



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Otimização do Processo de Carregamento de Baterias Li-ion com base em Inteligência Artificial

Samuel Domingues Barata

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof.^a Doutora Maria do Rosário Alves Calado

Covilhã, junho de 2019

Dedicatória

Aos meus pais e ao meu irmão por me concederem todo o apoio e confiança.

Agradecimentos

Depois de mais um objetivo concretizado não poderia deixar de agradecer a todas as pessoas que tiveram presentes e que me apoiaram e motivaram para a realização e concretização de todo o trabalho contido nesta dissertação.

Quero agradecer à minha orientadora, Prof.^a Doutora Maria do Rosário Alves Calado, por toda a ajuda e aconselhamento que me foram prestados ao longo da realização desta dissertação.

Agradeço ao Prof. Doutor Sílvio Mariano pela sua disponibilidade e cooperação que foram prestadas para que fosse possível o desenvolvimento deste trabalho.

Quero deixar um especial agradecimento ao mentor e “chefe” de laboratório, Prof. Doutor José Álvaro Nunes Pombo, por ter partilhado o todo seu conhecimento e experiência que foram necessários e fundamentais para a realização desta dissertação, apoiando-me e orientando-me em todos os momentos e circunstâncias.

Agradeço ao Eng. Rui Mendes por toda a disponibilidade e ajuda durante todo o meu percurso académico.

Agradeço carinhosamente aos meus pais e ao meu irmão por toda a confiança, disponibilidade e apoio que me prestaram ao longo de todo o meu percurso académico e que tornaram possível a realização de um sonho.

Por fim quero agradecer a todos os meus amigos e conhecidos que estiveram presentes durante todo o meu percurso académico e que contribuíram para que a realização desta dissertação também fosse possível.

Resumo

A evolução das tecnologias de armazenamento de energia está, nos dias de hoje, associada à recorrente transformação do atual paradigma da produção da energia elétrica e à forma como é consumida. Por questões de necessidade, e não apenas por conveniência, é cada vez mais inevitável o armazenamento da energia elétrica que não pode ser consumida no momento em que é produzida, para garantir sustentabilidade energética. Portanto, por revelarem alta densidade energética, alta eficiência e uma maior longevidade, as baterias de íons de lítio são uma tecnologia de armazenamento de energia que têm sido recentemente aplicadas no armazenamento de energia proveniente da produção de origem renovável, bem como no sector dos veículos elétricos/híbridos e nos dispositivos portáteis.

Assim sendo, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um método de carregamento, que tem por base um algoritmo de inteligência artificial designado como redes neurais, que privilegie a minimização da deterioração precoce das baterias com o propósito de prolongar o seu tempo de vida útil. Para a elaboração deste método proposto o trabalho desenvolvido pode ser descrito em duas fases.

A primeira é referente à análise e estudo da resistência interna de baterias com diferentes níveis de envelhecimento, onde serão comparados e verificados os valores da resistência interna em várias condições de carregamento. Isto possibilitará uma concepção real do estado de vida das baterias e também do modo como estas se comportam durante um carregamento.

A segunda fase consiste no desenvolvimento de um método de carregamento com o recurso à implementação de uma rede neuronal. O método proposto minimizará a deterioração das baterias e garantirá um carregamento adaptado e ideal para as suas condições. Os resultados obtidos são comparados com métodos tradicionais existentes na literatura.

Palavras-chave

Tecnologias de armazenamento de energia elétrica; Baterias Li-ion; Resistência interna; Redes neurais.

Abstract

The evolution of energy storage systems is nowadays associated with the recurrent transformation of the current paradigm of electric energy production and the way it is consumed. For reasons of necessity, and not just for convenience, it is increasingly unavoidable to store electrical energy that cannot be consumed when it is produced to guarantee energy sustainability. Therefore, as they demonstrate high energy density, high efficiency and longer longevity, lithium-ion batteries are an energy storage technology that recently has been applied to the storage of energy from renewable sources, as well as in the vehicle electric / hybrid sector and portable devices.

Therefore, this work has the objective of developing a charging method, based on an artificial intelligence algorithm called neural networks, which focuses on the minimization of early deterioration of the batteries with the purpose of prolonging their useful life. For the elaboration of this proposed method the work developed can be reconciled in two phases.

The first one refers to the analysis and study of the internal resistance of batteries with different levels of aging, where the values of the internal resistance for various conditions will be compared and verified. This will allow a real conception of the state of life of the batteries as well as the way it behaves during a charging.

The second phase consists in the development of a charging method with the implementation of a neural network. The proposed method will minimize the deterioration of batteries and guarantee an adapted and ideal charge for their conditions. The results obtained are compared with traditional methods in the literature.

Keywords

Technologies of energy storage system; Li-ion battery; Internal Resistance; Neural networks;

Índice

Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação e objetivos	8
1.3 Estrutura do documento	9
Capítulo 2	10
Estado de arte	10
2.1 Métodos de carregamento	12
2.1.1 Método de carregamento corrente constante/tensão constante (CC/CV)	12
2.1.2 Método de carregamento <i>multistage</i> (MSCC)	14
2.1.3 Método de carregamento pulsado (PC)	15
2.1.4 Método de carregamento corrente de onda sinusoidal (SRC)	16
2.1.5 Comparação dos métodos de carregamento	17
2.2 Métodos determinantes da resistência interna	18
2.2.1 Método de pulso de corrente DC	19
2.2.2 Método de pulso de corrente AC	20
2.2.3 Método <i>pulse-multisine signal</i>	23
2.2.4 Método de perdas de energia por transmissão de calor	25
Capítulo 3	29
Análise da resistência interna	29
3.1 Descrição geral	29
3.2 Hardware desenvolvido	30
3.3 Software desenvolvido	32
3.3.1 Unidade auxiliar de controlo	32
3.3.2 Unidade Principal de Controlo	34
3.4 Análise da resistência interna em regime de relaxamento	37
3.4.1 Caso 1 - Pulsos de Corrente de Carregamento	38
3.4.2 Caso 2 - Pulsos de Corrente de Descarregamento	43
3.5 Análise da resistência interna em regime de carregamento	47
3.5.1 Caso 1 - Bateria com reduzido número de ciclos	48
3.5.2 Caso 2 - Bateria com elevado número de ciclos	50
Capítulo 4	53
Método de carregamento baseado em redes neuronais	53
4.1 Introdução às redes neuronais	53
4.2 Método de carregamento baseado em redes neuronais	56

4.2.1	Método de treino da rede neuronal.....	57
4.2.2	Software desenvolvido.....	60
4.3	Resultados experimentais.....	65
4.3.1	Caso 1 - Bateria com reduzido número de ciclos.....	66
4.3.2	Caso 2 - Bateria com elevado número de ciclos.....	68
4.3.3	Análise da eficiência do método desenvolvido.....	71
Capítulo 5	79
Conclusão	79
5.1	Considerações finais.....	79
5.2	Trabalhos futuros.....	81
Referências bibliográficas	82

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Representação do historial e da previsão da percentagem da produção global de energia primária.	2
Figura 1.2 - Tecnologias de Armazenamento de Energia.	3
Figura 1.3 - Diagrama comparativo das várias tecnologias existentes.	4
Figura 1.4 - Ilustração da capacidade de várias tecnologias instaladas para o armazenamento global de energia elétrica.	5
Figura.1.5 - Previsão da evolução das tecnologias de armazenamento de energia.	7
Figura 2.1 - Método de carregamento Corrente Constante/Tensão Constante (CC/CV).	13
Figura 2.2 - Método de carregamento Multistage (MSCC).	14
Figura 2.3 - Método de carregamento pulsado: a) VFPC; b) VDPC.	16
Figura 2.4 - Diagrama comparativo dos vários métodos de carregamento.	17
Figura 2.5 - Representação da resposta da tensão durante um pulso de corrente DC.	19
Figura 2.6 - Modelo elétrico de uma bateria Li-ion.	21
Figura 2.7 - Diagrama de <i>Nyquist</i> típico de um modelo de uma bateria Li-ion.	23
Figura 2.8 - Projeção geral de um sinal <i>pulse-multisine</i>	24
Figura 2.9 - Esquema geral de um Calorímetro usado na determinação do calor produzido por uma bateria Li-ion.	26
Figura 3.1 - Hardware utilizado para a implementação.	31
Figura 3.2 - Fluxograma do programa implementado na unidade auxiliar de controlo.	33
Figura 3.3 - Fluxograma do programa implementado na unidade principal de controlo.	34
Figura 3.4 - Fluxograma da função configurações iniciais.	35
Figura 3.5 - Fluxograma da função requisição e cálculo da temperatura.	36
Figura 3.6 - Fluxograma da função cálculo da resistência.	37
Figura 3.7 - Leitura da resistência interna em diferentes níveis de SOC, com vários pulsos de corrente de carregamento: a) 0.5s; b) 2s; c) 5s; d) 10s.	39
Figura 3.8 - Leitura da resistência interna em diversas temperaturas, com vários pulsos de corrente de carregamento: a) 0.5s; b) 2s; c) 5s; d) 10s.	40
Figura 3.9 - Leitura da resistência interna em diferentes níveis de SOC, com vários pulsos de corrente de carregamento: a) 0.5s; b) 2s; c) 5s; d) 10s.	41

Figura 3.10 - Leitura da resistência interna em diversas temperaturas, com vários pulsos de corrente de carregamento: a) 0.5s; b) 2s; c) 5s; d) 10s.	42
Figura 3.11 - Leitura da resistência interna em diferentes níveis de SOC, com vários pulsos de corrente de descarregamento: a) 0.5s; b) 2s; c) 5s; d) 10s.	44
Figura 3.12 - Leitura da resistência interna em diversas temperaturas, com vários pulsos de corrente de descarregamento: a) 0.5s; b) 2s; c) 5s; d) 10s.	44
Figura 3.13 - Leitura da resistência interna em diferentes níveis de SOC, com vários pulsos de corrente de descarregamento: a) 0.5s; b) 2s; c) 5s; d) 10s.	46
Figura 3.14 - Leitura da resistência interna em diversas temperaturas, com vários pulsos de corrente de descarregamento: a) 0.5s; b) 2s; c) 5s; d) 10s.	46
Figura 3.15 - Perfis da resistência interna em carregamentos completos, com várias correntes de carregamento (Caso 1).....	48
Figura 3.16 - Perfis da resistência interna ao longo do carregamento em várias temperaturas de carregamento (Caso 1).....	50
Figura 3.17 - Perfis da resistência interna em carregamentos completos, com várias correntes de carregamento (Caso 2).....	51
Figura 3.18 - Perfis da resistência interna ao longo do carregamento em várias temperaturas de carregamento (Caso 2).....	51
Figura 4.1 - Rede neuronal típica de uma arquitetura <i>Multilayer Perceptron</i>	54
Figura 4.2 - Representação da rede neuronal <i>Multilayer Perceptron</i> implementada.	57
Figura 4.3 - Dados do conjunto de treino da rede neuronal.....	58
Figura 4.4 - Variação dos valores de corrente relativamente à tensão e à resistência, em diferentes temperaturas (20°C, 30°C, 40°C e 50°C).	59
Figura 4.5 - Variação dos valores de corrente relativamente à temperatura e à resistência, em diferentes níveis de tensão (3.3 V, 3.7 V, 4 V e 4.2 V).	59
Figura 4.6 - Fluxograma do programa implementado na unidade principal de controlo.	61
Figura 4.7 - Fluxograma da função configurações iniciais.	62
Figura 4.8 - Fluxograma da função cálculo inicial da resistência.....	63
Figura 4.9 - Fluxograma da função requisição e cálculo da temperatura.	64
Figura 4.10 - Fluxograma da função cálculo da resistência.	65
Figura 4.11 - Parâmetros do carregamento; (a) Perfil de corrente; (b) Resistência interna e (c) Variação da temperatura da bateria.....	66
Figura 4.12 - Perfil de tensão da bateria com reduzido número de ciclos (Caso 1)...	67
Figura 4.13 - (a) Perfil do SOC estimado e (b) Tensão em função do SOC ao longo do carregamento.	68

Figura 4.14 - Parâmetros do carregamento; (a) Perfil de corrente; (b) Resistência interna e (c) Variação da temperatura da bateria.	69
Figura 4.15 - Perfil de tensão da bateria com elevado número de ciclos (Caso 2)....	70
Figura 4.16 - (a) Perfil do SOC estimado e (b) Tensão em função do SOC ao longo do carregamento.	70
Figura 4.17 - (<i>Multistage</i>) Perfil da corrente de carregamento (a) e variação da temperatura da bateria durante o carregamento (b).	72
Figura 4.18 - (<i>Multistage</i>) Perfil de tensão da bateria com reduzido número de ciclos (Caso 1).	72
Figura 4.19 - (<i>Multistage</i>) (a) Perfil do SOC estimado e (b) Tensão em função do SOC ao longo do carregamento.....	73
Figura 4.20 - (<i>Multistage</i>) Perfil da corrente de carregamento (a) e variação da temperatura da bateria durante o carregamento (b).	75
Figura 4.21 - (<i>Multistage</i>) Perfil de tensão da bateria com reduzido número de ciclos (Caso 2).	75
Figura 4.22 - (<i>Multistage</i>) (a) Perfil do SOC estimado e (b) Tensão em função do SOC ao longo do carregamento.....	76

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Valores da resistência interna numa bateria com reduzido número de ciclos (Carregamento).....	40
Tabela 3.2 - Valores da resistência interna numa bateria com elevado número de ciclos (Carregamento).....	43
Tabela 3.3 - Valores da resistência interna numa bateria com reduzido número de ciclos (Descarregamento).....	45
Tabela 3.4 - Valores da resistência interna numa bateria com elevado número de ciclos (Descarregamento).....	47
Tabela 4.1 - Análise comparativa das características principais de carregamento entre o algoritmo <i>multistage</i> e o algoritmo com base nas redes neuronais (Caso 1).	73
Tabela 4.2 - Análise comparativa das características principais de carregamento entre o algoritmo <i>multistage</i> e o algoritmo com base nas redes neuronais (Caso 2).	76

Lista de Acrónimos e Abreviaturas

AC	<i>Alternating Current</i>
ACS	<i>Ant Colony System</i>
BC	<i>Boost Charger</i>
BESS	<i>Battery Energy Storage System</i>
BEV	<i>Battery Electrical Vehicle</i>
BP	<i>Back-propagation</i>
CC/CV	<i>Constant current/Constant voltage Charging Method</i>
COA	<i>Consecutive Orthogonal Arrays</i>
CM	<i>Charge mode</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DL	<i>Double Loop</i>
EES	<i>Electrical Energy Storage</i>
EIS	<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i>
FCDM	<i>Full charge detect mode</i>
FL	<i>Fuzzy Logic</i>
GP	<i>Grey Predicated</i>
HEV	<i>Hybrid Electrical Vehicle</i>
Li-ion	<i>Lithium-ion</i>
MLP	<i>Multilayer perceptron</i>
MSCC	<i>Multistage Charging Method</i>
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>
PC	<i>Pulse Charging Method</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</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>
SRC	<i>Sinusoidal Ripple Current</i>
TC	<i>Trickle Charge</i>
VDPC	<i>Variable Duty Pulse Charge</i>
VFPC	<i>Variable Frequency Pulse Charge</i>

Lista de Símbolos

b_{Hn}	Bias da camada escondida
b_{O1}	Bias da camada de saída
C	Capacidade térmica
C_{bat}	Capacidade térmica da bateria
C_{cal}	Capacidade térmica do calorímetro
F_1	Função de ativação da camada escondida
F_2	Função de ativação da camada de saída
I_{charge}	Corrente de carregamento
I_{min}	Valor mínimo de corrente
$I_{trickle}$	Valor reduzido de corrente de carregamento
pt	Período de tempo de perturbação da corrente
R	Resistência interna da bateria
R_{CT}	Resistência de transferência de carga
R_0	Resistência puramente óhmica
R_W	Resistência de difusão ou de Warburg
S_{Hn}	Saída dos neurónios da camada escondida
S_{O1}	Saída dos neurónios da camada de saída
tr	Tempo de amostragem da resistência interna
V_{max}	Valor máximo de tensão
V_{OC}	Tensão em circuito aberto
$V_{trickle}$	Valor crítico de tensão
w_{mn}	Pesos correspondentes às conexões entre a camada de entrada e a camada escondida
w_n	Pesos correspondentes às conexões entre a camada escondida e a camada saída
Z	Impedância da bateria
φ	Ângulo de desfasamento
ω	Frequência angular

Capítulo 1

O capítulo que aqui se apresenta terá como propósito o enquadramento do conteúdo que irá ser abordado nesta Dissertação. Para isso é apresentada uma breve explicação do contexto em que está inserido o tema, onde será apresentado um estudo geral da tecnologia aqui referida e em que meios é que ela é utilizada. Seguidamente são então divulgados os aspetos motivantes pelo qual este trabalho foi desenvolvido e, por fim, irá ser apresentada a estrutura desta dissertação, bem como uma breve descrição do que irá ser abordado em cada capítulo.

Introdução

1.1 Enquadramento

O aumento das exigências energéticas tem resultado numa saturação dos recursos energéticos que, manifestamente, para além da deterioração do estado do planeta, têm também causado grandes variações no valor monetário associado aos combustíveis fósseis.

Desta forma, a utilização dos combustíveis fósseis na produção de energia elétrica está atualmente a tornar-se um dos principais desafios e problemas a ultrapassar e tenderá a agravar-se futuramente devido ao crescimento na procura de energia. Este inconveniente está diretamente associado ao gradual desenvolvimento da taxa populacional mundial e, conseqüentemente, às exigências energéticas do atual sistema social e económico, prevendo-se um crescimento de mais de dois terços da procura mundial de eletricidade até 2060 [1]. O atual paradigma de uma sociedade consumista tem revelado uma enorme influência na deterioração do sistema ecológico e ambiental e, por este motivo, as entidades governamentais concentram a sua atenção na diminuição da pegada ecológica, reunindo tomadas de decisões e aplicando normas e leis inexoráveis que visam à atenuação da degradação do planeta e à estabilização da economia energética.

Sendo considerado um dos temas mais debatidos internacionalmente em contextos de análise e estudo, a produção de energia tem sido centro de atenção na procura por soluções que estabeleçam a sustentabilidade ambiental e que respondam igualmente à crescente procura energética. Deste modo, o setor de produção de energia tem sofrido transformações

que visam o estabelecimento de estratégias que proporcionem uma alteração dos atuais e convencionais processos de produção, promovendo e impulsionando a forma de produção de energia proveniente de fontes de origem renovável, modificando não apenas como a energia é produzida, mas também como é distribuída e consumida. Atualmente torna-se cada vez mais evidente essa transformação, passando efetivamente por uma aposta da descentralização da produção de energia elétrica que tem como princípio a aplicação de várias tecnologias de produção de origem renovável que garantirá as necessidades energéticas.

Como se ilustra na Figura 1.1, até ao início do século XXI, cerca de 60% a 70% da energia primária produzida globalmente derivava dos combustíveis fósseis, sendo a restante maioritariamente hídrica. Contudo, a partir do final da primeira década, com o surgimento de produção de energia solar e eólica, o crescimento da taxa de produção de origem renovável torna-se cada vez mais evidente, demonstrando-se uma tendência de crescimento gradual ao longo dos anos, estimando-se que no ano de 2050, cerca de 64% da energia produzida mundialmente seja disponibilizada por recursos renováveis, maioritariamente à custa da produção solar e eólica [2]-[4].

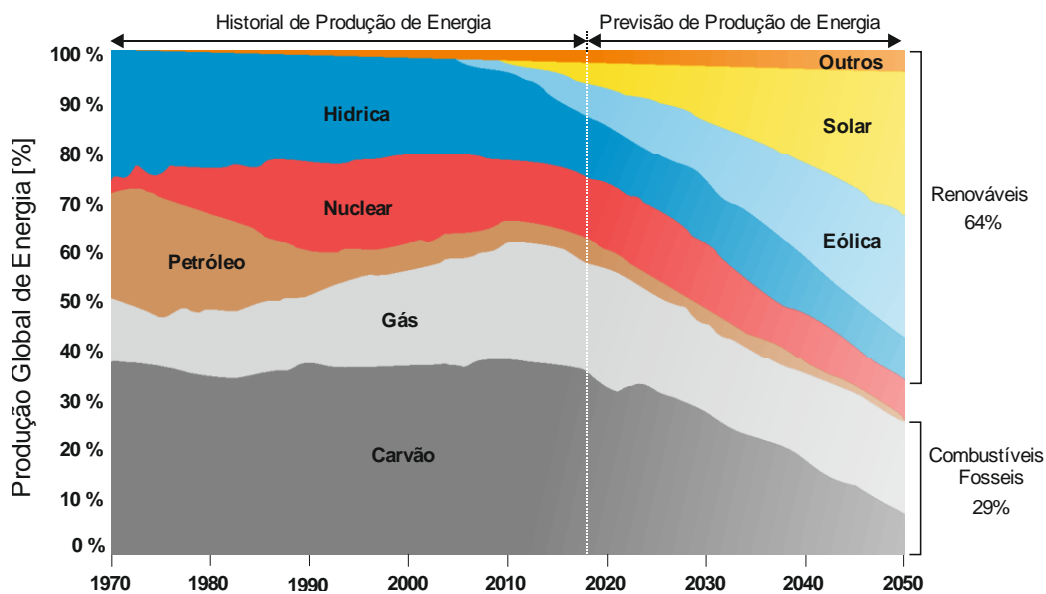


Figura 1.1 - Representação do historial e da previsão da percentagem da produção global de energia primária.

No entanto, a utilização de tecnologias de produção de energia com origem renovável, devido à sua grande variabilidade e difícil previsão, provoca problemas de estabilidade na rede elétrica. Esta particularidade traduz-se num enorme desafio em garantir a manutenção do equilíbrio no sistema elétrico de forma a assegurar a sua estabilidade e confiabilidade.

Na comunidade científica tem-se procurado soluções viáveis que incluem a agregação de sistemas de armazenamento de energia elétrica (EES), deslocamento de cargas, interconexões com redes externas, redes inteligentes, entre outras. A abordagem

reconhecida como sendo a mais promissora de entre todas as soluções possíveis é o armazenamento de energia elétrica (EES) [5].

O armazenamento de energia elétrica (EES) consiste no processo de conversão de energia elétrica para outras formas de energia, em que é possível o seu armazenamento em diferentes meios, podendo depois ser novamente convertida em energia elétrica assim que necessário [5], [6]. Tratando-se de um método reversível, apresenta a grande vantagem de conservar e gerir a energia armazenada da maneira mais conveniente, de forma a que esta seja disponibilizada e consumida no momento mais oportuno e desejado.

O processo de armazenamento de energia destaca-se nos segmentos de produção, transmissão, distribuição e consumo, facultando inúmeras vantagens no que diz respeito à eficiência energética, apresentando diversos serviços que permitem salvaguardar a integridade e estabilidade dos sistemas, garantindo os seus níveis de potência, qualidade e segurança. Estes serviços incluem a regulação e controlo de frequência e tensão, nivelamento de carga, compensação de perdas na rede, reserva girante, entre outros [5]-[7].

Existe um conjunto abrangente de tecnologias referenciadas na literatura, que podem compor um sistema de armazenamento de energia, com características operacionais distintas, sendo que umas estão completamente estabelecidas e outras em fase de desenvolvimento e/ou investigação, manifestando um enorme potencial para uma utilização cada vez mais viável e rentável.

As tecnologias de armazenamento de energia podem ser categorizadas em função do tipo de energia que é armazenada, como ilustra a Figura 1.2. Cada tecnologia está classificada consoante a forma de energia que armazena, que pode ser do tipo mecânica, eletroquímica, química, térmica e elétrica, que será posteriormente convertida em energia elétrica.

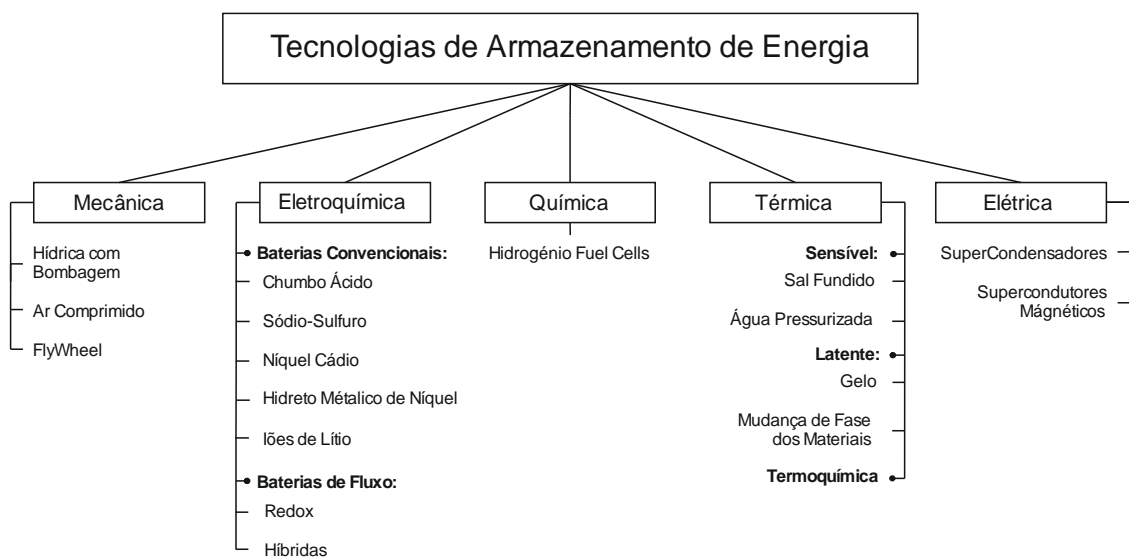


Figura 1.2 - Tecnologias de Armazenamento de Energia.

Como foi constatado anteriormente, existe uma grande diversidade de tecnologias de armazenamento de energia elétrica. Contudo, a determinação do tipo de tecnologia a utilizar vai de encontro às diferentes aplicações e objetivos pretendidos, que implicam e requerem diferentes características por parte dos sistemas de armazenamento de energia.

Deste modo, para a determinação do tipo de tecnologia de armazenamento, é fundamental o cumprimento de uma análise ambiental, económica e técnica que irá, posteriormente, evidenciar qual o tipo de tecnologia mais indicada.

Esta escolha é estabelecida com base na análise das características técnicas das tecnologias de armazenamento tais como: densidades de energia e de potência, duração dos ciclos carga/descarga, o custo de capital, capacidade de armazenamento, autonomia, rendimento e vida-útil [5]-[7], podendo-se deste modo efetuar-se uma avaliação da melhor aplicação para cada tecnologia, considerando-se a eficácia do sistema e os custos associados a cada serviço. Deste modo, para efeitos comparativos, a Figura 1.3 ilustra algumas características distintas alusivas a algumas tecnologias de armazenamento [6]-[8].

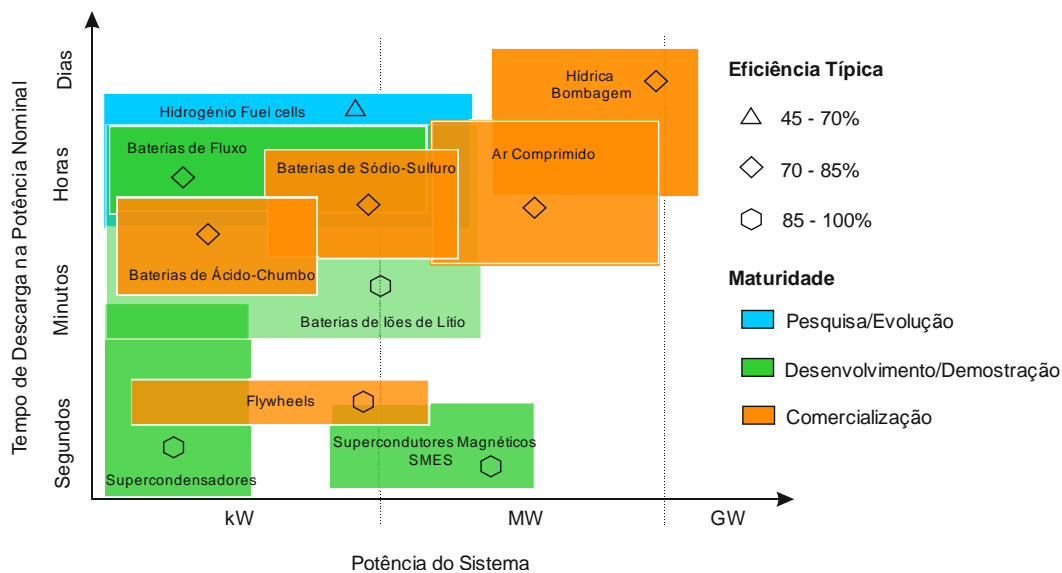


Figura 1.3 - Diagrama comparativo das várias tecnologias existentes.

Como é observável na Figura 1.3, estão representados alguns parâmetros que são fundamentais para a determinação do tipo de tecnologia a aplicação pretendida. Primeiramente, o diagrama demonstra os diferentes níveis de autonomia das tecnologias em função da sua potência nominal, permitindo distinguir quais as tecnologias mais idóneas e viáveis para a aplicação a que se destinam. No que diz respeito à aplicação, as tecnologias são divididas em dois grupos: sistemas de alta densidade de potência e sistemas de alta densidade energética.

As tecnologias mais indicadas para aplicações de alta densidade de potência são as que apresentam mais baixa potência e com tempos de descarga mais curtos (*e.g.*, os supercondensadores, os *flywheels* e algumas baterias). Para aplicações de alta densidade energética são então recomendadas tecnologias de maior potência e com tempos de descarga

mais longos (e.g., a hídrica com bombagem, o ar comprimido e os supercondutores magnéticos).

Para melhor avaliar as características das tecnologias de armazenamento são também ilustrados os níveis de maturidade e a eficiência típica. Das tecnologias mencionadas, apenas o hidrogénio-*fuel cells* ainda se encontra numa fase de pesquisa e investigação enquanto que nas restantes, algumas encontram-se totalmente desenvolvidas e comercializadas e outras em fase de desenvolvimento e comercialização. Relativamente à eficiência, verifica-se que as tecnologias de maior densidade de potência apresentam uma maior eficiência, destacando-se, no âmbito das baterias, as de iões de lítio.

Apesar do âmbito deste documento não estar integralmente compreendido no domínio geral das tecnologias de armazenamento de energia, é importante clarificar e mencionar o avanço que recentemente se tem sentido sobre estas. Por este motivo, é essencial a compreensão da situação atual relativa às tecnologias que estão instaladas e que detêm a capacidade global de armazenamento de energia elétrica.

Através do gráfico da Figura 1.4, construído com base em valores retirados em [7], [9], [10], é explícito que a capacidade total de armazenamento instalada mundialmente corresponde a cerca de 176 GW, sendo que 96% de toda a energia armazenada é dominada pelos sistemas hídricos com bombagem. Trata-se de uma tecnologia bastante desenvolvida e madura que constitui cerca de 169 GW instalados em todo o mundo. Também com bastante relevância, temos os sistemas de armazenamento térmicos com cerca de 3.3 GW (1.9%), nos quais predomina a tecnologia de sal fundido com cerca de 75% da energia térmica armazenada.

Seguidamente, considerado como umas das tecnologias mais promissoras e de elevada importância, o armazenamento eletroquímico apresenta uma parcela bastante significativa na capacidade mundial e destaca-se por ser uma das tecnologias com maior crescimento no segmento de mercado. Embora a instalação de baterias para armazenamento de energia elétrica seja apenas de 1.9 GW (1.1%), existe uma grande variedade de tecnologias de armazenamento eletroquímico com enorme potencial de desenvolvimento.

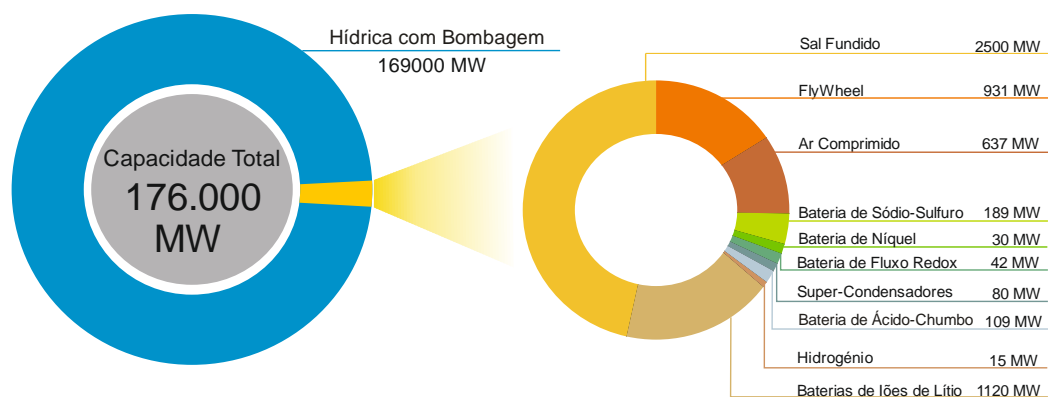


Figura 1.4 - Ilustração da capacidade de várias tecnologias instaladas para o armazenamento global de energia elétrica.

