

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



# **Modelo Eletrotérmico de Baterias de iões de Lítio**

**Rafael Rajão Moreira Martins**

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

Orientador: Professor Doutor Armando Luís Sousa Araújo

27 de Junho de 2016



# Resumo

Nesta dissertação é proposto um modelo eletrotérmico que permite estimar o estado de carga (SoC) e a temperatura atual em baterias de íões de Lítio durante a sua descarga. Este modelo foi implementado em linguagem de programação C para, posteriormente com a utilização de um microcontrolador XMC 4500 da Infineon, validar a sua integração num Sistema de Gestão de Baterias (BMS).

Um modelo só é suficientemente robusto se os parâmetros do sistema a ser modelado forem aproximados à realidade, neste caso, se para o modelo elétrico os condensadores e resistências forem calculados independentemente e atualizados de acordo com o tipo de descarga, continua ou descontinua no tempo. Do mesmo modo, no caso do modelo térmico a condutividade térmica, coeficiente de convecção, calor específico e o calor gerado na bateria devem ser adaptados ao tipo de descarga. Partindo deste princípio, para além do software desenvolvido em C é necessário um algoritmo matemático de otimização desses mesmos parâmetros. O algoritmo escolhido é o arrefecimento simulado ou simulated annealing (SA).

O principal objectivo desta dissertação é a contribuição para o desenvolvimento de modelos passíveis de serem implementados em microcontroladores, capazes de estimar o estado de carga e a temperatura associados ao funcionamento das baterias. Pretende-se assim um modelo computacionalmente leve mas ao mesmo tempo complexo o suficiente para modelar as dinâmicas térmicas e elétricas que ocorrem no interior de uma célula em descarga.

Dos modelos existentes, aqueles que realmente apresentam melhores resultados são também os que requerem maior capacidade e tempo de processamento, como é o caso dos eletroquímicos. Por outro lado, modelos mais simplistas levam a que a diferença entre o estimado e a realidade seja mais significativa. Nesta tese é implementado um modelo eletrotérmico, isto é, uma conjugação de uma representação elétrica e térmica do comportamento dinâmico da bateria. A primeira possibilita o conhecimento do SoC através de um circuito elétrico equivalente e da tensão aos terminais da bateria. O segundo possibilita o conhecimento da temperatura 1-D em vários pontos da bateria, através da descrição de fenómenos de difusão no seu interior, da equação geral do calor e de três condições, uma inicial e duas fronteira.

As equações matemáticas dos processos físicos associados foram devidamente resolvidas e o modelo resultante simulado nos programas MATLAB e Visual Studio. Posteriormente, os sistemas térmico e elétrico foram representados em espaço de estados, discretizados e o software escrito em linguagem de programação C.

Dos resultados obtidos nas simulações e testes laboratoriais é possível concluir em linhas gerais que o modelo proposto nesta dissertação apresenta um bom equilíbrio entre tempo de execução e qualidade na determinação dos parâmetros pretendidos.



# Abstract

In this dissertation is proposed an electrothermal model capable of estimating the state of charge (SoC) and the temperature during operations of discharge in lithium-ion batteries. This model was reproduced in C programming language in order to be implemented in a XMC 4500 from Infineon and validated its integration on a Battery Management System (BMS).

A model robustness is increased if the parameters of the system being modeled correspond to the reality, meaning that for the electric model capacitors and resistors must be calculated independently and updated accordingly to the type of discharge being applied. The same goes to the thermal parameters, thermal conductivity, heat transfer coefficient, thermal capacity and the generated heat in the battery must be adapted to the circumstances. The optimization method chosen was the Simulated Annealing (SA).

The main focus of this dissertation is to give a solid contribute to the development of models capable of being applied and implemented on microcontrollers, estimating the state of charge and temperature during a discharge operation. The model develop has to be complex enough to minimize the error and simple enough to be processed in the microcontroller.

From the existing models until this date, those giving the best results are those requiring more memory and processing capacity for instance electrochemical models. In the other hand, the error increases with simpler models. In this thesis an electrothermal model is designed, resulting in a conjugation of an electric and thermal representation of the dynamic behavior of the battery. The first is achieved by an equivalent electric circuit and the voltage across the battery terminals. The second makes it possible to know the temperature 1-D at different points of the direction considered, through the description of diffusion phenomena, heat equation and three conditions.

The mathematical equations derived from the physical processes associated to the battery were resolved and the model was simulated via MATLAB and Visual Studio. Finally, the models were written in state space representation, and the software written in C programming language.

From the results its possible to conclude that the model proposed suits very well the objectives defined, presenting a good trade-off between execution time and quality in the estimation of the parameters of interest.

**Keywords:** Lithium-ion Battery, Battery Management System, Electric Vehicle (EV), Hybrid Electric Vehicle (HEV), Battery Electric Model, Battery Thermal Model, Battery Electrothermal Model, Simulated Annealing (SA), Microcontroller



# Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais e à minha irmã que sempre foram e sempre serão a base da minha vida. À minha restante família que igualmente me dá o carinho e apoio necessários e da qual me orgulho de fazer parte.

Aos meus amigos Sérgio Costa, Pedro Xavier, Diogo Gonçalves, Sara Ramos, Vânia Figueiredo, Joana Antunes, Joana Ferreira e Catarina Carvalho por serem a minha segunda família e por todos estes anos de amizade.

Ao pessoal do laboratório I002 um obrigado especial pelo companheirismo e ajuda nos momentos mais complicados. O meu interesse neste tema foi imediato após a proposta feita pelo professor Dr. Armando Araújo . Agradeço-o portanto por esta oportunidade e pelo tempo dispendido neste trabalho. Por último, mas não menos importante, agradeço aos alumni da FEUP Sónia Costa, Daniel Magalhães e Diogo Ledo pelo trabalho precedente a esta dissertação.

Rafael Martins





*“We never fail when we try to do our duty.  
We always fail when we neglect to do it.”*

Robert Baden-Powell



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação e Objetivos da Dissertação . . . . .	2
1.2	Estrutura da Dissertação . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Revisão do Estado da Arte</b>	<b>5</b>
2.1	Baterias . . . . .	5
2.2	Sistemas de Gestão de Baterias . . . . .	9
2.3	Modelos de Baterias . . . . .	11
2.3.1	Modelos Empíricos . . . . .	11
2.3.2	Modelos Matemáticos . . . . .	11
2.3.3	Modelos Eletroquímicos . . . . .	12
2.3.4	Modelos Estocásticos . . . . .	13
2.3.5	Modelo Analítico KiBam . . . . .	13
2.3.6	Modelo Analítico de Difusão . . . . .	15
2.3.7	Modelos Híbridos . . . . .	16
2.3.8	Modelos Elétricos . . . . .	16
2.3.9	Modelos Térmicos . . . . .	19
2.3.10	Modelos Eletrotérmicos . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Caraterização do Problema</b>	<b>23</b>
3.1	Definição do Problema . . . . .	23
3.1.1	Efeito da Temperatura durante Carregamentos . . . . .	24
3.1.2	Efeito da Temperatura durante Descarregamentos . . . . .	26
3.1.3	Efeito da Sobrecarga . . . . .	26
3.2	Solução Proposta . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Modelo Eletrotérmico</b>	<b>29</b>
4.1	Modelo Elétrico . . . . .	29
4.2	Parametrização do Modelo Elétrico . . . . .	35
4.2.1	Otimização do valor da Resistência . . . . .	36
4.3	Modelo Térmico . . . . .	36
4.4	Parametrização do Modelo Térmico . . . . .	39
4.5	Algoritmo de Otimização dos parâmetros térmicos . . . . .	41
4.6	Modelo em C . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>49</b>
5.1	Simulações . . . . .	49
5.2	Ensaio Laboratoriais . . . . .	51

5.3	Discussão de Resultados . . . . .	57
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>61</b>
6.1	Satisfação de Objetivos . . . . .	63
6.2	Trabalho Futuro . . . . .	64
<b>A</b>	<b>Especificações GEB 3.7V, 10000 mAh lithium Battery</b>	<b>65</b>
<b>B</b>	<b>Dados do Modelo</b>	<b>71</b>
B.1	Validação do Modelo Elétrico [28] . . . . .	71
B.2	Resultados com Resistência Interna Variável para o Modelo Elétrico [28] . . . . .	71
B.3	Comparação entre modelos para a parametrização da função $V_{SoC}$ [28] . . . . .	72
B.4	Parâmetros calculados a partir do SA para o modelo térmico . . . . .	72
<b>C</b>	<b>Dados dos ensaios laboratoriais</b>	<b>73</b>
C.1	Sistema de registo automático das temperaturas da bateria . . . . .	73
C.2	Circuito para leitura da corrente da bateria . . . . .	74
C.3	Código Arduino/Processing . . . . .	74
C.3.1	Arduino . . . . .	74
C.3.2	Processing . . . . .	77
C.4	Perfil de corrente adotado para descargas descontínuas . . . . .	78
<b>D</b>	<b>Resultados MATLAB</b>	<b>79</b>
D.1	ELETROTHERMAL MODEL FOR LITHIUM-ION BATTERIES - Three node simulation, 1C discharge . . . . .	79
D.2	ELETROTHERMAL MODEL FOR LITHIUM-ION BATTERIES - Three node simulation, 2C discharge . . . . .	83
D.3	ELETROTHERMAL MODEL FOR LITHIUM-ION BATTERIES - Three node simulation, Pulse Discharge . . . . .	87
D.4	ELETROTHERMAL MODEL FOR LITHIUM-ION BATTERIES - Four node simulation, 1C discharge . . . . .	91
D.5	ELETROTHERMAL MODEL FOR LITHIUM-ION BATTERIES - Four node simulation, Pulse discharge . . . . .	95
<b>E</b>	<b>Modelo Térmico em C</b>	<b>101</b>
E.1	Funções de cálculo dos componentes do circuito elétrico equivalente. . . . .	101

# Lista de Figuras

2.1	Emissões de gases poluentes na Europa (1990-2013) . . . . .	6
2.2	Esquemático das Baterias de íões de Lítio . . . . .	9
2.3	Diagrama das entradas e saídas de um sistema BMS, adaptado de [5] . . . . .	10
2.4	Sistema Hidráulico do Modelo <i>KiBam</i> , adaptado de [16] . . . . .	14
2.5	Aproximação por carga variável da corrente de descarga . . . . .	16
2.6	Circuito Equivalente de Randle . . . . .	17
2.7	Circuito Elétrico equivalente para determinação da OCV . . . . .	18
2.8	Circuito equivalente com resistência de autodescarga. [25] . . . . .	20
2.9	Circuito equivalente com subcircuito bidirecional. [26] . . . . .	21
3.1	Evolução da capacidade com o tempo (anos) a diferentes temperaturas . . . . .	25
3.2	Relação entre a tensão, corrente e a capacidade de uma bateria de íões de Lítio durante o carregamento. Fonte: Cadex . . . . .	27
4.1	Modelo físico da bateria, adaptado de [13] . . . . .	31
4.2	Circuito Elétrico equivalente . . . . .	33
4.3	Circuito da Bateria dependente do SoC e da corrente da bateria. . . . .	33
4.4	Curva OCV-SoC para determinação dos parâmetros da função $V_{SoC}$ . . . . .	34
4.5	Evolução da resistência de ligação com a corrente de descarga. Adaptado de [16] . . . . .	36
4.6	Coordenadas adotadas no modelo térmico. . . . .	37
4.7	Circuito elétrico equivalente para o modelo térmico. . . . .	39
4.8	Fluxograma para o algoritmo Simulated Annealing. . . . .	43
4.9	Circuito elétrico equivalente para o modelo térmico com 3 nós. . . . .	45
4.10	Fluxograma do algoritmo em C. . . . .	47
5.1	Simulações com descarga a uma taxa 1C. . . . .	50
5.2	Simulações com descarga a uma taxa 2C. . . . .	50
5.3	Simulações com uma descarga descontínua. . . . .	51
5.4	Pontos de medição da temperatura da bateria. . . . .	52
5.5	Ciclo adotado para testes pulsados. . . . .	52
5.6	Resultados provisórios com o termómetro Fluke 65. . . . .	54
5.7	Resultados com sensores de temperatura. . . . .	55
5.8	Comparação de temperaturas para uma descarga descontínua, com 3 nós no circuito equivalente. . . . .	56
5.9	Comparação de temperaturas para uma descarga descontínua, com 4 nós no circuito equivalente. . . . .	56
5.10	Tempo de execução adotando 3 nós no circuito equivalente do modelo térmico. . . . .	57
5.11	Tempo de execução adotando 4 nós no circuito equivalente do modelo térmico. . . . .	58



# Lista de Tabelas

2.1	Tipos de baterias e as suas características . . . . .	8
4.1	Elementos da função $V_{SoC}$ . . . . .	35
4.2	Resultados do algoritmo SA para correntes contínuas. . . . .	35
4.3	Equivalências elétricas . . . . .	39
4.4	Valores típicos para os parâmetros térmicos. Adaptado de [21] . . . . .	40
4.5	Solução inicial utilizada no algoritmo SA. . . . .	41
4.6	Parâmetros do algoritmo SA. . . . .	42
4.7	Caraterísticas principais do XMC 4500 . . . . .	44
5.1	Especificações dos testes laboratoriais. . . . .	53
5.2	Erros relativos médios e máximos entre as simulações em C e MATLAB. . . . .	58
5.3	Erros relativos médios e máximos entre os resultados experimentais e em C. . . . .	58
5.4	Erros relativos médios e máximos entre os resultados experimentais e em MATLAB. . . . .	59
6.1	Verificação dos objetivos propostos na dissertação . . . . .	63





# Abreviaturas e Símbolos

ADC	Analog to Digital Converter (Conversor Analógico Digital)
BEV	Battery Electric Vehicle (Veículo Elétrico a Baterias)
BMS	Battery Management System (Sistema de Gestão de Baterias)
CAD	Computer Aided Design (Desenho Assistido por Computador)
CFDM	Centered Finite Difference Method (Diferenças Finitas Centradas)
DoD	Depth of Discharge (Profundidade de descarga)
EV	Electric Vehicle (Veículo Elétrico)
EKF	Extended Kalman Filter (Filtro de Kalman Estendido)
FEM	Finite Element Method (Método dos Elementos Finitos)
HEV	Hybrid Electric Vehicle (Veículo Híbrido Elétrico)
IDE	Integrated Development Environment (Ambiente de Desenvolvimento Integrado)
INE	Instituto Nacional de Estatística
OCV	Open Circuit Voltage (Tensão de Circuito Aberto)
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Veículo Híbrido Elétrico Plug-in)
PSIM	Powersim
SA	Simulated Annealing (Arrefecimento Simulado)
SCIE	Sistemas de Contas Integradas das Empresas
SoC	State of Charge (Estado de Carga)
SoF	State of Function (Estado de Função)
SoH	State of Health (Estado de Saúde)
VEC	Veículo Elétrico de Competição
VVN	Volume de Negócios
1-D	One-Dimensional System Coordinate (Sistema de Coordenadas a Uma Dimensão)
2-D	Two-Dimensional System Coordinate (Sistema de Coordenadas a Duas Dimensões)
F	Unidade SI de capacitância (Farad)
$\Omega$	Unidade SI de resistência elétrica (Ohm)
C	Taxa de descarga de uma bateria (C-rate), 1C corresponde a uma descarga de 1 hora



# Capítulo 1

## Introdução

Questões como a sustentabilidade do planeta Terra, pegada humana e o efeito de estufa resultante das emissões de gases poluentes para a atmosfera ainda não estão completamente descartadas do nosso vocabulário.

A procura por alternativas aos veículos convencionais, movidos através de um motor de combustão, é seguramente uma das formas de combate a este grande problema. Uma das opções que tem vindo a ganhar mais força é a tração de veículos através da conversão de energia elétrica em mecânica. Esta solução é possível, a partir da utilização de um motor elétrico e de uma fonte de energia portátil.

De um modo geral, existem duas características que devem ser consideradas para que a mudança seja vantajosa. A primeira prende-se com o facto de o motor elétrico necessitar de produzir um binário igual ou superior ao produzido por um veículo a combustão. Em segundo lugar é também importante que a fonte de energia sustentável seja eficiente e permita uma autonomia suficiente para deslocações iguais ou superiores às oferecidas pelos combustíveis fósseis.

Atendendo ao segundo problema, as fontes de energia eletroquímica são de facto as que apresentam melhores características físicas para desempenharem este papel. Para além de poderem ser recarregadas, o seu tamanho tem vindo a diminuir e a densidade de energia e segurança durante o funcionamento tem vindo a aumentar. Das várias opções existentes, as baterias de íões de Lítio (Li-ion) permitem atualmente uma maior autonomia e fiabilidade aos produtores de veículos elétricos. Não obstante, sofrem também de efeitos colaterais ao seu funcionamento que limitam em grande parte a sua performance.

Um sistema eletroquímico é altamente não-linear, fazendo com que a sua integração num ambiente que se pretende estável, seja um desafio ainda maior. Para além disto, não pode ser ignorado que sistemas deste tipo estão sujeitos a perturbações externas que introduzem ainda mais instabilidade. Em primeiro lugar, é fulcral reconhecer que um processo de transformação de energia gera, paralelamente, energia que é dissipada em forma de calor. É de notar portanto, que a temperatura nunca será constante e que à medida que as exigências impostas às baterias aumentam, o seu efeito também vai aumentar.

A informação e constante interação com o utilizador são características cada vez mais relevantes

para equipamentos orientados ao consumidor. Nesse sentido, como já acontecia nos veículos convencionais, o utilizador de EV tem de conhecer em que altura deve, por exemplo, suspender a sua utilização para carregar as baterias, fazer a manutenção das mesma ou até substituir o conjunto de baterias por um novo. Estas notificações só se conseguem eficazes e no tempo correto se forem precedidas de sistemas dedicados à sua supervisão, Sistemas de Gestão de Baterias (BMS).

Na sua génese, sistemas deste tipo são compostos por modelos de estimação de parâmetros como o estado de carga (SoC) e o estado de saúde (SoH), permitindo assim obter uma boa aproximação da sua evolução e antecipar as consequências diretas em questões como o tempo de vida, deterioração e tempo entre carregamentos do pack de baterias.

Partindo desta necessidade, o foco estende-se agora para a qualidade, quantidade e o tempo dispendido para a obtenção dessa informação. Estes três elementos dependem inteiramente do modelo implementado no BMS. Modelos mais completos permitem conhecer um maior número de variáveis normalmente com uma boa aproximação da realidade, mas não fornecem essa informação em tempo útil. Modelos mais simplista permitem conhecer menos parâmetros do sistema de baterias, como por exemplo o SoC, contudo o seu tempo de execução é muito menor. A vantagem reside exatamente nesse facto, uma vez que a avaliação por parte do condutor é feita antecipadamente e este pode-se adaptar melhor às circunstâncias.

## 1.1 Motivação e Objetivos da Dissertação

O aparecimento de fontes de energia eletroquímica recarregáveis originou uma revolução na indústria de produtos orientados ao consumidor. Do mesmo modo, a criação de motores elétricos com menos de metade do tamanho e peso dos motores a combustão interna e com maior capacidade veio igualmente possibilitar a evolução na indústria automóvel. Adicionalmente, a sociedade está cada vez mais consciente que habitamos um planeta que necessita de um maior cuidado e manutenção.

Não existem recursos naturais suficientes para a continuação do estilo de vida adotado até então. A vida está em constante mudança e o ser humano deve por isso adaptar-se, procurando novas formas de energia sustentável, construindo máquinas apropriadas às suas necessidades e inofensivas para o ambiente.

A engenharia como meio de aplicação do conhecimento científico, económico, social e prático tem mais encanto quando utilizada para esses fins. A eletrotecnia em especial, permite explorar ao máximo as tecnologias criadas com eletrónica, sistemas de energias renováveis e redes de comunicação e transporte de energia elétrica inteligentes. As opções são inúmeras e o nascimento de EV, HEV, BEV, PHEV, etc é mais um contributo. Contudo, existem ainda vários obstáculos que impedem a sua massificação. Ultrapassar esses mesmos desafios é a grande motivação que está por trás de trabalhos como este.

Além disso, estamos inseridos numa sociedade maioritariamente capitalista e como influência, a comunidade científica tende a crescer em direções que suportem esse tipo de sistema económico.

Um dos sectores que recorre frequentemente ao uso de baterias nos seus produtos é o dos transportes que, contrariamente ao esperado, continua a prosperar independentemente dos efeitos da crise financeira despoletada em 2008. Em Portugal, segundo a SCIE, o volume de negócios das empresas do sector registou um aumento de 3,7%, o que corresponde a um total de 10,8 mil milhões de euros em 2014. No mesmo documento publicado pelo INE [1], é também possível verificar que o número de veículos por habitante aumentou cerca de 8,6%, perfazendo um total de 6,1 milhões de unidades em 2014.

Analisando as situações retratadas, os sistemas de gestão de baterias são cada vez mais objeto de investigação e de avanços tecnológicos. Focado neste objectivo principal, contribuir ativamente para o aperfeiçoamento dos BMS, foram traçadas as seguintes metas.

1. Desenvolver um modelo elétrico e térmico de uma bateria prismática de íões de Lítio em MATLAB e linguagem de programação C.
2. Desenvolver software de otimização em MATLAB que calcule os parâmetros da bateria e permita reduzir o erro entre o *output* do modelo e os resultados experimentais.
3. Validar o modelo em ambiente de simulação, para descargas contínuas à taxa 1C, 2C e descontínuas no tempo.
4. Validar a concessão e tempo de execução do programa em C através da utilização de um microcontrolador XMC 4500 da Infineon e consequente integração num BMS.
5. Validar experimentalmente o programa com uma bateria prismática de íões de Lítio de capacidade 10Ah, para descargas descontínuas no tempo.
6. Confrontar os resultados da simulação em MATLAB com os resultados obtidos pelo modelo em C e os resultados experimentais, obtendo um erro médio relativo inferior a 5%.

## 1.2 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é composta por seis capítulos que pretendem explicar o percurso realizado durante cinco meses e o trabalho desenvolvido nesse período. Os capítulos 1, 2 e 3 introduzem os conceitos gerais e informações de base para esta dissertação. Nestes capítulos é também possível verificar o que é pretendido neste estudo, a metodologia utilizada e a forma como o estado da arte influenciou as decisões tomadas. O problema é caracterizado e explicado de forma detalhada e é posteriormente apresentada a solução proposta nesta tese.

No capítulo precedente, são apresentados os modelos elétrico e térmicos da bateria prismática de íões de Lítio implementados, assim como os métodos de parametrização utilizados e os algoritmos de otimização desses mesmos parâmetros. De seguida são evidenciadas as etapas de conversão do modelo em ambiente de simulação MATLAB para software em C implementado no microcontrolador.

Os resultados obtidos dos vários testes realizados são confrontados e avaliados no capítulo 5 e as conclusões sobre estes resultados podem ser consultados no capítulo 6.

## Capítulo 2

# Revisão do Estado da Arte

Neste capítulo é apresentada toda a informação de base para esta dissertação. Em primeiro lugar é feita uma abordagem geral relacionada com as fontes de energia eletroquímica, os vários tipos de baterias existentes, as suas principais características e são apresentadas as mais indicadas para a utilização em veículos elétricos. Será também abordado o tema BMS e a sua importância para os veículos elétricos e híbridos. Finalmente são apresentados os modelos de baterias existentes e quais as características que os tornam passíveis ou não de serem aplicados em sistemas BMS.

### 2.1 Baterias

As fontes de energia eletroquímica ou baterias, são dispositivos que possibilitam a geração de eletricidade a partir da energia libertada por reações químicas que ocorrem no seu interior. Na sua génese, as baterias permitem duas grandes funções, fontes de potência elétrica portáteis e a possibilidade de armazenarem energia elétrica fornecida por uma fonte externa [2].

A primeira função permitiu a produção de equipamentos portáteis, como por exemplo, telemóveis, relógios de pulso, computadores portáteis, veículos elétricos e híbridos. Os sistemas que fazem uso da segunda função são por exemplo, fontes de alimentação de emergência e para sistemas *stand-alone* em redes de energia renovável.

As baterias dividem-se em primárias, depois de todos os reagentes serem consumidos a bateria não é capaz de fornecer energia novamente, e em secundárias, a reação eletroquímica pode ser revertida pela passagem de corrente na direção oposta à de descarga. Deste modo a bateria é carregada e pode ser novamente utilizada.

As baterias secundárias podem então ser consideradas dispositivos de armazenamento de energia [2]. É de notar que a energia armazenada neste tipo de baterias não é elétrica, como no caso dos condensadores, mas química. A nomenclatura usada para descrever estes dispositivos provoca alguma confusão e devem ser considerados os seguintes pontos. Nesta dissertação será utilizada a terminologia "bateria" ou "célula" para uma única fonte de energia eletroquímica. Para duas ou mais baterias em série ou paralelo será utilizada a terminologia "pack de baterias" ou "células".

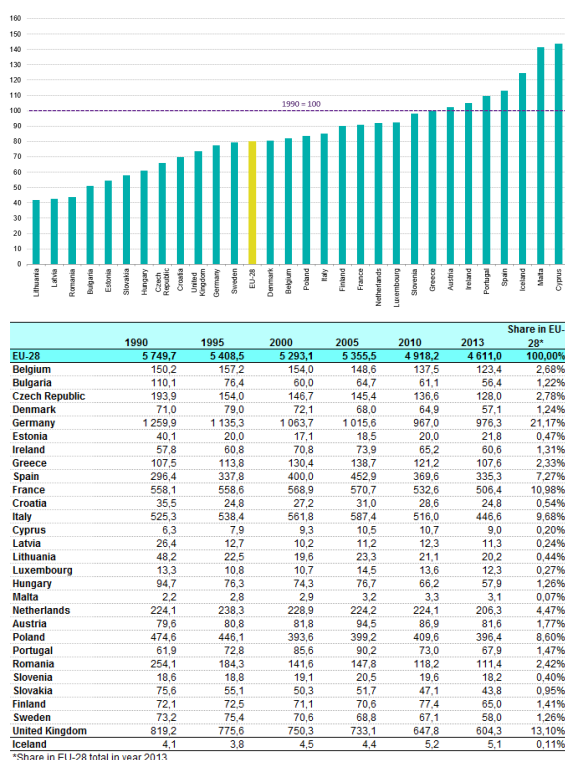


Figura 2.1: Emissões de gases poluentes na Europa (1990-2013)

### 2.1.0.1 Resenha Histórica

A primeira apresentação oficial de uma bateria foi em 1800 por Alessandro Volta na Universidade de Pavia, Itália. A descoberta de Volta permitiu a abertura de um novo capítulo na ciência, mas foi o desenvolvimento da telegrafia que despoletou o estudo mais aprofundado das baterias e consequentemente no seu comércio.

O mercado cresceu rapidamente e, por volta de 1870, a produção de baterias nos Estados Unidos da América atingiu os dois milhões de unidades [2]. A introdução de rádios portáteis em 1920 também desencadeou um estímulo à produção e desenvolvimento de tecnologias para a bateria tradicional. Nos últimos anos o crescimento na procura de baterias com maior capacidade e desempenho deve-se à exigência do consumidor e dos aparelhos que existem atualmente.

Os telemóveis, computadores portáteis, EVs e HEVs são cada vez mais complexos e potentes, o que leva a uma necessidade de sistemas de alimentação igualmente potentes e duradouros. Os veículos elétricos começaram a ser estudados e considerados como alternativa aos veículos modernos em 1830 na Escócia. No século XIX foi estabelecido o primeiro recorde de velocidade para um carro elétrico que atingiu os 100 km/h e em 1916 a produção de EVs nos Estados Unidos da América atingiu os 10 000 exemplares [2].

Uma curiosidade muito interessante, é o facto do Reino Unido ser dos primeiros países a introduzir tração elétrica nos seus veículos de distribuição de leite fresco. Contudo, o aparecimento de supermercados e a longevidade apresentada por estes veículos fez com que a aposta em sistema



de tração elétrica no Reino Unido caísse em 20%.

O mercado voltou a sofrer uma reviravolta dado que a atenção dos países desenvolvidos se concentrou no impacto que os meios de transporte tradicionais provocavam no ambiente. A Europa tem vindo a implementar medidas rigorosas para diminuir as emissões de gases poluentes para a atmosfera, e a aposta em EVs e HEVs tem ganho cada vez mais adeptos.

