on a Screening Process for Improved Voltage / SOC Balancing,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 1, pp. 411-424, 2012.
- [35] M. Daowd, N. Omar, P. van den Bossche, and J. van Mierlo, “A review of passive and active battery balancing based on MATLAB/Simulink,” *Int. Rev. Electr. Eng.*, vol. 6, no. 7, pp. 2974-2989, 2011.
- [36] F. Baronti, R. Roncella, and R. Saletti, “Performance comparison of active balancing techniques for lithium-ion batteries,” *J. Power Sources*, vol. 267, pp. 603-609, 2014.
- [37] J. Gallardo-Lozano, E. Romero-Cadaval, M. I. Milanés-Montero, and M. A. Guerrero-Martinez, “Battery equalization active methods,” *J. Power Sources*, vol. 246, pp. 934-949, 2014.
- [38] J. Qi and D. Dah-Chuan Lu, “Review of Battery Cell Balancing Techniques,” in *2014 Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2014 - Proceedings*, 2014, pp. 1-6.
- [39] J. Cao, N. Schofield, and A. Emadi, “Battery balancing methods: A comprehensive review,” *2008 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2008*, pp. 3-8, 2008.
- [40] W. C. Lee, D. Drury, and P. Mellor, “Comparison of Passive Cell Balancing and Active Cell Balancing for Automotive Batteries,” in *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2011*, 2011.
- [41] M.-Y. Kim, C.-H. Kim, J.-H. Kim, and G.-W. Moon, “A Chain Structure of Switched Capacitor for Improved Cell Balancing Speed of Lithium-Ion Batteries,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 8, pp. 3989-3999, Aug. 2014.
- [42] Y. Ye and K. W. E. Cheng, “Modeling and Analysis of Series-Parallel Switched-Capacitor Voltage Equalizer for Battery/Supercapacitor Strings,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 3, no. 4, pp. 977-983, 2015.
- [43] Y. Ye and K. W. E. Cheng, “An automatic switched-capacitor cell balancing circuit for series-connected battery strings,” *Energies*, vol. 9, no. 3, 2016.
- [44] J.-H. L. Hong-Sun Park, Chol-Ho Kim, Ki-Bum Park, Gun-Woo Moon, “Design of a Charge Equalizer Based on BatteryModularization,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 7,

- 2009.
- [45] K. Zhi-Guo, Z. Chun-Boo, L. Ren-Gui, and C. Shu-Kang, "Comparison and Evaluation of Charge Equalization Technique for Series Connected Batteries," in *Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06. 37th IEEE, 2006.*
- [46] H. Park, S. Member, C. Kim, C. Kim, S. Member, G. Moon, and J. Lee, "A Modularized Charge Equalizer for an HEV Lithium-Ion Battery String," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 5, pp. 1464-1476, 2009.
- [47] S. R. Raman, X. D. Xue, and K. W. E. Cheng, "Review of Charge Equalization Schemes for Li-ion Battery and Super-Capacitor Energy Storage Systems," in *2014 International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications, ICAECC 2014, 2015.*
- [48] A. M. Imtiaz, F. H. Khan, and H. Kamath, "A Low-Cost Time Shared Cell Balancing Technique for Future Lithium-Ion Battery Storage System Featuring Regenerative Energy Distribution," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE, 2011*, pp. 792-799.
- [49] M. M. Ur. Rehman, M. Evzelman, K. Hathaway, R. Zane, G. L. Plett, K. Smith, E. Wood, and D. Maksimovic, "Modular Approach for Continuous Cell-level Balancing to Improve Performance of Large Battery Packs," in *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2014, 2014*, pp. 4327-4334.
- [50] M. M. U. Rehman, F. Zhang, M. Evzelman, R. Zane, and D. Maksimovic, "Control of a Series-input, Parallel-output Cell Balancing System for Electric Vehicle Battery Packs," in *2015 IEEE 16th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2015*, pp. 1-7.
- [51] W. Hong, K.-S. Ng, J.-H. Hu, and C.-S. Moo, "Charge Equalization of Battery Power Modules in Series," in *2010 International Power Electronics Conference Charge, 2010*, pp. 1568-1572.
- [52] T. H. Phung, A. Collet, and J. C. Crebier, "An optimized topology for next-to-next balancing of series-connected lithium-ion cells," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 9, pp. 4603-4613, 2014.
- [53] F. Mestrallet, L. Kerachev, J. C. Crebier, and A. Collet, "Multiphase interleaved converter for lithium battery active balancing," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 2874-2881, 2014.
- [54] C. Young, N. Chu, L.-R. Chen, and Y.-C. Hsiao, "A Single-Phase Multilevel Inverter With Battery Balancing," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 5, pp. 1972-1978, 2013.
- [55] K. Taesic, Q. Wei, and Q. Liyan, "A multicell battery system design for electric and plug-in hybrid electric vehicles," in *Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International, 2012*, pp. 1-7.
- [56] H. Kim and K. G. Shin, "DESA: Dependable, Efficient, Scalable Architecture for Management of Large-Scale Batteries," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 8, no. 2, pp. 406-417, 2012.

-
- [57] W. Shen, T. T. Vo, and A. Kapoor, "Charging algorithms of lithium-ion batteries: An overview," in *2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2012, pp. 1567-1572.
- [58] P. Keil and A. Jossen, "Charging protocols for lithium-ion batteries and their impact on cycle life-An experimental study with different 18650 high-power cells," *J. Energy Storage*, vol. 6, pp. 125-141, 2016.
- [59] A. Al-Haj Hussein and I. Batarseh, "A Review of Charging Algorithms for Nickel and Lithium Battery Chargers," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 3, pp. 830-838, 2011.
- [60] P. H. L. Notten, J. H. G. Op, and J. R. G. Van Beek, "Boostcharging Li-ion batteries : A challenging new charging concept," *J. Power Sources*, vol. 145, pp. 89-94, 2005.
- [61] D. Anseán, M. González, J. C. Viera, V. M. García, C. Blanco, and M. Valledor, "Fast charging technique for high power lithium iron phosphate batteries: A cycle life analysis," *J. Power Sources*, vol. 239, pp. 9-15, 2013.
- [62] L. R. Chen, R. C. Hsu, and C. S. Liu, "A design of a grey-predicted Li-ion battery charge system," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 10, pp. 3692-3701, 2008.
- [63] L.-R. Chen, R. C. Hsu, C. S. Liu, H.-Y. Yang, and N.-Y. Chu, "A Grey-Predicted Li-ion Battery Charge System," in *30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2004, pp. 502-507.
- [64] S. C. Wang and Y. H. Liu, "A PSO-Based Fuzzy-Controlled Searching for the Optimal Charge Pattern of Li-Ion Batteries," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 5, pp. 2983-2993, 2015.
- [65] C. L. Liu, S. C. Wang, S. S. Chiang, Y. H. Liu, and C. H. Ho, "PSO-Based Fuzzy Logic Optimization of Dual Performance Characteristic Indices for Fast Charging of Lithium-Ion Batteries," in *Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, 2013, pp. 474-479.
- [66] L. R. Dung and J. H. Yen, "ILP-based algorithm for lithium-ion battery charging profile," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2010, pp. 2286-2291.
- [67] T. T. Vo, X. Chen, W. Shen, and A. Kapoor, "New charging strategy for lithium-ion batteries based on the integration of Taguchi method and state of charge estimation," *J. Power Sources*, vol. 273, pp. 413-422, 2015.
- [68] M. Yin, J. Cho, and D. Park, "Pulse-Based Fast Battery IoT Charger Using Dynamic Frequency and Duty Control Techniques Based on Multi-Sensing of Polarization Curve," *Energies*, vol. 9, no. 3, p. 209, 2016.
- [69] L.-R. Chen, "A Design of an Optimal Battery Pulse Charge System by Frequency-Variied Technique," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 1, pp. 398-405, Feb. 2007.
- [70] L. R. Chen, "Design of duty-varied voltage pulse charger for improving Li-ion battery-charging response," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 2, pp. 480-487, 2009.
- [71] SANYO, "SANYO Lithium Ion Battery Specifications," 2005.
- [72] SAMSUNG, "Specification of Product for Lithium-ion Rechargeable Cell-Model:ICR18650-26H," 2011.

- [73] M. R. Peyghami and R. Khanduzi, "Predictability and forecasting automotive price based on a hybrid train algorithm of MLP neural network," *Neural Comput. Appl.*, vol. 21, no. 1, pp. 125-132, 2012.
- [74] Q. Tang and D. Gu, "Day-Ahead Electricity Prices Forecasting Using Artificial Neural Networks," in *2009 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence*, 2009, vol. 2, pp. 511-514.
- [75] N. L. D. Khoa, K. Sakakibara, and I. Nishikawa, "Stock price forecasting using back propagation neural networks with time and profit based adjusted weight factors," in *2006 SICE-ICASE International Joint Conference*, 2006, pp. 5484-5488.
- [76] L. Huo, B. Jiang, T. Ning, and B. Yin, "A BP Neural Network Predictor Model for Stock Price," in *Intelligent Computing Methodologies*, vol. 8589, 2014, pp. 362-368.
- [77] H. Quan, D. Srinivasan, and A. Khosravi, "Short-term load and wind power forecasting using neural network-based prediction intervals.," *IEEE Trans. neural networks Learn. Syst.*, vol. 25, no. 2, pp. 303-15, Feb. 2014.
- [78] C. Ren, N. An, J. Wang, L. Li, B. Hu, and D. Shang, "Optimal parameters selection for BP neural network based on particle swarm optimization: A case study of wind speed forecasting," *Knowledge-Based Syst.*, vol. 56, pp. 226-239, Jan. 2014.
- [79] D. Liu, D. Niu, H. Wang, and L. Fan, "Short-term wind speed forecasting using wavelet transform and support vector machines optimized by genetic algorithm," *Renew. Energy*, vol. 62, pp. 592-597, Feb. 2014.
- [80] L. Wang, Y. Zeng, and T. Chen, "Back propagation neural network with adaptive differential evolution algorithm for time series forecasting," *Expert Syst. Appl.*, vol. 42, no. 2, pp. 855-863, 2015.
- [81] R. S. Sexton, R. E. Dorsey, and J. D. Johnson, "Optimization of neural networks: A comparative analysis of the genetic algorithm and simulated annealing," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 114, no. 3, pp. 589-601, May 1999.
- [82] N. Nawari, A. Khan, M. Z. Rehman, T. Herawan, and M. Deris, "Comparing Performances of Cuckoo Search Based Neural Networks," in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2014, vol. 287, pp. 163-172.
- [83] V. Sharma, S. S. Pattnaik, and T. Garg, "A Review of Bacterial Foraging Optimization and Its Applications," in *IJCA Proceedings on National Conference on Future Aspects of Artificial intelligence in Industrial Automation 2012*, 2012, pp. 9-12.
- [84] N. S. Jaddi, S. Abdullah, and A. R. Hamdan, "Optimization of neural network model using modified bat-inspired algorithm," *Appl. Soft Comput.*, vol. 37, pp. 71-86, Dec. 2015.
- [85] D. Stathakis, "How many hidden layers and nodes?," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 30, no. 8, pp. 2133-2147, 2009.
- [86] K. G. Sheela and S. N. Deepa, "Review on methods to fix number of hidden neurons in neural networks," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2013, 2013.
- [87] J. Kennedy and R. Mendes, "Population structure and particle swarm performance," in

Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. CEC'02 (Cat. No.02TH8600), 2002, pp. 1671-1676.

