

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



**Aplicação de Filtro de Kalman  
Estendido na estimação de Estado de  
Carga de um Sistema de Gestão de  
Baterias**

**Pedro Miguel Moreira da Silva**

PARA APRECIÇÃO POR JÚRI

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor Armando Luís Sousa Araújo

21 de Julho de 2016



# Resumo

A crescente necessidade de nos tornarmos independentes dos combustíveis fósseis levou, inevitavelmente, à utilização de outras fontes de energia. Atualmente os maiores desafios prendem-se com o armazenamento da energia em veículos elétricos, já que as necessidades energéticas destes são superiores a outros equipamentos elétricos portáteis e a autonomia é um fator determinante na escolha de um veículo elétrico em detrimento de um veículo com motores de combustão interna. A par da escolha de uma boa fonte energética para um veículo elétrico, é necessário também fazer uma boa gestão desse armazenamento energético.

Assim, o tema central desta dissertação é o desenvolvimento de um estimador de Estado de Carga (SOC) de uma bateria de polímeros de iões de Lítio para um sistema de gestão de baterias (BMS). Esta estimação será feita com recurso a um Filtro de *Kalman* Estendido (EKF) e a uma modelação de baterias baseada no modelo da difusão. Ao longo deste documento serão detalhados todos os processos associados ao desenvolvimento desse estimador e à implementação num sistema de estimação em tempo real.

Numa fase inicial foi feito o estudo teórico envolvendo os tipos de baterias mais comuns, os estimadores do SOC atuais e os modelos de baterias existentes. Concluída essa análise foi possível definir a abordagem a adotar para o desenvolvimento deste sistema.

Dado que o sistema em causa não é passível de ser descrito por um sistema de equações lineares, foi necessário aplicar o EKF, ao invés do Filtro de Kalman (KF) utilizado em sistemas lineares. A implementação deste filtro não linear é em tudo semelhante à do KF, no entanto é feita uma linearização em torno de cada ponto de funcionamento. Como a utilização deste método necessita de ser acompanhada por um modelo da bateria em teste, recorreu-se a uma modelação utilizando o modelo da difusão.

Depois de desenvolvido todo o sistema, o mesmo foi implementado, numa fase inicial, com num algoritmo em Matlab e de seguida, o mesmo algoritmo foi convertido para linguagem C para posterior implementação num micro-controlador da Infineon (XMC4500) para o sistema de estimação em tempo real. Para a comprovação do bom funcionamento do algoritmo em tempo real, foram utilizados percursos de teste internacionais, para veículos de combustão. Estes valores foram normalizados para valores de corrente retirada da bateria de acordo com a potência do VEC da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Com este sistema, na estimação do SOC, foram obtidos erros médios inferiores a 2% e erros máximos nunca superiores a 10%.

**Palavras Chave:** Veículo Elétrico, Modelo de bateria, Bateria de polímeros de lítio, Bateria, Estado de carga (SOC), Filtro de *Kalman* (KF), Filtro de *Kalman* Estendido (EKF), Sistema de Gestão de Baterias (BMS), Tempo real, XMC4500



# Abstract

Given the need to become fossil fuel independent, it led us to the use of other energy sources. Currently, the biggest challenges are related with the energy storage in electric vehicles, since their energetic need are far larger than other portable electronics and the autonomy is a determinant factor on choosing an electric vehicle over a internal combustion engine vehicle. As important as the selection of a good power source for an electric vehicle, it's also important to do a good management of that energy storage.

So, the main subject of this dissertation is the development of a lithium-ion polymer battery State of Charge (SOC) estimation algorithm for a Battery Management System (BMS). This estimation will be done with an Extended Kalman Filter (EKF) and a battery model based on the diffusion model. Further on this document all the processes associated with the development of the estimation algorithm and its implementation on a real time estimation system will be detailed.

Initially the theoretical study was made, involving the more common battery types, the current SOC estimators and the existing battery models. Ended that analysis, it was possible to define the adopted approach to the development of this system.

Given that this system can't be described with a linear equation system, it was necessary to apply the EKF, instead of the Kalman Filter (KF) used in linear systems. The implementation of this non linear filter is similar to the KF implementation, however a linearization is made on each operating point. Since the implementation of this method require a battery model for the battery being tested, it was also developed a model based on the diffusion model.

