Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Estudo e estimação de parâmetros de um modelo eléctrico de bateria

Marino Ricardo Santos Matos

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Automação

Orientador: Prof. Doutor. Rui Esteves Araújo
Data 31/1/2010

© Marino Ricardo Santos Matos, 2010

U.PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO

MIEEC - MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES **2010/2011**

A Dissertação intitulada

"Estudo e Estimação de Parâmetros de um Modelo Eléctrico de Bateria"

foi aprovada em provas realizadas em 23-02-2011

o júri

Presidente Professor Doutor Diamantino Rui da Silva Freitas
Professor Associado do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Professor Doutor Rui Filipe Marques Chibante
Professor Adjunto Departamento de Engenharia Electrotécnica da Instituto Superior de Engenharia do Porto

Professor Doutor Rui Manuel Esteves Araújo
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

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

Autor - Marino Ricardo dos Santos Matos

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

© Marino Ricardo Santos Matos, 2010

Resumo

Os veículos eléctricos assumem actualmente um papel preponderante na indústria automóvel. A necessidade de redução de gases poluentes, motivou o desenvolvimento na área, permitindo à tecnologia atingir nos dias de hoje uma performance razoável em comparação com os veículos de combustão interna.

Neste contexto as baterias possuem um papel relevante, pois permitem o armazenamento da energia responsável pelo movimento destes veículos. Actualmente existem diferentes químicas de baterias, com diferentes características e performance associadas.

Neste trabalho foi efectuado um levantamento de vários tipos de modelos teóricos capazes de simular o comportamento real da bateria. Foi implementado um modelo eléctrico baseado no circuito de *Thevenin* e um modelo baseado na impedância da bateria eléctrica.

O método de estimação paramétrica de espectroscopia de impedância electroquímica foi usado, os resultados indesejados levaram à discussão de formas práticas de melhorar o processo de medição.

Tendo em vista a validação e experimentação desses mesmos modelos, foi especificada e implementada uma plataforma de testes capaz de testar baterias e estimar os seus parâmetros internos. Foram realizados diversos testes aos elementos constituintes da plataforma de forma a garantir que esta cumpre com os requisitos, inicialmente propostos.

O *Matlab* foi a ferramenta usada para a implementação dos modelos teóricos, através do ambiente *Simulink*. De forma a comunicar com os diferentes componentes da plataforma de testes foi usado o *LabView*.

Foi possível adquirir um maior conhecimento para os diferentes tipos de modelos, principalmente os modelos eléctricos e matemáticos, onde foi possível comparar o seu desempenho através de simulações realizadas.

Abstract

Nowadays electric vehicles assume a primary role within the automotive industry. The need to reduce gas emissions to the atmosphere motivated the increase in the development of the subject, allowing it to reach levels or performance comparable to the vehicles of internal combustion engines.

In this context, batteries assume a major role as they store of the energy responsible for the movement of such vehicles.

As for now there are different chemicals of batteries, with diffent characteristics and associated performances.

In this work a study about several theoretical models able to simulate the real behaviour of a battery took place. The parametric estimation of espectroscopy of the electrochemical impedance model was used, wich faulty results lead to the discussion of more practical ways to improve the reading parameters process.

With the aim of proving and validating the models, a test platform was specified and implemented which is able to test batteries and estimate its internal parameters. Matlab was the software tool used to implement the theoretical models through the Simulink environment. To be able to communicate with different components of the test platform was also created a program using LabView.

It was possible to acquire a greater knowledge for the different types os models, mainly the electrical and mathematical models where it was possible to benchmark and compare their performance through numerical simulations.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Doutor Rui Esteves Araújo, pelo incentivo, orientações e sugestões. Um especial agradecimento à Engª. Cristina Nunes, pela sua simpatia e por facilitar o acesso aos laboratórios do departamento de química.

Aos colegas que partilharam comigo este percurso académico, em especial aqueles que estiveram sempre presentes.

À minha família, por todo o apoio.

Índice

Resumo iv

Abstract vi

Agradecimentos viii

Índice x

Lista de figuras xii

Lista de Tabelas xvi

Abreviaturas xviii

Capítulo 1 1

Introdução 1

1.1 - Organização do documento 1
1.2 - Enquadramento da dissertação 1
1.3 - Problemática da dissertação 2
1.4 - Objectivos do trabalho 2

Capítulo 2 5

Revisão dos modelos de baterias eléctricas 5

2.1 - Introdução 5
2.1.1 - Diferentes tipos de baterias eléctricas 5
2.1.2 - Características de desempenho 6
2.2 - Modelos de baterias 7
2.2.1 - Fenómenos internos 9
2.2.1.1 - Dinâmica dos fenómenos 9
2.2.1.2 - Fenómeno de difusão 10
2.2.1.3 - Fenómeno de dupla camada 11
2.2.1.4 - Fenómeno de polarização 12
2.2.2 - Modelos Electroquímicos 12
2.2.3 - Modelos Matemáticos 13
2.2.3.1 - Lei de Peukert 13
2.2.3.2 - Modelo de eficiência da bateria 14
2.2.3.3 - Shepherd Model 14
2.2.3.4 - Unnewehr Universal Model 15

2.2.4 - Modelos Eléctricos 16
2.2.4.1 - Modelo baseado no circuito eléctrico de Thévenin 16
2.2.4.2 - Modelo eléctrico baseado na impedância 18
2.2.4.3 - Modelos de tempo de funcionamento 19
2.2.5 - Comparação de modelos 19

Capítulo 3 23

Plataforma experimental para estimação de parâmetros 23

3.1 - Introdução 23
3.2 - Plataformas de teste comerciais 24
3.3 - Especificação da plataforma de testes 25
3.3.1 - Especificação da carga electrónica 26
3.3.1.1 - Especificação Inicial 26
3.3.1.2 - Critérios para ponderação 27
3.3.1.3 - Lista de equipamentos analisados 27
3.3.1.4 - Análise e ponderação 27
3.3.1.5 - Conclusão 30
3.4 - Testes preliminares aos elementos que constituem a plataforma de testes 30
3.4.1 - Controlo da fonte de tensão programável 30
3.4.2 - Carga dc electronicamente programável 33
3.5 - Testes de análise de desempenho de bateria 36
3.5.1 - Teste de carga dinâmico 36
3.6 - Processos de identificação paramétrica das baterias 37
3.6.1 - Descrição do processo de Espectroscopia de Impedância Electroquímica (EIS) . 37
3.6.1.1.1. Elementos de fase constante 40
3.6.2 - Equipamento utilizado 41
3.6.3 - Testes preliminares ao equipamento 42
3.6.4 - Resultados obtidos com bateria Li-Ion 44
3.6.1 - Conclusões 47

Capítulo 4 49

Análise e simulação dos modelos de baterias eléctricas 49

4.1 - Introdução 49
4.1.1 - Influência dos diferentes parâmetros 49
4.2 - Análise do modelo matemático incorporado no matlab 54
4.2.1 - Modelo de descarga 57
4.2.2 - Modelo de carga 58
4.2.3 - Diagrama de modelo matemático em Simulink 59
4.3 - Análise do modelo eléctrico equivalente da bateria 59
4.3.1 - Diagrama do modelo eléctrico em Simulink 62
4.4 - Estimação de parâmetros para o modelo eléctrico 63
4.4.1 - Estimação da resistência ohmica 64
4.4.2 - Estimação dos parâmetros Rts e Cts 66
4.4.3 - Estimação dos parâmetros Rtl e Ctl 67
4.4.4 - Influência da temperatura 70
4.5 - Modelo eléctrico baseado em impedância 71
4.6 - Resultados 73

Capítulo 5 75

Conclusão e Trabalhos Futuros 75

5.1 - Conclusão 75
5.2 - Trabalhos Futuros 75

Lista de figuras

Figura 2.1 – Modelação de baterias [2]. 8
Figura 2.2 – Domínio de tempos típicos para fenómenos dinâmicos em baterias [6]. 10
Figura 2.3- Processo de difusão numa bateria [6]. 11
Figura 2.4- Efeito de dupla camada I [8]. 11
Figura 2.5 – Efeito de dupla camada II [8]. 11
Figura 2.6 – Circuito eléctrico equivalente simplificado do efeito de dupla camada e polarização [6]. 12
Figura 2.7. Modelo simples de bateria 17
Figura 2.8 – Circuito equivalente de Thevenin 17
Figura 2.9 – Espectro da impedância de uma célula de Li-Ion [14]. 18
Figura 2.10 - Modelo elétrico de tempo de vida [13]. 19
Figura 3.1 – Equipamento de testes de baterias [15] 24
Figura 3.2 – Plataforma de testes de baterias 26
Figura 3.3 - Datasheet B&k 8500 series 28
Figura 3.4 - Por ordem: B&K 8500 - Agilent 6060B – Tti LD300 – Agilent N3307A – Elektro-Automatic 30
Figura 3.5- Modos de funcionamento de fonte dc controlável [26] 31
Figura 3.6 – Ambiente Labview® após envio de comando para identificação 32
Figura 3.7 – Diferentes patamares de tensão criados pela fonte de tensão de forma automática 33
Figura 3.8 – Gráfico de tensão, potência e resistência 34
Figura 3.9 - Gráfico da descarga da bateria para diferentes correntes 34
Figura 3.10 – Diagrama de descarga da bateria Li-ion 35
Figura 3.11 – Integração da carga DC com Labview 35
Figura 3.12 – Setup experimental 36
Figura 3.13 – Ciclo de teste de stress dinâmico [16]. 37
Figura 3.14- Esquema equivalente de um equipamento EIS [2]. 38
Figura 3.15- Resposta sinusoidal da corrente num sistema linear [9] 39
Figura 3.16- Diagrama de Bode [14]. 39

Figura 3.17 – Ajuste de mínimos quadrados 40
Figura 3.18 – Equivalência da impedância de Warburg com circuitos RC 40
Figura 3.19-Influência do número de circuitos RC paralelo [2]. 41
Figura 3.20 – Equipamento EIS - Voltalab 80 41
Figura 3.21 – Ligação dos terminais do EIS [18] 42
Figura 3.22 – EIS - Evolução da resistência com a frequência 10kΩ (ensaio realizado) 43
Figura 3.23- Evolução da resistência com a frequência (100kΩ) 43
Figura 3.24 – Teste EIS para uma resistência de 10kΩ 44
Figura 3.25 – Configuração recomendada para ligação das células [19] 45
Figura 3.26 – Fixação da bateria [19] 45
Figura 3.27 – Ligação no equipamento EIS para Medição de impedância [20] 46
Figura 3.28 – Diagrama de Bode da medição EIS 47
Figura 4.1 – Resposta a um impulso de descarga de uma bateria de Li-ion [21] 50
Figura 4.2 – Tendência de alteração da resistência da bateria [21] 51
Figura 4.3 – Resistência interna para diferentes correntes de descarga [21] 51
Figura 4.4 – Resistência interna para diferentes profundidades de descarga [21] 52
Figura 4.5 – Resistência interna para temperaturas ambientes diferentes [21]. 52
Figura 4.6 – Relação entre resistência ohmica e estado de carga [21]. 53
Figura 4.7- Variação das resistências com o SOC, para diferentes constantes de tempo [22]. 53
Figura 4.8- Curva de descarga a corrente constante de 0.2C [5]. 54
Figura 4.9- Curva típica de descarga [23]. 55
Figura 4.10 –Curva característica para a carga de baterias [23]. 55
Figura 4.11 – Zona exponencial para baterias de chumbo, NiMH e NiCD [23]. 56
Figura 4.12 – Diagrama de funcionamento do modelo matemático da bateria [23]. 57
Figura 4.13 – Modelo Simulink® do modelo matemático 59
Figura 4.14 – Modelo eléctrico com resistência de auto descarga [13] 60
Figura 4.15 – Modelo eléctrico sem resistência de auto descarga [24] 60
Figura 4.16- Relação SoC-Voc para diferentes temperaturas [22]. 61
Figura 4.17- Relação SOC-Voc 61
Figura 4.18 – Esquema de modelo eléctrico baseado no artigo [24]. 63
Figura 4.19 – Esquema de simulação da para teste de baterias em Simulink 64
Figura 4.20 – Gráfico de tensão a um impulso de corrente 65
Figura 4.21 – Tensão aos terminais da bateria 65
Figura 4.22 – Gráfico da tensão em resposta uma impulso de descarga [25]. 66
Figura 4.23 – Resposta ao impulso de corrente de 150s a 200s 67
Figura 4.24 – Matlab® *Curve Fitting* 68
Figura 4.25 – Resultados obtidos para os coeficientes da função y(t) 68

Figura 4.26 - Gráfico de comparação de tensão entre o modelo eléctrico (amarelo) e o modelo matemático (roxo) para R=0.1Ω 69

Figura 4.27 - Gráfico da diferença entre a tensão dos dois modelos representado pela linha amarela 70

Figura 4.28- Variação da resistência interna com a temperatura 71

Figura 4.29 – Implementação Matlab® de uma resistência variável em SimPowerSystems® 71

Figura 4.30 – Modelo eléctrico baseado em impedância em Simulink 73

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Comparação das características principais dos diferentes tipos de baterias. [3] 5

Tabela 2.2 – Comparação dos diferentes materiais para o ânodo de bateiras de lítio [4] 6

Tabela 2.3- Comparação dos vários modelos eléctricos [13] 20

Tabela 3.1- Lista de equipamentos analisados 27

Tabela 3.2- Especificação dos equipamentos analisados 28

Tabela 3.3- Sistemas de protecção dos sistemas analisados 29

Tabela 3.4 – Ponderação dos principais critérios 29

Tabela 3.6-Caracteristicas do equipamento EIS 42

Tabela 3.7 – Limite de frequências do equipamento EIS 42

Tabela 4.1- Comandos básicos da fonte programável 32

Abreviaturas

AC	Corrente alternada
CPE	Constant phase spectrum (espectro de fase constante)
DC	Corrente contínua
DEEC	Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
DOD	Deep of discharge (profundidade de descarga)
EIS	Electrochemical Impedance Spectroscopy
EOC	End of Charge (fim de carga)
EV	Electrical vehicle (veículo eléctrico)
HEV	Hybrid electrical vehicle (veículo electric híbrido)
LiB	Li-Ion battery (bateria de iões de lítio)
Ni-MH	Nickel-metal hydride cell
OCV	Open circuit voltage (tensão de circuito aberto)
SoC	State of Charge (estado de carga)
SoH	State of Health (estado de saúde)
SoF	State of Function (estado de funcionamento)
SPICE	Simulated Program with Integrated Circuits Emphasis
T	Temperatura
Voc	Open circuit voltage (tensão de circuito aberto)
VRLA	Valve-regulated lead-acid battery (bateria de chumbo-ácido com válvula regulação

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Organização do documento

O presente documento descreve o trabalho executado no âmbito da unidade curricular "Dissertação" do curso de Mestrado integrado de engenharia electrotécnica, no qual são apresentadas as problemáticas, as soluções estudadas, bem como os resultados obtidos.

A dissertação está organizada em cinco capítulos, cujos conteúdos são descritos, de forma resumida, na presente secção.

Neste primeiro capítulo é feito o enquadramento da dissertação bem como a problemática da mesma. Além disso, são definidos os objectivos pretendidos com a realização desta dissertação são definidos.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica relativamente aos principais aspectos referentes a modelos de baterias.

No terceiro capítulo é abordada a temática de desenvolvimento de uma plataforma experimental de baterias em laboratório de baixo custo.

No quarto capítulo é realizada uma simulação numérica de um modelo eléctrico de bateria, sendo depois comparado os resultados com um modelo matemático disponível na biblioteca *SimPowerSystems*® da *MathWorks*.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões da dissertação e são sugeridos futuros desenvolvimentos ao trabalho realizado.

1.2 - Enquadramento da dissertação

Com a consciencialização global acerca dos combustíveis fósseis, novas formas de produzir e armazenar energia estão em constante desenvolvimento. Tipicamente nos países

industrializados cerca de 30% da energia fóssil é consumida pelo sector dos transportes, pelo que desde a década de 90 a temática dos veículos eléctricos renasceu, como uma solução para a redução das emissões prejudiciais ao ambiente.

Para acelerar o desenvolvimento de tecnologia capaz de competir com os já existentes e bem enraizados, motores de combustão interna, tem-se assistido ao investimento por partes dos principais construtores automóveis. A autonomia dos veículos é ainda um dos principais factores para o fraco número de vendas, sendo por isso uma área em constante desenvolvimento [1].

As tendências mais recentes em termos de tipo de química apontam para iões de lítio. De qualquer forma, o estudo aqui apresentado pretende, na medida do possível, estudar os métodos de estimação paramétrica independentemente do tipo de química de bateria. Esta linha de pensamento leva a formular um modelo eléctrico elementar composto pela série de uma fonte de tensão com uma impedância. A cada um destes elementos pode-se acrescentar complexidade para melhor caracterizar certos fenómenos dependentes da química das baterias.

1.3 - Problemática da dissertação

Para promover o desenvolvimento sustentado dos veículos eléctricos, são necessários vários aperfeiçoamentos em termos de eficiência energética. Uma forma de se atingir melhoramentos é através do profundo conhecimento dos sistemas.

Nesta dissertação é projectada uma plataforma de testes capaz de testar e analisar baterias eléctricas, que são um dos principais meios de armazenamento de energia. São também abordados vários métodos de modelação de baterias, que permitem prever o seu comportamento durante o seu funcionamento. A modelação de baterias é utilizada em várias áreas, sendo uma das principais é na estimação do desempenho da bateria. No essencial, pretende-se avaliar o grau de desempenho da bateria em condições específicas de funcionamento.

1.4 - Objectivos do trabalho

Tendo como pano de fundo o enquadramento estabelecido nas secções anteriores, o trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação tem como objectivos principais os seguintes pontos:

- Rever os modelos eléctricos equivalentes das baterias;
- Identificar e caracterizar quais os fenómenos que os modelos eléctricos modelam;

- Especificar e implementar uma plataforma de baixo custo de estimação paramétrica.

Capítulo 2

Revisão dos modelos de baterias eléctricas

2.1 - Introdução

Este segundo capítulo tem como principal objectivo proporcionar uma revisão do estado de arte e desenvolver uma familiarização adequada com as diferentes abordagens de modelação matemática que permitem caracterizar os acumuladores eléctricos de energia.

Este capítulo aborda os principais tipos de baterias eléctricas que existem actualmente bem como as suas principais características. É também discutido os diferentes factores que influenciam o desempenho das baterias. São também apresentados os diferentes fenómenos internos que ocorrem no interior das baterias, de modo a entender quais fenómenos são modelados nos vários modelos estudados.

2.1.1 - Diferentes tipos de baterias eléctricas

As baterias eléctricas são usadas em veículos devido às suas características em termos de densidade de energia, tamanho e confiabilidade. Dividem-se principalmente em quatro categorias, consoante a sua química. Distinguem-se então, as baterias de ácido-chumbo (lead-Acid), Nickel-Cadmium (Ni-cd), Nickel-Metal Hydride (Ni-MH) e Lithium-Ion (Li-Ion) [2].

Na Tabela 2.1 encontra-se sistematizada uma comparação dos principais tipos de baterias.

Tabela 2.1 Comparação das características principais dos diferentes tipos de baterias [3].

	Lead-Acid	**Ni-Cd**	**NI-MH**	**Li ion**
Custo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Energia (Wh-Kg^{-1})	30-50	50-80	40-100	160
Tensão por célula (v)	2	1.25	1.25	3.6
Corrente de carga	Baixa	Muito Baixa	Moderada	Alta
Número de ciclos	200-500	1000	1000	1200

Auto descarga por mês	Baixa (5%)	Moderada (20%)	Alta (30%)	Baixa (10%)
Tempo mínimo de carga (h)	8-16	1 – 1.5	2 – 4	2 – 4
Impacto ambiental	Alto	Alto	Baixo	Alto

Embora as baterias de ácido-chumbo sejam bastante usadas em sistemas de tracção, devido à sua baixa densidade de energia, cada vez mais são vistas como uma tecnologia ultrapassada. As baterias de Ni-Cd também têm perdido alguma popularidade devido à sua elevada poluição ambiental provocada pelo elemento cádmio, de qualquer maneira é possível continuarem a serem uma das tecnologias a utilizar nos veículos eléctricos. As baterias de lítio, tendo em conta a sua grande densidade de energia têm ganho popularidade, sendo previsível um aumento da sua utilização com a progressiva redução de custos de produção. Na Tabela 2.2 estão descritos os principais tipos de químicos usados [4].

Tabela 2.2 – Comparação dos diferentes materiais para o ânodo de bateiras de lítio [4].

Material do Ânodo	**$LiCoO_2$**	**$LiMnO_2$**	**$LiFEPO_4$**	**$Li_3V_2(PO_4)_3$**
Capacidade de descarga (mAh/g)	130-140	100-120	~140	>170
Tensão de descarga (V)	3.6	~4	3.4	~4
Estabilidade de temperatura	Mau	Mau	Bom	Bom
Ciclo de vida	Bom	Normal	Bom	Bom
Segurança	Mau	Razoável	Razoável	Razoável
Preço	Alto	Baixo	Baixo	Muito Baixo

2.1.2 - Características de desempenho

As baterias são elementos electroquímicos, onde ocorrem várias reacções químicas, gerando energia eléctrica. Alguns dos factores que afectam o desempenho das baterias são:

- Estado de Carga (SoC);
- Estado de Saúde (SoH);
- Capacidade de armazenamento;
- Perfil de descarga;
- Temperatura.

Num sistema de tracção as principais características a ter em conta nas baterias são:

- Elevada densidade de potência e alta densidade de energia;
- Tempo de vida longo (> 10anos);
- Uniformidade da resistência interna e tensão nas células da bateria;
- Capacidade de funcionamento numa larga gama de temperatura;
- Facilidade de monitorização e de manutenção;
- Baixo custo;
- Efeito de memória nulo;
- Longo tempo de preservação;
- Confiabilidade;
- Baixo impacto ambiental.

É de consenso geral que as baterias de iões de lítio são, até ao momento, as mais promissoras para veículos eléctricos, puramente alimentados com baterias, pois são aquelas que cumprem a maior parte dos requisitos estabelecidos.

2.2 - Modelos de baterias

A modelação computacional das baterias permite prever o seu desempenho em funcionamento, sendo usada na concepção e projecto. Deste modo, será possível, após a sua concepção, perceber qual será o comportamento da bateria em funcionamento no sistema final. Outro aspecto de grande importância é permitir estimar em tempo real qual o comportamento da bateria, prevendo o actual estado de carga. Neste caso, o uso destes modelos é importante, pois é impossível realizar testes físicos de modo a prever o estado de carga quando a bateria se encontra num regime dinâmico.

Na literatura da especialidade, encontram-se descritos modelos de baterias com diferentes níveis de complexidade que naturalmente permitem estimação com diferentes graus de exactidão. Não existe um modelo perfeito, pois todos apresentam pontos fortes e pontos fracos. Alguns dos aspectos pelos quais se caracterizam os modelos são: a complexidade computacional, a precisão, a exactidão e a previsão em estados dinâmicos de potência.

Normalmente, os modelos usados em projecto são complexos e específicos, podendo demorar horas para se obterem resultados. Pelo contrário, os modelos usados em tempo real procuram ser mais simples computacionalmente, com a contrapartida de uma menor exactidão. Como os modelos de projecto são bastante complexos e difíceis de deduzir, acabam por ser modelos restritos à indústria que promove desenvolvimento na área de baterias ou instituições de investigação com trabalhos no desenvolvimento ao nível das células ou no seu aperfeiçoamento.