- [88] A. El Dor, D. Lemoine, M. Clerc, P. Siarry, L. Deroussi, and M. Gourgand, "Dynamic cluster in particle swarm optimization algorithm," *Nat. Comput.*, vol. 14, no. 4, pp. 655-672, 2015.
- [89] D. Nguyen and B. Widrow, "Improving the Learning Speed of 2-Layer Neural Networks by Choosing Initial Values of the Adaptive Weights," *Neural Networks, 1990., 1990 IJCNN Int. Jt. Conf.*, 1990.
- [90] M. Clerc, "Confinements and Biases in Particle Swarm Optimisation," *Sci. Non Linéaire*, vol. hal-001227, pp. 1-9, 2006.

Anexo A

Publicações Científicas

- Lookup Table Based Intelligent Charging and Balancing Algorithm for Large Li-ion Battery Packs (Submetido a uma revista internacional da *Elsevier*)

Abstract: In this article, an energy storage system (ESS) and its entire monitoring system are implemented. A new charging algorithm is developed based on the parameters of the battery pack in real time, extending the battery lifespan, improving the capacity usage and performance of the ESS. The proposed algorithm analyzes at each moment the difference between the desired voltage and the mean voltage of the cells, the temperature of the pack, and the difference of voltage between cells. Based on the obtained information, by trilinear interpolation, the algorithm calculates the charging current. The proposed charging algorithm also combines a balancing algorithm and a state of charge determination algorithm based on the Coulomb method. This represents an innovation compared to the existing methods in the literature. The experimental results demonstrate that the proposed algorithm can successfully charge large Li-ion battery packs with different capacities and life cycles, providing a better charging time and a much lower temperature increase.

- Management System for Large Li-ion Battery Packs with a New Adaptive Multistage Charging Method, **Revista: Energies, Fator de Impacto: 2.262** (Publicado)

Article

Management System for Large Li-Ion Battery Packs with a New Adaptive Multistage Charging Method [†]

Ricardo Velho, Miguel Beirão, Maria do Rosário Calado *, José Pombo, João Fermeiro and Sílvio Mariano

Instituto de Telecomunicações, Universidade da Beira Interior, 6201-001 Covilhã, Portugal; ricardovelho_94@hotmail.com (R.V.); mdbeirao@gmail.com (M.B.); jose_p@portugalmail.com (J.P.); fermeiro@ubi.pt (J.F.); sm@ubi.pt (S.M.)

* Correspondence: rc@ubi.pt; Tel.: +35-127-532-9760

[†] This paper is an extended version of our paper published in Proceedings of the 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Firenze, Italy, 7–10 June 2016.

Academic Editor: Rodolfo Araneo

Received: 14 February 2017; Accepted: 21 April 2017; Published: 1 May 2017

Abstract: Among the wide diversity of existing technologically mature batteries, lithium-ion (Li-ion) batteries have become popular because of their longevity, high energy density, high efficiency and lack of memory effect. Differential charging of cells with age has turned balancing management systems into an important research subject. This paper proposes a new battery management system (BMS) to improve the capacity usage and lifespan of large Li-ion battery packs and a new charging algorithm based on the traditional multistage method. The main advantages of the proposed system are its versatility and ability to implement different charging and balancing methods in a very accessible way. The combination of charging methods with balancing methods represents an evolution when compared with other works in the literature.

Keywords: battery charge equalization; cell balancing; battery management system; large Li-ion battery pack

1. Introduction

The longevity of a battery charge is nowadays a big issue for people who are usually outdoors. Electric Vehicles (EV), a worldwide growing market, are pretty dependent on battery capacity and usage, for EVs will only go as far as their battery allows [1,2]. Home battery-powered devices that can store energy from either local renewable sources or from the grid are also a promising technology highly dependent on battery usage patterns [3].

The need to interconnect multiple cells in series in order to obtain the required voltage levels, coupled with the existence of intrinsic and extrinsic differences between cells, results in a lack of uniformity that reduces usable capacity, lifetime and performance. Although parallel cells are self-balanced, this does not happen when they are in a series configuration [4,5].

This intrinsic (internal) non-homogeneity between cells is due mainly to small variations in the manufacturing process, such as different capacities, volume, internal impedance and different rates of self-discharge, characteristics that worsen with usage and battery age. The main extrinsic (external) factor is temperature non-homogeneity along the battery pack, which leads to different rates of self-discharge and consequent declines in performance.

Some battery balancing methods proposed in the literature aim to create a system capable of applying a charging algorithm [6]. The dissipative resistors method adopted in this paper is based on the most frequently used balancing system due to its simplicity, cost, efficiency, volume, weight, robustness and reliability [7].

Typically, Li-ion cells are designed with a working voltage range between 3 V and 4.2 V. If the voltage drops below the lower boundary, a deep state of discharge can occur, damaging the cell. Also, if the voltage reaches values above 4.2 V the cell can be destroyed due to overheating [8]. Thus, it is really important to know the voltage of each cell and undertake precautions to prevent severe damage [9,10].

The current manuscript presents a battery management system (BMS) capable of monitoring a theoretically infinite energy storage system. This monitoring system is important when balancing and charging the cells as it requires information about individual cell and pack voltages. In addition, the acquisition unit diagnoses the battery conditions, such as static fault detection, minimum and maximum cell voltages and temperature. The only limitation of this system lies in the voltage battery pack: about 700 V corresponding to 168 cells connected in series.

Methodologies to charge batteries can be found in the literature, but there are only a few methodologies for charging large Li-ion battery packs. Thus, it is imperative to monitor and manage the voltage of each individual cell, otherwise cell voltage can reach dangerous levels [8].

This paper proposes an algorithm that combines charging with balancing methods, based on the multistage method. One of the most relevant proposed innovations deals with the criterion for switching between current levels. This transition is made based on the calculation of the error between the actual cell voltage and the desired voltage. The implemented algorithm also considers the charging current, allowing for the estimation of the state of the charge. Another important feature is the introduction of a balancing procedure in the algorithm, allowing an equalization of the cells that is of extreme importance for large Li-ion battery packs.

This paper is organized as follows: Section 2 presents and evaluates cell balancing and cell charging methods presented in the literature. Section 3 describes the hardware related to the proposed BMS. Section 4 presents the developed software. Section 5 explains the designed and implemented algorithm. Section 6 shows the results obtained by the proposed system. Section 7 concludes the paper and discusses the results.

2. Background

2.1. Balancing Methods

There are two kinds of methods to balance Li-ion batteries, active and passive. Active cell balancing methods can present different topologies, which can be classified in two groups based on the use of capacitors or the use of converters. This second group can be further divided into two subtypes: isolated and non-isolated. Depending on the topology of the electronic circuit, it is possible to balance at different levels: cell-to-cell, cell-to-pack, pack-to-cell and cell-to-pack-to-cell [11,12].

The cell balancing circuits based on capacitors use a capacitor in parallel with a chosen cell or pack to transfer energy from higher voltage to lower voltage cells or packs. In this group, different topologies can be adopted, from the simplest (like the switched capacitor) to the more complex (like the modularized switched capacitor) [6,12–17]. In the literatures, additional methods are proposed, such as the double-tiered switched capacitor [12], the automatic switched capacitor [15], the single switched capacitor [13,14], the chain structure of switched capacitor [16], and the series-parallel switched capacitor [17]. Figure 1a presents a modularized switched capacitor capable of transferring energy from cell to cell in the first-tier capacitors, and from pack to pack in the second-tier capacitors.

In the cell balancing circuits based on converters, the battery pack is the energy source for the converter that will then charge the chosen cells. The isolated converter balancing circuit is based on the use of isolated DC-DC converters and can have various topologies, like with multi-winding transformer [6,12,14,18], multiple transformers [12,18], and single switched transformer. Figure 1b shows an example of an isolated converter [19,20]. The non-isolated converter balancing circuits are based on non-isolated DC-DC converters such as the buck, boost, buck-boost [18], or Cuk [14,18]. Other examples of topologies based on non-isolated DC-DC converters are the full-bridge DC-DC [12,18]

and the quasi-resonant converters [18]. All these topologies can be unidirectional or bidirectional. Figure 1c presents an example of a non-isolated converter [21].

In passive cell balancing methods, the cells are balanced by discharging when the battery is not being used, or by providing an alternative path for the current to flow while it is being charged. There are a few topologies for passive methods, such as the fixed shunt resistor and the shunt resistor [12,14]. Another topology, and the most common method, is the switched shunt resistor, presented in Figure 1d. Other topologies are presented in [6], such as the dissipative shunting resistor, analog dissipative shunting, PWM controlled shunting, resonant converter, boost shunting and complete shunting. The cell balancing is made by using semiconductors controlled to be turned on or off, allowing the current to flow through the resistors connected to each cell [6,12,14,18].

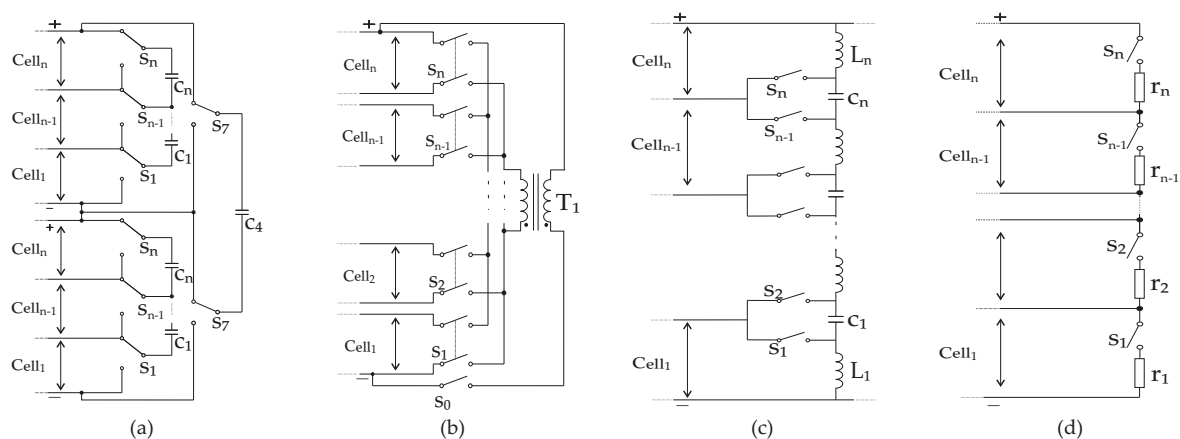


Figure 1. Several balancing topologies: (a) Modularized switched capacitor; (b) Switch matrix transformer; (c) Cuk converter; and (d) Switched shunt resistor.

A trend that is emerging in the literature is the use of dynamic (reconfigurable) topologies. Kim, Qiao and Qu [22] proposed a dynamic topology that allows cells to be deactivated (bypass), in case of an imbalance or failure. The application of this methodology can be performed during charging and discharging periods. Another methodology that involves dynamic topologies consists in reconfiguring the battery pack connections in real time. For example, Kim and Shin [23] proposed a topology called Dependable, Efficient, Scalable Architecture (DESA) that enables online reconfiguration depending on the charge level.

Although these methodologies are described in the literature as fast and efficient in terms of balancing, they require a high number of switches that must handle high currents. This exponentially increases cost and size, limiting the use of these methodologies for high power applications [24].

Figure 2 compares the main characteristics of different balancing methods. Due to its simplicity, cost, efficiency, volume, weight, robustness, and reliability [12] and the fact that it is widely used in the automotive industry, the work presented herein used the dissipative resistors method. This method has the advantage of not requiring complex control, as in active methods [25]. It should be noted that for large Li-ion battery packs passive methods are the most appropriate balancing methods, as others fail in terms of dimension and implementation costs. Table 1 presents a more detailed view of several balancing topologies introduced in literature, in order to offer a more intuitive analysis of several of the previously presented topologies.