Como é visível na Figura 1.4, as baterias de íões de lítio são predominantes com cerca de 1120 MW de capacidade instalada, traduzindo-se em 59% da energia total armazenada nas tecnologias eletroquímicas.

Contudo, é também importante salientar que as baterias de ácido chumbo, sódio-sulfuro e níquel possuem grande relevância no mercado elétrico, contribuindo significativamente no desenvolvimento e evolução das baterias nos sistemas de armazenamento de energia elétrica.

Apesar da predominância dos sistemas hídricos com bombagem na capacidade de armazenamento instalada globalmente, são as baterias (BESS) que apresentam maior prosperidade. As baterias são do conhecimento comum e apresentam grande vulgaridade em aplicações de baixa potência. De entre as tecnologias disponíveis para o armazenamento de energia elétrica, as baterias recarregáveis têm sido alvo de um enorme crescimento e apresentam uma série de oportunidades que, devido à sua versatilidade, poderão ser aplicadas nas mais diversas áreas, abrangendo desde o sector industrial até às mais diversas aplicações presentes no quotidiano.

O desenvolvimento tecnológico dos dispositivos de armazenamento tem permitido atenuar a variabilidade e a imprevisibilidade das tecnologias de produção de energia com origem renovável. Com o recente progresso dos sistemas eólicos e solares para a produção de energia elétrica, a aplicação da eletrónica de potência nos sistemas de produção/transmissão de energia tem-se tornado cada vez mais essencial, devido ao facto das baterias associadas aos conversores proporcionarem numerosas possibilidades de aplicação.

É mencionada na literatura a antevisão de que, num futuro próximo, as tecnologias de armazenamento irão assegurar grande parte das necessidades energéticas. Conforme foi explicado no início deste capítulo, na Figura 1.1, é previsto um domínio de mais de metade da produção mundial de energia elétrica por parte das fontes de origem renovável, confirmando, portanto, a imprescindibilidade da utilização das tecnologias EES. Como grande parte dessa energia produzida é maioritariamente de origem solar e eólica, serão as baterias que, devido às vantagens e oportunidades apresentadas, certamente se expandirão de forma proporcional ao crescimento da produção de energia elétrica por esses mesmos meios.

São vários os estudos encontrados na literatura com propósito de perspetivar o futuro das tecnologias EES, estimando, com base na situação atual, o possível decurso do desenvolvimento destas. Como é visível na Figura 1.5, a energia elétrica armazenada globalmente irá sofrer grandes alterações relativamente aos dados atuais e aos dados previstos para o ano de 2030. É observável que a hídrica com bombagem, apesar de se manter a tecnologia com mais capacidade de armazenamento a nível global, irá perder a sua predominância para as tecnologias que se encontram em crescimento, nomeadamente para as tecnologias eletroquímicas e térmicas. É evidente o efeito das baterias no desenvolvimento dos sistemas de armazenamento de energia elétrica e, com base nos estudos realizados em [2], [9]-[11], prevê-se que num período de pouco mais de 10 anos, as baterias venham a atingir mais de um terço da capacidade total mundial.

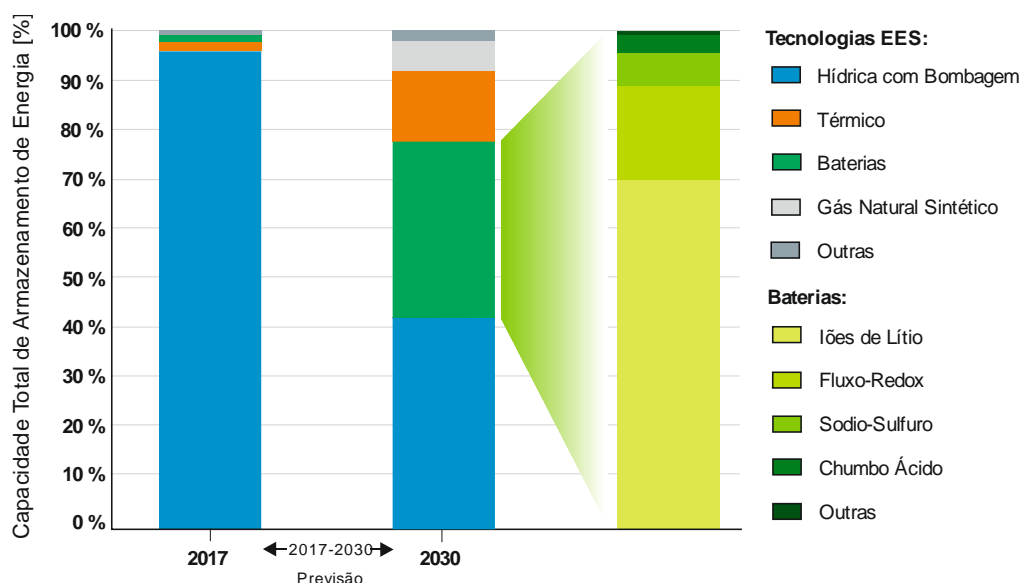


Figura.1.5 - Previsão da evolução das tecnologias de armazenamento de energia.

De entre a variedade de baterias existentes, as do tipo íons de lítio são as que mais se têm popularizado. Analisando a Figura 1.5, é possível constatar a tendência para a utilização deste tipo de tecnologia, onde se estima que cerca de 70% das baterias existentes será do tipo de íons de lítio (Li-ion). Em destaque estão também as baterias de fluxo *redox* que apresentam um crescimento significativo, que poderão tomar parte de cerca de 20% da energia armazenada em tecnologias eletroquímicas.

As baterias Li-ion têm adquirido uma elevada distinção comparativamente a outros tipos de baterias que estão tecnologicamente maduras, como por exemplo, as de chumbo-ácido ou níquel cádmio, por revelarem alta densidade energética, alta eficiência e uma maior longevidade [12]. Apesar de apresentarem reduzida tolerância à sobrecarga e um custo de aquisição elevado, as qualidades sobrepõem-se e, por essa razão, têm sido alvo de estudo e desenvolvimento na comunidade científica.

Nos dias de hoje, considerado como o pináculo na evolução das tecnologias de armazenamento de energia elétrica, a integração de baterias de íons de lítio nos sistemas elétricos tem possibilitado o solucionamento dos problemas de estabilização e imprevisibilidade das tecnologias de produção de energia de origem renovável, essencialmente a solar e eólica. Desta forma, a procura por estratégias e mecanismos que permitam aumentar a eficiência do processo de armazenamento e do desempenho dos sistemas elétricos é fundamental para possibilitar a mudança de perspetiva relativamente à forma como a energia é produzida, promovendo a sustentabilidade energética.

1.2 Motivação e objetivos

A necessidade de desenvolver novos métodos que possam melhorar os sistemas de armazenamento de energia elétrica tem sido um assunto que se tem destacado intensamente na atualidade. Na literatura existem diversas metodologias que assentam no desenvolvimento, investigação e pesquisa de novas soluções tecnológicas que assegurem a estabilidade e confiabilidade dos sistemas de armazenamento de energia. Este avanço reflete-se e tem grande impacto na sustentabilidade do ambiente, tratando-se de uma área tecnológica centralizada essencialmente no aproveitamento eficaz da energia produzida, bem como na diminuição da pegada ecológica, promovendo desta forma um futuro mais limpo e promissor. Segundo o ponto de vista do autor, estes fatores tornaram-se relevantes na suscitação pelo interesse em realizar uma Dissertação nesta temática, com o intuito de coadjuvar e contribuir no aperfeiçoamento de soluções mais capazes e eficazes.

Como as baterias de íons de lítio são tecnologias de armazenamento de energia que se encontram em grande ascensão e são consideradas as mais promissoras, dentro do domínio das tecnologias de armazenamento de energia elétrica, com grande impacto tanto a nível doméstico como a nível industrial comparativamente às outras tecnologias, é o motivo pelo qual a elaboração desta Dissertação assenta no desenvolvimento e investigação de soluções mais adequadas e robustas.

Este trabalho destaca-se essencialmente na otimização do processo de carregamento de baterias de íons de lítio, tendo em conta o seu estado inicial, isto é, o seu nível de envelhecimento, e as condições de utilização a que estão sujeitas. O objetivo será implementar um algoritmo, baseado em inteligência artificial, que permite a análise das propriedades inerentes da bateria, para assim verificar em que estado e em que meios esta se encontra, a fim de estabelecer e garantir um carregamento com características ideais.

Para além da preservação da bateria ao longo do tempo, será também tomada em consideração a segurança do sistema, pois o desenvolvimento deste algoritmo tem como foco o aumento da eficiência do carregamento e a maximização da transferência de energia, que resultará num prolongamento do tempo de vida útil das baterias.

1.3 Estrutura do documento

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, contendo no final as referências bibliográficas do documento.

O Capítulo 1 é constituído por 3 secções e expõe de forma geral uma primeira abordagem ao conteúdo que vai ser apresentado na dissertação, enquadrando a importância das tecnologias de armazenamento de energia, mais concretamente baterias Li-ion, na crescente penetração das energias renováveis nas redes elétricas. De seguida é apresentada a motivação pelo qual este trabalho foi desenvolvido e quais os principais objetivos a concretizar. Por último é apresentado de que modo este documento está organizado.

O Capítulo 2 é destacado por apresentar o estado de arte deste documento, onde é apresentada uma introdução relativamente às características das baterias Li-ion. Para além disso, este capítulo é ainda constituído por 2 secções. A primeira secção descreve os vários métodos de carregamento descritos na literatura, bem como algumas das suas variantes, e apresenta um breve estudo comparativo dos métodos em causa. A segunda secção é composta por uma breve introdução à resistência interna da bateria e depois são abordados os métodos determinantes da resistência interna de uma bateria mais utilizados na literatura.

No Capítulo 3 está detalhado todo o processo de funcionamento necessário conhecer para a análise da resistência interna das baterias. Este está dividido em 5 secções, sendo que a primeira é responsável por descrever de forma genérica o processo de análise da resistência interna. A segunda secção descreve o *hardware* utilizado e a terceira secção o *software* desenvolvido. A quarta secção apresenta os resultados da análise da resistência com as baterias em regime de relaxamento e a quinta secção apresenta os resultados da análise da resistência com as baterias em regime de carregamento.

O Capítulo 4 é constituído por 3 secções e está destacado para descrever o método de carregamento desenvolvido com base em redes neuronais. A primeira secção apresenta uma introdução às redes neuronais. A segunda secção pormenoriza a construção do método de carregamento baseado nas redes neuronais. Esta é composta por 2 subsecções, sendo que a primeira descreve o processo de treino da rede neuronal e a segunda o *software* desenvolvido. A terceira e última secção expõe os resultados experimentais do método proposto, onde é apresentado por fim a análise da eficiência do método.

Por último, no Capítulo 5 são enunciadas as conclusões finais do trabalho realizado e são apresentadas ideias e direções de investigação para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

Capítulo 2

A temática apresentada neste capítulo tem como destaque as baterias Li-ion. Primeiramente, serão descritas algumas das características intrínsecas e as suas principais aplicações. Serão também mencionados os aspetos fundamentais para o seu correto funcionamento e quais os parâmetros chave em que a comunidade científica mais se foca para o seu melhoramento e desenvolvimento. Seguidamente irá ser realizado um estudo no âmbito dos vários métodos de carregamentos existentes, e mais comuns na literatura, destacando-se os métodos de corrente constante/tensão constante (CC/CV), Multistage (MSCC), pulsado (PC) e de corrente de onda sinusoidal (SRC), fazendo uma breve comparação entre os diferentes métodos. Por fim será efetuado um estudo relativamente às técnicas mais utilizadas e comuns na literatura para a determinação da resistência interna/impedância das baterias de íões de lítio, realçando-se os métodos de pulso de corrente DC, pulso de corrente AC, pulse-multisine signal e de perdas de energia por transmissão de calor.

Estado de arte

As baterias Li-ion surgiram recentemente como uma tecnologia auspiciosa que está a ser alvo de vários estudos para o armazenamento e fornecimento de energia. Têm sido aplicadas no âmbito dos sistemas armazenamento energia com produção de origem renovável (solar e eólica), nos sectores de veículos híbridos (HEV) e veículos elétricos (BEV), nas redes inteligentes e nos dispositivos eletrónicos portáteis. Como são tecnologias que apresentam características de alta densidade energética, alta eficiência energética, elevados ciclos de vida e não sofrem de efeitos de memória [13], [14], são consideradas as mais apreciadas na utilização de sistemas de armazenamento de energia elétrica.

Contudo, apesar de todos os avanços tecnológicos e melhoramentos efetuados, as baterias Li-ion continuam a apresentar adversidades e desafios que convergem para uma busca incessante por soluções na comunidade científica. Esta preocupação tem surgido com o

propósito de otimizar o processo de carregamento de forma a maximizar o seu desempenho, garantir uma redução do tempo de carregamento e o prolongar o tempo de vida útil das baterias, de maneira a que estas sejam capazes de fornecer e armazenar a energia com segurança, confiabilidade e eficiência, de acordo com a necessidade.

A conservação do estado de vida (SOH) das baterias de maneira a evitar o envelhecimento precoce é, indubitavelmente, um dos critérios mais estudados e abordados na literatura. No entanto é inevitável a sua degradação ao longo do tempo, embora as suas proporções vão depender do uso que lhe é conferido e das condições de operação. O envelhecimento das baterias Li-ion é principalmente influenciado pelas condições adversas e hostis em que são utilizadas, isto é, pelas elevadas e baixas temperaturas, elevadas correntes, sobrecargas e descargas profundas [15]. Estes fatores contribuem e aceleram a degradação da bateria e podem até causar, em casos de elevadas temperaturas, elevadas correntes e sobrecargas, grandes riscos para a segurança dos sistemas, podendo ocorrer inflamação ou até explosão das baterias [12].

Deste modo, um aspeto fundamental para evitar a ocorrência destes acontecimentos é a escolha do método de carregamento. A escolha apropriada e adequada do método proporcionará um melhoramento do tempo de carregamento, e o prolongamento dos seus ciclos de vida, tornando, portanto, o processo mais eficiente. A procura por um perfil de carregamento ótimo permitirá um bom balanço entre estes aspetos. Desta forma, o presente capítulo começa por indicar os métodos de carregamento mais conhecidos na literatura, destacando-se os seguintes: Corrente constante/ tensão constante (CC/CV), *Multistage* (MSCC), Pulsado (PC) e Corrente de onda sinusoidal (SRC).

No entanto, para garantir uma seleção conveniente de um método de carregamento que revele a capacidade em providenciar o equilíbrio entre o tempo de carregamento e o prolongamento dos ciclos de vida, é fundamental ter em consideração alguns aspetos inerentes à bateria. Este cumprimento deve-se sobretudo ao inconveniente de que, para reduzir o tempo de carregamento, serão necessárias taxas de corrente de carregamento mais elevadas que irão sobreaquecer a bateria, por efeito de Joule, e conseqüentemente, irão conduzir à degradação do seu estado de vida. O efeito de elevadas temperaturas prejudica profundamente a capacidade da bateria, que está diretamente relacionada com a densidade energética, afetando a forma de como a bateria é carregada e descarregada, resultando não apenas no seu envelhecimento como também em riscos para a segurança do sistema [16].

A origem do aumento da temperatura, que resulta da aplicação de altas correntes de carregamento, é causada fundamentalmente pela resistência interna da bateria. Para além de ser um indicador criterioso do desempenho e do estado de vida (SOH) das baterias Li-ion [17], a resistência interna é também uma propriedade reveladora e determinante da potência disponível, da eficiência energética e da geração de calor no processo de carregamento/descarregamento [17], [18]. Deste modo, a identificação do estado da bateria é conseguida através da correlação entre a capacidade e a resistência interna, isto é, ao longo do tempo, o valor da resistência interna aumenta gradualmente e a bateria vai

perdendo capacidade progressivamente, causando uma diminuição do seu desempenho e da eficiência de transferência de energia.

Este parâmetro está contextualizado de acordo com uma série de características intrínsecas (e.g. processo de construção, capacidade, volume, etc.) e extrínsecas (e.g. temperatura, corrente de carregamento) das baterias, que condicionam e influenciam o seu valor. O conhecimento preciso do valor da resistência interna das baterias é imprescindível no âmbito do dimensionamento do sistema, pois permite selecionar e comparar baterias individualmente e definir estratégias de otimização do processo de carregamento, garantindo, portanto, a maximização da eficiência de energia transferida, o aumento do tempo de vida-útil das baterias e uma redução dos riscos de segurança do sistema [19].

Portanto, para uma aplicação bem-sucedida, a compreensão do valor da resistência interna possibilita a vantagem de assegurar uma viabilidade económica e uma sustentabilidade técnica da incorporação de baterias Li-ion em sistemas de fornecimento de energia eléctrica. Portanto, é com base nessa análise que são concebidos os sistemas mais congruentes para as mais distintas finalidades. Deste modo, neste capítulo é dada também ênfase aos métodos de determinação da resistência interna mais encontrados na literatura, onde serão realçados os seguintes métodos: pulso de carregamento DC, pulso de corrente AC, *pulse-multisine signal* e perdas de energia por transmissão de calor.

2.1 Métodos de carregamento

Como foi frisado anteriormente, a escolha do método de carregamento tem grande relevância no desempenho e no prolongamento dos ciclos de vida das baterias. Os vários métodos encontrados na literatura estão sobretudo agrupados em quatro grupos principais, existindo variantes em cada um deles: Corrente constante/tensão constante (CC/CV), *Multistage* (MSCC), Pulsado (PC) e Corrente de onda sinusoidal (SRC).

2.1.1 Método de carregamento corrente constante/tensão constante (CC/CV)

Considerado um dos métodos mais convencionais e populares, o método de carregamento CC/CV é abundantemente referenciado na literatura devido à sua simplicidade e fácil implementação. Este processo é caracterizado por ter duas fases de implementação, uma de corrente contínua CC e outra de tensão contínua CV. Contudo, para efeitos de segurança e proteção, uma terceira fase, designada como *trickle charge* (TC), poderá ou não ocorrer no início do processo de carregamento. Como é demonstrado na Figura 2.1, primeiramente é verificada a tensão atual da bateria e, caso esta se apresente abaixo do valor de tensão crítico (V_{trickle}), é induzido um valor mínimo de corrente (I_{trickle}), tipicamente

de $0.1C$, onde C representa a capacidade nominal da bateria [20]. Assim que o valor de tensão ultrapasse o valor de tensão crítico (V_{trickle}), o algoritmo avança para a fase seguinte.

A segunda fase do carregamento, designada por *constante current* (CC), consiste na introdução de uma corrente de carregamento (I_{charge}) de valor constante que pode variar entre $0,5C$ e $3,2C$, dependendo das suas especificações [20]. Quando o valor da tensão da bateria atinge o valor de tensão máxima de carregamento (V_{max}), o algoritmo comuta para a terceira e última fase de carregamento.

Na terceira fase de implementação, definida por *constante voltage* (CV), é imposta à bateria uma tensão constante no processo de carregamento e o valor da corrente vai decrescendo gradualmente. O período de carregamento termina quando a corrente atinge um valor predefinido de corrente (I_{min}), tipicamente de $0.02C$ [14], ou no estabelecimento predeterminado de um tempo máximo de carregamento [20], [21].

Na literatura podem ser encontradas várias variantes do método de carregamento CC/CV, que foram desenvolvidas na sequência de otimização do processo de carregamento, com o objetivo de minimizar o tempo de carregamento.

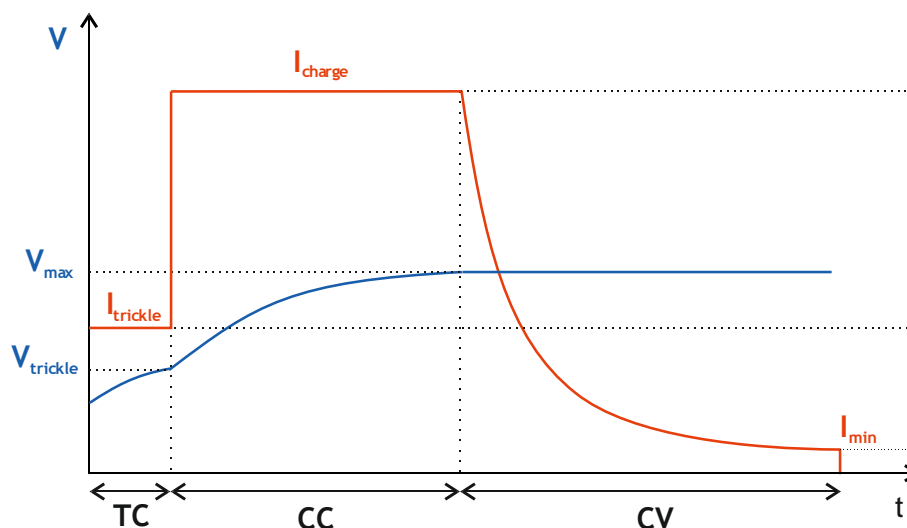


Figura 2.1 - Método de carregamento Corrente Constante/Tensão Constante (CC/CV).

Existem duas variantes particulares que alteram ligeiramente o padrão de carregamento CC/CV, são elas o *double-loop control charger* (DL-CC/CV) [20], [22], no qual é utilizada uma realimentação positiva e negativa, e o *boost charger* (BC-CC/CV) [20], [23], que consiste na introdução de correntes altas no início do carregamento, por um curto período de tempo, quando as baterias estão completamente descarregadas, não prejudicando o seu estado. São também encontrados algoritmos que usam o controlo avançado para implementar o CC/CV, que são os seguintes: *Fuzzy-logic control* (FL-CC/CV) [20], [24]; *Grey-predicated control* (GP-CC/CV) [20], [25] e *Phase-locked loop* (PLL-CC/CV) [20], [26].

2.1.2 Método de carregamento *multistage* (MSCC)

O método de carregamento *multistage* consiste num processo de carregamento constituído por diversos estágios com correntes de valores distintos. Na implementação deste método é necessário ter em conta duas questões pertinentes. A primeira consiste na determinação do critério de transição de estágios de corrente que, como é ilustrado na Figura 2.2, é imposto segundo o valor da tensão da bateria, ocorrendo transição de estágios de corrente quando esta atinge a tensão (V_{max}) [20].

A segunda recai na determinação do número de estágios de corrente e em encontrar os valores de corrente ideais para cada estágio. Na literatura são propostos diversos algoritmos utilizados para encontrar o perfil ótimo de carregamento. Por exemplo em [27]-[31], são determinadas os valores ótimos de corrente para um carregamento de cinco estágios, com base em métodos experimentais tais como os métodos de *Taguchi* e de *Consecutive Orthogonal Arrays* (COA), e em algoritmos de otimização tais como *Ant Colony System* (ACS), *Particle Swarm Optimization* (PSO) e Controladores *Fuzzy*.

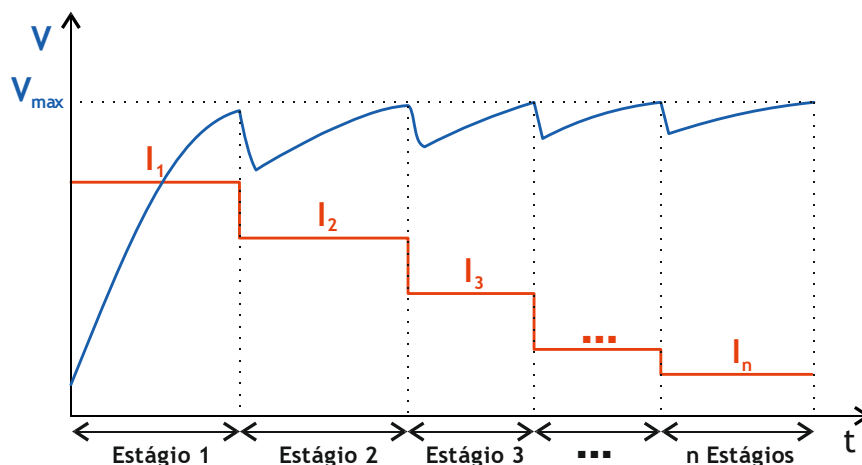


Figura 2.2 - Método de carregamento Multistage (MSCC).

Grande parte destes estudos tem como objetivo a avaliação do tempo de carregamento e da capacidade da bateria, onde são, na sua maioria, aplicados cinco estágios de corrente, devido ao número ótimo de estágios estar muito próximo de cinco [32].

Existem também estudos que, a partir do modelo de circuito elétrico, estabelecem um perfil ótimo de carregamento. Em [14], [33], é proposto um método de carregamento que tem por base a análise da capacidade da bateria e do seu tempo de carregamento onde, de acordo com os resultados experimentais (com 5 estágios de corrente), é conseguida uma redução de 12% do seu tempo de carregamento e de 1.8% na transferência de energia, e um aumento de 0.54% da sua eficiência comparando com o algoritmo CC/CV. Em [33] é também realizado um estudo comparativo entre um método de carregamento com três e cinco estágios de corrente, revelando, este último, resultados mais satisfatórios nos tempos de carregamento e na eficiência do carregamento.

Já em [32] é proposto um método de carregamento com quatro estágios de corrente com uma tensão constante CV no final. Com base na análise dos parâmetros da bateria, como o *state-of-charge* (SOC), o efeito da temperatura, a impedância, o tempo de carregamento e a sua capacidade, o algoritmo proposto é realizado em função dos ciclos de vida das baterias e, segundo os resultados experimentais, é conseguida uma diminuição do tempo de carregamento, um aumento do tempo de vida útil e da sua eficiência, garantido o carregamento total (100%) e os seus níveis de capacidade.

2.1.3 Método de carregamento pulsado (PC)

O método de carregamento pulsado é caracterizado pela utilização de uma corrente de carregamento pulsada. Neste método, têm sido desenvolvidos algoritmos que estão compreendidos em duas tipologias distintas, *variable frequency pulse charge* (VFPC) e *variable duty pulse current* (VDPC) [20], [34]. O objetivo do VFPC consiste na otimização da frequência do pulso de corrente de forma a minimizar a impedância da bateria que, consequentemente, fará maximizar a transferência de energia. Já o VDPC, para maximizar a transferência de energia baseia-se na variação da amplitude do pulso, fixando a sua largura ou vice-versa.

Em [35] é disponibilizado um algoritmo de carregamento VFPC composto por três modos de operação: *full charge detect mode* (FCDM), *search mode* (SM) e *charge mode* (CM), como está ilustrado na Figura 2.3 a). O algoritmo inicia a sua operação no modo FCDM, onde será detetado o estado da bateria, aplicando uma tensão constante para monitorizar a corrente de carregamento, certificando-se se esta se encontra totalmente carregada ou não. No caso de não se encontrar completamente carregada, o algoritmo comuta para o seguinte modo de operação, o SM. Nesta fase o algoritmo procura a frequência ótima para a qual a impedância da bateria é mínima e, consequentemente, o valor de corrente é máximo. Assim que a frequência ótima é encontrada, o algoritmo entra no modo CM, carregando a bateria com a corrente otimizada que foi obtida até esta se encontrar totalmente carregada. De acordo com os resultados experimentais, o algoritmo aqui proposto quando comparado com o algoritmo CC/CV consegue uma redução no tempo de carregamento em cerca de 24%.

Com base no mesmo processo do algoritmo VFPC, o autor em [36] propõe um algoritmo VDPC como ilustra a Figura 2.3 b). De acordo com os resultados experimentais, este algoritmo consegue, comparado com o algoritmo CC/CV, uma redução no tempo de carregamento em cerca de 3.4%

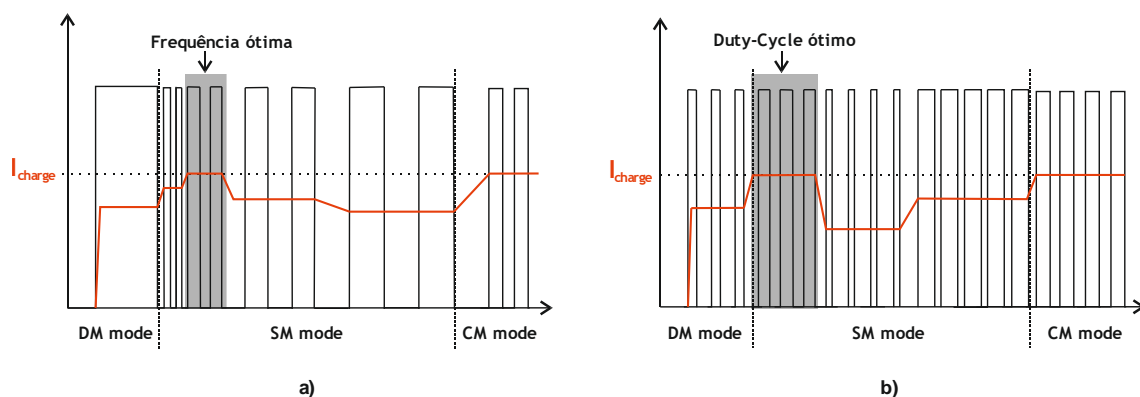


Figura 2.3 - Método de carregamento pulsado: a) VFPC; b) VDPC.

2.1.4 Método de carregamento corrente de onda sinusoidal (SRC)

O método de carregamento SRC é uma técnica recente que exhibe uma abordagem bastante semelhante ao método de carregamento pulsado, diferenciando-se apenas no perfil da corrente de carregamento. Este método caracteriza-se pela utilização de uma corrente de carregamento sinusoidal, que tem como finalidade a atenuação da impedância interna da bateria.

Existem vários estudos com o objetivo de entender as propriedades eletroquímicas da bateria em relação à indução de uma corrente alternada [37]. A realização dessa análise torna-se possível com o emprego de uma técnica designada como espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS), que fornece uma vasta informação das propriedades inerentes à bateria, possibilitando encontrar a frequência ideal designada como *minimum-impedance frequency* [38]. Esta técnica possibilitará a introdução de novos métodos de carregamento que serão postos em prática com recurso à frequência para a qual a impedância da bateria atinja um mínimo no EIS.

Na literatura são encontrados vários algoritmos desenvolvidos com base neste método e consistem tipicamente na aplicação de uma corrente de carregamento contínua DC, que é alterada com a sobreposição de um sinal sinusoidal, de frequência igual à que foi medida antecipadamente no EIS onde o valor de impedância é mínimo, garantindo à corrente de carregamento um perfil sinusoidal. Em [38]-[40] foram desenvolvidos algoritmos de carregamento com base neste método para maximizar a transferência de energia.

De acordo com os resultados experimentais, em [40], o tempo de carregamento e a eficiência de carregamento melhoraram em 5.1% e 5.6%, respectivamente, comparando com o método de carregamento CC/CV. Já em [38], são apresentados resultados que reportam uma diminuição do tempo de carregamento em 17%, um aumento da eficiência de carregamento em 2%, um aumento da temperatura máxima de 45.8% e um prolongamento da vida-útil das baterias em 16.1%, comparativamente ao método de carregamento CC/CV. Para além disso é

também exibida uma diminuição do tempo de carregamento em 0.24%, um aumento da eficiência de carregamento em 0.27% e um aumento da temperatura máxima de 16.47%, quando comparado com o método de carregamento pulsado.

Porém, os autores em [37], [41] afirmam que este algoritmo de carregamento não exibe um melhoramento na eficiência do carregamento, pois grande maioria das publicações não têm em consideração a componente DC, que irá modificar o valor da impedância da bateria. Em [37], os resultados experimentais apresentam um aumento de stress de corrente em 22.5% e um aumento da temperatura máxima de 18.5%, comparativamente ao método de carregamento CC/CV.

2.1.5 Comparação dos métodos de carregamento

Ao longo deste capítulo foram discutidos os principais métodos de carregamento encontrados na literatura, com formas de implementação e de desempenho distintas.