Na figura 2.1, é possível verificar a evolução e o esforço para que a pegada humana no planeta Terra seja mais atenuada. Portugal apresenta uma cota de 1,47%, mas comparado com países que têm em grosso modo o mesmo número de habitantes, como por exemplo a Hungria, este valor deveria ser menor.

É estimado que a produção anual de baterias seja de 8 a 15 unidades per capita, nos países desenvolvidos. A procura anual de fontes de alimentação eletroquímica aumenta 7.7% ao ano e em 2019 é estimável que ascenda aos 120 biliões, com a China no topo dos maiores produtores.

### 2.1.0.2 Tipos de Baterias e Características

Entre as baterias existentes no mercado, as que têm mais aplicabilidade em EVs e HEVs são as de iões de Lítio. Comparadas com outros tipos de baterias como as de chumbo-ácido ( $PbSO_4$ ), Níquel-Cádmio (Ni-Cd) e Níquel-Hidreto Metálico (Ni-MH), as baterias de iões de Lítio são superiores em vários aspetos. Para além das vantagens apresentadas na Tabela 1, este tipo de baterias não apresenta efeito de memória, podem ser adquiridas a um preço inferior, têm flexibilidade de *design* e são mais seguras quando postas em situações limite.

A maioria das baterias de iões de Lítio utiliza grafite de carbono como ânodos (elétrodo negativo) e os cátodos variam entre as seguintes configurações: Óxido de Cobalto ( $LiCoO_2LCO$ ), Óxido de Magnésio ( $LiMn_2O_4LMO$ ), Fosfato de Ferro ( $LiFePO_4LFP$ ) e Níquel-Manganês-Óxido de Cobalto ( $LiNi_{1-y-z}Mn_yCo_zO_2NMC$ ). Como é referido em [3], as baterias baseadas de Óxido de Cobalto ostentam maior desempenho em termos energéticos e de potência, apesar do preço do cobalto ser elevado. Alternativas mais baratas e mais seguras foram então consideradas, sendo que as de Níquel-Manganês-Óxido de Cobalto têm sido as mais comercializadas devido à sua alta densidade de energia.

No que respeita aos EVs, as baterias de Fosfato de Ferro são as mais adequadas uma vez que têm menos impacto no ambiente, são mais duradouras, baratas e o seu desempenho é muito constante. A construção das baterias de iões de Lítio é muito simples e tem na sua constituição 4 elementos fundamentais: o ânodo, o cátodo, o eletrólito e o separador.

O ânodo é o elétrodo negativo que tem como função servir de terminal para os eletrões que migram do cátodo quando a bateria está a carregar e serve de plataforma de migração quando está a descarregar. O cátodo é o elétrodo positivo que tem a função inversa à do ânodo. O eletrólito é um meio que permite o transporte dos iões de lítio entre o ânodo e o cátodo. O separador faz de barreira física para que não ocorram curto-circuitos dentro da bateria, deixando passar apenas os iões.

Tabela 2.1: Tipos de baterias e as suas características

Baterias	Chumbo-Ácido	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion
Energia Específica (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	110-60
Potência Específica (W/kg)	180	150	250-1000	1800
Tensão Nominal	2V	1.25V	1.25V	3.7V
Tolerância sobrecarregamento	Alta	Moderada	Baixa	Muito Baixa
Taxa auto-descarga	Baixa	Moderada	Alta	Muito Baixa
Temperaturas Funcionamento	-20 - 60	-40 - 60	-20 - 60	-20 - 60
Ciclo de vida	200-300	1500	300-500	500-1000

O funcionamento deste tipo de baterias pode ser observado a partir da figura 2.2. Quando uma célula está em carga, os eletrões que se encontram no cátodo transitam para o ânodo e quando a célula é descarregada os eletrões do ânodo transitam no sentido inverso.

### 2.1.0.3 Características relativas à carga da bateria

Estas características permitem definir aspetos intrínsecos ao funcionamento da bateria. São variáveis que têm em comum a impossibilidade de serem medidas diretamente. Na maior parte dos casos, modelos semelhantes ao desta dissertação, procuram por isso mesmo estimá-los com base nos processos físicos e químicos da bateria.

- O estado da carga (*SoC*) é das características mais importantes, pois permite conhecer a percentagem restante de carga na bateria. Relaciona a energia disponível com a energia máxima que a bateria pode fornecer, sendo que o resultado vem em percentagem. Como exemplo, uma bateria totalmente carregada apresenta um *SoC* de 100%. O seu conhecimento permite uma definição mais precisa do período entre carregamentos, que no caso dos veículos EVs e HEVs, é muito relevante.
- Estado de saúde (*SoH*) permite a análise da condição da bateria em relação às condições ideais. O seu resultado também tem como unidade a percentagem, o que por exemplo, leva a considerar que uma bateria acabada de sair de produção tem 100% de *SoH*. Há medida que são realizados mais ciclos de carga e descarga, o *SoH* diminui.
- O inverso e alternativa ao *SoC*, denomina-se por profundidade de descarga (*DoD*). Esta variável pode ser expressa em *Ah* ou em percentagem. Uma vantagem deste parâmetro

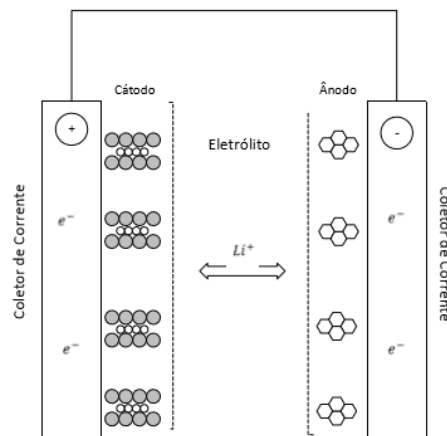


Figura 2.2: Esquemático das Baterias de íões de Lítio

é a possibilidade de abranger situações em que a bateria tem uma capacidade superior à nominal, por exemplo, 10% a mais da sua capacidade significa um DoD de 110%.

- Estado de Função (*SoF*) é a característica que permite analisar se uma bateria é capaz ou não de realizar determinada tarefa para o qual está destinada. Dependendo da sua aplicação e do *SoH* e *SoC* associados, uma bateria pode apresentar uma percentagem de 0 a 100.
- O número de sequências carga-descarga que uma bateria permite define-se como ciclo de vida. Para células secundárias, o ciclo de vida também pode significar o tempo que a bateria leva para ficar totalmente descarregada.

## 2.2 Sistemas de Gestão de Baterias

A performance e extensão da vida útil das baterias é diretamente proporcional à eficiência dos sistemas de gestão BMS. Existem três perguntas a fazer no design de sistemas BMS: I) Qual a temperatura ótima de funcionamento para um pack de baterias e para célula que o constitui? II) Quais são os limites máximos e mínimos de temperatura que não afetam o funcionamento das baterias? III) Para que valores do SoC se deve bloquear o fornecimento e armazenamento de energia?

A vida útil de uma bateria é reduzida em dois meses por cada grau em excesso, quando operam entre os 30°C e os 40°C. Por outro lado, para temperaturas abaixo dos 0°C, não só a longevidade é reduzida como a resistência interna da bateria aumenta. Esta é inversamente proporcional à potência que estas podem fornecer e à sua capacidade [4]. Num sistema BMS, é então importante combinar sistemas de refrigeração com sistemas de aquecimento, tornando o controlo mais robusto e prolongando assim o tempo de vida das baterias.

Da figura 2.3, verifica-se que as entradas para o sistema de gestão de baterias são a estratégia de atuação (ativo, passivo, refrigeração/aquecimento com gases, líquidos, etc., tempo de ciclo) ,

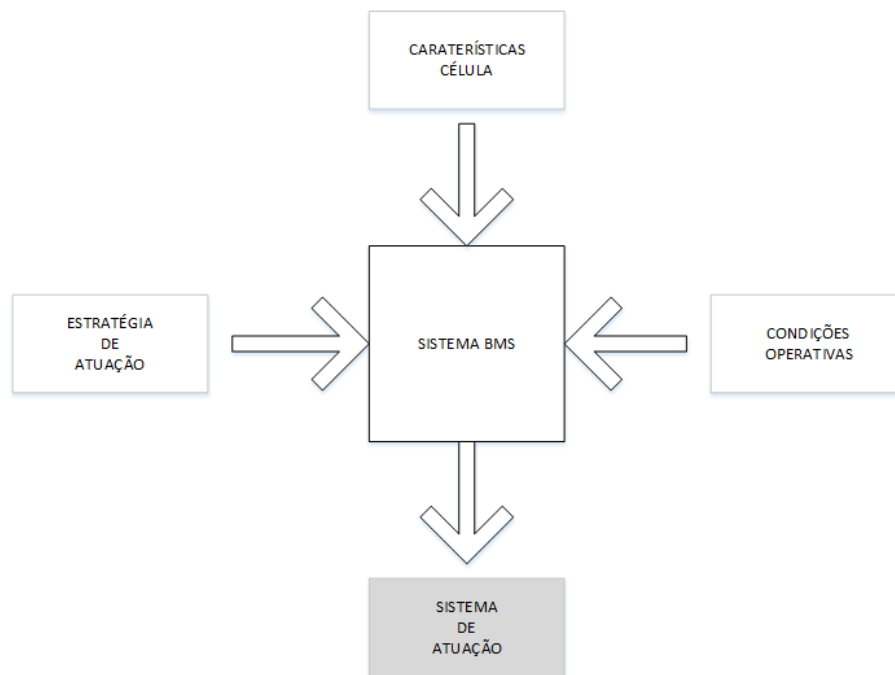


Figura 2.3: Diagrama das entradas e saídas de um sistema BMS, adaptado de [5]

as condições operativas (carga do veículo, condições ambientais, etc.) e as características da célula (dimensões, geometria, etc.) [5].

No design destes sistemas, existe a possibilidade de implementar dois métodos. O primeiro é o balanceamento de energia pelas células. As baterias podem ser desequilibradas em vários aspetos: estado de carga, taxa de auto-descarga, resistência interna e capacidade. O balanceamento pode ser do tipo ativo e passivo. No passivo são amostradas as tensões de todas as células, que posteriormente são niveladas pela que apresentar um valor de tensão mais baixo. No ativo também são amostradas as tensões de todas as células, contudo é calculado o valor médio e é transferida energia das células que possuam tensão superior ao valor calculado para as que apresentem um valor de tensão abaixo desse. Neste método, as perdas de energia são menores comparado com o método passivo [6].

Os métodos computacionais de fluidos térmicos implicam a captura do fluxo interno, definição do percurso térmico e resistências térmicas no interior de uma célula através de um software 3D sofisticado, por exemplo o Autodesk CFD.

Um sistema BMS completo é constituído por dois subsistemas, monitorização e controlo. Estes dois sistemas físicos discretos podem ser equiparados a comunicações *mestre-escravo*. Em [6], o sistema BMS apresentado é considerado ótimo, flexível, fiável e passível de ser aplicado a qualquer tipo de EV e HEV uma vez que é implementada uma placa de circuito impresso *mestre* capaz de controlar vários *escravos*. A independência que advém deste facto permite a sua utilização em qualquer veículo descurando a compatibilidade com as baterias.

Adicionalmente aos BMS podem ser também aplicados circuitos externos de proteção eletrônica que previnem que qualquer célula que pertence ao pack exceda os 4,3V. Muitas soluções também integram um fusível corta corrente que é acionado quando a temperatura no interior do pack atinge os 90°C.

## 2.3 Modelos de Baterias

Os modelos de baterias são desenvolvidos com os objetivos de padronizar o seu funcionamento e prever as consequências de certas condições operativas. Neste capítulo serão abordados os principais modelos existentes, exemplos de aplicação, assim como as suas vantagens e desvantagens.

### 2.3.1 Modelos Empíricos

Os modelos empíricos reproduzem o comportamento, não ideal, de descarga da bateria recorrendo a uma equação, relativamente simples, que usa parâmetros empíricos. Estes modelos são os mais simples de configurar e aplicar, contudo são os com menor precisão. Em [7] é apresentado um modelo empírico que utiliza uma tensão controlada em série com uma resistência, isto é, a resistência interna da bateria. O estado de carga (SoC) é a única variável de estado escolhida, uma vez que os parâmetros do modelo são retirados diretamente das curvas de descarga fornecidas pelos produtores das baterias. Para uma boa resposta deste tipo de modelos, são necessárias algumas premissas. A resistência interna é considerada constante durante o período de funcionamento, isto é, não varia com a amplitude da corrente, é assumido que não existe o efeito de Peukert<sup>1</sup>, o perfil de descarga é considerado exatamente igual ao perfil de carga, a temperatura não afeta o modelo, a bateria não apresenta efeito de memória e a taxa de auto-descarga não é representada [7].

A fonte de tensão é controlada através da equação 2.1.

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q - \int_0^t i, dt} + A \exp(-B \int_0^t i dt) \quad (2.1)$$

Onde  $E$  é a tensão de circuito aberto,  $E_0$  é a tensão inicial da bateria,  $K$  é a tensão de polarização,  $Q$  a capacidade da bateria,  $\int_0^t i dt$  é a corrente atual da bateria,  $R$  é a resistência interna,  $A$  é a amplitude exponencial e  $B$  é a constante de tempo inversa.

De acordo com o descrito anteriormente, esta forma de representar o funcionamento das baterias relaxa aspetos fulcrais, como por exemplo, a variação da resistência interna com a temperatura e amplitude da corrente na bateria. É concluído portanto que não são uma opção viável a usar num sistema como o BMS, em que é exigido precisão das previsões feitas.

### 2.3.2 Modelos Matemáticos

Os modelos matemáticos conseguem, a partir de submodelos, definir a tensão das baterias dependendo da corrente de carga/descarga e do SoC. É definida uma função objetivo que relaciona

<sup>1</sup>Lei de Peukert - Apresentada por Wilhelm Peukert em 1897, expressa aproximadamente a variação de capacidade de uma bateria recarregável com diferentes taxas de descarga.

a tensão de referência da bateria com o valor obtido da simulação. Para a tensão das baterias, o submodelo mais utilizado é o de Shepherd, que determina as variações da tensão nos terminais da bateria com a corrente [8]. A equação 2.2 rege este modelo.

$$V_{batt} = E_0 - K \left[ \frac{Q}{Q - \int_0^t i \, dt} \right] i - R_0 i \quad (2.2)$$

Onde  $E_0$  representa a tensão de circuito aberto,  $K$  é o coeficiente de polarização,  $Q$  a capacidade da bateria,  $\int_0^t i \, dt$  corrente atual da bateria e  $R_0$  é a resistência interna. Existem modelos mais recentes e complexos que usam como base o modelo de Shepherd, mas que melhoram a relação entre as curvas de carga e descarga da bateria e relaxam as premissas relacionadas com o modelo de Shepherd [9] [10].

O submodelo de tensão-corrente por si só não é robusto uma vez que é considerado que a capacidade da bateria  $Q$  não se altera com a amplitude de corrente e que a temperatura não afeta o modelo. A mudança destes parâmetros deve então ser considerada a cada período de simulação. O estado de carga da bateria, por exemplo, pode ser calculado através de 2.3, onde  $i_{sd}$  é a corrente de auto-descarga e  $i_{gas}$  é parte da corrente perdida na produção de gases no eletrólito quando este se dissocia devido a sobretensões ou sobrecarregamentos. Este fenómeno é raramente incluído nos modelos, mas ao consumir parte da corrente vai consequentemente afetar a performance global da bateria.

$$SoC = SoC_{init} - \int_0^t (i - \max(i_{gas}, i_{sd})), d\tau / Q \quad (2.3)$$

Uma vez que este tipo de modelos necessitam de cálculos complexos e/ou medições para a obtenção de dados de referência que por sua vez dependem de parâmetros externos [10] [11], não são adequados para o BMS.

### 2.3.3 Modelos Eletroquímicos

Os modelos deste tipo baseiam-se na descrição matemática das reações químicas que ocorrem no interior de cada célula da bateria. A sua precisão e consequente complexidade levam a que o tempo de simulação seja extenso.

Um exemplo deste tipo de modelos é o apresentado em [12]. Este modelo é baseado no pseudo modelo de Doyle a 2-D, que tem como objectivo o estudo do efeito da temperatura na concentração de partículas ativas nas baterias de íões de Lítio .

As experiências foram realizadas a diversas temperaturas (0°C, 10°C, 25°C, 55°C) e taxas de descarga (0.2C, 0.5C, 1C, 2C), quer para baterias com eletrólitos sólidos quer para baterias com eletrólitos líquidos.

As equações de base para a formulação do problema consideram três condicionantes: I) Balanceamento da carga eletrónica; II) Balanceamento da massa; III) Cinética eletroquímica; IV) Balanceamento de Energia. As equações resultantes destas formulações são muito complexas

como era de prever em modelos deste tipo e apesar de incluírem 7 condições fronteira, a sua implementação em sistemas de tempo real é impraticável.

Contudo, os resultados apresentados em [12] revelam uma grande precisão deste modelo em relação a experiências laboratoriais. É possível verificar que a diminuição de potencial da célula no estado sólido e líquido diminui à medida que a temperatura diminui devido à descida do coeficiente de difusão, aumento da resistência interna e descida da taxa de reações eletroquímicas.

Em [12], é ainda relatado um erro inferior a 2% para correntes de descarga a taxas constantes e temperatura de 25°C.

### 2.3.4 Modelos Estocásticos

O primeiro modelo do género foi formulado por Carla Chiasserini e Ramesh Rao a um nível superior de abstração, onde descreveram a bateria por uma cadeia discreta de Markov com  $N + 1$  estados, numerados de 0 a  $N$  e em que  $N$  corresponde ao número de unidades de carga<sup>2</sup> disponíveis na bateria [13].

Embora simples, os primeiros modelos estocásticos não eram os mais precisos. Várias extensões foram desenvolvidas de modo a resolver problemas iniciais deste tipo de modelos, como por exemplo, o facto de considerarem constante a taxa de recuperação durante uma descarga [14, 15].

São modelos que fornecem uma boa descrição qualitativa do comportamento da bateria para correntes descontínuas no tempo. Este modelo apenas fornece números relativos à comparação de tempos de vida e não consideram o efeito de intensidade de corrente de descarga e carga, que é muito importante para o BMS.

### 2.3.5 Modelo Analítico KiBam

O modelo analítico *KiBam*, representa a bateria através de dois reservatórios ligados entre si por um canal estreito. Um dos tanques é composto por uma válvula que permite o fluxo do líquido no seu interior. A capacidade dos dois tanques é diferente, mas com a mesma altura [13]. No instante  $t = 0$ , figura 2.4a, os dois tanques estão cheios, isto é, o líquido nos dois tanques tem a mesma altura e a válvula está fechada. Esta situação reproduz uma bateria completamente carregada e em repouso. Em  $t = \tau_1$  a válvula é aberta e o líquido do tanque a jusante flui para fora do sistema. Neste caso, a equivalência do sistema hidráulico com o elétrico pode imaginar-se através da colocação de uma bateria em paralelo com uma carga, sendo o líquido a corrente que flui da bateria. Quando a válvula é novamente bloqueada, em  $t = \tau_2$ , a quantidade de líquido presente nos dois tanques é diferente. No tanque a jusante a disponibilidade de líquido é menor, uma vez que o caudal na válvula é maior que na ligação dos dois tanques.

A quantidade de líquido que flui na ligação é diretamente proporcional à pressão imposta pelo vazio criado durante a saída de líquido pela válvula. É portanto, dependente da diferença de alturas entre os dois  $\Delta h(t)$  e do parâmetro  $k$ , situação da figura 2.4c. Entre  $\tau_2$  e  $T$ , o líquido flui de um

---

<sup>2</sup>Unidade de carga - corresponde à quantidade de energia necessária para transmitir um único pacote.

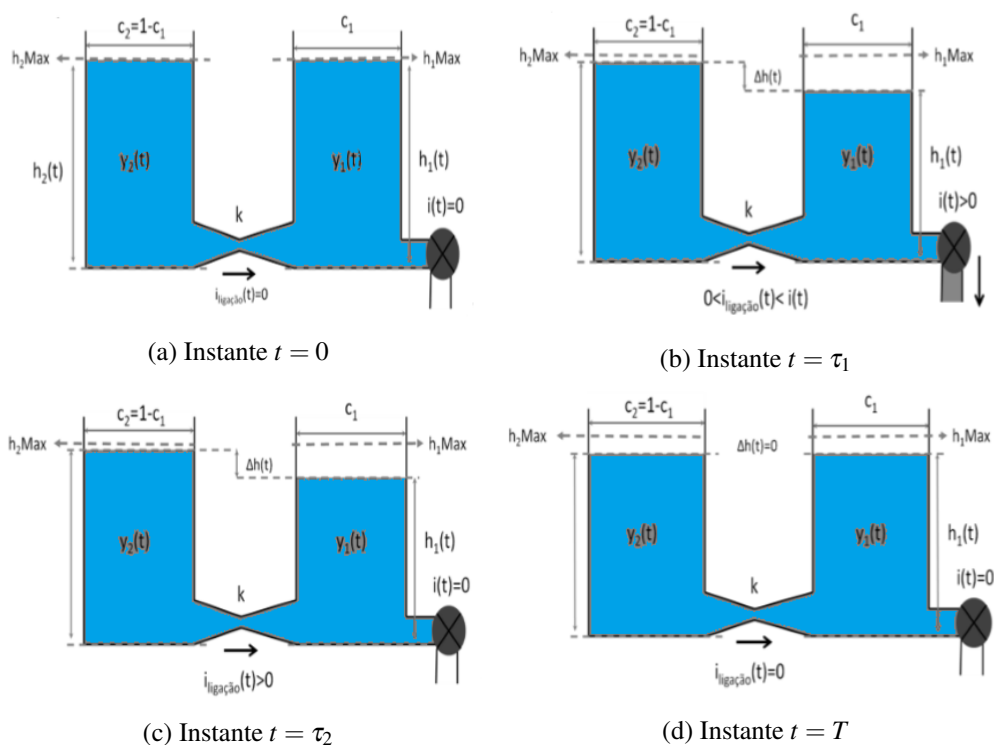


Figura 2.4: Sistema Hidráulico do Modelo *KiBam*, adaptado de [16]

tanque para o outro até que  $h_1 = h_2$ , o que permite afirmar que este modelo considera o efeito de reorganização de cargas [13].

$$\begin{cases} y_1(t) = h_1(t)/c_1 \\ y_2(t) = h_2(t)/(1-c_1) \end{cases} \quad (2.4)$$

A carga dos dois tanques, ou seja, a quantidade de líquido a cada instante pode ser calculada recorrendo ao conjunto de equações 2.4. A variação da carga nos dois tanques é descrita pelo sistema de equações 2.5.

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = -i(t) + k(h_2(t) - h_1(t)) \\ \frac{dy_2}{dt} = -k(h_2(t) - h_1(t)) \end{cases} \quad (2.5)$$

Uma vez que o caudal  $i_{ligacao}(t)$  depende diretamente da condutividade  $k$  e da diferença de alturas entre os reservatórios, o sistema de equações pode ser reescrito da seguinte forma.

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = -i(t) + i_{ligacao}(t) \\ \frac{dy_2}{dt} = -i_{ligacao}(t) \\ i_{ligacao}(t) = k(h_2(t) - h_1(t)) \end{cases} \quad (2.6)$$



É importante referir que este modelo também permite considerar o efeito de Peukert, uma vez que com taxas de descargas altas, a quantidade de líquido que flui pela válvula é muito maior do que a quantidade que flui pela ligação. Sem tempo para a reorganização de cargas, a capacidade da bateria vai ser proporcional à taxa de descarga.

Atendendo às condições iniciais  $y_1(0) = c_1 \cdot C$ ,  $y_2(0) = c_2 \cdot C$  e substituindo no conjunto de equações 2.4, é possível afirmar que a carga total disponível é igual a  $C$ . Como em todos os sistemas físicos existentes, a analogia para um circuito elétrico equivalente é quase imediata. Os dois tanques podem ser considerados condensadores no circuito elétrico, enquanto que o canal de ligação é convertido numa resistência, o líquido dos tanques é equivalente à corrente elétrica e como dito anteriormente, a quantidade de líquido nos reservatórios é a carga dos dois condensadores. Para  $n$  células, teriam de ser produzidas  $n$  malhas RC equivalentes.

### 2.3.6 Modelo Analítico de Difusão

O modelo analítico apresentado de seguida apresenta várias semelhanças com o modelo KiBam, e em [13] é comprovado que este é a versão contínua do modelo KiBam.

O modelo analítico de difusão foi desenvolvido em 2001 por Daler Rakhmatov e Sarma Vrudhula. As leis de difusão de Fick são a base para a formulação do problema adotado por este modelo. A evolução da concentração de partículas ativas no eletrólito é considerado suficiente para a previsão do tempo de vida da mesma.

Neste modelo, os processos e reações químicas nos dois elétrodos são assumidas equivalentes. Assim, a bateria é considerada simétrica e é apenas formulado o problema para um dos elétrodos. Esta assunção não é em toda a parte verdade, como pode ser verificado em modelos eletroquímicos [12].

Resolvendo as leis de Fick através da transformada direta e inversa de Laplace e da manipulação de uma função  $\theta$ , a solução é a equação 2.7 [17].

$$\alpha = \int_0^T i(\tau) d\tau + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \int_0^T i(\tau) e^{-\beta^2 m^2 (T-\tau)} d\tau \quad (2.7)$$

Onde  $\alpha$  é a capacidade da bateria em *Coulomb* e  $\beta$  as não-linearidades da bateria.

Para correntes de descarga constantes,  $i(t) = I$ , a equação 2.7, resulta na seguinte:

$$\alpha = I \left[ T + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1 - e^{-\beta^2 m^2 (T)}}{\beta^2 m^2} \right] \quad (2.8)$$

A estimação dos parâmetros para este modelo pode ser feita recorrendo a experiências simples com correntes constantes, utilizando portanto a equação 2.8. De qualquer forma, a formulação para casos gerais em que a corrente varia deve ser realizada.

Neste caso, a corrente de descarga  $i(t)$  é aproximada a uma função discreta em degrau, figura 2.5. Das soluções apresentadas, é possível obter uma expressão que determina a totalidade da

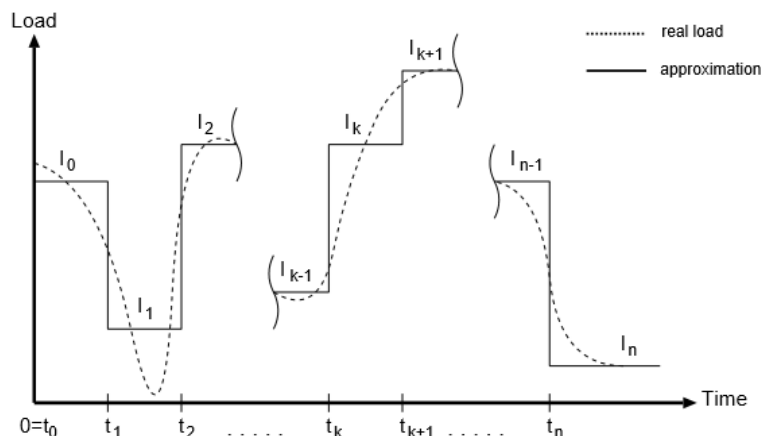


Figura 2.5: Aproximação por carga variável da corrente de descarga

carga que não pode ser utilizada, uma vez que já foi consumida ou pelos simples facto de estar indisponível, expressão 2.9.

$$\sigma(t) = \int_0^t i(\tau) d\tau + \int_0^T i(\tau) \left( 2 \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\beta^2 m^2 (T-\tau)} \right) d\tau \quad (2.9)$$

A bateria é considerada descarregada quando  $\sigma(t) = C_{total}$  [13].

### 2.3.7 Modelos Híbridos

Estes modelos nascem da conjugação de dois ou mais modelos para que as vantagens de cada um sejam aproveitadas. Com esta conjugação procura-se obter um modelo mais rigoroso quanto às previsões que realiza e que, ao mesmo tempo, se torne simples de aplicar nas ferramentas de simulação e nos sistemas de gestão de baterias existentes.

### 2.3.8 Modelos Elétricos

Os modelos elétricos procuram reproduzir a dinâmica da bateria utilizando um circuito elétrico equivalente muito simples e passível de ser analisado em software de simulação, como por exemplo, PSIM ou Labview.