After all the system is developed, it was implemented, in the beggining, on a Matlab algorithm and then, the same algorithm was converted to C language to be implemented on a Infineon micro-controller (XMC4500) for the real time estimation system. To prove the proper functioning of the real time algorithm, some international testing cycles for internal combustion engine vehicles were used. These tests were converted to electric current removed from the battery according to FEUP electric vehicle power. With this system the mean errors obtained on the SOC estimation were less than 2% of the SOC and the maximum errors were never more than 10%.

**Keywords:** Electric vehicle, Battery model, Li-poly battery, Battery, State of Charge (SOC), Kalman Filter (KF), Extended Kalman Filter (EKF), Battery Management System (BMS), real-time, XMC4500.



# Agradecimentos

Começo por agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Armando Sousa Araújo, por todo o apoio dado não só ao longo desta dissertação, como durante todo o meu percurso académico nesta Faculdade. Agradeço também ao Agostinho pela disponibilidade mostrada durante todo o semestre.

Agradeço aos meus pais, à minha irmã e a toda a restante família por me terem proporcionado a oportunidade de obter formação superior e fazer algo que tanto gosto me dá.

Deixo um agradecimento a todos os amigos que fiz desde que cá cheguei, em especial àqueles com quem passei tantas horas no I002. Afonso, Cisco, Fábio, Gabriel, Rafael, Ricardo e Tiago, um obrigado a todos vocês pela companhia, demência, brincadeira e, especialmente, pela ajuda sempre que era precisa.

Não posso deixar de agradecer também aos técnicos Pedro Galvão, pelo tempo gasto a ensinar todos os truques de sistemas operativos e programação e pelos intervalos de distração, e Pedro Alves, por todas as lições de vida que serão, sem dúvida, tidas em conta.

E como não poderia esquecer, agradeço ainda à minha namorada por me ter metido na linha e dado o apoio necessário quando mais precisei.

Um muito obrigado a todos.

Pedro Silva





*“Perfection is reached, not when there is no longer anything to add,  
but when there is no longer anything to take away.”*

Antoine de Saint-Exupery



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos	2
1.2	Estrutura do Documento	2
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1	Baterias	5
2.1.1	Princípio de Funcionamento	5
2.1.2	Terminologia e conceitos básicos	7
2.1.3	Tipos de baterias	8
2.1.4	Parâmetros que alteram as características da bateria	10
2.2	Métodos de estimação do SOC	12
2.2.1	Coloumb Counting	13
2.2.2	Filtro de Kalman	14
2.2.3	Método da tensão em circuito aberto (OCV)	14
2.2.4	Métodos baseados em lógica difusa e redes neurais	14
2.2.5	Outros métodos	14
2.3	Modelos de baterias	15
2.3.1	Lei de Peukert	15
2.3.2	Modelos analíticos	16
2.3.3	Modelos elétricos	19
2.3.4	Outros modelos	20
2.4	Conclusões	21
<b>3</b>	<b>Modelo</b>	<b>23</b>
3.1	Bateria de polímeros de iões de Lítio	23
3.2	Exposição do modelo	23
3.2.1	Simplificação do modelo	25
3.3	Parametrização	26
3.3.1	Otimização do modelo	28
3.4	Conclusões	30
<b>4</b>	<b>Filtro de Kalman</b>	<b>31</b>
4.1	Exemplo de aplicação	31
4.2	Filtro de Kalman Estendido	33
4.3	Aplicação do EKF no modelo	33
4.4	Conclusões	36

<b>5</b>	<b>Implementação e Resultados</b>	<b>37</b>
5.1	Validação do algoritmo . . . . .	37
5.1.1	Implementação em Matlab . . . . .	37
5.1.2	Implementação em C . . . . .	39
5.2	Implementação no micro-controlador . . . . .	40
5.2.1	Tempo de execução . . . . .	44
5.3	Resultados . . . . .	45
5.3.1	Corrente constante . . . . .	46
5.3.2	Percurso NEDC . . . . .	47
5.3.3	Percurso Artemis . . . . .	48
5.3.4	Percurso US EPA . . . . .	52
5.3.5	Erros de estimação do SOC . . . . .	55
5.4	Conclusões . . . . .	56
<b>6</b>	<b>Conclusão e trabalho futuro</b>	<b>57</b>
6.1	Conclusão . . . . .	57
6.2	Trabalho futuro . . . . .	58
<b>A</b>	<b>Placa de aquisição de tensão e corrente da bateria</b>	<b>59</b>
<b>B</b>	<b>Resultados da implementação do algoritmo em linguagem C</b>	<b>61</b>
<b>C</b>	<b>Descargas a 1C</b>	<b>65</b>
C.1	Bateria 11Ah . . . . .	65
C.2	Bateria 10Ah . . . . .	67
<b>D</b>	<b>Descargas pulsadas</b>	<b>71</b>
D.1	Percurso NEDC . . . . .	71
D.2	Percurso Artemis . . . . .	73
D.2.1	Artemis Urban . . . . .	73
D.2.2	Artemis Rural Road . . . . .	75
D.2.3	Artemis Motorway 130km/h . . . . .	77
D.2.4	Artemis Motorway 150km/h . . . . .	79
D.3	Percurso EPA . . . . .	81
D.3.1	EPA Federal Test Procedure . . . . .	81
D.3.2	EPA Highway Fuel Economy Test . . . . .	83
D.3.3	EPA Urban . . . . .	85