Com isto, os modelos de estimação do desempenho são os mais utilizados, e os mais úteis para a maioria dos utilizadores. Estes modelos permitem conhecer o estado de carga (SoC), estado de saúde (SoH), tensão em circuito aberto (Voc), entre outros parâmetros de menor importância para o utilizador.

É possível fazer uma dos diferentes tipos de modelos em três categorias, que são: modelos electroquímicos, matemáticos e eléctricos. Os modelos electroquímicos são baseados nas equações físico-químicas que regem o comportamento da bateria, como estes fenómenos são por vezes difíceis de descrever por equações matemáticas, estes modelos têm normalmente, uma complexidade elevada. Os modelos matemáticos por sua vez recorrem a fórmulas matemáticas adquiridas de forma empírica para modelar alguns aspectos que caracterizam o desempenho das baterias. Já os modelos de baterias baseados em circuitos eléctricos, modelam o comportamento das baterias através de circuitos eléctricos, recorrendo a elementos simples como resistências e condensadores para descrever os fenómenos internos das baterias.

Na Figura 2.1 está representado um modelo genérico de um sistema de estimação. As entradas deste modelo são: Corrente I(t), potência P(t), variação da temperatura exterior Θext(t). Estes sinais são depois processados por um modelo, que podem ter um fundamento electroquímico, térmico, eléctrico ou matemático. Assim, dependendo da sua função, tem como saídas a tensão U(t), a variação da temperatura interna da bateria Θbat(t), o estado de carga actual SOC(t) e o estado de saúde actual SOH(t) [5] [2].

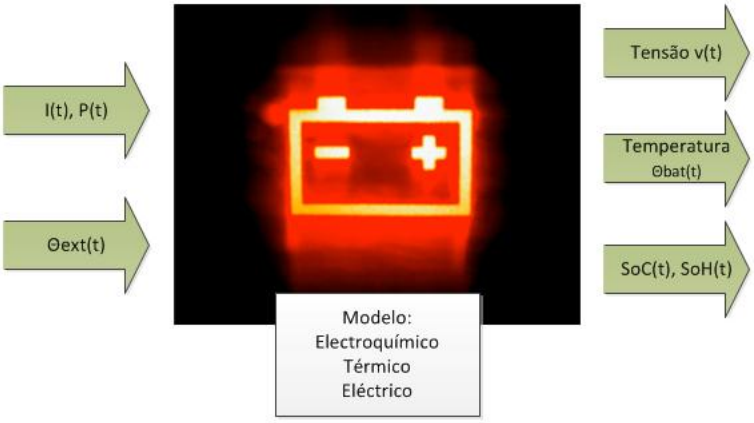

Figura 2.1 – Modelação de baterias [2].

Dado o objectivo da dissertação, outros aspectos e explicações mais detalhadas poderão ser encontradas na literatura da especialidade e na bibliografia referenciada.

2.2.1 - Fenómenos internos

Esta secção dedica-se a introduzir uma descrição paramétrica de um conjunto de fenómenos. Numa primeira secção é dedicada à dinâmica dos fenómenos que ocorrem nas baterias e que influenciam os parâmetros dos circuitos eléctricos equivalentes. Depois é explicada de uma forma sucinta os diferentes fenómenos.

2.2.1.1 - Dinâmica dos fenómenos

A dinâmica dos fenómenos que ocorrem no interior das baterias pode ser influenciada por parâmetros internos e externos tais como:

Parâmetros internos:

- Estado de Carga (SoC);
- Estado de saúde (SoH);
- Estado de funcionamento (SoF);
- Resistência DC e AC;
- Parâmetros de projecto da bateria.

Parâmetros externos:

- Temperatura;
- Corrente DC;
- Perfil de utilização a curto e longo termo.

As características de dinâmica da bateria podem dar informações acerca dos parâmetros mencionados. Torna-se por isso importante saber qual a banda de frequências e domínios de tempo que são influenciados por cada um dos parâmetros. O domínio de tempo de um sistema composto por uma bateria vai desde o micro segundos até vários anos. Este vasto domínio de tempo é causado por diferentes fenómenos físicos que podem ser divididos em efeitos eléctricos (efeitos rápidos), efeitos decorrentes do princípio de funcionamento, tais como transporte de massa ou dupla camada e efeitos a longo termo causado por regimes de funcionamento. Normalmente este domínio de tempo é bastante influenciado pela química da bateria, design, SoC e SoH. Na Figura 2.2 está representado o domínio de tempo típico para cada fenómeno [6].

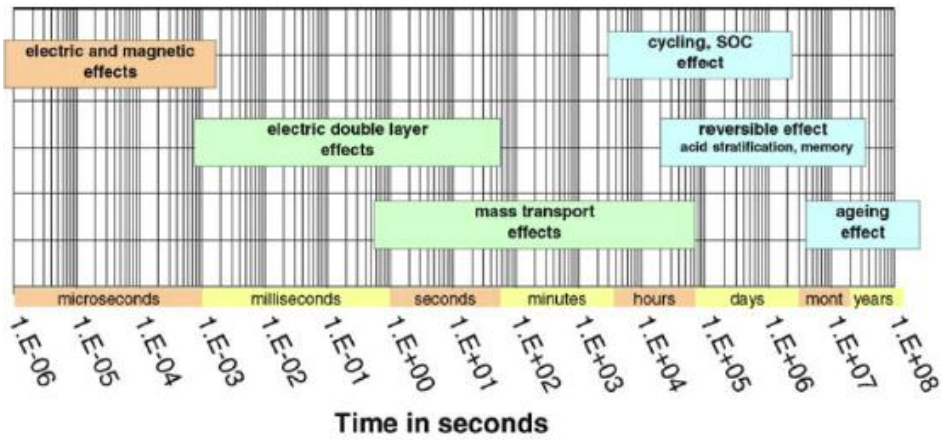

Figura 2.2 – Domínio de tempos típicos para fenómenos dinâmicos em baterias [6].

Os efeitos de temperatura não estão representados, pois a temperatura não tem um domínio de tempo definido, podendo variar desde os 10 segundos às 10 horas, dependendo principalmente da capacidade de dissipação de calor e do trânsito de energia.

2.2.1.2 - Fenómeno de difusão

Nas baterias, o transporte de iões é feito por difusão e por migração. A difusão é causada pelo gradiente em concentração, enquanto a migração é provocada pelas forças do campo eléctrico. A difusão pode ocorrer em várias zonas dentro da célula.

No electrolítico livre (separador), à medida que os iões são produzidos num eléctrodo, são consumidos no outro, havendo assim movimentação entre os eléctrodos. Esse movimento regista-se entre os poros do eléctrodo, uma vez que a reacção electroquímica pode ocorrer em qualquer sítio (dentro ou fora dos poros do eléctrodo) da superfície da massa activa. Os produtos de reacção podem-se mover entre a massa activa para a sua posição final por difusão. No caso das baterias de li-ion, existe uma película na superfície do ânodo, e a difusão através dessa película tem uma influência significante no comportamento eléctrico das baterias de Li-ion. Em células gastas, esta película pode ser substituída, resultando na alteração das características dinâmicas da bateria.

Na Figura 2.3 estão representadas três localizações onde a difusão pode ocorrer. A temperatura é um factor importante no coeficiente de difusão, daí que quanto maior a for a temperatura, maior será o fenómeno de difusão. Numa perspectiva eléctrica, a difusão provoca uma sobre tensão, que é causada pela redução ou aumento da concentração iónica no local de transferência de carga. A constante de tempo que representa a difusão demonstra uma característica dinâmica, e varia com a forma do eléctrodo.

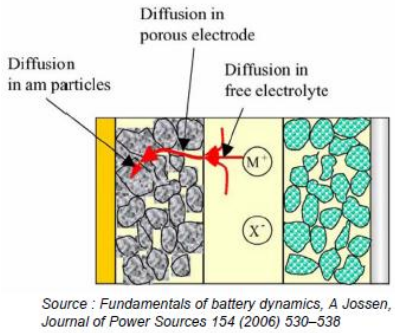

Figura 2.3- Processo de difusão numa bateria [6].

Este fenómeno pode ser presenciado no caso de uma lanterna. Quando esta é usada durante bastante tempo e a luz começa a fraquejar, se esta for desligada por alguns minutos, quando se volta a ligar a luz fica por alguns segundos mais brilhante. Isto acontece porque o electrólito voltou ao seu estado de equalização [7].

2.2.1.3 - Fenómeno de dupla camada

Quando um eléctrodo (ânodo) está imerso no electrolítico, é coberto por uma camada de cargas positivas, que por sua vez, atrai cargas negativas. Estas cargas negativas formam uma segunda camada móvel que está segura pela atracção electroestática. As duas camadas são designadas de dupla camada eléctrica e assumem o comportamento de um condensador electrolítico. Na Figura 2.4 e 2.5 está representado o efeito de dupla camada num eléctrodo.

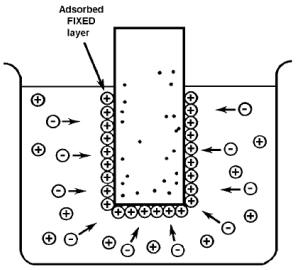

Figura 2.4- Efeito de dupla camada I [8].

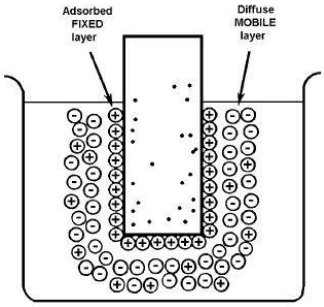

Figura 2.5 – Efeito de dupla camada II [8].

O valor capacitivo provocado por este efeito depende de varias variáveis, tais como: Potencial do eléctrodo, temperatura, concentração iónica, tipo de iões, entre outros [9].

Um circuito equivalente deste fenómeno é mostrado na Figura 2.6, a queda de tensão provocada pela transferência de carga é modelado pela resistência de polarização Rp e a capacidade de dupla camada é modelado pelo condensador Cdl.

2.2.1.4 - Fenómeno de polarização

Quando o potencial de um eléctrodo é forçado a desviar-se do seu valor em circuito aberto, é designado como "polarizar" o eléctrodo. Quando o eléctrodo é polarizado pode causar um fluxo de corrente através de reacções electroquímicas, que ocorrem na superfície do eléctrodo. A quantidade de corrente é controlada pela cinética das reacções e pela difusão dos reagentes. Nas células onde um eléctrodo está sobre uma corrosão uniforme em circuito aberto, o potencial em circuito aberto é controlado pelo equilíbrio entre duas reacções químicas. Uma das reacções gera corrente catódica e outra gera corrente anódica. O potencial em circuito aberto acaba por ser o potencial onde as correntes anódicas e catódicas são iguais, a isto dá-se o nome de potencial misto. O valor de corrente para as duas reacções é conhecido por corrente de corrosão. Na Figura 2.1 está representado a resistência Rp que representa a resistência de polarização.

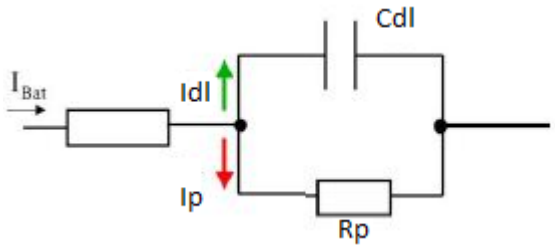

Figura 2.6 – Circuito eléctrico equivalente simplificado do efeito de dupla camada e polarização [6].

2.2.2 - Modelos Electroquímicos

Os modelos electroquímicos são os mais exactos e têm grande utilidade para os projectistas de baterias. Estes constituem-se como uma ferramenta útil na optimização dos parâmetros físicos da bateria. Apresentam uma complexidade elevada e, naturalmente, são bastante lentos a produzir resultados em relação a outras abordagens de modelação.

A título ilustrativo considere-se um modelo electroquímico isotérmico. Este descreve a carga e descarga de uma bateria de lítio para um ciclo, usando a teoria de solução concentrada para derivar um conjunto de equações que, quando resolvidas, fornecem os valores do potencial da célula em função do tempo [10].

Existem disponíveis ferramentas computacionais, como por exemplo o programa *DualFoil*, criado pela universidade de Berkeley, o qual é usado para simular vários tipos de bateria, sendo para isso necessário vários parâmetros do modelo. Estes parâmetros são baseados no conhecimento da composição química, capacidade, temperatura e outras características da bateria em causa. Como este tipo de simulação recorre a equações matemáticas complexas, a simulação pode demorar algumas horas, não sendo assim úteis para modelos de estimação em tempo real.

A modelação utilizando o *DualFoil* permite [11]:

- Identificar limitações nas células: transporte, cinética;
- Optimizar protocolos de carga, em função da temperatura;
- Validar protocolos de segurança para carregamento da bateria;
- Fazer recomendações de projecto;
- Optimizar o projecto de bateria para determinadas aplicações;
- Comparar a performance de diferentes químicas e projecto de células.

2.2.3 - Modelos Matemáticos

Nesta categoria os modelos são construídos com base em equações matemáticas que modelam e caracterizam o comportamento da bateria.

Nas próximas secções serão abordados cinco modelos diferentes explicando sucintamente as suas equações fundamentais [10].

O documento técnico [12] apresenta de forma concisa um plano geral sobre os vários modelos de baterias e constitui-se como referência para as secções seguintes.

2.2.3.1 - Lei de Peukert

Alguns modelos procuram demonstrar o comportamento não linear de descarga, usando equações relativamente simples em que os parâmetros correspondem a valores empíricos da bateria. A lei de Peukert expressa a capacidade de uma bateria de chumbo tendo em conta a taxa de descarga. Esta lei pode ser descrita da seguinte forma:

$$t = H\left(\frac{C}{IH}\right)^{K} \qquad (2.1)$$

Onde:

H: Rácio do tempo de descarga;

C: Capacidade para o rácio de descarga actual;

I: Corrente de descarga;

k: Constante de Peukert;

t: Tempo de descarga da bateria.

O valor da constante *K* varia com o desgaste, com a idade e com a temperatura. Para rácios de descarga muito baixos é necessário ter em conta o próprio descarregamento.

Para o caso em que $^{C}/_{H} = 1$, uma bateria ideal com capacidade C, descarregada a uma corrente constante deveria ter um tempo de vida esperado t.

$$C = I \times t \qquad (2.2)$$

Na realidade a capacidade tem uma relação exponencial com a corrente:

$$C = I^{k} \times t \qquad (2.3)$$

O expoente fornece uma maneira simples de ter em conta a dependência de t com a taxa de descarga. No entanto, os valores de k têm que ser obtidos para diferentes temperaturas e nem sempre o valor encontrado é exacto.

Embora fácil de configurar e de usar, a lei de Peukert não toma em conta cargas variáveis ao longo do tempo e a maioria das baterias sofre uma descarga variável [12].

2.2.3.2 - Modelo de eficiência da bateria

O modelo de eficiência da bateria calcula o rácio entre a capacidade actual e a capacidade teórica, através de uma função quadrática linear em função da corrente de descarga. Este modelo extrai um valor aproximado da potência consumida para perfis de corrente com o mesmo valor médio de corrente. É também demonstrado que os limites para o valor da potência consumida dependem do valor máximo e mínimo da corrente. Entre todos os perfis de corrente para a descarga da bateria, com o mesmo valor médio, o perfil de corrente constante é aquele que consegue dar um maior tempo de vida à bateria. Este modelo tem em conta a dependência do rácio de descarga e consegue prever a performance para cargas variáveis. O referido modelo foi mais tarde alterado para maximizar o tempo de vida de sistemas múltiplos de bateria entre outros [10].

2.2.3.3 - Shepherd Model

O modelo de Shepherd descreve o comportamento electroquímico da bateria directamente em termos de tensão e corrente. É normalmente usado em conjunto com a equação de Peukert de modo a obter a tensão e o estado de carga (SoC), para uma carga variável [12].

$$Et = Eo - Ri \times I - Ki \times [1 - q] \quad (2.4)$$

Onde

Et = Tensão nos terminais da bateria [v]

Eo = Tensão de circuito aberto de uma célula quando totalmente carregada [v]

Ri = Resistência interna da bateria [Ω]

Ki = Resistência de polarização [Ω]

Q = Capacidade da bateria [A-h]

I = Corrente instantânea [A]

q = Acumulação de A-h dividido pela capacidade total da bateria

O estado de carga pode depois encontrado pela equação de Peukert. As modificações do modelo de Shepherd normalmente consistem em adicionar termos que descrevem certos aspectos da performance da bateria [12].

2.2.3.4 - Unnewehr Universal Model

De modo a adaptar o modelo de Sheperd aos modelos de baterias usados em veículos eléctricos, onde a corrente de descarga é elevada e onde as baterias não são normalmente usadas em estados de descarga elevados, surge a simplificação da equação de Sheperd como é mostrado de seguida [12].

$$Et = Eo - Ri \times I - Ki \times f \quad (2.5)$$

A tensão em circuito aberto para este modelo é:

$$Eoc = Eo - Ki \times f \quad (2.6)$$

Unnewehr and Nasar definem uma função para a resistência interna da seguinte forma:

$$R = Ro - K_R \times f \quad (2.7)$$

Onde:

Ro = Resistência interna total de uma bateria totalmente carregada

K_R = Constante experimental

Esta equação tenta modelar a variação de R_i tendo em consideração o estado de carga.

Combinando esta equação com $P = V \times I$ é possível criar a seguinte relação para calcular a corrente durante a descarga:

$$I = (\frac{Eoc - \sqrt{Eoc^2 - 4 \times R_i \times P}}{2 \times R_i}) \tag{2.8}$$

E durante a carga:

$$I = \frac{-Eoc + \sqrt{Eoc^2 + 4 \times R_i \times P)}}{2 \times R_i} \tag{2.9}$$

A potência máxima P pode ser calculada da seguinte forma:

$$Pmáx = \frac{Eoc^2}{4 \times R_i} \tag{2.10}$$

2.2.4 - Modelos Eléctricos

O uso de modelos eléctricos permite conhecer as principais características, Voc e SoC da bateria de uma forma rápida e com baixa carga computacional. Estes modelos podem ser aplicados a vários tipos de químicas tais como VRLA, Ni-MH, LiB.

Este método reduz a necessidade de conhecer detalhadamente os fenómenos físicos-químicos e apenas requer alguns parâmetros de configuração obtidos de forma experimental. A complexidade do modelo, e consequente performance, é proporcional à quantidade de parâmetros estimados da bateria. Estes modelos normalmente apresentam um tempo de computação menor em relação aos modelos matemáticos.

Nas próximas secções são apresentados um conjunto de modelos baseados em circuitos eléctricos equivalentes.

2.2.4.1 - Modelo baseado no circuito eléctrico de Thévenin

O modelo simplificado de uma bateria eléctrica encontra-se representado na Figura 2.7, o qual consiste numa série de uma fonte de tensão ideal, representativo de tensão de circuito aberto e uma resistência interna, que modela o efeito da queda de tensão aos seus terminais quando carregada.

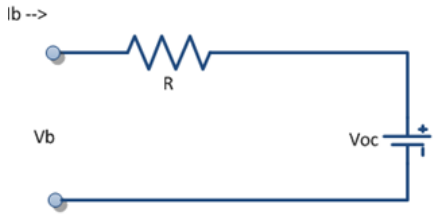

Figura 2.7. Modelo simples de bateria

Este modelo não tem em conta a variação da resistência interna, com a variação do estado de carga da bateria, nem a sua alteração em regime de carga ou descarga da bateria. Por isso é bastante limitado, podendo ser usado em situações onde o estado de carga não tem importância, assumindo uma carga ilimitada por parte da bateria.

A modelação da bateria por um circuito de *Thevenin* é uma forma simples de exprimir o comportamento da tensão em vazio (Voc) da bateria. Este tipo de modelo apresenta alguma imprecisão nos resultados, pois neste modelo os valores dos componentes electricos são fixos, o que não se verifica na realidade. De modo a melhorar os resultados deste modelo, os valores dos componentes eléctricos devem variar consoante os factores de desempenho, definidos no capitulo 2.1.2.

Na Figura 2.8 está representado o esquema do circuito equivalente de Thevenin, constituido por uma resistência R_2, que modela a resistência interna e uma malha RC em paralelo de modo a prever a resposta da bateria à variação de carga, para diferentes estados de carga. A relação entre tensão de circuito aberto (Voc) e estado de carga é constante. Esta relação impossibilita a previsão da variação de tensão em regime contínuo, bem como a informação de tempo útil de funcionamento [13].

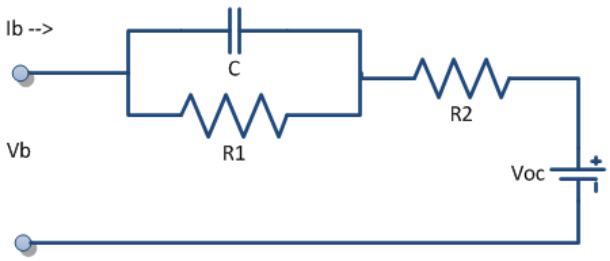

Figura 2.8 – Circuito equivalente de Thevenin

Com base neste modelo foram criadas representações equivalentes com o objectivo de permitirem extracção de mais informação. Por exemplo, é possível acrescentar um condensador variável para representar a relação não linear entre o Voc e SOC. Com isto já é possível conhecer o tempo de funcionamento, bem como a tensão em regime contínuo.

Podem também ser adicionadas equações matemáticas ao modelo para calcular o estado de carga e estimar o tempo de vida [13].

2.2.4.2 - Modelo eléctrico baseado na impedância

Um modelo AC é obtido pela medida da impedância da bateria utilizando a espectroscopia da impedância electroquímica (*electrochemical impedance spectroscopy (EIS)*) de modo a obter a impedância complexa para uma gama de frequências AC. Deste modo, é possível criar um modelo equivalente da bateria. O princípio geral do método de EIS é baseado na aplicação de um sinal sinusoidal, medindo depois a resposta característica da bateria, que depende da impedância.

A impedância de um circuito eléctrico pode ser representada em função da frequência de várias formas (diagrama de bode, diagrama de Nyquist, etc).

A representação de impedância no plano complexo é habitualmente usado em EIS. Assim $Z(\omega) = |z|e^{i\varphi}$, em que φ representa a diferença de fase entre a tensão e a corrente. Com base na representação de variáveis complexas é possível escrever a impedância como uma função com uma parte real e outra imaginária:

$$Z(\omega) = |Z|\cos(\varphi) + i|Z|sen(\varphi)$$

O diagrama de Nyquist estabelece que a parte real de uma função de variável complexa é representada sobe o eixo x e a parte imaginaria sobre o eixo y.

Na Figura 2.9 está representado o espectro da impedância ideal para uma bateria de iões de lítio. Para cada uma das gamas de frequências equivale um circuito RC. Para altas frequências a célula é representada por uma bobina ideal L e a resistência óhmica representada por R. Os elementos RC em paralelo representam os processos físicos-químicos [14].