Para manter o circuito relativamente preciso e ao mesmo tempo linear, os primeiros modelos deste género utilizavam apenas fontes de tensão, tabelas, resistências e condensadores [13]. Apesar de existirem várias topologias possíveis para o circuito elétrico equivalente, existem aspetos comuns a todos eles.

- A carga da bateria é representada pela carga de um condensador;
- É necessário um circuito de descarga da bateria, aplicando a corrente de descarga considerada;

- Uma resistência elétrica que representa a resistência interna da bateria;

Este tipo de modelos fornece informação sobre a tensão em circuito aberto, a resposta dinâmica e sobre o efeito de auto-descarga. Contudo, não simulam as não linearidades das baterias apresentando um erro de 12% na previsão do tempo de vida da bateria [13].

O modelo apresentado em [18, 19], é um excelente exemplo deste tipo de modelos. Apesar de ser possível a representação do efeito de difusão de íons de Lítio através da formulação da propagação de uma onda num meio, este modelo que se pretende de implementação *on-board*, isto é, em sistemas BMS utiliza apenas elementos lineares. Não são introduzidos quaisquer elementos não lineares, como por exemplo, impedâncias de Warburg [18].

O modelo elétrico equivalente é fruto da caracterização de equações diferenciais de primeira ordem convertidas na estrutura da figura 2.6, denominada por circuito equivalente de Randle.

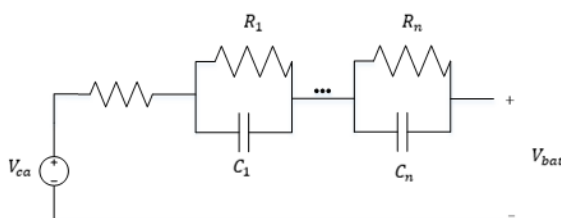


Figura 2.6: Circuito Equivalente de Randle

As equação para o ramo  $i$  do circuito equivalente pode ser descrita como:

$$\frac{dV_i}{dt} = \frac{1}{R_i C_i} V_i + \frac{1}{C} I \quad (2.10)$$

A tensão de circuito aberto (OCV) é função do estado de carga, quando o SoC atinge os 0% a tensão decresce rapidamente e quando atinge os 100% tende a aumentar até à tensão nominal. A relação entre os dois é quase linear, portanto a tensão em OCV pode ser modelada como:

$$V_{oc}(z) = V_0 + \alpha(1 - \exp(-\beta z)) + \gamma z + \zeta \left(1 - \exp\left(-\frac{\epsilon}{1-z}\right)\right) \quad (2.11)$$

onde  $z$  é discretizado entre  $[0, 1]$ . Para a determinação dos parâmetros deste circuito elétrico, é utilizado o algoritmo de otimização Genetic Algorithm (GA).

A dependência de tais parâmetros com o estado de carga foi experimentalmente comprovado em [18]. Uma extensão deste modelo, permitiu concluir experimentalmente que estes parâmetros também são influenciados pela temperatura [19].

Outro exemplo deste tipo de modelos é o apresentado em [20]. Baseado na tensão de circuito aberto, este modelo difere do apresentado anteriormente e do proposto nesta dissertação.

O circuito elétrico equivalente é gerado a partir da resposta típica da tensão quando aplicada uma corrente constante a uma taxa de 20C e o estado de carga é de 40%. O circuito equivalente deve portanto conter uma OCV o mais próximo possível da tensão gerada naquelas condições.

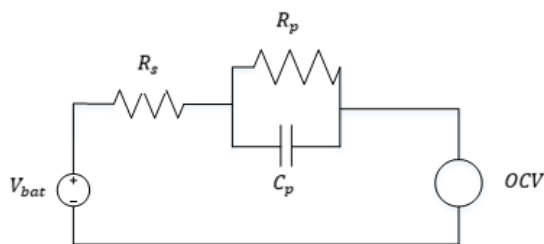


Figura 2.7: Circuito Elétrico equivalente para determinação da OCV

Os resultados observados para este modelo também foram confirmados para valores de SoC: 20%, 60% e 80%, quer em situações de descarga quer em carga. O circuito equivalente base para este modelo pode ser visto na figura 2.7.

A expressão analítica de  $V_{bat}$  em frequência é dada por:

$$U_{bat}(j\omega) = I_{cell}(j\omega) \left( R_s + \frac{R_p}{1 + j\omega R_p C_p} \right) + OCV \quad (2.12)$$

onde  $\omega$  é a frequência angular da corrente aplicada. O ajuste dos vários parâmetros ( $R_s, R_p, C_p$ ) permite a réplica da tensão com um desvio de menos de  $4mV$ , quando excitado com uma corrente de 20C.

Neste modelo é introduzido o fenómeno de histerese da tensão de circuito aberto. Para os mesmos valores de SoC, a OCV quando a bateria está a carregar difere da OCV quando esta se encontra a descarregar. No tipo de baterias em questão é previsível que isto aconteça, muito devido aos seus constituintes [20].

No desenvolvimento deste modelo a caracterização das ondas de tensão em carga e descarga foram consideradas independentes entre si.

Uma questão importante a reter neste tipo de modelo, é a insuficiência na representação da tensão de recuperação quando a bateria se encontra em vazio. Este problema é contornado em [20] com a introdução de fator de recuperação  $\sigma$ .

$$\sigma(t_{rest}) = \exp\left(\frac{-t_{rest}}{\tau}\right) \quad (2.13)$$

Quando a bateria está em carga,  $\sigma = 1$  e após 3h em vazio o fator de recuperação é considerado 0.

A tensão de circuito aberto pode ser expressa da seguinte forma:

$$OCV(SoC, \sigma) = \sigma \cdot OCV_{1min}(SoC) + (1 - \sigma) \cdot OCV_{3h}(SoC) \quad (2.14)$$

Este modelo é validado experimentalmente, reconstruindo com precisão a tensão atual da bateria durante o seu funcionamento. A sua integração num sistema BMS é possível, apesar de existirem modelos mais simples e intuitivos que fornecem resultados semelhantes.

### 2.3.9 Modelos Térmicos

O estudo de modelos térmicos teve início em 1995, através de publicação de John Newman e Caroline Pals. O primeiro artigo referia-se a apenas uma célula, sendo que o segundo foi uma extensão do primeiro para um pack de baterias [21].

A caracterização térmica de baterias pode ser dividida em 2 grupos:

- Modelo térmico de uma célula
- Modelo térmico de um pack de células

#### 2.3.9.1 Modelo térmico de uma Célula

De modo a obter uma melhor percepção da modelação térmica de uma pack de células é necessário uma primeira abordagem a uma célula. John Newman, em [22], considera que os elétrodos são porosos e que conseqüentemente deve ser considerada a reação eletroquímica em toda a dimensão do elétrodo. A influência da difusão dos íões de Lítio nas partículas ativas deve também ser considerada, já que as propriedades termodinâmicas neste caso variam.

Por ultimo, a massa do eletrólito não deve ser considerada constante como se de um material linear se tratasse, aspeto que tem muita importância na performance das baterias. A modelação mais básica consiste assim, na assunção de um eletrólito poroso, em teoria de concentração de partículas ativas, lei de Ohm, relações cinéticas e balanceamento de carga e massa [21].

#### 2.3.9.2 Modelo térmico de um pack de Células

Como dito anteriormente, temperaturas elevadas em períodos de tempo curtos melhoram o desempenho da bateria por causa do aumento das taxas de reação eletroquímica. No entanto, o tempo de vida da bateria diminuiu uma vez que as temperaturas elevadas aumentam a corrosão, promovendo o envelhecimento da bateria.

Prever os perfis de temperatura é então importante para a concepção de um sistema BMS, bem como prever a forma como a variação de temperatura na bateria atinge o seu desempenho. A geração de calor dentro de uma célula pode ser removido através das paredes da célula, pode ser acumulado na própria célula ou os dois em simultâneo [21].

A obtenção de imagens térmicas de uma bateria em carga/descarga pode ser uma boa abordagem para um maior conhecimento e simulação dos fenómenos inerentes ao seu funcionamento.

Em [23], é comparada uma simulação a duas dimensões realizada com uma bateria cilíndrica com uma simulação a três dimensões realizada com uma bateria prismática. Os autores, para o sistema de simulação da bateria prismática utilizaram a equação geral do calor (4.14) e confirmaram os bons resultados quando confrontados com o sistema a 2-D das baterias cilíndricas.

Desde 1995, que se fazem várias tentativas de simplificação dos modelos térmicos existentes. Em [24], é desenvolvido um modelo detalhado para verificação da veracidade das considerações até ai tomadas, e para determinar uma abordagem ótima ao problema térmico das baterias. Mais uma vez, as transferências de calor dentro da bateria são formuladas a partir da equação geral do

calor. No entanto, a taxa de calor gerado deve também ser considerado e para esta formulação, os autores utilizaram a equação de Bernardi:

$$\bar{q} = \frac{I}{V_{ol}} (E_{OC} - E - T \frac{dE_{OC}}{dT}) \quad (2.15)$$

Contudo este modelo revelou-se ineficiente uma vez que o efeito da resistência de contacto na condutividade térmica é insignificante, logo a condutividade térmica do eletrólito líquido é comparável ao seu homologado em estado sólido [21].

A precisão dos modelos térmicos pode ser avaliada quantitativamente com a medição dos seguintes índices:

- Desvio máximo de temperatura;
- Temperatura mínima aceitável;
- Temperatura média;
- Desvio da temperatura depois de uma descarga completa;

É importante ressaltar que a distribuição do calor nas células de íões de Lítio depende em grande parte do sistema de refrigeração adotado e que nenhum modelo é suficientemente bom se não for acompanhado de um sistema de atuação igualmente eficaz.

### 2.3.10 Modelos Eletrotérmicos

Os modelos eletrotérmicos são um tipo de modelo híbrido compostos por um modelo elétrico de estimação do SoC, SoH e conseqüente SoF e um modelo térmico que permite obter uma caracterização térmica durante o funcionamento das baterias.

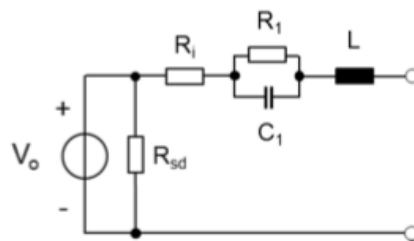


Figura 2.8: Circuito equivalente com resistência de autodescarga. [25]

Este tipo de modelos é muito indicado para soluções em que se pretende uma capacidade de processamento média e uma boa aproximação dos valores de interesse. Embora partam do mesmo princípio de modelação, existem várias opções que determinam a qualidade dos modelos e os resultados obtidos.

A primeira diferença pode estar no design do circuito elétrico equivalente. Quando a solução final é destinada à implementação num computador *on-board*, a estrutura escolhida deve ser desprovida de elementos não lineares ou valores expressos no domínio das frequências. O circuito da figura 2.6 e o desenvolvido nesta dissertação são exemplos deste tipo de circuitos.

O circuito elétrico equivalente pode também conter elementos adicionais, como é o caso de uma resistência elétrica,  $R_{sd}$ , que representa a autodescarga da bateria, figura 2.8. Normalmente, este tipo de elemento é difícil de parametrizar por depender do tempo, da tensão e temperatura da bateria [25].

Como vastamente descrito na literatura, se uma bateria depois de excitada é deixada a relaxar, ocorrem no seu interior fenómenos de reorganização de carga e origem de campo elétricos que fazem variar o SoC da bateria. Quanto maior for a excitação que se antecede, mais o valor do SoC se altera. Para modelar este fenómeno, é também possível adicionar uma componente de histerese da tensão da bateria que limite essas mesmas variações [19].

Outro aspecto que também pode diferir de modelo para modelo, figura 2.9, é a inclusão de subcircuito bidirecional de forma a ter em conta a polarização da tensão na resistência interna e em possíveis diferenças nos valores da resistência durante a carga e descarga da bateria [26].

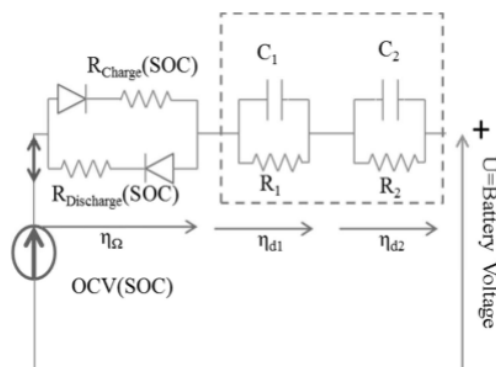


Figura 2.9: Circuito equivalente com subcircuito bidirecional. [26]

A parametrização destes modelos pode também divergir, mas o mais comum é a realização de ensaios laboratoriais que permitam conhecer os valores das resistências e condensadores do circuito equivalente. Dois métodos bastante conhecidos são o Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), Hybrid Power Pulse Characterization (HPPC). No primeiro, a impedância do sistema é medida para uma gama definida de frequências, isto é, é conhecida a resposta em frequência do sistema, assim como a energia armazenada e dissipada. Normalmente os resultados deste método são apresentados num diagrama de Nyquist. Um exemplo da aplicação deste método pode ser visto em [25, 19].

Outros métodos, como o apresentado nesta dissertação, utilizam a resposta do sistema a diversos perfis de corrente para a determinação desses mesmos parâmetros. A maioria dos modelos eletrotérmicos também utiliza uma função de aproximação da OCV que depende diretamente do

SoC e indiretamente da temperatura e corrente de descarga. Apesar de serem usadas funções polinomiais para este problema, em [19] por exemplo, são implementadas funções de interpolação spline por afirmarem que os coeficientes das funções polinomiais são difíceis de determinar.

Para a caracterização térmica das baterias, os modelos também podem assumir fontes diferentes de a representar. Em [26] por exemplo, a equação do calor é dividida em três partes: O calor gerado pelas resistências internas da bateria ( $Q_{res}$ ), o calor gerado pelos processos eletroquímicos no interior da bateria ( $Q_{din}$ ) e o calor dissipado na interação da parede da bateria com o ar ( $Q_{diss}$ ).

A equação é então descrita como:

$$mC_p \frac{dT}{dt} = Q_{res} + Q_{din} + Q_{diss} \quad (2.16)$$

onde  $m$  é a massa da bateria [kg],  $C_p$  o calor específico [J/kgK] e  $T$  é a temperatura [K].

Um forma que é igualmente viável na caracterização térmica das baterias de íões de Lítio, é a utilização de programas especializados a análises como esta. Em [25] o modelo é realizado com o auxílio do FEM e parametrizado com o software CAD. O modelo é posteriormente simulado em ANSYS. Apesar dos bons resultados que esta abordagem permite, o tempo que requerem para o seu processamento traduz-se numa desvantagem.



## Capítulo 3

# Caraterização do Problema

No presente capítulo são enunciados os principais problemas inerentes ao funcionamento das baterias de iões de Lítio e que conseqüentemente as tornam menos competitivas em relação a fontes de energia convencionais. Com base nestas problemáticas existem várias soluções e são direcionados vários estudos que complementam essas mesmas soluções. Esta dissertação é mais um contributo nesse sentido, que se concentra especialmente na caraterização da temperatura de funcionamento das baterias e no seu estado de carga.

São colocadas em evidência as causas para a geração de calor na bateria e a influência que o conhecimento do SoC das baterias tem no modo como as carregamos. Os problemas que a sobrecarga pode ter no pack de baterias é igualmente nefasto, não pode ser ignorado e como tal, existem vários sistemas de proteção direcionados a esse controlo.

As baterias, especialmente as de iões de Lítio, podem facilmente debitar potências elevadas sem que nada o faça prever. Um exemplo deste tipo de situação é o desgaste do separador, que ao sofrer uma rutura permite que ocorra um curto circuito na célula. A criação da norma IEC 62133 em 2012 visa, portanto, reduzir o risco de transporte, armazenamento e operação de baterias através de circuitos de proteção.

A solução proposta nesta dissertação é fundamentada por um conjunto de vários estudos realizados no passado e tem como base dois modelos, um elétrico e um térmico. Não se pretende independência na solução apresentada, mas que possa funcionar em conjunto com sistemas já existentes de maneira a obter a robustez necessária à proliferação dos veículos elétricos e híbridos.

### 3.1 Definição do Problema

Na utilização de EVs e HEVs, a degradação das células está diretamente ligada à autonomia que estes permitem entre carregamentos. Tal provoca um elevado custo na manutenção e substituição das células, facto que tem peso na decisão de compra ou não de veículos elétricos.

Existem vários fatores que proporcionam situações de risco para as baterias ou que encurtam o tempo útil da sua utilização. A sobrecarga, o relaxamento, o efeito da corrente de carga e descarga,

o efeito do tipo de carga e descarga, o envelhecimento e o efeito da temperatura são as principais condicionantes [16].

As baterias recarregáveis de íões de Lítio têm vindo a ser utilizadas com mais frequência devido a características como alta densidade de potência, gama alargada de temperatura de funcionamento, eficiência energética, ciclos de vida relativamente altos e taxas de auto descarga baixas.

Como é vastamente descrito na literatura, a temperatura excessiva a que estas células possam estar sujeitas degrada o seu funcionamento, reduzindo a potência disponível, autonomia e também a capacidade máxima de carregamento (designada por efeito memória). Esta última consequência não se verifica nas baterias de íões de Lítio, o que constitui mais uma vantagem em relação aos outros tipos de baterias.

Apesar disto, existe uma certeza que é transversal a todo o tipo de baterias: o facto de haver uma gama de valores de temperatura em que o seu desempenho é ótimo. Nas baterias de íões de Lítio existem três tipos de aquecimento inerentes ao seu funcionamento e portanto impossíveis de eliminar [12]:

- Aquecimento devido à polarização entre partículas ativas e o eletrólito;
- Aquecimento por efeito de Joule;
- Aquecimento devido à entropia entre a carga e descarga da bateria;

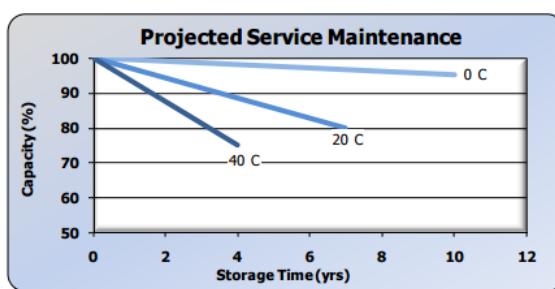
O efeito da temperatura, como descrito anteriormente, perturba diretamente a capacidade nominal e tensão nominal da bateria afetando a forma como é carregada e descarregada e consequentemente reduzindo os ciclos carga-descarga permitidos. Por estas razões, os produtores de baterias fornecem uma gama de temperaturas de funcionamento dentro da qual essas consequências são atenuadas e a bateria apresenta melhor performance. Este efeito não é exclusivo das baterias utilizadas em EVs e HEVs, como se pode verificar na figura 3.1. A vida útil das pilhas mais comuns e que são utilizadas diariamente é visivelmente reduzida com o aumento da temperatura.

Contudo, uma curiosidade no que toca à temperatura é o facto de apresentar um comportamento contraditório em períodos de tempo curtos. Quando uma bateria é submetida a temperaturas elevadas, a sua capacidade instantânea aumenta e quando submetida a temperaturas baixas, diminui.

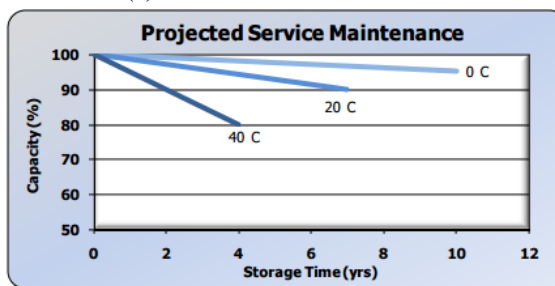
Com o aumento da temperatura, as reações químicas para produção de energia elétrica são favorecidas, o que aparentemente melhora as suas características [27]. Um exemplo bastante conhecido é o aumento da temperatura por fricção das baterias de um comando remoto, possibilitando mais uma utilização. Com a diminuição da temperatura, a resistência interna da bateria aumenta e a sua capacidade diminui. Estes factos são os principais responsáveis para que, por exemplo, seja difícil realizar a ignição de um motor de combustão em dias de Inverno.

### 3.1.1 Efeito da Temperatura durante Carregamentos

Temperaturas extremamente altas e baixas diminuem a disponibilidade da bateria na recepção de energia, reduzindo a carga total/capacidade da mesma.



(a) Pilhas cilíndricas Alcalinas



(b) Pilhas cilíndricas de Lítio

Figura 3.1: Evolução da capacidade com o tempo (anos) a diferentes temperaturas

Contrariamente às baterias de Ácido de Chumbo e de Níquel-Cádmio, que permitem carregamentos a temperaturas abaixo dos  $0^{\circ}\text{C}$  com uma taxa de  $0.1\text{C}$ , as baterias de íões de Lítio não devem ser sujeitas a este tipo de carregamento independentemente da taxa a que é realizado.

Quando estas situações ocorrem, há a possibilidade do ânodo sofrer galvanoplastia permanente. No fenómeno de galvanoplastia, a parede do eléctrodo negativo é revestida por íões de Lítio que bloqueiam a passagem dos electrões para o eléctrodo. Esta placa obstrui e dificulta o funcionamento correto da bateria tornando-a mais vulnerável a situações de *stress*.

Os estudos e avanços tecnológicos mais recentes tentam de alguma forma evitar essa adversidade, mas até ao momento só é possível carregar uma bateria de íões de Lítio a  $-30^{\circ}\text{C}$  com uma taxa de  $0.02\text{C}$ . O tempo necessário nestas condições seria 50 horas, facto que é impraticável.

São vários os sistemas existentes nos EVs e HEVs que auxiliam o aquecimento controlado das baterias, como por exemplo, a reutilização dos gases do sistema de ar condicionado.

Para temperaturas elevadas, as baterias de íões de Lítio são, sem margem para dúvida, as que apresentam melhor desempenho. A tensão de alimentação nestas baterias não é afetada, porém quando exposta a altas temperaturas por longos períodos de tempo a sua capacidade máxima é reduzida.

Apesar da gama de funcionamento deste tipo de baterias estar entre  $[-20^{\circ}\text{C}, 60^{\circ}\text{C}]$ , o carregamento deve ser realizado para temperaturas entre  $[5^{\circ}\text{C}, 45^{\circ}\text{C}]$ . Quando são efetuados carregamentos abaixo dos  $0^{\circ}\text{C}$  o lítio congela formando uma placa metálica impossível de eliminar deixando portanto a bateria inutilizada.

### 3.1.2 Efeito da Temperatura durante Descarregamentos

No geral todo o tipo de baterias apresenta desempenhos mais satisfatórios com temperaturas de funcionamento entre os  $[20^{\circ}\text{C}, 25^{\circ}\text{C}]$ . Em casos específicos, como por exemplo em baterias de polímeros sólidas, as altas temperaturas favorecem a descarga. Para valores entre os  $[60^{\circ}\text{C}, 100^{\circ}\text{C}]$ , o transito de iões é facilitado e a própria condutividade da bateria aumenta. O calor serve de catalisador em vez de representar uma desvantagem.

Contudo, as baterias com mais presença no mercado são constituídas por eletrólitos em gel devido à segurança extra que permitem em relação às suas homólogas em estado sólido. Neste tipo de baterias de iões de Lítio por cada  $10^{\circ}\text{C}$  a mais, a capacidade é reduzida em 20%.

Para baixas temperaturas, os fenómenos são idênticos à situação de carregamento. A taxa de descarga tem de ser muito baixa para que a bateria possa funcionar, o que se torna praticamente uma desvantagem e que para EVs e HEVs não se pode verificar. O problema ainda se torna mais relevante quando se examina um pack de baterias.

Uma vez que é difícil garantir a equipolência de todas as células do conjunto, a baixas temperaturas é possível a ocorrência de um curto circuito na célula mais descarregada. Esta situação pode até chegar ao ponto de ser irreversível, causando uma inversão dos pólos da bateria. É fácil de prever que quanto maior for no número células que formam o pack, maior é a probabilidade de acontecimento.

### 3.1.3 Efeito da Sobrecarga

As baterias utilizadas nesta dissertação são tradicionalmente limitadas a uma tensão de 4,2 V/Célula, com uma tolerância baixa à volta de 50 mV/Célula. Variantes deste tipo de baterias com valores de capacidade maior conseguem porém chegar a 4,3 V/Célula.

Aumentar a tensão de alimentação pode, em certa parte, significar menor tempo de carregamento. Hoje em dia existem várias possibilidades, existindo até níveis de acordo com a potência de carregamento, tempo de carregamento e autonomia <sup>1</sup>. Contudo, se ultrapassados os limites acima descritos a probabilidade de ocorrência de perturbações irreversíveis na bateria é maior. Neste caso a integridade do pack de baterias é colocado em causa e em consequência a segurança dos passageiros.

É recomendável que a taxa de carregamento de uma célula deste tipo seja entre 0.5C e 1C, resultando num tempo de carregamento de aproximadamente 2 horas e 30 minutos. Os produtores de baterias recomendam ainda que seja apenas atingidos SoC nos valores de 80% de forma a prolongar o tempo de vida da própria bateria. Um bom indicador de que a bateria está totalmente carregada é a descida da corrente de alimentação para valores abaixo dos 3% do seu valor nominal. A figura 3.2 ilustra exatamente esse comportamento a uma taxa de 1C, onde também é possível verificar que a tensão da bateria evolui rapidamente até 70%-80% do SoC e que a tensão é mantida constante assim que atinge os 4,2V.

---

<sup>1</sup>A Tesla apresenta as melhores opções de carregamento, sendo proprietários dos Superchargers que com carregamentos de 30 minutos fornecem uma autonomia de aproximadamente 274 km.

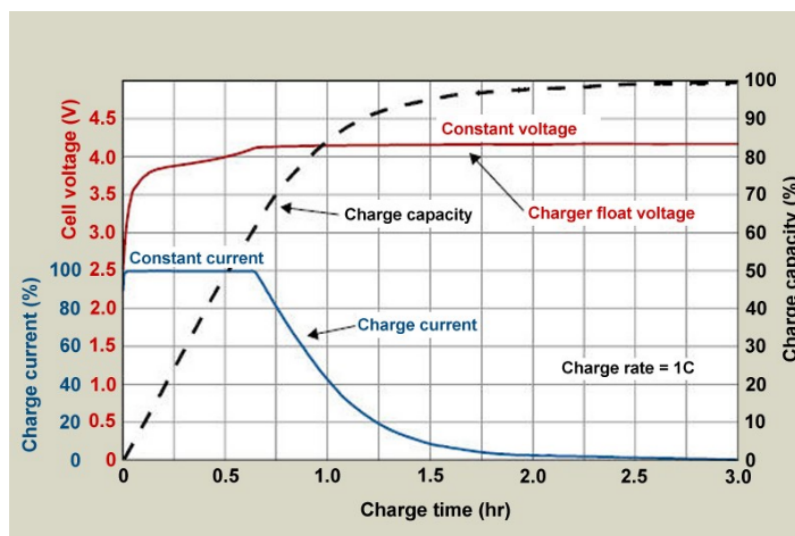


Figura 3.2: Relação entre a tensão, corrente e a capacidade de uma bateria de íons de Lítio durante o carregamento. Fonte: Cadex

Este controle de tensão é feito por circuitos externos, referidos no capítulo 2, que auxiliam o BMS. Mas, estes circuitos só oferecem segurança a perturbações externas, como por exemplo, curto circuitos. Quando as baterias são sujeitas a longos períodos de sobrecarga, isto é, tensões superiores a 4,3V/Célula o metal presente no ânodo é danificado ao nível microscópico.

Do mesmo modo, os materiais que constituem o cátodo tornam-se oxidantes, perdem estabilidade e produzem dióxido de carbono ( $CO_2$ ). A pressão no interior da bateria aumenta exponencialmente o que leva a ruturas na sua estrutura e formação de pequenas "explosões" de ar com chamas.

No sentido inverso, também é preciso especial atenção para tensões baixas durante a descarga da bateria. O valor mínimo, igualmente denominado de valor de *cut-off*, é de 2,5V/Célula. Os danos tornam-se irreparáveis quando esta situação é permitida por um longo período de tempo. Nestes casos a bateria morre e não pode ser carregada novamente.