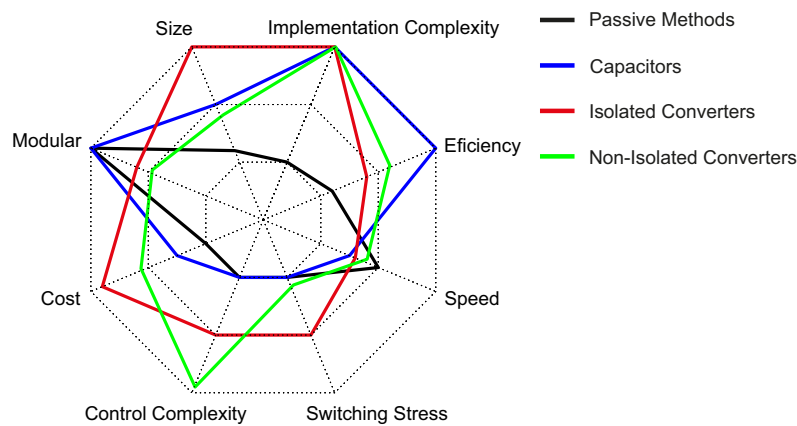


Figure 2. Comparison of balancing methods.

Table 1. Comparative table of the main characteristics of the balancing topologies (based on [6,12,18]).

Balancing Topologies	Equalization Speed	Control Complexity	Implementation Complexity	Size	Components to Balance an n Cells, m Module
Fixed Shunt Resistor	Satisfactory	Very Simple	Very Simple	Good	n Resistors
Switched Shunt Resistor	Good	Simple	Very Simple	Good	n Resistors, n Switches
Complete Shunting	Fast	Simple	Medium	Good	$4n$ Switches
Switched Capacitor	Normal	Medium	Simple	Normal	$n - 1$ Capacitors, $2n$ Switches
Single-Switched Capacitor	Good	Complex	Simple	Satisfactory	1 Capacitor, $2n$ Switches
Double-tiered Switched Capacitor	Good	Medium	Simple	Good	n Capacitors, $2n$ Switches
Modularized Switched Capacitor	Good	Complex	Medium	Normal	$n - 1$ Capacitors, $2n + 2m$ Switches
Multiple Transformers	Good	Medium	Simple	Bad	n Transformers, 1 Switch, n Diodes
Single Switched Transformer	Satisfactory	Complex	Medium	Bad	$n + 3$ Switches, 1 Transformer
Cuk Converter	Fast	Complex	Simple	Bad	$2n - 2$ Inductors, $n - 1$ Capacitors, $2n - 2$ Switches
Buck Converter	Excellent	Complex	Excellent	Bad	m Inductores, m Capacitors, $2m$ Switches
Full-bridge Converter	Fast	Complex	Medium	Very Bad	m Capacitors, $4m$ Switches

2.2. Charging Methods

The Constant Current/Constant Voltage (CC/CV) charging algorithm is widely referenced in the literature because of its simplicity and ease of implementation. However, when applied to a large Li-ion package, this type of charging suffers from some implementation limitations. This algorithm is characterized by three phases of operation, as illustrated in Figure 3a.

The first phase, called the trickle charge (TC), corresponds to a cell voltage below the $V_{trickle}$ critical value. In this condition, the cell should be charged with a reduced current, typically with a value of $C/10$ where C is the nominal capacity of the cell. As soon as the cell voltage exceeds the $V_{trickle}$ value, the charging algorithm switches to the second phase. At this stage the cell is subjected to a constant charging current (CC), with a fixed and predetermined value, varying between $0.5 C$ and $3.2 C$ depending on their specifications. When the cell voltage reaches the V_{charge} value (typically $4.2 V$), the algorithm switches to the third charging phase. At this stage the cell is subjected to a constant

voltage (CV). When the current reaches a default value, typically 0.1 C, or the maximum charging time, the process is complete [26,27]. To mitigate the disadvantages of this method (mainly the charging time), some variants can be found in the literature, for example, the double-loop control charger (DL-CC/CV), the boost charger (BC-CC/CV), the fuzzy-logic control (FL-CC/CV), the grey-predicated control (GP-CC/CV) and the phase-locked loop control (PLL-CC/CV) [26].

Optimal ion conductivity control (OIC), proposed in [28], is an algorithm to improve the performance of the CC/CV method. This method controls ion conductivity, one of the electrochemical characteristics relevant to an optimal charging control strategy. This control scheme measure online the battery impedance and tracks its saturation points, resulting in better efficiency, less charging time, and less temperature rising rate. Another methodology in the literature is multistage charging consisting of multiple charging stages with different current levels, as shown in Figure 3b. This method establishes different current levels and the conditions for changing stages. The most used criterion to switch between stages (threshold crossing criterion) is a defined cell voltage limit, reducing the current and making the voltage readings more realistic, because the voltage drop across the internal resistance of the cell is smaller [26].

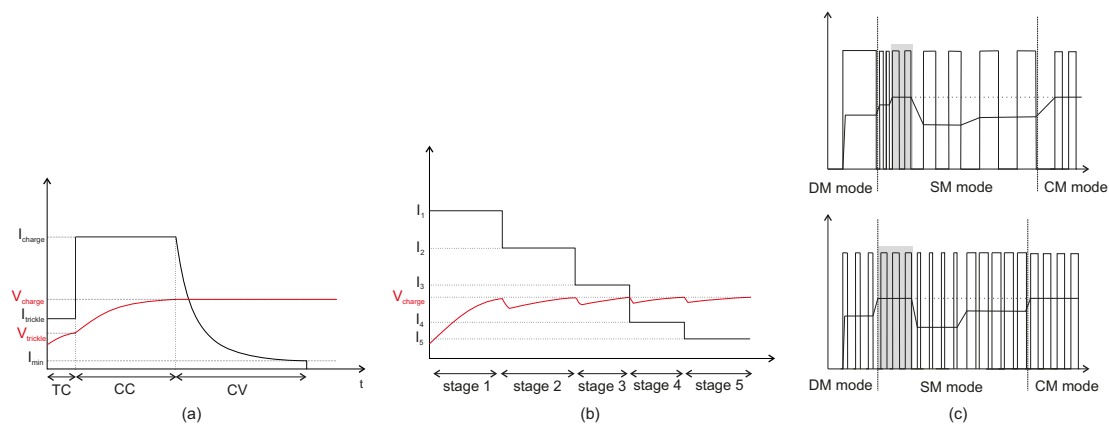


Figure 3. Charging methods: (a) CC/CV charging method; (b) multistage charging method; and (c) pulse charging method (above variable frequency pulse charge and below variable duty pulse current).

Some authors choose optimization algorithms to find the most optimal stages based on different approaches, such as the PSO algorithm and fuzzy controllers in [29,30]. However, despite the use of optimization algorithms, the threshold crossing criterion continues to focus on the cell voltage limit.

Another charging method, the Pulse Charging Method, is characterized by the use of a pulsed current and can be subdivided into two methodologies: the Variable Frequency Pulse Charge (VFPC) and the Variable Duty Pulse Current (VDPC), as illustrated in Figure 3c [31]. The VFPC optimizes the frequency of the current pulse in order to minimize the impedance of the cell and consequently to maximize the transference of energy. This energy transference maximization can be achieved in two different ways: by setting the pulse amplitude and varying pulse width, or vice versa. Chen [32] proposed a VFPC charging algorithm composed of three modes of operation: detection mode (DM), search mode (SM), and charge mode (CM). Briefly, the algorithm starts its operation in the DM mode and detects the state of the cell, applying a constant voltage to the cell in order to monitor the charging current. Once this mode is finished, the algorithm switches to the SM mode of operation, discovering the optimal frequency. As soon as the frequency is “optimized” the algorithm enters the CM mode of operation, repeating this process until the cell is charged. Also, in [33], the same author proposes a similar method based on the VDPC methodology.

A comparison of the various charging methods is shown in Figure 4. The multistage charging method has the best relationship between efficiency, simplicity of control, and charging time. The pulse charging method is the worst in terms of implementation and control complexity.

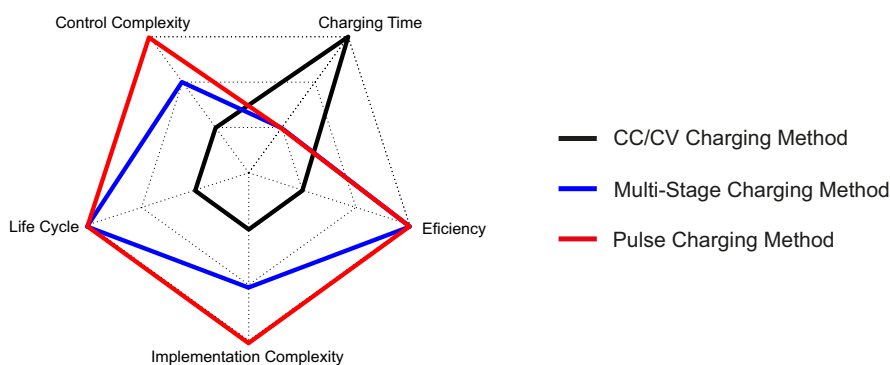


Figure 4. Comparison of charging methods.

3. Hardware Development

3.1. System Topology

A new hardware setup was implemented to make the system presented in [34] more robust and versatile. This is theoretically capable of supporting infinite power and allows the implementation of different charging and balancing algorithms in a simpler and more effective way. The topology used can be represented by the block diagram in Figure 5. Thus, it is possible to divide the system into three fundamental units: control and processing unit, acquisition and balancing unit and power unit.

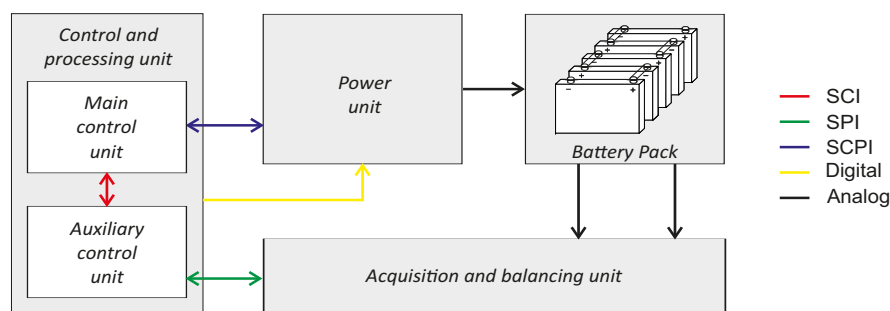


Figure 5. Block diagram of the hardware topology.

3.1.1. Control and Processing Unit

The control and processing unit is composed of a centralized architecture with two subsystems. One is the main control unit containing the software developed in Matlab. This choice allows greater flexibility and speed in the development of new combined charging and balancing methodologies.

The other subsystem (auxiliary control unit) consists of the TMS320F28069 microcontroller. This microcontroller is a 32-bit floating-point used in mathematical tasks with some complexity, since it is capable of performing parallel processing. It has a clock frequency of 90 MHz, with a RAM of 100 kb and 2 kb of ROM and a flash memory of 256 kb. It also has 16 PWM channels and 16 channels of 12-bit ADC, and the I²C, USB, CAN, SCI and SPI communication protocols.

The auxiliary unit provides greater versatility in the interconnections between the main control unit (Matlab) and the other units by using the two asynchronous communication modules (serial communications interface; SCI) and the two synchronous communication modules (serial peripheral interface; SPI).

The main control unit communicates directly with the power system (Programmable DC SL 500-5.2 source) through the Standard Commands for Programmable Instruments (SCPI) asynchronous serial communication protocol. All other communications are performed from the auxiliary control system by the asynchronous RS-232 serial communication protocol.

3.1.2. Acquisition and Balancing Unit

The acquisition unit is centered on the ISL94212 device (Intersil, Milpitas, CA, USA), enabling it to be connected in a chain of up to a maximum of 14 devices (168 cells in series and n in parallel). This unit also performs extensive diagnostic functions (static fault detection functions, oscillator check function, cell overvoltage, cell undervoltage, V_{BAT} or VSS connection test, open wire test, overtemperature indication, reference check function, register checksum and EEPROM MISR checksum). Each device has capacity for 12 cells, constituting a stack of the battery pack.