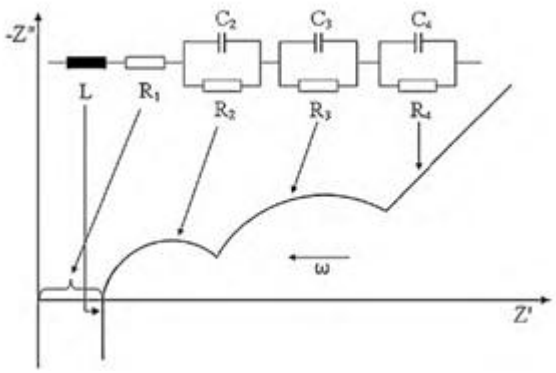

Figura 2.9 – Espectro da impedância de uma célula de Li-Ion [14].

A impedância da bateria é fortemente afectada com a temperatura e estado de carga, sendo por isso necessário realizar várias medições para se construir uma base de dados com a informação.

2.2.4.3 - Modelos de tempo de funcionamento

Estes modelos usam uma rede complexa de circuitos para simular o tempo de vida da bateria e a sua resposta de tensão dc. Estes modelos apenas são precisos para regimes de corrente constante, e não permitem prever o comportamento em tempo real da bateria nem a tensão de resposta para diferentes correntes de carga com precisão. Na Figura 2.10 está representado um modelo eléctrico capaz de estimar o tempo de vida da bateria.

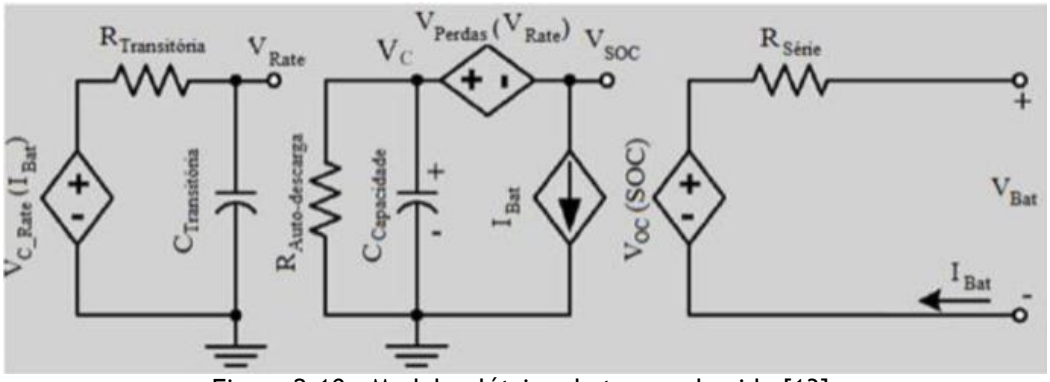

Figura 2.10 - Modelo elétrico de tempo de vida [13].

2.2.5 - Comparação de modelos

Vários modelos foram apresentados, desde os mais simples até aos mais complexos. Os modelos simples permitem simular apenas um limitado comportamento da bateria, enquanto os modelos complexos incorporam mecanismos capazes de simular um maior número de fenómenos. Os modelos mais simples, tais como o modelo simples da bateria, composto por uma fonte de tensão e uma impedância apenas permite conhecerem a tensão em circuito aberto. Por outro lado, modelos mais complexos, tais como o modelo eléctrico de tempo de funcionamento, permitem conhecer qual o tempo de vida restante da bateria.

Aqueles modelos que realmente interessam estudar são aqueles que permitem estimar o estado de carga actual da bateria, visto que esse parâmetro é fundamental na gestão de energia das baterias. Os modelos electroquímicos são normalmente complexos e específicos, sendo por isso deixados de parte neste trabalho. Já com modelos matemáticos é possível modelar a bateria através de equações matemáticas, conseguindo-se simular vários comportamentos da bateria. Os modelos eléctricos também são bastante intuitivos, sendo possível obter bons resultados através dos mesmos.

De modo a comparar os modelos eléctricos entre si estão descritas as principais capacidades desses modelos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3- Comparação dos vários modelos eléctricos [13].

Capacidade de Previsão	Thevenin	Impedância	Tempo de funcionamento
DC	Não	Não	Sim
AC	Limitado	Sim	Não
Transitórios	Sim	Limitado	Limitado
Parâmetros da bateria em tempo real	Não	Não	Sim

Capítulo 3

Plataforma experimental para estimação de parâmetros

3.1 - Introdução

Neste capítulo é discutida a especificação e implementação de uma plataforma de teste de baterias. É especificada uma carga electronicamente controlável de modo a ser usada na plataforma de testes, é também abordado a temática de EIS para a extracção de parâmetros internos das baterias de forma a realizar uma caracterização da bateria. Por fim são realizados vários testes à fonte de tensão programável e à carga DC electronicamente controlável de forma a verificar o cumprimento dos requisitos estabelecidos para a plataforma de testes.

A plataforma deve permitir a realização de vários testes de modo a identificar e estimar os parâmetros e características da bateria. Tendo vista são propostos um conjunto de testes possíveis de realizar.

Assim, e antes de propriamente se expor a especificação, efectua-se uma resenha do conjunto de testes típicos a que habitualmente uma bateria é sujeita, dos quais se destacam:

- Teste de ciclo de vida;
- Teste de stress dinâmico;
- Teste de descarga parcial;
- Teste a potência constante;
- Teste de desempenho térmica;
- Teste de reserva de capacidade;
- Estimação de parâmetros.

O teste de ciclo de vida consiste na carga/descarga cíclica da bateria, de modo a obter dados relativos à capacidade, energia, resistência DC interna, entre outros.

No teste de stress dinâmico são realizadas cargas e descargas usando um perfil conhecido, como por exemplo o Dynamic Stress Test (DST).

O teste de descarga parcial consiste num conjunto de descargas parciais da bateria, permitindo verificar qual o efeito dessas descargas na capacidade da bateria.

O teste a potência constante permite realizar descargas a potência constante, de modo a simular, por exemplo, um regime de subida de uma montanha por um veículo eléctrico. Pode, no entanto, ser pré-configurado um perfil de potência, sendo possível verificar a performance da bateria.

Para o teste de performance térmica é necessário uma câmara térmica, de modo a realizar testes a temperaturas diferentes, para que se possa a comprovar a performance térmica da bateria.

O teste de reserva de capacidade permite realizar descargas a corrente constante para se conhecer o ponto onde o valor da tensão se torna demasiado baixo para fornecer a potência necessária.

3.2 - Plataformas de teste comerciais

No mercado actual existem várias soluções que permitem testar em laboratório baterias eléctricas. Na Figura 3.1 está representado um equipamento de laboratório de modo a exemplificar qual a forma dos equipamentos actuais.

Figura 3.1 – Equipamento de testes de baterias [15]

Estes equipamentos permitem, em geral, realizar testes DC, tais como, voltímetria, ciclos de carga/descarga, medição de resistência ohmica, entre outros. O que se pretende não será da complexidade dos produtos existentes, mas sim uma plataforma de baixos custo, que permitem realizar ensaios experimentais com baixa potência, mas que permitem estabelecer representação paramétrica adequados para os modelos de estimação do SoC, SoH e SoF.

3.3 - Especificação da plataforma de testes

Tendo em vista os testes a realizar, é necessário definir uma especificação para a plataforma de testes com custos reduzidos. Uma vez que se pretende fazer um estudo de baterias, esta plataforma está direccionada para baterias de baixa capacidade.

As baterias testadas devem estar dentro dos seguintes parâmetros:

- Tensão < 15v;
- Corrente máxima < 5A.

Os sinais adquiridos são tensão, corrente e temperatura da bateria.

Para aquisição dos sinais é usado o *LabView* através da placa de aquisição de dados Ni-DAQ-6024E. Esta é a placa escolhida capaz de cumprir os requisitos necessários, permitindo uma amostragem de 200kS/s, com uma resolução de 12-Bit de sinais com potencial máximo de 20v. A amostragem de 200k amostras por segundo permitem uma resolução suficiente para este trabalho, pois os efeitos dinâmicos das baterias com menor base temporal estão na casa dos microssegundos.

Para controlar a temperatura de funcionamento da bateria é possível usar uma câmara térmica com temperatura controlável. Nesta fase do trabalho esse aspecto não foi considerado.

Na realização de testes de descarga é usado um elemento resistivo de precisão. Uma abordagem possível seria o uso de grupos de resistências de valor fixo, agrupados de forma a criar o valor resistivo pretendido. Esta abordagem limitaria de certa forma os testes, pois não seria possível realizar testes de forma automática em regimes de carga dinâmicos. Por essa razão a carga electrónica é vista como uma mais-valia para a plataforma, pois permite controlar a carga resistiva através de um controlo digital a partir de um computador.

A carga da bateria é efectuada através de uma fonte DC digitalmente controlável. Assim como, a carga electrónica permite realizar testes de potência dinâmicos. A fonte a usar é a Fluke PM2832 com comunicação com o computador através de GPIB. Este protocolo de comunicação requere placa PCI e cabo de ligação específicos. Esta fonte tem também a capacidade de medição de corrente e tensão, podendo essa informação ser enviada pelo barramento GPIB.

Na Figura 3.2 é representado um diagrama representativo da plataforma de testes a desenvolver.

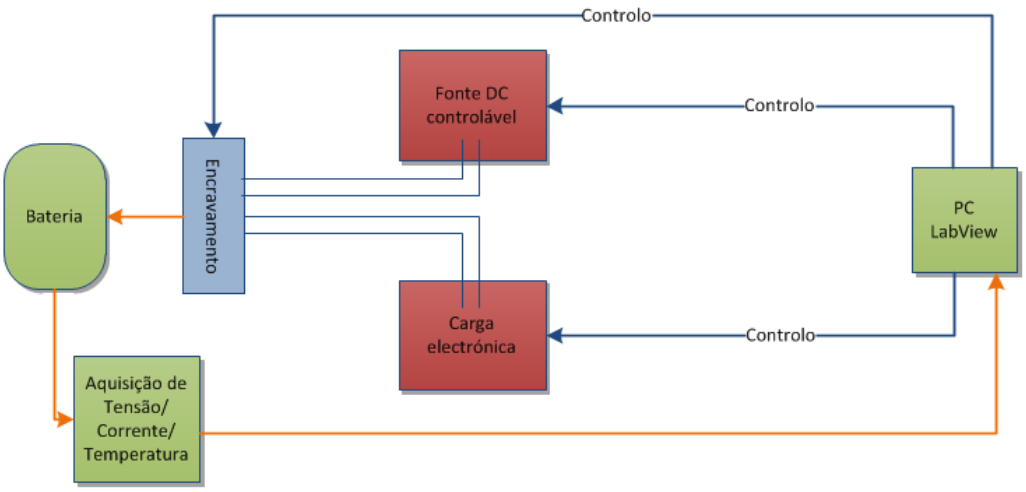

Figura 3.2 – Plataforma de testes de baterias

De salientar, a necessidade de desenvolver (posteriormente) um encravamento de segurança necessário de modo a prevenir uma ligação indesejada entre a fonte DC e a carga electrónica. A ligação de controlo à fonte controlável é feito através de GPIB e a ligação à carga electrónica é feita através do protocolo RS232. A aquisição de tensão, corrente e temperatura é feita pela placa de aquisição NI-DAQ.

3.3.1 - Especificação da carga electrónica

O processo de selecção iniciou-se com a especificação dos requisitos do equipamento a adquirir. Em seguida, efectuou-se um levantamento dos principais fabricantes de instrumentação electrónica com equipamentos na área. No sentido de ponderar os vários equipamentos definiu-se um conjunto de critérios básicos de ponderação. A informação técnica recolhida para a tabela de ponderação encontra-se em anexo.

3.3.1.1 - Especificação Inicial

A especificação inicial para a carga electrónica pretendida é a seguinte:

Tensão de entrada DC: 0 a 100 V.
Potência máxima DC: inferior a 500W.
Possibilidade de comunicação com PC para implementação de controlo remoto e aquisição de dados.
Canal de comunicação em RS-232 ou USB.
Disponibilidade de bibliotecas de Software que possibilitem a interligação com o LabView.

3.3.1.2 - Critérios para ponderação

Os critérios escolhidos para a ponderação dos equipamentos foi o seguinte:

- Cumprimento das especificações básicas;
- Resolução e precisão do equipamento;
- Existência de funcionalidades adicionais;
- Pós-venda e representante do equipamento;
- Preço do equipamento;
- Prazo de entrega.

A escolha do equipamento será obtida por média ponderada de cada um dos critérios numa escala de (0-5).

3.3.1.3 - Lista de equipamentos analisados

Dada a grande quantidade de fabricantes de equipamentos e instrumentos para laboratório, seleccionou-se uma pequena amostra de fabricantes com a maior presença no mercado nacional. Na selecção dessa amostra houve o cuidado de garantir a presença de fabricantes de topo do sector da instrumentação electrónica, tendo procurado relaxar o critério de potência. Assim, nesta secção é apresentada a lista de equipamentos considerados no processo de selecção.

Tabela 3.1- Lista de equipamentos analisados

Marca	Modelo	Fornecedor	Preço
Elektro-Automatic	EA-EL 3160-60	**Farnell/RS-Components**	901,25 € + 163,77€*
Elektro-Automatic	EA-EL 3400-25	**Farnell/RS-Components**	901,25 € + 163,77€*
Agilent	6060B	**RS-Components**	2.174,00 €
Agilent	N3307A	**RS-Components**	1.760,00 €
B&K PRECISION	8500	**Farnell**	1.417,14 €
Tti	LD300	**RS-Components**	870,00 €

3.3.1.4 - Análise e ponderação

Nesta secção encontra-se sistematizada a ponderação efectuada. Apenas um equipamento não cumpre todos os requisitos propostos. As funções base dos equipamentos são transversais, conseguindo todos os aparelhos realizar testes de vários tipos de fontes de alimentação, baterias, células de combustível e células solares. Os principais modos de funcionamento são: corrente constante (CC), resistência constante (CR), tensão constante (CV) e potência constante (CP).

Uma função bastante importante é a capacidade de controlo remoto por dispositivo digital de controlo (PC). Este interface, normalmente RS232 ou USB, permitindo a interligação com o *LabView*. Todos os equipamentos têm comunicação via interface analógico, mas nem todos os equipamentos possuem a capacidade de comunicação digital.

Por norma estes equipamentos têm protecção contra subtensão, sobretensão, sobre corrente e sobre temperatura. Estas protecções são úteis pois minimizam o risco de danificar a fonte a ser testada, bem como o próprio equipamento.

Os fabricantes distinguem-se nas funções adicionais, tais como métodos de refrigeração extra, drivers específicos, capacidade modular entre outros.

Na Figura 3.3 está representado um diagrama de descarga de uma bateria realizado com auxílio dos drivers em python fornecidos com o equipamento B&K 8500.

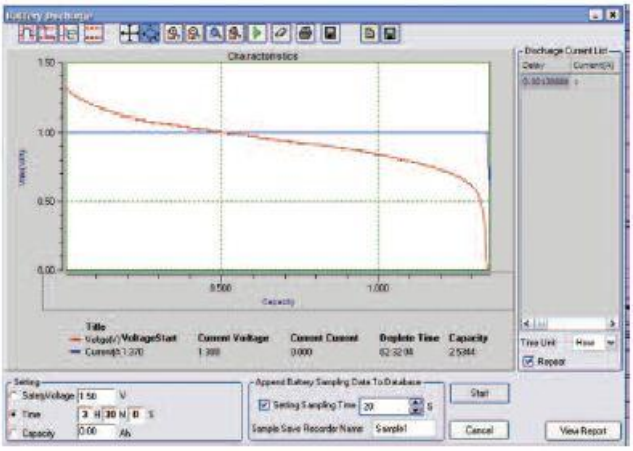

Figura 3.3 - Datasheet B&k 8500 series

As especificações básicas estão descritas na seguinte tabela. Apenas está representada a precisão e resolução do modo em tensão constante (CV) de forma a ilustrar o funcionamento geral do equipamento.

Tabela 3.2- Especificação dos equipamentos analisados

Critérios	Precisão Modo CV	Resolução Modo CV	Potência	Tensão	Corrente	Comunicação
EA-EL 3160-60	<0.1%	100mv	400w	160V	60 A	Periférico usb/rs232
EA-EL 3400-25	<0.1%	100mv	400w	400V	25 A	Periférico usb/rs232
Agilent 6060B	<0.1%	10mv	300w	60V	60 A	Analógico
Agilent N3307A	<0.1%	10mv	250w	150V	30 A	RS232/GPIB

B&K 8500	0.05%	10mv	300w	120V	30 A	RS232
TTi LD300	0.02%	10mv	300w	80V	80 A	Analógico

Os sistemas de protecção são uma importante característica dos equipamentos e uma forma de os distinguir entre si. Na Figura 3.3Figura 3.3 - Datasheet B&k 8500 series está a informação retirada dos resumos técnicos.

Tabela 3.3- Sistemas de protecção dos sistemas analisados

Critérios	Subtensão	Sobretensão	Sobre corrente	Sobre temperatura	Polaridade inversa	Contador Ah
EA-EL 3160-60	X					X
EA-EL 3400-25	X					X
Agilent 6060B	X	X	X	X	X	X
Agilent N3307A	X	X	X	X	X	X
B&K 8500		X	X	X		X
TTi LD300		X	X	X		

Os principais critérios também foram tomados em conta, sendo feita uma análise ponderada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Ponderação dos principais critérios

Critérios	Cumprimento das especificações básicas	Resolução e precisão do equipamento	Existência de funcionalidades adicionais	Pós-venda e representante do equipamento	Preço do equipamento	TOTAL
EA-EL 3160-60	3	3	3	3	2 Pendente entrega	2,8
EA-EL 3400-25	4	3	3	3	3	3,8
Agilent 6060B	3	3	3	5	2 Em stock RS	3,2
Agilent N3307A	5	5	4	5	1 Em stock RS	4
B&K 8500	5	4	4	4	3 Sem stock	4
TTi LD300	3	2	2	3	5 Em stock RS	3

A ponderação foi distribuída equitativamente entre todos os critérios, no caso de se aumentar o peso do critério do preço, o equipamento B&K 8500 terá um maior valor.

Nas imagens seguintes estão representados os equipamentos, de notar que o equipamento Agilent N3307A é modular.

Figura 3.4 - Por ordem: B&K 8500 - Agilent 6060B – Tti LD300 – Agilent N3307A – Elektro-Automatic

3.3.1.5 - Conclusão

Todos os equipamentos cumprem os requisitos mínimos especificados inicialmente, apenas o equipamento TTi LD300 e o Agilent 6060B não cumprem o requisito de comunicação de série. O equipamento EA-EL 3400-25 tem a desvantagem de ser necessário um dispositivo extra para comunicação, o que aumenta a complexidade bem como o preço do equipamento. O produto B&K 8500 é bastante equilibrado, tanto em funcionalidades bem como em características técnicas. Este equipamento é fornecido com bibliotecas Python e Labview, o que é uma mais-valia para o desenvolvimento de aplicações. O equipamento Agilent N3307A tem a vantagem de ser modular, sendo possível num futuro acrescentar outros módulos, porém apresenta um preço bastante elevado em relação aos outros, tornando a relação custo/benefício mais duvidosa para os objectivos do trabalho em curso.

Tomando em consideração todos os aspectos mencionados, o equipamento que se enquadra melhor nos requisitos pretendidos é o B&K 8500. Com base neste trabalho foi proposta a aquisição do referido equipamento para o DEEC.

3.4 - Testes preliminares aos elementos que constituem a plataforma de testes

3.4.1 - Controlo da fonte de tensão programável

A fonte programável Fluke PM 2832 usada neste trabalho permite fornecer uma tensão dc ou corrente predefinida de um modo controlado. Esta versão apresenta dois canais separados, permitindo um controlo independente. A capacidade de medição de tensão e corrente elimina a necessidade de utilização de multímetro exterior. Cada canal pode funcionar em modo de tensão constante (CV) ou em modo de corrente constante (CC). No

primeiro caso a tensão de saída mantém-se constante, enquanto a corrente se altera devido a flutuações da carga. Em modo de corrente constante, a corrente de saída mantém-se constante, enquanto a tensão de saída se altera devido a flutuações da carga.

O equipamento apresenta ainda algumas capacidades, tais como:

- Comunicação GPIB;
- Memória interna para configurações diferentes;
- Protecção de sobre temperatura e sobre corrente.

Existem quatro modos de funcionamento principais, *Self-Test*, *Standby*, *Operation* e *Calibration*. A Figura 3.5 exemplifica os vários modos de funcionamento. Inicialmente é feito um autoteste, se esse teste for bem-sucedido, é possível escolher entre os três modos seguintes.

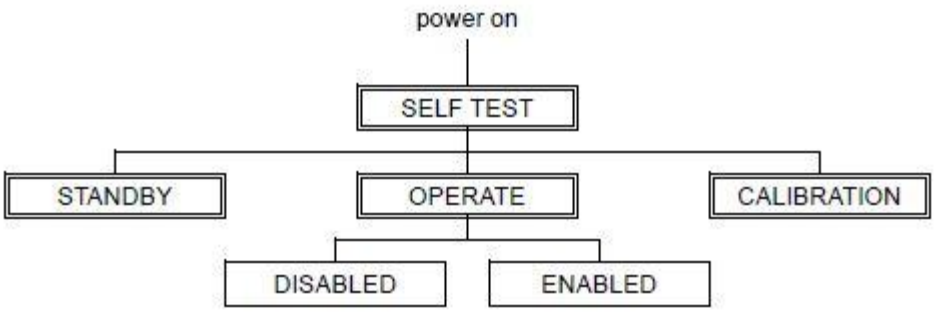

Figura 3.5- Modos de funcionamento de fonte dc controlável [26]

Para configurar o modo de funcionamento é possível usar o modo local ou remoto. Para este trabalho é utilizado o modo remoto, utilizando comunicação GPIB com o standard IEE 488.2.

Foi criada uma interface simples Labview para comunicar com a fonte programável. Na Figura 3.6 está representada a interface que permite a comunicação. É necessário seleccionar se a operação a realizar é apenas de escrita, de leitura ou ambas.

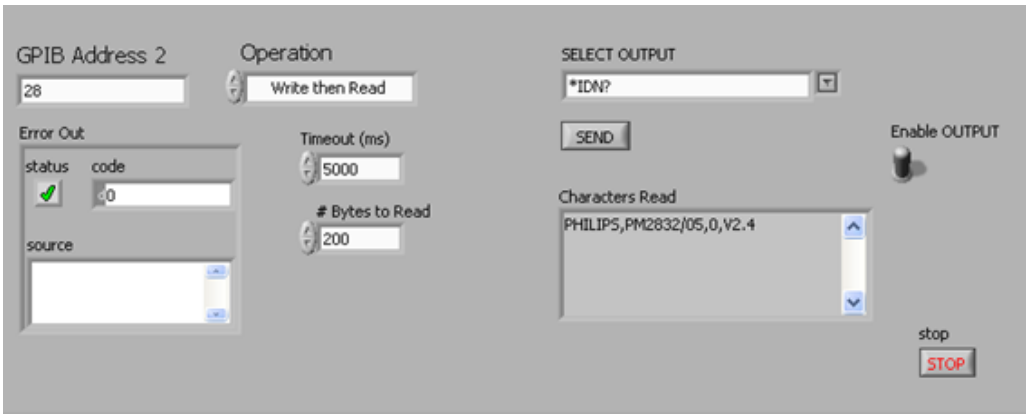

Figura 3.6 – Ambiente Labview® após envio de comando para identificação

Esta interface permite o envio e recepção de comandos, tendo assim total controlo sobre a fonte. Pretende-se, no entanto, melhorar esta interface de modo a sistematizar a comunicação. Alguns comandos básicos usados pela fonte encontram-se na Tabela 3.5- Comandos básicos da fonte programável no entanto existem muitos mais comandos de controlo, que podem ser consultados no manual do equipamento.