## 3.2 Solução Proposta

Com o intuito de melhorar a performance das baterias utilizadas nos EVs e nos HEVs, os sistemas de gestão das mesmas tendem a ser cada vez mais robustos. Porém, simultaneamente à sua robustez e eficiência, é adequado que este não necessite de um grande poder computacional para ser executado.

A solução proposta nesta dissertação é composta por software que se pretende simples e eficiente na modelação de baterias de íons de Lítio. Estimar o estado de carga da bateria em qualquer situação, sem grandes discrepâncias no tempo de processamento, ser de fácil compreensão e ser passível de integrar o sistema BMS são requisitos mínimos para esta solução. Além de estimar estes parâmetros, o modelo proposto deve também prever a temperatura de uma, ou várias, células

durante descargas constantes no tempo a uma taxa de 1C, 2C, assim como descargas descontínuas no tempo.

No capítulo 2 foram revistos os modelos desenvolvidos até ao momento e de que forma dão o seu contributo para a estimação de parâmetros como o SoC e o SoH. Os modelos que mais se assemelham ao desejado são os modelos *KiBam* e o de *Difusão*.

Desta forma, também foram revistos os modelos térmicos que permitem conhecer a temperatura resultante das transferências de calor durante a carga/descarga das baterias. Muitos destes algoritmos abordam o problema tridimensionalmente, tornando-os mais complexos na fase de projeto e computacionalmente mais pesados.

O modelo eletrotérmico sugerido, resulta da conjugação entre um circuito elétrico equivalente para estimação da quantidade de carga da bateria em tempo real e um modelo térmico de determinação do calor gerado pela célula ou células. O modelo será posteriormente validado com uma comparação entre experiência laboratorial e simulação.

## Capítulo 4

# Modelo Eletrotérmico

Neste capítulo dá-se ênfase à forma como foram desenvolvidos quer o modelo elétrico quer o modelo térmico, assim como a forma escolhida para os parametrizar. Em primeiro lugar são explicados os processos físicos que dão origem às equações diferenciais utilizadas de base para o modelo.

No caso elétrico, são analisadas as equações de Fick assim como a relação existente entre o SoC e a tensão aos terminais da bateria. No caso térmico será analisada a distribuição do calor gerado durante o funcionamento da bateria, ao longo do seu volume. A análise é simplificada a uma dimensão e é utilizada a equação geral do calor como ponto de partida.

Estes processos são todos explicados neste capítulo, que finaliza demonstrando a passagem do modelo dos ambientes de simulação para o software em C desenvolvido no IDE DAVE 3.1.10.

### 4.1 Modelo Elétrico

Diversos modelos relacionam aproximadamente o tempo de vida da bateria com parâmetros mensuráveis como a tensão aos seus terminais. De uma forma simplista, o tempo de vida da bateria é o tempo em que a tensão aos seus terminais ultrapassa um certo limite mínimo. Estimar o estado de carga pela tensão da bateria é errado e a figura 3.2 mostra exatamente a razão para esta afirmação. É possível verificar que a evolução da tensão na bateria não é diretamente proporcional à evolução do SoC. Para valores constantes de tensão da bateria, o SoC pode valer 70%, 85% ou até 90%.

O modelo apresentado nesta dissertação e desenvolvido por [16, 28], determina o SoC através de um circuito elétrico equivalente resultante de fenómenos de difusão que ocorrem na bateria. A tensão da bateria é depois calculada em função do SoC e da sua resistência interna. O erro do modelo é calculado como a diferença entre esta tensão  $V_{SoC}$  e a tensão real da bateria.

Para a concessão deste modelo a primeira assunção considerada é a igualdade entre as reações eletroquímicas que ocorrem entre o eletrólito e o ânodo e entre o eletrólito e o cátodo. Assim, a bateria é apenas analisada até metade da sua largura e é assumido que acontece exatamente

o mesmo na metade oposta [13]. A configuração real da bateria pode então ser aproximada ao esquema da figura 4.1.

Em 1855, Adolf Fick desenvolveu um conjunto de equações que permitem conhecer o coeficiente de difusão molecular. O modelo elétrico desta dissertação tem como base essas mesmas leis de Fick. A equação 4.1, primeira lei, relaciona o fluxo de carga com a concentração de espécies em regime permanente. Assim, ficou demonstrado que o fluxo de carga é orientado de zonas com maior concentração de elétrons para zonas mais pobres e que esse movimento se realiza a uma taxa proporcional ao gradiente de concentração.

$$J = -D \frac{\partial \phi(x,t)}{\partial x} \quad (4.1)$$

Onde é possível identificar que  $J$  é o fluxo de difusão [ $mol/m^2 \cdot s$ ],  $D$  é a difusividade ou coeficiente de difusão [ $m^2/s$ ],  $\phi$  é a concentração ou quantidade de substância por unidade de volume [ $mol/m^3$ ] e  $x$  a posição [ $m$ ].

A equação geral de continuidade<sup>1</sup> de massa pode ser adaptada a este caso como sendo:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot J = 0 \quad (4.2)$$

Da combinação entre as equações 4.1 e 4.2, surge a segunda lei de Fick, 4.3. Desta equação observa-se que a única variável dependente é a concentração  $\phi(x,t)$ .

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \phi(x,t)}{\partial x^2} \quad (4.3)$$

Como referido anteriormente, qualquer processo físico descrito por equações diferenciais pode ser convertido em circuitos elétricos. As equações diferenciais são resolvidas por qualquer um dos métodos existentes (Transformada de Laplace, Método de Newton, Diferenças Finitas, etc.). Partindo deste princípio, o modelo desenvolvido é a solução analítica das leis de Fick [29].

No modelo analítico de difusão revisto no capítulo 2, são utilizadas três condições fronteira de forma a resolver o sistema de equações diferenciais [29, 17, 13]. A primeira, para  $x = 0$ , relaciona o fluxo  $J$  com a superfície do eletrodo negativo:

$$J(0,t) = \frac{i(t)}{\nu FA} \quad (4.4)$$

$F$  é a constante de Faraday,  $\nu$  é o número de elétrons associados à reação eletroquímica e  $A$  é a área do eletrodo. A equação 4.4, resulta em:

$$D \frac{\partial \phi(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{i(t)}{\nu FA} \quad (4.5)$$

Para  $x = L$ , isto é, metade da espessura da bateria, o fluxo é considerado nulo resultando:

$$J(L,t) = 0 \quad (4.6)$$

<sup>1</sup>Uma equação de continuidade descreve uma lei de conservação de massa, quer integral quer diferencialmente.



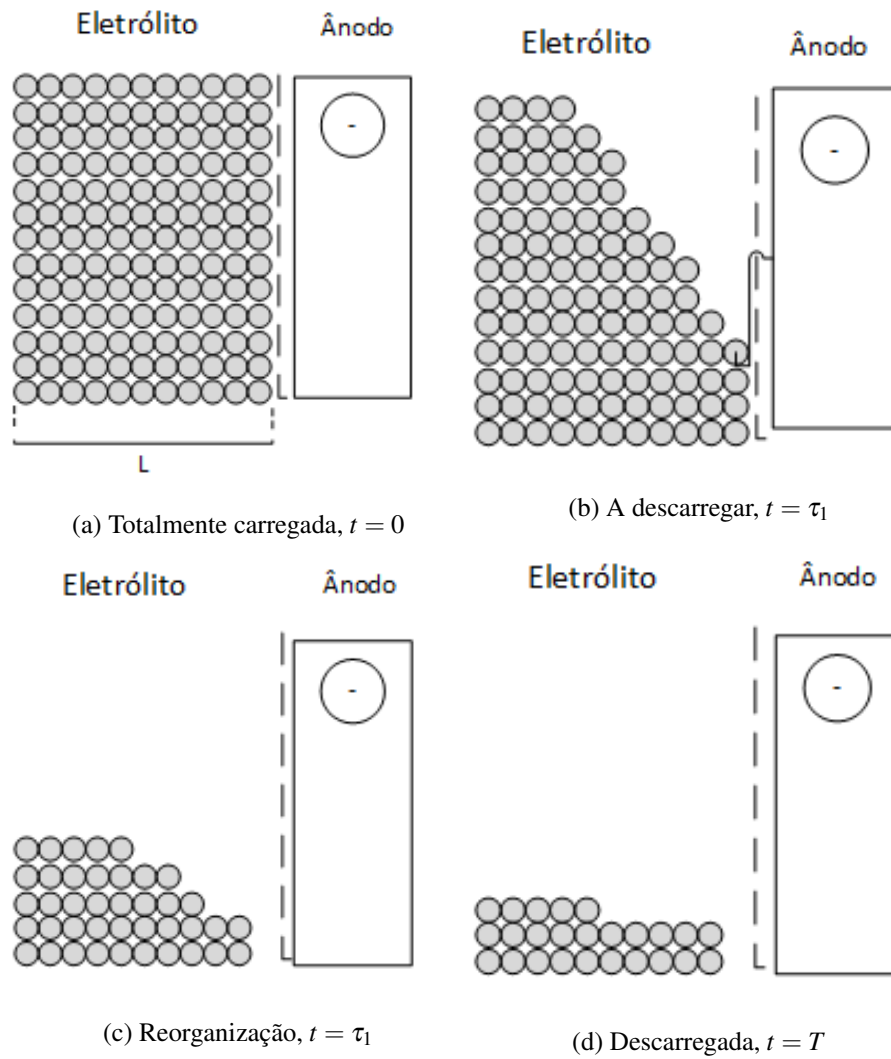


Figura 4.1: Modelo físico da bateria, adaptado de [13]

Resultado que leva à segunda condição:

$$D \frac{\partial \phi(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0 \quad (4.7)$$

Neste ponto, a diferença para [17, 30] recai no método escolhido para encontrar a solução desejada. Como descrito no capítulo 2, o modelo de difusão serve-se da transformada de Laplace direta e inversa. No modelo desenvolvido para esta dissertação, é utilizado o método das diferenças finitas centradas (CFDM). Este método numérico aproxima equações diferenciais através de diferenças. A função de aproximação é obtida da série de Taylor da função derivada parcial.

Contudo, antes de aplicar este método é necessário formular e simplificar o problema. Em primeiro lugar, a dimensão espacial  $x$  é normalizada de forma a que  $\bar{x} = \frac{x}{L}$ . Esta conversão torna o sistema adimensional e portanto menos complexo [13].

A seguinte aproximação que permite a conversão das leis de Fick para circuitos elétricos, é

a transformação da concentração de iões  $\phi(\bar{x}, t)$  em carga  $Q$  [As]. Por cada ião que participa na reação eletroquímica,  $v$  eletrões são libertados[29, 13]. A carga na bateria pode então ser definida como:

$$Q(\bar{x}, t) = \phi(\bar{x}, t)AvF \quad (4.8)$$

Por último, o espaço considerado deve ser discretizado. O eletrólito é então decomposto em  $n$  partes iguais com espaçamento entre elas de valor  $\alpha = \frac{1}{n}$ .

Com a normalização e transformações descritas, resulta um novo conjunto de equações 4.9 e condições fronteira 4.10.

$$\begin{cases} -J(\bar{x}, t)AvF = \frac{D}{L} \frac{\partial Q(\bar{x}, t)}{\partial \bar{x}} \\ \frac{\partial Q(\bar{x}, t)}{\partial t} = \frac{D}{L^2} \frac{\partial^2 Q(\bar{x}, t)}{\partial \bar{x}^2} \end{cases} \quad (4.9)$$

$$\begin{cases} \left. \frac{D}{L} \frac{\partial Q(\bar{x}, t)}{\partial \bar{x}} \right|_{x=0} = i(t) \\ \left. \frac{D}{L} \frac{\partial Q(\bar{x}, t)}{\partial \bar{x}} \right|_{x=1} = 0 \end{cases} \quad (4.10)$$

Aplicando o método CFDM ao segundo termo da segunda equação do conjunto 4.9, é gerado um sistema de equações tanto maior quanto maior o número de divisões consideradas,  $n$ .

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_1(t)}{\partial t} &= \frac{1}{\alpha} \left[ \frac{D}{\alpha L^2} (Q_2(t) - Q_1(t) - i(t)) \right] \\ \frac{\partial Q_2(t)}{\partial t} &= \frac{1}{\alpha} \left[ \frac{D}{\alpha L^2} ((Q_3(t) - Q_2(t)) - (Q_2(t) - Q_1(t))) \right] \\ &\dots \\ \frac{\partial Q_{n-1}(t)}{\partial t} &= \frac{1}{\alpha} \left[ \frac{D}{\alpha L^2} ((Q_n(t) - Q_{n-1}(t)) - (Q_{n-1}(t) - Q_{n-2}(t))) \right] \\ \frac{\partial Q_n(t)}{\partial t} &= \frac{1}{\alpha} \left[ \frac{D}{\alpha L^2} (-Q_n(t) - Q_{n-1}(t)) \right] \end{aligned}$$

Observando o conjunto de equações é possível fazer uma associação quase direta com as equações matemáticas que resultam de circuitos elétricos. As cargas de cada divisão discretizada no espaço  $0 < \bar{x} < 1$ , são tensões nos nós do circuito elétrico equivalente.

$$\begin{aligned} C_1 \frac{\partial V_1(t)}{\partial t} + \frac{(V_1(t) - V_2(t))}{R_{12}} + i(t) &= 0 \\ C_2 \frac{\partial V_2(t)}{\partial t} + \frac{(V_2(t) - V_1(t))}{R_{12}} + \frac{(V_2(t) - V_3(t))}{R_{23}} &= 0 \\ &\dots \\ C_{n-1} \frac{\partial V_{n-1}(t)}{\partial t} + \frac{(V_{n-1}(t) - V_{n-2}(t))}{R_{n-1, n-2}} + \frac{(V_{n-1}(t) - V_n(t))}{R_{n-1, n}} &= 0 \end{aligned}$$

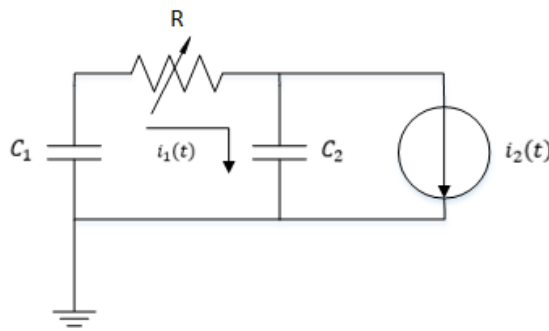


Figura 4.2: Circuito Elétrico equivalente

Como referido em [17], os primeiros 10 termos da série já permitem boas previsões do tempo de vida da bateria. No modelo apresentado, a série foi reduzida a 2 termos, isto é, a duas malhas RC, figura 4.2.

Para que este modelo fique completo, o funcionamento da bateria deve ser aproximado usando um esquema elétrico equivalente em que os elementos elétricos são escalonados de acordo com o SoC e com a direção da corrente da bateria, esta última que varia entre carga e descarga [19]. Neste sentido é introduzido um circuito extra ao esquema da figura 4.2.

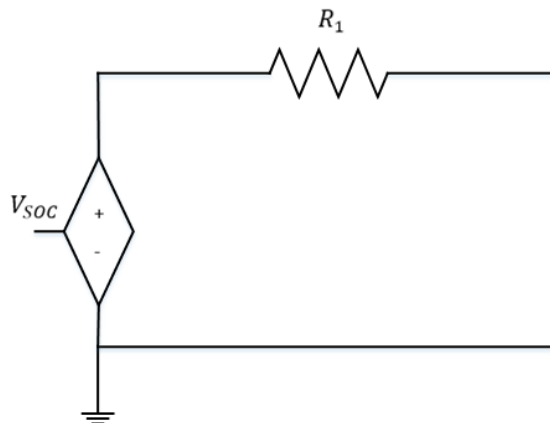


Figura 4.3: Circuito da Bateria dependente do SoC e da corrente da bateria.

No circuito da figura 4.3,  $R_1$  é a resistência série e a tensão aos seus terminais é a tensão terminal da bateria, isto é, a diferença de potencial entre a tensão da bateria estimada pelo SoC ( $V_{SoC}$ ) e a tensão efetiva da bateria.

A validação do modelo elétrico aqui descrito foi realizada a partir da comparação com modelos já conhecidos, como por exemplo o de Difusão e *Peukert*. Os resultados obtidos permitiram verificar que o modelo é bastante satisfatório, apresentando inclusivamente erros de 0% para correntes de elevada e baixa intensidade. O erro relativo máximo obtido é de 4.88% para uma corrente de 3 mA, enquanto que o modelo de Difusão, *Peukert* e KiBaM chegam a ter erros de 9.21%, 107.30% e 9.21% respetivamente [28].

Os testes práticos feitos à bateria permitiram assim retirar valores necessários à aplicação do algoritmo de otimização. As características da bateria definidas pelo fabricante e os resultados dos testes de validação podem ser consultados no anexo A.

#### 4.1.0.1 Estimação do SoC

O método de estimação do estado de carga atual das baterias é feito através da aplicação de um filtro de Kalman estendido (EKF) [28]. Um filtro de Kalman por si só é preferencialmente aplicado a sistemas lineares, o que não acontece no sistema desta dissertação. As baterias de íons de Lítio funcionam a partir de processos que dão origem a equações não-lineares.

A utilização deste método requer a sua formulação em espaço de estados discreto, como descrito na secção 4.5.

No circuito da figura 4.3, o SoC é convertido numa tensão  $V_{SoC}$  que corresponde à tensão em circuito aberto do modelo elétrico. A tensão aos terminais da resistência série  $R_s$  pode ser calculada através de modelos como o Modelo de *Shepherd*, Modelo Universal de *Unnewehr* e o Modelo de Nernst. Contudo os resultados obtidos destes modelos não foram os indicados, e a comparação entre os erros desses modelos pode ser consultada no anexo B.

A equação utilizada nesta dissertação é fruto do trabalho realizado em [28]. Os ensaios realizados permitem obter a OCV da bateria, isto é, instantes em que a corrente é praticamente zero. Esses instantes são conseguidos através de descargas descontinuas no tempo.

Com o método de *Coloumb Counting* e com os dados retirados dos ensaios, os valores do SoC associados podem então ser calculados. A curva resultante do cruzamento dos valores da tensão em circuito aberto e do SoC pode ser vista na figura .

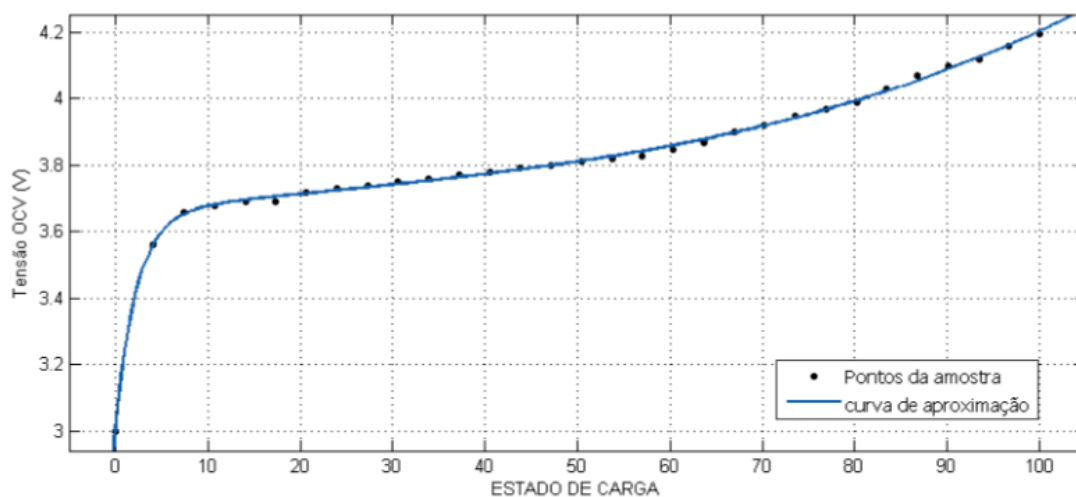


Figura 4.4: Curva OCV-SoC para determinação dos parâmetros da função  $V_{SoC}$

$$V_{SoC}(V_{C2} * k) = a(\exp(1 - bV_{C2}k)) + c(V_{C2}k)^3 + d(V_{C2}k)^2 + e(V_{C2}k) + f \quad (4.11)$$

Tabela 4.1: Elementos da função  $V_{SoC}$ 

Elemento	Valores encontrados
a	-0.2402
b	0.4438
c	5.358e-7
d	-3.349e-5
e	0.003508
f	3.653

Na equação 4.11,  $V_{C2}$  é a tensão aos terminais do condensador 2 do circuito elétrico da figura 4.2.

A partir desta curva foram encontrados os valores para os elementos da função  $V_{SoC}$ . É possível verificar que a função proposta em [28] aproxima satisfatoriamente os pontos da amostra, quase sobrepondo os mesmos.

## 4.2 Parametrização do Modelo Elétrico

Os valores dos componentes do circuito elétrico da figura 4.2,  $R_{ij}, C_n$ , são de mais difícil obtenção por dependerem de parâmetros físicos normalmente desconhecidos, como por exemplo, o coeficiente de difusão  $D$  [29].

Estes foram portanto estimados recorrendo ao algoritmo de otimização denominado por arrefecimento simulado ou em Inglês Simulated Annealing (SA). Esta meta-heurística de aproximação de parâmetros permite, dentro de um espaço de procura, localizar valores considerados ótimos localmente. A vantagem na sua utilização é o facto de identificar ótimos locais a partir de uma função objectivo e de uma variável que determina a aleatoriedade da busca. À medida que o algoritmo evolui ou passado um número fixo de iteração, a solução ótima é identificada.

Os testes realizados a correntes constantes, permitiram definir os valores para os condensadores  $C_1, C_2$  de forma a minimizar a energia do sistema[29].

A partir de ensaios laboratoriais é possível definir os valores para os dois condensadores e para a resistência entre eles. Os valores iniciais que o algoritmo SA recebe são a capacidade nominal da bateria, tempos de descarga, corrente de descarga, o erro médio relativo e o número de iterações que servem de limite à estimação [28, 16].

A partir de diferente descargas contínuas e tempos de descarga diferentes para cada corrente, o algoritmo SA definiu para cada parâmetro o valor corresponde a um erro inferior a 3% [28]. Os valores para cada componente do circuito elétrico podem ser consultados na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Resultados do algoritmo SA para correntes contínuas.

Condensador $C_1$ (F)	Condensador $C_2$ (F)	Resistência R ( $\Omega$ )
0.2017	0.7983	360

### 4.2.1 Otimização do valor da Resistência

O valor constante da resistência elétrica  $R$  do circuito da figura 4.2 é um dos componentes que, segundo [16, 28], pode ser otimizado para diferentes níveis de carga a que a bateria está sujeita, isto é, para diferentes valores de corrente de descarga.

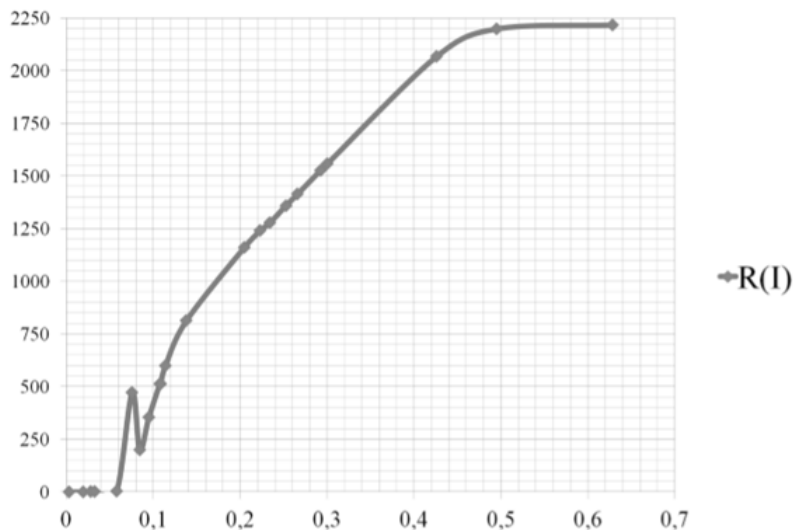


Figura 4.5: Evolução da resistência de ligação com a corrente de descarga. Adaptado de [16]

Uma vez que o modelo elétrico desenvolvido resulta de fenómenos de difusão no interior da bateria, intuitivamente se compreende que um aumento de corrente traduz-se numa diminuição de espécies por difusão e conseqüentemente ocorre uma diminuição na capacidade. Outra conseqüência direta é a variação da resistência interna da bateria.

É importante também notar que esta aproximação é realizada assumindo que os valores dos condensadores  $C_1$  e  $C_2$  se mantêm constantes.

Esta variação é aproximada através de funções polinomiais dimensionadas para valores de corrente baixas, médias e altas. Os resultados destes ensaios podem ser consultados no Anexo B.

$$R = -0.0341i^3 + 3.419i^2 - 93.9i + 700 \quad (4.12)$$

A Aplicação do EKF ao modelo elétrico em conjunto com os algoritmos de otimização dos seus parâmetros conferem uma base sólida à solução proposta.

## 4.3 Modelo Térmico

Em análise de transferências de calor, a única forma de energia de interesse é aquela que permita a diferença de temperatura do sistema, isto é, calor ou energia térmica [21]. O modelo térmico pretende descrever o processo de aquecimento da bateria e o calor gerado no seu interior quando esta se encontra em descarga. O aquecimento das baterias é proporcional à exigência a

que esta está submetida, o que significa que à medida que a corrente da bateria aumenta a sua temperatura também aumenta.

A evolução da temperatura tem influência direta nos valores dos parâmetros da bateria, como por exemplo, na sua condutividade térmica e difusividade térmica. De forma a completar o sistema elétrico apresentado, o modelo aqui descrito e desenvolvido em [27] estima a temperatura de  $n$  pontos no interior da bateria de íões de Lítio .

O calor pode ser transmitido de várias maneiras: convecção, radiação e condução<sup>2</sup>. A maioria dos problemas de condução do calor tem como solução a primeira lei da termodinâmica, ou seja, uma versão da lei da conservação de energia [31]. Neste problema em específico é utilizada a equação geral de difusão do calor, que em coordenadas cartesianas é descrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \bar{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.13)$$

onde  $k_x$ ,  $k_y$  e  $k_z$ , são as condutividades térmicas em cada dimensão considerada [W/mK],  $\rho$  é a densidade [kg/m<sup>3</sup>],  $c_p$  a capacidade térmica [J/kgK] e  $\bar{q}$  o calor gerado por unidade de volume [W/m<sup>3</sup>]. Depois de tomadas algumas considerações iniciais, o problema pode ser formulado e simplificado.

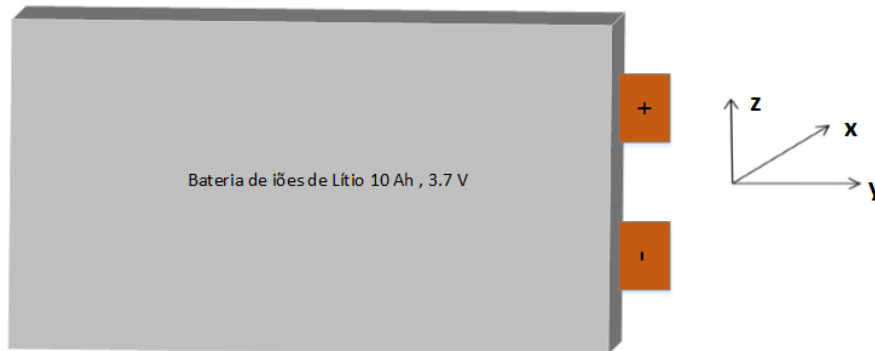


Figura 4.6: Coordenadas adotadas no modelo térmico.

Os valores iniciais para a condutividade térmica  $k$ , coeficiente de convecção  $h$ , calor específico  $c_p$  e massa volúmica  $\rho$  da bateria são considerados constantes durante a simulação. Os materiais que a constituem são considerados homogêneos e sem transferência de massa e as propriedades da célula são assumidas isotrópicas, isto é, as suas propriedades são independentes da direção considerada [21, 31]. A transferência de calor por radiação é assumida como nula e a distribuição do calor pela bateria assume-se uniforme.