No diagrama da Figura 2.3 é ilustrada uma análise comparativa dos principais métodos de carregamento referenciados na literatura e que foram discutidos ao longo deste capítulo.

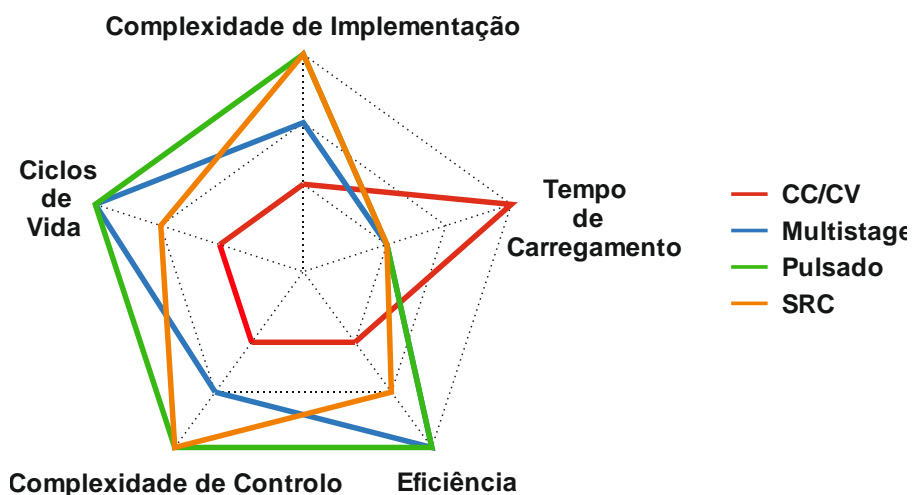


Figura 2.4 - Diagrama comparativo dos vários métodos de carregamento.

O método CC/CV é detentor de uma implementação simples e não requer um controle avançado, no entanto, possui um tempo de carregamento superior e uma fraca eficiência, dando origem ao encurtamento dos ciclos de vida da bateria. Já o método SRC apesar de apresentar um tempo de carregamento mais reduzido, possui um sistema bastante complexo e não garante uma melhoria na eficiência nem no aumento dos ciclos de vida.

Constata-se que o método pulsado, apesar de apresentar um melhoramento na eficiência e no prolongamento dos ciclos de vida das baterias, é um método que detém uma implementação complexa e exige um controle rigoroso. De entre os métodos apresentados é o *Multistage* que manifesta a melhor relação entre eficiência, tempo de carregamento, simplicidade de implementação/controlo e ciclos de vida.

2.2 Métodos determinantes da resistência interna de uma bateria

A componente que se opõe e oferece resistência à passagem de uma corrente numa bateria é designada como resistência interna. A determinação desta característica provém da medição da variação da tensão como resultado da passagem dessa mesma corrente, como é reconhecida na lei de Ohm. Contudo, o tipo de corrente usado na excitação da bateria tem grande relevância no modo como é determinada a resistência, pois em casos de corrente contínua (DC), o seu cálculo advém exclusivamente dos elementos resistivos, enquanto que no caso de corrente alternada (AC), como esta é dependente da frequência, é possível a realização de uma análise mais precisa e acurada, possibilitando o cálculo da impedância.

As baterias são sistemas complexos que revelam comportamentos não-lineares, uma vez que apresentam, para além de um comportamento puramente resistivo, um comportamento capacitivo e indutivo. Este fenómeno está associado às propriedades físicas e eletroquímicas que compõem a bateria, e revela ter grande impacto no seu desempenho. Assim sendo, para compreender as causas e os efeitos deste complexo comportamento, as investigações científicas focam-se na segmentação da resistência interna da bateria cujo valor varia e se altera ao longo de um carregamento ou de um descarregamento, devido às diferentes reações eletroquímicas provocadas pelos materiais que integram a bateria.

Como está explícito na literatura [18], [37], [42]-[44], a resistência interna/impedância das baterias Li-ion é constituída pelos seguintes elementos que caracterizam os comportamentos resistivos, capacitivos e indutivos da bateria: -Resistência puramente óhmica (R_0), alusiva ao somatório das resistências dos condutores de corrente, do eletrólito e dos terminais internos da bateria. -Resistência de transferência de carga (R_{CT}), que está associada à ativação da polarização dos elétrodos. - Resistência de difusão ou Warburg (R_D), que está relacionada com a difusão e transporte de massa, isto é, à concentração da polarização dos elétrodos.

Apesar da temática presente nesta dissertação não ir exclusivamente ao encontro da análise e do estudo concreto dos parâmetros mencionados, que constituem a resistência interna/impedância da bateria, é fundamental o seu conhecimento. Deste modo, torna-se possível entender a diferença entre os métodos determinantes da resistência interna, que serão abordados seguidamente, e a influência que o tipo de corrente (DC e AC) aplicada tem na minuciosidade e precisão da análise da resistência interna. São vários os métodos de determinação da resistência interna/impedância de uma bateria encontrados na literatura, sendo os mais importantes e populares os seguintes: pulso de carregamento DC, pulso de corrente AC, *pulse-multisine signal* e perdas de energia por transmissão de calor.

2.2.1 Método de pulso de corrente DC

O método de pulso de corrente DC é caracterizado pela aplicação de um pulso de corrente DC, de carregamento ou descarregamento, na bateria com um determinado nível de estado de carga (SOC) e quando esta se encontra em equilíbrio eletroquímico, resultando numa variação da tensão da bateria (ΔV) como é ilustrado na Figura 2.4. Este método é bastante comum na comunidade científica e é amplamente utilizado na indústria dos veículos elétricos [45], devido à sua simplicidade de implementação e facilidade na execução.

Como está exemplificado no gráfico da Figura 2.4, o valor de tensão varia de acordo com a duração do pulso (t_{pulso}) de corrente (ΔI) que é aplicada à bateria e, segundo a literatura, poderá ter uma duração compreendida entre 0,1 a 18 segundos [18], [44]. Nos primeiros milissegundos, aproximadamente 0,1 segundos [44], a variação linear da tensão corresponde ao efeito provocado pela resistência puramente óhmica (R_0) da bateria. Depois desse período inicial, o efeito da variação da tensão passa a ser governada pela resistência de transferência de carga (R_{CT}).

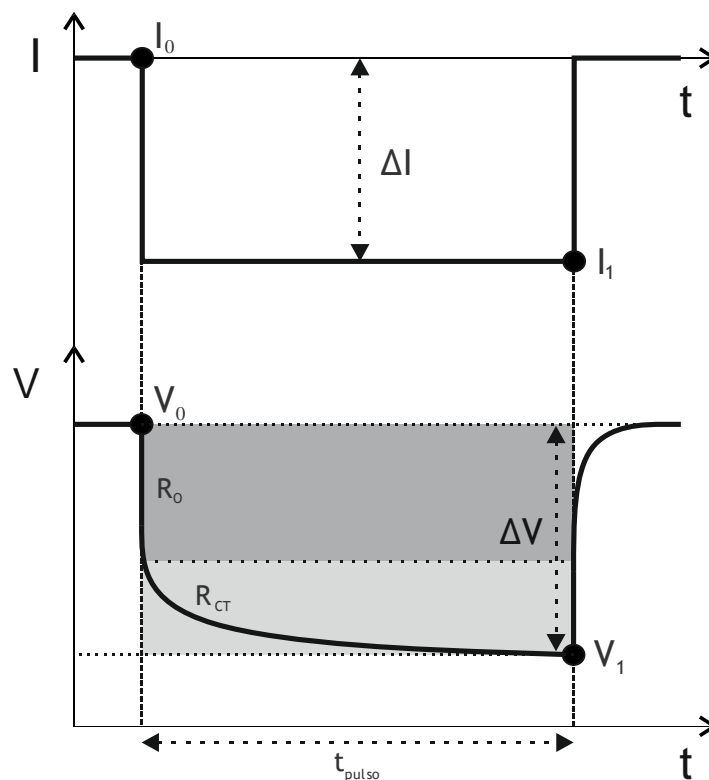


Figura 2.5 - Representação da resposta da tensão durante um pulso de corrente DC.

Este método é caracterizado por determinar o valor da resistência interna da bateria segundo a lei de Ohm, como é demonstrado na equação (2.1). Com base na diferença entre os valores da tensão medida e os valores da corrente já conhecida, é determinado o valor total da resistência interna da bateria, que corresponde ao somatório da resistência R_0 e R_{CT} . A determinação do valor total da resistência interna R calculada a partir da relação da variação

total do valor da tensão ΔV , isto é, no início e no final da aplicação da corrente, pela variação de corrente ΔI , é bastante comum na literatura [19], [46], [47].

$$R = \frac{V_1 - V_0}{I_1 - I_0} = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (2.1)$$

É também igualmente comum, para melhor caracterizar os parâmetros da bateria, a determinação da resistência interna da bateria com base na aplicação de múltiplos pulsos de corrente de carregamento e de descarregamento com amplitudes distintas [45], [48], [49], com o propósito de obter a informação relacionada com a dependência da resistência da bateria em relação à corrente que lhe é aplicada. Já em [18], [44], [50], o estudo da resistência interna é realizada com a repartição das componentes resistivas que compõem a resistência interna de uma bateria Li-ion, procurando aplicar a Lei de Ohm individualmente a cada componente no intuito de proporcionar um cálculo mais preciso.

Apesar de se tratar do método mais convencional na indústria dos veículos elétricos, por possuir um funcionamento prático e simples, apresenta o inconveniente de não proporcionar um estudo circunspecto e minucioso da resistência interna, pois não é possível separar devidamente as diferentes componentes que a constituem, impedindo uma avaliação e análise profundamente coerente e precisa.

2.2.2 Método de pulso de corrente AC

O método de pulso de corrente AC permite a determinação da impedância interna da bateria através da aplicação de uma pequena corrente alternada AC (não degradativa) e na observação da variação da tensão da bateria.

Conforme está descrito na literatura [18], [51], [52], o valor mínimo da impedância Z das baterias Li-ion é muitas vezes o que se obtém para um valor de frequência próximo de 1 kHz e, por este motivo, muitos dos estudos para determinar a impedância mínima são realizados com base nesse valor de frequência. Deste modo, como está ilustrado na equação (2.2), a impedância calculada determina não apenas as amplitudes de tensão V_{max} e corrente I_{max} , tal como o método de pulso de corrente DC, como também os seus ângulos de desfasamento (φ_V e φ_I).

$$Z = \frac{V(t)}{I(t)} = \frac{V_{max} e^{i(\omega t + \varphi_V)}}{I_{max} e^{i(\omega t + \varphi_I)}} \quad (2.2)$$

Este método é relativamente simples e rápido, apresentando um baixo consumo e um baixo custo associado [44]. Este método também é caracterizado por ser não invasivo, visto que é aplicada uma pequena corrente sinusoidal, não causando a degradação ou qualquer tipo de condicionamento nas baterias [53]. Contudo, a prática deste método não proporciona um

conhecimento pleno da impedância da bateria, precisamente pelo facto de esta não se encontrar sob o domínio de uma frequência que varie ao longo do processo. Deste modo, com o objetivo de analisar e avaliar o comportamento dinâmico da bateria em corrente alternada, e definir as propriedades eletroquímicas associadas aos elementos resistivos que compõem a sua impedância, é empregue a técnica designada como espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS).

Nesta variante do método de pulso AC é aplicada uma corrente AC de frequência variada e de baixa amplitude. Os estudos que envolvem o EIS, são tipicamente efetuados com base numa gama de frequência compreendida entre os milihertz (mHz) e os kilohertz (kHz) [44], [54]. O EIS distingue-se pelo facto de providenciar informação mais detalhada e pormenorizada do comportamento da bateria sob o efeito de uma corrente alternada. Para além de proporcionar uma análise do estado de vida das baterias, fornece ainda o valor de frequência para a qual a impedância da bateria atinge o valor mínimo. São vários os estudos referenciados na literatura que investigam e analisam, com base no EIS, o estado de vida das baterias ao longo do seu período de utilização, onde o seu envelhecimento é feito em diferentes tipos condições (e.g., temperatura, corrente de carregamento, etc.) [32], [42], [44], [50].

Esta técnica tem a vantagem de tornar exequível a análise e determinação de cada elemento que integra a impedância interna da bateria, permitindo a obtenção do modelo elétrico equivalente da impedância AC no domínio da frequência, como ilustra a Figura 2.6. Os modelos elétricos equivalentes podem ser de maior ou menor complexidade, e são constituídos pelas componentes resistivas e capacitivas que integram a impedância da bateria.

O modelo apresentado consiste na agregação da resistência puramente óhmica (R_0), da resistência de transferência de carga (R_{CT}) da resistência de Warburg ou de difusão (R_W), e da fonte de tensão V_{oc} (tensão em circuito aberto). A resistência de transferência de carga é constituída pela associação em paralelo da resistência R_1 e do condensador C_1 e a resistência de Warburg é representada pela ligação em série RC que poderá ser de n séries.

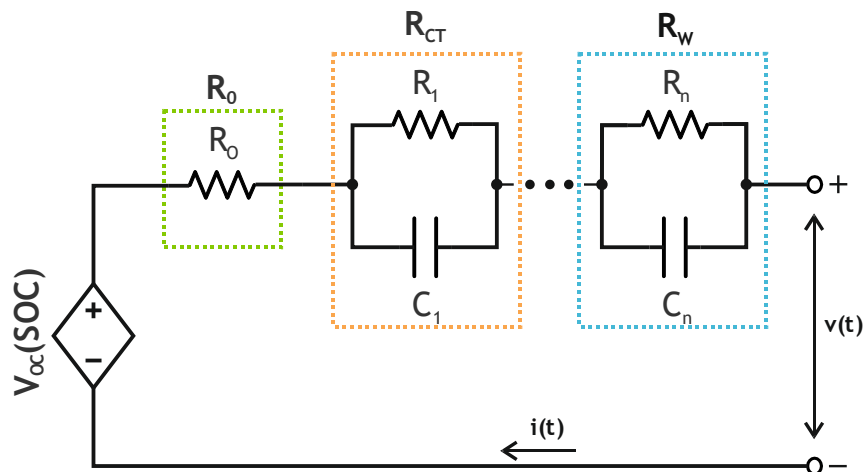


Figura 2.6 - Modelo elétrico de uma bateria Li-ion.

O cálculo da impedância pode ser formulado considerando a corrente de excitação ilustrada na equação (2.3).

$$i(t) = i_0 \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (2.3)$$

Onde i_0 corresponde à amplitude da corrente de excitação, ω à frequência angular, t ao tempo e φ_1 ao ângulo de defasamento. A aplicação desta corrente resulta na resposta de uma tensão $v(t)$, demonstrada na equação (2.4), que possui a mesma frequência, mas com um ângulo de defasagem diferente (φ_2), e onde v_0 representa a amplitude da tensão.

$$v(t) = v_0 \sin(\omega t + \varphi_2) \quad (2.4)$$

As expressões (2.3) e (2.4) encontram-se no domínio do tempo (t), e dispô-las no domínio da frequência angular resultará nas equações (2.5) e (2.6)..

$$I(\omega) = I_0(\omega) e^{j\varphi_1(\omega)} \quad (2.5)$$

$$V(\omega) = V_0(\omega) e^{j\varphi_2(\omega)} \quad (2.6)$$

Então, com base nas expressões (2.5) e (2.6), o cálculo da impedância da bateria em função da sua frequência é ilustrada na equação (2.7).

$$Z(\omega) = \frac{V_0(\omega) e^{j\varphi_2(\omega)}}{I_0(\omega) e^{j\varphi_1(\omega)}} = Z_0 e^{j(\varphi_2 - \varphi_1)} \quad (2.7)$$

Deste modo, a equação da impedância de uma bateria segundo a representação de Euler, é descrita pela seguinte equação:

$$Z(\omega) = Z_0 (\cos(\varphi) + i \cdot \sin(\varphi)) \quad (2.8)$$

A impedância $Z(\omega)$ é decomposta numa parte real e numa parte imaginária que correspondem ao comportamento puramente resistivo, e ao comportamento capacitivo e indutivo, respetivamente. Deste modo, a impedância das baterias é tipicamente representada por um diagrama de *Nyquist*, como ilustra a Figura 2.7.

O diagrama apresenta um comportamento indutivo no 4º quadrante e um comportamento capacitivo no 1º quadrante. A região capacitiva pode ser decomposta em duas partes. A região para baixas frequências (mHz) é caracterizada por um comportamento linear, que tipicamente surge com um ângulo de 45º, e está associada à difusão e transporte de massa que representa a região responsável pelo efeito da resistência de *Warburg* (R_w).

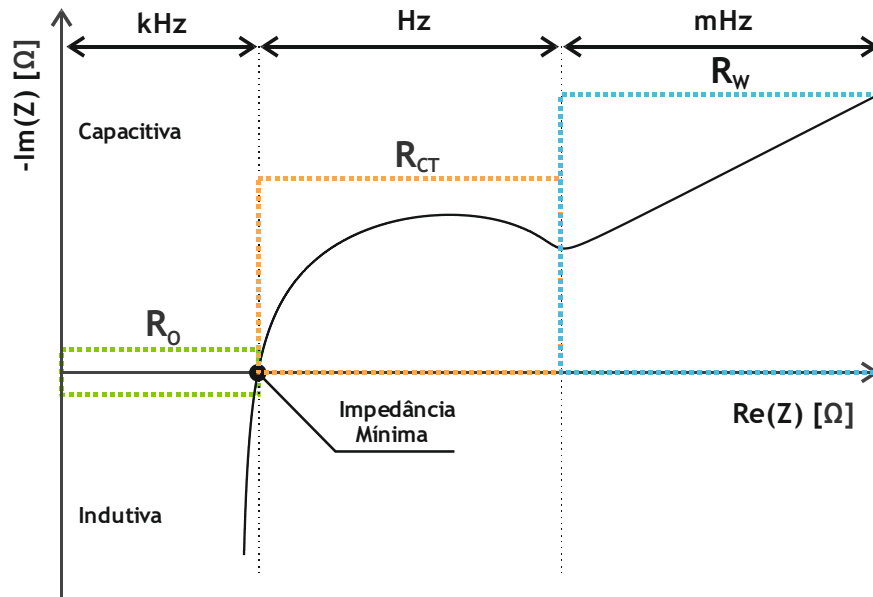


Figura 2.7 - Diagrama de Nyquist típico de um modelo de uma bateria Li-ion.

A região para frequências intermédias (Hz) é designada como região de transferência de carga e é fundamentalmente dominada pelo efeito provado pela resistência de transferência de carga (R_{CT}).

A impedância eletroquímica mínima é encontrada quando $Im(Z) = 0$, isto é, quando a curva intercepta o eixo horizontal e o comportamento indutivo e capacitivo estão em equilíbrio. Quando a curva alcança o ponto de impedância mínima, passa a estar exclusivamente dominada por um comportamento puramente resistivo que é provocado pela resistência puramente ôhmica (R_o). Todavia, a curva apresentada no diagrama da Figura 2.7 está diretamente relacionada com diversos parâmetros, como o estado de carga [50], a temperatura [54], [55], o número de ciclos de vida da bateria [42] e o tipo de bateria (construção) [56].

Embora proporcione uma análise mais detalhada da resistência/impedância da bateria, o EIS é uma técnica que apresenta algumas desvantagens, nomeadamente a necessidade de utilização de equipamentos caros, as medições realizadas requerem bastante tempo e trata-se de uma técnica que não é adequada para sistemas de packs de baterias [18], [53].

2.2.3 Método *pulse-multisine signal*

O método *pulse-multisine signal* é uma técnica recentemente desenvolvida que permite a determinação da impedância interna de uma bateria, que se fundamenta na combinação de uma sequência de pulsos de corrente DC e um sinal composto pela soma de várias componentes sinusoidais designado como *multisine*. Esta associação tem como resultado a concepção de um sinal de corrente denominado como *pulse-multisine signal*, como é constatado na Figura 2.8 [57]. Neste método, a bateria é excitada com um sinal de

corrente mais dinâmico tanto em amplitude como em frequência, tendo por isso um conceito que se assemelha ao processo de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) [57].

Este método baseia-se em três fases para estimar a resistência interna e determinar cada elemento que integra o modelo equivalente da bateria. Na primeira fase, como está proposto em [57], é construído o o sinal de corrente *pulse-multisine signal*. Na segunda fase é determinada a resistência interna da bateria através da aplicação da corrente *pulse-multisine signal* e na observação da evolução da tensão.

A terceira fase estabelece, como está descrito em [58], o ajustamento da parametrização dos elementos constituintes da resistência interna da bateria segundo o modelo elétrico do circuito equivalente, podendo estes ser de maior ou menor complexidade, como está exemplificado na Figura 2.5 (Subsecção 2.2.2).

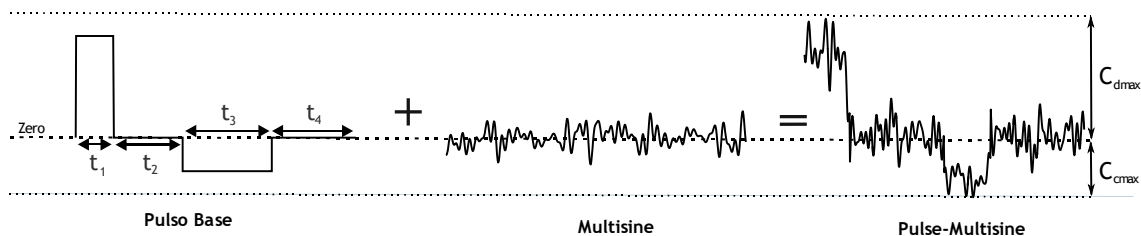


Figura 2.8 - Projeção geral de um sinal *pulse-multisine*.

O método *pulse-multisine signal* é configurado para abranger correntes de carregamento/descarregamento com um período máximo de 10 segundos, de diversas amplitudes e em diferentes condições de temperatura e SOC. A gama de frequência está compreendida entre 0 Hz e 1 Hz.

A impedância $Z(\omega)$, para um dado valor de frequência angular (ω), depende da corrente aplicada à bateria e da variação da tensão aos seus terminais, como é ilustrado na equação (2.9).

$$V(\omega) = Z(\omega)I(\omega) + E(\omega) \quad (2.9)$$

A determinação da impedância $Z(\omega)$, para uma dada corrente $I(\omega)$ e uma dada tensão $V(\omega)$, consiste na minimização do erro $E(\omega)$ através de diferentes métodos, como por exemplo, o método dos mínimos quadrados [58]. Onde $E(\omega)$ é o erro que pode surgir devido a erros de medição ou em respostas não-lineares da bateria.

Uma vez conhecida a impedância interna da bateria torna-se possível determinar todos n elementos que constituem o modelo elétrico equivalente da bateria, através da equação (2.10).

$$Z_m(\omega) = R_0 + \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{j\omega\tau_i + 1} \quad (2.10)$$

Onde R_0 representa a resistência puramente óhmica, n representa o número de elementos RC do modelo equivalente, ω representa a frequência angular e τ_i a constante de tempo dado pelos elementos R_iC_i do modelo equivalente.

2.2.4 Método de perdas de energia por transmissão de calor

Quando se procede à aplicação de um fluxo de corrente numa bateria, esta liberta energia sob a forma de calor. Este comportamento térmico, designado como aquecimento sob efeito de *Joule*, é causado pela resistência interna da bateria em resultado da passagem de corrente elétrica durante o processo de carregamento ou descarregamento. O método de perdas de calor trata-se de um processo utilizado na determinação da resistência interna da bateria em função do calor que esta transmite no momento em se encontra sob utilização.

A implementação deste método consta na utilização de um calorímetro adiabático [18], [59], como é ilustrado na Figura 2.4. Este dispositivo permite medir a transmissão de calor Q que é gerado pela bateria para o seu exterior e, com base na lei de *Joule*, é possível calcular o valor da resistência interna da bateria, como está explícito na equação (2.11):

$$Q = I^2 \times R \times t \quad (2.11)$$

O calor dissipado pela bateria pode ser calculado pelo aumento da temperatura, assumindo que a capacidade térmica de todo o sistema é conhecida. Para isso, é injetada uma quantidade de calor Q conhecida no sistema pelo calibrador de calor, onde será verificada variação de temperatura no interior do calorímetro ΔT . Deste modo será então possível, a partir da equação (2.12), determinar a capacidade térmica (C) de cada componente que integra o sistema (e.g., calorímetro (C_{cal}) e bateria (C_{bat})).

$$Q = (C_{cal} + C_{bat}) \times \Delta T \quad (2.12)$$

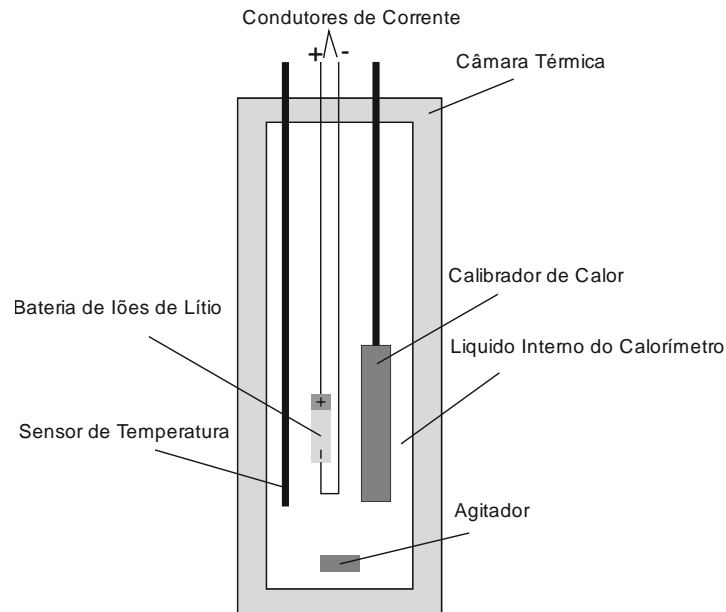


Figura 2.9 - Esquema geral de um Calorímetro usado na determinação do calor produzido por uma bateria Li-ion.

Para calcular o valor da resistência interna da bateria, sabendo previamente os valores das capacidades térmicas (C_{cal} , C_{bat}), é apenas necessário determinar a variação da temperatura ΔT durante o ciclo de carregamento ou descarregamento. Deste modo, relacionando as trocas de calor entre a bateria e o calorímetro, com o calor gerado no interior da bateria, poder-se-á determinar o valor da resistência interna da bateria como ilustra a equação (2.13).

$$Q \Rightarrow I^2 \times R \times t = (C_{cal} + C_{bat}) \times (T_2 - T_1) \quad (2.13)$$

Contudo, a equação (2.13), apenas providencia o cálculo da resistência interna para correntes DC. Para melhor compreender as características não-lineares da bateria na aplicação de correntes AC a Lei de *Joule* sofrerá a seguinte alteração:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} (I(t))^2 \cdot R \cdot dt \quad (2.14)$$

Assim, reformulando o processo das trocas de calor entre a bateria e o calorímetro na equação (2.13), igualando a expressão (2.12) com expressão (2.14) é então possível relacionar a temperatura com a passagem da corrente elétrica na bateria:

$$Q \rightarrow \int_{t_1}^{t_2} (I(t))^2 \cdot R \cdot dt = (C_{cal} + C_{bat}) \times (T_2 - T_1) \quad (2.15)$$

Ordenando a equação (2.15) em função da resistência interna obtemos a seguinte transformação:

$$R = \frac{(C_{cal} + C_{bat}) \times (T_2 - T_1)}{\int_{t_1}^{t_2} (I(t))^2 \cdot dt} \quad (2.16)$$

Na comunidade científica este método é maioritariamente utilizado na avaliação e análise do desempenho e da degradação de baterias, que consiste no aumento da resistência interna ao longo do tempo em determinados valores de temperatura [60]-[63]

Capítulo 3

Este capítulo reside fundamentalmente na análise da resistência interna das baterias Li-ion, quando estas estão em regime de relaxamento e em regime de carregamento. Inicialmente será descrito de forma genérica o princípio de operacionalidade de cada uma dessas análises, onde será depois explícito todo o hardware e software que foi desenvolvido para a sua realização. Seguidamente são apresentados os resultados relativos à análise da resistência em regime de relaxamento. Por fim serão exibidos os resultados da análise da resistência em regime de carregamento.

Análise da resistência interna

3.1 Descrição geral

O presente capítulo consiste, integralmente, na análise da variabilidade da resistência interna das baterias Li-ion em regime de relaxamento e em regime de carregamento.

Tal como foi constatado no capítulo anterior, a resistência interna é um importante indicador do estado atual de uma bateria, por ser amplamente influenciada pelo seu grau de envelhecimento. Para além disso, foi visto também que o estado de carga (SOC) real da bateria, a temperatura ambiente e a corrente de carregamento, são também condicionantes que revelam ter um grande impacto no processo de carregamento, afetando significativamente o desempenho da bateria e provocando alterações do valor da resistência interna. Deste modo, a análise deste parâmetro deve-se fundamentalmente à predominância que a resistência interna apresenta, relativamente à eficiência e ao desempenho das baterias de Li-ion no processo de transferência de energia.

O objetivo deste capítulo consiste na análise da resistência interna de baterias Li-ion cilíndricas do tipo 18650, com diferentes níveis de envelhecimento (*i.e.*, reduzido número de ciclos e elevado número de ciclos). Tanto em regime de relaxamento como em regime de carregamento, a determinação da resistência interna foi feita com base no método de pulso DC que foi anteriormente abordado na secção 2.2.1.

Primeiramente, foi efetuada a análise da resistência interna sob o regime de relaxamento, ou seja, todos os valores da resistência interna foram retirados com as baterias

permanecidas em equilíbrio eletroquímico. Nesta análise foram aplicados pulsos de correntes de carregamento e descarregamento nas baterias, em diferentes níveis de estado de carga (SOC) e em diferentes temperaturas. A concepção desta análise é fundamentalmente para efeitos de validação e autenticação dos valores da resistência interna medidos em regime de carregamento.

De seguida, procedeu-se à análise da resistência interna em regime de carregamento, onde foram efetuados carregamentos com correntes de carregamento distintas e em diversas temperaturas. Para isso foi desenvolvido um algoritmo que controla todo o processo de carregamento, do qual está também integrado o processo de cálculo da resistência interna e um algoritmo que controla e monitoriza a temperatura. A resistência interna foi medida durante todo carregamento efetuado e com um tempo de amostragem previamente estipulado.

Neste capítulo será também apresentada a descrição do sistema implementado no qual se baseou este estudo. Concretamente, o sistema implementado é constituído pelas unidades de controlo e aquisição (*hardware*), e pelos algoritmos propostos (*software*).

3.2 Hardware desenvolvido

Os processos de análise da resistência interna foram colocados em prática com recurso ao equipamento que integra o *hardware* desenvolvido ao longo de todo o trabalho experimental apresentado nesta dissertação. O *hardware* está organizado e disposto conforme é ilustrado na Figura 3.1, onde é utilizada uma fonte programável *DP832A Rigol* para efetuar o carregamento das baterias, enquanto que para o seu descarregamento é utilizada a carga resistiva programável *IT8512A+*. Para a obtenção dos valores de tensão da bateria é utilizado o multímetro *DMM 402 Tektronix*. Todos os equipamentos acima mencionados estão sob o domínio da unidade principal de controlo e processamento que consiste no *software Matlab*, onde é comandada e processada toda a operação do sistema.

É importante salientar que, como está exemplificado na Figura 3.1, os cabos de contacto do multímetro estão diretamente ligados aos terminais da bateria, de maneira a evitar componentes resistivas adicionais que prejudiquem a precisão da leitura dos valores de tensão, garantindo o cálculo e a determinação do valor da resistência interna da bateria.