Tabela 3.5- Comandos básicos da fonte programável

*IDN?	Identificação do equipamento
:INST:NSEL 1	Seleccionar canal 1
:OUTP:STAT ON	Ligar o canal seleccionado
:INST:STAT ON	Alterar o modo da fonte para Operação
:VOLT 5	Alterar a tensão para 5v

A partir dos modos pré-programados é possível correr uma sequência pré definida. Este modo tem especial importância pois permite simular diferentes tensões de carga da bateria.

Para exemplificar o modo de funcionamento foram usados três níveis de tensão diferentes, com cinco segundos de duração cada. De modo a programar a fonte é necessário a seguinte ordem de comandos:

:OUTP:STAT OFF
:INST:NSEL 1
:INST:STAT ON
:LIST:IND 20
:LIST:VOLT 25,20,15
:LIST:CURR 1.5,1.5,1.5
:LIST:SOUR TIM 5.0
:LIST:SEQ:START 20

:LIST:SEQ:STOP 22

:INST:NSEL 1

:OUTP:STAT ON

:INST:STAT ON

:INIT

Após os envios dos comandos a fonte estabelece três patamares de tensão de 25v, 20v e 15v, com uma corrente máxima de 1.5 A. Estes diferentes níveis de tensão pretendem simular diferentes estágios de carga provenientes da travagem regenerativa em veículos eléctricos. Na Figura 3.7 é possível verificar os diferentes patamares.

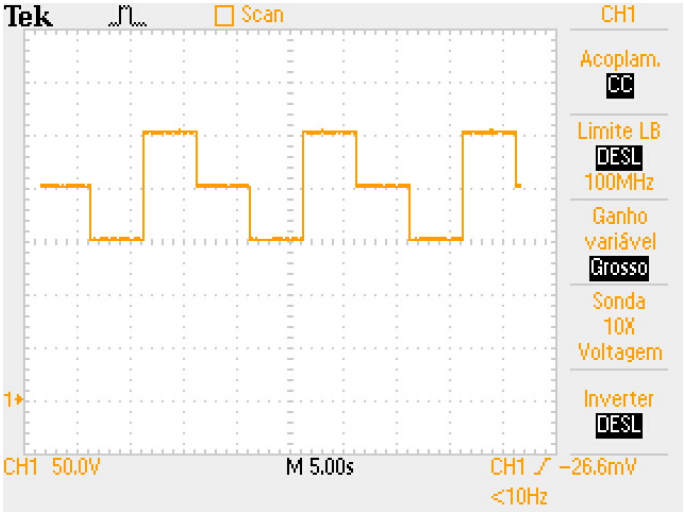

Figura 3.7 – Diferentes patamares de tensão criados pela fonte de tensão de forma automática

3.4.2 - Carga dc electronicamente programável

A fonte de tensão controlável permite realizar testes em modo de tensão fixa (CV), corrente fixa (CC), resistência fixa (CR) ou potência fixa (CW).

Na Figura 3.8 estão representados os três diferentes patamares de tensão criados pela fonte de tensão. Neste exemplo a carga está modo de resistência constante, assim a resistência interna da carga dc tem um valor fixo de 100Ω.

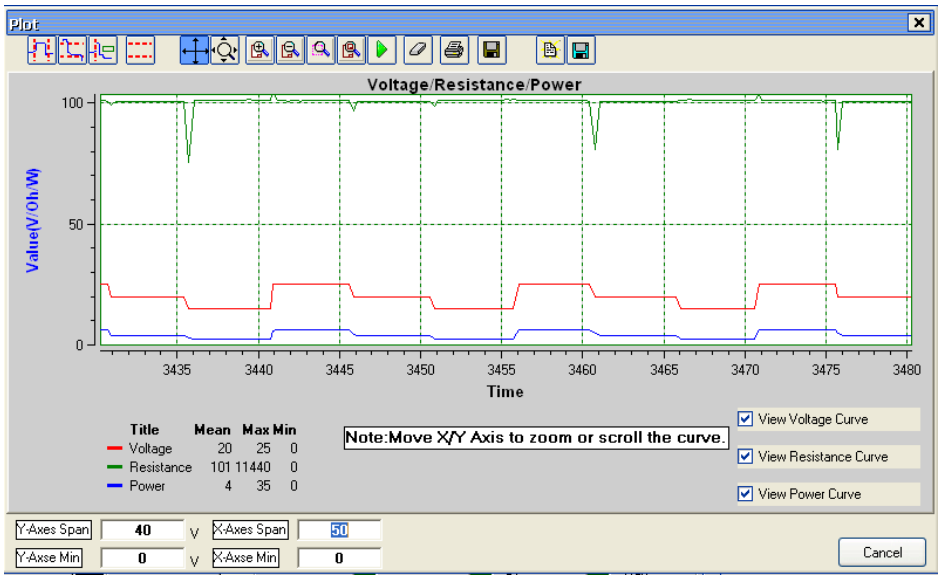

Figura 3.8 – Gráfico de tensão, potência e resistência

A carga DC também permite realizar testes de descarga de baterias, sendo possível escolher diferentes correntes de descarga com diferentes durações temporais. A Figura 3.9 representa um teste simples à bateria de li-ion, onde foram definidos diferentes correntes de descarga, o software calcula automaticamente a carga extraída através da medição da corrente.

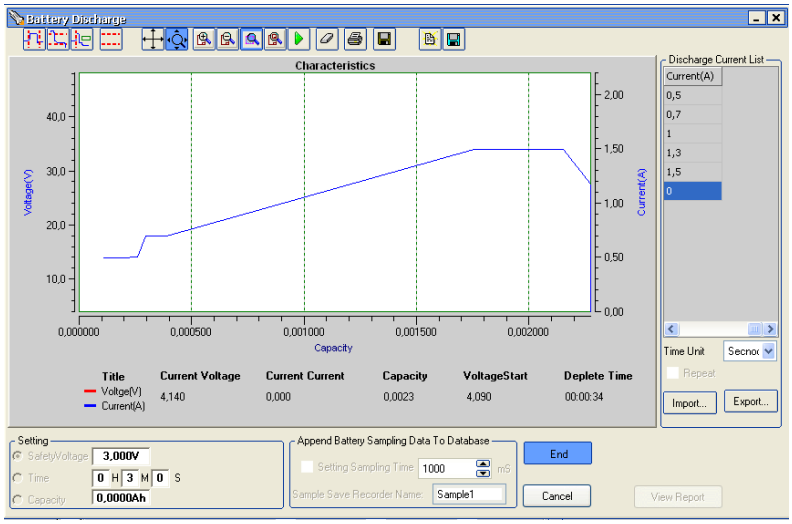

Figura 3.9 - Gráfico da descarga da bateria para diferentes correntes

De modo a fazer um teste de descarga da bateria é usado o modo de corrente constante, a 1A, o que equivale a uma descarga a 0.5C. O software permite determinar uma tensão mínima para o qual o teste termina automaticamente. A Figura 3.10 mostra a descarga da bateria Li-ion em ambiente de laboratório.

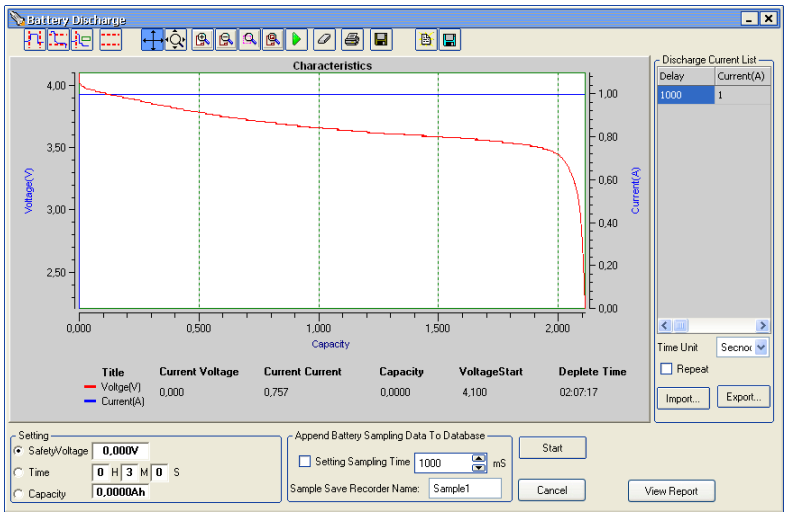

Figura 3.10 – Diagrama de descarga da bateria Li-ion

O equipamento é fornecido com librarias python e librarias LabView, permitindo criar aplicações em diferentes plataformas. Os drivers LabView permitem um total controlo sobre a fonte de tensão, na Figura 3.11 é possível verificar o layout usado capaz de controlar a potência de descarga da bateria, sendo possível definir vários parâmetros, tais como tensão máxima de entrada, corrente máxima de entrada e potência máxima. Neste exemplo é pedido um valor de potência constante de 4W, mas como a tensão da bateria é de apenas 3V, a potência máxima extraída é de 3W.

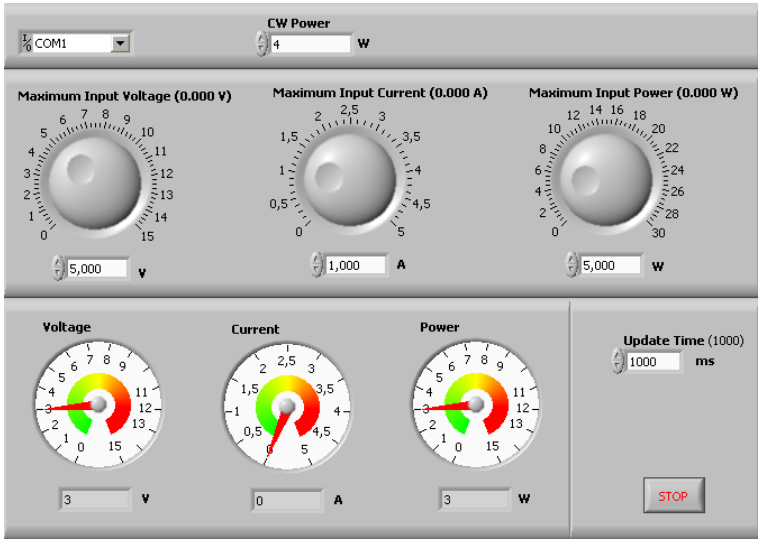

Figura 3.11 – Integração da carga DC com Labview

O setup experimental para testes está demonstrado na Figura 3.12, é possível ver a carga electronicamente controlável e a fonte DC, bem como a bateria usada.

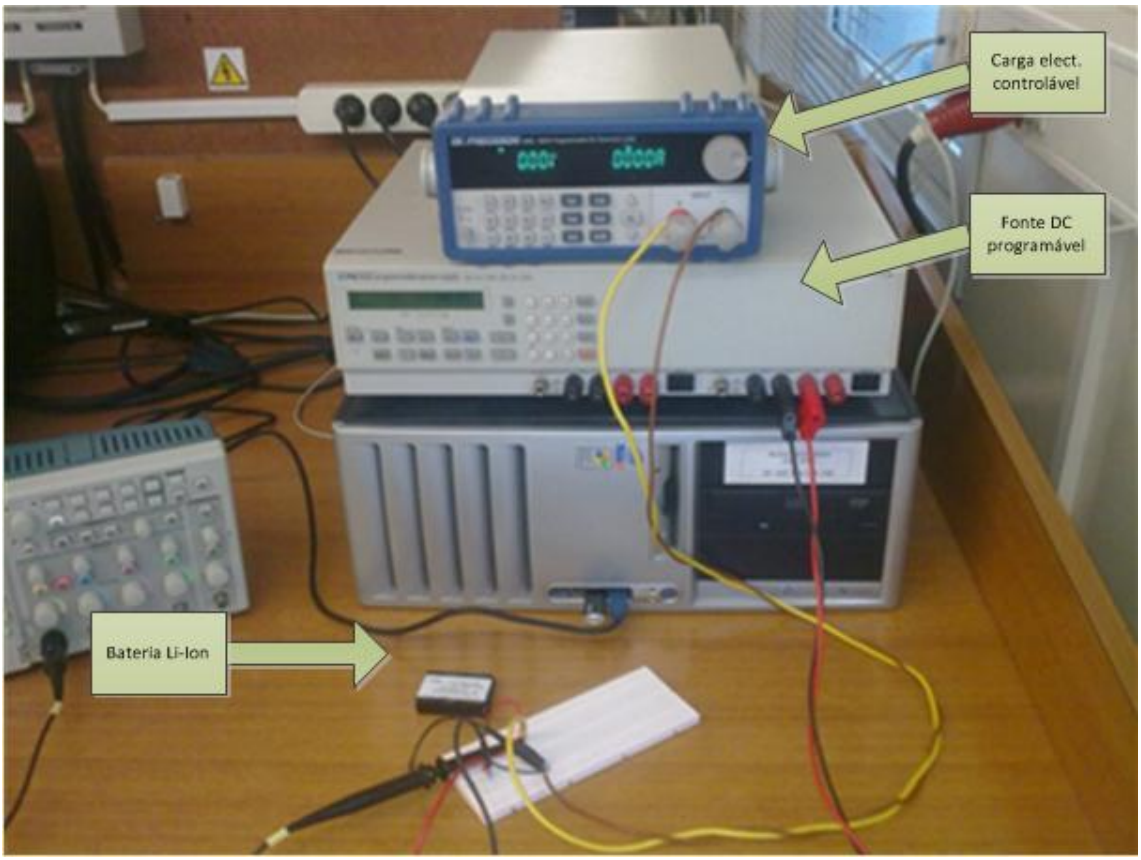

Figura 3.12 – Setup experimental

3.5 - Testes de análise de desempenho de bateria

3.5.1 - Teste de carga dinâmico

Para simular o comportamento da bateria a um ciclo de condução normal de um veículo, com potência de descarga variável, é usado o teste de descarga dinâmico. Este teste é escalado a uma percentagem da potência máxima a ser utilizada, dependendo da bateria usada. Existem perfis standard documentados que permitem aferir a performance da bateria. Na Figura 3.13 está representado um ciclo pré-definido pela USCAR (United States Council for Automotive Research). Assim seguindo, detalhadamente, o protocolo definido é possível comparar a performance de baterias realizadas por entidades distintas.

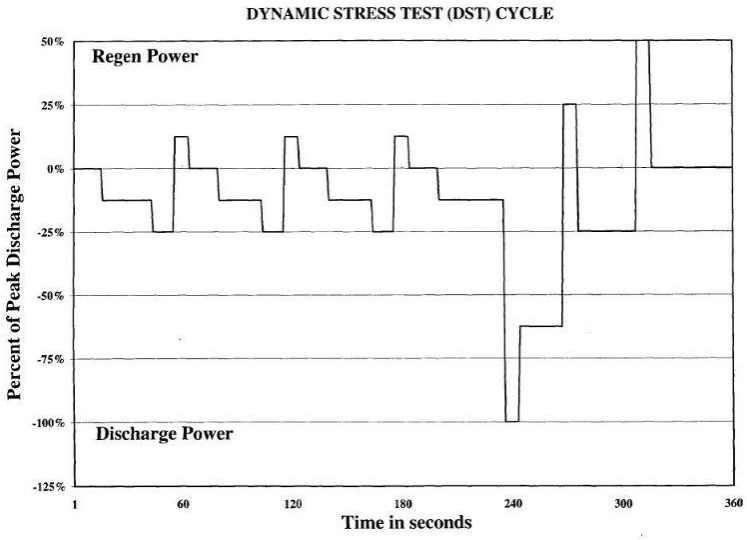

Figura 3.13 – Ciclo de teste de stress dinâmico [16].

3.6 - Processos de identificação paramétrica das baterias

3.6.1 - Descrição do processo de Espectroscopia de Impedância Electroquímica (EIS)

Com o intuito de estimar os parâmetros internos da bateria é usado o processo de espectroscopia de impedância electroquímica, nesta secção é exemplificado o modo de funcionamento deste processo.

O processo de estimação *EIS* é um instrumento de análise de sistemas electroquímicos complexos. A técnica de análise EIS é baseada no método dos circuitos equivalentes AC. Inicialmente é previsto um circuito eléctrico, que contem vários componentes eléctricos clássicos e alguns elementos electroquímicos especiais (ex. Warburg). Este circuito normalmente é diferente consoante a química da bateria e da complexidade que se pretenda do modelo. Cada elemento eléctrico no modelo tem um comportamento de impedância já previamente conhecido.

Na Figura 3.14 está representado o esquema geral de um equipamento de EIS:

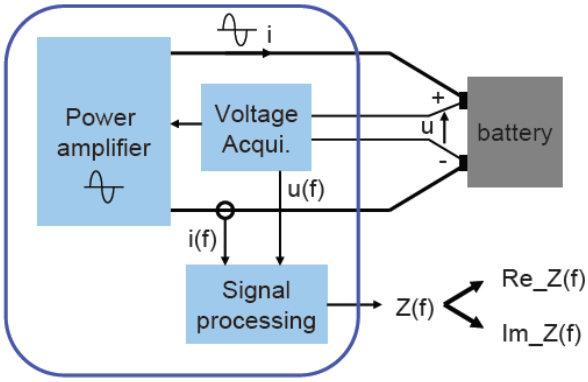

Figura 3.14- Esquema equivalente de um equipamento EIS [2].

A tensão u(t) e o desfasamento ϕ são adquiridos como respostas ao sinal . Usando a seguinte equação:

$$Z = \frac{u(t)}{i(t)} = \frac{\hat{U}.sen(wt)}{\hat{I}.\cos(wt-\phi)} = |Z|.\frac{sen(wt)}{\cos(wt-\phi)} \quad (3.1)$$

Onde:

Û é a amplitude da tensão do sinal;

Î é a amplitude da corrente do sinal

W é a frequência angular;

Φ é o desfasamento;

|Z| é o valor absoluto do valor da impedância.

É possível separar a impedância em parte real Z' e parte imaginaria Z'', usando ϕ:

$$Z' = |Z|\cos(\phi) \quad (3.2)$$

$$Z'' = |Z|\mathrm{sen}(\phi) \quad (3.3)$$

$$|Z| = \sqrt{Z'^2 + Z''^2} \quad (3.4)$$

A impedância electroquímica é medida aplicando um potencial AC aos terminais da bateria, medindo depois a corrente que atravessa essa mesma bateria. Assumindo que é aplicada uma tensão sinusoidal de excitação, a resposta a este potencial será um sinal AC de corrente. Este sinal de corrente pode ser analisado como a soma de várias funções sinusoidais (Série de Fourier) [9].

Normalmente é usado um pequeno sinal DC de excitação, de modo à bateria apresentar uma resposta pseudo-linear. Num sistema linear a resposta de corrente ao potencial sinusoidal será uma sinusóide com a mesma frequência mas com um desfasamento.

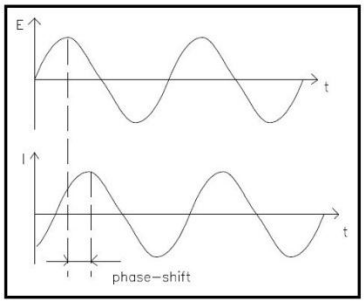

Figura 3.15- Resposta sinusoidal da corrente num sistema linear [9]

Para uma determinada temperatura e estado de carga é possível obter o traçado de Bode, como mostra um exemplo na Figura 3.16:

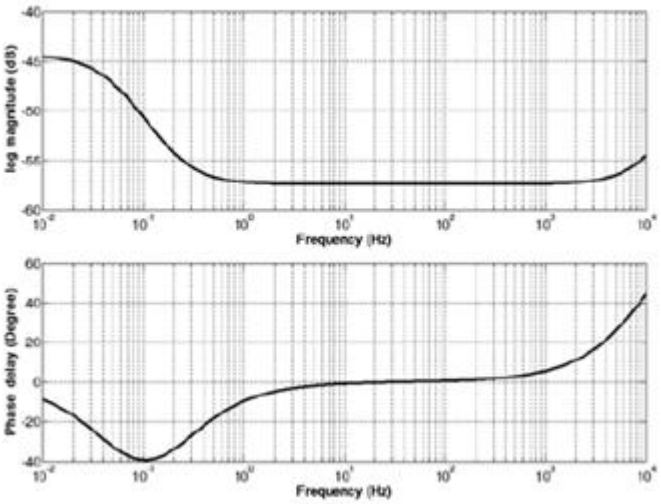

Figura 3.16- Diagrama de Bode [14].

Através deste diagrama de Bode é possível chegar aos valores de impedância do modelo previamente escolhido, usando conceitos de funções de transferência.

Para se determinar o valor da impedância é usado o método de ajuste mínimos quadrados, de modo a minimizar o peso dos valores mais desviados da média.

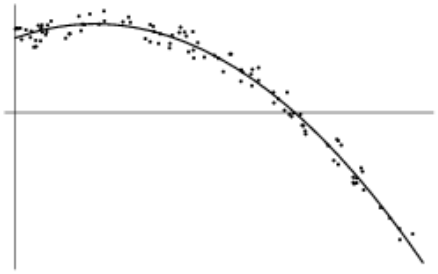

Figura 3.17 – Ajuste de mínimos quadrados

Este modelo tem a vantagem de conseguir prever a tensão das células dependendo da corrente, temperatura e SoC. Assim é possível saber qual a potência máxima que se pode extrair da bateria para um dado momento (depende do SoC, temperatura), tornando todo o sistema mais eficaz. No entanto o modelo tem a desvantagem de modelar a bateria como uma impedância, não sendo por isso capaz de prever quanta energia está armazenada, pois é impossível saber qual o valor da indutância e da capacitância. Como os parâmetros do circuito não são exactamente conhecidos, é difícil calcular a produção de calor, perdas e eficiência pois é necessário conhecer os valores exactos dos componentes.

Para melhor modelar o espectro da impedância da bateria podem ser usados elementos como a impedância de Warburg e a impedância de Zarc. Estes elementos são constituídos por uma resistência e um elemento de fase constante (CPE) em paralelo. Podem ser aproximados por uma série de resistências e condensadores em série. Quanto maior for o número de circuitos RC paralelo, maior será a exactidão.

Figura 3.18 – Equivalência da impedância de Warburg com circuitos RC

3.6.1.1.1. Elementos de fase constante

Na figura Figura 3.19 pode ver-se o efeito do elemento de fase constante, Utilizando apenas um circuito RC paralelo, o traçado de Nyquist seria um semicírculo, com centro no eixo x. Com o elemento CPE, o centro da circunferência encontra-se um pouco abaixo do eixo x. Estes semicírculos são explicados por vários fenómenos físicos tais como, rugosidade da

superfície, distribuição das taxas de reacção, espessura variável, distribuição de corrente não uniforme [17].