Figure 6 presents the system developed to monitor and control a 24SnP system (24 cells in series and n in parallel). In this work, a 24S1P system was implemented resulting in a nominal power of approximately 230 W/h.

The position of each device in the chain is defined by COMMS SELECT 1 and COMMS SELECT 2 inputs of each device, where the main device takes the first position of the chain, working as master for communication purposes. This device communicates with the main control unit through the auxiliary control system via SPI.

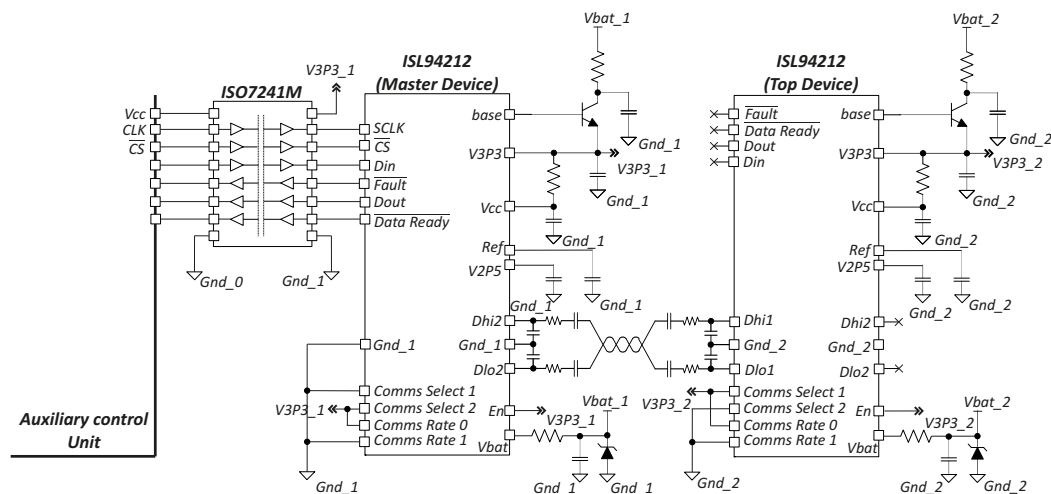


Figure 6. Electrical circuit of ISL94212 devices forming the chain.

Another feature of the ISL94212 device is the possibility to easily implement low-cost balancing methods with external circuits, by providing analog-digital converters (ADC's) to monitor the chain voltage with a resolution of ± 180 mV and the individual cell voltage with a resolution of ± 10 mV. The device also has outputs dedicated to the activation/deactivation of switches (MOSFET) required for the realization of balancing methods.

Using the Switched Shunt Resistor passive balancing method (in this case $R_{bal} = 33 \Omega$), as shown in Figure 7, the device, through the programming of internal registers, offers three operating modes: timed balance mode, auto balance mode, and manual balance mode. In the timed balance mode, the main control unit defines the duration of balancing (between 0.33 and 42.33 min), as well as the instant when the balancing of the cells begins. In manual balance mode, the main control unit defines the beginning and the end of the balancing period. Finally, in the auto balance mode, the device performs balancing autonomously, depending on the state of charge at time t , the desired state of charge, the impedance of the balancing circuit, and the sampling time.

The ISL94212 device only allows the monitoring of four temperature sensors, therefore a system has been implemented to enable the use of a larger number of sensors (in this case 12 sensors, 1 sensor for each 2 cells), as shown in Figure 8. Given the limitations of the auxiliary control circuit, which only provides 16 analog ports, the analog multiplexer CD74HC4067 was used, allowing circuit expansion if desired. The temperature value is extrapolated through the Steinhart-Hart equation using Semitec's 10 k Ultimate Thinness NTC thermistor.

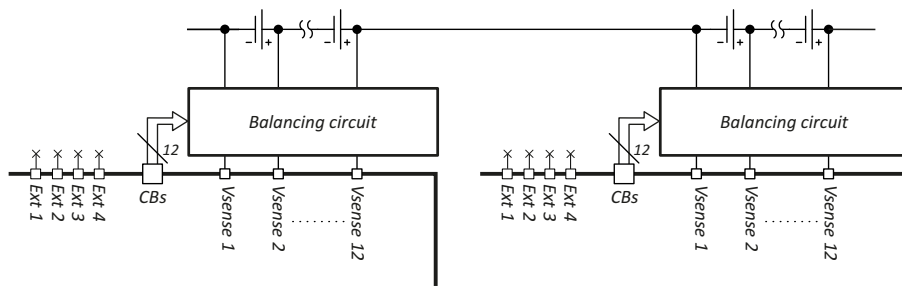


Figure 7. Representation of the balancing circuit.

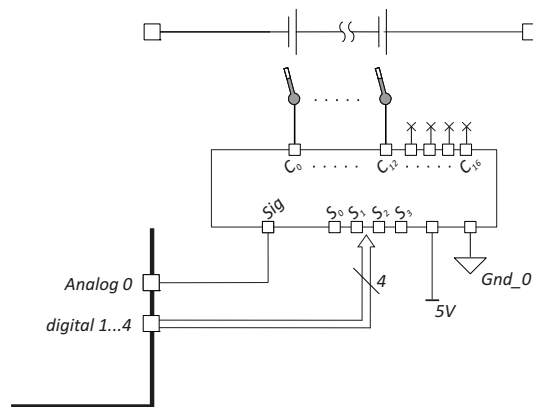


Figure 8. Representation of the electric circuit of the temperature acquisition system.

3.1.3. Power Unit

The power unit used in this work is based fundamentally on the DC SL 500-5.2 programmable power supply, which communicates directly with the main control unit via the SCPI asynchronous communication protocol.

To ensure that current only flows in one direction, a diode (whose voltage drop is compensated through the V_{sense} inputs of the programmable power supply) has been introduced in the power unit circuit. An isolated switching MOSFET drive circuit was designed (Figure 9) in order to implement the Variable Frequency Pulse Charge (VFPC) and Variable Duty Pulse Current charge (VDPC) methods described previously. This circuit, based on TLP152 optical couplers, allows a maximum switching frequency of 250 kHz. Also, an isolated DC-DC converter was used to adjust the MOSFET trigger voltage, as well as to reduce noise in the main control unit.

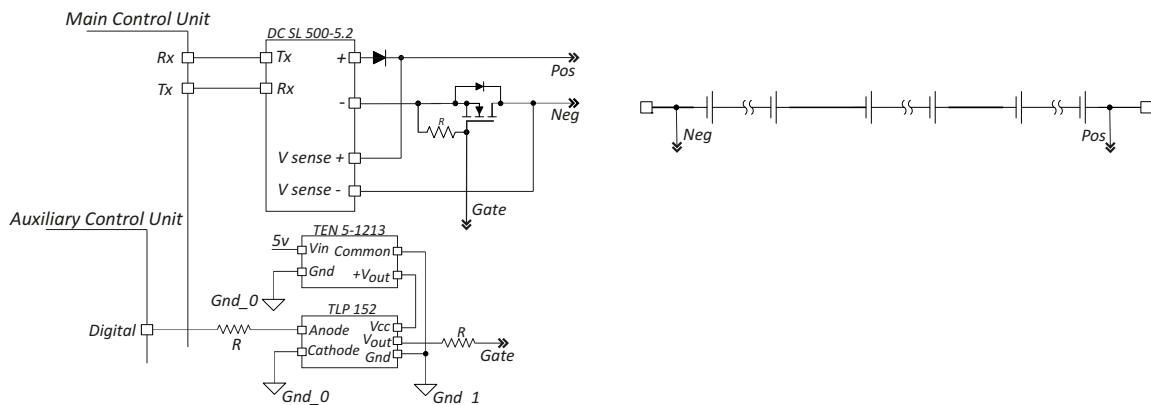


Figure 9. Power circuit command system.

4. Software Development

4.1. Auxiliary Control Unit

All algorithms implemented in the auxiliary control unit were developed in C language in Code Composer Studio version 6 (Texas Instruments, Dallas, TX, USA). The algorithm consists of a main program, shown in Figure 10, where in a first step all variables are initialized and the peripherals and interrupts are configured. After the initial settings, the unit remains in an infinite loop, waiting for the communications frame from the main control unit via SCI serial communication protocol. The first byte of the communications frame is interpreted by the auxiliary unit, allowing the selection of one among four implemented functions.

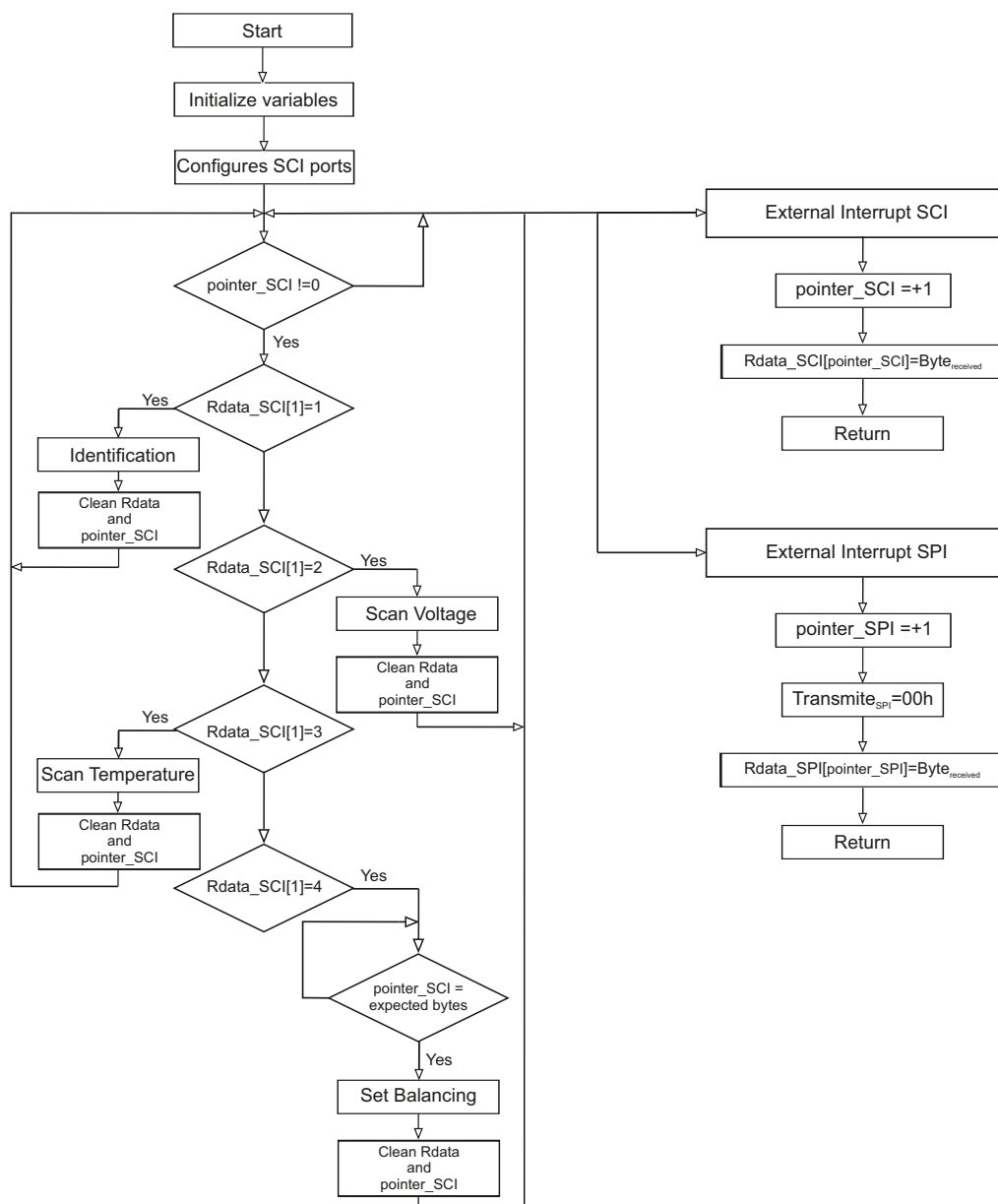


Figure 10. Flowchart of the main program implemented in the auxiliary control unit.