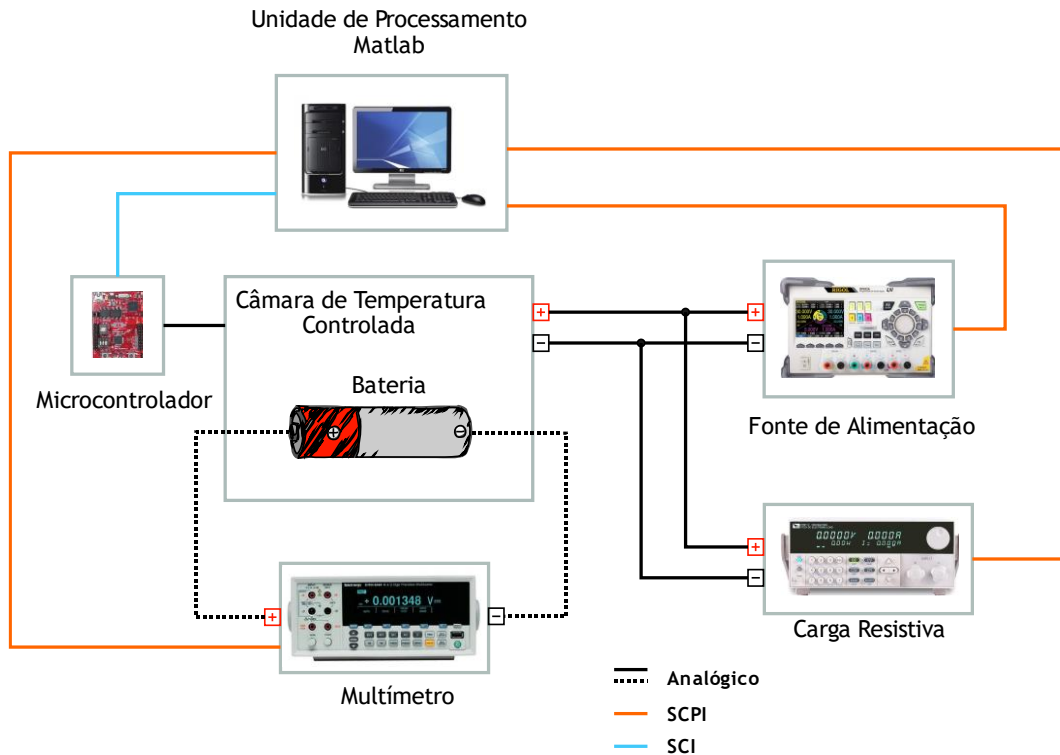


Figura 3.1 - Hardware utilizado para a implementação.

As baterias utilizadas no sistema são as SAMSUNG ICR18650-26H 2600mAh com reduzido número de ciclos de vida e as baterias SANYO UR18650F-SCUD-3 com elevado número de ciclos de vida. Estas são sujeitas à realização de testes no interior de uma câmara térmica com temperatura controlada.

A unidade auxiliar de controlo, que faz a monitorização e controlo da temperatura da câmara térmica, recai sobre o microcontrolador TMS320F28027 da *Texas Instruments*. Trata-se de um microcontrolador de 32 bits de vírgula flutuante, capaz de realizar operações matemáticas complexas, uma vez que possibilita o processamento em paralelo. Possui uma frequência de *clock* de 60 MHz, com uma memória flash de 64 kb e uma memória RAM de 12 kb. Dispõe de 8 canais PWM, 8 canais de ADC de 12 bit e de módulos de comunicação I²C, SPI e SCI.

Para efetuar a aquisição dos valores da temperatura recorreu-se a termístores NTC de 10 k *Ultimate Thinness* da *Semitec*, agregados a 4 canais ADC do microcontrolador, sendo que três foram destinados à medição da temperatura no interior da câmara e o restante para medir a temperatura à superfície da bateria em teste. O valor da temperatura é extrapolado usando a equação *Steinhart-Hart*.

Como está explícito na Figura 3.1, a comunicação entre o equipamento e a unidade principal de controlo (Matlab) é efetuada segundo o protocolo de comunicação série assíncrono *Standard Commands for Programmable Instruments* (SCPI). Já a comunicação entre a unidade auxiliar de controlo (microcontrolador) e a unidade principal de controlo (Matlab) para o processamento dos valores de temperatura é realizado através do protocolo de comunicação série assíncrono RS-232 (SCI).

3.3 Software desenvolvido

Esta secção é destacada para a ilustração do *software* que foi desenvolvido e que integra todo o sistema implementado para a análise da resistência presente neste capítulo. Deste modo, foi desenvolvido um algoritmo para a unidade principal de controlo, responsável pelo controlo de todo o processo de carregamento e pela leitura e medição da resistência interna e um algoritmo para a unidade auxiliar de controlo, responsável por medir a temperatura no interior da câmara térmica.

O algoritmo implementado na unidade auxiliar de controlo foi realizado no *Code Composer Studio* versão 7.4 da *Texas Instruments* em linguagem C. Por outro lado, o algoritmo implementado na unidade principal de controlo foi desenvolvido em ambiente de programação *Matlab*.

3.3.1 Unidade auxiliar de controlo

O fluxograma que está ilustrado na Figura 3.2 representa o algoritmo implementado no microcontrolador. A unidade auxiliar de controlo tem como função a aquisição dos valores medidos pelos sensores de temperatura e o envio dessa informação à unidade principal de controlo, a partir do momento em que esta última assim o exige.

Numa primeira fase são inicializadas todas as variáveis do programa, onde é depois feita a configuração do módulo de comunicação série SCI para comunicar com a unidade principal de controlo. Seguidamente, são configuradas as entradas referentes aos ADC's que foram utilizados para recolher os valores de temperatura medidos pelos sensores de temperatura.

Depois de concluídas as configurações iniciais, o algoritmo entra em ciclo infinito, e aguarda pela trama de comunicações provenientes da unidade principal de controlo através do protocolo de comunicação SCI. O programa é composto por uma rotina de interrupção que está associada ao módulo de comunicação SCI, e é responsável pela leitura da trama de comunicações provenientes da unidade de controlo principal.

Quando o primeiro byte da trama é recebido, a unidade auxiliar de controlo está programada para exercer duas funções disponíveis. Se o byte de comando for de 01h, o programa comuta para a primeira função que consiste na medição do valor da temperatura da superfície da bateria, onde serão depois enviados os dados relativos a essa informação para a unidade principal de controlo.

Caso o byte de comando seja de 02h, o programa permuta para a segunda função, que consta primeiramente na medição do valor da temperatura da superfície da bateria e do valor da temperatura do interior da câmara. Logo após a leitura dos valores da temperatura, o algoritmo executa o controlo da temperatura da câmara térmica. A regulação da temperatura ambiente no interior da câmara é efetuada de acordo com o valor de temperatura que é enviado pela unidade principal de controlo.

Com a ativação externa de uma resistência de aquecimento, a temperatura ambiente é regulada através de um controlador on/off. Por fim, o algoritmo envia os dados das temperaturas da câmara e da superfície da bateria à unidade principal de controlo. No final de cada função são limpas as informações que foram enviadas e o programa entra novamente em ciclo infinito, aguardando novamente pela comunicação da unidade principal de controlo.

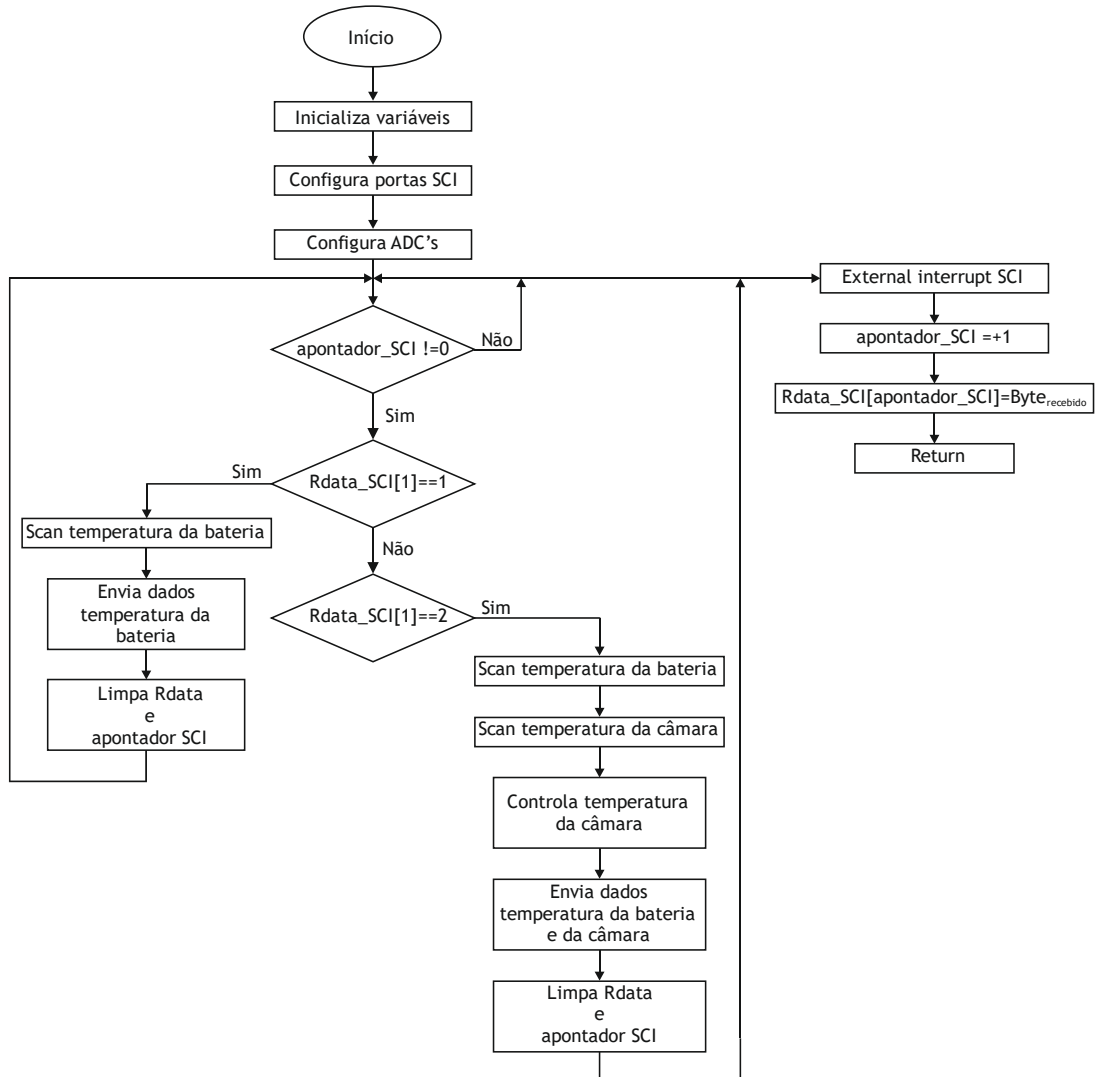


Figura 3.2 - Fluxograma do programa implementado na unidade auxiliar de controlo.

3.3.2 Unidade Principal de Controle

O software que compõe a unidade principal de controle pode ser agrupado em 3 funções principais, nomeadamente: função configuração inicial, função requisição e cálculo da temperatura e função cálculo da resistência, conforme está ilustrado na Figura 3.3.

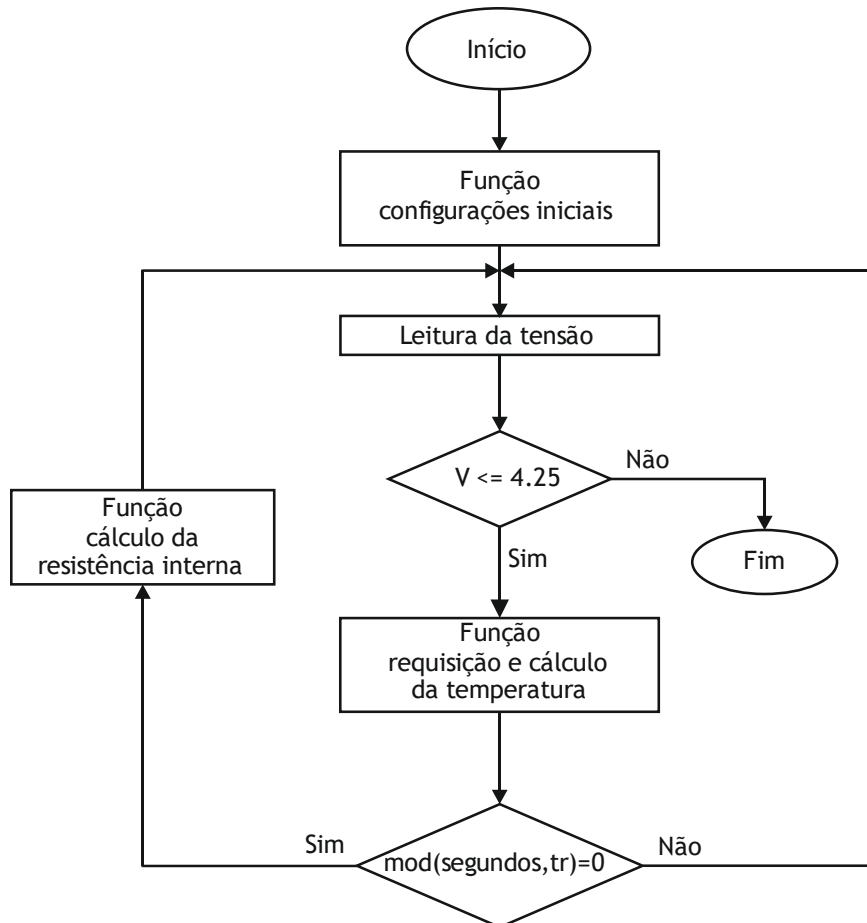


Figura 3.3 - Fluxograma do programa implementado na unidade principal de controle.

Na função configuração inicial são inicializadas todas as variáveis e é feita a configuração dos módulos de comunicação série assíncrono SCPI e SCI. De seguida é definida a temperatura no interior da câmara e, além disso, é definido o valor da corrente de carregamento. Seguidamente é definido o tempo de amostragem da resistência interna da bateria, e por fim são fixados os critérios para a perturbação da corrente de carregamento, onde é estabelecida a amplitude da variação da corrente percentualmente, e a duração da perturbação (pt) em segundos, como é ilustrado na Figura 3.4.

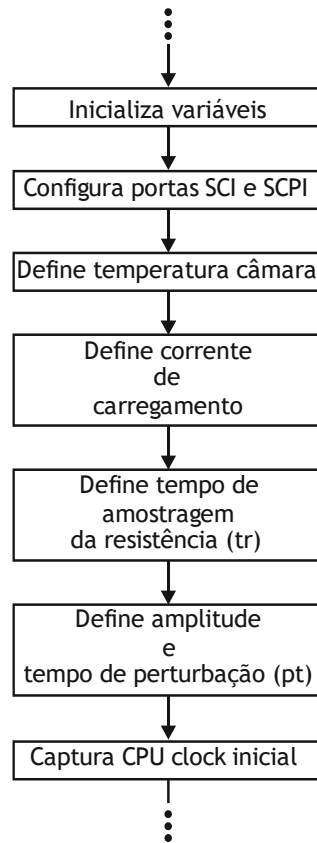


Figura 3.4 - Fluxograma da função configurações iniciais.

Assim que o programa efetua as configurações iniciais é lida a tensão da bateria nesse instante e o programa entra na condição do critério de paragem. Se a bateria apresentar uma tensão maior ou igual a 4.25 V é desligada a fonte de alimentação e o programa termina. Caso contrário, o algoritmo entra em ciclo infinito e inicia o carregamento, comutando para a função requisição e cálculo da temperatura.

Como está ilustrado na Figura 3.5, ao longo de todo o carregamento o algoritmo faz a aquisição do valor da temperatura e envia o byte de comando 02h à unidade auxiliar de controlo, aguardando depois pela sua resposta. Assim que são enviados os 4 bytes provenientes dos 4 sensores de temperatura, a unidade principal recebe a informação, relativa à temperatura da câmara e à superfície da bateria, e o algoritmo efetuará o cálculo da temperatura extrapolando os valores com a equação *Steinhart-Hart*.

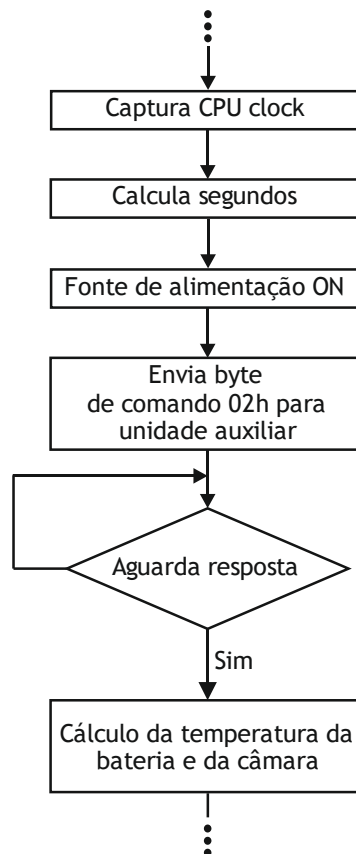


Figura 3.5 - Fluxograma da função requisição e cálculo da temperatura.

Assim que é executada a função requisição e cálculo da temperatura, o algoritmo comuta para a função cálculo da resistência interna depois de atingir o tempo de amostragem (t_r), imposto na função configurações iniciais (Figura 3.4). O tempo de amostragem imposto foi de 10 segundos, e durante todo o carregamento o algoritmo efetuará, num período cíclico de 10 segundos o cálculo da resistência da bateria.

Para realizar o cálculo da resistência da bateria, como é ilustrado na Figura 3.6, é lida primeiramente a tensão da bateria nesse instante. Logo de seguida é perturbada a corrente de carregamento, variando a sua amplitude em 50% do valor da corrente que está a ser aplicada, durante um período de tempo (p_t) de 0.5 segundos, também estabelecido na função configurações iniciais. Após 0.5 segundos é novamente lida a tensão da bateria e, a partir da lei de Ohm, exemplificada na equação (2.1), é calculada a resistência da bateria.

De seguida é restabelecida a amplitude inicial da corrente de carregamento, até esta ser novamente perturbada. Por fim, o algoritmo repetirá consecutivamente este procedimento ao longo de todo o carregamento, até que a bateria atinja os 4.25 V de tensão (critério de paragem).

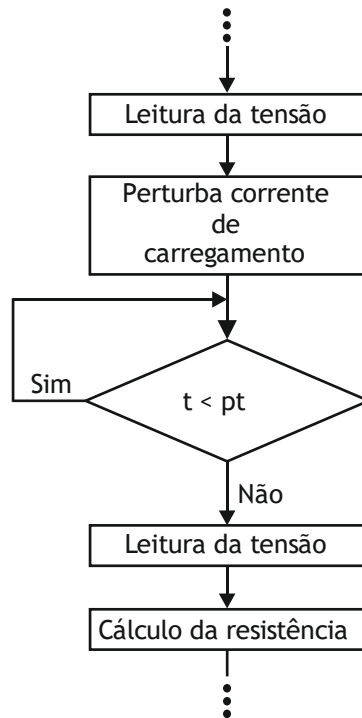


Figura 3.6 - Fluxograma da função cálculo da resistência.

3.4 Análise da resistência interna em regime de relaxamento

Para analisar o impacto do envelhecimento nas baterias de Li-ion foi utilizada uma bateria SAMSUNG ICR18650-26H 2600mAh com reduzido número de ciclos de vida [64], e uma bateria SANYO UR18650F-SCUD-3 com elevado número de ciclos de vida [65].

Deste modo, foram aplicados às baterias sob teste pulsos de corrente de carregamento (Caso 1) e de descarregamento (Caso 2), com períodos de duração de 0.5, 2, 5, e 10 segundos e com uma intensidade de corrente de 1 A. Esta sequência de pulsos de corrente, igual para ambos os casos, foi aplicada em diversas condições de temperatura e em níveis de SOC (ou estado de carga) distintos, ou seja, a medição dos valores da resistência interna foi efetuada nas seguintes conjunturas: i) em diferentes níveis de SOC (*i.e.*, 10%, 50% e 100%) a uma temperatura ambiente controlada e constante de 20°C; ii) em diferentes valores de temperatura (*i.e.*, 30°C, 40°C e 50°C) com o SOC a 50%.

De acordo com o protocolo de ajustamento, primeiramente foi realizado o descarregamento total das baterias, até ao valor de tensão mínimo (3.2 V) recomendado pelo fabricante, garantindo os 0% de SOC. Seguidamente procedeu-se ao carregamento individual de cada bateria, onde foi empregue o método de carregamento corrente constante (CC) durante cerca de duas horas com uma corrente de carregamento inicial de 0.5 C (1.3 A). Após

o primeiro carregamento completo, ocorreu o primeiro ensaio experimental com a aplicação dos pulsos de descarregamento e carregamento, empregues alternadamente, em cada bateria no nível de SOC de 100%.

Para alcançar os restantes níveis de SOC desejados, as baterias, completamente carregadas, foram descarregadas durante uma hora para atingir os 50%. Para atingir os 10% de SOC, procedeu-se ao descarregamento completo das baterias, onde foram depois novamente carregadas durante 12 minutos.

Foram exercidos nas baterias períodos de relaxamento [66] de 4 horas após cada carregamento/descarregamento, podendo este ser completo ou não, e de 15 minutos entre cada ensaio experimental, isto é, entre cada pulso de corrente aplicado na bateria.

3.4.1 Caso 1 - Pulsos de Corrente de Carregamento

- **Bateria com reduzido número de ciclos**

A Figura 3.7 demonstra os perfis da resistência interna que foram medidos com a aplicação das várias correntes de carregamento com diferentes durações: a) 0.5 segundos, b) 2 segundos, c) 5 segundos e d) 10 segundos, em diferentes níveis de SOC. Ao analisar os perfis da resistência interna, podemos verificar que estes assumem um comportamento linear nos primeiros milissegundos, seguindo-se de uma variação não-linear no restante período.

Esta particularidade, comum em todos os ensaios experimentais que estão compreendidos no Caso 1 e no Caso 2, resulta da transição das componentes resistivas que compõem a resistência interna de uma bateria. A zona linear é causada pela predominância da resistência puramente óhmica (R_0), enquanto que o restante período é derivado do efeito provocado pela resistência de transferência de carga (R_{CT}). Deste modo, é possível concluir que a duração do pulso de corrente tem bastante relevância na determinação da resistência interna, pois altera o comportamento eletroquímico da bateria.

Para além disso, é também evidente e comum nos resultados experimentais de ambos os casos de estudo, o aumento do valor da resistência interna relativamente à extensão da duração do pulso de corrente aplicado. Este fenómeno está associado ao aumento da variação da tensão da bateria, isto é, quanto maior for a duração do pulso de corrente, maior será a variação da tensão e consequentemente, maior será o valor da resistência interna da bateria.

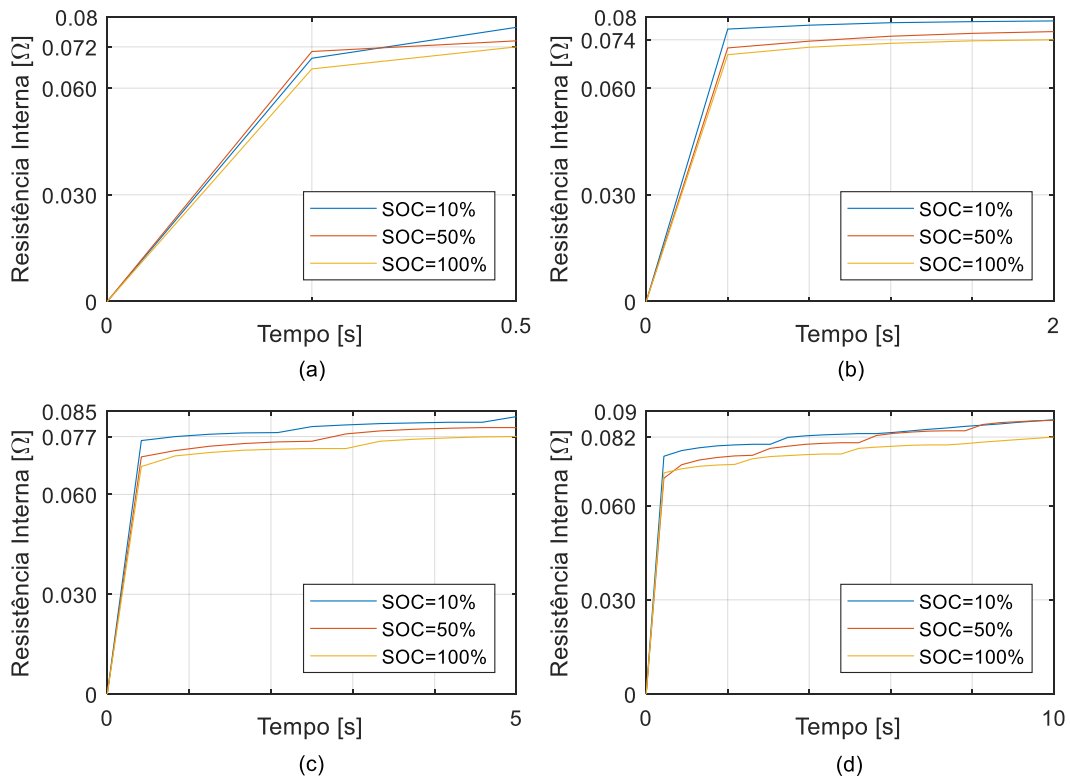


Figura 3.7 - Leitura da resistência interna em diferentes níveis de SOC, com vários pulsos de corrente de carregamento: a) 0.5s; b) 2s; c) 5s; d) 10s.

Na Figura 3.7 é também perceptível que o valor da resistência interna da bateria diminui com o aumento do SOC. À temperatura de 20°C, e dependendo da duração do pulso de corrente, o valor da resistência interna da bateria pode apresentar pequenas variações. Nos 10% de SOC pode variar entre 77 m Ω e os 87 m Ω , enquanto que nos 50% esta adquiriu valores entre os 73 m Ω e os 87m Ω . Já nos 100% de SOC a bateria tomou os valores de resistência entre 72 m Ω e 82 m Ω . Portanto, podemos concluir que bateria apresenta maior resistência interna quando se encontra num nível de estado de carga menor (10%) e vai diminuindo gradualmente até ao estado de carga máximo (100%).

A Figura 3.8 ilustra os valores da resistência interna sob a influência da temperatura. Com um estado de carga de 50%, é observável que o aumento da temperatura contribui no decréscimo do valor da resistência. Este fenómeno deve-se fundamentalmente ao aumento das reações eletroquímicas que ocorrem no interior da bateria. Dependendo da duração do pulso de corrente, a resistência interna da bateria pode alcançar os valores entre 62 m Ω e 72 m Ω a uma temperatura de 30°C. Já o intervalo de resistência à temperatura de 40°C está compreendido entre 58 m Ω e 67 m Ω , e à temperatura de 50°C o valor da resistência baixa para valores entre os 56 m Ω e 63 m Ω .

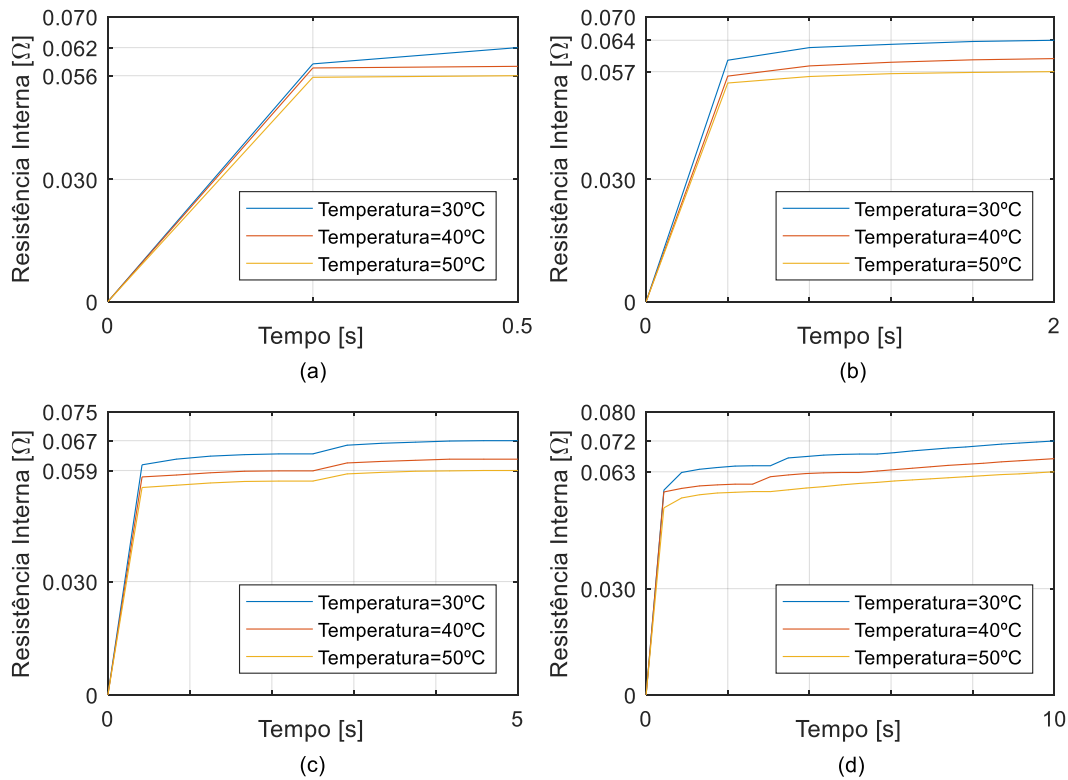


Figura 3.8 - Leitura da resistência interna em diversas temperaturas, com vários pulsos de corrente de carregamento: a) 0.5s; b) 2s; c) 5s; d) 10s.

Para efeitos comparativos e ilustrativos, a Tabela 3.1 apresenta todos os valores da resistência interna para os vários pulsos de corrente de carregamento que foram aplicadas à bateria com reduzido número de ciclos.

Através da Tabela 3.1, torna-se mais intuitivo analisar o aumento progressivo da resistência interna com o aumento da duração do pulso. Além disso, é também possível analisar e comparar os valores nos diferentes níveis de SOC para uma temperatura de 20°C, e nas diferentes temperaturas com a bateria num estado de carga de 50%.

Tabela 3.1 - Valores da resistência interna numa bateria com reduzido número de ciclos (Carregamento).

Pulsos de Corrente de Carregamento de 1A			
Resistência Interna (mΩ) com T=20°C			
Duração do Pulso [S]	SOC=10%	SOC=50%	SOC=100%
0.5	77	73	72
2	79	76	74
5	83	80	77
10	87	87	82
Resistência Interna (mΩ) com SOC = 50%			

Duração do Pulso [S]	T=30°C	T=40°C	T=50°C
0.5	62	58	56
2	64	60	57
5	67	62	59
10	72	67	63

- **Bateria com elevado número de ciclos**

A Figura 3.9 ilustra os valores da resistência interna nos diferentes níveis de SOC de uma bateria com elevado número de ciclos. Comparativamente à bateria com reduzido número de ciclos, esta apresenta valores de resistência interna bastante superiores, o que evidencia e justifica o seu estado degradativo. Como se pode verificar, a diminuição gradual do valor da resistência interna com o aumento do SOC é igualmente comum na bateria com elevados números de ciclos.

Quando a bateria se encontra com um SOC igual a 10%, esta revela ter valores de resistência entre os 121 mΩ e 132 mΩ. Aos 50% a resistência baixa para valores compreendidos entre os 106 mΩ e 124 mΩ, e é novamente nos 100% de SOC que foram medidos os valores mais baixos de resistência da bateria, entre os 102 mΩ e 119 mΩ.

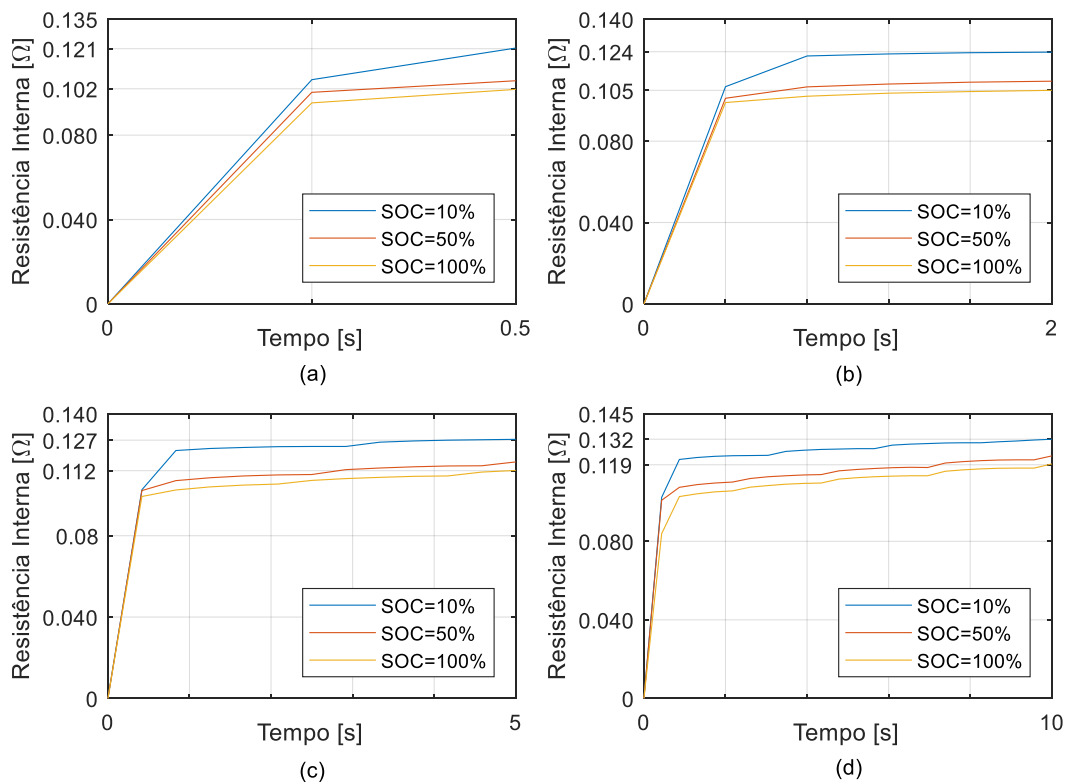


Figura 3.9 - Leitura da resistência interna em diferentes níveis de SOC, com vários pulsos de corrente de carregamento: a) 0.5s; b) 2s; c) 5s; d) 10s.