# Lista de Figuras

2.1	Operação eletroquímica da bateria nos processos de carga e descarga [6] . . . . .	6
2.2	Exemplo da relação entre ciclo de vida e DOD[15] . . . . .	11
2.3	Relação entre a corrente de descarga e a tensão da bateria a diferentes temperaturas. A temperatura aumenta de T1 para T4, sendo T4 representativa das temperaturas normais [5] . . . . .	12
2.4	Relação entre a corrente de descarga e a capacidade da bateria a diferentes temperaturas. A temperatura aumenta de T1 para T6, sendo T4 representativa das temperaturas normais [5] . . . . .	13
2.5	Representação do Modelo Cinético da Bateria [23] . . . . .	16
2.6	Representação de uma descarga segundo o Modelo de Rakhmatov e Vrudhula [23] . . . . .	18
2.7	Representação do modelo equivalente de Thevenin da bateria [28] . . . . .	20
2.8	Cadeia de Markov [23] . . . . .	21
3.1	Modelo elétrico de uma bateria num conjunto de n malhas RC[1] . . . . .	25
3.2	Modelo simplificado de uma bateria numa malha RC [1] . . . . .	26
3.3	Modelo de uma bateria numa malha RC [1] . . . . .	26
3.4	Valores amostrados e curva resultante da aproximação da função $V_{OC}$ [1] . . . . .	28
3.5	Modelo de uma bateria numa malha RC com resistência variável . . . . .	29
3.6	Variação do valor da resistência de ligação em função do valor da corrente . . . . .	30
4.1	Passos iterativos do Filtro de Kalman [20] . . . . .	32
4.2	Modelo elétrico completo de uma bateria com resistência variável . . . . .	33
5.1	Diagramas de fluxo das implementações do algoritmo . . . . .	38
5.2	Corrente de descarga da bateria durante o ensaio . . . . .	38
5.3	Comparação entre os algoritmos em C e Matlab . . . . .	39
5.4	Placa de desenvolvimento XMC4500 Relax Kit V1 [34] . . . . .	40
5.5	Configurações do bloco de comunicação com o cartão de memória . . . . .	41
5.6	Blocos utilizados no teste do micro-controlador com dados previamente recolhidos . . . . .	41
5.7	Interface entre os blocos utilizados no primeiro teste do micro-controlador . . . . .	42
5.8	Blocos utilizados no DAVE v3 para a implementação em tempo real . . . . .	42
5.9	Configuração do bloco de interrupção temporal no DAVE v3 . . . . .	43
5.10	Configuração do bloco de interface com o utilizador no DAVE v3 . . . . .	43
5.11	Interface gráfica desenvolvida no DAVE v3 . . . . .	44
5.12	Tempo de execução do algoritmo no micro-controlador . . . . .	45
5.13	SOC e Erro da estimação do SOC numa bateria de 10Ah numa descarga a 1C . . . . .	46
5.14	SOC e Erro da estimação do SOC numa bateria de 10Ah numa descarga a 1C . . . . .	46
5.15	Variação de velocidade no percurso NEDC [35] . . . . .	47
5.16	SOC e Erro da estimação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso NEDC . . . . .	48