Table 2 presents a brief description of the functions implemented, the size of the communications frame from the main control unit, and the command byte.

Table 2. Brief description of the functions implemented in the auxiliary control unit.

Function	Dimension	Command Byte	Description
Identification	1	01 h	Responsible for identifying the number of devices used
Scan Voltage	1	02 h	Responsible for reading the voltage of the cells
Scan Temperature	1	03 h	Responsible for reading the temperature of the cells
Set Balancing	8 (by device)	04 h	Responsible for the selection of the cells and the duration of the balancing time

There are two interrupt routines in the algorithm: the SCI interrupt routine, associated with the asynchronous communication module SCI, which is responsible for reading the communications frame from the main control unit; and the SPI interrupt routine, a hardware falling edge-triggered interrupt routine associated with the GPIO20. The GPIO20 is configured as an input, associated with the output of the master device (data ready), which indicates that the data is available on the serial communications port (SPI).

4.1.1. Identification Function

The identification function is responsible for identifying the number of devices and their positions in the chain (ISL94212 devices). Briefly, this process starts by transmitting a 3-byte frame to the master device. Once this device is addressed, it responds with a 4-byte frame, which indicates the success of the process, and also states its position in the chain. This process is repeated until the addressed device is at the top of the chain. When the device at the top of the chain is identified, the identification process is complete. This routine returns one byte representing the number of devices in the chain.

4.1.2. Voltage Scan Function

The voltage scan function is responsible for reading the voltage of the battery pack cells. The initialization of this process is carried out as previously described, by requesting sampling of the voltages. Afterwards, there is a request for the value of the readings corresponding to a 40-byte communications frame. Once this is received it is directed to the main control unit, returning 40-bytes for each device forming the chain.

4.1.3. Temperature Scan Function

The temperature scan function is responsible for obtaining the temperature of the battery pack cells. Cyclically this process selects the desired read channel through inputs S1, S2, S3 and S4 of the analog multiplexer. Once the desired channel is selected, the ADC is forced to read from the auxiliary control unit. Since the ADC is 12 bits, the conversion value is decomposed into a 2-byte frame and directed to the main control unit via SCI. This process is repeated for all devices, returning 24 bytes to the main control unit.

4.1.4. Balance Set Function

The balance set function is responsible for defining the duration of the balancing process and the cells to be balanced. The process is initialized with a frame of 8 bytes per device, derived from the main control unit, with the values of the registers necessary for the configuration.

Briefly, the function is initiated by configuring the Balance Setup Register of device i , which sets the balancing mode to timed balance mode. If device i responds with a 4-byte frame (ACK) that means that the process was successful and the Balance Time Register is set up with the duration of the balancing process.

After the previous process is complete, the Balance Status Register is set up and defines the cells of device i subjected to balancing. The balancing process is initiated with the Enable Balance command. The function is repeated for all the devices of the pack.

4.2. Main Control Unit

All algorithms implemented in the main control unit were developed in Matlab software. The main flowchart of the proposed algorithm can be divided into four segments. The first segment is shown in Figure 11 and includes the initial configuration as well as the definition of the number of devices in the pack. First all variables are initialized, the SCI communication ports are configured, and the duration time of the balancing process is defined. After the initial configuration, the command byte (01 h) is sent, which triggers the identification function in the control auxiliary unit. The main control unit waits for the return of this routine: a byte corresponding to the number of devices present. If the response is non-zero, the algorithm proceeds to the second segment. If the answer is zero, the algorithm makes two more attempts. If after the third attempt the answer is still zero, an error message is shown and the process is interrupted.

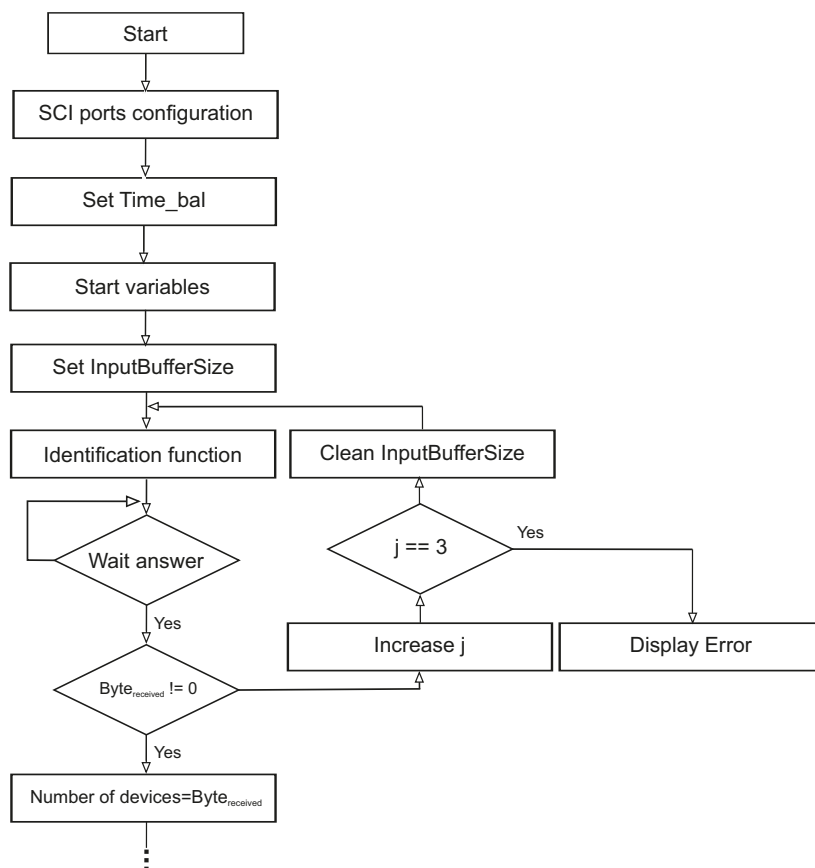


Figure 11. Flowchart of the program implemented in the main control unit—First Segment.

The second segment of the algorithm, shown in Figure 12, is responsible for the acquisition of pack cell voltages and temperatures. The first byte sent corresponds to the command (02 h) that will trigger the scanning voltage function. After the previous process is completed, the second byte corresponding to the command (03 h) is sent in order to trigger the scan temperature function.

With the initial readings are completed, the algorithm remains in an infinite loop until the stopping criteria, detailed later (Section 5), is met. When this occurs, the algorithm communicates with the power unit via SCPI with the STOP command. If the stopping criteria are not met, the algorithm executes the remaining code, described in the following segments, until a new check.

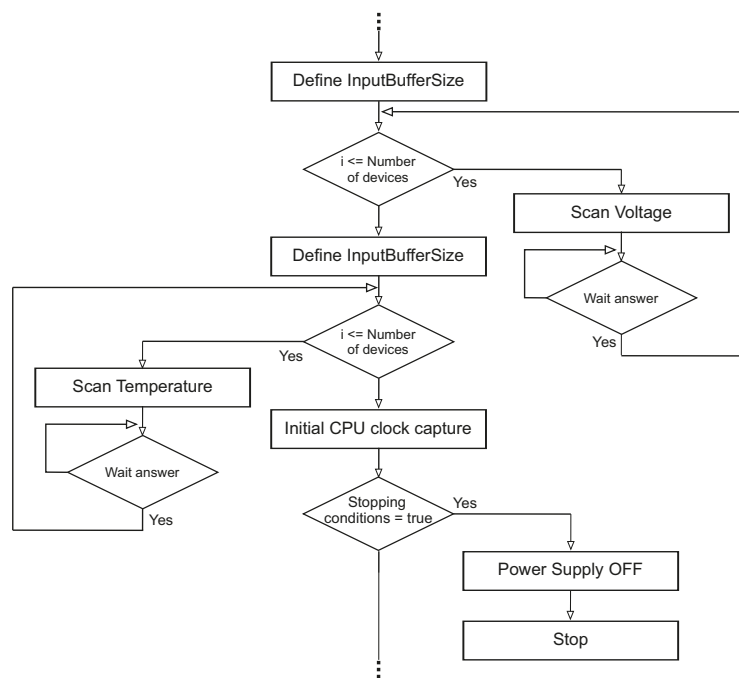


Figure 12. Flowchart of the program implemented in the main control unit—Second Segment.

The third segment of the algorithm, shown in Figure 13, defines the voltage of the power unit as calculated by:

$$dv \times N \times N_d \quad (1)$$

where: dv is the desired voltage (4.2 V), N represents the number of cells and N_d is the number of devices. Since cell balancing influences voltage readings, there is a five second lag between the balancing process (one minute in this work) and the acquisition of the cell voltages. Thus, the acquisition of the voltages is carried out at a frequency determined by the following equation:

$$1/(T_b + 5) \quad (2)$$

where T_b is the balancing time.

Once these readings are obtained, the algorithm proceeds to the third segment.

Figure 14 shows the last segment of the algorithm, which is responsible for determining the cells to be balanced. For this, a line vector is defined with a dimension given by the following equation:

$$N \times N_d, \quad (3)$$

This vector is formed by ones if the balancing criterion is met and zeros otherwise (detailed later in Section 5). When the vector is complete, the algorithm proceeds to the functions related to cell balancing.

The balancing process has two inherent functions: The Get Frame Balance Time Register function and the Get Trama Balance Status Register function. The first function sets the duration of the balancing process, configured within a 0.33 to 42.33 min by setting the [14:8] bits of the Balance Time Register of each device. Initially, the algorithm determines the number of times that T_b is divisible by 0.33 min (time base). The second function contains the information of the cells to be balanced through the Balance Time Register of each device. The algorithm decomposes the balancing vector, calculated in the fourth segment of the main flowchart, and performs the concatenation of the bytes. Once these bytes are determined the communications frame is built and transmitted to the auxiliary control unit, and the algorithm performs the second segment in order to re-check the stopping criteria.

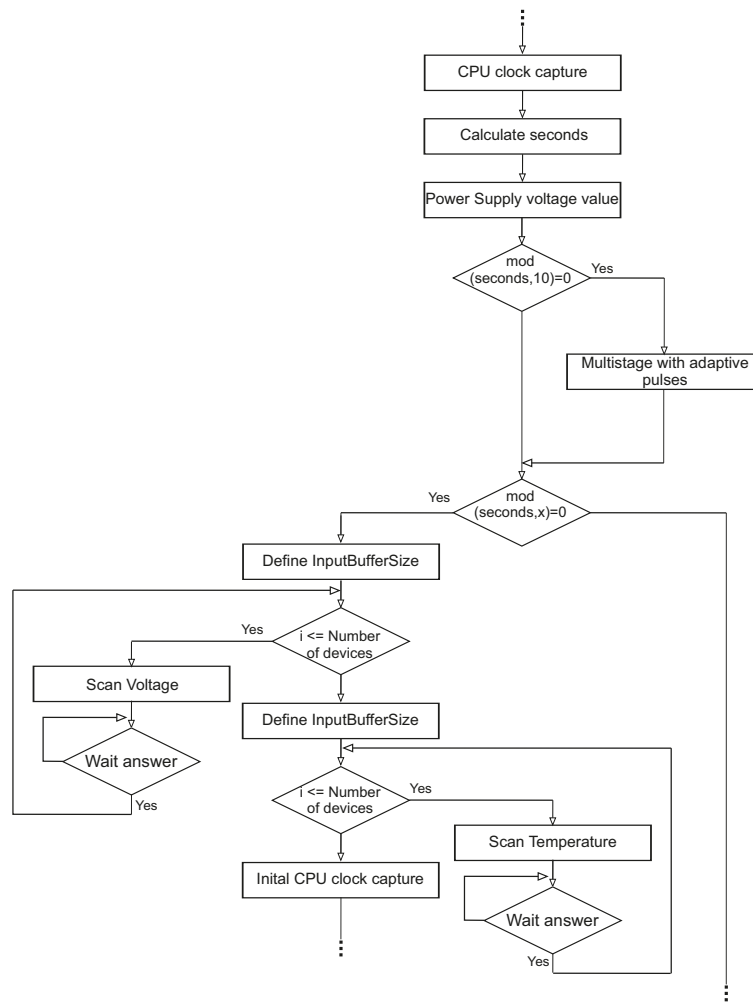


Figure 13. Flowchart of the program implemented in the main control unit—Third Segment.