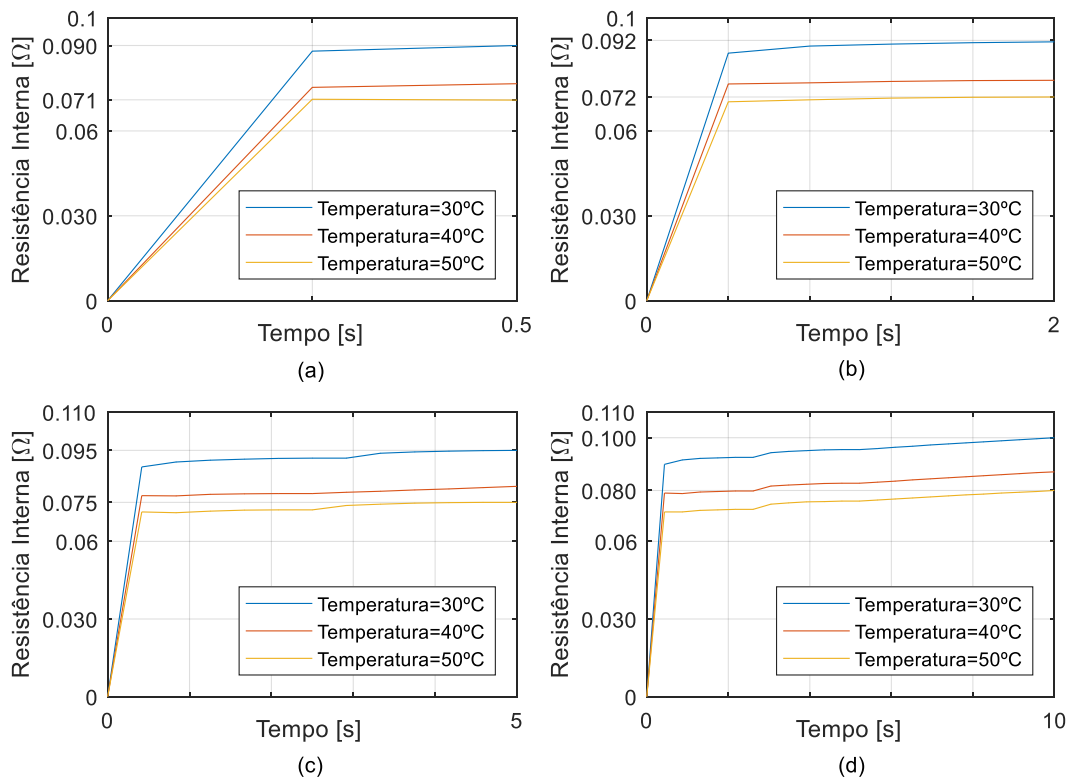


Figura 3.10 - Leitura da resistência interna em diversas temperaturas, com vários pulsos de corrente de carregamento: a) 0.5s; b) 2s; c) 5s; d) 10s.

Através da Figura 3.10 é possível verificar as leituras efetuadas da resistência interna sob a influência da temperatura. Analisando os perfis, verifica-se que o efeito da temperatura é semelhante ao da bateria com reduzido número de ciclos, ou seja, o valor da resistência diminui com o seu aumento. Deste modo, com o SOC a 50%, a resistência interna da bateria com elevado número de ciclos a 30°C possui um valor entre 90 mΩ e 100 mΩ, a 40°C entre 77 mΩ e 87 mΩ e a 50°C entre 71 mΩ e 80 mΩ.

Ao analisar a Tabela 3.2 é possível constatar-se um comportamento semelhante, relativamente à bateria com reduzido número de ciclos, na variação da resistência interna com o aumento do SOC e da temperatura. Contudo, apresenta valores de resistência bastante superiores e manifesta uma variabilidade mais acentuada relativamente aos diferentes níveis de SOC e temperaturas.

Tabela 3.2 - Valores da resistência interna numa bateria com elevado número de ciclos (Carregamento).

Pulsos de Corrente de Carregamento de 1A			
Resistência Interna (mΩ) com T=20 °C			
Tempo de Pulso [S]	SOC=10%	SOC=50%	SOC=100%
0.5	121	106	102
2	124	110	105
5	127	116	112
10	132	124	119
Resistência Interna (mΩ) com SOC = 50%			
Tempo de Pulso [S]	T=30°C	T=40°C	T=50°C
0.5	90	77	71
2	92	78	72
5	95	81	75
10	100	87	80

3.4.2 Caso 2 - Pulsos de Corrente de Descarregamento

- **Bateria com reduzido número de ciclos**

A Figura 3.11 apresenta os perfis da resistência interna medidos com a aplicação das várias correntes de descarregamento com diferentes durações: a) 0.5 segundos, b) 2 segundos, c) 5 segundos e d) 10 segundos, em diferentes níveis de SOC. Analisando os gráficos é possível verificar a homogeneidade dos perfis quando comparados com as medições demonstradas no Caso 1, evidenciando valores da resistência interna muito próximos ou idênticos. À temperatura de 20°C, o valor da resistência interna da bateria, com um SOC de 10%, está compreendido entre 78 mΩ e 87 mΩ, a 50% entre 73 mΩ e 85Ωm e a 100% entre 72 mΩ e 81 mΩ.

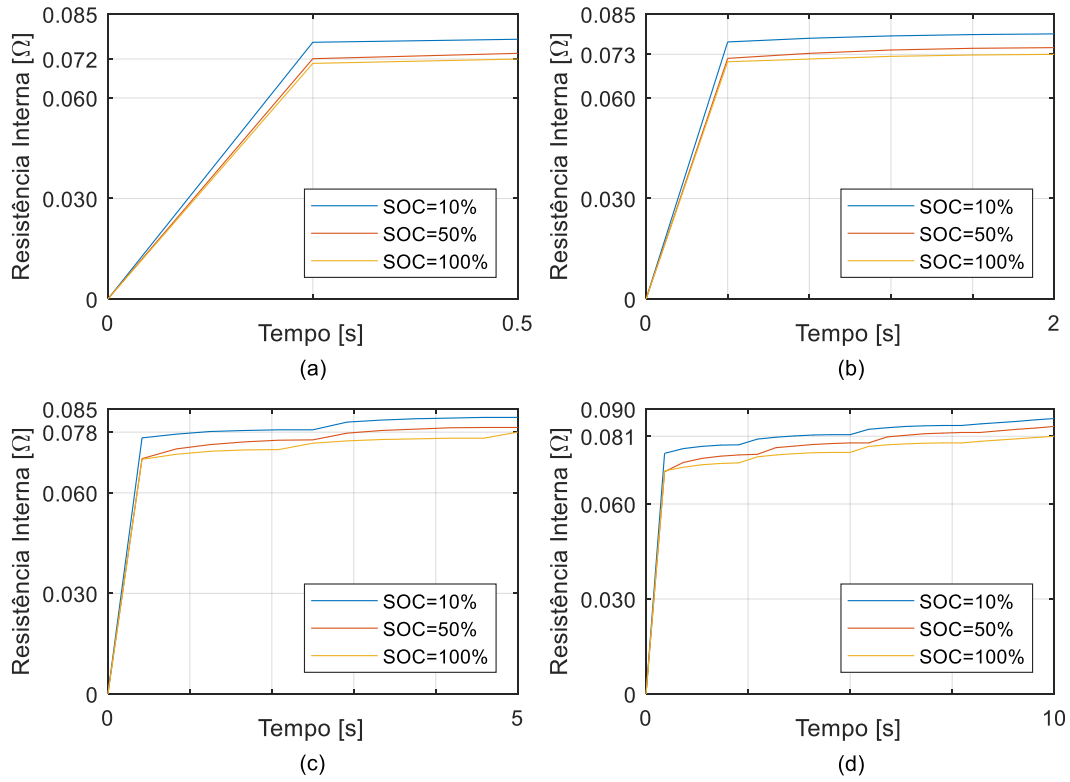


Figura 3.11 - Leitura da resistência interna em diferentes níveis de SOC, com vários pulsos de corrente de descarregamento: a) 0.5s; b) 2s; c) 5s; d) 10s.

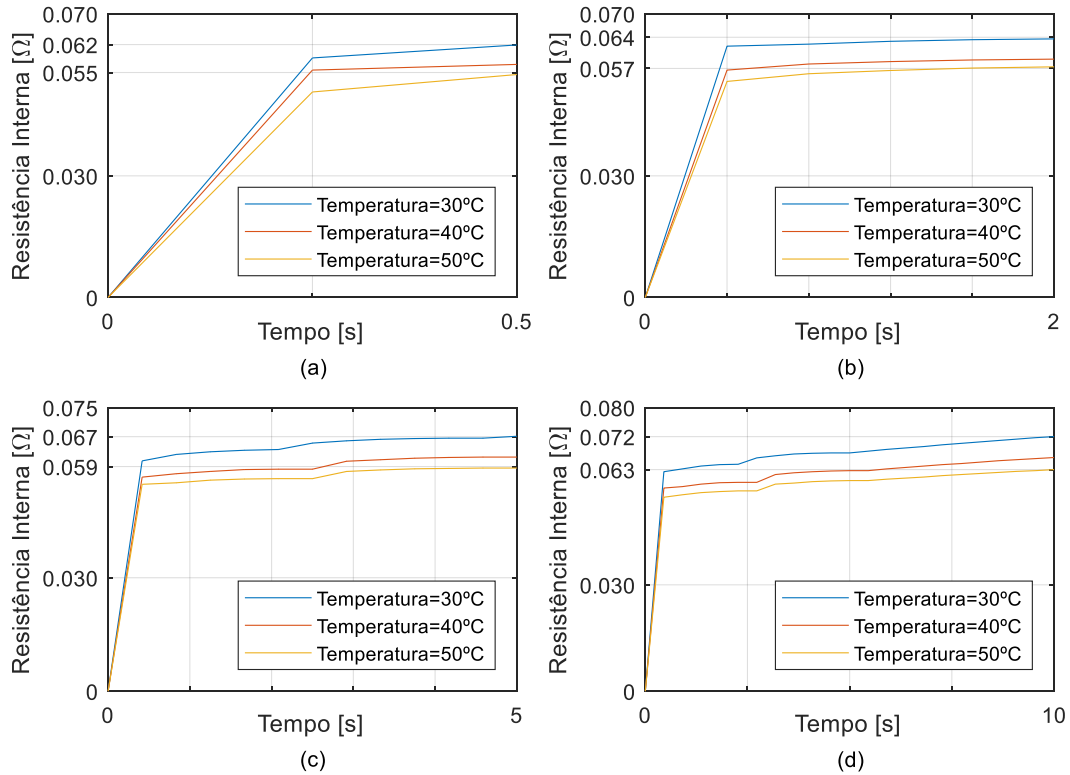


Figura 3.12 - Leitura da resistência interna em diversas temperaturas, com vários pulsos de corrente de descarregamento: a) 0.5s; b) 2s; c) 5s; d) 10s.

Relativamente ao impacto da temperatura, através da Figura 3.12 é possível analisar os perfis da resistência interna, verificando-se novamente a similaridade do comportamento da bateria em relação ao Caso 1. Com um SOC de 50% e a uma temperatura de 30°C, a bateria revela valores de resistência interna entre 62 mΩ e 72 mΩ, a 40°C entre 58 mΩ e 66 mΩ e a 50°C entre 55 mΩ e 63 mΩ.

Por análise da Tabela 3.3 é possível avaliar os valores da resistência interna através da imposição de pulsos de corrente de descarregamento na bateria com reduzido número de ciclos. Comparando com a Tabela 3.1, é facilmente perceptível a correspondência dos valores tabelados.

Tabela 3.3 - Valores da resistência interna numa bateria com reduzido número de ciclos (Descarregamento).

Pulsos de Corrente de Descarregamento 1A			
Resistência Interna (mΩ) com T=20 °C			
Tempo de Pulso [S]	SOC=10%	SOC=50%	SOC=100%
0.5	78	73	72
2	79	75	73
5	83	80	78
10	87	85	81
Resistência Interna (mΩ) com SOC = 50%			
Tempo de Pulso [S]	T=30°C	T=40°C	T=50°C
0.5	62	58	55
2	64	59	57
5	67	62	59
10	72	66	63

- **Bateria com elevado número de ciclos**

A Figura 3.13 apresenta os valores da resistência interna da bateria com elevado número de ciclos, em diferentes níveis de SOC e a uma temperatura de 20°C. Fazendo uma apreciação comparativamente com os valores demonstrados no Caso 1, constata-se alguma discrepância entre a leitura da resistência interna em pulsos de corrente de carregamento e de corrente de descarregamento. Apesar dos perfis serem quase idênticos, os valores da resistência interna são significativamente superiores neste caso de estudo. Com um SOC igual a 10% os valores da resistência estão compreendidos entre 128 mΩ e 144 mΩ, já a 50% os valores estão entre 108 mΩ e 126 mΩ e a 100% entre 103 mΩ e 122 mΩ.

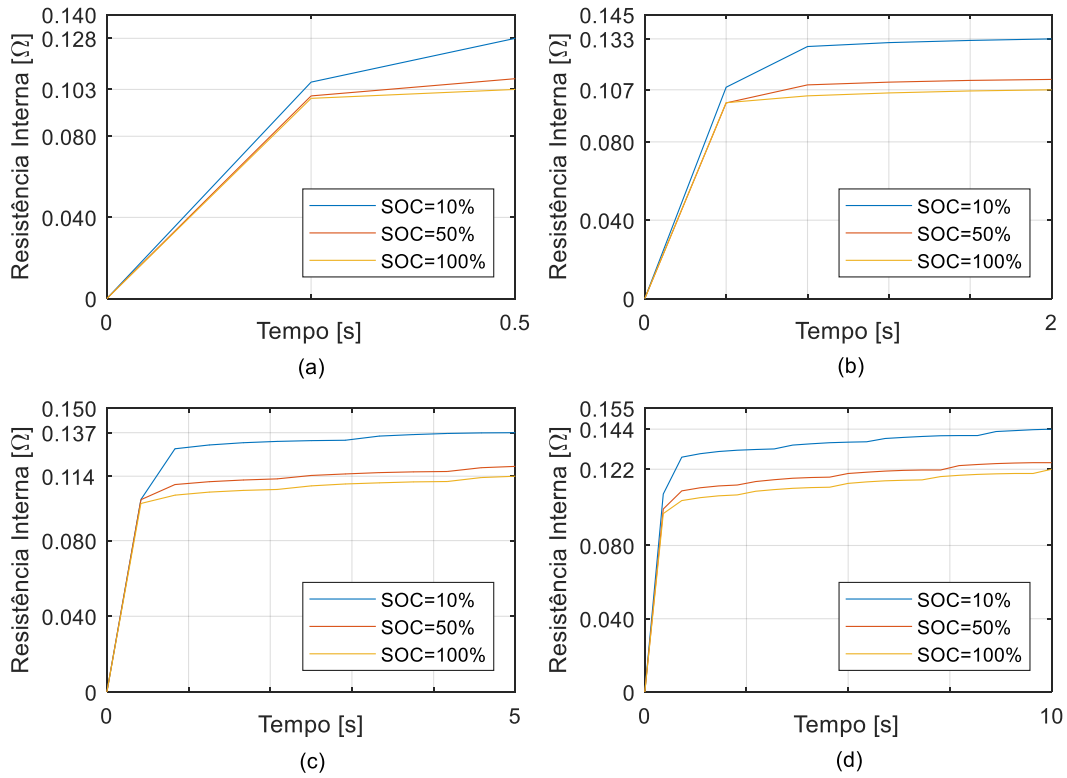


Figura 3.13 - Leitura da resistência interna em diferentes níveis de SOC, com vários pulsos de corrente de descarregamento: a) 0.5s; b) 2s; c) 5s; d) 10s.

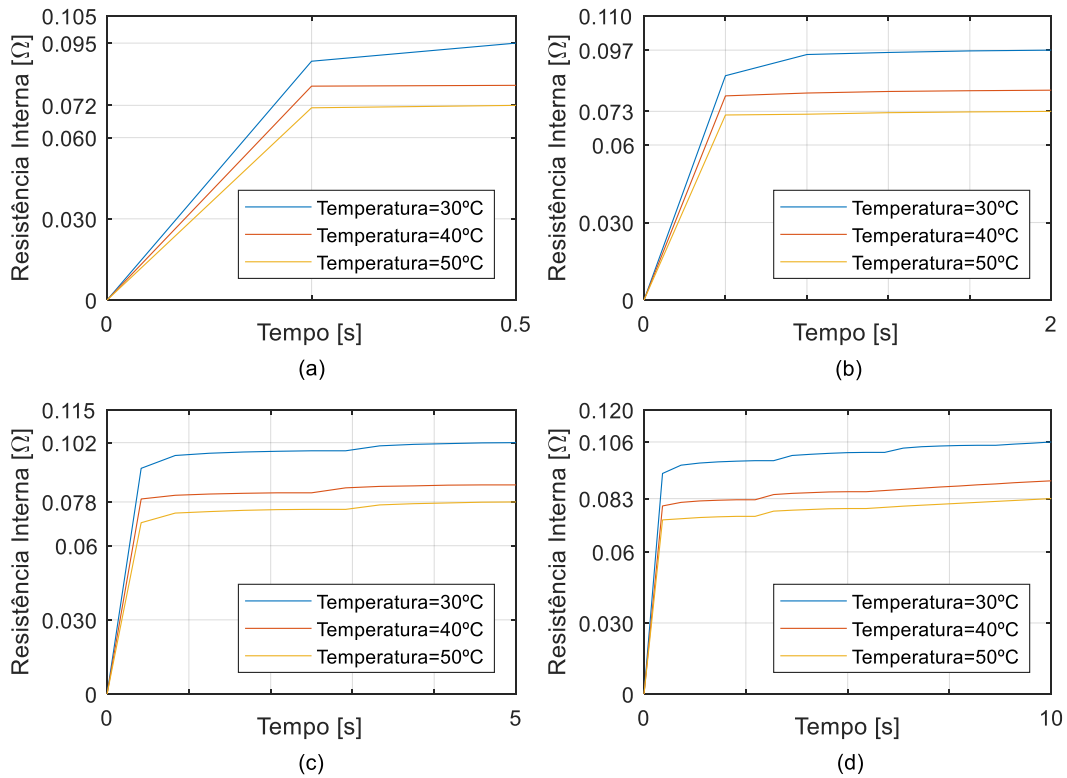


Figura 3.14 - Leitura da resistência interna em diversas temperaturas, com vários pulsos de corrente de descarregamento: a) 0.5s; b) 2s; c) 5s; d) 10s.

Na Figura 3.14 estão ilustrados os perfis da resistência interna, da bateria com elevado número de ciclos, para as diversas temperaturas (30°C, 40°C e 50°C) a um nível de carga de 50%. Analisando os gráficos, é novamente constatado alguma divergência nos valores da resistência interna, comparativamente aos testes executados na aplicação de pulsos de corrente de carregamento (Caso 1). O efeito da sua diminuição com o aumento da temperatura é novamente constatado e a bateria apresenta valores de resistência entre 95 mΩ e 106 mΩ a 30°C, enquanto que a 40°C os valores variam entre 79 mΩ e 90 mΩ, e a 50°C entre 72 mΩ e 83 mΩ.

Por fim são ilustrados na Tabela 3.4 todos os valores da resistência interna medidos na sequência dos pulsos de corrente de descarregamento aplicados à bateria com elevado número de ciclos. Comparando com a Tabela 3.2 é possível verificar de forma clara que nos pulsos de corrente de descarregamento, a bateria com elevado número de ciclos assume valores de resistência mais elevados do que quando são aplicados pulsos de corrente de carregamento.

Tabela 3.4 - Valores da resistência interna numa bateria com elevado número de ciclos (Descarregamento).

Pulsos de Corrente de Descarregamento de 1A			
Resistência Interna (mΩ) com T=20 °C			
Tempo de Pulso [S]	SOC=10%	SOC=50%	SOC=100%
0.5	128	108	103
2	132	112	106
5	137	120	114
10	144	126	122
Resistência Interna (mΩ) com SOC = 50%			
Tempo de Pulso [S]	T=30°C	T=40°C	T=50°C
0.5	95	79	72
2	97	81	73
5	102	85	78
10	106	90	83

3.5 Análise da resistência interna em regime de carregamento

Nesta secção serão apresentados os resultados experimentais da análise da resistência interna em regime de carregamento. Para testar o algoritmo implementado foram novamente utilizadas as baterias de Li-ion SAMSUNG ICR18650-26H 2600mAh com reduzido número de ciclos de vida [64] e as baterias SANYO UR18650F-SCUD-3 com elevado número de ciclos de vida [65], que correspondem ao primeiro e segundo casos de estudo, respetivamente.

Para analisar e comparar o impacto do envelhecimento, foram definidas, para ambos os casos, as mesmas condições de carregamento (critérios de paragem e condições iniciais) e de leitura da resistência. Foram efetuados três carregamentos completos, cada um com diferente valor de corrente de carregamento (0.5 A, 1 A e 2 A) a uma temperatura ambiente controlada de 20°C. Seguidamente, foram realizados mais três carregamentos com uma corrente de carregamento constante de 1 A, mas com temperaturas ambiente distintas (30°C, 40°C e 50°C).

O algoritmo de carregamento implementado tem por base o método de carregamento corrente contínua (CC) e possui um critério de paragem no momento em que a tensão da bateria alcança o valor máximo estipulado (4.25 V). Relativamente à resistência interna da bateria, esta é determinada com base no método de pulso de corrente DC, com uma variação de amplitude de corrente de 50% e com um tempo de amostragem de 10 segundos, como foi anteriormente explicado na secção 3.3.2.

3.5.1 Caso 1 - Bateria com reduzido número de ciclos

Na Figura 3.15 estão representados os perfis da resistência interna, que foram medidos ao longo dos diversos carregamentos, sendo que cada um deles foi efetuado com uma corrente de carregamento diferente (0.5 A, 1 A e 2 A). Através da análise dos gráficos, é constatada a influência que a corrente de carregamento tem relativamente à transferência de energia e ao desempenho da bateria, pois existe uma variabilidade no valor da resistência, relativamente à intensidade de corrente que lhe é aplicada. Apesar das durações de carregamento e dos valores serem diferentes, as curvas da resistência interna com valores de corrente distintos manifestam um comportamento idêntico.

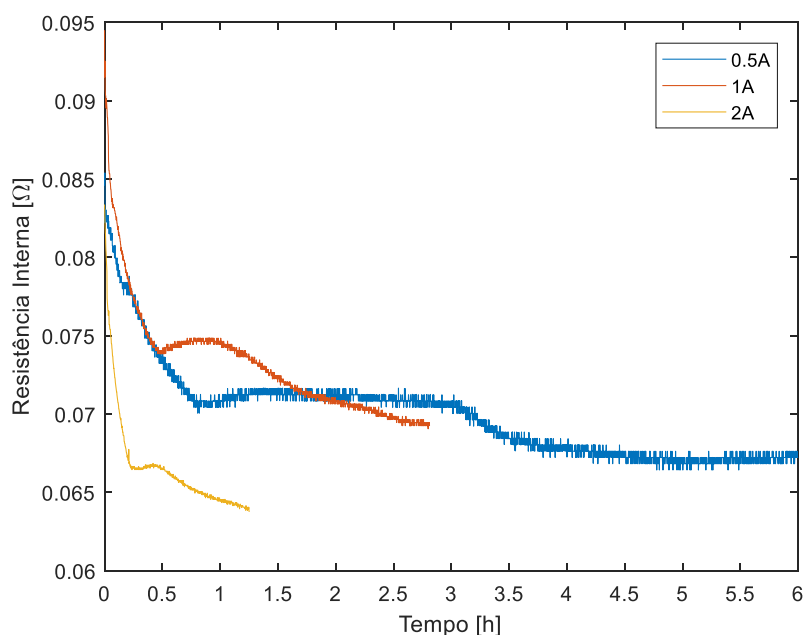


Figura 3.15 - Perfis da resistência interna em carregamentos completos, com várias correntes de carregamento (Caso 1).

Observando a curva da resistência resultante da aplicação de uma corrente de 0.5 A (azul), verifica-se a tendência decrescente do valor da resistência ao longo do carregamento. Na primeira hora de carregamento, que corresponde a cerca de 15%-20% de SOC, o valor da resistência da bateria diminui vertiginosamente, apresentando valores no início do carregamento de cerca de 90 mΩ, e caindo gradualmente até quase aos 70 mΩ. A partir da primeira hora de carregamento é visível um ligeiro aumento da resistência, pouco significativo, mantendo-se praticamente constante nos 72 mΩ, até cerca de 3 horas de carregamento, que corresponde aproximadamente aos 50% de SOC. Seguidamente o valor da resistência volta a diminuir ligeiramente até um pouco menos de 70 mΩ e vai-se mantendo constante até ao fim do carregamento de cerca de 5 horas e 45 minutos.

Na curva da resistência com a aplicação de uma corrente de 1 A (laranja), é verificado um pequeno aumento do seu valor. No início do carregamento a bateria apresenta uma resistência de quase 95 mΩ e decresce até cerca dos 73 mΩ depois de 30 minutos de carregamento, que corresponde a um SOC entre cerca 15%-20%. Depois desse instante, a resistência aumentou de forma mais acentuada, comparativamente à curva da resistência anteriormente analisada, durante cerca de 30 minutos. Como a resistência não manifesta nenhum comportamento constante durante todo o carregamento, a partir deste ponto a resistência diminui gradualmente de 75 mΩ para cerca de 70 mΩ no final do carregamento (2 horas e 43 minutos).

Por fim, através da análise da curva da resistência correspondente à corrente de 2 A (amarelo), é possível constatar-se a diminuição dos valores da resistência comparativamente às curvas anteriormente analisadas. Entre o início do carregamento, e apenas cerca de 15 minutos depois, ou seja, os primeiros 15%-20% de SOC, a resistência da bateria varia entre 83 mΩ e 67 mΩ. Depois disso, a curva mostra, de forma exígua, um ligeiro aumento da resistência após 30 minutos de carregamento. A partir desse instante, a resistência diminui progressivamente até ao final do carregamento (1 hora e 15 minutos), adquirindo valores entre 67 mΩ e 63 mΩ.

A Figura 3.16 ilustra os perfis da resistência interna que foram medidos ao longo dos diferentes carregamentos com temperaturas ambientes distintas (30°C, 40°C e 50°C) com uma corrente de carregamento de 1 A. Analisando os gráficos é perceptível a diminuição da resistência da bateria com o aumento da temperatura, como já tinha sido confirmado previamente na secção 3.4. Apesar de a resistência diminuir com o aumento da temperatura, este fenómeno não significa uma melhoria na eficiência do carregamento.

O efeito da temperatura na resistência sucede devido ao facto de as reações eletroquímicas no interior da bateria ocorrerem mais rapidamente. Todavia, este acontecimento, para além de condicionar a segurança, torna o sistema mais instável, danifica a bateria ao longo do tempo e não se traduz num aumento da eficiência da transferência de energia.

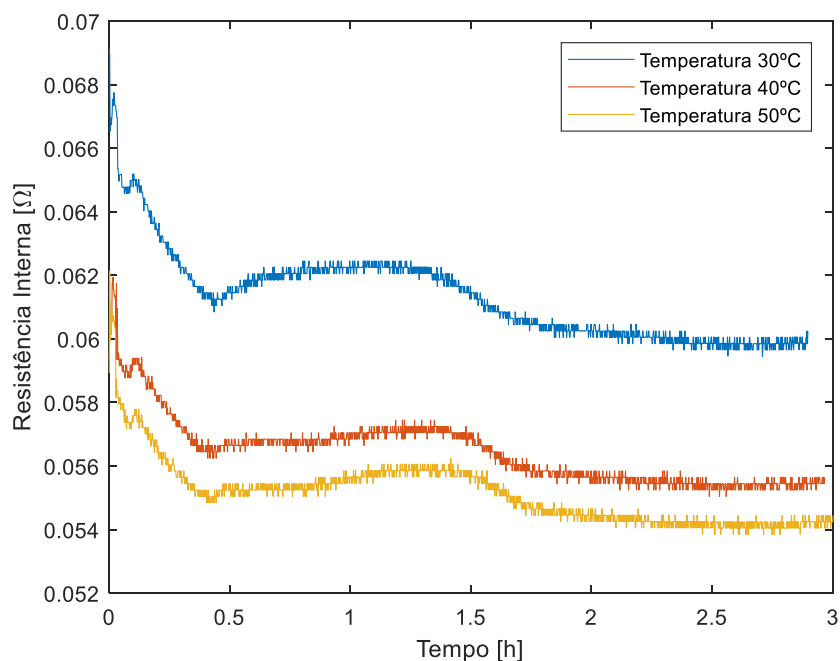


Figura 3.16 - Perfis da resistência interna ao longo do carregamento em várias temperaturas de carregamento (Caso 1).

Comparando com a curva de resistência medida com a corrente de 1 A (laranja), analisada na Figura 3.15, é possível verificar-se a semelhança com as curvas aqui apresentadas. Com uma temperatura de 30°C a resistência da bateria varia entre os 69 mΩ e os 60 mΩ. Já à temperatura de 40°C a resistência variou entre os 62 mΩ e os 56 mΩ, e com uma temperatura de 50°C os valores foram compreendidos entre 62 mΩ e os 54 mΩ.

3.5.2 Caso 2 - Bateria com elevado número de ciclos

A Figura 3.17 apresenta os perfis da resistência interna, que foram medidos ao longo dos diversos carregamentos que contêm correntes de carregamento distintas (0.5 A, 1 A e 2 A) para o Caso 2. As curvas da resistência interna, comparando com o Caso 1, possuem valores superiores, tendendo a diminuir durante quase todo o carregamento, estabilizando parcialmente no final do carregamento.

Neste caso de estudo, os valores medidos da resistência diminuem com o aumento da intensidade da corrente de carregamento. Com uma corrente de carregamento de 0.5 A (azul), a resistência da bateria varia entre os 136 mΩ e os 107 mΩ e quando é aplicada uma corrente de 1 A (laranja), a bateria apresenta valores de resistência entre 136 mΩ e 103 mΩ. Já quando foi aplicada uma corrente de 2 A (amarelo), a bateria apresentou valores de resistência compreendidos entre 136 mΩ e 103mΩ.

Por se tratar de uma bateria com elevado número de ciclos, a sua capacidade de armazenamento encontra-se condicionada, assim como a sua eficiência. Esta particularidade justifica o facto de neste caso de estudo, o tempo de carregamento ser inferior ao tempo de carregamento que é apurado no Caso 1.