A equação 4.13 resulta então na seguinte:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{k} = \frac{\bar{q}}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.14)$$

<sup>2</sup>A condução do calor num meio é provocado pela transferência de energia entre partículas mais carregadas para partículas adjacentes com menor carga.

A equação de difusão de calor simplificada 4.14 tridimensional pode ser aproximada a uma dimensão uma vez que a condutividade térmica depende da área e do comprimento do material. Das três dimensões ( $x$  - profundidade,  $y$  - largura,  $z$  - altura), a menor é a dimensão  $x$ . O gradiente de temperatura vai ser maior nessa direção, portanto a equação 4.14 pode ser retificada a uma dimensão [21].

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\bar{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.15)$$

Em primeiro lugar é considerado que a bateria se encontra em regime permanente e que portanto, a temperatura não varia com o tempo mas com a posição  $x$ . Para a resolução da equação proposta, são impostas uma condição inicial e duas fronteira.

$$\begin{cases} T = T_\infty, & t = 0; \quad 0 \leq x \leq 2L \\ k \frac{\partial T}{\partial x} = -h(T - T_\infty), & x = 0 \\ k \frac{\partial T}{\partial x} = -h(T - T_\infty), & x = 2L \end{cases} \quad (4.16)$$

Sendo  $L$  metade da espessura da bateria, como visto no subcapítulo anterior. A primeira equação do conjunto 4.16, determina que no instante inicial de funcionamento a temperatura quer no interior quer das paredes da bateria é igual à temperatura do meio em que esta está inserida. As duas condições fronteira explicitam que a única forma de transferência de calor nas paredes da célula se realiza por convecção [31, 21].

Com a formulação do problema concluída, a equação 4.15 pode então ser resolvida através do método de diferenças finitas centradas.

$$\frac{\partial^2 T_n}{\partial x_n^{*2}} = \frac{T_{n+1} - 2T_n + T_{n-1}}{a^2}, \quad x^* = \frac{x}{2L} \quad (4.17)$$

Onde  $a = \frac{1}{1-n}$  e  $n$  é o número de divisões/nós do espaço considerado. Para este modelo, como dito anteriormente, a dimensão escolhida tem como comprimento a espessura da bateria que foi dividida em 11 nós. As equações fronteira para o primeiro ( $n=1$ ) e último nó ( $n=11$ ) são então tidas em conta na resolução de 4.17.

As soluções finais para as fronteiras da célula são as seguintes:

$$\left[ \frac{2ahL}{a^2k} (T_1 - T_\infty) + \frac{-2T_2 - 2T_1}{a^2} \right] + \frac{L^2}{k} \bar{q} = \frac{L^2}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad x = 0 \quad (4.18)$$

$$\left[ \frac{hL}{ak} (T_{11} - T_\infty) + \frac{-T_{11} - T_{10}}{a^2} \right] + \frac{L^2}{2k} \bar{q} = \frac{L^2}{2\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad x = 2L \quad (4.19)$$

Para os nós interiores,  $n \in [2, 10]$ , a solução é a seguinte:

$$\left[ \frac{(T_{n+1})}{a^2} - \frac{(T_n - T_{n-1})}{a^2} \right] + \frac{L^2}{2k} \bar{q} = \frac{L^2}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.20)$$



Analogamente à transformação em circuito elétrico do modelo de difusão, os vários constituintes das equações 4.18, 4.19 e 4.20 podem ser traduzidos em componentes elétricos equivalentes. O circuito final de simulação pode ser visto na figura 4.7.

Tabela 4.3: Equivalências elétricas

$R_s$	$a^2$
$R_p$	$\frac{ak}{hL}$
$C_i$	$\frac{L^2}{\alpha}$
$C_f$	$\frac{L^2}{2\alpha}$
$I_i$	$\frac{L^2}{k} \bar{q}$
$I_f$	$\frac{L^2}{2k} \bar{q}$

Os nós fronteira (1 e 11) são construídos a partir da equação 4.21 e os nós interiores (2 a 10) com a equação 4.22.

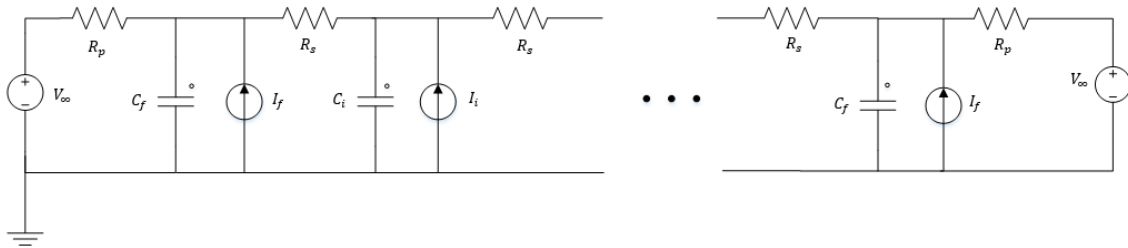


Figura 4.7: Circuito elétrico equivalente para o modelo térmico.

$$\left[ \frac{1}{R_p} (V_{11} - V_\infty) + \frac{-V_{11} + V_{10}}{R_s} \right] + I_{11} = C_{11} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.21)$$

$$\left[ \frac{(V_{n+1} - V_n) - (V_n - V_{n-1})}{R_s} \right] + I_n = C_n \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.22)$$

## 4.4 Parametrização do Modelo Térmico

Os parâmetros a considerar para a caracterização térmica da bateria são a condutividade térmica  $k$ , o calor específico  $cp$ , massa volúmica média  $\rho$  e o coeficiente de convecção  $h$  da bateria. Estes valores vão servir de entrada ao modelo para que, à saída, seja obtida a distribuição de temperatura na bateria.

Os valores típicos para estas grandezas em baterias de íões de Lítio podem ser consultados na tabela 4.4.

A densidade da bateria é facilmente calculada a partir da massa e volume fornecidos pelo fabricante, sendo que o seu valor ronda os 2118 [kg/m<sup>3</sup>]. Em [21], a célula é considerada uma série de células elementares contíguas. A partir das camadas constituintes da bateria (elétrodo,

Tabela 4.4: Valores típicos para os parâmetros térmicos. Adaptado de [21]

Parâmetro	Gama de valores típicos
$cp$ [J/kgK]	650 - 950
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1700 - 2500
$h$ [W/m <sup>2</sup> K]	10 - 150
$k$ [W/mK]	0.40 - 0.85

separador, eletrólito), da sua composição química e espessura é possível encontrar o valor tablado para a condutividade térmica da célula, 65.82 [W/mK] [31].

Contudo, só é considerada a dimensão  $x$  neste modelo, de acordo com a referência da figura 4.6. Assim, a nova condutividade térmica pode ser calculada através da expressão 4.23, onde  $R_{eq}$  é a resistência térmica equivalente e  $L_{tot}$  o comprimento total das camadas que constituem a bateria.

$$k_x = \frac{R_{eq}}{L_{tot}} \quad (4.23)$$

A condutividade na direção considerada é aproximadamente 0.66 [W/mK]. O valor para o calor específico é mais complexo de calcular e devido à dependência de programas especializados para esse efeito [21], é utilizado um valor padrão de aproximadamente 795 [J/kgK].

Das equações 4.18 e 4.19 é possível verificar que os valores desconhecidos são a difusividade térmica  $\alpha$ , o coeficiente de convecção  $h$  e o calor gerado na bateria  $\bar{q}$ . O primeiro é o quociente entre a capacidade do objecto de conduzir energia térmica e a capacidade de armazenar energia térmica. Pode ser calculada da seguinte forma, dependendo apenas de parâmetros já conhecidos.

$$\alpha = \frac{k}{\rho cp} \quad (4.24)$$

O coeficiente de convecção é calculado através de correlações empíricas baseadas em números de Reynolds e Nussel. Da seguinte expressão:

$$h = \frac{Nu k_{ar}}{D_h} \quad (4.25)$$

em que  $Nu$  é o número de Nussel,  $D_h$  é o diâmetro hidráulico e a bateria é assumida em contacto com o ar, daí ser considerado a condutividade térmica do ar  $k_{ar}$ . Verificados os valores tablados para os números de Nussel e Reynolds, que dependem das dimensões da bateria e da sua geometria, o valor para  $h$  pode ser calculado.

Nesta dissertação é assumido o valor calculado em [27].

O calor gerado  $\bar{q}$ , pode ser calculado através da expressão 2.15. O último termo desta equação pode ser desprezado para baterias de íões de Lítio [21], mas nesta dissertação substitui-se o mesmo por uma função dependente do SoC.

A função de aproximação , foi desenvolvida em [27] por meio de testes laboratoriais. A dependência do SoC no calor gerado na bateria pode ser estimado.

$$f(\text{SoC}) = 10 \cdot e^{(-0.063 \cdot |I| - \text{SoC})} \quad (4.26)$$

Estes valores vão, posteriormente, sofrer pequenas alterações devido à aplicação do algoritmo de otimização SA. Para cada teste realizado os seus valores são atualizados e introduzidos no modelo.

## 4.5 Algoritmo de Otimização dos parâmetros térmicos

O método de escolha dos parâmetros para o modelo térmico, como para o elétrico, e possível otimização dos mesmos foi o arrefecimento simulado (SA). O nome e método de execução deste algoritmo advém de um processo utilizado na metalúrgica que permitia a eliminação de imperfeições nos metais e que os suplementava com melhores características termodinâmicas e mecânicas.

Para a concepção deste algoritmo é necessário ter em conta alguns aspetos construtivos que no final, podem desencadear resultados muito diversos. O termino do algoritmo é ditado pelo numero de iterações definidas ou pelo conceito de temperatura, isto é, pelo numero de pontos percorridos no algoritmo. Para este caso é necessário então definir uma temperatura inicial e uma temperatura final do algoritmo.

A solução inicial é um grupo de variáveis de interesse que se pretende otimizar. Estas vão servir de entrada às funções objectivo que calculam uma nova energia. O seu valor deve ser minimizado para que o algoritmo convirja para um solução local ótima. A cada iteração do algoritmo, cabe a uma função de probabilidade determinar a percentagem de aceitação da nova solução baseada na comparação dos valores de energia consecutivos.

No trabalho desenvolvido em [28], os componentes do circuito elétrico equivalente para o modelo elétrico já são otimizados por um algoritmo semelhante ao desenvolvido nesta dissertação. Será então só considerada a otimização dos parâmetros para o modelo térmico: condutividade térmica ( $k$ ), coeficiente de convecção ( $h$ ), calor específico ( $cp$ ) e massa volúmica da bateria ( $\rho$ ). Estes parâmetros farão então parte do vector para a solução inicial do algoritmo. Os seus valores iniciais, de acordo com o subcapítulo anterior, podem ser consultados na tabela 4.5.

Tabela 4.5: Solução inicial utilizada no algoritmo SA.

Parâmetro Térmico	Valor
$k$	0.66
$h$	10
$\rho$	2100
$cp$	795

Tabela 4.6: Parâmetros do algoritmo SA.

Parâmetro	Valor
Temperatura Inicial	2000
Coefficiente de Arrefecimento	0.8
Temperatura Final	0.17
Iterações Rejeitadas	200
Iterações Aceites	20
Energia Desejada	0.1

Os valores de energia, no caso deste trabalho, são os erros entre o valor de temperatura medidos e os simulados. Temperatura essa que não tem nada a ver com as temperaturas do algoritmo.

Há medida que as novas soluções são aceites e o algoritmo incrementa, é adicionada um fator de arrefecimento à temperatura do algoritmo. Esta vai fazer com que a temperatura do algoritmo decresça e, se ultrapassar o valor mínimo definido previamente, que este seja interrompido.

Para uma melhor percepção do algoritmo pode-se recorrer ao fluxograma da figura 4.8.

Os vários parâmetros do algoritmo SA podem ser consultados na tabela 4.6.

Os vários parâmetros não são escolhidos ao acaso. No caso da temperatura inicial, normalmente são escolhidos valores que permitam que o algoritmo aceite as primeiras iterações. Para que isto se verifique, é escolhido um valor quase absurdo para a temperatura inicial, como é o caso.

O coeficiente de arrefecimento determina a velocidade de rejeição de más soluções. Quanto maior este parâmetro, mais tempo leva a descartar uma solução má, mas ao mesmo tempo melhora a qualidade da procura. Os valores típicos para este parâmetro variam entre 0.7 e 0.9.

A temperatura final é escolhida tendo em conta três fatores: I) o número de iterações do algoritmo; II) O comportamento da função de aceitação perto de temperaturas finais para soluções negativas; III) O seu comportamento perante soluções válidas;

As iterações aceites e rejeitadas definem um limite superior e inferior para o número de soluções novas geradas. Os valores típicos para estes parâmetros foram os considerados para este algoritmo.

A energia desejada, como dito anteriormente, define o erro ótimo entre a temperatura simulada e a medida e conseqüentemente para uma possível interrupção do algoritmo. Com o valor considerado de 0.1% a simulação já obteria valores bastante satisfatórios.

## 4.6 Modelo em C

De forma a poder ser implementado num microcontrolador, o modelo desenvolvido deve ser convertido em linguagem de programação C. O microcontrolador escolhido para esta tarefa é o XMC 4500 da Infineon por apresentar características mais que suficientes ao seu processamento. Um resumo deste microcontrolador pode ser consultado na tabela 4.7.

O primeiro passo na conversão do modelo é a sua representação em espaço de estados discreto. Um sistema nesta representação toma a seguinte forma:

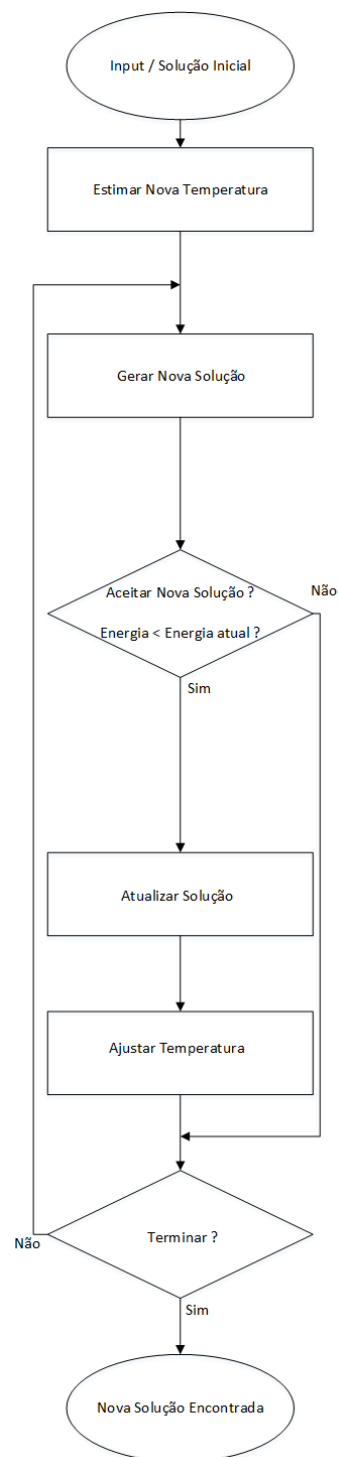


Figura 4.8: Fluxograma para o algoritmo Simulated Annealing.

Tabela 4.7: Características principais do XMC 4500

	XMC 4500
Processador	32-bit ARM® Cortex-M4, 120 Mhz
Memória Flash	1,024 kB
Memória RAM	160 kB SRAM
Periféricos	Ethernet MAC, USB 2.0, MultiCAN, Full-CAN, USIC, UART, SPI, LED, SD, EBU
ADC	4 ADC de 12-bit, 8 canais

$$\begin{cases} x(k+1) = Ad \cdot x(k) + Bd \cdot u(k) \\ y = Cd \cdot x(k) + Dd \cdot u(k) \end{cases} \quad (4.27)$$

Onde as matrizes Ad e Bd são calculadas a partir da transformação 4.28, e as matrizes Cd e Dd são equivalentes à sua representação em espaço de estados contínuo.

$$Ad = e^{AT} \quad Bd = {}^3A^{-1}(e^{AT} - I)B \quad (4.28)$$

Para o modelo elétrico as variáveis de interesse são as tensões nos condensadores  $C_1$  e  $C_2$ . Assim sendo, as variáveis de estado são definidas como:

$$x = \begin{bmatrix} V_{C2} & V_{C1} \end{bmatrix}^T \quad (4.29)$$

Pelo circuito da figura 4.2, é possível escrever as equações que regem este sistema.

$$\begin{cases} \dot{V}_{C2} = \frac{1}{RC_2}(V_{C1} - V_{C2}) - \frac{1}{C_2} \cdot i_2(t) \\ \dot{V}_{C1} = -\frac{1}{RC_1}(V_{C1} - V_{C2}) \\ V_{out} = V_{SoC} - R_1 \cdot i_2(t) \end{cases} \quad (4.30)$$

Com o conjunto de equações 4.30, as matrizes AE, BE, CE e DE podem ser descritas, assim como as suas equivalentes discretas com a aplicação das transformações 4.28. As matrizes discretas resultam em [28]:

$$AE = \begin{bmatrix} \frac{C_2 + C_1 * e^{-\frac{TC_2 + TC_1}{C_2 C_1 R}}}{C_2 + C_1} & \frac{C_1 - C_1 * e^{-\frac{TC_2 + TC_1}{C_2 C_1 R}}}{C_2 + C_1} \\ \frac{C_2 - C_2 * e^{-\frac{TC_2 + TC_1}{C_2 C_1 R}}}{C_2 + C_1} & \frac{C_1 + C_2 * e^{-\frac{TC_1 + TC_2}{C_1 C_2 R}}}{C_2 + C_1} \end{bmatrix}$$

$$BE = \begin{bmatrix} -\frac{TC_2 + TC_1 + (C_1)^2 R * e^{-\frac{TC_2 + TC_1}{C_2 C_1 R}}}{(C_2 + C_1)^2} \\ -\frac{TC_2 + TC_1 - C_2 C_1 R + C_2 C_1 R * e^{-\frac{TC_2 + TC_1}{C_2 C_1 R}}}{(C_2 + C_1)^2} \end{bmatrix}$$

<sup>3</sup>se A for invertível

$$CE = \begin{bmatrix} 0 & -b \cdot k \cdot a \cdot \exp((1 - bV_{C2}k) + 3 \cdot c \cdot k^3 \cdot (V_{C2})^2) + 2 \cdot d \cdot k^2 \cdot V_{C2} + e \cdot k \end{bmatrix}$$

$$DE = \begin{bmatrix} -R_1 \end{bmatrix}$$

Para o modelo térmico, os passos são exatamente os mesmos. As equações neste caso são descritas atendendo ao circuito da figura 4.7, faltando escolher o número de nós. Considerando a direção  $x$  e sabendo que quanto maior o número de nós, mais complexo será o sistema, o número mínimo de nós possível é 3.

Dois dos nós modelam as paredes da bateria e o restante espaço entre as duas fronteiras pode ser dividido em  $n$  nós como visto anteriormente. Para 3 nós, o circuito elétrico equivalente fica reduzido ao circuito da figura 4.9.

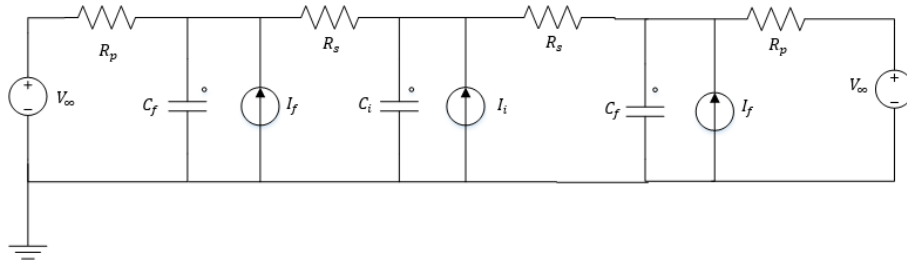


Figura 4.9: Circuito elétrico equivalente para o modelo térmico com 3 nós.

Através do método da tensão nos nós, sabendo que o circuito tem 3 nós principais, as equações que regem este sistema elétrico são:

$$\begin{cases} \frac{V_{C_f} - V_{\infty}}{R_p} + i_{C_f} - I_f + \frac{V_{C_f} - V_{C_i}}{R_s} = 0 \\ \frac{V_{C_i} - V_{C_f}}{R_s} + i_{C_i} - I_i + \frac{V_{C_i} - V_{C_f}}{R_s} = 0 \\ \frac{V_{C_f} - V_{C_i}}{R_p} + i_{C_f} - I_f + \frac{V_{C_f} - V_{\infty}}{R_p} = 0 \end{cases} \quad (4.31)$$

Por questões de simplificação, os três condensadores vão ser numerados de 1 a 3 respectivamente, ficando assim definidas as variáveis de estado, saídas e entradas do sistema:

$$x = \begin{bmatrix} V_{C_1} & V_{C_2} & V_{C_3} \end{bmatrix}^T \quad y = \begin{bmatrix} V_{C_1} & V_{C_2} & V_{C_3} \end{bmatrix}^T \quad u = \begin{bmatrix} V_{\infty} & I_f & I_i \end{bmatrix}^T \quad (4.32)$$

As matrizes de espaço de estados para o modelo térmico são então definidas como:

$$AT = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s C_f + R_p C_f}{R_p R_s (C_f)^2}\right) & \frac{1}{R_s C_f} & 0 \\ \frac{1}{R_s C_i} & -\frac{2}{R_s C_i} & \frac{1}{R_s C_i} \\ 0 & \frac{1}{R_s C_f} & -\left(\frac{R_s C_f + R_p C_f}{R_p R_s (C_f)^2}\right) \end{bmatrix}$$

$$BT = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_p C_f} & \frac{1}{C_f} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_i} \\ \frac{1}{R_p C_f} & \frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix}$$

$$CT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$DT = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Se, porventura, o número de nós for incrementado, mantêm-se os dois nós fronteira e aumentam-se o número de nós interiores. As variáveis de estado são diretamente proporcionais ao nós escolhidos e conseqüentemente as matrizes aumentam de dimensão, o que leva a que o algoritmo seja computacionalmente mais pesado.

Após a discretização do sistema de matrizes apresentado através do mesmo método utilizado em 4.28, o algoritmo pode ser escrito em linguagem de programação C. As matrizes discretizadas para o modelo térmico não serão apresentadas por serem demasiado extensas.

No fluxograma seguinte é possível acompanhar o fluxo do algoritmo desenvolvido em C.



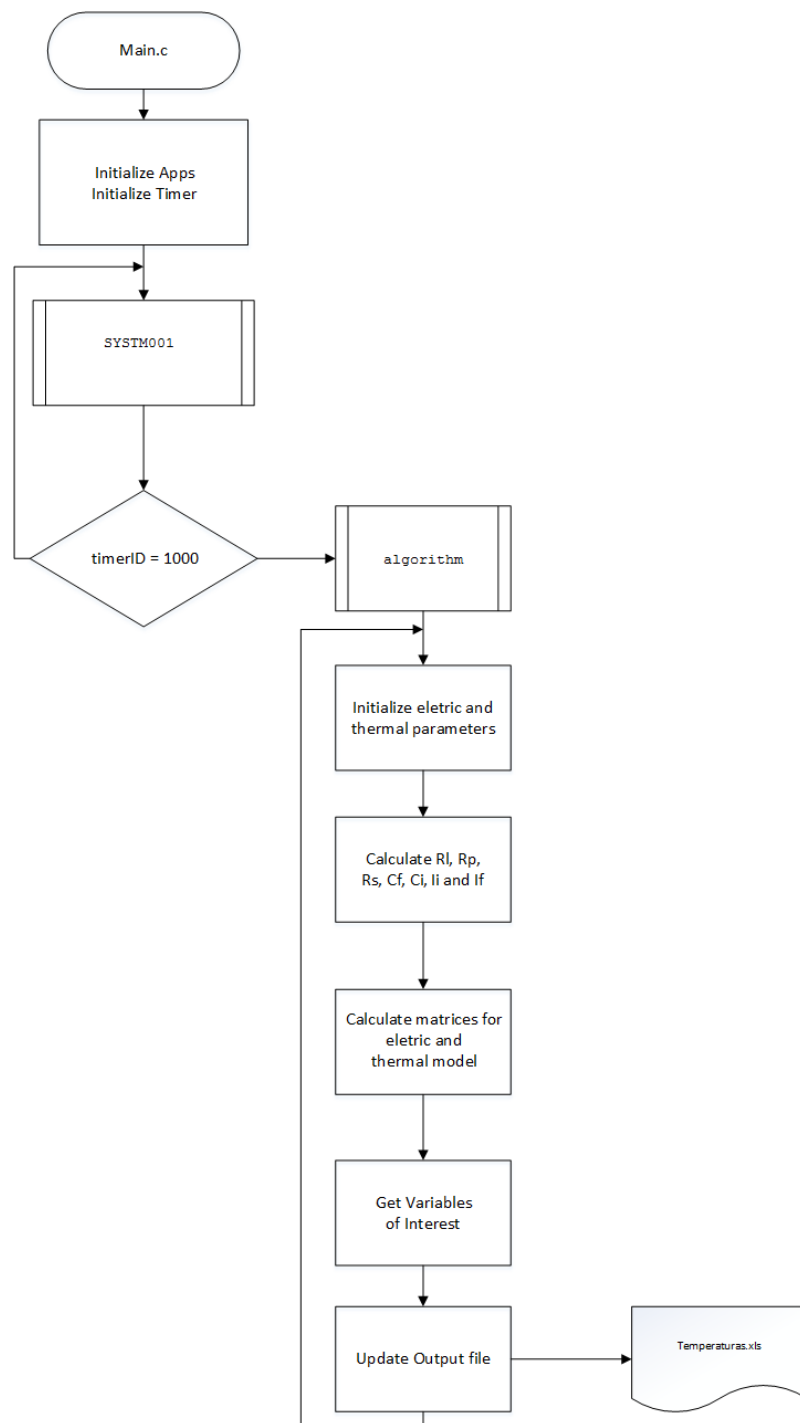


Figura 4.10: Fluxograma do algoritmo em C.



# Capítulo 5

## Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas simulações e nos testes experimentais para o trabalho proposto. No início de cada subcapítulo são introduzidas as condutas utilizadas nos testes e simulações, os materiais utilizados e eventuais problemas que possam ter ocorrido durante os testes. O principal foco desta dissertação é a comparação entre a temperatura real de uma célula de íões de Lítio e a temperatura dada pelo modelo. Apesar de se tratar de um modelo eletrotérmico e de ser calculado o SoC e estimada a respetiva tensão da bateria, esse parâmetro não é alvo de análise neste trabalho. Contudo, como visto no capítulo 4, são igualmente importantes por fazerem parte da caracterização térmica da bateria, por exemplo, no cálculo do calor gerado.

### 5.1 Simulações

Os testes realizados em ambiente de simulação servem para confirmar a evolução do algoritmo desenvolvido em linguagem de programação C. Numa primeira fase foram validadas, em MATLAB, as equações que descrevem o modelo térmico, 4.31. A sua validação constou basicamente na divisão do circuito da figura 4.9 em pequenos circuitos e na simulação da evolução das variáveis de entrada, temperatura ambiente, corrente nos nós interiores e corrente nos nós fronteira.

Concluída esta fase, o sistema foi reescrito em espaço de estados e discretizado com os seguintes comandos MATLAB:

- »  $A_d = \text{expm}(A_T * dt)$
- »  $B_d = \text{inv}(A_T) * (A_d - \text{eye}(3)) * B_T$

Obtidas as matrizes discretizadas, o algoritmo em C foi escrito no software Visual Studio. Esta versão intermédia permitiu comparar os resultados em ambiente de simulação MATLAB e os resultados com o algoritmo em C.

A diferença entre os dois algoritmos recai no cálculo dos parâmetros dos componentes para o circuito elétrico equivalente ao modelo térmico. O algoritmo em C lê, a partir de dois ficheiros de texto, os valores dos parâmetros do modelo térmico calculados a partir do SA e os valores

de corrente, tensão e SoC da bateria. As funções de cálculos desses componentes podem ser consultadas no anexo E.

No algoritmo em MATLAB foram utilizados valores constantes para  $R_p$ ,  $R_s$ ,  $C_f$ ,  $C_i$  e as correntes fronteira e interior com os mesmos valores calculados pelo algoritmo em C. Os *outputs* dos *scripts* em MATLAB podem ser consultados no anexo D.