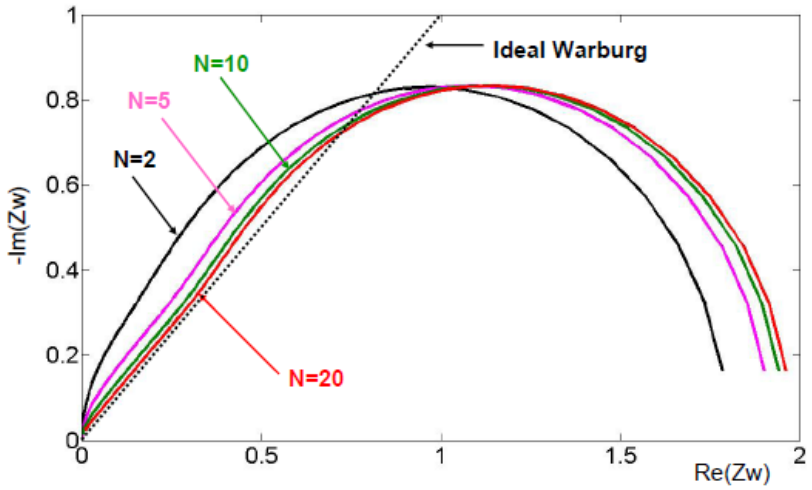

Figura 3.19-Influência do número de circuitos RC paralelo [2].

3.6.2 - Equipamento utilizado

Para a realização da caracterização do modelo baseado na impedância da bateria foi usado um potencióstato. Normalmente, este tipo de equipamento é usado para medir a impedância de soluções químicas, foi por isso possível ter acesso a um equipamento nos laboratórios de química. O equipamento em questão é o *VoltaLab 80*, que está representado na Figura 3.20.

Figura 3.20 – Equipamento EIS - Voltalab 80

Com a finalidade de conhecer o equipamento na Tabela 3.6 e Tabela 3.7 estão descritas as principais características.

Tabela 3.6-Caracteristicas do equipamento EIS

Voltametria	
Maximum compliance voltage	±30V
Maximum current output	±1A
Maximum polarization voltage	±15V
A/D converter	16 bits

Tabela 3.7 – Limite de frequências do equipamento EIS

Impedância electroquímica	
Frequência Máxima	100kHz
Frequência Mínima	1mHz

3.6.3 - Testes preliminares ao equipamento

Para verificar a performance do equipamento foram realizados alguns testes utilizando elementos passivos. De modo a minimizar a capacitância entre os crocodilos de ligação são mantidos o mais afastados possível, como demonstra a Figura 3.21.

Figura 3.21 – Ligação dos terminais do EIS [18] .

Num primeiro teste é usada uma resistência de 10k, de modo a obter a frequência máxima do equipamento. A tensão DC é zero e a tensão AC é $20mV_{rms}$.

Na Figura 3.22 está representado o resultado do teste realizado, sendo que a frequência mínima usada é de 1mHz e a frequência máxima é de 100kHz.

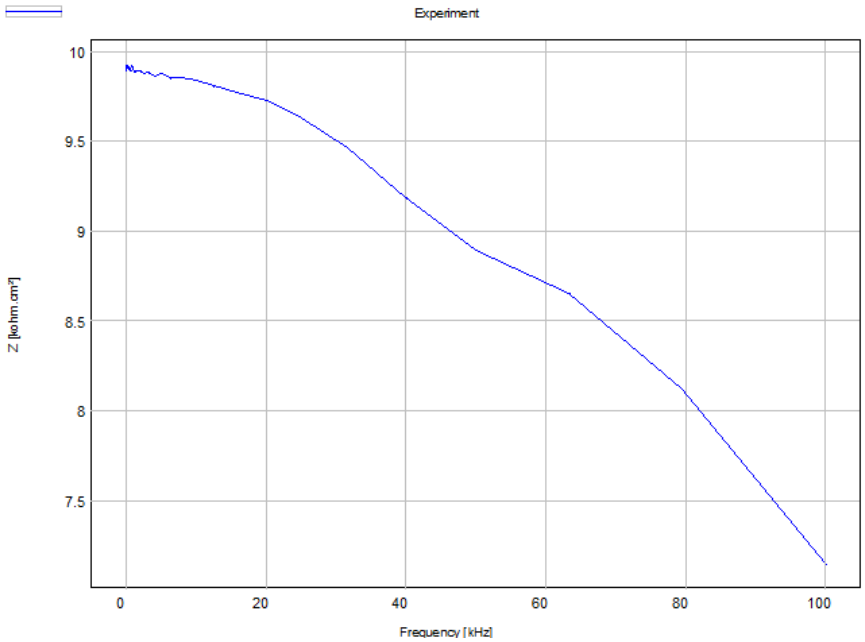

Figura 3.22 – EIS - Evolução da resistência com a frequência 10kΩ (ensaio realizado)

Como se pode verificar, para baixas frequências o valor é aproximado de 10kΩ, mas para frequências maiores o valor medido decresce consideravelmente. Como a resistência usada foi de 10KΩ±5%, a gama de valores deve estar entre 10.5KΩ e 9.5 KΩ.

Para uma resistência de 100kΩ o resultado obtido é semelhante como mostra a Figura 3.23.

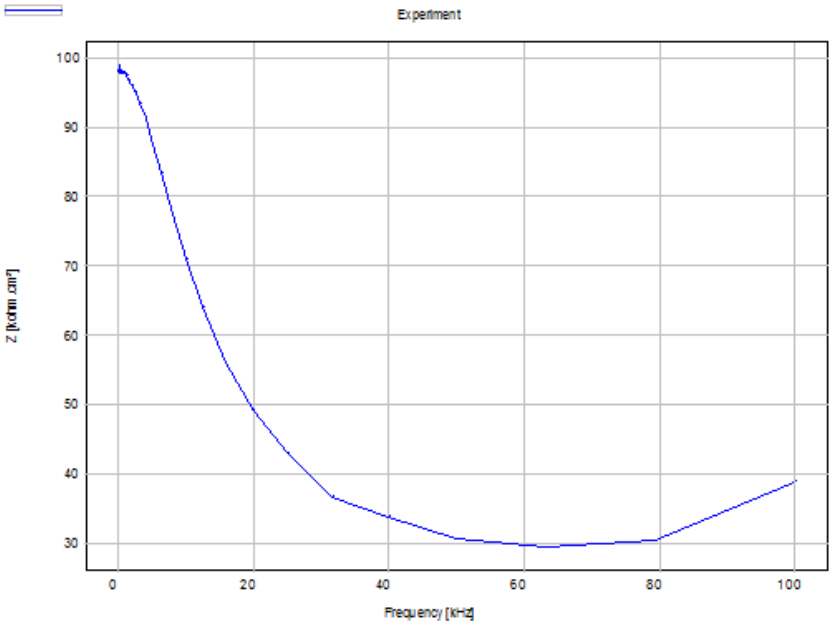

Figura 3.23- Evolução da resistência com a frequência (100kΩ)

De modo a comparar a performance do equipamento são apresentados na Figura 3.24 os resultados obtidos pelo fabricante de um equipamento EIS, usando uma resistência de 10KΩ. Como se pode verificar os testes são realizados até uma frequência de 1Mhz, sendo que conseguem todos os equipamentos uma boa medição para uma frequência de 100Khz.

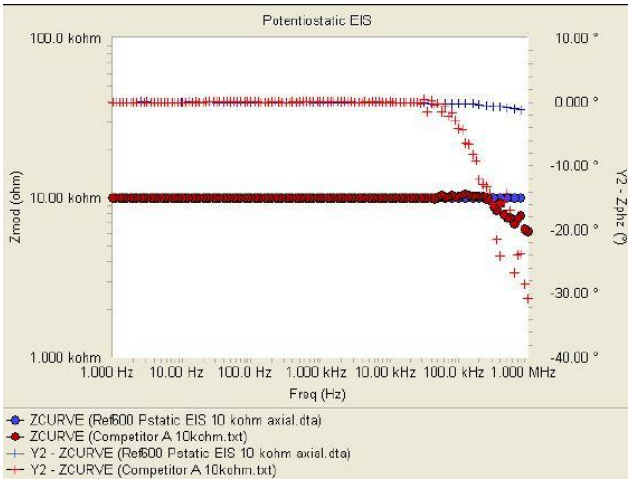

Figura 3.24 – Teste EIS para uma resistência de 10kΩ

A disparidade de resultados é grande, o que pode dever-se a erros sistemáticos de medição, como por exemplo a incorrecta calibração do equipamento, ou incorrecta configuração para realizar este tipo de testes.

3.6.4 - Resultados obtidos com bateria Li-Ion

EIS é uma forma poderosa de ter informação acerca de sistemas electroquímicos, tais como as baterias. A baixa impedância de algumas baterias torna difícil fazer a medição, pois a maioria dos equipamentos de EIS não funcionam correctamente para impedâncias inferiores a 0.1Ω. É, por isso, necessário usar técnicas especiais de modo a melhorar a exactidão dos resultados. A indutância mútua entre cabos de medição é um factor a ter em conta. São aplicados métodos práticos para reduzir este efeito indesejado. Todos os sistemas de alta performance usam um esquema de ligação de quatro terminais. As quatro pontas que se ligam à célula eléctrica estão agrupadas em pares, um par conduz a corrente entre a bateria e o potencióstato, enquanto um segundo par mede a tensão aos terminais da célula. O primeiro par é chamado "pontas de transporte de corrente" e o segundo par é chamado "pontas de medição". O termo indutância mútua descreve a influência do campo magnético gerado pelas pontas de transporte de corrente nas pontas de medição. Fazendo a analogia com um transformador, as pontas de transporte de corrente correspondem ao primário e as pontas de medição ao secundário. A corrente AC no primário cria um campo magnético que cria uma tensão AC no secundário, indesejada neste caso.

Este efeito pode ser minimizado da seguinte forma:

- Evitar altas frequências.
- Minimizar o campo magnético gerado pelas pontas de transporte de corrente.
- Separar as pontas de transporte de corrente das pontas de medição.
- Entrelaçar os fios das pontas de medição.
- Separar os pares de medição e os pares de transporte de corrente.
- Usar cabo coaxial ou pares torcidos.

Na Figura 3.25, está representada a ligação entre o equipamento EIS e a célula eléctrica. É pretendido maximizar a distância entre os pares de transporte de corrente e os pares de medição. É também pretendido minimizar a distância entre o equipamento EIS e a célula eléctrica, usando os cabos curtos [19].

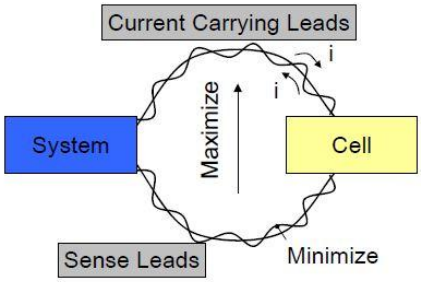

Figura 3.25 – Configuração recomendada para ligação das células [19]

De modo a melhorar a exactidão da medição EIS são também sugeridos os seguintes aspectos:

- Usar o modo galvanostatico no equipamento EIS.
- Usar correntes de excitação elevadas.

Figura 3.26 – Fixação da bateria [19]

Usando este esquema de ligação é possível medir os efeitos da cablagem na medição da impedância, sendo assim possível subtrair esses mesmos efeitos. A fixação deve ter o mesmo formato que a bateria, e deve ter a mínima resistência e indutância possível. Depois é medida a impedância e resistência da ligação, sendo este valor subtraído ao valor da impedância total (bateria+cablagem). De notar que o valor da impedância da fixação é muito baixa R≈40μΩ e L≈1.3nH, sendo que este efeito na maior parte das vezes pode ser ignorado.

Deve ser usado o modo galvanostático pois a resistência interna da bateria é baixa. Assim, é definido um valor de corrente de excitação fixo, de modo a não ultrapassar o limite de corrente do sistema. Deve-se, no entanto, escolher um valor para a corrente de excitação que permita uma tensão AC maior do que 10μV, pois uma vez abaixo deste valor torna-se difícil a medição, já que neste caso o ruído torna-se elevado em relação ao sinal. Como exemplo uma bateria com 100μΩ de resistência interna, implica uma corrente de excitação superior a 100mA.

No equipamento utilizado (voltalab 80) nas ligações entre EIS e a bateria são usados quatro terminais, REF, AUX, SENSE e WORK. O canal SENSE deve ser ligado em conjunto com o canal WORK, pois o canal SENSE apresenta uma maior impedância do que o canal WORK e quando se ligam estes dois canais a queda ohmica devido à cablagem é eliminada. Os canais REF e AUX devem ser ligados entre si. Na Figura 3.27 estão exemplificadas as ligações necessárias no equipamento necessárias [20].

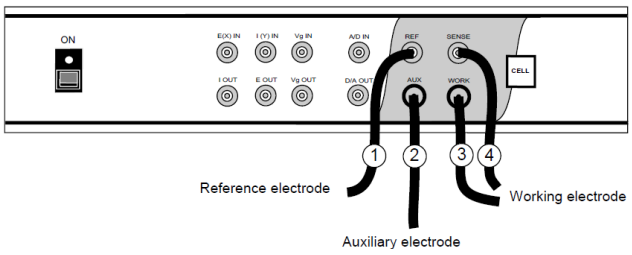

Figura 3.27 – Ligação no equipamento EIS para Medição de impedância [20]

O botão CELL indica que os eléctrodos AUX e REF estão ligados ao potencióstato, portanto para se proceder às ligações em segurança dos eléctrodos é necessário ter em atenção que o botão CELL esteja desactivado (luz apagada).

Foram efectuados vários testes com uma bateria de Li-ion com as seguintes características:

- Tensão nominal: 3.75v
- Capacidade: 1.840mAh
- Energia: 6.9Wh
- Corrente máxima de carga: 1.8A
- Corrente máxima de descarga: 2A

De modo a realizar o teste EIS, é necessário escolher um valor de tensão para a componente DC. Como a resistência interna da bateria está na ordem dos 400mΩ o valor máximo para a tensão DC é de 400mV, uma vez que a corrente máxima suportada pelo equipamento é de 1A.

A gama de frequências usadas foi de 5kHz a 10mKz, com 20 amostras por década. A corrente DC usada é 250mA. A Figura 3.28 mostra o resultado obtido, que não é um resultado esperado.

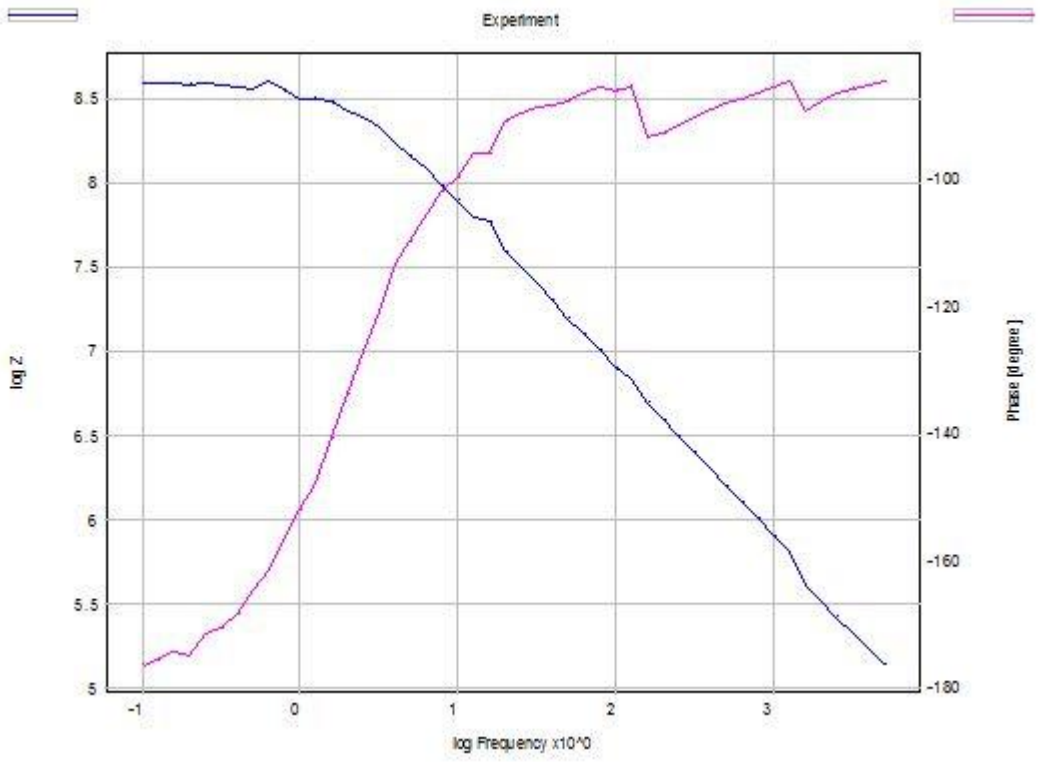

Figura 3.28 – Diagrama de Bode da medição EIS

O valor esperado da impedância teria que ser próximo da Figura 3.16- Diagrama de Bode [14]. o que não se verifica. Embora se tenham realizados vários ensaios, o resultado foi sempre insatisfatório.

3.6.1 - Conclusões

Os resultados estão longe do esperado, o que impossibilitou a realização de testes mais pormenorizados. No entanto seria de interesse realizar testes para a impedância para diferentes estados de carga e para diferentes temperaturas.

Capítulo 4

Análise e simulação dos modelos de baterias eléctricas

4.1 - Introdução

Pretende-se neste capítulo mostrar as características de dois modelos amplamente usados, um será o modelo matemático, que está incorporado no Simulink® (Matlab®), enquanto o segundo será o modelo eléctrico equivalente, estudado na presente dissertação. Com base neste estudo pretende-se exercitar e verificar a viabilidade da estimação paramétrica a implementar na banca de ensaios experimentais.

Neste capítulo é discutido a influência dos diferentes parâmetros, tais como temperatura ou corrente de descarga, no desempenho da bateria. É depois feita uma análise do modelo matemático usado, bem como uma análise ao modelo eléctrico. É depois abordado dois métodos diferentes para obter os parâmetros internos da bateria modelada pelo modelo matemático. É depois comparada o desempenho do modelo eléctrico em relação ao modelo matemático. Neste capítulo mostra-se também que é possível obter um modelo em *Simulink* baseado na impedância interna da bateria.

A resistência interna é um parâmetro importante para caracterizar a performance e tempo de funcionamento de bateria. A resistência da bateria pode ser dividida em resistência interna ohmica e resistência de polarização. A resistência ohmica tem uma dinâmica rápida, enquanto a resistência de polarização apresenta uma dinâmica mais lenta. A resistência interna difere consoante os materiais que constituem a bateria, o modo como a bateria é fabricada, bem como a sua estrutura.

4.1.1 - Influência dos diferentes parâmetros

Na Figura 4.1 está representada a resposta em tensão a um impulso de descarga, sendo possível verificar o impacto da componente ohmica e da componente de polarização.

Existe uma queda inicial provocada pela componente ohmica, seguindo-se um decréscimo gradual, que é provocado pela componente de polarização.

Pretende-se que a resistência interna da bateria seja baixa, pois quanto maior a resistência, menor será a tensão de descarga, o que implica um decréscimo da potência que a bateria é capaz de fornecer.

Em aplicações onde são necessários regimes elevados de potência, tais como veículos eléctricos, é importante conhecer a resistência interna de modo a prever a performance da bateria em tempo real. Na prática, não é possível obter a informação acerca da resistência em tempo real, pois é necessário realizar testes de impulsos de descarga, e para tal a bateria tem que estar em repouso, o que não acontece na realidade. Para contornar esta situação, são usados modelos equivalentes da bateria de modo a estimar os parâmetros ao longo do tempo de forma a estimar o estado de carga e o estado de saúde [21].

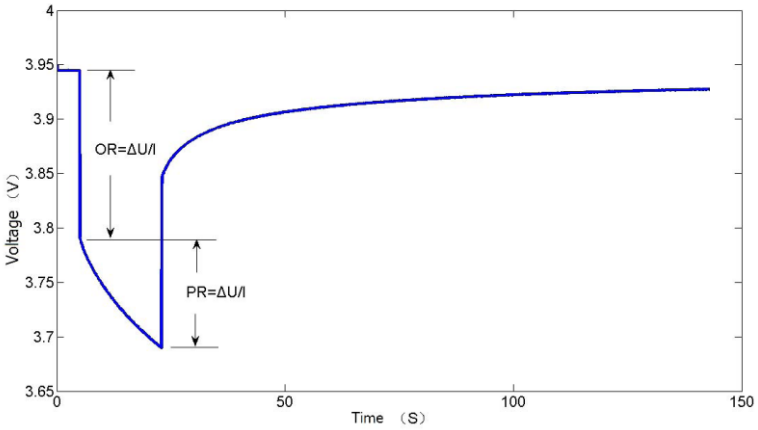

Figura 4.1 – Resposta a um impulso de descarga de uma bateria de Li-ion [21]

Tomando como exemplo uma bateria de lítio 8Ah, pode ser visto na Figura 4.2 o comportamento ao longo da vida da bateria submetida a vários ciclos de carga e descarga completos, a uma temperatura constante de 40ºC e uma corrente de 4C. A resistência ohmica e a resistência de polarização são medidas ao longo dos vários ciclos de carga/descarga. De modo a facilitar a comparação, os valores foram normalizados utilizando o método de "fitting" exponencial. A capacidade total da bateria também é medida ao longo do tempo. Como seria de esperar a capacidade diminui de uma maneira linear. Já a resistência ohmica tem um aumento significativo ao longo do tempo comparado com o aumento da resistência de polarização. Pode-se concluir que a performance da bateria diminui com o seu tempo de vida, sendo que a resistência ohmica tem um papel importante quando se pretende prever essa mesma performance [21].

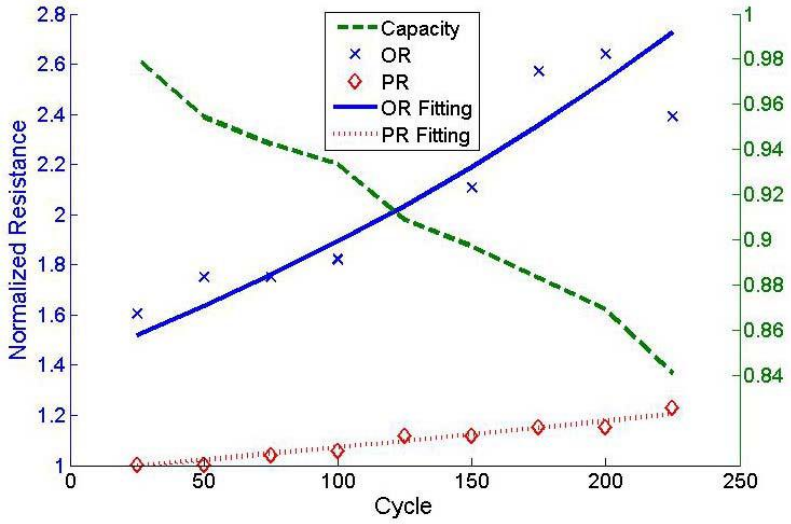

Figura 4.2 – Tendência de alteração da resistência da bateria [21]

A resistência interna também é influenciada pelo regime de carga ou descarga aplicado, ou seja, a resistência aumenta rapidamente para regimes de carga ou descarga elevados, como demonstra a Figura 4.3.