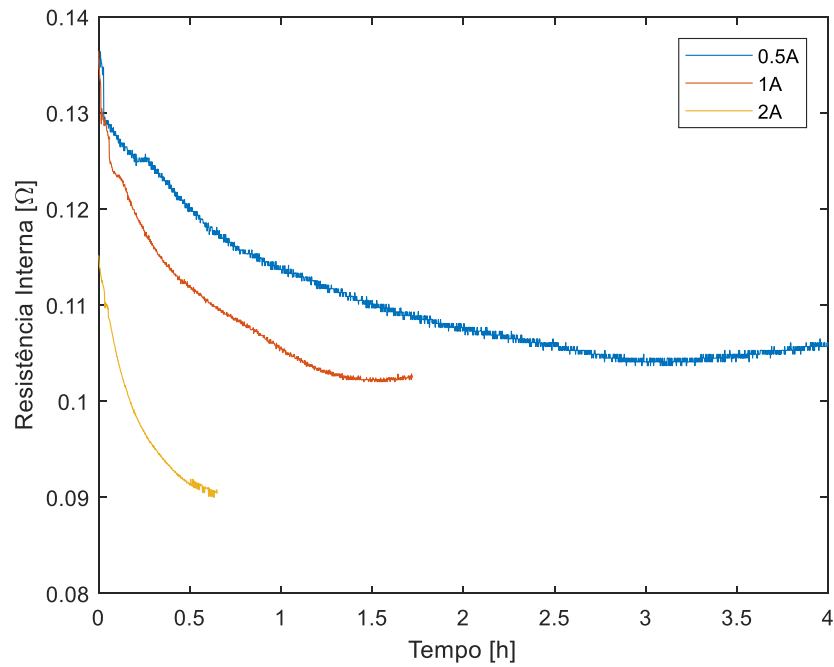


Figura 3.17 - Perfis da resistência interna em carregamentos completos, com várias correntes de carregamento (Caso 2).

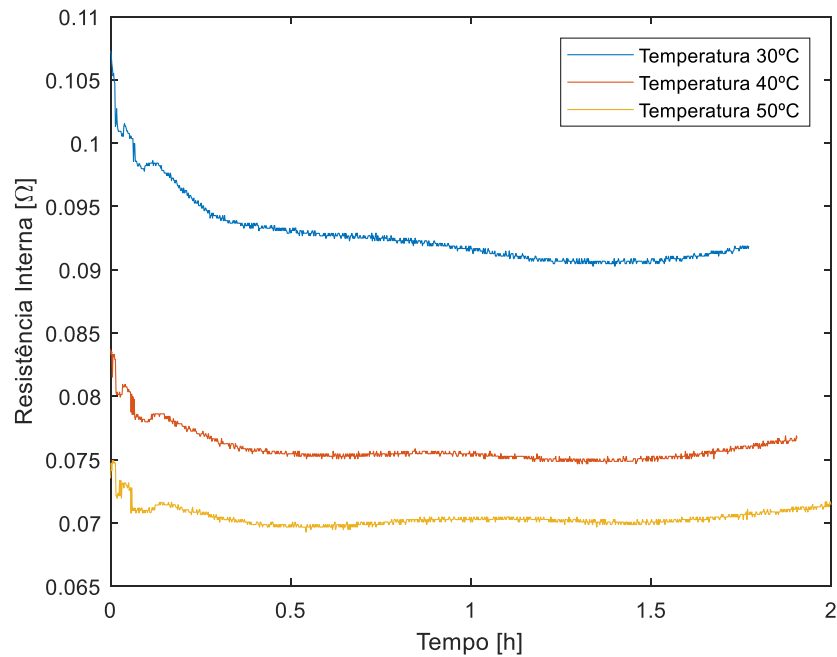


Figura 3.18 - Perfis da resistência interna ao longo do carregamento em várias temperaturas de carregamento (Caso 2).

Na Figura 3.18, são ilustradas as curvas da resistência que foram medidas nos carregamentos com diferentes temperaturas (30°C, 40°C e 50°C) para o Caso 2. Embora os valores da resistência sejam maiores, comparativamente ao Caso 1, estes diminuem igualmente com o aumento da temperatura. Também é possível visualizar que, em baterias

com elevado número de ciclos, a resistência varia de forma mais estabilizada após 10 minutos de carregamento e apresenta uma menor variabilidade no seu valor.

Com uma temperatura ambiente de 30°C a resistência adquiriu valores compreendidos entre 107 mΩ e 93 mΩ. Contudo, com a temperatura a 40°C o valor da resistência diminuiu drasticamente e cai para valores entre os 83 mΩ e 75 mΩ. Com uma temperatura de 50°C a resistência interna diminui novamente e atinge os valores compreendidos entre 75 mΩ e 70 mΩ. Neste caso de estudo destaca-se o efeito da temperatura em relação ao tempo de carregamento.

Capítulo 4

Neste capítulo é descrito na íntegra o princípio de funcionamento do algoritmo de carregamento desenvolvido com base nas redes neuronais. Primeiramente é feita uma introdução às redes neuronais, sendo depois descrito o princípio de funcionamento do algoritmo proposto. Por fim serão apresentados os resultados experimentais obtidos da aplicação do algoritmo, onde será depois avaliada a sua eficiência.

Método de carregamento baseado em redes neuronais

4.1 Introdução às redes neuronais

As redes neuronais são sistemas altamente dinâmicos de computação adaptativa de processamento paralelo de informação. Estes sistemas são inspirados nas características de funcionamento que são encontradas no sistema nervoso central, mais concretamente no processamento de informação que ocorre nos neurónios biológicos e nas suas interconexões, para deduzir e prever a partir de eventos confusos, incompletos ou escassos. São diversas as arquiteturas existentes, bem como os métodos de treino, com princípios de funcionamento e técnicas totalmente distintas.

Na Figura 4.1 está ilustrada a representação de uma arquitetura designada por *Multilayer Perceptron* (MLP). Trata-se de uma arquitetura bastante vulgar na comunidade científica e caracteriza-se por possuir múltiplas entradas e saídas e múltiplas camadas escondidas.

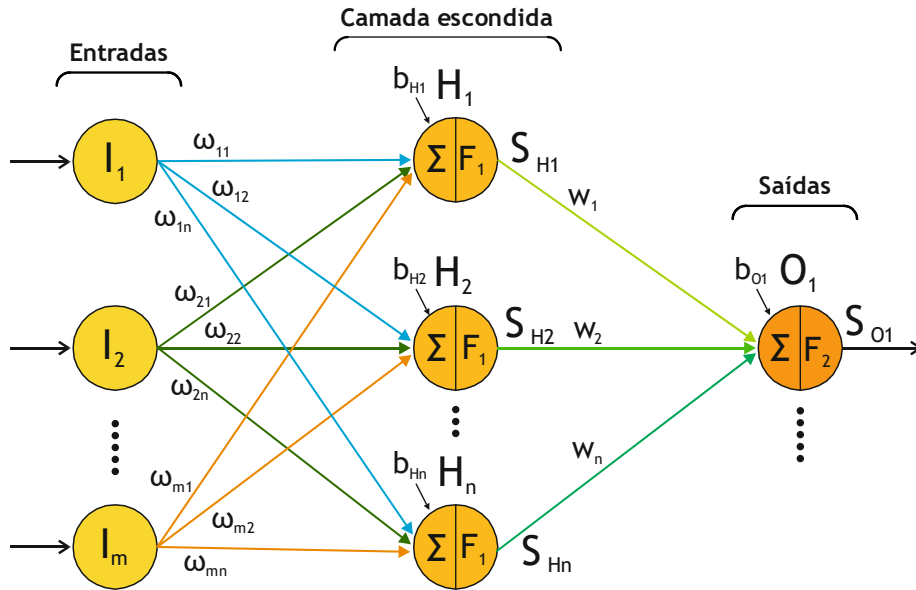


Figura 4.1 - Rede neuronal típica de uma arquitetura *Multilayer Perceptron*.

Tal como é descrito em [67], [68], as redes neurais MLP possuem a particularidade de transmitirem informação sem que ocorra realimentação, isto é, sem que haja retorno da informação das saídas para as entradas. Conforme está representado na Figura 4.1, o fluxo de informação é unidirecional e ocorre nas camadas de neurónios, transmitindo-se inicialmente nos neurónios de entrada até aos neurónios de saída da rede. A informação à saída de cada neurónio da camada escondida e da camada de saída podem ser representadas pelas equações (4.1) e (4.2), respetivamente:

$$S_{Hn} = F_1 \times (w_{mn} \times I_m + b_{Hn}) \quad (4.1)$$

$$S_{O1} = F_2 \times (W_n \times S_{Hn} + b_{O1}) \quad (4.2)$$

Os elementos S_{Hn} e S_{O1} representam as saídas dos neurónios das camadas escondida e de saída, F_1 e F_2 as funções de ativação, w_{mn} os pesos correspondentes às conexões entre a camada de entrada e a camada escondida, W_n os pesos correspondentes às conexões entre a camada escondida e a camada de saída, I_m as entradas do problema e b_{Hn} e b_{O1} as *bias* dos neurónios das camadas correspondentes. As funções de ativação servem de *threshold* e são estabelecidas para a camada escondida e para a camada de saída. Alguns exemplos de funções de ativação são a função sigmóide, a função tangente hiperbólica, a função de *Heaviside*, a função Gaussiana e a função *Spline*.

Uma outra característica relevante nas redes neurais, que serve para definir e atribuir os valores dos pesos das conexões dos neurónios entre cada camada, são os métodos de treino. Estes podem ser divididos, de um modo geral em duas classes fundamentais:

- i) **Métodos de treino supervisionado:** São métodos onde as entradas e saídas desejadas para a rede neuronal são fornecidas por um supervisor externo. Estes tipos 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, no entanto, a sua implementação requer um maior tempo computacional. Os métodos supervisionados *offline* são mais simples na sua implementação, mas exigem um treino que envolve um maior tempo computacional.
- ii) **Métodos de treino não supervisionados:** As redes treinadas por estes métodos são conhecidas como redes de autoaprendizagem, pois a rede tem que intuir e deduzir sem qualquer referência externa, relações ou padrões dos dados de entrada. São caracterizados por não possuírem qualquer conhecimento das células da rede neuronal e por isso a sua implementação torna-se bastante complexa, envolvendo um tempo computacional elevado.

O processo de treino é considerado um dos processos mais difíceis na implementação de uma rede neuronal, pelo facto de manifestar uma natureza não-linear e pelo desconhecimento do melhor conjunto de valores relativos aos parâmetros principais de controlo da rede, *i.e.*, os pesos e as *bias*. Por este motivo, têm existido um enorme esforço de investigação, na comunidade científica, relativamente à otimização dos métodos de treino por estes revelarem grande impacto na eficiência de uma rede neuronal. Assim sendo, são diversos os métodos de treino que se podem encontrar na literatura, podendo apresentar maior ou menor complexidade.

O algoritmo de treino mais comum e mais utilizado em redes neuronais com arquiteturas MLP é designado como *Back-Propagation* [69]-[71]. Trata-se de um algoritmo de treino supervisionado *offline* que se baseia na descida do gradiente e que privilegia uma exploração local. O processo de funcionamento deste algoritmo consiste fundamentalmente na sequência de duas fases. Primeiramente é apresentado um padrão às entradas da rede que irá fluir através da rede, camada por camada, até que seja produzida uma resposta pela(s) saída(s) da rede. A segunda fase consta no cálculo do erro reproduzido pela comparação da saída obtida relativamente à saída desejada. Em função do erro, o algoritmo modificará os pesos e as *bias*, de maneira a minimizar o erro da(s) próxima(s) saída(s).

Outro algoritmo bastante popular é o *Levenberg-Marquardt* [72]-[74], que é considerado como um dos algoritmos mais eficientes dentro dos algoritmos que se baseiam na descida do gradiente [75]. Trata-se de um algoritmo que, a partir da minimização de uma função não-linear, fornece uma solução numérica mais rápida, apresentando uma convergência estável. Apesar de ser um pouco mais complexo que o *Back-propagation*, este algoritmo é bastante adequado para efetuar o treino de redes neuronais orientadas para resolver problemas de pequena e média dimensão [76].

Recentemente tem surgido na literatura uma tendência para a utilização de algoritmos meta-heurísticos com o objetivo de mitigar as desvantagens dos métodos. Alguns exemplos desses algoritmos são PSO [77], [78], Grey wolf optimization [75], [79], Whale optimization [80], Ant lion optimizer [68], Grasshopper optimization [81], entre outros.

Outro aspeto não consensual na literatura que influencia o desempenho e eficiência das redes neurais é o seu dimensionamento. Na implementação de uma rede neuronal não existem técnicas para determinarem especificamente o número de camadas escondidas e o número de neurónios. Contudo, apesar de não existir um paradigma ótimo, são encontrados na literatura diversos métodos que são utilizados para solucionar este problema.

De acordo com [82], existem quatro métodos para determinar o número de camadas escondidas e o número de neurónios: tentativa e erro, heurísticas, de busca exaustiva e algoritmos de *pruning and constructive*. Por exemplo em [83] o autor formulou um método heurístico para determinar o número de neurónios na camada escondida.

4.2 Método de carregamento baseado em redes neurais

Nesta secção é descrito detalhadamente o método de carregamento que se baseia na utilização de redes neurais para determinar a corrente de carregamento. Este método foi desenvolvido com o objetivo de identificar em tempo real o estado de vida atual das baterias e dessa maneira maximizar a transferência de energia. Deste modo, é possível adequar a corrente de carregamento relativamente ao estado de vida atual. Esta característica, quando comparada com os métodos existentes na literatura, evita a deterioração prematura das baterias e, conseqüentemente, aumenta o seu tempo de vida útil e maximiza a capacidade utilizável.

Deste modo, o método baseia-se na aplicação de redes neurais para estimar a corrente de carregamento que irá ser aplicada à bateria. Foi desenvolvida, portanto, uma rede neuronal com base numa arquitetura *Multilayer Perceptron*, composta por uma camada de entrada constituída por 3 entradas, uma camada escondida formada por 40 neurónios e uma camada de saída.

Como é ilustrado na Figura 4.2, a rede neuronal tem como entradas a tensão da bateria (V), a sua resistência interna (R) e a temperatura à superfície da bateria (T). A informação presente nas entradas irá fluir através da rede neuronal, camada por camada, até à camada de saída, formada apenas por um neurónio, que corresponde à corrente de carregamento (I). Tanto para a camada escondida como para a saída, foram estabelecidas como funções de ativação a função tangente hiperbólica.

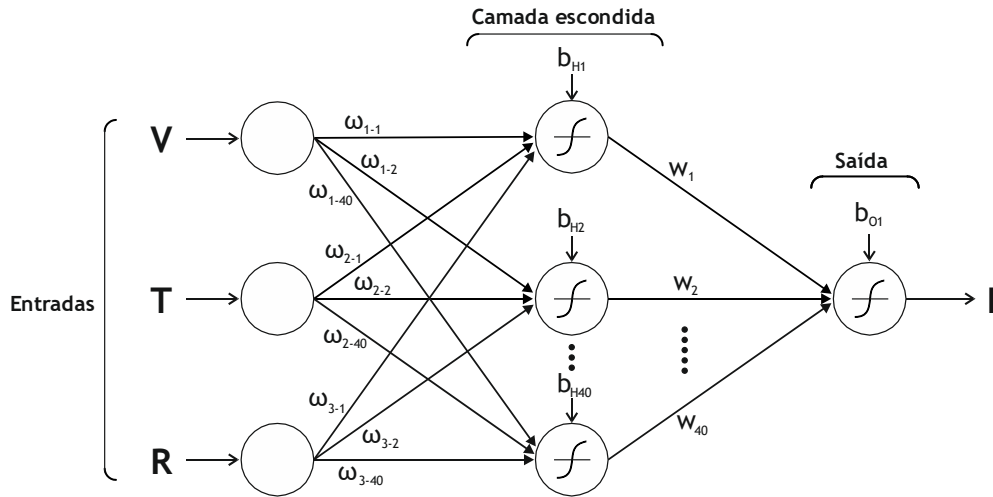


Figura 4.2 - Representação da rede neuronal *Multilayer Perceptron* implementada.

4.2.1 Método de treino da rede neuronal

Para o treino da rede neuronal foi utilizado o método de treino supervisionado *offline* com recurso ao algoritmo de otimização *Levenberg-Marquardt* para ajustar e otimizar os parâmetros da rede neuronal, *i.e.*, as *bias* dos neurónios e os pesos das suas conexões.

Deste modo, foi desenvolvido um conjunto de dados de treino que garantirá um valor de corrente ótimo para o estado atual em que se encontra a bateria e para as condições ambientais a que está exposta no momento do carregamento. O conjunto de dados de treino foi construído com base na análise da resistência interna da bateria, abordada no Capítulo 3. Os dados do conjunto de treino foram estabelecidos com o intuito de alcançar um equilíbrio entre o tempo de carregamento e o prolongamento da vida útil das baterias.

Como é ilustrado na Figura 4.3, a determinação do valor da corrente de carregamento é condicionada por três fatores: resistência interna da bateria, nível de tensão da bateria, e temperatura. Para melhor interpretar os dados do conjunto de treino são seguidas as seguintes pontos de raciocínio:

- Com o aumento dos valores dos parâmetros mencionados, o valor da corrente de carregamento diminui;
- Com o aumento do valor da resistência interna, independentemente dos restantes parâmetros, a corrente de carregamento irá sofrer uma diminuição com o objetivo de maximizar a eficiência e prevenir ainda mais a sua degradação;
- Com o aumento da temperatura, independentemente da resistência ou tensão da bateria, a corrente de carregamento diminui de forma a garantir o aumento do tempo de vida útil;
- Se a bateria se encontrar no início do carregamento, entre 3 V e 3.3 V, com valores de resistência menores que 0.1 Ω e sujeita a uma temperatura inferior a 40°C, é aplicado o

valor de corrente mais alto (2.5 A), que corresponde aos tons de cores mais quentes (vermelho);

- O valor da corrente irá diminuir ao longo do carregamento e a sua variação irá depender dos valores das entradas da rede. Este acontecimento pode ser facilmente interpretado de acordo com transição das cores mais quentes para as cores mais frias (azul);
- Quando a bateria se encontra no final do carregamento e apresenta um valor de tensão máximo (4.2 V), independentemente da sua temperatura ou resistência, o valor de corrente é mínimo (0 A);

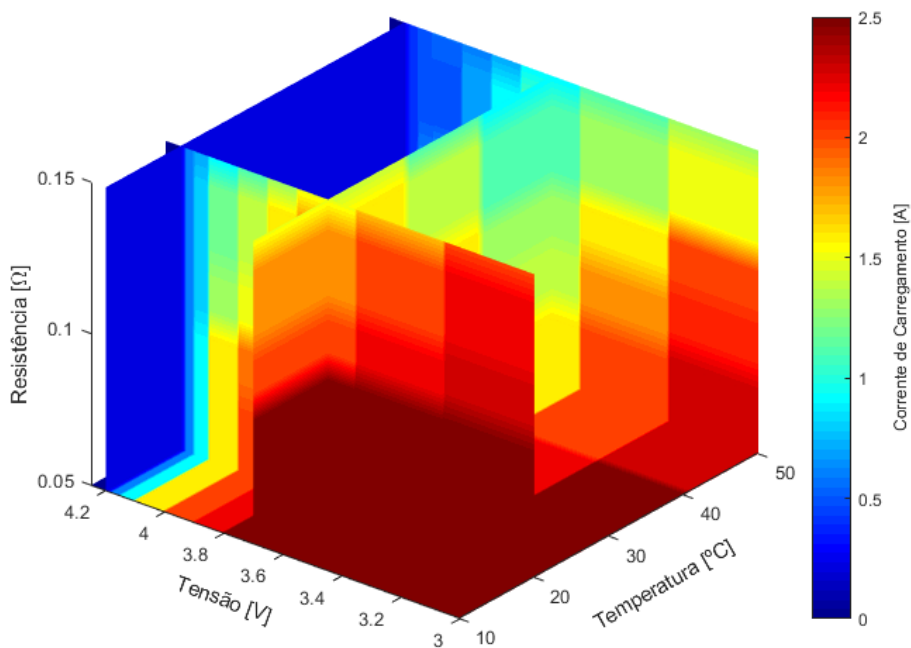


Figura 4.3 - Dados do conjunto de treino da rede neuronal.

A Figura 4.4 apresenta a corrente de carregamento aplicada na bateria durante o carregamento em função da tensão e da resistência interna, para diferentes valores de temperatura (20°C, 30°C, 40°C e 50°C). É possível verificar que quanto maior for a temperatura, mais baixa irá ser a corrente de carregamento. Este aspecto torna-se evidente a partir dos 3.3 V (bateria completamente descarregada). Caso o valor da resistência interna seja superior a 0.1 Ω (estado de saúde mais degradativo), e sujeita a altas temperaturas, a corrente de carregamento torna-se mais baixa para prevenir ainda mais a sua danificação e maximizar o processo de transferência de energia.

Analisando os gráficos da Figura 4.4, torna-se evidente uma diminuição gradual da corrente de carregamento para tensões superiores a 3.8 V. Outra característica importante é a diminuição da corrente de carregamento com o aumento da temperatura.

Esta característica provoca um aumento do tempo de carregamento, no entanto, garante uma utilização segura e evita a danificação prematura das baterias.

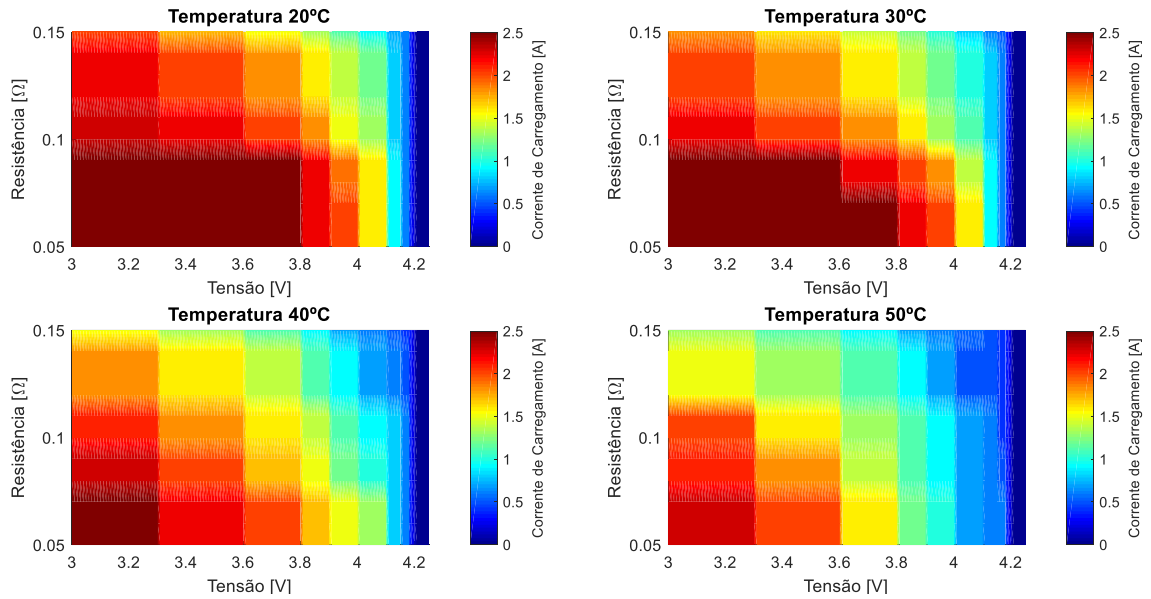


Figura 4.4 - Variação dos valores de corrente relativamente à tensão e à resistência, em diferentes temperaturas (20°C, 30°C, 40°C e 50°C).

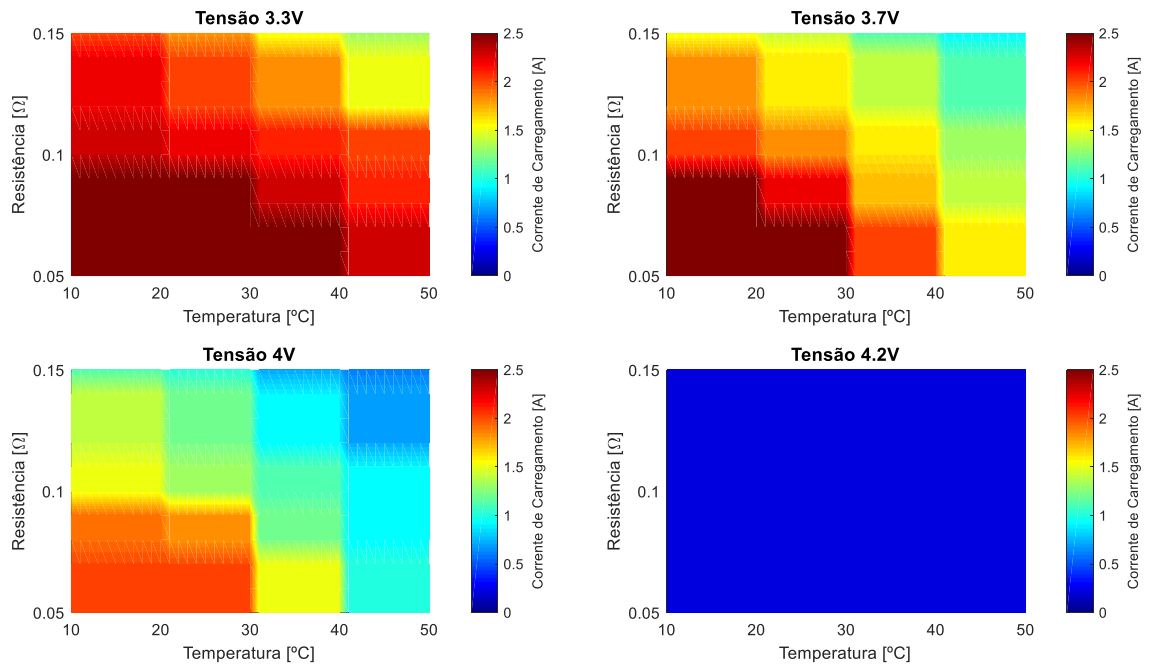


Figura 4.5 - Variação dos valores de corrente relativamente à temperatura e à resistência, em diferentes níveis de tensão (3.3 V, 3.7 V, 4 V e 4.2 V).

Já a Figura 4.5 ilustra os gráficos que correspondem à variação da corrente de carregamento em função da temperatura e da resistência interna da bateria, para diferentes níveis de tensão (3.3 V, 3.7 V, 4 V e 4.2 V). Verifica-se uma diminuição da corrente de carregamento com o aumento da resistência interna e da temperatura, independentemente da tensão da bateria. Assim que a tensão aos terminais da bateria atinge o valor de tensão máxima (4.2 V) é concluído o processo de carregamento, atribuindo o valor de corrente mínimo (0 A).

4.2.2 Software desenvolvido

O *software* implementado na unidade principal de controlo, desenvolvido em ambiente de programação *Matlab*®, é responsável pela leitura e medição da resistência interna e pela atribuição da corrente de carregamento através de uma rede neuronal. Já a unidade auxiliar de controlo é responsável pela medição dos valores de temperatura da bateria, através do algoritmo detalhado na secção 3.3. Este algoritmo foi desenvolvido no *Code Composer Studio* versão 7.4 da *Texas Instruments* em linguagem C.

O fluxograma ilustrado na Figura 4.6 apresenta o algoritmo implementado na unidade principal de controlo, que é composto por 4 funções principais: função configurações iniciais, função cálculo inicial da resistência, função requisição e cálculo da temperatura e função cálculo da resistência interna.

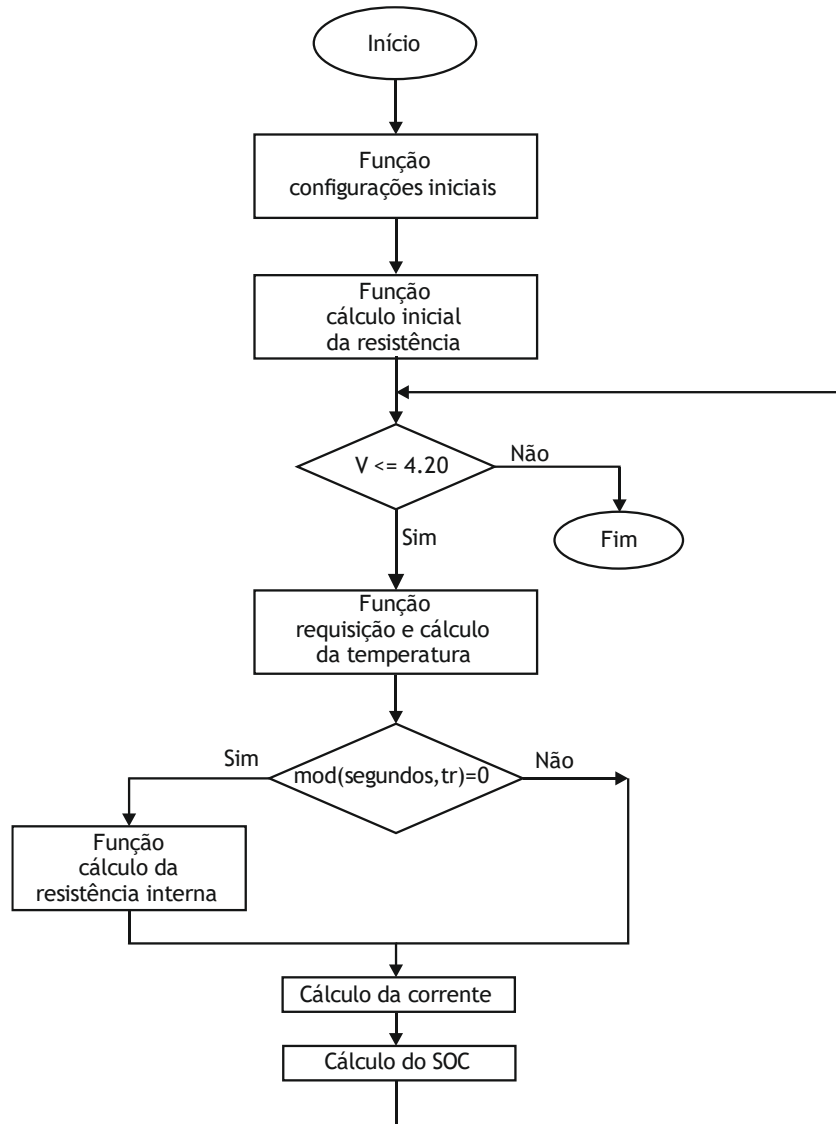


Figura 4.6 - Fluxograma do programa implementado na unidade principal de controle.

Primeiramente, o programa entra na função configurações iniciais onde são inicializadas todas as variáveis e é feita a configuração dos módulos de comunicação série assíncrono SCPI e SCI. De seguida é definido o tempo de amostragem da resistência interna da bateria e são estabelecidos os critérios para a perturbação da corrente de carregamento, onde é definida a amplitude da variação da corrente percentualmente, e a duração da perturbação (pt) em segundos, como está ilustrado na Figura 4.7.

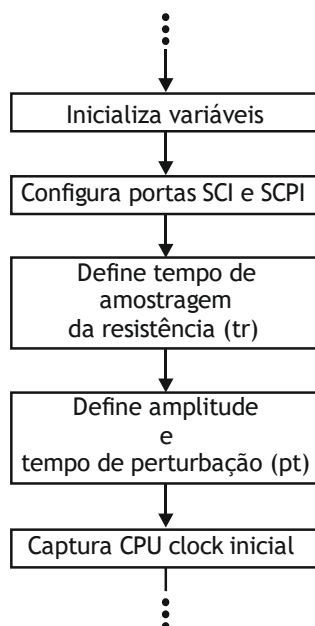


Figura 4.7 - Fluxograma da função configurações iniciais.

Após o estabelecimento das configurações iniciais, o programa comuta para a função cálculo inicial da resistência. Antes do início do carregamento, o algoritmo procede ao cálculo da resistência interna com a bateria em regime de relaxamento com o objetivo de identificar o estado de vida em que a bateria se encontra.

Tal como é observável na Figura 4.8, o algoritmo efetua a leitura da tensão da bateria e com base nesse valor determina a amplitude da corrente de perturbação. Concretamente, se a tensão aos terminais da bateria for inferior a 4 V é aplicado um pulso de corrente com uma amplitude de 1 A. No entanto, se a tensão aos terminais da bateria apresentar um valor entre 4 V e 4.2 V é aplicado um pulso de corrente com uma amplitude de 0.5 A. Por último, caso a tensão seja superior a 4.2 V entra no critério de paragem e o algoritmo é finalizado.

Para ambas as situações, a corrente é aplicada durante um período de tempo (pt) de 0.5 segundos, parâmetro estabelecido na função configurações iniciais. Após os 0.5 segundos é novamente lida a tensão da bateria e, a partir da lei de Ohm, exemplificada na equação (2.1), é calculada a resistência interna da bateria.