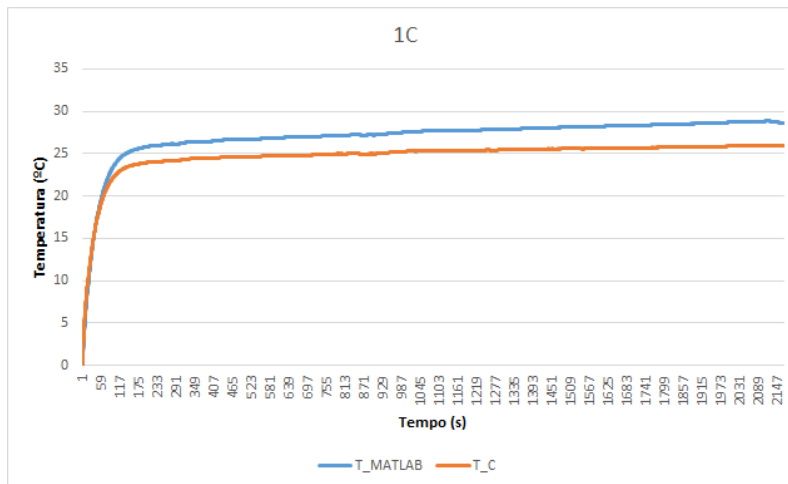


Figura 5.1: Simulações com descarga a uma taxa 1C.

A primeira descarga simulada foi a uma taxa de 1C. No gráfico da figura 5.1, verifica-se que ambas as curvas têm tendência positiva apesar de apresentarem uma diferença de 2 °C ao longo do período de simulação.

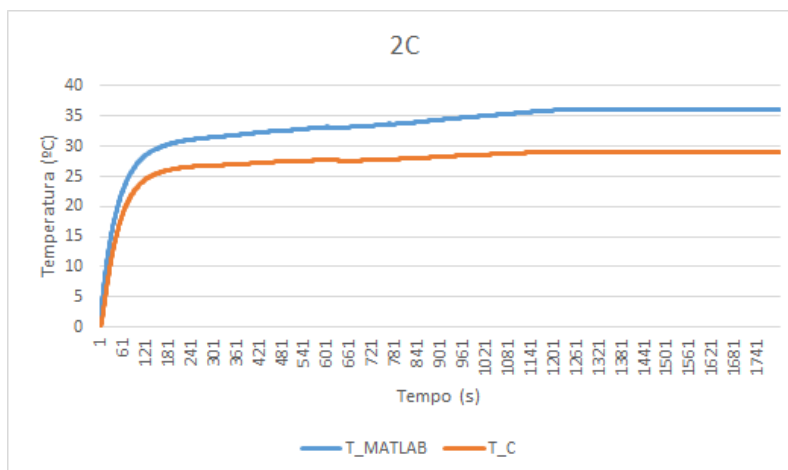


Figura 5.2: Simulações com descarga a uma taxa 2C.

O segundo teste realizado foi a uma taxa de 2C, isto é, com uma corrente de descarga contínua e igual a 19.99 A. Era expectável que a temperatura aumenta-se para valores superiores aos registados no teste com descarga a 1C, o que realmente se veio a verificar pelo gráfico da figura

5.2. Contudo, a diferença entre as duas curvas também acompanhou este crescimento, chegando mesmo a atingir os 5 °C de diferença.

Para as simulações com correntes descontínuas, figura 5.3, foram calculados os parâmetros e respectivos componentes do circuito elétrico equivalente da figura 4.9 de acordo com o perfil de corrente apresentado no anexo C.

Os resultados destas simulações são bastante interessantes uma vez que as duas curvas se sobrepõem durante quase todo o período de teste. Estes valores são também bastante promissores uma vez que o modo de condução de um EV em ambientes de grande trânsito, como por exemplo no centro de uma cidade, requer níveis de corrente semelhantes ao simulado. Isto significa que o modelo desenvolvido permitirá boas aproximações de temperatura para um perfil de condução que é bastante comum.

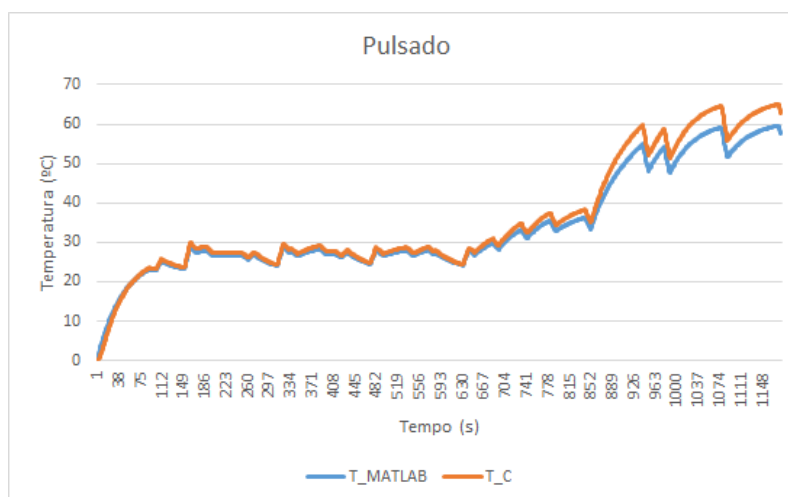


Figura 5.3: Simulações com uma descarga descontínua.

## 5.2 Ensaios Laboratoriais

O objetivo principal destes ensaios laboratoriais foi a recolha de dados relativos à temperatura real da bateria durante o seu funcionamento.

Para esse estudo, foram conduzidas descargas contínuas e descontínuas no tempo. Inicialmente a temperatura era medida a cada minuto e registada numa folha de cálculo. Essa medição era realizada em cinco pontos distintos da bateria utilizando um termómetro de infravermelhos Fluke 65, figura 5.4.

A corrente exigida à bateria era controlada e programada a partir da carga eletrónica BK Precision e do software PV8500. A estrutura do ensaio deve ser feita de forma a que as paredes da bateria fiquem em contacto com o ar. Os terminais da bateria são ligados à carga eletrónica com cabos que permitam no mínimo 40 A, o que corresponde a um teste a uma taxa de 4C.

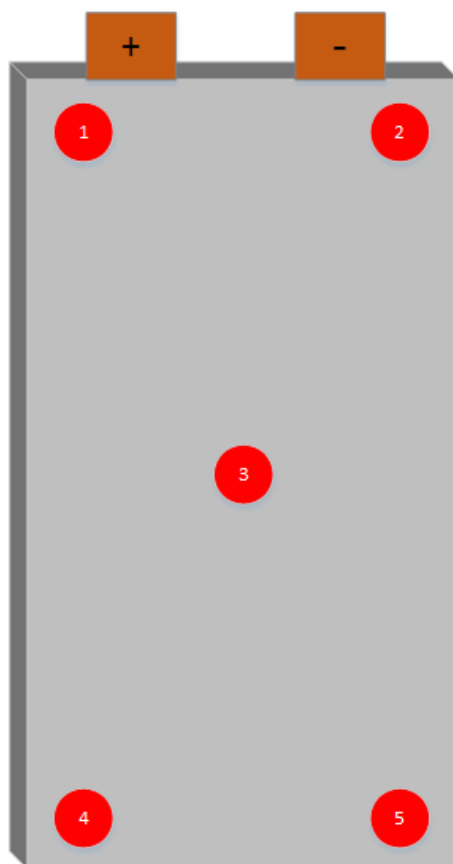


Figura 5.4: Pontos de medição da temperatura da bateria.

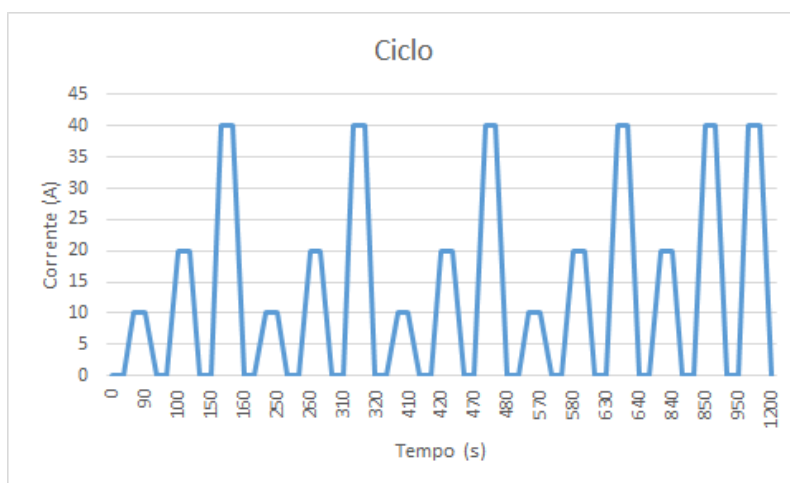


Figura 5.5: Ciclo adotado para testes pulsados.

As especificações dos testes podem ser consultadas na tabela 5.1. No início de cada teste foi medida a temperatura ambiente do laboratório de forma a que posteriormente não hajam disparidades entre  $V_{\infty}$  do modelo e a temperatura inicial de cada teste. Os testes foram realizados

num ambiente o mais escuro possível de maneira a não haver interferência com as leituras do termómetro. As portas da sala de teste mantiveram-se fechadas para evitar correntes de ar e consequentemente oscilações nas leituras da temperatura.

O perfil de corrente adotado para a descarga pulsada foi criado especialmente para estes testes e não corresponde a nenhum ciclo de teste oficial, como por exemplo, o NEDC (*New European Driving Cycle*). No anexo C é possível identificar os períodos de tempo e correntes definidas para este ciclo, resultando no perfil de corrente da figura 5.5.

Tabela 5.1: Especificações dos testes laboratoriais.

Bateria	Tipo de teste	Corrente	Tempo
10 Ah	1C	9.99 A	$\approx 3600$ s
	2C	19.99 A	$\approx 1800$ s
	4C	39.99 A	$\approx 900$ s
	Pulsado	9.99 A; 19.99 A; 39.99 A	$\approx 1200$ s

Apesar dos cuidados tomados, a evolução da temperatura registada com o termómetro não satisfaz as previsões para cada tipo de teste, figura 5.6. É possível verificar que a temperatura oscila bastante, o que não corresponde à verdade. A sua evolução, apesar de não ser linear, não corresponde ao registado pelo termómetro.

Para além de haver uma distância ideal de medição, tornava-se igualmente difícil medir a temperatura exatamente no mesmo ponto que a medição anterior. Estes pequenos problemas, que no final modificam imenso os resultados obtidos, levaram a que o modo de captura da temperatura fosse alterado.

A alternativa a esta solução, foi desenvolver um sistema de leitura automático das temperaturas da bateria a cada segundo nos mesmos cinco pontos anteriormente assinalados. Desta feita, foram utilizados sensores de temperatura LM335 da *National Semiconductor*.

Os sensores foram ligados a um Arduino UNO para que a sua leitura fosse interpretada e guardada numa folha de cálculo. O circuito elétrico necessário para este sistema é bastante simples, bastando colocar uma resistência de  $2\text{ k}\Omega$  em série com o pino "Out" do sensor e um pino de alimentação 5V do Arduino. A montagem e código utilizados na medição das temperaturas podem ser consultados no anexo C.

Os resultados com os sensores de temperatura revelaram-se mais coerentes e de acordo com o esperado relativamente aos registados com o Fluke 65. Os gráficos da evolução da temperatura para uma descarga contínua a 1C e uma descarga descontínua podem ser observados na figura 5.7.

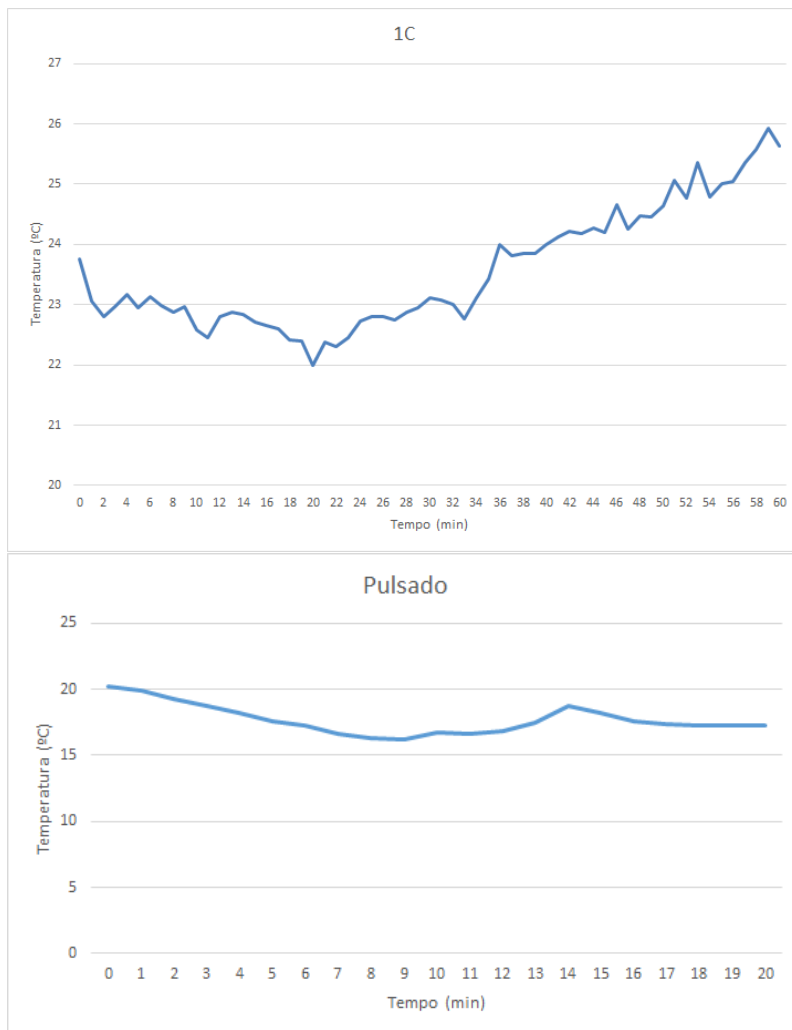


Figura 5.6: Resultados provisórios com o termómetro Fluke 65.



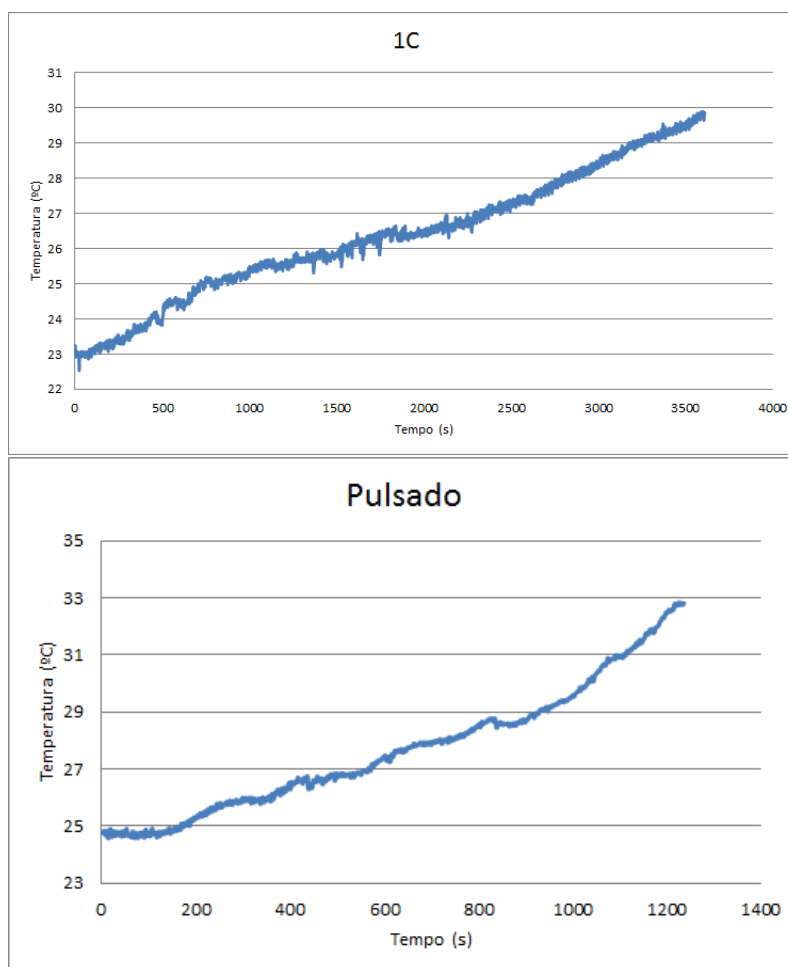


Figura 5.7: Resultados com sensores de temperatura.

Após a recolha dos dados relativos às temperaturas reais para várias descargas, a qualidade do modelo pode ser avaliada. O algoritmo em C foi reproduzido na plataforma de desenvolvimento DAVE. Este IDE baseado em Eclipse utiliza um compilador GNU C e permite o acesso a um repositório de código para os microcontroladores da família XMC.

Contrariamente ao algoritmo desenvolvido em Visual Studio, este programa não recorre a um ficheiro externo para a leitura dos valores de tensão e corrente da bateria. Com a introdução de um sensor de corrente no cabo que liga a bateria à carga eletrónica é possível, a cada ciclo de execução do algoritmo, registar o valor de corrente a ser extraído da bateria. Este aspecto é principalmente importante para testes com descargas descontínuas no tempo. A montagem deste sensor e respetivo circuito elétrico podem ser consultados no anexo C.

A tensão da bateria é igualmente extraída em tempo real e uma vez que não ultrapassa os 4.2 V, se o teste for realizado com uma célula apenas, a leitura é feita diretamente através de uma entrada com ADC do microcontrolador.

Os valores dos parâmetros para o modelo térmico são previamente calculados uma vez que se mantêm constantes ao longo do teste. A comparação entre as diferentes curvas de temperatura será comentada em maior detalhe no subcapítulo seguinte, mas dos gráficos das figuras 5.8 e 5.9

já é possível verificar que existem pequenas discrepâncias entre o modelo da simulação, o modelo em C implementado no microcontrolador e as medições feitas pelos sensores de temperatura.

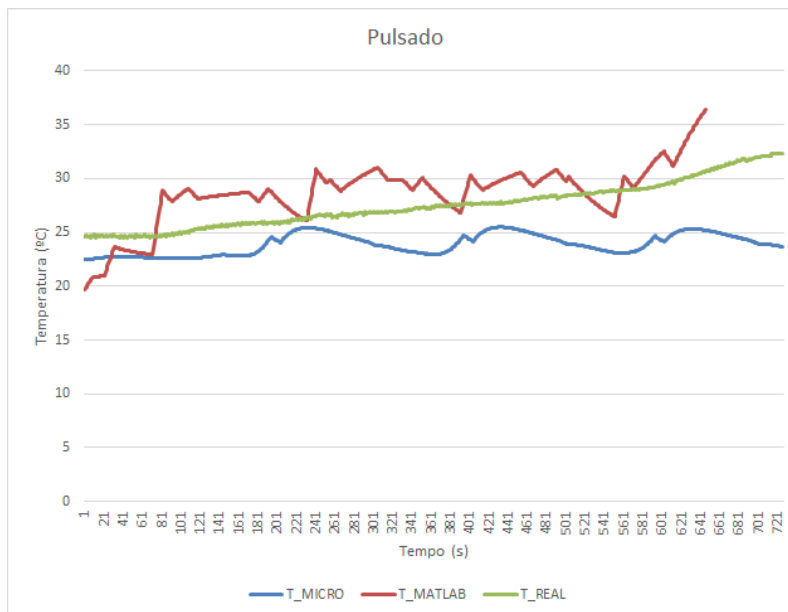


Figura 5.8: Comparação de temperaturas para uma descarga descontínua, com 3 nós no circuito equivalente.

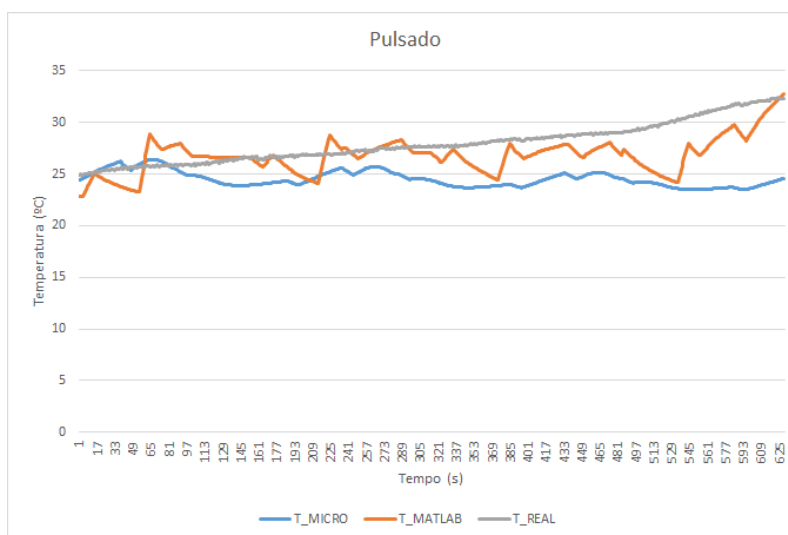


Figura 5.9: Comparação de temperaturas para uma descarga descontínua, com 4 nós no circuito equivalente.

Como explicado no capítulo 4, o modelo deve ser executado no menor tempo possível. Os fatores que podem aumentar ou diminuir o tempo de ciclo do algoritmo são em primeiro lugar, o número de operações das matrizes dos espaços de estados e em segundo a sua complexidade.

Nesse sentido, realizaram-se medições dos tempos de execução do algoritmo alterando o modelo térmico. Esta medição é feita através de um osciloscópio, figuras 5.10 e 5.11, que deteta a mudança de estado de um pino de saída do microcontrolador. Essa mudança é feita na primeira e na última linha de código do algoritmo em C, permitindo assim saber o tempo que decorre entre esses dois momentos.

Mantendo o modelo térmico como mostrado na figura 4.9, o tempo de execução do algoritmo é de 9.2 ms. Quando é acrescentado mais um nó interior a este circuito elétrico equivalente, o tempo de execução sobe para 13.7 ms.



Figura 5.10: Tempo de execução adotando 3 nós no circuito equivalente do modelo térmico.

## 5.3 Discussão de Resultados

De um modo geral, os resultados alcançados com o modelo desenvolvido nesta dissertação satisfizeram as expectativas de qualidade e tempo de execução do mesmo.

Nas simulações, as diferenças no modo de cálculo dos componentes do circuito elétrico equivalente foram determinantes para a diferença nas duas curvas. Os valores dos parâmetros para o modelo elétrico e térmico calculados a partir do SA e que entraram nas diversas simulações e testes experimentais com o microcontrolador, assim como a temperatura inicial de cada teste podem ser consultados na tabela 4.2 e no anexo B.

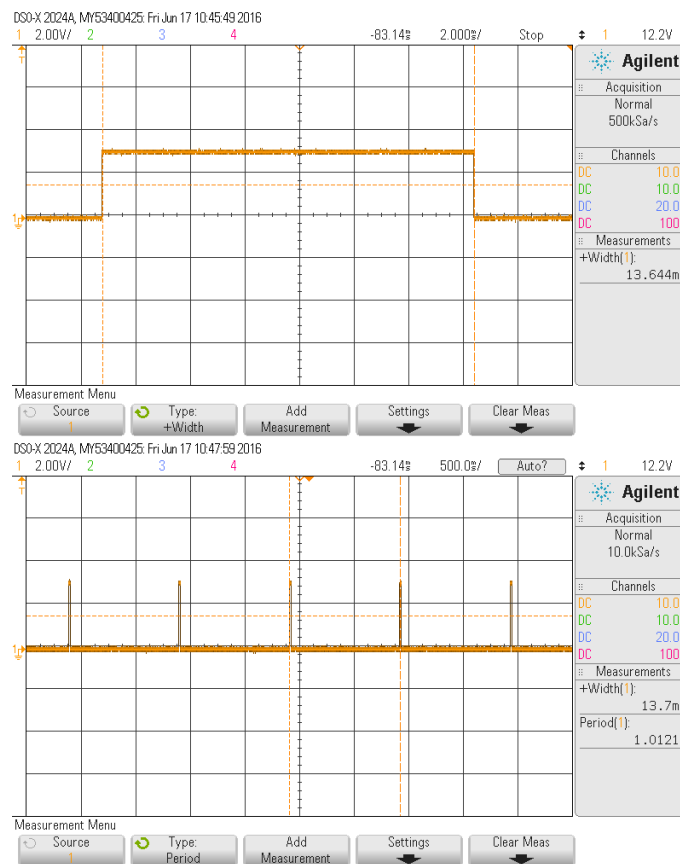


Figura 5.11: Tempo de execução adotando 4 nós no circuito equivalente do modelo térmico.

Os piores resultados alcançados nas simulações foram com descargas com uma corrente de 19.99 A e os melhores com a aplicação do ciclo 5.5, tabela 5.2.

Tabela 5.2: Erros relativos médios e máximos entre as simulações em C e MATLAB.

Teste	Erro Relativo Médio (%)	Erro Relativo Máximo (%)
1C	8.33	10.08
2C	17.51	23.30
Pulsado	4.52	9.24

Tabela 5.3: Erros relativos médios e máximos entre os resultados experimentais e em C.

Teste	Nº de nós	Erro Relativo Médio (%)	Erro Relativo Máximo (%)
Pulsado	3	12.86	26.76
	4	9.84	21.40

Tabela 5.4: Erros relativos médios e máximos entre os resultados experimentais e em MATLAB.

Teste	Nº de nós	Erro Relativo Médio (%)	Erro Relativo Máximo (%)
Pulsado	3	9.80	27.48
	4	5.55	20.33

A partir das tabelas 5.3 e 5.4 confirma-se o que já se previa na literatura e no capítulo 4. Aumentando o número de nós no circuito equivalente térmico, o erro do modelo relativamente à temperatura real da bateria diminui. Com um nó a mais no circuito, o tempo de execução aumenta sensivelmente 4 ms e o erro diminui 3 pontos percentuais. Considerando esta relação linear, um circuito com 8 nós apresentaria erros inferiores a 1%. Nesta dissertação não se experimentou esse caso, mas é importante ressaltar que esta relação dificilmente se manteria linear. Do mesmo modo, seria de esperar que o tempo de execução do algoritmo aumentasse exponencialmente. Outro aspecto importante, mas que não foi relevante para esta dissertação, é o tamanho da memória RAM disponível no microcontrolador. Com o aumento de nós no circuito equivalente e consequente crescimento das matrizes de espaço de estados, os 160 kB disponibilizados no XMC 4500 e na maior parte dos microcontroladores pode-se tornar insuficiente.

Apesar da troca de aparelho de medição, também é relevante assumir que os sensores utilizados adicionam um erro que pode influenciar os resultados finais. Normalmente, os erros destes sensores são da ordem de menos de 1 °C por 100 °C medidos.

Contudo, na troca das baterias para a realização dos vários testes, era necessário o seu manuseamento. O calor produzido pelas mãos da pessoa que preparava a experiência poderia introduzir uma perturbação que se refletia nas medições seguintes.



## Capítulo 6

# Conclusões

No capítulo 2 foram apresentados os princípios de base para a realização desta dissertação, as variantes que podem adotar e o porquê da sua escolha. No caso das baterias, ficou comprovado que as de íões de Lítio têm as melhores características para integrarem os EVs e os HEVs. No entanto, a tecnologia continua a avançar e têm surgido novas formas de armazenar energia.

Em outubro de 2015, foi publicado na revista IEEE Spectrum um artigo sobre baterias de lítio-ar que permitem obter 10 vezes mais energia que as baterias de íões de Lítio com o mesmo volume. É também referenciado que, ultrapassados os problemas associados a esta tecnologia, os veículos elétricos podem mesmo chegar a atingir autonomias iguais aos veículos convencionais. Nesta dissertação não foram revelados mais pormenores acerca deste tipo de baterias por ainda se considerar uma tecnologia recente e que necessita de estudos mais aprofundados.

Os Sistemas de Gestão de Baterias acompanham a evolução dos modelos que os integram. No entanto, não devem ser implementados isoladamente. A complexidade destes sistemas aumenta dependendo do tipo de aplicação e neste caso, um sistema de alimentação de um motor elétrico e consequente tração de veículos elétricos deve seguir as normas de segurança e usabilidade definidas.