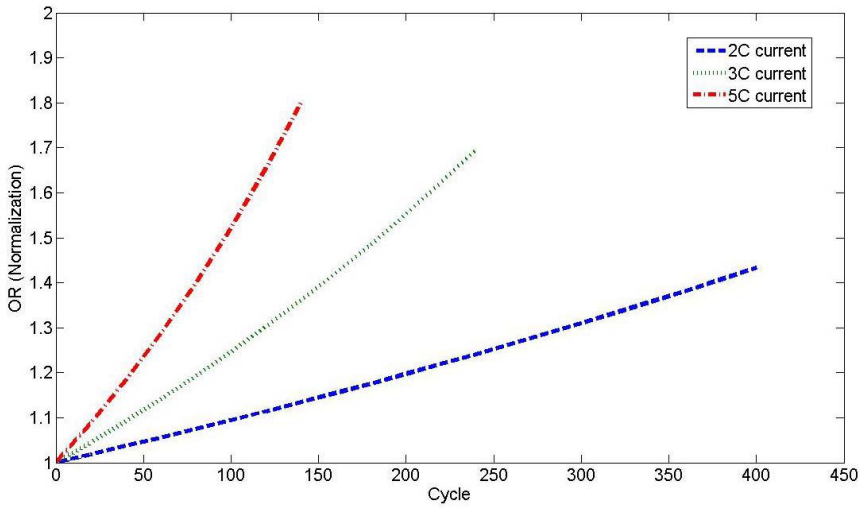

Figura 4.3 – Resistência interna para diferentes correntes de descarga [21]

Outro factor que influencia a resistência interna é a profundidade de descarga aplicada (DoD). Como exemplo um DoD de 20% significa que a bateria apenas funciona entre um SoC de 100% e um SoC de 80%, é demonstrado na Figura 4.4 que a resistência interna aumenta com o aumento do DoD.

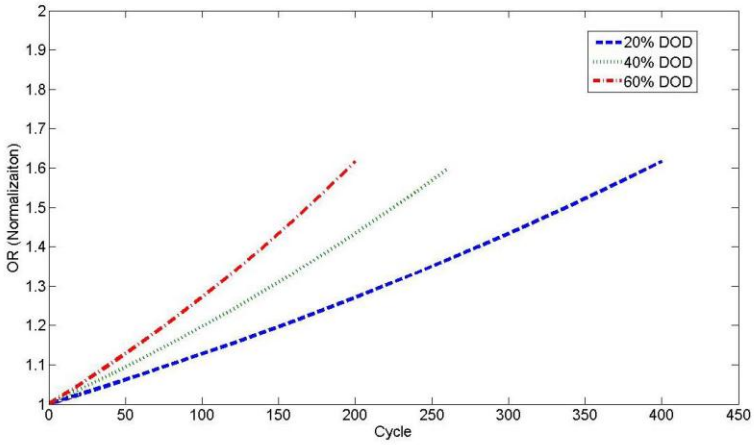

Figura 4.4 – Resistência interna para diferentes profundidades de descarga [21]

A temperatura ambiente também tem um papel importante no valor da resistência interna. Com o aumento da temperatura a resistência aumenta, como mostra a Figura 4.5, neste exemplo as condições de carga e descarga são constantes, variando apenas a temperatura ambiente [21].

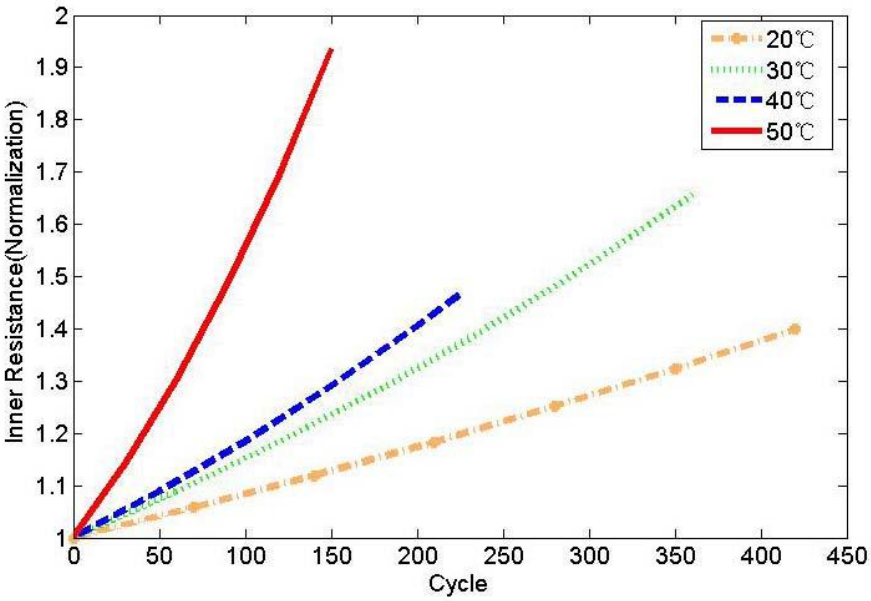

Figura 4.5 – Resistência interna para temperaturas ambientes diferentes [21].

A relação entre o estado de carga (SoC) e a resistência ohmica é demonstrada na Figura 4.6, sendo possível verificar que para um SoC entre 30% e 80% a resistência se mantém estável. Pode-se também verificar que a corrente de descarga não tem influência no valor da resistência ao longo de diferentes estados de carga.

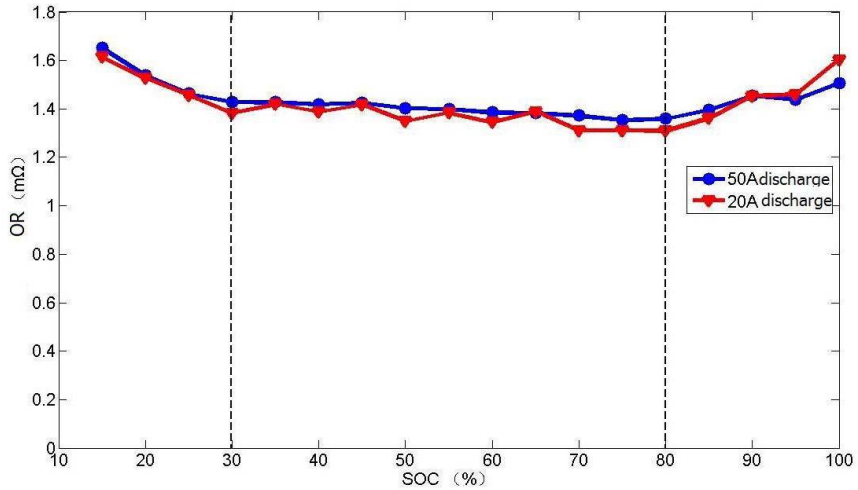

Figura 4.6 – Relação entre resistência ohmica e estado de carga [21].

A Figura 4.7- Variação das resistências com o SOC, para diferentes constantes de tempo [22]. mostra a variação dos parâmetros internos da bateria com o estado de carga. Estes parâmetros estão agrupados por constantes de tempo.

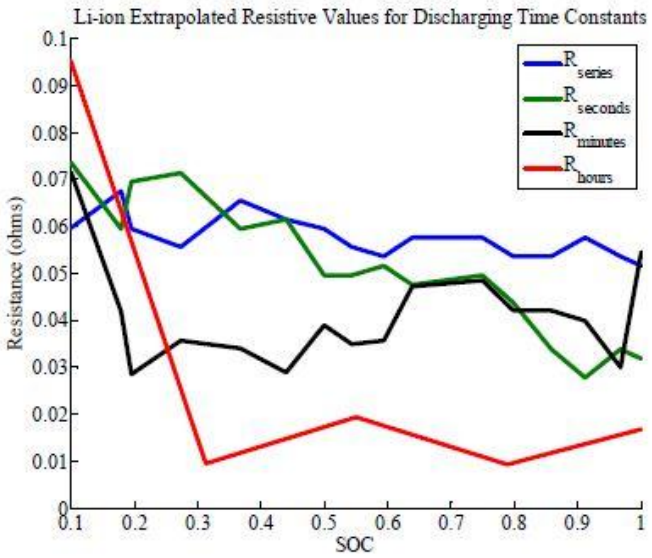

Figura 4.7- Variação das resistências com o SOC, para diferentes constantes de tempo [22].

Em resumo, a resistência interna tem um papel fundamental na performance da bateria, pois este parâmetro tem influência no tempo de funcionamento de bateria, bem como a potência que a mesma é capaz de fornecer.

4.2 - Análise do modelo matemático incorporado no matlab

De modo a servir de modelo base, é usado um modelo matemático, que se pode encontrar no ambiente de simulação *simulink* do programa *matlab*.

O modelo apresentado está incorporado no Simulink® do Matlab® e simula o comportamento das baterias, sendo que aplica um algoritmo diferente consoante a carga ou descarga da bateria. Uma das particularidades deste modelo é o facto de apenas serem necessários três pontos da curva de descarga de modo a simular o comportamento da bateria. Normalmente essa curva de descarga é fornecida pelo fabricante, ou poderá ser obtida através de um simples teste de descarga. Dessa curva de descarga é possível extrair o valor da tensão máxima (Vfull), o fim da zona exponencial (Qexp, Vexp) e o fim da zona nominal (Qnom, Vnom) que é identificada por uma queda abrupta de tensão. Também é possível extrair o valor da capacidade máxima da bateria, sendo para isso necessário fazer a contagem de carga ao longo do tempo, usando o integral da corrente. De forma geral, a resistência interna ohmica também é um dado fornecido pelo fabricante. Deste modo não é necessária a realização de testes experimentais para obter esses mesmos parâmetros de modo a configurar o modelo matemático. Um exemplo de curva de descarga é mostrado na Figura 4.8 [5].

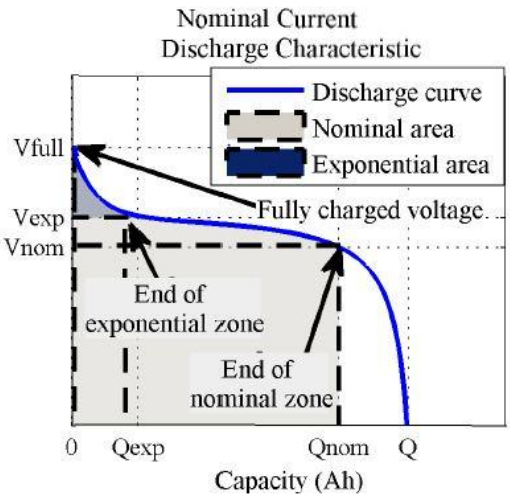

Figura 4.8- Curva de descarga a corrente constante de 0.2C [5].

A curva de descarga é tipicamente composta por três secções, como mostra a Figura 4.9. A primeira secção representa a zona de queda de tensão exponencial quando a bateria se encontra carregada. Esta zona difere consoante o tipo de bateria, normalmente é mais acentuada em baterias de lítio.

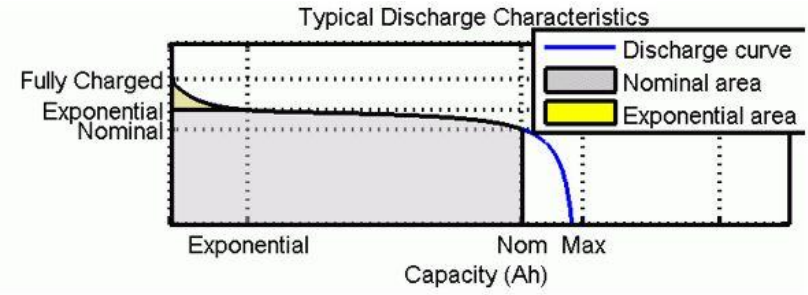

Figura 4.9- Curva típica de descarga [23].

A segunda zona (cinzento) representa a carga que pode ser extraída da bateria até que a tensão atinja um valor abaixo da tensão nominal. A terceira secção representa a descarga total da bateria, onde a tensão Voc decresce muito rapidamente, até praticamente 0v.

Quando a bateria se encontra em carregamento, a curva característica de tensão para as baterias de Li-ion, chumbo, NiMH e NiCD são as representadas na
Figura 4.10:

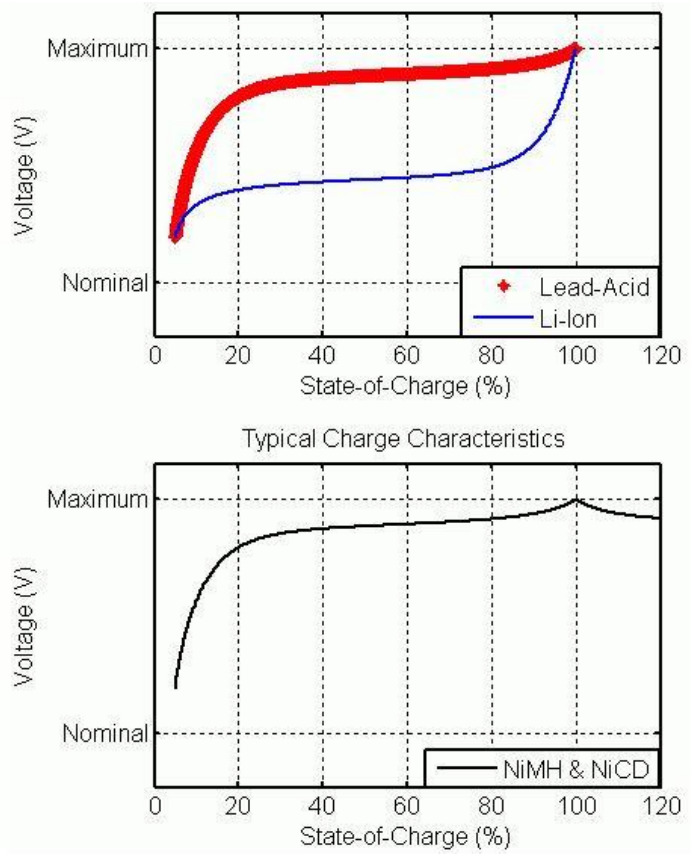

Figura 4.10 –Curva característica para a carga de baterias [23].

Os parâmetros do modelo são obtidos pela curva característica de descarga e é assumida a mesma curva para o modelo de carga.

A função de transferência Exp(s) representa o fenómeno de histerese para as baterias de chumbo, NiCD e NiMH. A tensão aumenta exponencialmente quando a bateria está a carregar, independentemente do estado de carga da mesma. O oposto acontece quando a bateria está a descarregar, onde a tensão decresce exponencialmente como mostra a Figura 4.11.

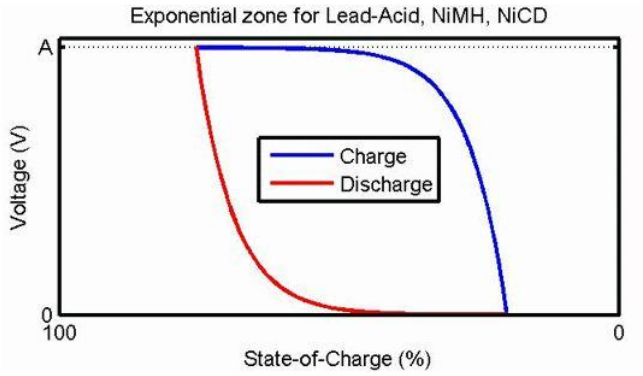

Figura 4.11 – Zona exponencial para baterias de chumbo, NiMH e NiCD [23].

Este modelo tem algumas limitações, tais como:

- A resistência interna é considerada constante durante os ciclos de carga e descarga e não varia com a amplitude da corrente.
- Os parâmetros do modelo são deduzidos pela curva característica de descarga e é assumida a mesma curva para a carga.
- A capacidade da bateria não se altera com a amplitude da corrente.
- O modelo não tem em conta a temperatura como factor de variação.
- O auto descarregamento da bateria não é representado, mas pode ser facilmente incluído no modelo, acrescentando uma resistência em paralelo aos terminais da bateria.
- Este modelo não tem em consideração o efeito de memória presente em alguns tipos de baterias.

O esquemático do circuito equivalente da bateria é demonstrado na Figura 4.12, é possível identificar vários componentes:

Internal Resistence:

Este componente representa a resistência interna da bateria. Neste modelo é considerado que é sempre constante ao longo do tempo.

First order low-pass filter:

Este modelo usa um filtro de corrente, de modo a calcular a corrente de polarização. Esta corrente, como já foi explicado, é derivada de fenómenos com uma constante de tempo lenta.

Sel:

Como as funções para a zona exponencial durante a carga e descarga são diferentes, existe um seleccionador que consoante a situação, selecciona qual a função Exp(s) a usar.

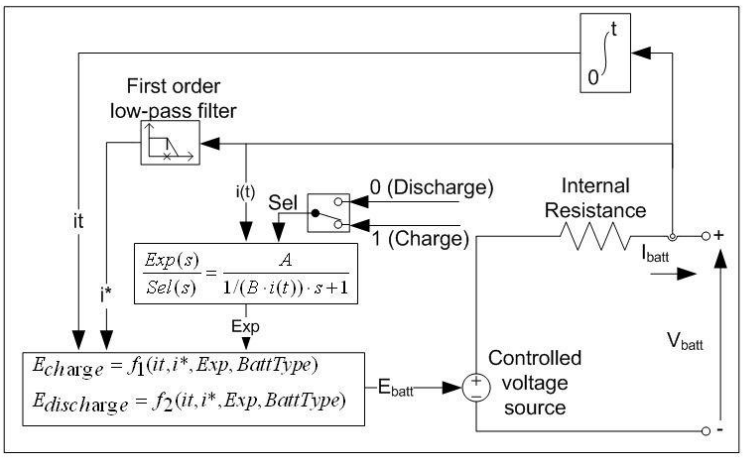

Figura 4.12 – Diagrama de funcionamento do modelo matemático da bateria [23].

Onde:

E_{Batt} = Tensão não linear (V)

E_0 = Tensão Constante (V)

Exp(s) = Zona de dinâmica exponencial (V)

Sel(s) = Representa o modo da bateria. Sel(s) = 0 durante a descarga da bateria, Sel(s) = 1 durante a carga da bateria.

K = Constante de polarização (Ah^{-1}) ou Resistência de polarização (Ohms)

i* = Dinâmica de corrente de baixa frequência (A)

i = Corrente da bateria (A)

it = Capacidade extraída (Ah)

Q = Capacidade máxima da bateria (Ah)

A = Tensão Exponencial (V)

B = Capacidade Exponencial $(Ah)^{-1}$

4.2.1 - Modelo de descarga

O modelo de descarga é idêntico ao modelo de Shepherd, contudo apresenta uma grande vantagem ao modelar com precisão a dinâmica da tensão quando a corrente de descarga é variável ao longo do tempo. Este modelo também tem em conta a tensão em circuito aberto (OCV) em função do SOC.

A tensão da bateria é determinada pelas seguintes equações:

$$Vbatt = Eo - K\frac{Q}{Q-it} \times it - R \times i + A^{-B\times it} - K\frac{Q}{Q-it} \times it^{*} \qquad (4.1)$$

Onde:

Vbatt = Tensão da bateria (v)

E_0 = Tensão constante da bateria (v)

K = Constante de polarização (V/Ah)

Q = Capacidade da bateria (Ah)

It=$\int idt$ Carga actual da bateria (Ah)

A = Amplitude da zona exponencial (V)

B = Constante de tempo inversa da zona exponencial Ah^{-1}

R = Resistência interna (Ω)

i = Corrente na bateria (A)

i^{*}= Corrente filtrada (A)

4.2.2 - Modelo de carga

O modelo de carga depende do tipo de bateria a ser modelado, uma vez que a característica de fim de carga (EOC) difere. As baterias de *Lead-Acid* e *Li-ion* têm as mesmas características de EOC, pois a tensão aumenta bruscamente quando a bateria atinge a carga máxima. Este fenómeno é modelado pela resistência de polarização. Neste caso, a resistência de polarização aumenta até ao ponto em que a bateria está praticamente carregada. Quando atinge este ponto a corrente anula-se (it=0) e a resistência de polarização aumenta bruscamente.

A resistência de polarização é descrita por:

$$\text{Resistência_Polarização} = K\frac{Q}{it} \qquad (4.2)$$

Está demonstrado que existe um desvio de cerca de 10% entre o ponto onde a corrente it=0 e o ponto de carga máxima. Por isso é necessário reescrever a equação da seguinte forma:

$$\text{Resistência_Polarização} = K\frac{Q}{it-0.1*Q} \qquad (4.3)$$

4.2.3 - Diagrama de modelo matemático em Simulink

Este modelo é depois implementado em Simulink®, como o modelo usa blocos da toolbox SimPowerSystems. Na Figura 4.13 está representado o modelo matemático implementado em Matlab.

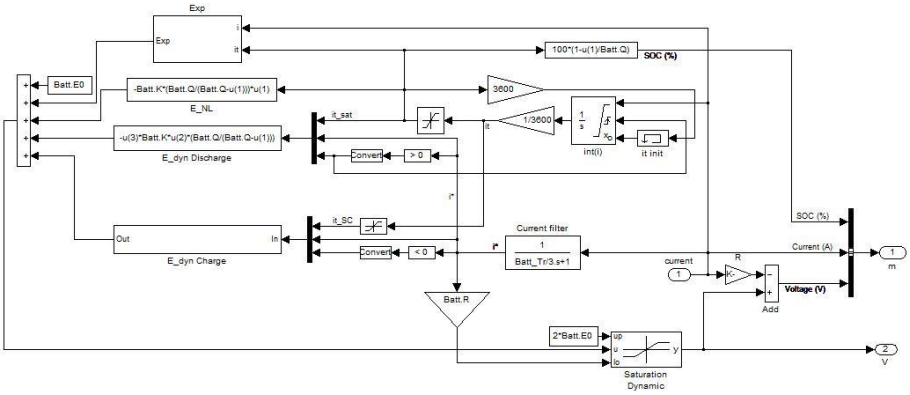

Figura 4.13 – Modelo Simulink® do modelo matemático

De forma a melhorar a performance deste modelo seria necessário acrescentar variáveis como a temperatura, profundidade de descarga e estado de saúde SoH. Para isso seria necessário conhecer o comportamento da bateria para vários pontos de funcionamento, para cada uma das variáveis. Sendo depois possível usar *look-up tables*, de modo a prever o comportamento da bateria para todos os pontos de funcionamento.

4.3 - Análise do modelo eléctrico equivalente da bateria

O modelo eléctrico equivalente permite representar o comportamento da bateria recorrendo a elementos elementares eléctricos. Na Figura 4.14, está representado o circuito eléctrico que modela o seu comportamento a partir de elementos passivos e activos. Neste modelo apresentado os componentes passivos são resistências e condensadores, enquanto que os componentes activos são as fontes de tensão e corrente controladas. Neste circuito está representado o circuito de tempo de funcionamento e o circuito da característica tensão-corrente.

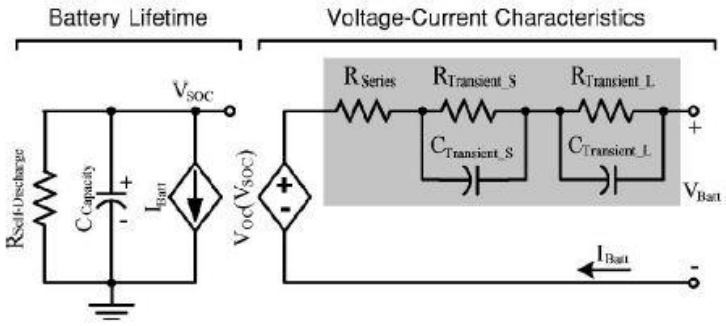

Figura 4.14 – Modelo eléctrico com resistência de auto descarga [13]

O circuito de tempo de funcionamento é constituído por um condensador Ccap, representativo da capacidade total da bateria. A fonte de alimentação de corrente Ibat representa a corrente de descarga da bateria. Por último a resistência R_self_discharge permite incluir no modelo a auto descarga da bateria ao longo do tempo. Como neste trabalho apenas se pretende modelar a bateria para curtos espaços de tempo, essa resistência pode ser desprezada, simplificando o circuito.