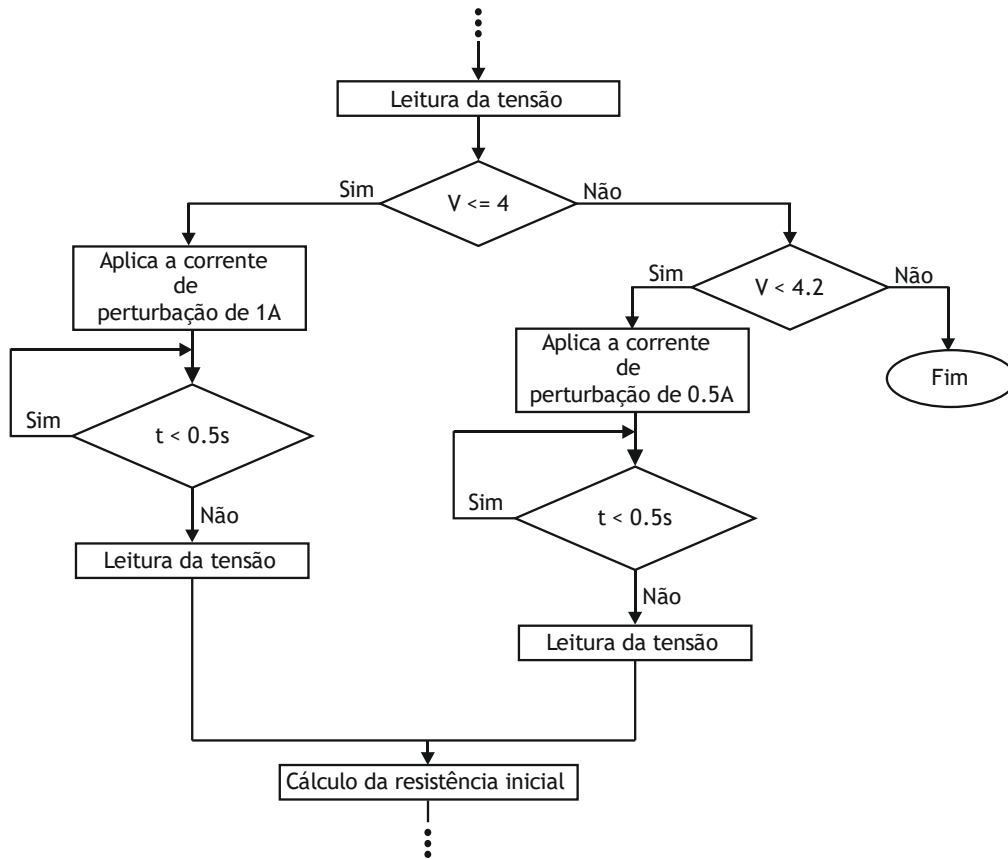


Figura 4.8 - Fluxograma da função cálculo inicial da resistência.

Caso o critério de paragem não se verifique o algoritmo entra em ciclo infinito e comuta para a função cálculo da temperatura.

Como está ilustrado na Figura 4.9, ao longo de todo o carregamento o algoritmo faz a aquisição do valor da temperatura e envia o byte de comando 01h à unidade auxiliar de controlo, aguardando depois pela sua resposta. Assim que é recebido o byte correspondente à temperatura da superfície da bateria, por parte da unidade auxiliar de controlo, o algoritmo efetuará o cálculo da temperatura extrapolando os valores com a equação *Steinhart-Hart*. Caso a temperatura calculada seja igual ou superior a 60°C, que são consideradas temperaturas de alto risco, o carregamento é interrompido por questões de segurança e o programa é dado por terminado.

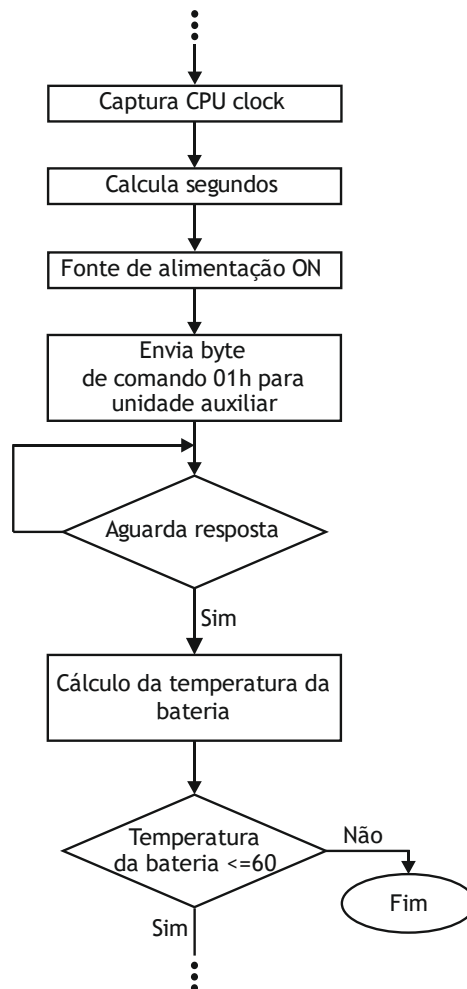


Figura 4.9 - Fluxograma da função requisição e cálculo da temperatura.

Assim que é executada a função requisição e cálculo da temperatura, o algoritmo comuta para a função cálculo da resistência interna depois de atingir o tempo de amostragem (t_r), imposto na função configurações iniciais (Figura 4.7). O tempo de amostragem imposto foi de 100 segundos, e durante todo o carregamento o algoritmo efetuará, num período cíclico de 100 segundos o cálculo da resistência da bateria.

Através da Figura 4.10 é possível verificar que o cálculo da resistência é feito primeiramente com a leitura da tensão da bateria nesse instante. Logo de seguida é perturbada a corrente de carregamento, variando a sua amplitude em 50% do valor da corrente que está a ser aplicada, durante um período de tempo (p_t) de 0.5 segundos, também estabelecido na função configurações iniciais. Depois de 0.5 segundos é novamente lida a tensão da bateria e, a partir da lei de Ohm, como está ilustrado na equação (2.1), é calculada a resistência da bateria, onde será depois restabelecida a amplitude inicial da corrente de carregamento.

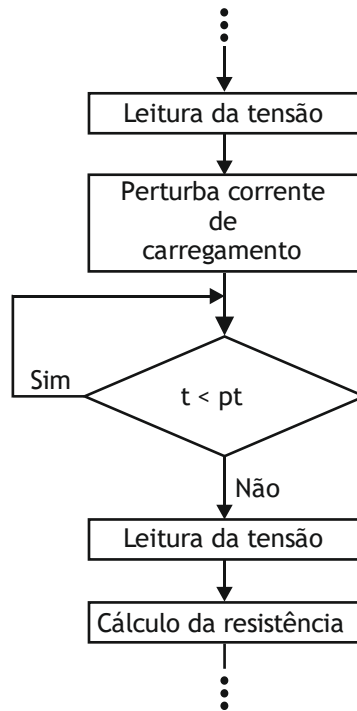


Figura 4.10 - Fluxograma da função cálculo da resistência.

Como é verificado no fluxograma principal (Figura 4.6) o cálculo da corrente de carregamento ótima é efetuado para as condições intrínsecas e extrínsecas da bateria, recorrendo à rede neuronal que foi desenvolvida.

Depois do valor da corrente de carregamento ser estipulado, o programa efetua o cálculo do valor do SOC da bateria nesse instante. O SOC é estimado pelo método de Coulomb tradicional, como é exemplificado na equação (4.3).

$$SOC(t) = SOC(t - 1) + \frac{I(t)}{C_n} \Delta t \quad (4.3)$$

Por fim, o algoritmo repetirá consecutivamente este procedimento ao longo de todo o carregamento, até que a bateria atinja os 4.2 V de tensão (critério de paragem).

4.3 Resultados experimentais

No seguimento do método de carregamento que foi desenvolvido com base nas redes neurais, serão apresentados os resultados experimentais dos ensaios realizados, ou seja, dos carregamentos que foram efetuados. Para testar o algoritmo implementado foram novamente utilizadas as baterias de Li-ion SAMSUNG ICR18650-26H 2600mAh com reduzido número de ciclos de vida [64] e as baterias SANYO UR18650F-SCUD-3 com elevado número de ciclos de vida [65], que correspondem ao primeiro e segundo casos de estudo, respetivamente.

Os carregamentos foram realizados nas mesmas condições para ambos os casos, diferenciando-se apenas no nível de envelhecimento das baterias.

4.3.1 Caso 1 - Bateria com reduzido número de ciclos

A Figura 4.11 ilustra o perfil da corrente de carregamento e os parâmetros que condicionam o seu valor, durante um carregamento completo da bateria para o caso de estudo 1. Através da Figura 4.11(a) é possível observar o perfil de corrente de carregamento aplicado à bateria. O algoritmo ajusta em tempo real a corrente de carregamento em função da resistência interna e da temperatura, Figuras 4.11(b) e (c) respectivamente, com o intuito de maximizar o tempo de vida útil e a eficiência.

No início do carregamento, como a bateria se encontrava completamente descarregada e revelou ter uma resistência interna de 76 m Ω e uma temperatura de 25°C, foi aplicada uma corrente de 2.5 A. Porém, a corrente começa a diminuir progressivamente logo após o início do carregamento. Este comportamento deve-se fundamentalmente ao aumento da tensão da bateria.

Analisando a Figura 4.11(c) é possível constatar o excelente comportamento do algoritmo proposto em termos de variação de temperatura, apresentando uma variação máxima apenas de 3°C. De seguida, devido à diminuição do valor da corrente, a temperatura vai diminuindo progressivamente até atingir o valor de temperatura inicial.

Através da Figura 4.11(a) é possível constatar algumas perturbações quase instantâneas no perfil da corrente. Esta característica diz respeito à perturbação da corrente para o cálculo da resistência interna, uma vez que não existe sincronismo entre a aquisição dos valores pelo *datalogger* e o cálculo da resistência interna.

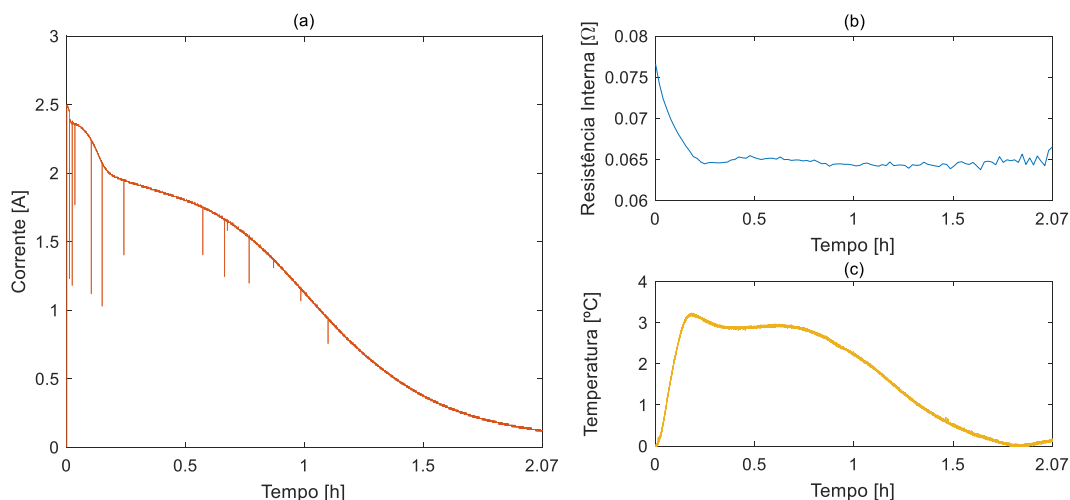


Figura 4.11 - Parâmetros do carregamento; (a) Perfil de corrente; (b) Resistência interna e (c) Variação da temperatura da bateria.

Na Figura 4.12 é ilustrado o perfil da tensão da bateria durante o processo de carregamento. A partir da sua análise é possível observar o aumento mais acentuado da tensão da bateria até aproximadamente 3.9 V, pois foram aplicadas à bateria correntes iguais ou superiores a 2 A. A partir desse momento o comportamento da tensão da bateria estabiliza e aumenta gradualmente até alcançar o nível de tensão máximo (4.2 V). Este valor de tensão corresponde ao critério de paragem do processo de carregamento e pode ser visualizado a partir da imagem ampliada do final do carregamento.

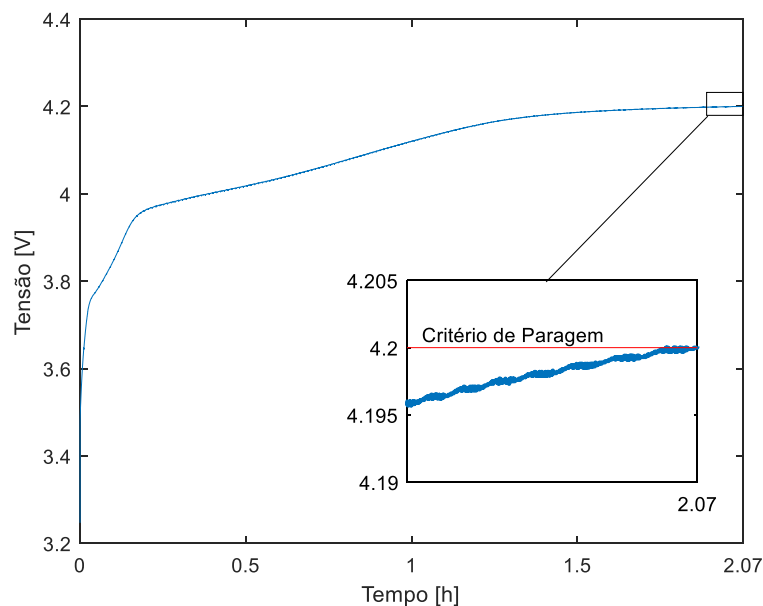


Figura 4.12 - Perfil de tensão da bateria com reduzido número de ciclos (Caso 1).

A Figura 4.13 apresenta os dados relativos ao estado de carga da bateria durante o carregamento efetuado. A Figura 4.13(a) ilustra a evolução do SOC ao longo do carregamento, onde é possível verificar que a bateria foi completamente carregada e foi armazenada uma carga correspondente a 99% da capacidade total da bateria. Já a Figura 4.13(b) mostra a tensão da bateria em função do SOC, onde é possível verificar o excelente desempenho do algoritmo utilizado para estimar o SOC.

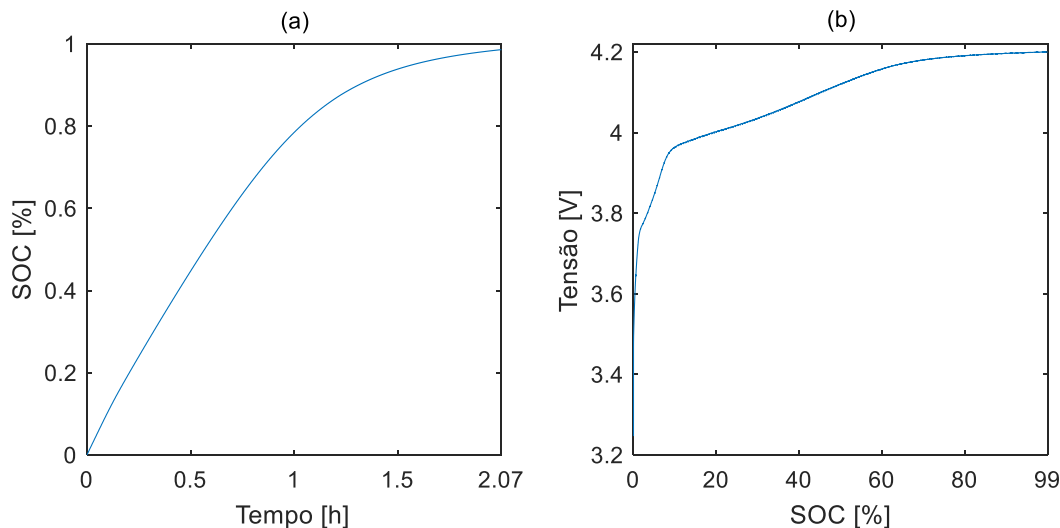


Figura 4.13 - (a) Perfil do SOC estimado e (b) Tensão em função do SOC ao longo do carregamento.

4.3.2 Caso 2 - Bateria com elevado número de ciclos

A Figura 4.14 exibe o perfil da corrente de carregamento e os parâmetros que resultam da sua determinação, ao longo de um carregamento completo da bateria com elevado número de ciclos. Observando o Figura 4.14(a) é possível verificar uma diminuição bastante acentuada do valor da corrente no início do carregamento, transitando de uma intensidade de 2.2 A para 1.3 A. Este acontecimento é causado pelo valor da resistência interna (115 mΩ) que a bateria apresenta, indicando ser uma bateria com elevado número de ciclos, como é demonstrado no Figura 4.14(b).

Como se trata de uma bateria envelhecida é fundamental a sua conservação e o aumento do seu desempenho. Por este motivo, o algoritmo de carregamento aplica correntes mais baixas, comparativamente com as correntes aplicadas no Caso 1, com o intuito de evitar ao máximo a degradação da bateria e melhorar a eficiência do carregamento.

Esta característica de carregamento é evidente com base na análise do Figura 4.14(c). Com uma temperatura inicial de 25°C, a bateria aqueceu 2.2°C depois uma hora de carregamento, atingindo a temperatura máxima nesse instante. De seguida, devido à diminuição do valor da corrente, a temperatura diminuiu progressivamente até atingir o valor final de cerca de 26.5°C.

Tal como foi anteriormente referido no caso de estudo 1, também neste caso de estudo são evidentes, embora em menor número, as perturbações da corrente de carregamento para a medição da resistência interna da bateria

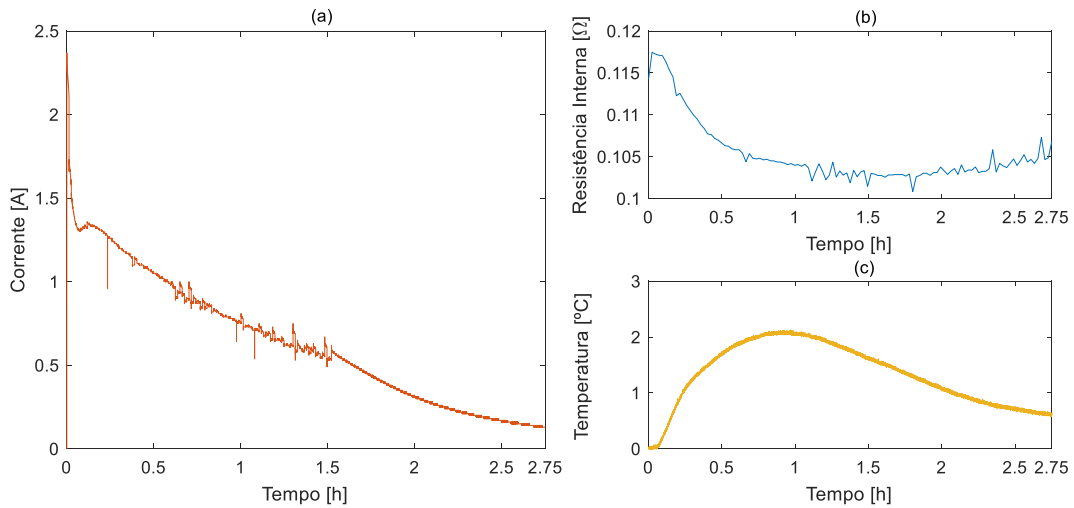


Figura 4.14 - Parâmetros do carregamento; (a) Perfil de corrente; (b) Resistência interna e (c) Variação da temperatura da bateria.

A Figura 4.15 apresenta, para este segundo caso de estudo, o comportamento da tensão ao longo do carregamento. Observando o início do carregamento é possível constatar-se um aumento acentuado da tensão da bateria, passando dos 3.3 V para quase 3.9 V. Este fenómeno, tal como foi mencionado anteriormente, é devido ao facto da bateria possuir uma resistência interna elevada, provocando uma maior variação da tensão no momento em que a corrente é aplicada à bateria. Como foi aplicada uma corrente mais alta (2.2 A), a tensão elevou-se de forma abrupta e, por esta razão, o algoritmo reduziu o valor da corrente aplicada à bateria.

Como é possível visualizar na imagem ampliada da Figura 4.15, também neste caso de estudo o critério de paragem do carregamento foi estabelecido no momento em que a tensão da bateria atinge os 4.2 V.

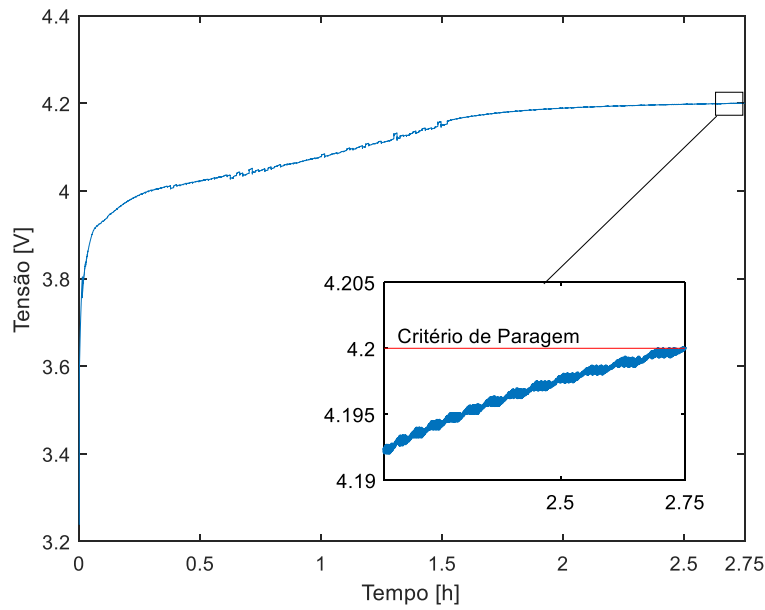


Figura 4.15 - Perfil de tensão da bateria com elevado número de ciclos (Caso 2).

A Figura 4.16 ilustra os dados relativos ao estado de carga da bateria durante o carregamento efetuado. Através da análise do Figura 4.16(a), que ilustra o perfil do SOC estimado, é possível constatar o grau de degradação da capacidade da bateria, pois foi apenas armazenada uma carga correspondente a 69% da capacidade total da bateria. Já a Figura 4.16(b) demonstra a correspondência do valor de tensão máximo (4.2 V) com o valor total do SOC, comprovando-se uma vez mais que a estimativa do SOC foi feita corretamente.

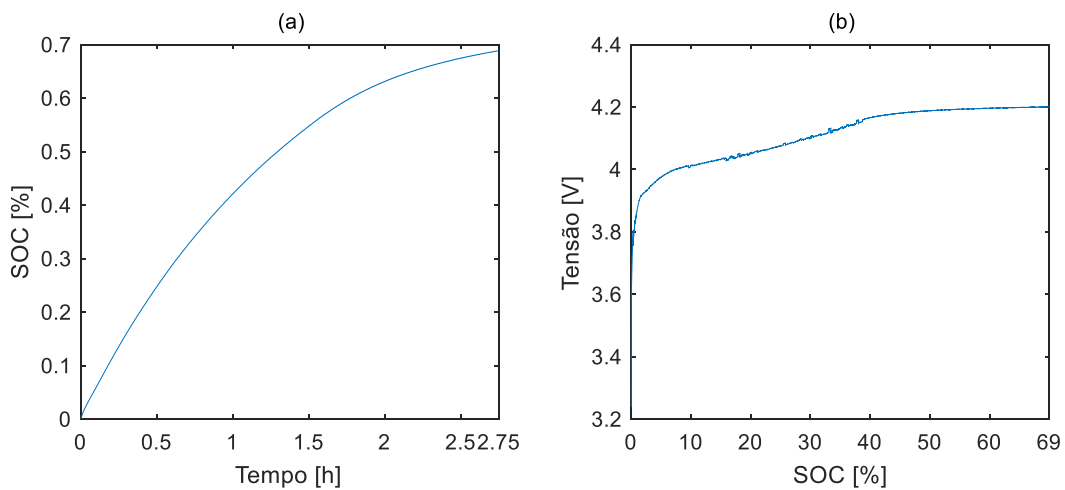


Figura 4.16 - (a) Perfil do SOC estimado e (b) Tensão em função do SOC ao longo do carregamento.

4.3.3 Análise da eficiência do método desenvolvido

Para fins de comparação e para verificar a eficiência do método de carregamento baseado nas redes neurais, descrito ao longo deste capítulo, foi implementado o método tradicional de carregamento *multistage*. Como está explícito no Capítulo 2, o método de carregamento *multistage* é o que apresenta melhor relação entre eficiência, tempo de carregamento e prolongamento dos ciclos de vida, dentro dos métodos mais populares existentes na literatura.

Deste modo, foram estabelecidas as mesmas condições de carregamento (condições iniciais e critérios de paragem) e foram novamente utilizadas as baterias de Li-ion SAMSUNG ICR18650-26H 2600mAh com reduzido número de ciclos de vida [64] e as baterias SANYO UR18650F-SCUD-3 com elevado número de ciclos de vida [65], que correspondem novamente ao primeiro e segundo casos de estudo, respetivamente.

O algoritmo *multistage* desenvolvido contém cinco estágios de corrente, com valores de corrente de carregamento de 2.5 A, 1.5 A, 0.8 A, 0.4 A e 0.2 A. em que o critério de transição entre cada estágio de corrente ocorre quando a bateria atinge os 4.2 V, como é tipicamente encontrado na literatura.

- **Caso 1 - Bateria com reduzido número de ciclos**

Na Figura 4.17 são apresentados o perfil da corrente de carregamento da bateria com reduzido número de ciclos e a variação da temperatura da sua superfície durante o carregamento. Analisando o perfil da corrente no Figura 4.17(a), podem-se identificar os cinco estágios de corrente que foram impostos na implementação do algoritmo *multistage*. É possível observar-se que a bateria foi carregada durante mais tempo no primeiro e no último estágio de corrente. Este comportamento ocorreu porque a corrente inicial carregou a bateria desde que esta estava completamente descarregada até ser alcançado o primeiro critério de transição. Já o último estágio de corrente, que também é prolongado, deveu-se ao baixo valor de corrente aplicado à bateria (0.2 A).

A bateria ao ser carregada inicialmente com a corrente mais alta (2.5 A), provocou um aumento significativo na variação da temperatura da bateria. Analisando a Figura 4.17(b) constata-se uma variação da temperatura de 6.61 °C, atingindo o seu máximo no momento de transição para o segundo estágio.

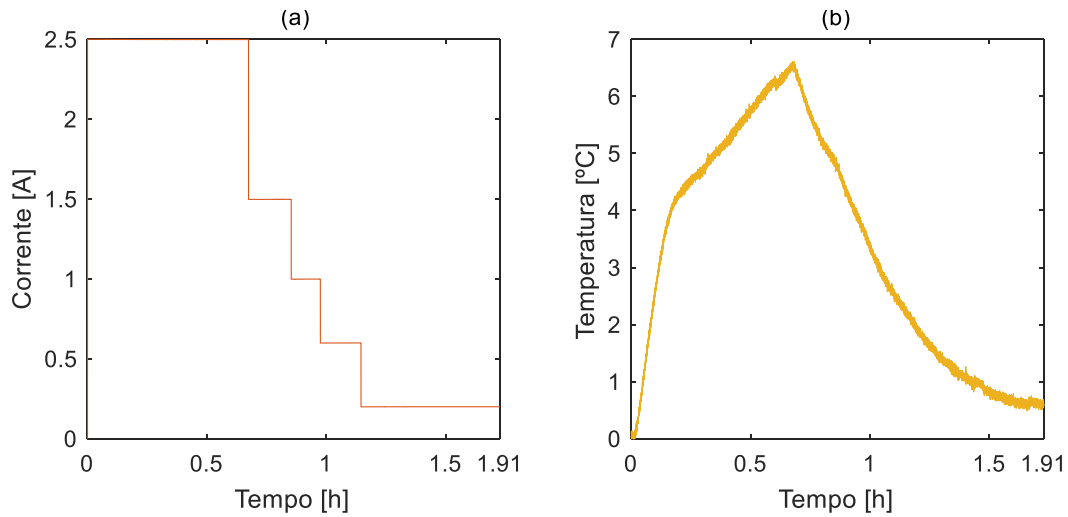


Figura 4.17 - (*Multistage*) Perfil da corrente de carregamento (a) e variação da temperatura da bateria durante o carregamento (b).

Na Figura 4.18 está ilustrado o perfil da tensão durante o carregamento efetuado para o primeiro caso de estudo. A partir da sua análise são perceptíveis os momentos em que o algoritmo transita entre os estágios de corrente. Após cerca de 40 minutos, depois do início do carregamento, quando a bateria atingiu primeiramente os 4.2 V, ocorreu uma transição para o seguinte estágio de corrente (1.5 A). Este procedimento repetiu-se até alcançar o quinto estágio de corrente (0.2 A), terminando o carregamento. Através da imagem ampliada da Figura 4.18, é evidente o momento em que a bateria atinge pela quinta vez o valor de tensão de 4.2 V e termina o carregamento.

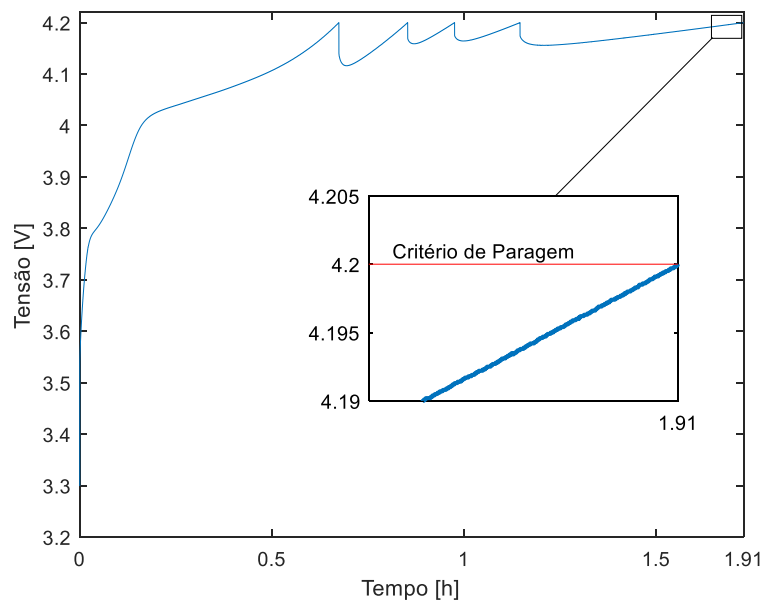


Figura 4.18 - (*Multistage*) Perfil de tensão da bateria com reduzido número de ciclos (Caso 1).

A Figura 4.19 mostra a informação relativa ao estado de carga da bateria durante o carregamento efetuado. Como é visível no Figura 4.19(a) que ilustra o perfil do SOC, verifica-se que a bateria foi completamente carregada e foi armazenada uma carga correspondente a 97% da capacidade total da bateria. Já a Figura 4.19(b) mostra a tensão da bateria em função do SOC verificando-se o excelente desempenho do algoritmo utilizado para estimar o SOC.

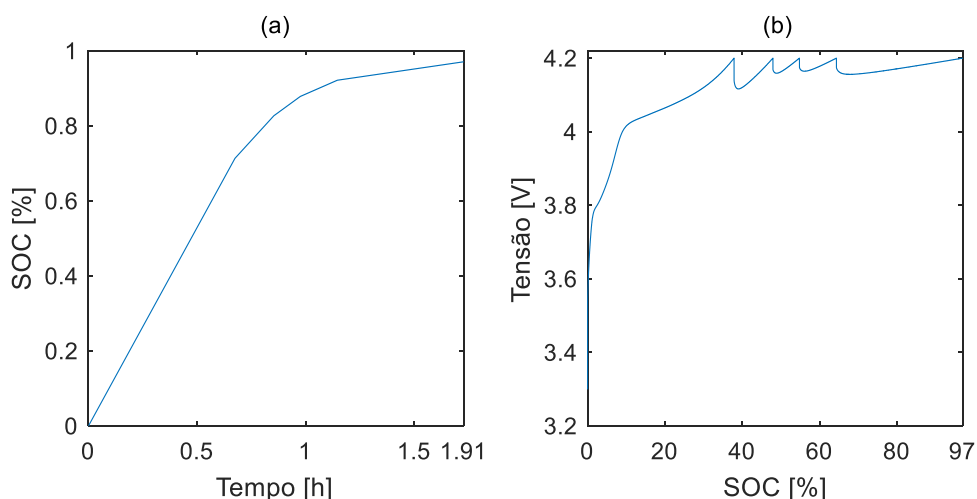


Figura 4.19 - (*Multistage*) (a) Perfil do SOC estimado e (b) Tensão em função do SOC ao longo do carregamento.