5.17	Variação de velocidade no percurso Artemis Urban [40] . . . . .	49
5.18	SOC e Erro da estimação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso Artemis Urban . . . . .	49
5.19	Variação de velocidade no percurso Artemis Rural Road [40] . . . . .	50
5.20	SOC e Erro da estimação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso Artemis Rural . . . . .	50
5.21	Variação de velocidade nos percursos Artemis Motorway 130km/h e 150km/h [40] . . . . .	51
5.22	SOC e Erro da estimação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso Artemis Motorway 130 km/h . . . . .	51
5.23	SOC e Erro da estimação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso Artemis Motorway 150 km/h . . . . .	52
5.24	Variação de velocidade no percurso EPA UDDS [41] . . . . .	53
5.25	SOC e Erro da estimação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso EPA UDDS . . . . .	53
5.26	Variação de velocidade no percurso EPA Federal Test Procedure [41] . . . . .	54
5.27	SOC e Erro da estimação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso EPA FTP . . . . .	54
5.28	Variação de velocidade no percurso EPA Highway Fuel Economy Test [41] . . . . .	55
5.29	SOC e Erro da estimação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso EPA HWFET . . . . .	55
A.1	Placa de circuito impresso desenvolvida . . . . .	59
A.2	Circuito da placa de aquisição . . . . .	60
B.1	Comparação entre os algoritmos em C e Matlab . . . . .	61
B.2	Comparação entre os erros estimados do KF em C e Matlab . . . . .	62
B.3	Comparação entre os erros estimados do modelo em C e Matlab . . . . .	62
B.4	Comparação entre os erros de estimação do SOC em C e Matlab . . . . .	62
B.5	Comparação entre as estimações da tensão em C e Matlab . . . . .	63
C.1	Perfil de corrente na descarga a 1C de uma bateria de 11Ah . . . . .	65
C.2	Estimação do SOC na descarga a 1C de uma bateria de 11Ah . . . . .	66
C.3	Erro absoluto da estimação do SOC na descarga a 1C de uma bateria de 11Ah . . . . .	66
C.4	Variação da tensão na descarga a 1C de uma bateria de 11Ah . . . . .	67
C.5	Perfil de corrente na descarga a 1C de uma bateria de 10Ah . . . . .	67
C.6	Estimação do SOC na descarga a 1C de uma bateria de 10Ah . . . . .	68
C.7	Erro absoluto da estimação do SOC na descarga a 1C de uma bateria de 10Ah . . . . .	68
C.8	Variação da tensão na descarga a 1C de uma bateria de 10Ah . . . . .	69
D.1	Perfil de corrente de descarga segundo o percurso NEDC . . . . .	71
D.2	Estimação do SOC na descarga segundo o percurso NEDC . . . . .	72
D.3	Erro da estimação do SOC na descarga segundo o percurso NEDC . . . . .	72
D.4	Variação da tensão na descarga segundo o percurso NEDC . . . . .	73
D.5	Perfil de corrente de descarga segundo o percurso Artemis Urban . . . . .	73
D.6	Estimação do SOC na descarga segundo o percurso Artemis Urban . . . . .	74
D.7	Erro da estimação do SOC na descarga segundo o percurso Artemis Urban . . . . .	74
D.8	Variação da tensão na descarga segundo o percurso Artemis Urban . . . . .	75
D.9	Perfil de corrente de descarga segundo o percurso Artemis Rural . . . . .	75
D.10	Estimação do SOC na descarga segundo o percurso Artemis Rural . . . . .	76

D.11 Erro da estimação do SOC na descarga segundo o percurso Artemis Rural . . . . .	76
D.12 Variação da tensão na descarga segundo o percurso Artemis Rural . . . . .	77
D.13 Perfil de corrente de descarga segundo o percurso Artemis Motorway 130 km/h .	77
D.14 Estimação do SOC na descarga segundo o percurso Artemis Motorway 130 km/h	78
D.15 Erro da estimação do SOC na descarga segundo o percurso Artemis Motorway 130 km/h . . . . .	78
D.16 Variação da tensão na descarga segundo o percurso Artemis Motorway 130 km/h	79
D.17 Perfil de corrente de descarga segundo o percurso Artemis Motorway 150 km/h .	79
D.18 Estimação do SOC na descarga segundo o percurso Artemis Motorway 150 km/h	80
D.19 Erro da estimação do SOC na descarga segundo o percurso Artemis Motorway 150 km/h . . . . .	80
D.20 Variação da tensão na descarga segundo o percurso Artemis Motorway 150 km/h	81
D.21 Perfil de corrente de descarga segundo o percurso EPA FTP . . . . .	81
D.22 Estimação do SOC na descarga segundo o percurso EPA FTP . . . . .	82
D.23 Erro da estimação do SOC na descarga segundo o percurso EPA FTP . . . . .	82
D.24 Variação da tensão na descarga segundo o percurso EPA FTP . . . . .	83
D.25 Perfil de corrente de descarga segundo o percurso EPA HWFET . . . . .	83
D.26 Estimação do SOC na descarga segundo o percurso EPA HWFET . . . . .	84
D.27 Erro da estimação do SOC na descarga segundo o percurso EPA HWFET . . . . .	84
D.28 Variação da tensão na descarga segundo o percurso EPA HWFET . . . . .	85
D.29 Perfil de corrente de descarga segundo o percurso EPA Urban . . . . .	85
D.30 Estimação do SOC na descarga segundo o percurso EPA Urban . . . . .	86
D.31 Erro da estimação do SOC na descarga segundo o percurso EPA Urban . . . . .	86
D.32 Variação da tensão na descarga segundo o percurso EPA Urban . . . . .	87