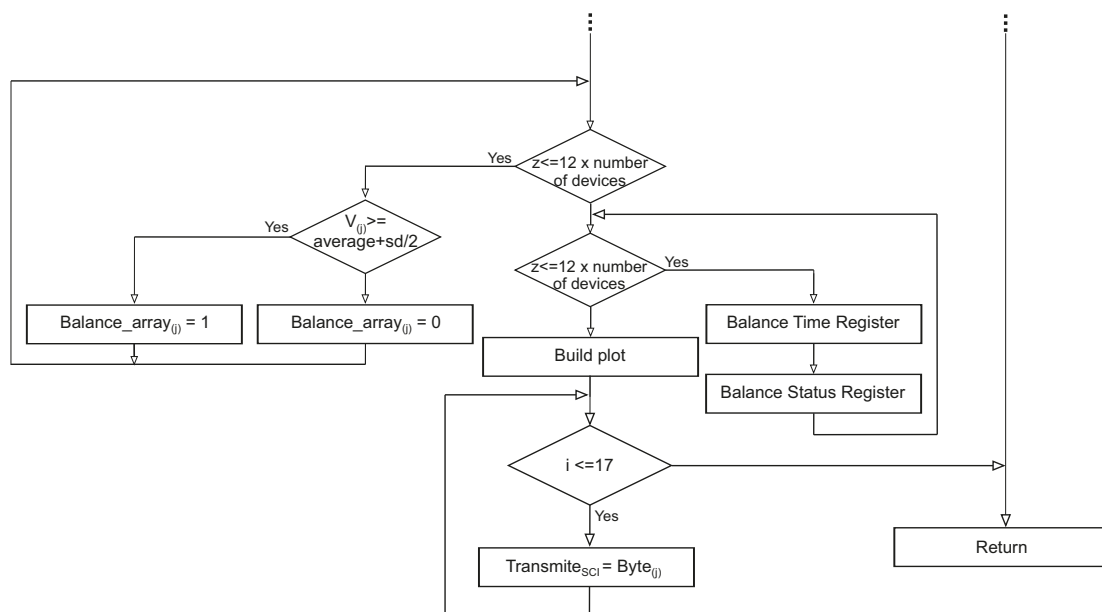


Figure 14. Flowchart of the program implemented in the main control unit—Fourth Segment.

5. Proposed Methodology

When referring to large Li-ion battery packs it is essential to have communication between the charger and the BMS, otherwise, the charger does not provide any protection, but rather a false sense of security that can lead to pack damage. The charger alone, without individual cell voltages values, becomes a reckless solution for the protection of a large Li-ion battery pack [8].

As the charger does not consider the balancing current value it may harm the battery pack in terms of its total capacity. In order to avoid exceeding the battery safe voltage limits, some batteries are used between 20% and 80% of their capacity. With a good charging and balancing management system, it is possible to use batteries between 5% and 95% of their capacity, which represents a substantial increase in use of the available energy [35].

Concerning the charging method, the proposed system was based on the multistage method, since it presents less chemical reaction stress and shorter charging time [30]. It also has a relationship between efficiency, simplicity of control, and charging time that is better than the other methods in the literature. It is also important to note that this is the most adequate method for large Li-ion battery packs because of its versatility.

Five current levels were chosen for this work. The choice of the number of levels was based on the study carried out by [36], where the authors evaluate the effect of different numbers of levels in relation to charging time and efficiency. According to the experimental results, the difference between applying a different number of charging current levels is almost negligible when the number of charging current levels is more than five. Therefore, gradual decreasing five-stage charging levels were chosen.

Another fundamental aspect is determining the value of the current levels; in this work, they were determined based on the battery conditions, the capacity, the balancing methodology, and the balancing current.

Therefore, the most important levels are the highest and lowest. In order to choose the highest current level the capacity of the batteries was taken into account, which according to the cell manual [37] is 1.5 A. For the lowest current level, the methodology and balancing current were considered, and it was set at 0.2 A. The remaining levels were interpolated as a function of the error.

The algorithm described was formulated mathematically through the following equations:

$$\text{Min } f_k(\gamma_k), \quad (4)$$

Subject to:

$$V_{i,k} \leq 4.25, \quad (5)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_{i,k} \geq dv \quad \& \quad \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_{i,k} - 0.01 \leq V_{i,k} \leq \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_{i,k} + 0.01, \quad (6)$$

where:

$$f_k(\gamma_k) = \begin{cases} 1.5 & \text{if } \gamma_k \geq 0.3 \\ 0.8 & \text{if } 0.3 > \gamma_k > 0.15 \\ 0.6 & \text{if } 0.15 \geq \gamma_k > 0.1 \\ 0.4 & \text{if } 0.1 \geq \gamma_k > 0.02 \\ 0.2 & \text{if } \gamma_k \leq 0.02 \end{cases}, \quad (7)$$

with:

$$\gamma_k = dv - \max(V_{i,k}). \quad (8)$$

In addition to the charging equations, it is also necessary to take into account the balancing equation. The decision on which cells to balance is based on the following equation:

$$V_{i,k} \geq \zeta_k + \frac{\delta_k}{2}. \quad (9)$$

In the previous equations, the variables are:

f_k : Function to be minimized at instant k ;

γ_k : Error between voltages at instant k ;

$V_{i,k}$: Voltage in cell i at instant k ;

dv : Desired voltage (4.2 V);

N : Number of cells;

δ_k : Standard deviation at cell voltages at instant k ;

ζ_k : Mean voltage in the cells at the instant k .

Expressions (4)–(9) are interpreted as follows:

- Expression (4) represents the mathematical formulation of the proposed algorithm, which is related to the minimization of the error of the voltages in the cells to 4.2 V and consequently the minimization of the charging time.
- Expression (5) represents a stopping criterion, whereby if any cell exceeds 4.25 V the charging is terminated.
- Expression (6) represents the second stopping criterion of the algorithm. If expression (5) represents a safety condition, (6) represents a premise whereby acceptable charge results are considered, that is, when the mean value of the voltages of the cells is greater than or equal to 4.2 V and all cells are within the acceptable voltage limits, charging is interrupted and considered to have been successfully completed. Both stopping criteria were selected according to the cell manual [37].
- Expression (7) represents the values the function takes for each possible error value.
- Expression (8) represents the error between the desired voltage (4.2 V) and the maximum voltage of the cells.
- Equalization of the cells (balancing) is performed through a statistical analysis expressed by Equation (9). This represents the condition by which cells are selected for balancing. If the condition is true for a particular cell, it will be equilibrated, as shown in Figure 15.

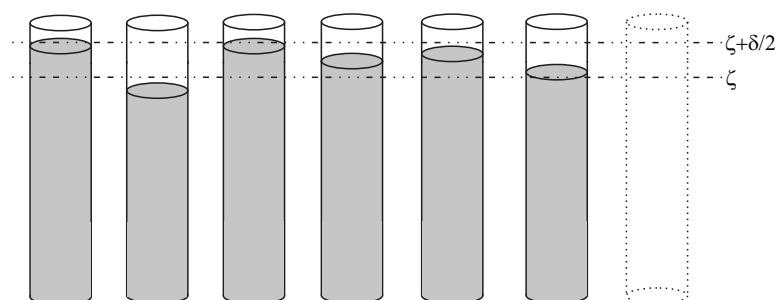


Figure 15. Graphic representation of the implemented balancing methodology.

6. Experimental Results

To test the implemented algorithm, two different types of cells were used, UR18650F-SCUD-3 cells (SANYO, Moriguchi, Japan) with a large number of charge/discharge cycles (case 1) and ICR18650-26H 2600 mAh cells (SAMSUNG, Seoul, Korea) with no charge/discharge cycles (case 2). Figure 16 illustrates the implemented hardware.

Figure 17 shows the evolution of the charging current throughout the entire process, for both case studies. The proposed methodology, when compared to the traditional Multistage charging methodology, optimizes the transition between levels and minimizes the voltage drop in the internal resistance of the cells during charging. This occurs because the common criterion used with the traditional Multistage Charging Method is as in Figure 3b, where change of stage occurs as soon as

the voltage of one of the cell reaches the value of 4.2 V. However, during charging, the cell voltage is greater than its real voltage due to a voltage drop in its internal resistance, which tends to zero as the current tends to zero. In the proposed method, this voltage drop is progressively attenuated during charging, which results in a reduction in charging time.

It is also important to analyze the differences between the two case studies in relation to the current. Thus, it is noteworthy that the proposed methodology behaves differently according to the battery condition. In case 1, due to the condition of the cells which results in a higher internal resistance, cell voltage decreases greatly during the transition between the current levels. This demands a current level correction, in order to reduce the error. In case 2, with the cells with no charge/discharge cycles, the cell voltage decays considerably less, thus the proposed algorithm approaches the traditional multistage method.

Therefore, the proposed algorithm perceivably adapts to the condition (number of charge/discharge cycles) of the cells used in the charging process. With the process of transition between current levels proposed in this article, there is a reduction in the charging time.

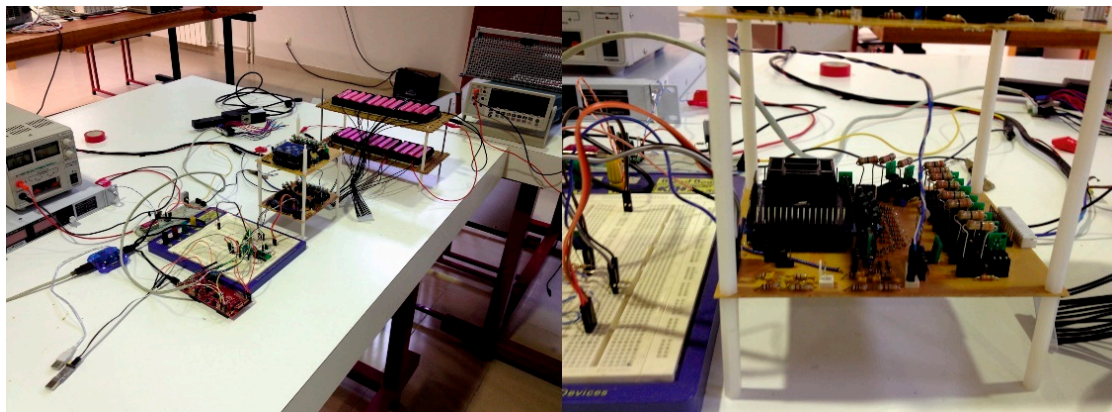


Figure 16. Practical implementation.