Para efeitos comparativos, a Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos do carregamento efetuado com o algoritmo *multistage* e com o algoritmo baseado nas redes neurais. Os resultados ilustrados correspondem a três parâmetros essenciais num carregamento, *i.e.*, aumento da temperatura, maximização da transferência de energia e tempo de carregamento.

Tabela 4.1 - Análise comparativa das características principais de carregamento entre o algoritmo *multistage* e o algoritmo com base nas redes neurais (Caso 1).

Parâmetros	Aumento da temperatura	Maximização da transferência de energia	Tempo de Carregamento
Algoritmo <i>Multistage</i>	6.61°C	97%	1.91h
Algoritmo baseado em redes neurais	3.26°C	99%	2.07h

Através da análise da Tabela 4.1 é possível deduzir que, numa abordagem geral, o algoritmo proposto apresenta melhores resultados que o algoritmo *multistage*. O algoritmo baseado em redes neuronais revela uma redução da temperatura de 49.3%, comparativamente ao método *multistage*. Para além disso manifesta também um aumento de 2% na capacidade de armazenamento, resultante de um melhoramento da eficiência de carregamento, garantindo um pouco mais de autonomia e qualidade de carregamento.

Por se focalizar maioritariamente na conservação do estado das baterias, o algoritmo baseado nas redes neuronais revela maior tempo de carregamento. Apesar de apresentar um aumento de 7.7%, o tempo de carregamento é pouco significativo, menos de 10 minutos, assegurando condições de operação ideais para um perfeito funcionamento das baterias.

- **Caso 2 - Bateria com elevado número de ciclos.**

Para o segundo caso de estudo, a Figura 4.17 apresenta o perfil da corrente de carregamento da bateria com elevado número de ciclos e a variação da temperatura da sua superfície durante o carregamento. Como é possível observar no Figura 4.17(a), o carregamento foi igualmente realizado com a imposição dos cinco estágios de corrente.

Comparativamente ao primeiro caso de estudo, verifica-se que o processo de carregamento da bateria transitou do primeiro estágio de corrente para o segundo num menor intervalo de tempo. Este comportamento deve-se fundamentalmente ao elevado valor da resistência interna da bateria que, ao aplicar a corrente máxima de carregamento (2.5 A), provocou uma maior variação na tensão. Este comportamento repetiu-se durante os 4 estágios de corrente e, por este motivo, a bateria esteve sujeita ao último estágio de corrente de carregamento (0.2 A) durante mais de metade do tempo de carregamento.

Como a bateria foi carregada inicialmente com a corrente mais alta (2.5 A), ocorreu um aumento na variação da temperatura da bateria. Ao analisar o Figura 4.17(b) constata-se um aumento da temperatura de 5.3°C, atingindo novamente o seu máximo no momento de transição para o segundo estágio. Quando o algoritmo transita do primeiro estágio de corrente, a temperatura da bateria vai diminuindo progressivamente até atingir o valor perto da temperatura do início do carregamento.

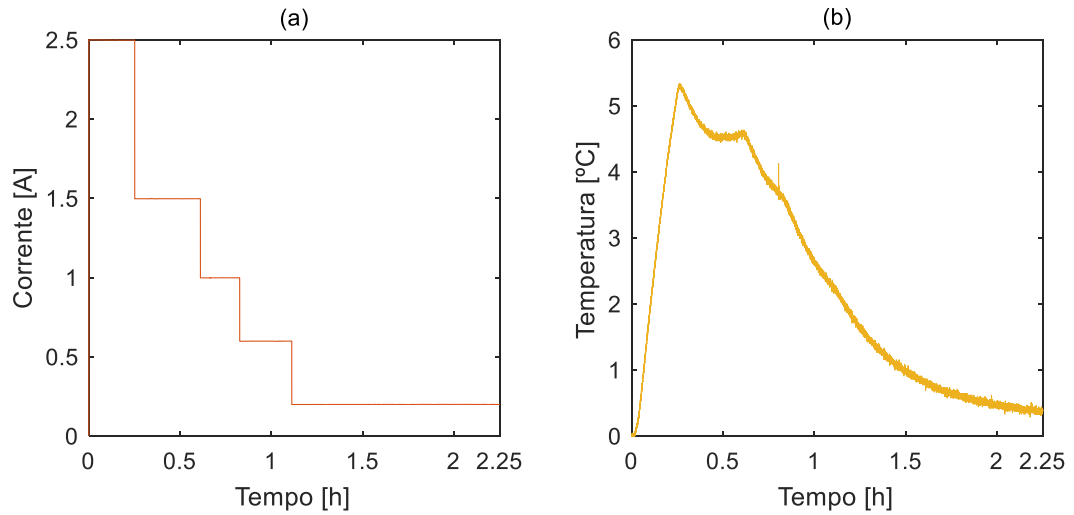


Figura 4.20 - (*Multistage*) Perfil da corrente de carregamento (a) e variação da temperatura da bateria durante o carregamento (b).

Através da análise Figura 4.21 é perceptível o aumento bastante acentuado da tensão da bateria com a aplicação da corrente máxima no início do carregamento. Tal como foi verificado no perfil de corrente, a bateria atinge os critérios de transição (4.2 V) muito rapidamente, quando comparado com o primeiro caso de estudo. O algoritmo termina o carregamento quando a bateria atinge, no quinto estágio de corrente, o critério de paragem (4.2 V), como é possível visualizar-se na figura ampliada.

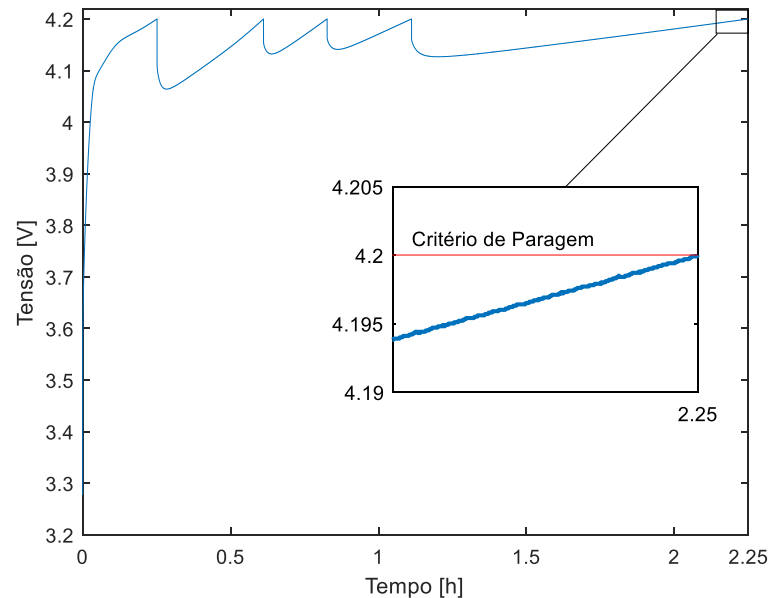


Figura 4.21 - (*Multistage*) Perfil de tensão da bateria com reduzido número de ciclos (Caso 2).

Na Figura 4.22 são novamente apresentados os dados relativos ao estado de carga da bateria. Analisando o perfil do SOC no Figura 4.22(a), é possível verificar-se o estado da bateria e a degradação da sua capacidade, pois foi armazenada uma carga apenas de 65% da sua capacidade total. Pela Figura 4.22(b) é possível verificar-se novamente que a estimação do SOC pelo algoritmo utilizado foi feito corretamente.

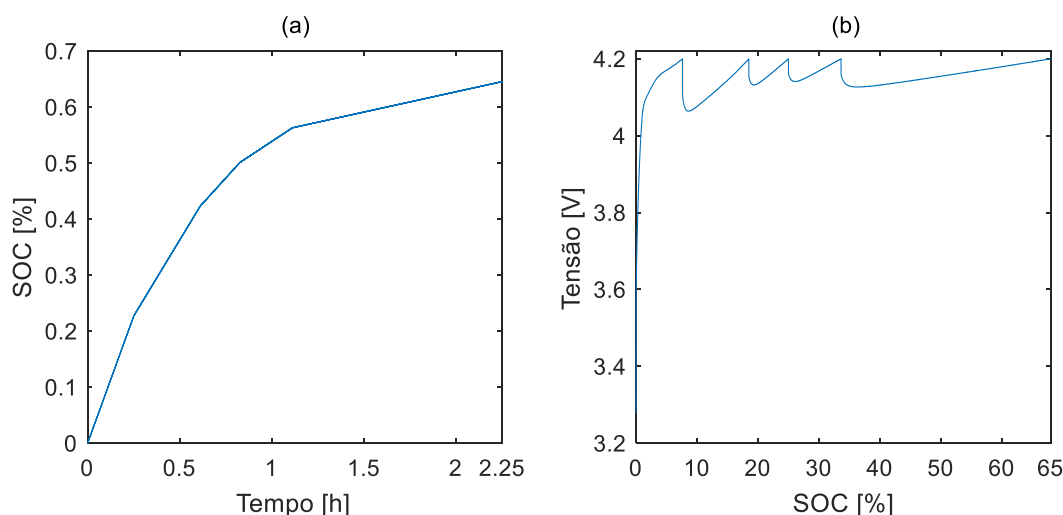


Figura 4.22 - (*Multistage*) (a) Perfil do SOC estimado e (b) Tensão em função do SOC ao longo do carregamento.

Por fim, para apurar igualmente os resultados obtidos da implementação dos dois algoritmos no segundo caso de estudo, a Tabela 4.2 ilustra os dados de três parâmetros essenciais num carregamento, *i.e.*, aumento da temperatura, maximização da transferência de energia e tempo de carregamento.

Tabela 4.2 - Análise comparativa das características principais de carregamento entre o algoritmo *multistage* e o algoritmo com base nas redes neurais (Caso 2).

Parâmetros	Aumento da temperatura	Maximização da transferência de energia	Tempo de Carregamento
Algoritmo <i>Multistage</i>	5.34°C	65%	2.25h
Algoritmo baseado em redes neurais	2.16°C	69%	2.75h

No algoritmo proposto, o critério de conservação e prevenção do estado de vida útil da bateria torna-se ainda mais relevante quando se trata de uma bateria com elevado número de ciclos. Deste modo, se o algoritmo detetar uma resistência interna elevada procede à minimização do desgaste da bateria e, por este motivo, o algoritmo baseado nas redes neurais revela uma redução da temperatura de 59.55% e um aumento da capacidade de armazenamento de 4% quando comparado com o método *multistage*. Contudo, o algoritmo proposto apresenta um aumento de 18.2% no tempo de carregamento, que corresponde a 30 minutos de carregamento.

Capítulo 5

Neste capítulo são enunciadas as conclusões resultantes de todo o trabalho demonstrado neste documento. Para além disso são também apresentadas e sugeridas propostas de trabalhos futuros em contexto do trabalho desenvolvido.

Conclusão

5.1 Considerações finais

As baterias Li-ion são certamente a tecnologia de armazenamento de energia elétrica que revela maior tendência de crescimento por transparecer enormes potencialidades na sua aplicação. Esta afirmação é facilmente comprovada pelo domínio evidente das baterias Li-ion na sua recente aplicação no armazenamento de energia proveniente da produção de origem renovável, no sector dos veículos elétricos/híbridos e nos dispositivos portáteis. Contudo, existem ainda advertências que condicionam o desempenho e a eficiência das baterias Li-ion que, poderá conduzir à sua degradação precoce.

A grande maioria das publicações que envolve métodos de carregamento de baterias de Li-ion têm apenas em conta a temperatura e o SOC, não tendo em consideração o seu estado de vida atual. Isto significa que os carregamentos são efetuados nas mesmas condições, independentemente do número de ciclos que a bateria já efetuou. Esta particularidade é fundamental porque as propriedades eletroquímicas da bateria sofrem alterações ao longo do tempo e isso traduzir-se-á numa mudança do seu comportamento durante um carregamento e/ou descarregamento.

No ponto de vista do autor deste trabalho, é pouco consensual realizarem-se carregamentos idênticos para baterias que apresentam diferentes níveis de envelhecimento, pois uma bateria com elevado número de ciclos tende a aquecer mais rapidamente, podendo causar riscos na segurança do sistema, já não dispõe da mesma capacidade de armazenamento e da mesma eficiência de transferência de energia. Assim sendo, o objetivo da presente dissertação consiste precisamente no desenvolvimento de um método de carregamento que garanta a conservação das baterias, sendo o principal critério o estado de vida útil das baterias, juntamente com a temperatura e o SOC.

Sendo a resistência interna o indicador e o elemento chave para a determinação do estado de vida das baterias, revelou-se fundamental a sua determinação quando as baterias

se encontravam em regime de relaxamento e em regime de carregamento, de forma a garantir uma determinação exata e autêntica da resistência interna. Foi utilizado, portanto, o método de pulsos DC por se tratar de um método bastante simples e prático de implementar e que não necessita de equipamento dispendioso. Embora seja considerado um método pouco preciso, revelou-se bastante eficaz para o propósito que lhe foi atribuído, pois foi possível analisar e avaliar o comportamento da resistência interna das baterias de maneira a que fosse possível identificar o seu estado, como foi demonstrado no Capítulo 3.

A partir das análises efetuadas é possível concluir que a resistência interna de uma bateria aumenta com maiores ciclos de vida. Além disso, foi também concluído que quanto maior for a corrente aplicada à bateria, mais rapidamente ocorre a transferência de energia no seu interior. Este efeito provocará um aumento da temperatura da bateria e, conseqüentemente, irá provocar uma diminuição do valor da resistência interna. No entanto, o aumento da temperatura, seja por aplicação de uma corrente ou pelas condições ambientais, causa uma aceleração das reações eletroquímicas que ocorrem no interior da bateria que irá facilitar a transferência de energia e resultará numa diminuição da resistência interna. Contudo, a falsa sensação de melhoramento do processo de carregamento com a diminuição da resistência interna da bateria, devido ao aumento da temperatura, traduz-se, na realidade, na danificação prematura da bateria e no aumento do risco de segurança, pois a temperatura é considerada um dos maiores causadores de desgaste e envelhecimento das baterias Li-ion.

Depois de determinar eficazmente a resistência interna das baterias e analisar o seu comportamento, foi possível desenvolver-se o método de carregamento com base em redes neuronais. Para avaliar a eficiência do método de carregamento proposto foi utilizado, para questões comparativas, o método *multistage* por possuir, tal como foi explicado no Capítulo 2, a melhor relação entre eficiência, tempo de carregamento e prolongamento dos ciclos de vida.

Como o método de carregamento proposto foi concebido para maximizar a transferência de energia e prevenir o agravamento do estado das baterias, prolongando o seu tempo de vida-útil, os resultados permitem concluir que este algoritmo alcançou um excelente desempenho.

No entanto, apesar de apresentar maior tempo de carregamento, comparativamente ao método *multistage*, o método proposto desempenhou a sua função de forma eficiente e espetável, pois a variação da temperatura, proveniente do aquecimento da bateria, foi reduzida até mais de 50% na bateria com elevados ciclos.

Além disso, o método proposto demonstrou ter capacidade de identificar o estado de vida da bateria e quanto maior for o número de ciclos de uma bateria, *i.e.*, apresentar uma maior resistência interna, este irá efetuar o carregamento para minimizar ainda mais a sua degradação, otimizando o processo de carregamento. Deste modo, são aplicadas correntes mais baixas, o que irá resultar, evidentemente, num carregamento mais prolongado. Isto

prova a versatilidade que o algoritmo possui, pois o carregamento adapta-se para as condições que a bateria se encontra.

O autor deste trabalho considera que o método de carregamento aqui proposto revelou ter qualidades e competências excepcionais. A aplicação de redes neurais associado à identificação do estado de vida das baterias, a partir da leitura da sua resistência interna, revela ter uma enorme potencialidade no âmbito do processo de carregamento de baterias Li-ion. Para além de estar direcionado para a minimização da degradação das baterias, o método de carregamento aqui proposto viabiliza também a possibilidade de desenvolvimento de modos de utilização, como por exemplo um carregamento mais rápido, consoante a preferência do utilizador. Deste modo, o método proposto demonstrou ter capacidade para otimizar o processo de carregamento e dá evidências de ser possível tornar-se ainda versátil e adaptar-se a todo o tipo de preferências e condições.

Por último é possível concluir que o desenvolvimento e a otimização do processo de carregamento de baterias Li-ion é fundamental para garantir uma eficiência e um desempenho adequado para o armazenamento e fornecimento de energia elétrica com qualidade e segurança.

5.2 Trabalhos futuros

Durante a realização deste trabalho foram sendo identificadas questões que poderiam introduzir oportunidades de estudo com interesse para os resultados finais. Deste modo é apresentado um conjunto de ideias e direções de investigação que poderão ser desenvolvidos com o intuito de otimizar e melhorar o método proposto nesta dissertação:

- Otimizar o método de carregamento desenvolvido na presente dissertação com o propósito de reduzir a sua complexidade e encontrar soluções ainda mais precisas;
- Potencializar o método de carregamento com a inclusão de modos de carregamento e permitir que o utilizador escolha o método de carregamento mais adequado, isto é, privilegiando o tempo de carregamento ou privilegiando a mitigação da degradação das baterias.
- Integrar o algoritmo desenvolvido em *packs* de baterias com a incorporação de metodologias de balanceamento.

Referências bibliográficas

- [1] International Energy Agency, *Energy Technology Perspectives 2017*. 2017.
- [2] International Renewable Energy Agency (IRENA), *Global Energy Transformation - A roadmap to 2050*, 2018th ed. Abu Dhabi: IRENA, 2018.
- [3] IRENA, *REmap: RoadMap for a Renewable Energy Future*, 2016th ed. Abu Dhabi: IRENA, 2016.
- [4] International Energy Agency, “World Energy Outlook 2016,” Paris, 2016.
- [5] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, “Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation,” *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 511-536, 2015.
- [6] C. K. Das, O. Bass, G. Kothapalli, T. S. Mahmoud, and D. Habibi, “Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 91, no. March, pp. 1205-1230, 2018.
- [7] M. C. Argyrou, P. Christodoulides, and S. A. Kalogirou, “Energy storage for electricity generation and related processes: Technologies appraisal and grid scale applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 94, no. June, pp. 804-821, 2018.
- [8] C. Christiansen and B. Murray, “Energy storage study,” *Energy Post*, p. 130, 2015.
- [9] International Renewable Energy Agency (IRENA), “Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030,” */publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets*, no. October, p. 132, 2017.
- [10] International Renewable Energy Agency (IRENA), *REthinking Energy*. 2017.
- [11] C. B. Manish Ram, Dmitrii Bogdanov, Arman Aghahosseini, Solomon Oyewo, Ashish Gulagi, Michael Child, “Global Energy System based on 100% Renewable Energy - Power Sector,” no. October 2018, 2017.
- [12] M. A. Hannan, M. S. H. Lipu, A. Hussain, and A. Mohamed, “A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, no. August 2016, pp. 834-854, 2017.
- [13] Y. Gao, J. Jiang, C. Zhang, W. Zhang, Z. Ma, and Y. Jiang, “Lithium-ion battery aging mechanisms and life model under different charging stresses,” *J. Power Sources*, vol. 356, pp. 103-114, 2017.
- [14] A. B. Khan and W. Choi, “Optimal Charge Pattern for the High-Performance Multistage Constant Current Charge Method for the Li-Ion Batteries,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 33, no. 3, pp. 1132-1140, 2018.

- [15] G. Zubi, R. Dufo-López, M. Carvalho, and G. Pasaoglu, "The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 89, no. April 2017, pp. 292-308, 2018.
- [16] C. Zhang, J. Jiang, Y. Gao, W. Zhang, Q. Liu, and X. Hu, "Charging optimization in lithium-ion batteries based on temperature rise and charge time," *Appl. Energy*, vol. 194, no. 7 SUPPL. 2, pp. 569-577, May 2017.
- [17] T. Grandjean *et al.*, "Accelerated Internal Resistance Measurements of Lithium-Ion Cells to Support Future End-of-Life Strategies for Electric Vehicles," *Batteries*, vol. 4, no. 4, p. 49, 2018.
- [18] H. G. Schweiger *et al.*, "Comparison of several methods for determining the internal resistance of lithium ion cells," *Sensors*, vol. 10, no. 6, pp. 5604-5625, 2010.
- [19] D. I. Stroe, M. Swierczynski, S. K. Kær, and R. Teodorescu, "Degradation Behavior of Lithium-Ion Batteries During Calendar Ageing - The Case of the Internal Resistance Increase," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 1, pp. 517-525, 2018.
- [20] W. Shen, T. T. Vo, and A. Kapoor, "Charging algorithms of lithium-ion batteries: An overview," *Proc. 2012 7th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl. ICIEA 2012*, pp. 1567-1572, 2012.
- [21] 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.
- [22] K. M. Tsang and W. L. Chan, "Current sensorless quick charger for lithium-ion batteries," *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 3, pp. 1593-1595, 2011.
- [23] P. H. L. Notten, J. H. G. O. H. Veld, and J. R. G. Van Beek, "Boostcharging Li-ion batteries: A challenging new charging concept," *J. Power Sources*, vol. 145, no. 1, pp. 89-94, 2005.
- [24] G. C. Hsieh, L. R. Chen, and K. S. Huang, "Fuzzy-controlled Li-ion battery charge system with active state-of-charge controller," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 48, no. 3, pp. 585-594, 2001.
- [25] 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.
- [26] D. F. Martin and D. E. F. Tweedle, "Phase-Locked Loop Based Battery Charge Circuit Topology," *Am. J. Surg.*, vol. 163, no. 2, pp. 273-274, 2004.
- [27] Y. H. Liu and Y. F. Luo, "Search for an optimal rapid-charging pattern for li-ion batteries using the Taguchi approach," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 12, pp. 3963-3971, 2010.
- [28] Y. H. Liu, C. H. Hsieh, and Y. F. Luo, "Search for an optimal five-step charging pattern

- for li-ion batteries using consecutive orthogonal arrays,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 26, no. 2, pp. 654-661, 2011.
- [29] Y. H. Liu, J. H. Teng, and Y. C. Lin, “Search for an optimal rapid charging pattern for lithium-ion batteries using ant colony system algorithm,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 5, pp. 1328-1336, 2005.
- [30] 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.
- [31] 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,” *Proc. Int. Conf. Power Electron. Drive Syst.*, pp. 474-479, 2013.
- [32] J. Liu, Q. Duan, H. Chen, J. Sun, and Q. Wang, “An optimal multistage charge strategy for commercial lithium ion batteries,” *Sustain. Energy Fuels*, vol. 2, no. 8, pp. 1726-1736, 2018.
- [33] A. B. Khan, V. L. Pham, T. T. Nguyen, and W. Choi, “Multistage constant-current charging method for Li-Ion batteries,” *2016 IEEE Transp. Electrification Conf. Expo, Asia-Pacific, ITEC Asia-Pacific 2016*, pp. 381-385, 2016.
- [34] M. Di 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, 2016.
- [35] L. R. Chen, “A design of an optimal battery pulse charge system by frequency-varied technique,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 1, pp. 398-405, 2007.
- [36] 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.
- [37] S. Y. Cho, I. O. Lee, J. Il 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. 1561-1573, 2016.
- [38] 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.
- [39] L. R. Chen, J. J. Chen, C. M. Ho, S. L. Wu, and D. T. Shieh, “Improvement of li-ion battery discharging performance by pulse and sinusoidal current strategies,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 12, pp. 5620-5628, 2013.
- [40] Y. Lee and S. Park, “Electrochemical State-Based Sinusoidal Ripple Current Charging Control,” *IEEE Trans. Power Electr.*, vol. 30, no. 8, pp. 4232-4243, 2015.
- [41] A. Bessman, R. Soares, S. Member, and S. Vadivelu, “Challenging Sinusoidal Ripple-

- Current Charging of Lithium-Ion Batteries,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 6, pp. 4750-4757, 2018.
- [42] M. Abdel Monem *et al.*, “Lithium-ion batteries: Evaluation study of different charging methodologies based on aging process,” *Appl. Energy*, vol. 152, pp. 143-155, 2015.
- [43] D. Andre, M. Meiler, K. Steiner, H. Walz, T. Soczka-Guth, and D. U. Sauer, “Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. I: Experimental investigation,” *J. Power Sources*, vol. 196, no. 12, pp. 5356-5363, 2011.
- [44] A. Barai, K. Uddin, W. D. Widanage, A. McGordon, and P. Jennings, “A study of the influence of measurement timescale on internal resistance characterisation methodologies for lithium-ion cells,” *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, pp. 1-13, 2018.
- [45] DOE, “Battery Test Manual For Plug-In Hybrid Electric Vehicles Rev 1,” *Idaho Natl. Lab.*, no. September, 2010.
- [46] D. Wang, Y. Bao, and J. Shi, “Online lithium-ion battery internal resistance measurement application in state-of-charge estimation using the extended kalman filter,” *Energies*, vol. 10, no. 9, 2017.
- [47] Y. Bao, W. Dong, and D. Wang, “Online internal resistance measurement application in lithium ion battery capacity and state of charge estimation,” *Energies*, vol. 11, no. 5, 2018.
- [48] K. Smith and C. Y. Wang, “Solid-state diffusion limitations on pulse operation of a lithium ion cell for hybrid electric vehicles,” *J. Power Sources*, vol. 161, no. 1, pp. 628-639, 2006.
- [49] K. Uddin, A. Picarelli, C. Lyness, N. Taylor, and J. Marco, “An acausal Li-ion battery pack model for automotive applications,” *Energies*, vol. 7, no. 9, pp. 5675-5700, 2014.
- [50] W. Waag, S. Käbitz, and D. U. Sauer, “Experimental investigation of the lithium-ion battery impedance characteristic at various conditions and aging states and its influence on the application,” *Appl. Energy*, vol. 102, pp. 885-897, 2013.
- [51] B. G. Carkhuff, P. A. Demirev, and R. Srinivasan, “Impedance-Based Battery Management System for Safety Monitoring of Lithium-Ion Batteries,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 8, pp. 6497-6504, 2018.
- [52] W. Huang and J. A. Qahouq, “An online battery impedance measurement method using DC-DC power converter control,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 11, pp. 5987-5995, 2014.
- [53] S. Madani, E. Schaltz, and S. Knudsen Kær, “Review of Parameter Determination for Thermal Modeling of Lithium Ion Batteries,” *Batteries*, vol. 4, no. 2, p. 20, 2018.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] K. Kisu *et al.*, “Internal resistance mapping preparation to optimize electrode thickness and density using symmetric cell for high-performance lithium-ion batteries and capacitors,” *J. Power Sources*, vol. 396, no. May, pp. 207-212, 2018.
- [57] W. D. Widanage *et al.*, “Design and use of multisine signals for Li-ion battery equivalent circuit modelling. Part 1: Signal Design,” *J. Power Sources*, vol. 324, pp. 61-69, 2016.
- [58] W. D. Widanage *et al.*, “Design and use of multisine signals for Li-ion battery equivalent circuit modelling. Part 2: Model estimation,” *J. Power Sources*, vol. 324, pp. 61-69, 2016.
- [59] Y. Kobayashi, H. Miyashiro, K. Kumai, K. Takei, T. Iwahori, and I. Uchida, “Precise Electrochemical Calorimetry of LiCoO₂/Graphite Lithium-Ion Cell,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 149, no. 8, p. A978, 2002.
- [60] E. Schuster, C. Ziebert, A. Melcher, M. Rohde, and H. J. Seifert, “Thermal behavior and electrochemical heat generation in a commercial 40 Ah lithium ion pouch cell,” *J. Power Sources*, vol. 286, pp. 580-589, 2015.
- [61] N. Nieto *et al.*, “Thermal Modeling of Large Format Lithium-Ion Cells,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 160, no. 2, pp. A212-A217, 2012.
- [62] S. N. Motapon, A. Lupien-Bedard, L. A. Dessaint, H. Fortin-Blanchette, and K. Al-Haddad, “A Generic Electrothermal Li-ion Battery Model for Rapid Evaluation of Cell Temperature Temporal Evolution,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 2, pp. 998-1008, 2017.
- [63] C. Lin *et al.*, “Comparative study on the heat generation behavior of lithium-ion batteries with different cathode materials using accelerating rate calorimetry,” *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 3369-3374, 2017.
- [64] SAMSUNG, “Specification of Product for Lithium-ion Rechargeable Cell-Model:ICR18650- 26H,” 2011.
- [65] SANYO, “SANYO Lithium Ion Battery Specifications,” 2005.
- [66] A. Barai, G. H. Chouchelamane, Y. Guo, A. McGordon, and P. Jennings, “A study on the impact of lithium-ion cell relaxation on electrochemical impedance spectroscopy,” *J. Power Sources*, vol. 280, pp. 74-80, 2015.
- [67] 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.
- [68] A. A. Heidari, H. Faris, S. Mirjalili, I. Aljarah, and M. Mafarja, *Nature-Inspired Optimizers*, vol. 811. Springer International Publishing, 2020.
- [69] Y. C. Lin, D. D. Chen, M. S. Chen, X. M. Chen, and J. Li, “A precise BP neural network-based online model predictive control strategy for die forging hydraulic press machine,” *Neural Comput. Appl.*, vol. 29, no. 9, pp. 585-596, 2018.
- [70] J. chao Li, D. ling Zhao, B. F. Ge, K. W. Yang, and Y. W. Chen, “A link prediction method for heterogeneous networks based on BP neural network,” *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, vol. 495, pp. 1-17, 2018.
- [71] Li Huo, Bo Jiang, T. Ning, and B. Yin, “A BP Neural Network Predictor Model for Stock Price,” International Conference on Intelligent Computing, ICIC 2014, pp. 362-368, 2014.
- [72] M. T. Hagan and M. B. Menhaj, “Training Feedforward Networks with the Marquardt Algorithm,” *Brain Cogn.*, vol. 5, no. 6, pp. 989-993, 1994.
- [73] B. M. Wilamowski and Hao Yu, “Improved Computation for Levenberg-Marquardt Training,” *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 21, no. 6, pp. 930-937, 2010.
- [74] A. Suratgar, M. Tavakoli, and A. Hoseinabadi, “Modified Levenberg-Marquardt method for neural networks training,” *World Acad Sci Eng Technol*, pp. 46-48, 2005.
- [75] H. Faris, S. Mirjalili, and I. Aljarah, “Automatic selection of hidden neurons and weights in neural networks using grey wolf optimizer based on a hybrid encoding scheme,” *Int. J. Mach. Learn. Cybern.*, vol. 0, no. 0, p. 0, 2019.
- [76] H. Yu and B. M. Wilamowski, “Levenberg-marquardt training,” *Ind. Electron. Handbook, Intell. Syst.*, vol. 5, no. CRC Press, pp. 12-1-12-15, 2011.
- [77] E. T. Mohamad, D. J. Armaghani, E. Momeni, A. H. Yazdavar, and M. Ebrahimi, “Rock strength estimation: a PSO-based BP approach,” *Neural Comput. Appl.*, vol. 30, no. 5, pp. 1635-1646, 2018.
- [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, 2014.
- [79] E. Emary, H. M. Zawbaa, and C. Grosan, “Experienced Gray Wolf Optimization Through Reinforcement Learning and Neural Networks,” *IEEE Trans. Neural Networks Learn. Syst.*, vol. 29, no. 3, pp. 681-694, 2018.
- [80] I. Aljarah, H. Faris, and S. Mirjalili, “Optimizing connection weights in neural networks using the whale optimization algorithm,” *Soft Comput.*, vol. 22, no. 1, pp. 1-15, 2018.
- [81] A. A. Heidari, H. Faris, I. Aljarah, and S. Mirjalili, “An efficient hybrid multilayer

- perceptron neural network with grasshopper optimization,” *Soft Comput.*, 2018.
- [82] D. Stathakis, “How many hidden layers and nodes?,” *Int. J. Remote Sens.*, vol. 30, no. 8, pp. 2133-2147, 2009.
- [83] K. G. Sheela and S. N. Deepa, “Review on Methods to Fix Number of Hidden Neurons in Neural Networks,” *Math. Probl. Eng.*, vol. 2013, p. 11, 2013.