# Lista de Tabelas

2.1	Características qualitativas dos tipos de baterias mais comuns . . . . .	9
2.2	Características quantitativas dos tipos de baterias mais comuns . . . . .	9
2.3	Erro da estimação do SOC segundo diferentes métodos de estimação [3] . . . . .	15
3.1	Correntes de descarga e tempos de referência ( <i>Dualfoil</i> ) e resultados da parametrização [1] . . . . .	27
3.2	Comparação entre os valores de referência do tempo de descarga e valores resultantes da aplicação do modelo de difusão, KiBaM, Peukert e modelo adotado, correntes de descarga contínuas [1] . . . . .	27
3.3	Coefficientes da função $V_{OC}$ . . . . .	28
3.4	Especificações da bateria utilizada nesta dissertação [1] . . . . .	29
3.5	Parâmetros $C_1$ e $C_2$ . . . . .	29
4.1	Inicializações do sistema . . . . .	35
5.1	Valores de referência do sensor LEM LA 55-P . . . . .	44
5.2	Características dos percursos Artemis [40] . . . . .	48
5.3	Comparação dos erros obtidos nos diferentes ciclos utilizados . . . . .	56



# Abreviaturas e Símbolos

ADC	Conversor analógico-digital ( <i>Analog to Digital Converter</i> )
BMS	Sistema de Gestão de Baterias ( <i>Battery Management System</i> )
CADC	Common Artemis Driving Cycles
DOD	Profundidade de descarga ( <i>Deep of Discharge</i> )
EKF	Filtro de Kalman Estendido ( <i>Extended Kalman Filter</i> )
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
FTP	<i>Federal Test Procedure</i>
GPS	Sistema de posicionamento global ( <i>Global Positioning System</i> )
HWFET	<i>Highway Fuel Economy Test</i>
KF	Filtro de Kalman ( <i>Kalman Filter</i> )
KiBaM	Modelo Cinético da Bateria ( <i>Kinetic Battery Model</i> )
Li-air	Lítio-Ar ( <i>Lithium-Air</i> )
Li-ion	Iões de Lítio ( <i>Lithium Ion</i> )
Li-poly	Polímero de iões de Lítio ( <i>Lithium-ion Polymer</i> )
Li-S	Enxofre-Lítio ( <i>Lithium-Sulphur</i> )
NEDC	<i>New European Driving Cycle</i>
Ni-Cd	Níquel Cádmio
Ni-MH	Hidretos Metálicos de Níquel
OCV	Tensão em circuito aberto ( <i>Open Circuit Voltage</i> )
SA	Arrefecimento Simulado ( <i>Simulated Annealing</i> )
SOC	Estado de Carga ( <i>State Of Charge</i> )
UDDS	<i>Urban Dynamometer Driving Schedule</i>
VEC	Veículo Elétrico de Competição



# Capítulo 1

## Introdução

Dada a necessidade de sermos cada vez mais independentes dos combustíveis fósseis devido a questões relacionadas com a sustentabilidade ambiental, a indústria automóvel começou a apostar de forma cada vez mais intensiva na utilização de motores elétricos nos automóveis. Desta forma, são utilizadas baterias para armazenar a energia elétrica e, por isso, a determinação do nível de carga das baterias é de extrema importância para gerir a autonomia do veículo e controlar o estado de saúde das mesmas.

De todos os tipos de veículos desenvolvidos, os veículos puramente elétricos são aqueles em que se deposita maior esperança no caminho para a independência dos combustíveis fósseis e, uma vez que não emitem gases poluentes, também diminuem a poluição atmosférica. Além disso, a eficiência energética dos veículos elétricos é superior à dos veículos que utilizam motores de combustão interna, necessitam de menos manutenção e, devido à redução dos componentes, têm melhor desempenho global [1]. Uma vez que estes veículos usam baterias como fonte de energia isso leva a um estudo e desenvolvimento constante de baterias com melhor desempenho, mais leves e mais pequenas. Mas, apesar de todo o estudo feito, é ainda necessária uma correta gestão da energia armazenada e da utilização da mesma para que a bateria funcione dentro dos intervalos de tensão e temperatura adequados. Desta forma é necessário um bom Sistema de Gestão de Baterias (BMS) capaz de garantir o cumprimento dos requisitos do veículo elétrico [2, 3].