O conhecimento das várias características da carga da bateria é a principal função associada ao BMS uma vez que não podem ser medidas diretamente. O sistema de atuação resultante só é robusto o suficiente se forem considerados todos os fatores que afetam o funcionamento das baterias: balanceamento, controlo do carregamento e gestão térmica.

Numa primeira fase é fulcral que sistemas do género consigam prever com qualidade fatores externos que influenciam a performance das baterias: existência energética a que estão sujeitas, temperatura externa, segurança e proteção contra materiais estranhos ao sistema, etc.

Em seguida, devem prever componentes inerentes ao seu funcionamento e que permitem conhecer os tempos de carregamento, a altura de substituição do pack, ou por exemplo a quantidade de carga necessária para o trajeto definido. Estes valores são obtidos através de modelos que simulam e tentam reproduzir o funcionamento da bateria.

Estes modelos podem também tomar várias formas, dependendo do seu conteúdo e ponto de

partida, os vários modelos são passíveis ou não de serem aplicados num sistema BMS. É necessário escolher as variáveis com maior interesse e aquelas que podem fornecer maior informação ao utilizador dos veículos elétricos.

Nesta dissertação foram escolhidos o estado da carga e a temperatura das baterias.

Existe um conjunto grande de opções com vantagens e desvantagens umas em relação às outras. Dos apresentados no capítulo 2, aqueles que permitem uma boa aproximação da realidade são os eletroquímicos. No entanto, a sua aplicação requer o conhecimento profundo dos processos físicos e químicos que ocorrem a nível microscópico na bateria. Além disso, o modelo resultante é de igual complexidade e considerável peso computacional.

Por outro lado, os modelos empíricos não são de toda a melhor opção. Modelos deste tipo descuram vários aspetos que são fundamentais na caracterização do estado de carga e temperatura da bateria.

No presente trabalho foi escolhido um modelo que se encontra entre estes dois modelos. O modelo elétrico derivado do modelo da difusão garante, à partida, que este seja mais preciso que os modelos elétricos puros deduzidos por inspeção.

A validação do modelo foi feita com testes já existentes na literatura e comparados com modelos bem conhecidos, como é o caso do modelo de difusão e de Peukert. Da análise de resultados foi possível concluir que o modelo desenvolvido nesta dissertação, conduz a valores coerentes e com erros médios e máximos inferiores aos dos outros modelos. Com a aplicação do filtro de Kalman estendido, a estimação do SoC é melhorada significativamente. Como o sistema de equações que descrevem o modelo elétrico da bateria é não linear, a utilização do filtro tem de ser precedida por uma linearização.

Os resultados do modelo elétrico isolado e aplicando o EKF comprovam o funcionamento do modelo para perfis de corrente contínua e descontínua no tempo. Uma vez que a tensão da bateria pode ser lida diretamente, é criada uma função  $V_{SoC}$  que permite saber a tensão da bateria estimada e calcular o erro entre os valores lidos e estimados. O erro do modelo comparando valores de SoC é impossível uma vez que esta componente não pode ser medida.

O modelo térmico desenvolvido nesta dissertação foi apresentado como computacionalmente eficiente, utilizando métodos de previsão das dinâmicas térmicas de uma bateria prismática de íons de Lítio. Contrariamente a outros modelos de previsão que utilizam técnicas de identificação e programas de análise complexos, o método proposto nesta dissertação baseia-se unicamente em processos físicos. No capítulo 4, foi descrito um modelo a uma dimensão para determinar a distribuição térmica de uma bateria durante a sua descarga.

Do mesmo modo ao sucedido no modelo elétrico, as equações do sistema foram convertidas em circuitos elétricos equivalentes através de CFD. Em ambos, o número de subcircuitos/nós escolhidos deve respeitar o nível de qualidade desejado no modelo, o peso computacional, a memória disponível e tempo de execução ótimo para o sistema BMS. Este último considerado de grande importância devido à exigência no seu tempo de resposta.

Quanto mais cedo se detetarem falhas, situações de perigo e problemas nas baterias, mais eficaz será a sua solução. O modelo proposto apresenta um tempo de execução bastante satisfatório,



Tabela 6.1: Verificação dos objetivos propostos na dissertação

Objetivo	Cumprimento	Comentários
1	✓	A forma como foram formulados os modelos elétrico e térmico permitiu que fossem escritos dois algoritmos distintos mas com o mesmo propósito, um em MATLAB e outro em linguagem de programação C.
2	✓	Adicionalmente aos programas e paralelamente à sua execução, foi desenvolvido um algoritmo de otimização para cálculo independente dos parâmetros do circuito elétrico equivalente para o modelo térmico.
3/4	✓	O modelo foi testado para vários perfis de corrente de descarga e os seus parâmetros igualmente calculados de acordo com a descarga realizada. Os scripts MATLAB e o código em C podem ser verificados em anexo. O algoritmo não apresenta um tempo de execução considerável e considerando que seria adicionado a um BMS, não introduziria um atraso relevante ao programa final.
5	✓	Os testes experimentais permitiram validar o modelo com variáveis a serem lidas em tempo real, como por exemplo, a tensão e corrente da bateria. O modelo também foi validado neste caso.
6	x	Este objetivo não foi totalmente cumprido uma vez que o erro mínimo atingido nos ensaios laboratoriais é de 9.84%. No entanto, o erro médio relativo entre os resultados das simulações em MATLAB e os resultados reais é próximo ao esperado.

permitindo um aumento de complexidade do mesmo.

A parametrização e otimização dos modelos foi realizada por um método probabilístico denominado por arrefecimento simulado. Este foi o algoritmo escolhido para o modelo térmico por coerência com o modelo elétrico desenvolvido em [28]. O SA preenche todos os requisitos para a otimização do problema em questão e como não necessita de ser implementado no sistema BMS, não foi colocada em questão a complexidade do mesmo.

Formulado o problema, foram apresentados os resultados com maior expressão para esta dissertação. O algoritmo implementado no microcontrolador, já parametrizado e otimizado, permite uma aproximação à temperatura real da bateria com erros inferiores a 10% quando considerados 4 nós no circuito equivalente para o modelo térmico e mantendo o modelo elétrico com duas malhas RC. Este valor poderá no entanto ser melhorado como foi explicado no capítulo precedente. A satisfação dos objetivos sugeridos é discutida no subcapítulo seguinte e são enumeradas algumas fases que poderão introduzir melhorias ao trabalho elaborado.

## 6.1 Satisfação de Objetivos

As seis metas introduzidas no início deste trabalho não foram totalmente cumpridas. Fazendo uma pequena reflexão sobre o proposto nesta dissertação, a tabela 6.1 foi elaborada colocando em evidência os pontos que permitiram ou não concluir cada objetivo traçado.

## 6.2 Trabalho Futuro

A aplicação do modelo desenvolvido nesta dissertação limitou-se apenas a uma célula de íões de Lítio . O próximo passo para a validação e melhoramento do mesmo seria a sua implementação num conjunto de baterias que permitisse a alimentação de um motor elétrico real.

O modelo térmico foi reduzido a um numero mínimo de nós que fez com que o erro entre os resultados das experiências laboratoriais e os valores reais fossem significativos. Para manter este nível de simplicidade no circuito elétrico equivalente para o modelo térmico, mas aumentar a fiabilidade do próprio modelo, seria interessante realizar uma otimização semelhante à implementada na resistência elétrica do circuito para o modelo elétrico.

Fazer variar os parâmetros  $R_s$ ,  $R_p$ ,  $C_f$  ou  $C_i$  com a temperatura ou calor gerado pode então ser uma oportunidade de trabalho e enriquecimento futuro.

Na tracção de EVs um valor típico para a potência do motor é de aproximadamente 4 kW, o que implica a utilização de um pack de baterias capaz de produzir 300 V. A forma como são dispostas as baterias influencia os valores de tensão e corrente que podem fornecer, mas do trabalho realizado em [27] é previsto a utilização de 3 packs com 72 baterias para o fornecimento da energia necessária a um motor com essas características.

Outra alteração que também poderia ser implementado no futuro seria a realização de testes e respetiva medição de temperaturas das baterias em ambiente controlado, como por exemplo câmaras de ensaios climáticos e de temperatura.

Posteriormente, seria muito interessante a aplicação do modelo no VEC da Faculdade de Engenharia do Porto, para comparação com o já existente.

## **Anexo A**

# **Especificações GEB 3.7V, 10000 mAh lithium Battery**

**Customer:**

**Specification No.** GEB020110927

**General Electronics Battery Co., Ltd.  
(GEB)**

**SPECIFICATIONS of GEB LITHIUM BATTERIES**

MODEL NO.: GEB9759156SH5 3.7V 10Ah



*General Electronics Battery Co., Ltd. (GEB)*  
*Address: Xin'er Hong Xiang Industrial Road No. 42, Shajing Town,*  
*Baoan District, Shenzhen 518125, P.R. China*  
*Website: [www.qebattery.com.cn](http://www.qebattery.com.cn)*  
*Email: [sales@qebattery.com.cn](mailto:sales@qebattery.com.cn)*  
*Tel: 86-755-8176 2725/26/27 ext 628*  
*Fax: 86-755-8176 2723*

**1. Scope:**

This specification just suitable for the lithium polymer battery from GEB. All the test methods will be accordance with the specification stated.

**2. Products and model:**

2.1 Products: Lithium polymer battery cell

2.2 Model No: 9759156SH5

**3. Specification**

Item		Nominal Value	Remark
3.1 Capacity	Typical	10000mAh	Standard charging, 1.0C discharge, cut-off discharge voltage 3.0V
	Minimum	9500mAh	
3.2 Rated Voltage		3.7V	1.0C discharge average voltage
3.3 Standard charging condition		1C(10000mA), 4.2V(CC-CV), 50mA	Total charging time will be shorter than 2.5H
3.4 Max charging current		1C(10000mA)	
3.5 Max charging voltage		4.20V	
3.6 Max discharge current		5C(50.0A)	Continuous discharge model
3.7 Cut-off discharge voltage		3.0V	
3.8 Transport Voltage		3.7~3.9V	
3.9 Weight		About 201.5g	
3.10 Working Temperature	Charging	0~45℃	Max 90% relative humidity
	Discharge	-20~60℃	Max 90% relative humidity
3.11 Keeping temperature	1 month	-20~45℃	During transportation, the keeping temperature will be lower than 20℃
	3 months	-20~35℃	
	1 year	-20~20℃	

**4. Overall Dimension and appearance****4.1 Overall Dimension**

Thickness : Max. 10.0mm (The pressure of the measure device acting on the battery will be 300gf during the measure, the temperature will be  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ )

Width :  $59.0 \pm 0.5\text{mm}$  (The pressure of the measure device acting on the battery will be 300gf during the measure, the temperature will be  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ )

Length :  $158.0 \pm 0.5\text{mm}$  (Pole ear not included)

Remark: Battery will expand when keeping and using in the high temperature condition .

**4.2 Appearance**

The appearance of the battery will not have the obvious scratch, fracture, flaw, stain, leakage, transformation, these will be effected the commercial value.

## 5. Performance

### 5.1 Standard testing condition:

Battery testing must within 1month after leaving the factory. And the battery will not more than 5 charge and discharge cycling. Excepting other special requirements, the test condition as the specification stated:: Temperature  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ , relative humidity  $65\pm 20\%$ .

### 5.2 Testing equipment:

#### 5.2.1 Dimension testing equipment

The precision of the dimension testing equipment will be  $\geq 0.01\text{mm}$ .

#### 5.2.2 Multi-meter

The degree of accuracy of using multimeter to test the voltage and the current will not lower than 0.5grade. the internal resistance when testing voltage will not be lower than  $10\text{k}\Omega/\text{V}$ .

#### 5.2.3 Internal resistance tester

Measuring principle of the internal resistance tester will be A C impedance (1kHz LCR).

#### 5.2.4 Battery testing system

The precision of current in battery test system will be higher than  $\pm 0.1\%$ , constant voltage precision  $\pm 0.5\%$ , the time keeping precision will not be lower than  $\pm 0.1\%$

### 5.3 Standard charging definition

1.0C=10000mA

1.0C constant-current charge to 4.2V, shift to constant-voltage charge, cut-off current will be 50mA, total charging time will be lower than 2.5h.

### 5.4 Lay-up time

No other special requirements, charge-discharge interval time will be 10min

### 5.5 Standard discharge definition

1.0C(10000mA) constant-current discharge to 3.0V.

### 5.6 Initial performance test

Item	Test method	Standard
5.6.1 Open-circuit voltage	Standard charging within the $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ temperature environment, measuring the battery's Open-circuit voltage	$\geq 4.15\text{V}$
5.6.2 AC internal resistance	Standard charging within the $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ temperature environment, using the exchange method to test the battery's internal resistance (1kHz LCR meter)	$\leq 7.0\text{m}\Omega$
5.6.3 Initial Capacity	Standard charging within the $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ temperature environment, 1.0C(10000mA) discharge to 3.0V, testing the battery's capacity.	$\geq 10000\text{mAh}$

**5.7 Electrical performance****5.7.1 Discharge rate character**

Standard charging within the  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  temperature environment, then discharge according to the following form's discharge current, requirements as following:

Discharge current	1.0C(10000mA)	5C(50.0A)
Discharge capacity	98%	90%

**5.7.2 Discharge temperature characteristic**

Standard charging within the  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  temperature environment, then cooling and heating to testing temperature within 30min. Before discharging, please keeping the battery 1H in this temperature. Discharge current as following form, cut-off discharge voltage 3.0V. After a temperature test, discharge after placing the battery 2H in the  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  temperature, requirements as following:

Discharge temperature	$-10^{\circ}\text{C}$	$0^{\circ}\text{C}$	$25^{\circ}\text{C}$	$45^{\circ}\text{C}$
Discharge rate	0.2C	0.2C	1.0C	1.0C
Discharge Capacity	60%	85%	100%	95%

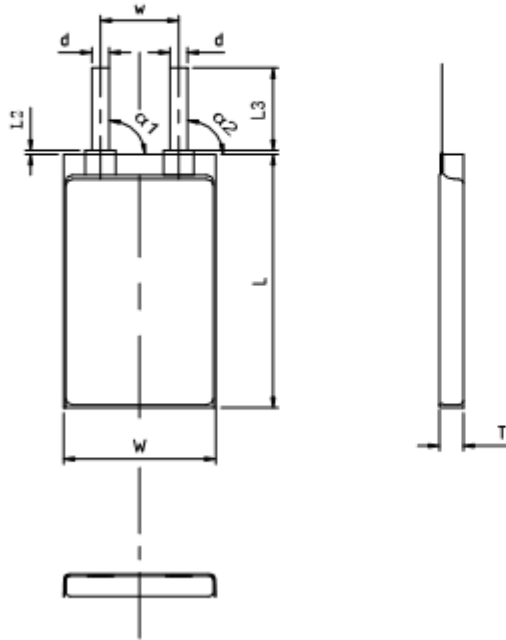
**6. Quality guarantee period**

Quality guarantee period will be 6 months after the battery leaving the factory.

**7. Transportation:**

Transporting the battery under the condition of 50% charged.

**8. Other**

**Picture1** Outline dimension drawing

Item	Parameter
T	Max 10.0mm
W	59.0±0.5mm
L	158.0±0.5mm
L2	0.5—1.0mm
L3	15.0±1.0 mm
w	30.0±2.0mm
d	10.0±0.1mm
$\alpha_1$	90±5°
$\alpha_2$	90±5°



## Anexo B

# Dados do Modelo

### B.1 Validação do Modelo Elétrico [28]

Corrente de teste (mA)	Dualfoil (min)	Difusão		KiBaM		Peukert		Modelo adotado		
		TD(min)	ER (%)	TD(min)	ER (%)	TD(min)	ER (%)	TD(min)	ER (%)	
Baixas	3	12285	13417	9.21	13417	9.21	12288	0.02	11685	4.88
	108.3	317.2	331.4	4.48	331.4	4.48	321.3	1.29	308.5	2.74
	204.5	156.0	156.0	0	156.0	0	156.0	0	156.0	0
Médias	222.7	140.9	139.9	0.71	139.9	0.71	154.5	9.65	138.55	1.67
	265.6	113.1	110.6	2.21	110.6	2.21	129.1	14.14	113.04	0.053
	300	96.0	93.2	2.91	93.1	3.02	114.1	18.85	97.93	2.01
Altas	425.6	54.6	53.9	1.28	53.5	2.01	80.0	46.52	52.83	3.24
	494.7	41.3	41.4	0.24	40.5	1.94	68.6	66.10	41.3	0
	628.0	26	26.6	2.31	24.9	4.23	53.9	107.30	26.25	0.96
Erro médio relativo (%)		2.59		3.09		29.32		1.73		
Erro máximo (%)		9.21		9.21		107.30		4.88		

### B.2 Resultados com Resistência Interna Variável para o Modelo Elétrico [28]

Corrente média (A)	Erro médio Relativo (%) para $R_l = 360\Omega$	Erro médio Relativo (%) para $R_l$ variável
6.59	0.037	0.003
14.99	0.434	0.061

### B.3 Comparação entre modelos para a parametrização da função $V_{SoC}$ [28]

Modelo	SSE	$R_{square}$	$R_{square}$ ajustado	RMSE
Modelo de <i>Shepherd</i>	0.4438	0.419	0.3983	0.1259
Modelo Universal <i>Unnewehr</i>	0.3288	0.777	0.7693	0.1065
Modelo de <i>Nernst</i>	-	-	-	-
Polinómio de 1º grau	0.3288	0.777	0.7693	0.1065
Polinómio de 2º grau	0.323	0.7809	0.7653	0.1074
Polinómio de 3º grau	0.1965	0.8667	0.8519	0.08532
Polinómio de 4º grau	0.1134	0.9231	0.9113	0.06604
Função proposta	0.00156	0.9989	0.09987	0.007898

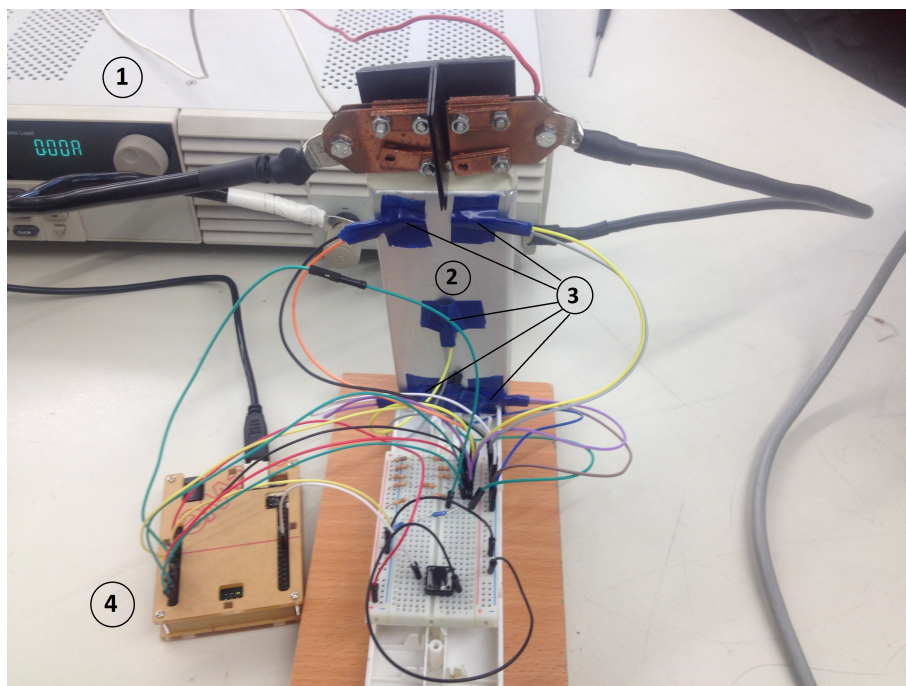
### B.4 Parâmetros calculados a partir do SA para o modelo térmico

Tipo de Teste	$k$	$h$	$p$	$cp$	$T_{amb}$
1C	0.609	23.409	2118.893	842.632	22.5
2C	0.599	32.042	2498.756	945.176	22
Pulsado	0.755	39.208	2499.047	946.543	23.5

## Anexo C

# Dados dos ensaios laboratoriais

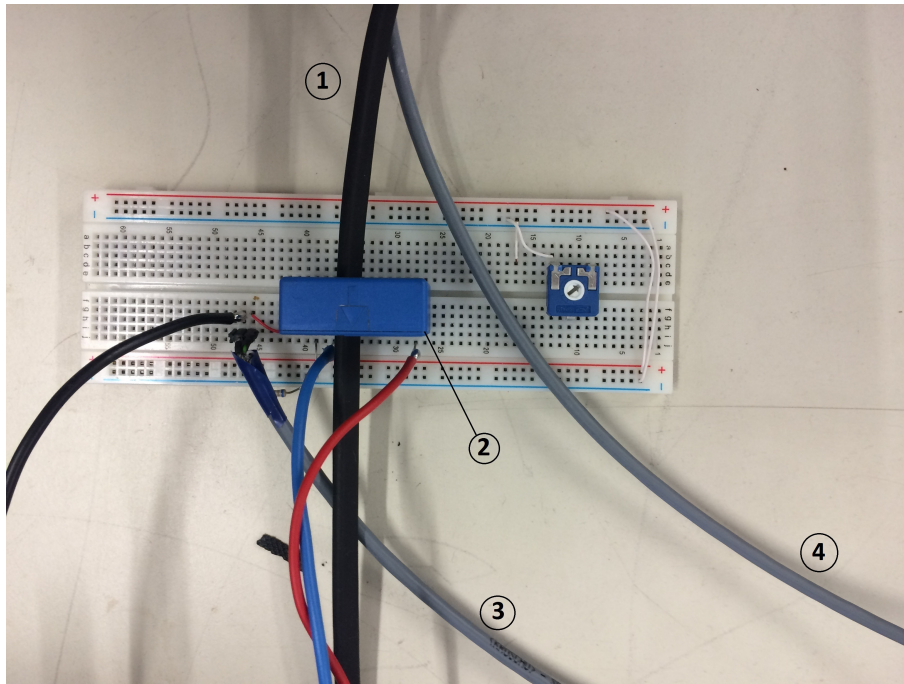
### C.1 Sistema de registo automático das temperaturas da bateria



Legenda:

1. Carga Eletrónica BK Precision 8510;
2. Bateria de iões de Lítio ;
3. Sensores de Temperatura;
4. Arduino UNO;

## C.2 Circuito para leitura da corrente da bateria



Legenda:

1. Cabo de ligação entre a bateria e carga eletrónica;
2. Sensor de Corrente;
3. Cabo de ligação ao microcontrolador para leitura da corrente da bateria;
4. Cabo de ligação ao microcontrolador para leitura da tensão da bateria;

## C.3 Código Arduino/Processing

### C.3.1 Arduino

```
int sensorPin0 = A0;  
float sensorValue0 = 0;  
int sensorPin1 = A1;  
float sensorValue1 = 0;  
int sensorPin2 = A2;  
float sensorValue2 = 0;  
int sensorPin3 = A3;  
float sensorValue3 = 0;  
int sensorPin4 = A4;
```

```
float sensorValue4 = 0;
int sensorPin5 = A5;
float sensorValue5 = 0;
int offset=8;
int but = 1;
int a = 0;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  pinMode(8,INPUT);
  digitalWrite(8,HIGH);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:

  sensorValue0 =0;
  sensorValue1 =0;
  sensorValue2 =0;
  sensorValue3 =0;
  sensorValue4 =0;
  sensorValue5 =0;

  if (digitalRead(8)==LOW && a == 0){
    but = 0;
    a = 1;
  } else if (digitalRead(8)==LOW && a == 1) {
    but = 1;
    a = 0;
  }

  if (but == 0) {
    for(int i=0;i<1000;i++){

      sensorValue0 += analogRead(sensorPin0);
      sensorValue1 += analogRead(sensorPin1);
      sensorValue2 += analogRead(sensorPin2);
      sensorValue3 += analogRead(sensorPin3);
      sensorValue4 += analogRead(sensorPin4);
```

```
sensorValue5 += analogRead(sensorPin5);
}

sensorValue0 /=1000;
sensorValue1 /=1000;
sensorValue2 /=1000;
sensorValue3 /=1000;
sensorValue4 /=1000;
sensorValue5 /=1000;

float milivolts0=(sensorValue0/1024.0)*5000;
float celsius0=(milivolts0/10)-273.15-offset;
Serial.print(celsius0);
Serial.print(";");
//Serial.print("\n");
//Serial.println(" °C Sensor 0");

float milivolts1=(sensorValue1/1024.0)*5000;
float celsius1=(milivolts1/10)-273.15-offset;
Serial.print(celsius1);
Serial.print(";");
//Serial.print("\n");
//Serial.println(" °C Sensor 1");

float milivolts2=(sensorValue2/1024.0)*5000;
float celsius2=(milivolts2/10)-273.15-offset;
Serial.print(celsius2);
Serial.print(";");
//Serial.print("\n");
//Serial.println(" °C Sensor 2");

float milivolts3=(sensorValue3/1024.0)*5000;
float celsius3=(milivolts3/10)-273.15-offset;
Serial.print(celsius3);
Serial.print(";");
//Serial.print("\n");
//Serial.println(" °C Sensor 3");

float milivolts4=(sensorValue4/1024.0)*5000;
float celsius4=(milivolts4/10)-273.15-offset;
```

```
Serial.print(celsius4);
Serial.print(";");
//Serial.print("\n");
//Serial.println(" °C Sensor 4");

float milivolts5=(sensorValue5/1024.0)*5000;
float celsius5=(milivolts5/10)-273.15-offset;
Serial.print(celsius5);
Serial.print(";");
Serial.print("\n");
//Serial.println(" °C Sensor 5");
}
delay(1000);
}
```

### C.3.2 Processing

```
import processing.serial.*;
Serial mySerial;
PrintWriter output;
void setup() {
size(500,500);
mySerial = new Serial( this, "COM3", 9600 );
output = createWriter( "temperaturas.csv" );
}
void draw() {
if (mySerial.available() > 0 ) {
String value = mySerial.readString();
if ( value != null ) {
print(value);
output.print( value );
}
}
}

void keyPressed() {
output.flush(); // Writes the remaining data to the file
output.close(); // Finishes the file
exit(); // Stops the program
}
```

**C.4 Perfil de corrente adotado para descargas descontínuas**

Período de Tempo (s)	Corrente (A)
10	0
90	9.99
10	0
40	19.99
10	0
40	39.99
10	0
90	9.99
10	0
40	19.99
10	0
40	39.99
10	0
90	9.99
10	0
40	19.99
10	0
40	39.99
10	0
90	9.99
10	0
40	19.99
10	0
40	39.99
10	0
190	19.99
10	0
90	39.99
10	0
90	39.99



## Anexo D

# Resultados MATLAB

### D.1 ELETROTHERMAL MODEL FOR LITHIUM-ION BATTERIES - Three node simulation, 1C discharge

Created by Rafael Martins

MATLAB simulation for thermal model analysis

Master's Thesis in Electric and Computer Engineering (2015-2016)

#### Contents

- Parameters
- State-space matrix definition
- Continuous-time Analysis
- Discrete-time Analysis
- Initial state and input vector definition
- System Response

#### Parameters

$R_p =$

0.5200

$R_s =$

0.2500

Cf =

36.6671

Ci =

73.3342

### State-space matrix definition

A =

```
-0.1615    0.1091    0
0.0545   -0.1091    0.0545
0    0.1091   -0.1615
```

B =

```
0.0524    0.0273    0
0         0    0.0136
0.0524    0.0273    0
```

C =

```
1    0    0
0    1    0
0    0    1
```

D =

```
0    0    0
0    0    0
0    0    0
```

sys =

a =

x1	x2	x3	
x1	-0.1615	0.1091	0
x2	0.05454	-0.1091	0.05454
x3	0	0.1091	-0.1615

b =

u1	u2	u3	
x1	0.05244	0.02727	0
x2	0	0	0.01364
x3	0.05244	0.02727	0

c =

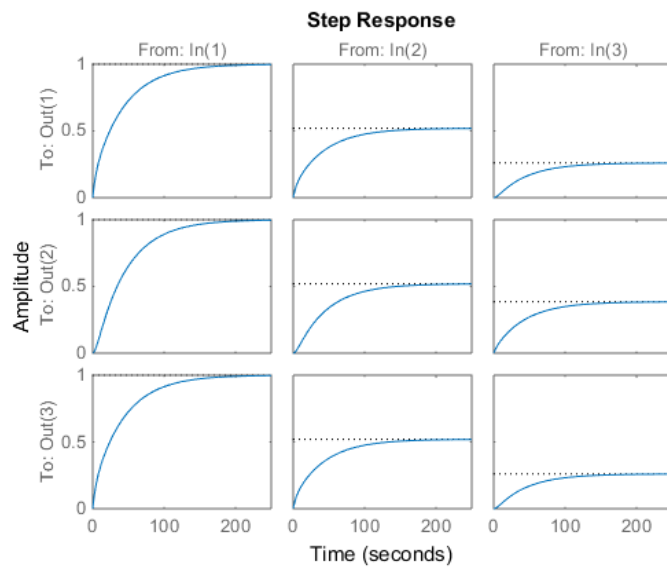
x1	x2	x3	
y1	1	0	0
y2	0	1	0
y3	0	0	1

d =

u1	u2	u3	
y1	0	0	0
y2	0	0	0
y3	0	0	0

Continuous-time state-space model.