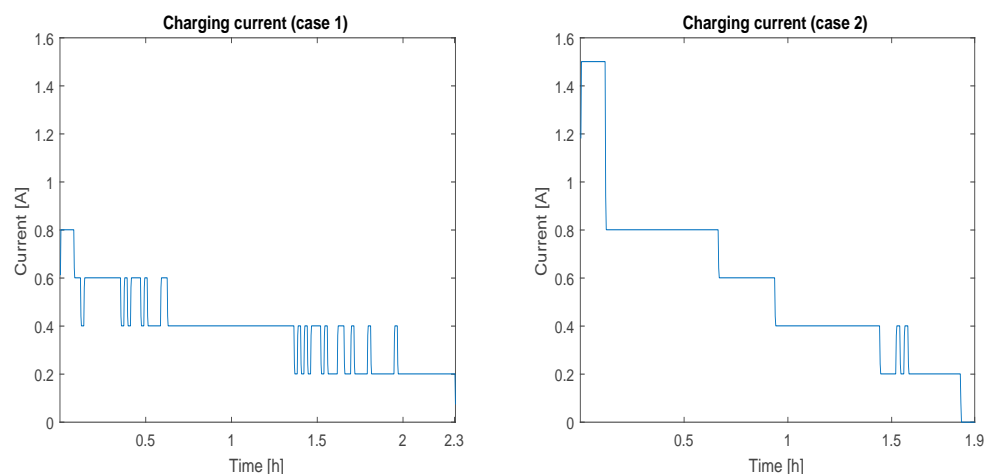


Figure 17. Current profile during charging.

Figure 18 shows the evolution of the error of the voltage as a function of the charging time, corresponding to the charging process in Figure 17. These results reveal that the error decreases during the charging process, thus validating the measured voltage as the correct one.

As described above, a more pronounced oscillation is noted in case 1, resulting in the need for a greater adjustment in the transition between current levels.

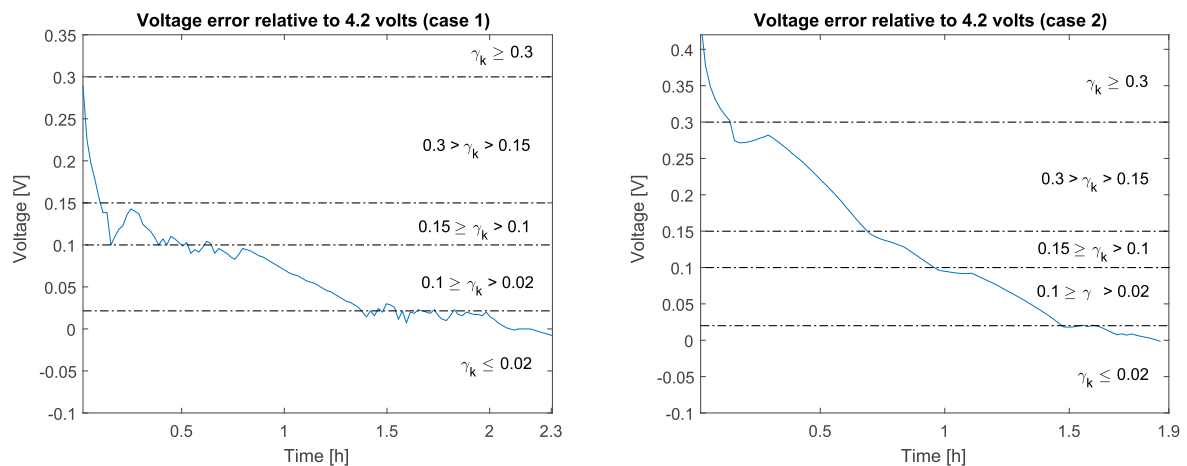


Figure 18. Error profile during charging.

Regarding the voltage present in each cell, it is possible to prove that at the end of the charging process the premises imposed by the algorithm were fulfilled, and all cells were within the desired limits. It is also relevant that although each cell has a distinct condition (greater internal resistance), the algorithm can overcome these differences, allowing the success of the charging process, as shown in Figure 19. This figure also illustrates that in case 1 there are greater variations in the voltage of the cells, resulting in the need for greater adjustment in the transition between current levels.

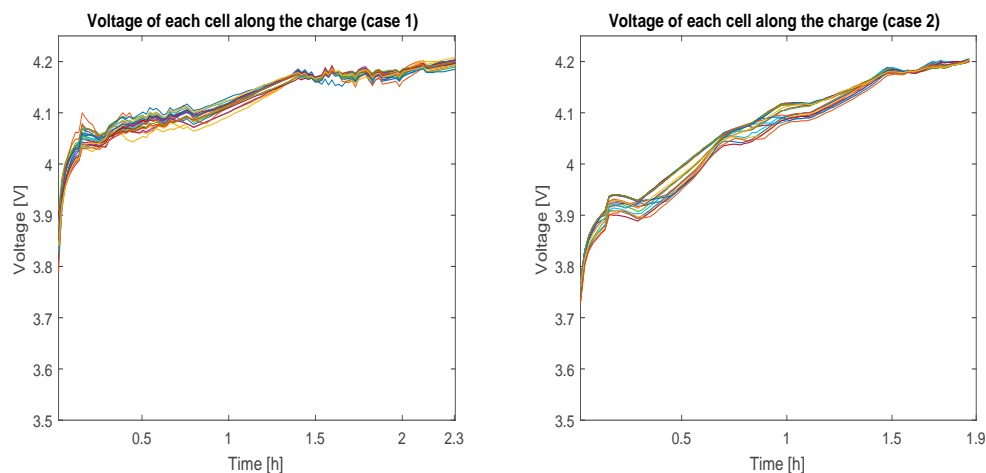


Figure 19. Voltage profile per cell during charging.

Figure 20 illustrates the evolution of the mean voltage (red line), the individual cell voltages, as well as a region defined by the mean voltage \pm the standard deviation (gray area). It should be noted that the gray area decreases with time, i.e., the difference between voltages decreases during charging, which implies a correct order of balancing. We can also observe that the stopping criterion was reached in the two cases, that is, the mean voltage is equal to 4.2 V and all the cells were within the established limits (4.2 ± 0.01 V).

In the worst-case scenario, if there is a positive imbalance when one or more cells are positively distanced from the mean value, the algorithm maintains the minimum charge level, balancing the imbalanced cells until all are within the limits, resulting in a longer charging time. Inversely, if there is a negative imbalance, the algorithm maintains the minimum charge level until all the cells are within the limits established in the stopping criterion.

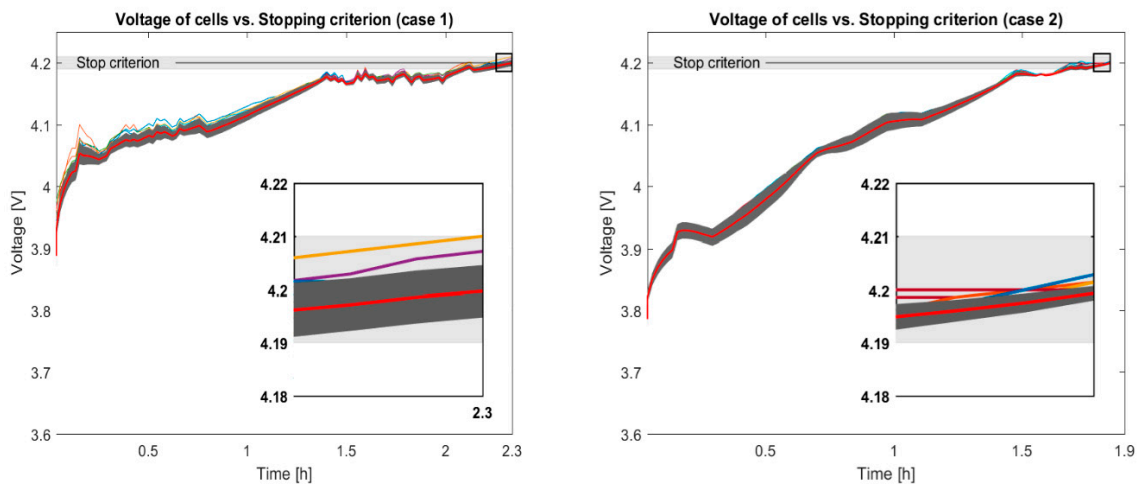


Figure 20. Voltage profile per cell vs. stopping criterion. The red line represents mean voltage, the gray area represents the mean of the voltages \pm the standard deviation.

Figure 21 illustrates the behavior of each cell regarding one balancing process. A correct balancing order for the various cells is evident, in both of cases, proving a convenient formulation of the algorithm. Also, regarding the balancing process, even while charging, the top balancing is more effective, this happens because charging the current level occurs at a point close to the balancing current level, thus the cells are set to balance charge at significant lower rate than the rest, leading to cell equalization.

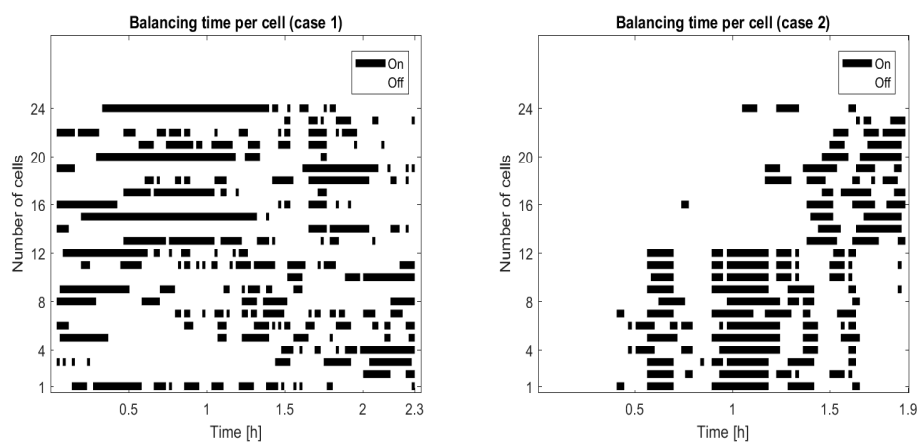


Figure 21. Balancing time per cell during charging.

It was also performed a charge for case 2 with the traditional Multistage method and with the proposed method for comparison purposes, considering the same charging conditions, Figure 22.

Through Figure 22 it is possible to perceive that the proposed algorithm has improvements regarding the charging efficiency. With regard to voltage deviation, a greater imbalance is observed in the traditional multistage method (0.0143 V) when compared with the proposed approach (0.01 V). The improvements over the multistage method are achieved due to a smoother transition between levels, achieving a voltage profile with fewer oscillations. In the traditional algorithm, the conditions of the battery influence the behavior in the transitions between current levels. This occurs due to the fact that the cells have a low internal resistance, and therefore, do not suffer sudden variations in voltage during the transitions between levels. With respect to charging time, with the proposed method the results show a reduction up to 7.2% (about 8 min).

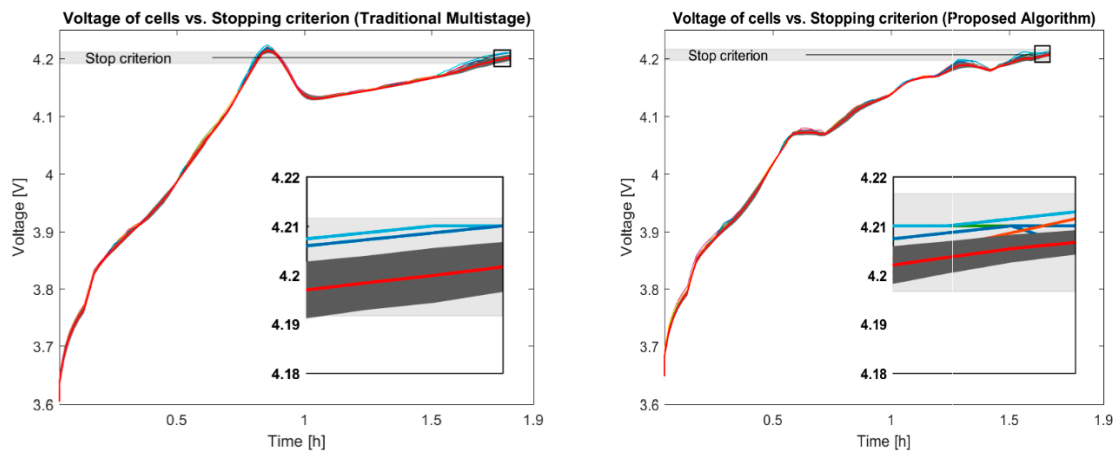


Figure 22. Voltage profile per cell vs. stopping criterion considering the traditional multistage method and the proposed method. The red line represents mean voltage, the gray area represents the mean of the voltages \pm the standard deviation.