O circuito de característica de tensão-corrente pretende representar os fenómenos físicos que ocorrem no interior da bateria e que afectam o seu funcionamento. Neste circuito está representada a resistência R*serie*, que é a resistência interna ohmica da bateria. Estão também representados os fenómenos electroquímicos tais como difusão, dupla camada e polarização. Estes fenómenos estão representados pelas malhas RC em paralelo. Neste modelo esses fenómenos estão divididos em dois conjuntos, os de dinâmica rápida, e os de dinâmica lenta. Aqueles que têm dinâmica rápida influenciam a tensão de saída da bateria ao fim de poucos micros segundos, enquanto os de dinâmica lenta influenciam o comportamento da bateria ao fim de cerca de 1 segundo, como mostrado no capítulo 2.2.1.1 - .

Um circuito simplificado, sem resistência de auto descarga está representado na Figura 4.15 – Modelo eléctrico sem resistência de auto descarga. Este modelo foi utilizado na simulação do modelo Matlab®, uma vez que apenas se pretende simular o comportamento para curtos intervalos de tempo [24].

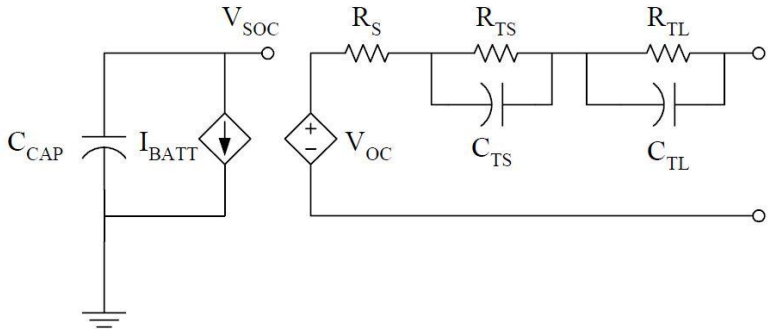

Figura 4.15 – Modelo eléctrico sem resistência de auto descarga [24]

Como ilustrado na Figura 4.16, a relação entre o estado de carga (SoC) e a tensão de circuito aberto é não linear. Quando o estado de carga atinge um valor próximo de zero, a tensão decresce bruscamente provocando uma diminuiçao de potência disponível. É necessário usar mecanismos de segurança para prevenir a descarga total da bateria, para isso existem no mercado micro-processadores especificos capazes de monitorar vários parâmetros da bateria de modo a garantir a segurança da mesma.

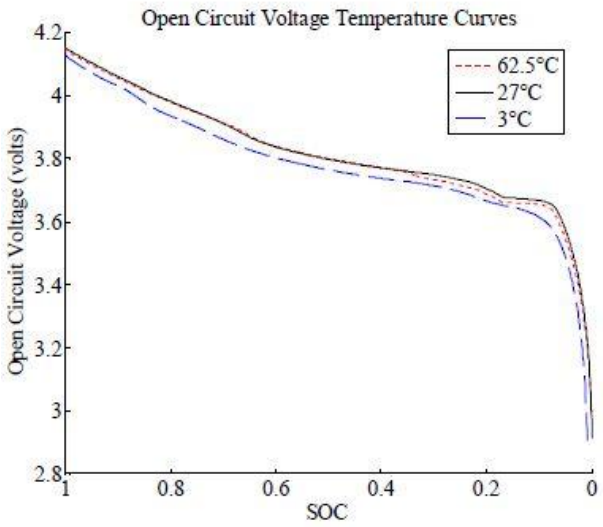

Figura 4.16- Relação SoC-Voc para diferentes temperaturas [22].

A relação do modelo matemático incluído no Matlab® está representado na Figura 4.17, o estado de carga está representado entre zero e um, onde um corresponde à carga total.

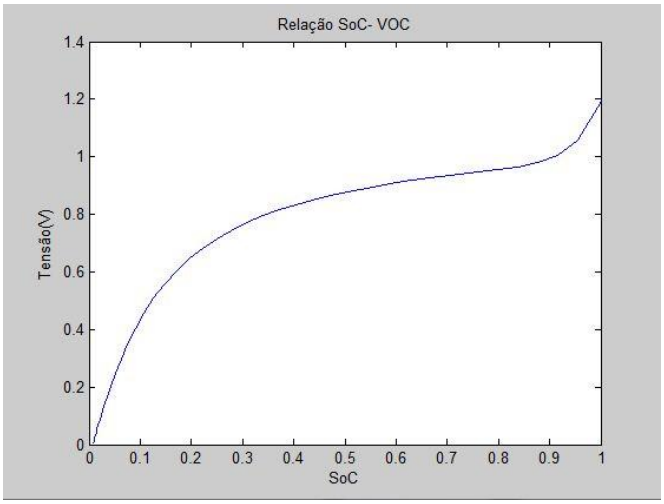

Figura 4.17- Relação SOC-Voc

O circuito elétrico da Figura 4.15, é descrito por uma equação ordinária diferencial,

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(RtsCts)^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & -(RtlCtl)^{-1} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} -(Ccap)^{-1} \\ -(Crs)^{-1} \\ -(Ctl)^{-1} \end{bmatrix} u \qquad (4.1)$$

$$y = g(x1) + x2 + x3 + Rs\, u \qquad (4.2)$$

Neste equação Rts e Cts são a resistência e capacidade para uma malha RC com uma constante de tempo baixa, Rtl e Ctl são a resistência e capacidade da malha RC com uma constante de tempo elevada. A função g(x) é não linear, que mapea SOC em VOC. O vector x representa as tensões em Ccap, Cts e Ctl. A variável u representa a corrente que flui pela bateria. Na equação (4.2 a variável y corresponde à tensão aos terminais da bateria, que é o somatório da tensão Ocv, da queda de tensão $x2$ e $x3$ e da queda de tensão na resistência Rs.

O estado de carga (SOC) é calculado através da equação:

$$SOC[i(t)] = SOCinicial - \frac{1}{C}\int_0^t i(t)dt \qquad (4.3)$$

Para calcular o estado de carga é realizada a "contagem de coloumb". Neste processo a corrente é integrada ao longo do tempo.

Vout pode ser calculado por:

$$Vout = Voc(SOC) - ibat(t) \times Rint(SOC) + ibat(t) \times Rtrans(\tau s + \tau l) \qquad (4.\ 4.4)$$

Onde Vout é a tensão à saída, Rint é a resistência interna. Rtrans são as malhas RC de constantes de tempo τs e τl.

Neste modelo apresentado é negligenciada a variação das resistências internas devido aos factores já mencionados.

4.3.1 - Diagrama do modelo eléctrico em Simulink

De modo a implementar o modelo eléctrico optou-se por utilizar uma representação do circuito eléctrico através de uma equação ordinária equivalente. Outra abordagem validada

seria utilizar a representação eléctrica do circuito através da toolbox SimPoweSystems do Matlab.

O esquema do Simulink® da Figura 4.18 implementa o sistema de equações 4.4 e 4.5. A interface entre os blocos de SimPowerSystems e os blocos baseados em sinais é feito através de uma fonte de tensão controlada.

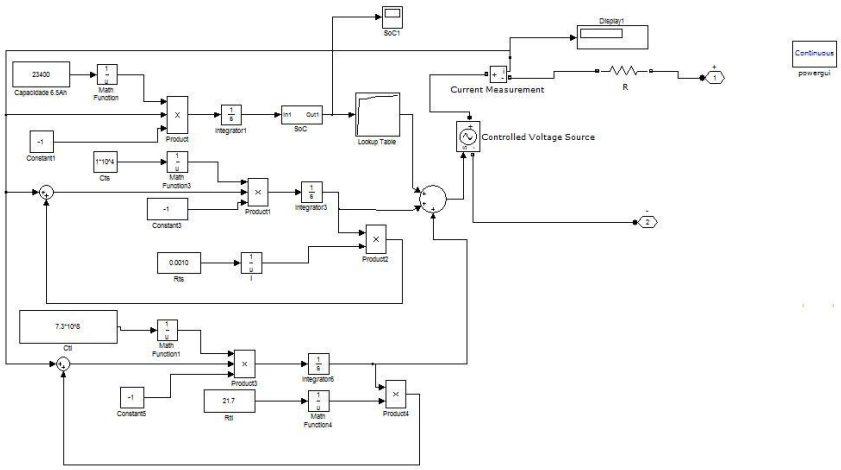

Figura 4.18 – Esquema de modelo eléctrico baseado no artigo [24].

Foi adicionada uma "lookup table" de modo a exprimir a relação SoC-Voc. Para mais tarde comparar o modelo matemático com este modelo, é usada a relação SoC-Voc do modelo matemático. Para isso é necessário usar a curva da relação não linear entre SoC-Voc da Figura 4.17.

4.4 - Estimação de parâmetros para o modelo eléctrico

De modo a extrair os parâmetros do modelo eléctrico, são simulados testes de descarga e carga na bateria com o modelo matemático. Estes testes consistem na aplicação de pulsos de corrente [25].

Para simular os testes de descarga é usado o esquema da Figura 4.19. Neste esquema estão representados os dois modelos da bateria, é usado um *switch* de modo a comutar a carga, deste modo é possível controlar os impulsos de descarga. É usado um *duty cycle* de 50% com um período de 100s, de modo a permitir a estabilização da tensão em circuito aberto.

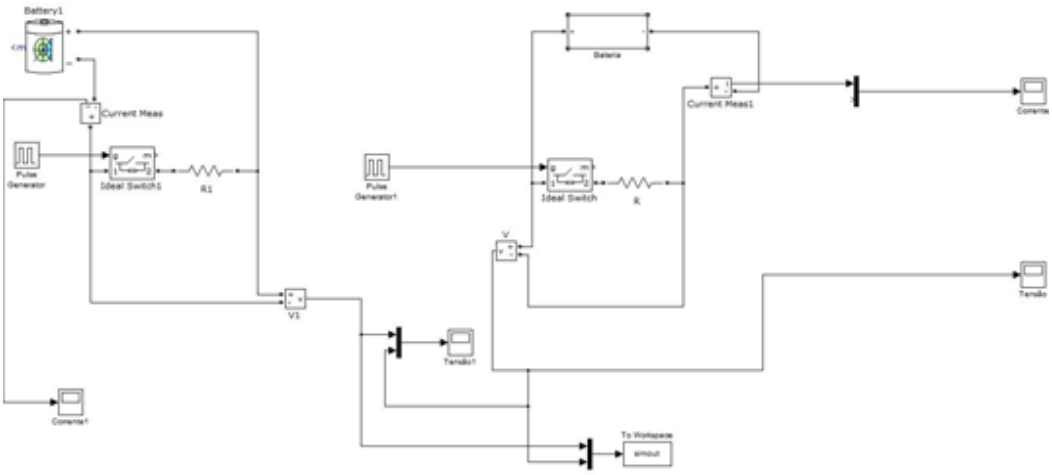

Figura 4.19 – Esquema de simulação da para teste de baterias em Simulink

4.4.1 - Estimação da resistência ohmica

A resistência interna da bateria, chamada Rs (resistência em série) pode ser obtida através da aplicação de um degrau de corrente, que provoca uma queda de tensão de dinâmica rápida provocada pela resistência interna da bateria. Está demonstrado que a resistência interna é independente da corrente de descarga, mas é dependente da temperatura, estado de saúde (SoH) e estado de carga (SoC) da bateria [25].

Nos testes realizados é assumido que a temperatura é constante, e que o estado de saúde da bateria se mantém constante.

Na Figura 4.20, está representada a tensão aos terminais da bateria quando é aplicado um degrau de corrente. A resistência usada tem o valor de 1Ω, o que faz com que a corrente tenha o valor de 1.4A.

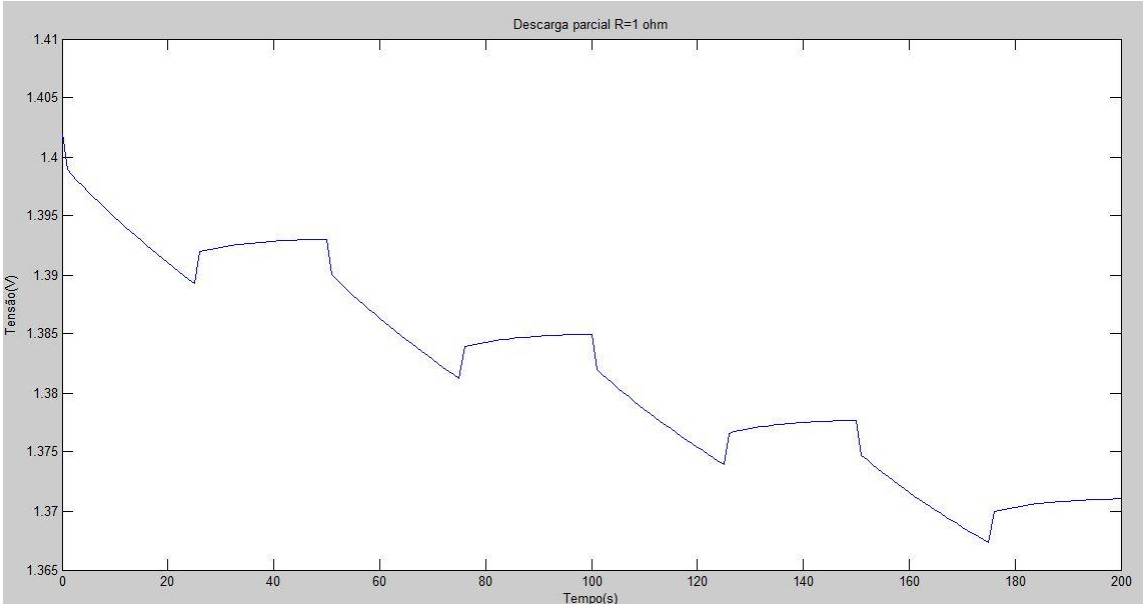

Figura 4.20 – Gráfico de tensão a um impulso de corrente

Com $Rs = \frac{Vr}{i}$o, é possível obter um valor para a resistência de $Rs = \frac{1{,}3840-1{,}3812}{1.4} \approx 0.002\Omega$.

Este valor é depois introduzido no modelo eléctrico, sendo comparada a performance do modelo eléctrico com o modelo matemático.

De modo a comprovar o sinal de onda obtido em ambiente de simulação foram realizados testes de descarga periódicos à bateria de Li-ion. Na Figura 4.21 está representado a imagem do sinal de onda aos terminais da bateria, quando é aplicado um sinal de controlo da carga periódico.

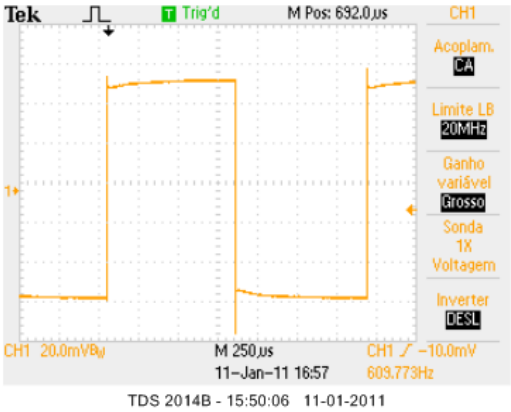

Figura 4.21 – Tensão aos terminais da bateria

É possível verificar a queda de tensão provocada pela resistência ohmica, seguida de uma queda lenta, que é modelada no modelo eléctrico pelo circuito RC.

4.4.2 - Estimação dos parâmetros Rts e Cts

Os parâmetros da malha RC, Rts e Cts correspondem aos fenómenos de dinâmica rápida. Estes parâmetros podem também ser obtidos observando os primeiros 0,5s da tensão após se aplicar um degrau de corrente.

De modo a calcular estes parâmetros é necessário conhecer a constante de tempo τd, que é o tempo que a tensão demora a atingir 63,3% do seu valor final, como demonstra a Figura 4.22.

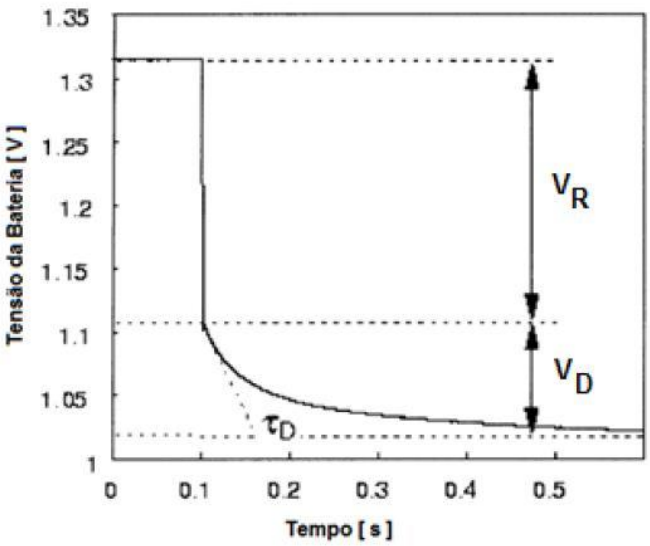

Figura 4.22 – Gráfico da tensão em resposta uma impulso de descarga [25].

Através da análise do sinal de tensão da Figura 4.22 é possível obter os valores para Rts e Cts da seguinte forma:

$$Rts = \frac{Vd}{i} \text{ e } Cts = \frac{\tau d}{Rts} \tag{4.5}$$

Correndo a simulação da bateria é possível encontrar os valores de Rts e Cts. Neste caso, para um de t=150s após o início de simulação, é obtido o gráfico da Figura 4.23.

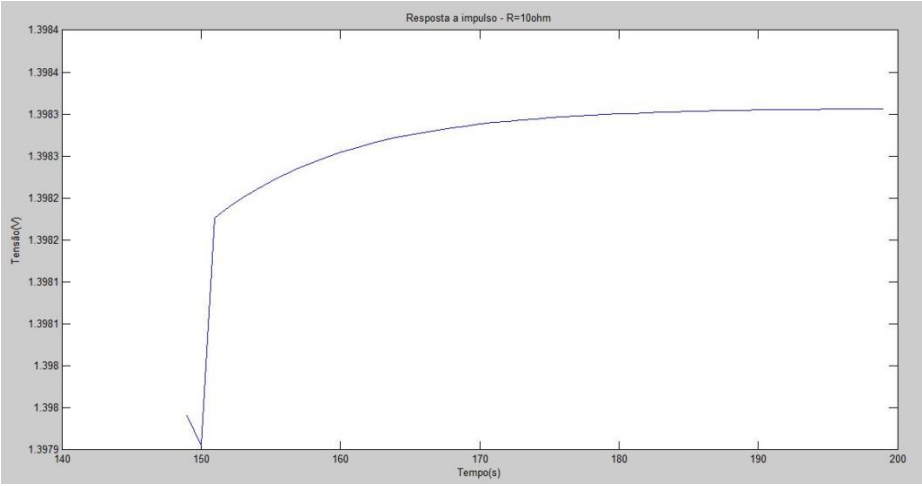

Figura 4.23 – Resposta ao impulso de corrente de 150s a 200s

Analisando o gráfico é possível concluir os valores para Rts e Cts:

$$Rts \approx \frac{1{,}3984-1{,}3980}{1{,}4} \approx 0.28 \times 10^{-3}\Omega \quad (4.6)$$

$$Cts \approx \frac{31{,}5}{0.28\times10^{-3}} \approx 1.1250\times 10^{5}\text{F} \quad (4.7)$$

4.4.3 - Estimação dos parâmetros Rtl e Ctl

Para extrair os parâmetros de Rtl e Ctl é utilizado a ferramenta de *Curve Fitting* do Matlab®. A partir da resposta ao impulso de corrente consegue-se aproximar uma equação a essa resposta, sendo possível conhecer os valores de Rtl, Ctl Rts e Cts [24].

A partir do artigo [24] é possível derivar as seguintes equações:

$$y(t) = k + a.e^{bt} + c.e^{dt} \quad (4.8)$$

$$R_{TS} = -\frac{a}{i_c} \quad (4.9)$$

$$R_{TL} = -\frac{c}{i_c} \quad (4.10)$$

$$C_{TS} = -\frac{1}{R_{TS}b} \quad (4.11)$$

$$C_{TL} = -\frac{1}{R_{TL}d} \quad (4.12)$$

A partir da equação 4.8 é possível fazer uma aproximação da curva da resposta ao impulso da Figura 4.23.

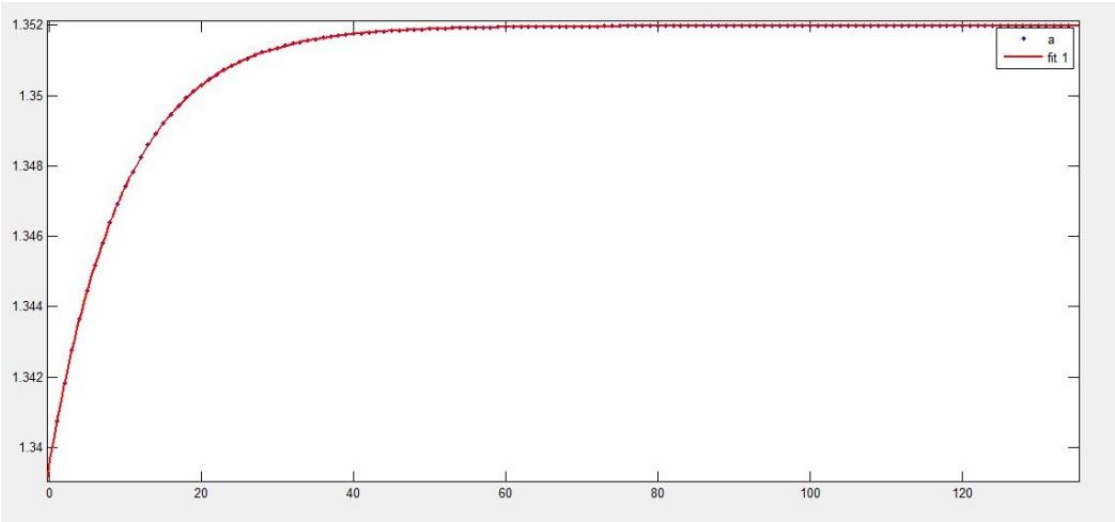

Figura 4.24 – Matlab® *Curve Fitting*

O *fitting* da equação à curva real é perfeito, tornando difícil distinguir as duas curvas na figura. Os valores obtidos para as variáveis da equação $y(t) = k + a.e^{bt} + c.e^{dt}$ (4.8 estão representados na Figura 4.25 Para que seja possível o *fitting* correcto é necessário criar a condição k>0, de modo a k ter apenas valores positivos.

```
Results
General model:
     f(t) = k+a*exp(b*t)+c*exp(d*t)
Coefficients (with 95% confidence bounds):
       a =    -0.01341  (-0.01341, -0.01341)
       b =    -0.09993  (-0.09996, -0.0999)
       c =      -238.8  (-325.5, -152.2)
       d = -6.337e-011  (-1.155e-010, -1.124e-011)
       k =       240.2  (153.5, 326.8)
```

Figura 4.25 – Resultados obtidos para os coeficientes da função y(t)

Usando os valores da Figura 4.25 e as equações 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12, são obtidos os seguintes valores para os parâmetros do modelo equivalente:

$$R_{TS} = -\frac{-0.011341}{11} = 0.0010\Omega \tag{4.13}$$

$$R_{TL} = -\frac{-238.8}{11} = 21.7091\Omega \tag{4.14}$$

$$C_{TS} = -\frac{1}{0.0010\times-0.09993} = 1.0007 \times 10^4 F \tag{4.15}$$

$$C_{TL} = -\frac{1}{21.7091\times -6.337\times 10^{-11}} = 7.2690 \times 10^{8} F \qquad (4.16)$$

Com estes valores para o modelo matemático é possível obter os resultados da Figura 4.26.