## Continuous-time Analysis



## Discrete-time Analysis

Frequency of sampling (Hz) and number of samples

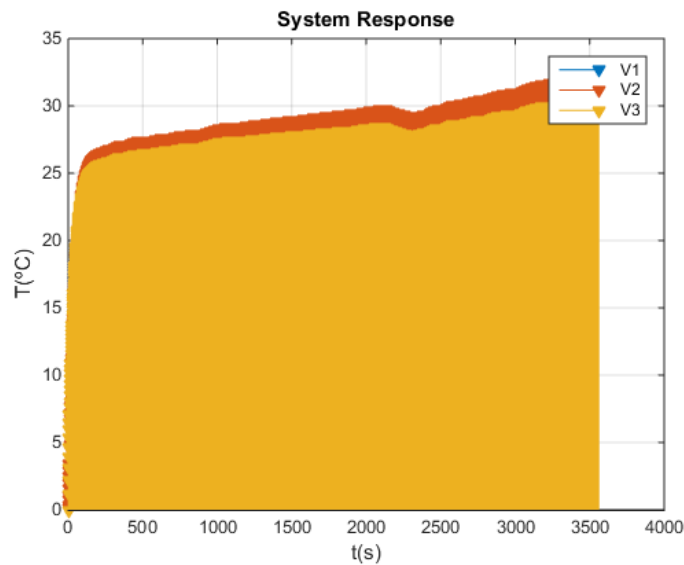
Ad =

0.8534	0.0955	0.0026
0.0477	0.9019	0.0477
0.0026	0.0955	0.8534

Bd =

0.0485	0.0252	0.0007
0.0026	0.0014	0.0129
0.0485	0.0252	0.0007

## System Response



## D.2 ELETROTHERMAL MODEL FOR LITHIUM-ION BATTERIES - Three node simulation, 2C discharge

Created by Rafael Martins

MATLAB simulation for thermal model analysis

Master's Thesis in Electric and Computer Engineering (2015-2016)

### Contents

- Parameters
- State-space matrix definition
- Continuous-time Analysis
- Discrete-time Analysis
- Initial state and input vector definition
- System Response

### Parameters

$R_p =$

0.3738

Rs =

0.2500

Cf =

49.3001

Ci =

98.6001

### State-space matrix definition

A =

```
-0.1354    0.0811         0
 0.0406   -0.0811    0.0406
 0         0.0811   -0.1354
```

B =

```
0.0543    0.0203         0
 0         0         0.0101
 0.0543    0.0203         0
```

C =

```
1     0     0
 0     1     0
 0     0     1
```

D =

```
0    0    0
0    0    0
0    0    0
```

sys =

a =

```
      x1      x2      x3
x1  -0.1354  0.08114  0
x2   0.04057 -0.08114  0.04057
x3      0     0.08114 -0.1354
```

b =

```
      u1      u2      u3
x1  0.05427  0.02028  0
x2      0      0  0.01014
x3  0.05427  0.02028  0
```

c =

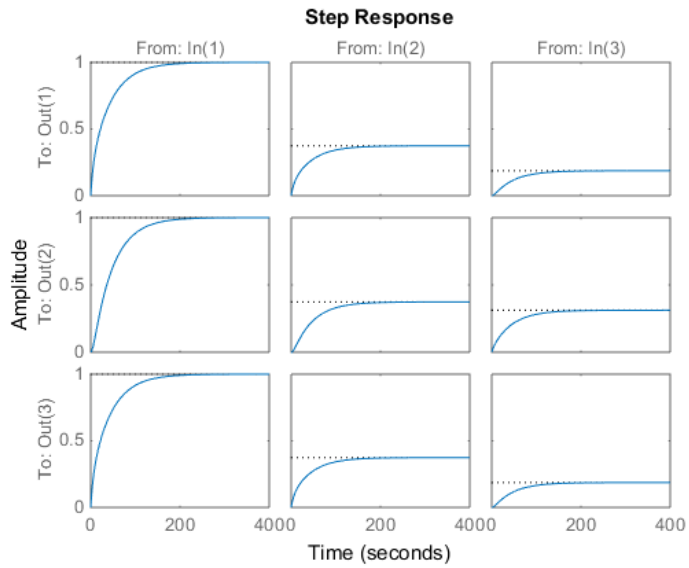
```
      x1  x2  x3
y1   1   0   0
y2   0   1   0
y3   0   0   1
```

d =

```
      u1  u2  u3
y1   0   0   0
y2   0   0   0
y3   0   0   0
```

Continuous-time state-space model.

## Continuous-time Analysis



## Discrete-time Analysis

Ad =

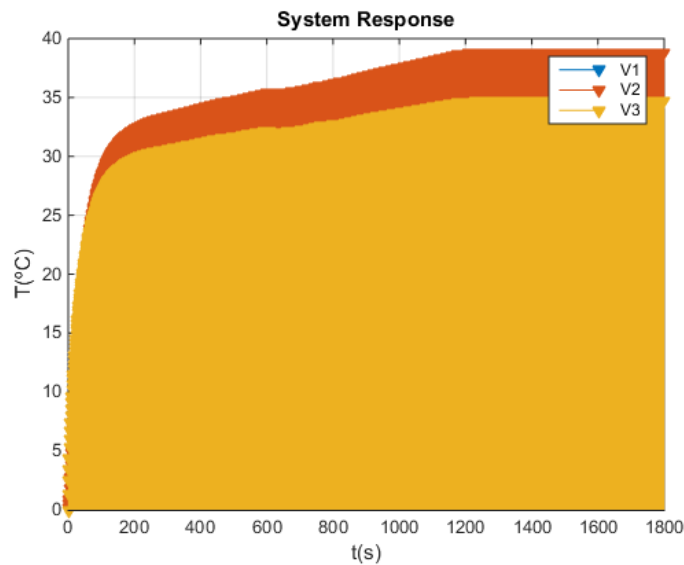
0.8748	0.0729	0.0015
0.0364	0.9251	0.0364
0.0015	0.0729	0.8748

Bd =

0.0508	0.0190	0.0004
0.0021	0.0008	0.0098
0.0508	0.0190	0.0004



### System Response



## D.3 ELETROTHERMAL MODEL FOR LITHIUM-ION BATTERIES - Three node simulation, Pulse Discharge

Created by Rafael Martins

MATLAB simulation for thermal model analysis

Master's Thesis in Electric and Computer Engineering (2015-2016)

### Contents

- Parameters
- State-space matrix definition
- Continuous-time Analysis
- Discrete-time Analysis
- Initial state and input vector definition
- System Response

### Parameters

$R_p =$

0.5200

Rs =

0.2500

Cf =

36.6671

Ci =

73.3342

### State-space matrix definition

A =

```
-0.1615    0.1091         0
0.0545   -0.1091    0.0545
0         0.1091   -0.1615
```

B =

```
0.0524    0.0273         0
0          0         0.0136
0.0524    0.0273         0
```

C =

```
1     0     0
0     1     0
0     0     1
```

D =

```
0    0    0
0    0    0
0    0    0
```

sys =

a =

```
      x1      x2      x3
x1  -0.1615  0.1091      0
x2  0.05454 -0.1091  0.05454
x3      0    0.1091 -0.1615
```

b =

```
      u1      u2      u3
x1  0.05244  0.02727      0
x2      0      0  0.01364
x3  0.05244  0.02727      0
```

c =

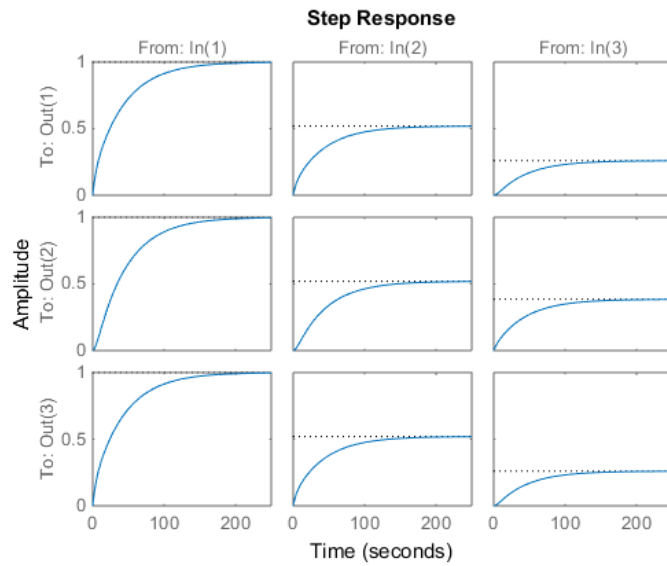
```
      x1  x2  x3
y1   1   0   0
y2   0   1   0
y3   0   0   1
```

d =

```
      u1  u2  u3
y1   0   0   0
y2   0   0   0
y3   0   0   0
```

Continuous-time state-space model.

## Continuous-time Analysis



## Discrete-time Analysis

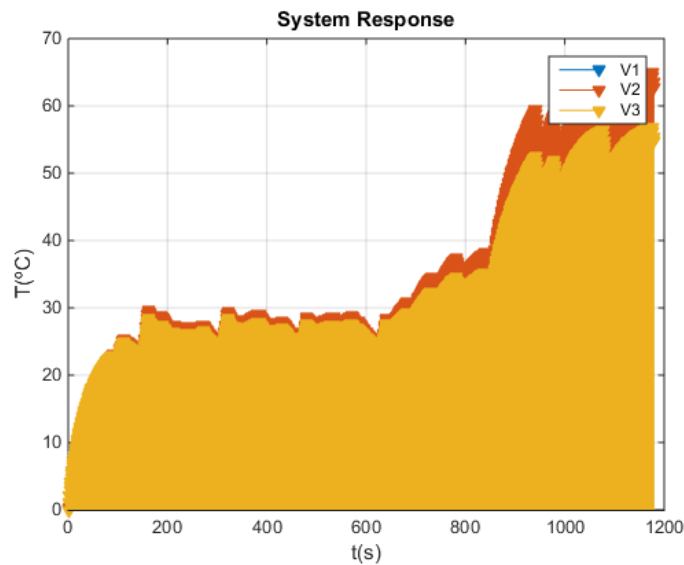
Ad =

0.8534	0.0955	0.0026
0.0477	0.9019	0.0477
0.0026	0.0955	0.8534

Bd =

0.0485	0.0252	0.0007
0.0026	0.0014	0.0129
0.0485	0.0252	0.0007

## System Response



## D.4 ELETROTHERMAL MODEL FOR LITHIUM-ION BATTERIES - Four node simulation, 1C discharge

Created by Rafael Martins

MATLAB simulation for thermal model analysis

Master's Thesis in Electric and Computer Engineering (2015-2016)

### Contents

- Parameters
- State-space matrix definition
- Continuous-time Analysis
- Discrete-time Analysis
- Initial state and input vector definition
- System Response

### Parameters

$R_p =$

0.5200

Rs =

0.1111

Cf =

36.6671

Ci =

73.3342

### State-space matrix definition

A =

```
-0.2979    0.2455         0         0
0.1227   -0.2455    0.1227         0
0     0.1227   -0.2455    0.1227
0         0     0.2455   -0.2979
```

B =

```
0.0524    0.0273         0
0         0     0.0136
0         0     0.0136
0.0524    0.0273         0
```

C =

```
1     0     0     0
0     1     0     0
0     0     1     0
0     0     0     1
```

sys =

a =

x1	x2	x3	x4	
x1	-0.2979	0.2455	0	0
x2	0.1227	-0.2455	0.1227	0
x3	0	0.1227	-0.2455	0.1227
x4	0	0	0.2455	-0.2979

b =

u1	u2	u3	
x1	0.05244	0.02727	0
x2	0	0	0.01364
x3	0	0	0.01364
x4	0.05244	0.02727	0

c =

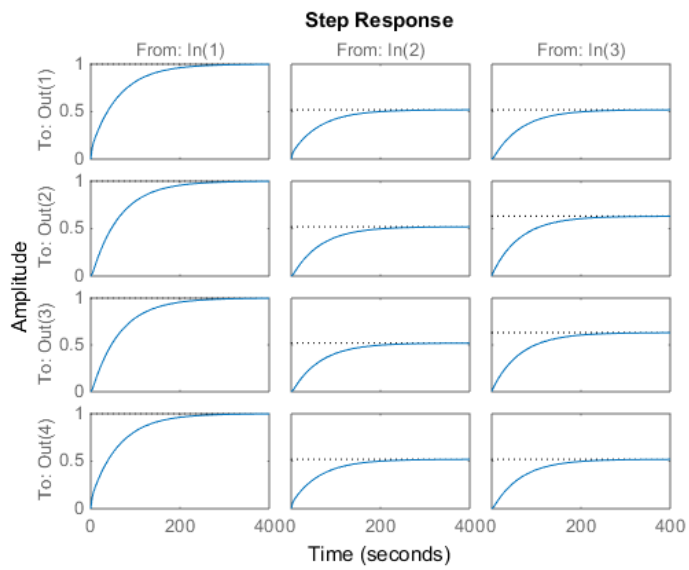
x1	x2	x3	x4	
y1	1	0	0	0
y2	0	1	0	0
y3	0	0	1	0
y4	0	0	0	1

d =

u1	u2	u3	
y1	0	0	0
y2	0	0	0
y3	0	0	0
y4	0	0	0

Continuous-time state-space model.

## Continuous-time Analysis



## Discrete-time Analysis

Frequency of sampling (Hz) and number of samples

Ad =

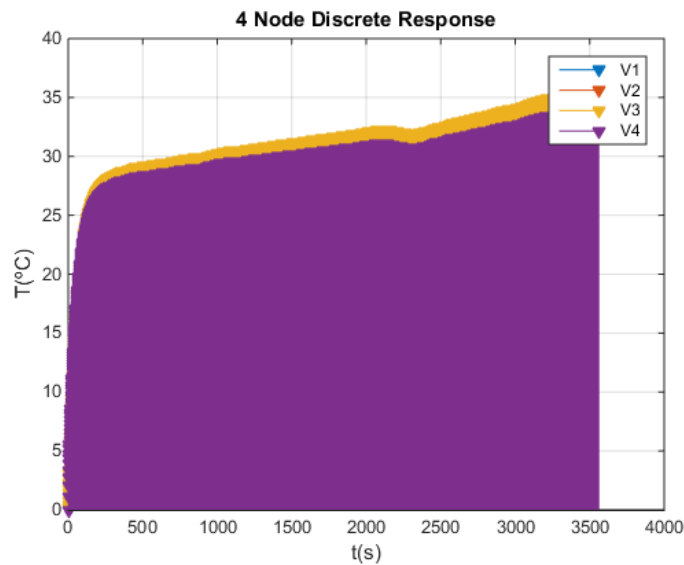
0.7538	0.1885	0.0117	0.0005
0.0942	0.7999	0.0972	0.0058
0.0058	0.0972	0.7999	0.0942
0.0005	0.0117	0.1885	0.7538

Bd =

0.0456	0.0237	0.0015
0.0028	0.0015	0.0129
0.0028	0.0015	0.0129
0.0456	0.0237	0.0015



## System Response



## D.5 ELETROTHERMAL MODEL FOR LITHIUM-ION BATTERIES - Four node simulation, Pulse discharge

Created by Rafael Martins

MATLAB simulation for thermal model analysis

Master's Thesis in Electric and Computer Engineering (2015-2016)

### Contents

- Parameters
- State-space matrix definition
- Continuous-time Analysis
- Discrete-time Analysis
- Initial state and input vector definition
- System Response

### Parameters

$R_p =$

0.5200

Rs =

0.2500

Cf =

36.6671

Ci =

73.3342

### State-space matrix definition

A =

```
-0.1615    0.1091         0         0
0.0545   -0.1091    0.0545         0
0    0.0545   -0.1091    0.0545
0         0    0.1091   -0.1615
```

B =

```
0.0524    0.0273         0
0         0    0.0136
0         0    0.0136
0.0524    0.0273         0
```

C =

```
1    0    0    0
0    1    0    0
0    0    1    0
0    0    0    1
```

D =

0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0

sys =

a =

x1	x2	x3	x4	
x1	-0.1615	0.1091	0	0
x2	0.05454	-0.1091	0.05454	0
x3	0	0.05454	-0.1091	0.05454
x4	0	0	0.1091	-0.1615

b =

u1	u2	u3	
x1	0.05244	0.02727	0
x2	0	0	0.01364
x3	0	0	0.01364
x4	0.05244	0.02727	0

c =

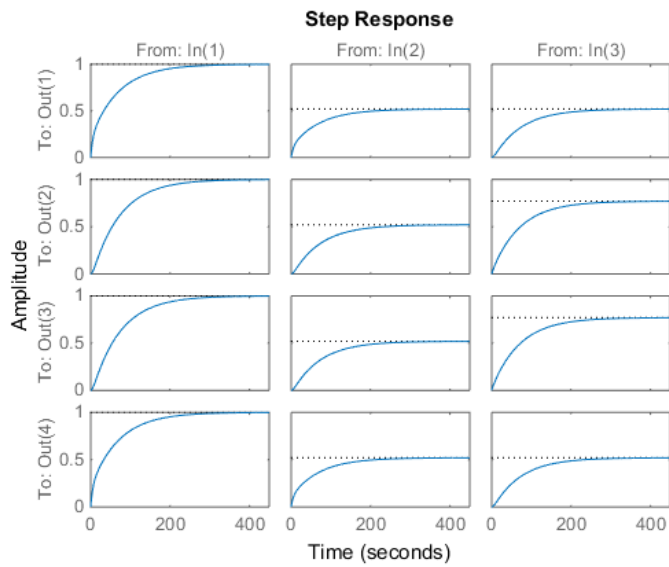
x1	x2	x3	x4	
y1	1	0	0	0
y2	0	1	0	0
y3	0	0	1	0
y4	0	0	0	1

d =

u1	u2	u3	
y1	0	0	0
y2	0	0	0
y3	0	0	0
y4	0	0	0

Continuous-time state-space model.

## Continuous-time Analysis



## Discrete-time Analysis

Frequency of sampling (Hz) and number of samples

Ad =

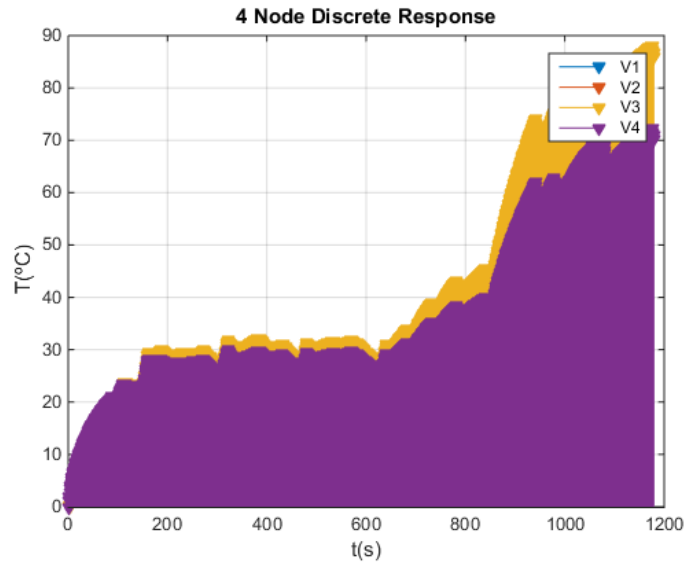
0.8534	0.0954	0.0026	0.0000
0.0477	0.9006	0.0490	0.0013
0.0013	0.0490	0.9006	0.0477
0.0000	0.0026	0.0954	0.8534

Bd =

0.0485	0.0252	0.0007
0.0013	0.0007	0.0133
0.0013	0.0007	0.0133
0.0485	0.0252	0.0007

## Initial state and input vector definition

### System Response





## Anexo E

# Modelo Térmico em C

### E.1 Funções de cálculo dos componentes do circuito elétrico equivalente.

```
double calcCapacitor(double alpha, char type) {
// Node Capacitance calculator
double C = 0;
if (type == '0') {
C = pow(L, 2) / (2.0 * alpha);
}
else {
C = pow(L, 2) / alpha;
}
return C;
}
```

```
double calcCurrent(double q, double k, char type) {
// Node current calculator
double I = 0;
if (type == '0') {
I = (pow(L, 2) / (2.0 * k)) * q;
}
else {
I = (pow(L, 2) / k) * q;
}
return I;
}
```

```
double calcGeneratedHeat(double I, double SOC, double V0) {
```

```
// Generated Heat in the battery estimation
double Q = 0;
Q = ((exp(SOC*(-0.01)) * (exp(fabs(I)*(-0.063)) * 10.0) + 1.0)
 * (V0 * fabs(I))) / 0.0000093220;
return Q;
}

double calcRp(double h, double k) {
// Paralell resistor calculator
double R = 0;
R = (0.1 * k) / (L * h);
return R;
}
```



# Bibliografia

- [1] Instituto Nacional de Estatística. Estatísticas dos transportes e comunicações 2014. In *INE, I.P., Lisboa - Portugal*, pages 1–10. INE, 2015.
- [2] Colin Vincent and Bruno Scrosati. *Modern Batteries 2nd Edition*. Elsevier, 1997.
- [3] Xiaopeng Chen, Weixiang Shen, Thanh Tu Vo, Zhenwei Cao, and Ajay Kapoor. An overview of lithium-ion batteries for electric vehicles. In *IPEC, 2012 Conference on Power & Energy*, pages 230–235. IEEE, 2012.
- [4] Kirill Murashko, Huapeng Wu, Juha Pyrhonen, and Lasse Laurila. Modelling of the battery pack thermal management system for hybrid electric vehicles. In *Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe), 2014 16th European Conference on*, pages 1–10. IEEE, 2014.
- [5] Gi-Heon Kim and Ahmad A Pesaran. *Battery thermal management system design modeling*. National Renewable Energy Laboratory, 2006.
- [6] Mark Bowkett, Kary Thanapalan, Thomas Stockley, Mark Hathway, and Julia Williams. Design and implementation of an optimal battery management system for hybrid electric vehicles. In *Automation and Computing (ICAC), 2013 19th International Conference on*, pages 1–5. IEEE, 2013.
- [7] Olivier Tremblay, Louis-A Dessaint, and Abdel-Allah Dekkiche. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. In *Vehicle power and propulsion conference, 2007. VPPC 2007. IEEE*, pages 284–289. Ieee, 2007.
- [8] Shuhui Li and Bao Ke. Study of battery modeling using mathematical and circuit oriented approaches. In *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, pages 1–8. IEEE, 2011.
- [9] A Cherif, M Jraidi, and A Dhouib. A battery ageing model used in stand alone pv systems. *Journal of Power Sources*, 112(1):49–53, 2002.
- [10] Parthasarathy M Gomadam, John W Weidner, Roger A Dougal, and Ralph E White. Mathematical modeling of lithium-ion and nickel battery systems. *Journal of Power Sources*, 110(2):267–284, 2002.

- [11] S Rael, Matthieu Urbain, and Hugues Renaudineau. A mathematical lithium-ion battery model implemented in an electrical engineering simulation software. In *Industrial Electronics (ISIE), 2014 IEEE 23rd International Symposium on*, pages 1760–1765. IEEE, 2014.
- [12] Yonghuang Ye, Yixiang Shi, Ningsheng Cai, Jianjun Lee, and Xiangming He. Electro-thermal modeling and experimental validation for lithium ion battery. *Journal of Power Sources*, 199:227–238, 2012.
- [13] Marijn R Jongerden and Boudewijn R Haverkort. Which battery model to use? *Software, IET*, 3(6):445–457, 2009.
- [14] Carla E Chiasserini and Ramesh R Rao. A model for battery pulsed discharge with recovery effect. In *Wireless Communications and Networking Conference, 1999. WCNC. 1999 IEEE*, pages 636–639. IEEE, 1999.
- [15] Carla-Fabiana Chiasserini and Ramesh R Rao. Improving battery performance by using traffic shaping techniques. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 19(7):1385–1394, 2001.
- [16] Daniel Filipe Pereira Magalhães. *Modelo de Baterias com aplicação em sistemas de gestão de baterias (BMS) de Veículos Elétricos (EVs)*. dissertation, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [17] Daler Rakhmatov, Sarma Vrudhula, and Deborah A Wallach. Battery lifetime prediction for energy-aware computing. In *Proceedings of the 2002 international symposium on Low power electronics and design*, pages 154–159. ACM, 2002.
- [18] Y Hu, S Yurkovich, Y Guezennec, and BJ Yurkovich. A technique for dynamic battery model identification in automotive applications using linear parameter varying structures. *Control Engineering Practice*, 17(10):1190–1201, 2009.
- [19] Yiran Hu, S Yurkovich, Y Guezennec, and BJ Yurkovich. Electro-thermal battery model identification for automotive applications. *Journal of Power Sources*, 196(1):449–457, 2011.
- [20] Michael A Roscher and Dirk Uwe Sauer. Dynamic electric behavior and open-circuit-voltage modeling of lifepo 4-based lithium ion secondary batteries. *Journal of Power Sources*, 196(1):331–336, 2011.
- [21] Matteo Muratori. *Thermal Characterization of Lithium-ion Battery Cell*. dissertation, Politecnico di Milano, 2009.
- [22] John Newman, Karen E Thomas, Hooman Hafezi, and Dean R Wheeler. Modeling of lithium-ion batteries. *Journal of power sources*, 119:838–843, 2003.
- [23] Y Inui, Y Kobayashi, Y Watanabe, Y Watase, and Y Kitamura. Simulation of temperature distribution in cylindrical and prismatic lithium ion secondary batteries. *Energy Conversion and Management*, 48(7):2103–2109, 2007.

- [24] SC Chen, CC Wan, and YY Wang. Thermal analysis of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 140(1):111–124, 2005.
- [25] M Giegerich, S Koffel, R Filimon, JL Grosch, T Fuhner, MM Wenger, M Gepp, and VRH Lorentz. Electrothermal modeling and characterization of high capacity lithium-ion battery systems for mobile and stationary applications. In *Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE*, pages 6721–6727. IEEE, 2013.
- [26] I Baghdadi, O Briat, A Eddahech, JM Vinassa, and P Gyan. Electro-thermal model of lithium-ion batteries for electrified vehicles applications. In *Industrial Electronics (ISIE), 2015 IEEE 24th International Symposium on*, pages 1248–1252. IEEE, 2015.
- [27] Diogo Bastos Martins Ledo. *Powertrain de um veículo elétrico – estudo térmico da bateria e projeto mecânico*. dissertation, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [28] Sónia Carina Lopes da Costa. *Análise e Desenvolvimento de um Método de Estimação de Estado de Carga de Baterias Baseado em Filtros de Kalman*. dissertation, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [29] Daniel F Magalhães, Armando S Araújo, and Adriano S Carvalho. A model for battery lifetime calculation implementable in circuit simulators. In *Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), 2013 World*, pages 1–6. IEEE, 2013.
- [30] Daler Rakhmatov, Sarma Vrudhula, and Deborah A Wallach. A model for battery lifetime analysis for organizing applications on a pocket computer. *Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, IEEE Transactions on*, 11(6):1019–1030, 2003.
- [31] Theodore L Bergman, Frank P Incropera, and Adrienne S Lavine. *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons, 2011.