Concerning the temperature increasing during the charging process, the traditional algorithm presents a temperature increase of $\Delta T = 5.78$ °C, whereas the proposed algorithm shows a temperature increase of $\Delta T = 4.6$ °C, Figure 23. These results correspond to a 20.4% reduction for the proposed algorithm.

By these results, the proposed method when compared with the traditional Multistage is verified to improve the charging efficiency.

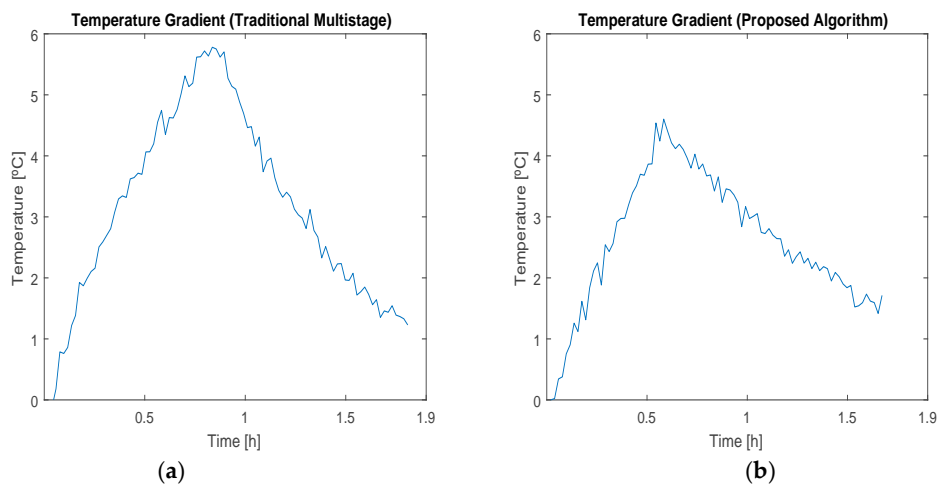


Figure 23. Temperature gradients during battery charging with (a) the traditional Multistage method and (b) the proposed method.

7. Conclusions

In this paper, a new algorithm is proposed combining charging and balancing with the objective of increasing the useful life of large Li-ion battery packs. The system is able to manage multiple battery packs with only a single voltage restriction, allowing a maximum of 168 cells in series. Since it has no restriction regarding the number of cells in parallel we can consider this system is theoretically an infinite power system.

The proposed algorithm presents an improvement over the multistage method, showing smoother voltage transitions when changing the current level, which in turn shortens the charging time. This advantage occurs because in the proposed charging method the current level changes according

to the difference between 4.2 V and the cell voltages, and not by default as in the traditional method. It is important to note that the proposed algorithm can adapt to the conditions of the used batteries. It was also possible to prove that the proposed algorithm presents better results regarding the charging time, the temperature increase and the voltage deviation when compared with the traditional multistage approach. After several tests, it was possible to prove that, with the existing BMS, top balancing is more efficient for the adopted profile in balancing current. For correct and safe charging, it is essential to have communication between the charger and the BMS.

Acknowledgments: This work was supported by National Funding from the FCT—Fundação para a Ciência e a Tecnologia, through the UID/EEA/50008/2013 Project.

Author Contributions: All authors contributed equally to this work.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Piao, C.; Wang, Z.; Cao, J.; Zhang, W.; Lu, S. Lithium-Ion Battery Cell-Balancing Algorithm for Battery Management System Based on Real-Time Outlier Detection. *Math. Probl. Eng.* **2015**, *2015*, 168529. [[CrossRef](#)]
2. Drori, Y.; Martinez, C. *The Benefits of Cell Balancing*; Intersil Americas, Inc.: Muntinlupa, Philippines, 2005; pp. 1–9.
3. Aksanli, B.; Rosing, T. Optimal battery configuration in a residential home with time-of-use pricing. In Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Smart Grid Communications, Vancouver, BC, Canada, 21–24 October 2013.
4. Popp, H.; Attia, J.; Delcorso, F.; Trifonova, A. Lifetime analysis of four different lithium ion batteries for (plug-in) electric vehicle. In Proceedings of the Transport Research Arena (TRA) 5th Conference: Transport Solutions from Research to Deployment, Paris, France, 14–17 April 2014.
5. Technologies, I. *Selection of the MOSFET for Faster Cell Balancing of Li-Ion Batteries*; Infineon Technologies Austria AG: Villach, Austria, 2013.
6. Cao, J.; Schofield, N.; Emadi, A. Battery balancing methods: A comprehensive review. In Proceedings of the 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Harbin, China, 3–5 September 2008.
7. Aizpuru, I.; Iraola, U.; Canales, J.M.; Echeverria, M.; Gil, I. Passive balancing design for Li-ion battery packs based on single cell experimental tests for a CCCV charging mode. In Proceedings of the 2013 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Alghero, Italy, 11–13 June 2013.
8. Andrea, D. *Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs*, 1st ed.; Artech House: Norwood, MA, USA, 2010.
9. Altemose, G. Achieving cell balancing for lithium-ion batteries. *Electron. Prod.* **2008**, *50*, 21–22.
10. Einhorn, M.; Roessler, W.; Fleig, J. Improved performance of serially connected Li-ion batteries with active cell balancing in electric vehicles. *IEEE Trans. Veh. Technol.* **2011**, *60*, 2448–2457. [[CrossRef](#)]
11. Baronti, F.; Roncella, R.; Saletti, R. Performance comparison of active balancing techniques for lithium-ion batteries. *J. Power Sources* **2014**, *267*, 603–609. [[CrossRef](#)]
12. Gallardo-Lozano, J.; Romero-Cadaval, E.; Milanés-Montero, M.I.; Guerrero-Martinez, M.A. Battery equalization active methods. *J. Power Sources* **2014**, *246*, 934–949. [[CrossRef](#)]
13. Raman, S.R.; Xue, X.D.; Cheng, K.W.E. Review of Charge Equalization Schemes for Li-ion Battery and Super-Capacitor Energy Storage Systems. In Proceedings of the 2014 International Conference on Advances in Electronics Computers and Communications, Bangalore, India, 10–11 October 2014.
14. Qi, J.; Lu, D.D. Review of battery cell balancing techniques. In Proceedings of 2014 Australasian University, Power Engineering Conference, Perth, Australian, 28 September–1 October 2014.
15. Ye, Y.; Cheng, K. An automatic switched-capacitor cell balancing circuit for series-connected battery strings. *Energies* **2016**, *9*, 138. [[CrossRef](#)]
16. Kim, M.Y.; Kim, C.H.; Kim, J.H.; Moon, G.W. A chain structure of switched capacitor for improved cell balancing speed of lithium-ion batteries. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **2014**, *8*, 3989–3999. [[CrossRef](#)]
17. Ye, Y.; Cheng, K.W.E. Modeling and analysis of series-parallel switched-capacitor voltage equalizer for battery/supercapacitor strings. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.* **2015**, *3*, 977–983. [[CrossRef](#)]

18. Daowd, M.; Omar, N.; Bossche, P.V.D.; Mierlo, J.V. A review of passive and active battery balancing based on MATLAB/Simulink. *Int. Rev. Electr. Eng.* **2011**, *6*, 2974–2989.
19. Rehman, M.M.U.; Zhang, F.; Evzelman, M.; Zane, R.; Maksimovic, D. Control of a series-input, parallel-output cell balancing system for electric vehicle battery packs. In Proceedings of the 2015 IEEE 16th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, Vancouver, BC, Canada, 12–15 July 2015.
20. Rehman, M.M.U.; Evzelman, M.; Hathaway, K.; Zane, R.; Plett, G.L.; Smith, K.; Wood, E.; Maksimovic, D. Modular approach for continuous cell-level balancing to improve performance of large battery packs. In Proceedings of the 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Pittsburgh, PA, USA, 14–18 September 2014.
21. Mestrallet, F.; Kerachev, L.; Crebier, J.C.; Collet, A. Multiphase interleaved converter for lithium battery active balancing. *IEEE Trans. Power Electron.* **2014**, *29*, 2874–2881. [[CrossRef](#)]
22. Kim, T.; Qiao, W.; Qu, L. A multicell battery system design for electric and plug-in hybrid electric vehicles. In Proceedings of the 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference, Greenville, SC, USA, 4–8 March 2012.
23. Kim, H.; Shin, K.G. DESA: Dependable, efficient, scalable architecture for management of large-scale batteries. *IEEE Trans. Ind. Inform.* **2012**, *8*, 406–417. [[CrossRef](#)]
24. Hauser, A.; Kuhn, R. *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*; Woodhead Publishing: Sawston, UK, 2015; pp. 265–282.
25. Vitols, K. Design of an embedded battery management system with passive balancing. In Proceedings of the 2014 6th European Embedded Design in Education and Research Conference (EDERC), Milano, Italy, 11–12 September 2014.
26. Shen, W.; Vo, T.T.; Kapoor, A. Charging algorithms of lithium-ion batteries: An overview. In Proceedings of the 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Singapore, 18–20 July 2012.
27. Hussein, A.A.; Batarseh, I. A review of charging algorithms for nickel and lithium battery chargers. *IEEE Trans. Veh. Technol.* **2011**, *60*, 830–838. [[CrossRef](#)]
28. Lee, Y.; Park, S.; Han, S. On-line optimal ion conductivity control of li-ion battery. In Proceedings of the 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Raleigh, NC, USA, 15–20 September 2012.
29. Liu, C.L.; Wang, S.C.; Chiang, S.S.; Liu, Y.H.; Ho, C.H. PSO-based fuzzy logic optimization of dual performance characteristic indices for fast charging of Lithium-ion batteries. In Proceedings of the 2013 IEEE 10th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Kitakyushu, Japan, 22–25 April 2013.
30. Wang, S.C.; Liu, Y.H. A PSO-based fuzzy-controlled searching for the optimal charge pattern of li-ion batteries. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **2015**, *62*, 2983–2993. [[CrossRef](#)]
31. Yin, M.D.; Cho, J.; Park, D. Pulse-based fast battery iot charger using dynamic frequency and duty control techniques based on multi-sensing of polarization curve. *Energies* **2016**, *9*, 209. [[CrossRef](#)]
32. Chen, L. A Design of an Optimal Battery Pulse Charge System by Frequency-Varied Technique. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **2007**, *54*, 398–405. [[CrossRef](#)]
33. Chen, L.R. Design of duty-varied voltage pulse charger for improving Li-ion battery-charging response. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **2009**, *56*, 480–487. [[CrossRef](#)]
34. Beirão, M.D.; Calado, R.A.; Pombo, J.A.N.; Mariano, S.J.P.S. Balancing management system for improving Li-ion batteries capacity usage and lifespan. In Proceedings of the 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Florence, Italy, 6–8 June 2016.
35. Cadar, D.; Petreus, D.; Patarau, T.; Palaghita, N. Active balancing method for battery cell equalization. *Acta Tech. Napoc.* **2010**, *51*, 1–5.
36. Dung, L.R.; Yen, J.H. ILP-based algorithm for lithium-ion battery charging profile. In Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Bari, Italy, 4–7 July 2010.
37. Sanyo, E. *SANYO Lithium Ion Battery Specifications*; SANYO Electric Co., Ltd.: Moriguchi, Japan, 2005. Available online: <http://www.batteryonestop.com/baotongusa/products/datasheets/li-ion/sanyo-ur18650f-26a.pdf> (accessed on 24 April 2017).