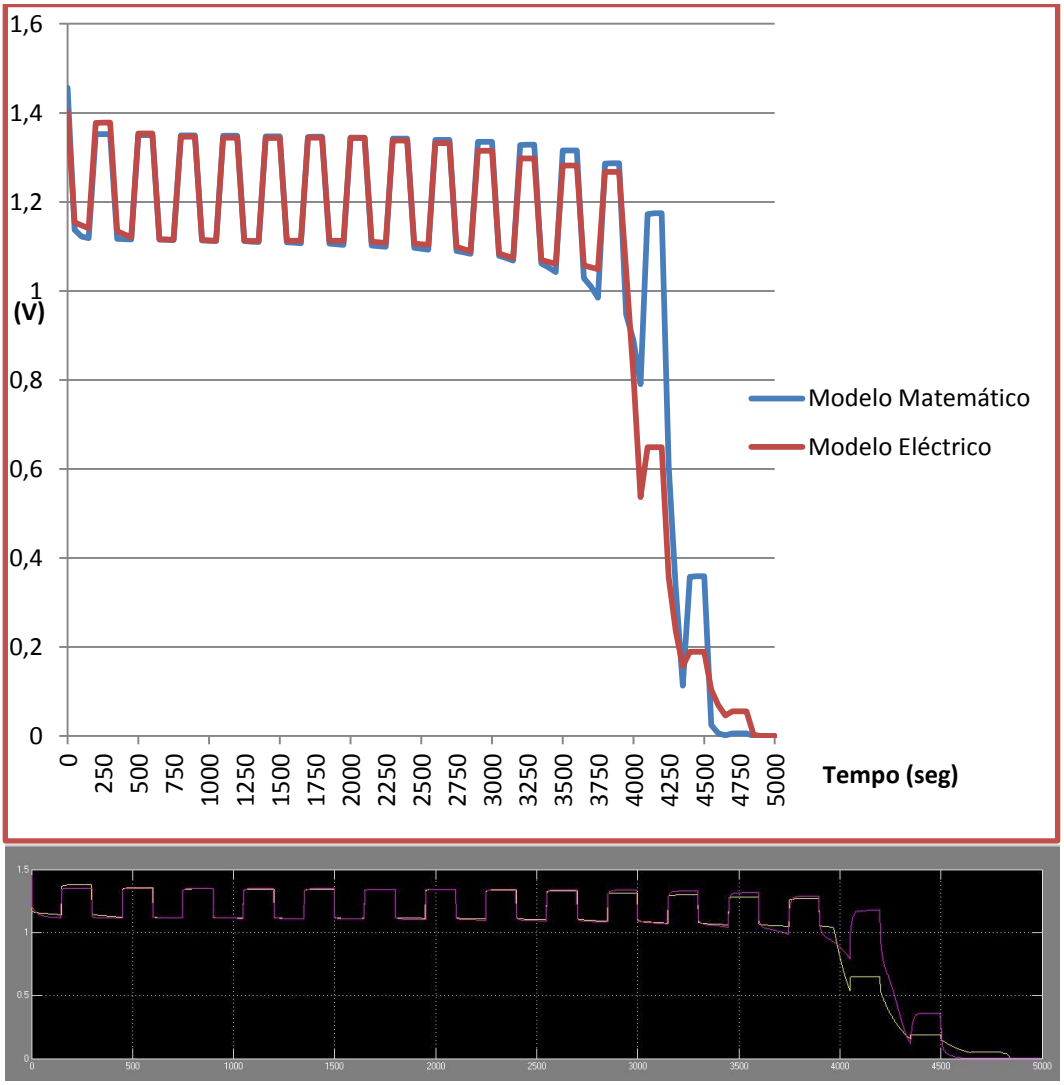

Figura 4.26 - Gráfico de comparação de tensão entre o modelo eléctrico (amarelo) e o modelo matemático (roxo) para R=0.1Ω

Com estes valores de Rts, Rtl, Cts e Ctl as constantes de tempo para os fenómenos que ocorrem em curto espaço de tempo tem a constante de tempo de τs=Rts×Cts=10 e τl=Rtl×Ctl=10000.

Calculando a diferença entre os dois sinais de tensão é obtido o resultado da Figura 4.27.

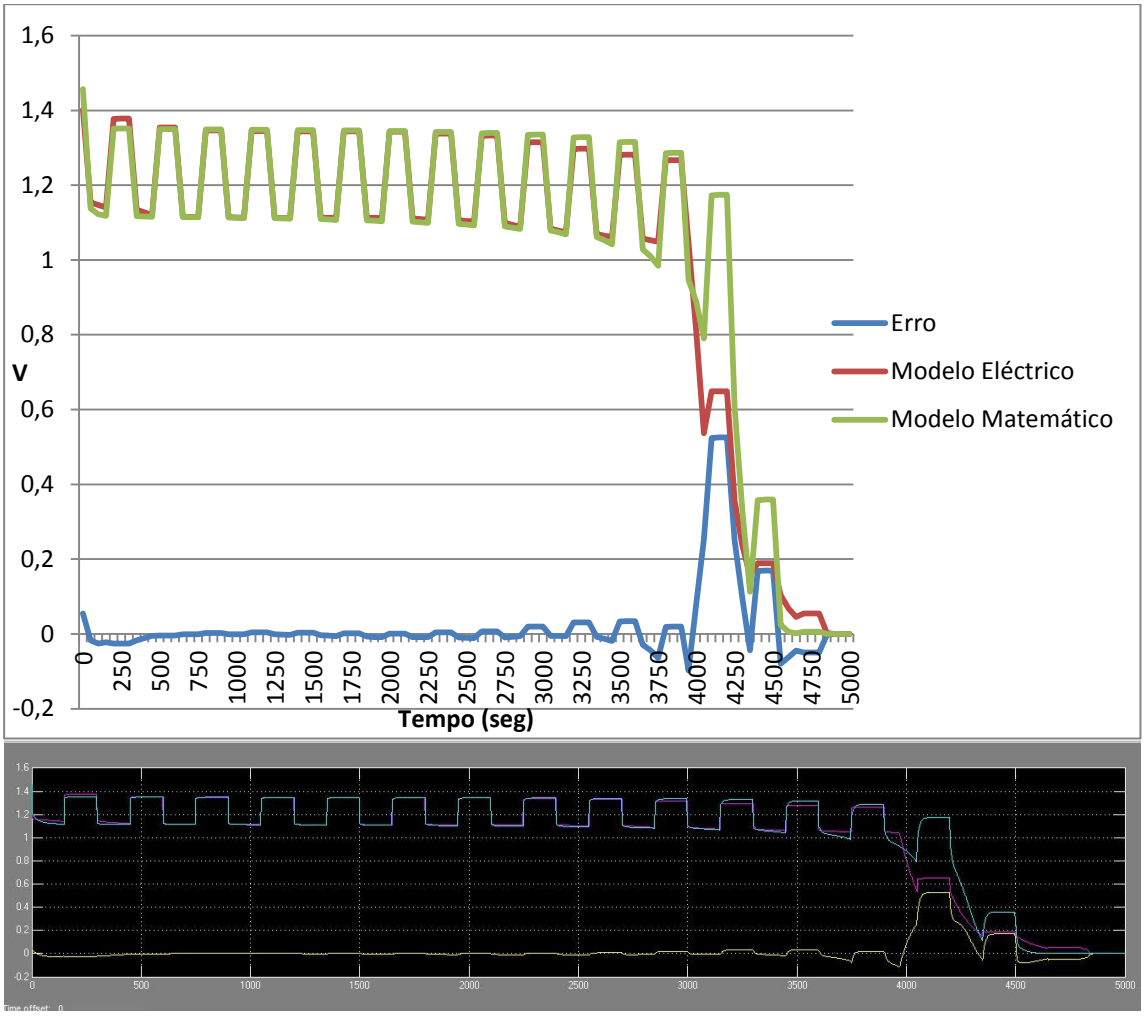

Figura 4.27 - Gráfico da diferença entre a tensão dos dois modelos representado pela linha amarela

4.4.4 - Influência da temperatura

A temperatura tem um papel fundamental na performance da bateria, a baixas temperaturas o electrolítico perde capacidades, limitando a potência da bateria. Por outro lado, a taxa de reacções químicas que ocorrem no interior da bateria aumenta exponencialmente com a temperatura. A altas temperaturas podem ocorrer reacções não desejadas que acabam por destruir a própria bateria.

De modo a incluir a influência da temperatura no modelo eléctrico é necessário conhecer o seu comportamento para uma gama de temperaturas. A Figura 4.28 mostra a relação entre a resistência interna e a temperatura. Para baixas temperaturas a resistência chega a ser três vezes superior, comparado com altas temperaturas.

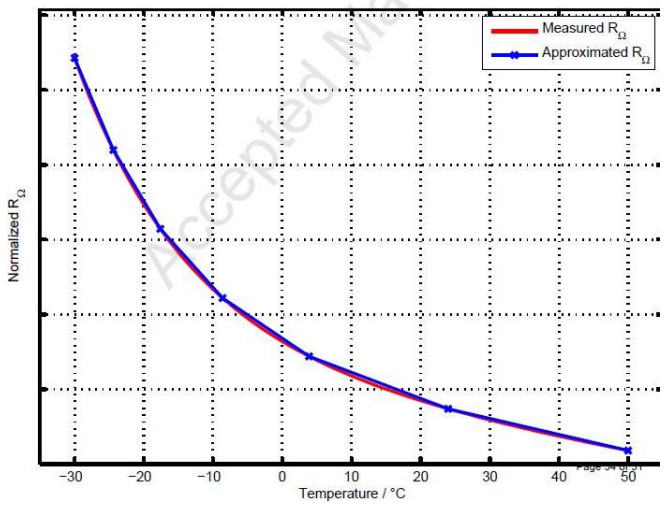

Figura 4.28- Variação da resistência interna com a temperatura

A toolbox SimPowerSystems® não permite directamente usar uma resistência variável para implementar a variação da temperatura no modelo eléctrico. É então necessário criar uma resistência variável através de uma fonte de tensão controlada. Na Figura 4.29 está representada uma resistência controlada por tensão. É possível alterar a queda de tensão numa resistência através da tensão usada pela fonte DC.

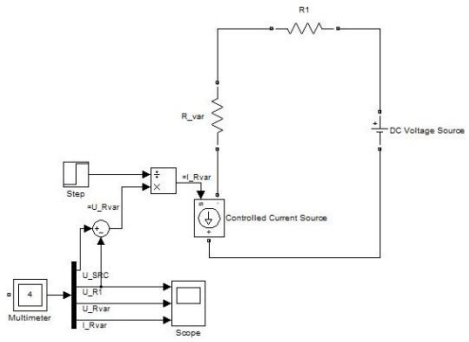

Figura 4.29 – Implementação Matlab® de uma resistência variável em SimPowerSystems®

4.5 - Modelo eléctrico baseado em impedância

Uma alternativa ao modelo eléctrico apresentado é o modelo eléctrico baseado na impedância da bateria. Baseado no artigo [14] foi possível criar um modelo capaz de representar a evolução da tensão da bateria em situações de descarga e o estado de carga.

Para isso são necessários três passos, calcular a tensão em circuito aberto, calcular a queda de tensão provocada pela resistência ohmica. E por último é necessário calcular a queda de tensão provocado pelos elementos RC.

Para calcular a tensão de circuito aberto é necessário conhecer a relação entre Voc e SoC. Ao integrar a corrente ao longo do tempo é possível saber qual o SoC actual, partindo do

princípio que o SoC inicial é conhecido. Depois, através de uma tabela é possível conhecer o Voc.

O cálculo da queda de tensão provocado pela resistência ohmica é feito através do conhecimento prévio da resistência ohmica para diferentes SoC e diferentes temperaturas. Com isso, mais uma vez, a partir de duas tabelas é possível conhecer a resistência em R(SoC,t), conseguindo-se, assim, identificar a queda de tensão, já que a corrente também é conhecida.

Para calcular a queda de tensão provocada pelos elementos RC é necessário conhecer previamente qual a impedância da bateria para diferentes estados de carga e diferentes temperaturas. Para conhecer o circuito eléctrico equivalente da impedância, é possível usar software específico, como por exemplo o *Zman* da empresa *WonATech*. É feita uma correlação entre a corrente I e o sinal de tensão U para cada elemento RC. A corrente no elemento RC é a seguinte:

$$I = I_R + I_C \tag{4.17}$$

A corrente que atravessa a resistência e pelo condensador é definido por:

$$I_R = \frac{U}{R} \tag{4.18}$$

$$I_C = C\frac{\partial U}{\partial t} \tag{4.19}$$

Através das equações:

$$I_C = C\frac{\partial U}{\partial t} \quad (4.19 \tag{4.20}$$

$$I_R = \frac{U}{R} \tag{4.18}$$

$$I = I_R + I_C \tag{4.17}$$

É possível calcular a queda de tensão provocada pelo elemento RC por:

$$\int_{t=0}^{t=tf} \frac{RI-U}{RC} dt \tag{4.213}$$

Nesta equação, os valores de R e C são funções do estado de carga e da temperatura, que são obtidos através e tabelas determinadas previamente por testes experimentais.

Na Figura 4.30 está representada a implementação em *Simulink* do modelo eléctrico baseado em impedância.

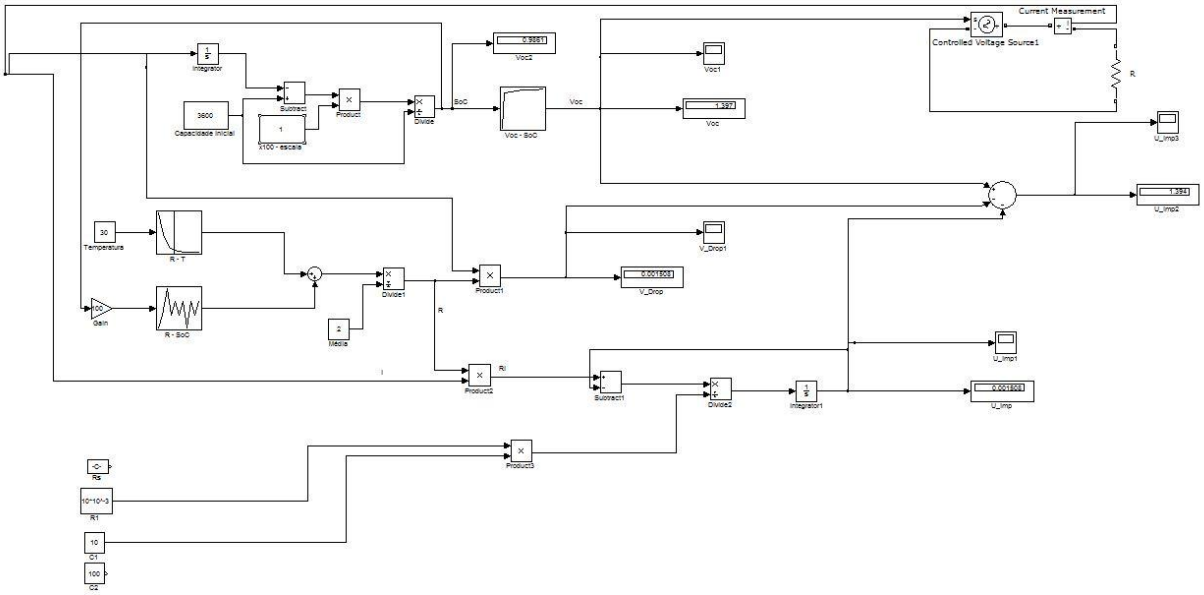

Figura 4.30 – Modelo eléctrico baseado em impedância em Simulink

Com esta simulação foi possível prever a tensão em circuito aberto e o estado de carga. Este modelo tem a limitação de usar valores fixos de impedâncias, visto não se conseguido estimar os parâmetros da bateria para diferentes temperaturas e diferentes estados de carga.

No entanto ficou demonstrado que este modelo tem enormes potencialidades no que respeita à estimação em tempo real, sendo um modelo a ter em conta quando se pretenda implementar numa aplicação real.

4.6 - Resultados

O objectivo da simulação centrou-se na comparação entre os dois tipos de modelos, em termos de funcionamento, bem como performance. Foi necessário estimar os parâmetros do modelo matemático de forma a criar um modelo eléctrico equivalente. Como está demonstrado, os valores de tensão na saída são idênticos como mostra a Figura 4.27.

Tanto o modelo eléctrico como o modelo matemático permitem prever qual o estado de carga e a tensão aos terminais em tempo real. De modo a tornar estes modelos mais robustos seria necessário ter em conta a influência da variação da temperatura, da quantidade de ciclos de carga/descarga efectuados e a taxa de corrente de descarga. Para

implementar estes factores seria necessário efectuar um estudo prévio da bateria de modo a saber quais as variações dos parâmetros internos. Posteriormente, através da interpolação de todos os parâmetros seria possível chegar aos valores de cada momento dos parâmetros. Sendo assim possível uma maior exactidão na previsão do estado de carga e estado de saúde, bem como potência instantânea máxima disponível.

Capítulo 5

Conclusão e Trabalhos Futuros

5.1 - Conclusão

Neste trabalho são apresentados de forma resumida diferentes modelos para baterias baseadas em circuitos eléctricos equivalentes.

O estudo efectuado permitiu comparar o desempenho dos diferentes modelos e estudar técnicas simples de estimação dos parâmetros do modelo.

A disponibilidade do equipamento EIS foi exercitada, embora os resultados conseguidos não sejam convincentes. A razão para o insucesso destes testes prende-se com a falta de informação acerca do equipamento usado, já que este equipamento é principalmente usado para testes laboratoriais de soluções químicas.

A plataforma de testes foi especificada e foram efectuados testes simples de modo a conhecer o funcionamento dos seus principais elementos. Não foi possível construir a plataforma na sua totalidade pois ouve um ligeiro atraso na entrega da carga DC e da interface GPIB.

5.2 - Trabalhos Futuros

Ao aprofundar o conhecimento nesta área torna-se visível quais os aspectos importantes a ter em conta, sendo sugeridos trabalhos futuros, no sentido de continuar a temática do estudo de modelos eléctricos capazes de serem utilizados em sistemas de gestão de energia das baterias.

A implementação de um modelo eléctrico baseado em impedância para cálculo do estado de carga e tensão de saída, num sistema de gestão de baterias pode ser implementado, usando as metodologias aqui discutidas.

Para a realização da estimação de parâmetros EIS é recomendado o uso de equipamentos de fabricantes como Gamry®, Ivium® ou Solartron@, pois fornecem bastante informação e software de modo a tornar a medição da impedância uma tarefa fácil. O software *Zman* [27] é também recomendado em futuras aplicações.

Referências

[1] C. C. Chan, "The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles," *Proceedings of the IEEE,* vol. 95, pp. 704-718, 2007.

[2] S. Pelissier, "Batteries for electric and hybrid vehicles
State of the art, Modeling, Testing, Aging," presented at the VPPC, Lille, France, 2010.

[3] E. Valsera-Naranjo, *et al.*, "Electrical vehicles: State of art and issues for their connection to the network," in *Electrical Power Quality and Utilisation, 2009. EPQU 2009. 10th International Conference on*, 2009, pp. 1-3.

[4] S. Liqing, *et al.*, "State-of-art of energy system for new energy vehicles," in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE*, 2008, pp. 1-8.

[5] L.-A. D. Olivier Tremblay, "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications," *World Electric Vehicle Journal,* vol. 3, 2009.

[6] A. Jossen, "Fundamentals of battery dynamics," *Journal of Power Sources,* vol. 154, pp. 530-538, 2006.

[7] R. L. H. II, "An Aging Model for Lithium-Ion Cells," Faculty of The University of Akron, 2008.

[8] N. J. E. N. D. Cogger, "An Introdution to Electrochemical Impedance Measurement Tech Report n.17," Solartron analytical1999.

[9] G. Instruments. (2010, Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy.

[10] R. Rao, *et al.*, "Battery modeling for energy aware system design," *Computer,* vol. 36, pp. 77-87, 2003.

[11] I. Exponent. *Cell Modeling Using Dualfoil 5.1* Available: http://www.exponent.com/cell_modeling_using_dualfoil/

[12] T. Analytics. (2010). *Battery Modeling*. Available: http://www.thermoanalytics.com/docs/batteries.html

[13] C. Min and G. A. Rincon-Mora, "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance," *Energy Conversion, IEEE Transactions on,* vol. 21, pp. 504-511, 2006.

[14] D. Andre, *et al.*, "Characterization of High-Power Lithium-Ion Batteries by Electrochemical Impedance Spectroscopy I. Experimental Investigation," *Journal of Power Sources,* vol. In Press, Accepted Manuscript.

[15] WonATech. (2010). *WBCS Battery Cycler System*. Available: http://www.xenosystem.com/t6.php?id=wbcs2

[16] tpub. Available: http://www.tpub.com/content/altfuels02/3361/33610013.htm

[17] R. S. R. LLC. (2009). Available: http://www.consultrsr.com/resources/eis/cpe2.htm

[18] G. Instruments. (2009, Quick Check of EIS System Performance.

[19] G. Instruments, "EIS Measurement of a Very Low Impedance Lithium Ion Battery," 2009.

[20] R. Analytical. (2006). *Voltalab*. Available: http://www.radiometer-analytical.com/pdf%5CUser_manuals%5CVoltaLab%5CD21V032_VoltaLab%20Vm4_gb.pdf

[21] X. Wei, *et al.*, "Internal Resistance Identification in Vehicle Power Lithium-Ion Battery and Application in Lifetime Evaluation," presented at the Proceedings of the 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation - Volume 03, 2009.

[22] R. C. Kroeze and P. T. Krein, "Electrical battery model for use in dynamic electric vehicle simulations," in *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE*, 2008, pp. 1336-1342.

[23] I. The MathWorks. (2009, Battery - Implement generic battery model.

[24] J. M. Michael Knauff, Dr. Chris Dafis, Dr. Dagmar Niebur, Dr. Pritpal Singh , Dr. Harry Kwatny, and Dr. Chika Nwankpa. Simulink Model of a Lithium-Ion Battery for the Hybrid Power System Testbed.

[25] B. Schweighofer, *et al.*, "Modeling of high power automotive batteries by the use of an automated test system," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on,* vol. 52, pp. 1087-1091, 2003.

[26] Fluke, "Programmable Power Supplies- Users Manual," ed, 1997.

[27] WonATech, "ZMAN," 2.2 ed, 2010.