Uma das mais importantes funções de um BMS é a estimação do Estado de Carga (SOC) [3], que é o alvo de estudo desta dissertação. Atualmente existem vários métodos para a gestão de baterias, nomeadamente recorrendo à utilização de métodos Coulomb Counting, redes neuronais e lógica difusa e Filtros de Kalman e suas derivações para sistemas não lineares, como a que vai ser estudada neste documento. O método de estimação com aplicação do KF é aquele que estima o SOC com menor erro [3].

Apesar da enorme necessidade de um bom e preciso sistema de gestão de baterias e da muita pesquisa feita em torno dos métodos de estimação, os produtores destes sistemas para veículos elétricos garantem apenas um erro relativo na ordem dos 15% apesar de existirem relatos de veículos que ficaram sem bateria quando o estimador assumia ter ainda 25% de carga restante [4]. Este facto, por si só, torna o tema desta dissertação motivante no sentido de tentar obter um sistema

melhor do que os existentes.

## 1.1 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é o desenvolvimento de um estimador do SOC de cada uma das células da bateria do VEC da FEUP.

Para isso é necessário realizar um conjunto de tarefas associadas, listadas de seguida:

- Estudo do estado da arte relativo a baterias, métodos de estimação do SOC e modelos de baterias;
- Modelização da bateria;
- Aplicação do algoritmo de estimação num micro-controlador;
- Desenvolvimento de rotinas e métodos de aquisição de tensão e corrente para o micro-controlador;
- Realização de testes práticos ao sistema em tempo real segundo diversos percursos;
- Validações dos testes e resultados.

Para isto pretende-se realizar um sistema de gestão de baterias baseado num Filtro de Kalman Estendido como estimador do estado de carga. Este estimador será posteriormente aplicado num micro-controlador da Infineon (XMC4500) que irá fazer as leituras das células da bateria em tempo real.

## 1.2 Estrutura do Documento

Este documento está dividido em seis capítulos. Neste é apresentado o tema e é feito um enquadramento do mesmo no panorama tecnológico atual.

Seguidamente, na Revisão Bibliográfica, é feita uma síntese dos conteúdos associados a esta dissertação e a este tema. São apresentados os conceitos básicos sobre baterias e o seu comportamento e será ainda feita uma introdução e comparação a vários métodos de estimação do estado de carga. Uma vez que alguns métodos de estimação recorrem a modelos de baterias, serão apresentados também vários tipos de modelos.

No terceiro capítulo é apresentado o modelo matemático referente à descarga da bateria a utilizar, o modelo elétrico da mesma e é feita a parametrização do modelo da bateria e apresentado o modelo elétrico modificado da bateria.

No quarto capítulo é feita uma introdução ao Filtro de Kalman (KF) e uma aplicação do mesmo num sistema linear por forma a demonstrar o seu comportamento. Dado que o sistema onde será aplicado o estimador desta dissertação não é linear, são utilizados métodos de linearização previamente à aplicação do filtro. Esta variante do KF denomina-se de Filtro de Kalman Estendido

(EKF). Assim sendo, é também feita uma apresentação teórica desta variante. Finalmente serão feitas as parametrizações necessárias à aplicação do filtro estimador.

No quinto capítulo são apresentados os resultados da aplicação do algoritmo desenvolvido no Matlab para ensaios práticos previamente realizados. Também é desenvolvido um estimador com recurso ao EKF em linguagem C cujos resultados são comparados com os obtidos no Matlab.

Para finalizar, o sexto capítulo é dedicado à conclusão e trabalhos futuros.





## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

É fundamental ter um conhecimento científico aprofundado e bem fundamentado com bibliografia fidedigna e atualizada. Essa revisão bibliográfica é feita neste capítulo.

Dado que o elemento central desta dissertação é a bateria, este capítulo inicia-se com a apresentação do seu princípio de funcionamento, conceitos básicos e de diferentes tipos de baterias. Seguidamente será introduzido o BMS e as suas funções associadas. Sendo o principal objetivo desta dissertação a estimação do estado de carga (SOC), serão apresentados finalmente métodos de estimação do SOC.

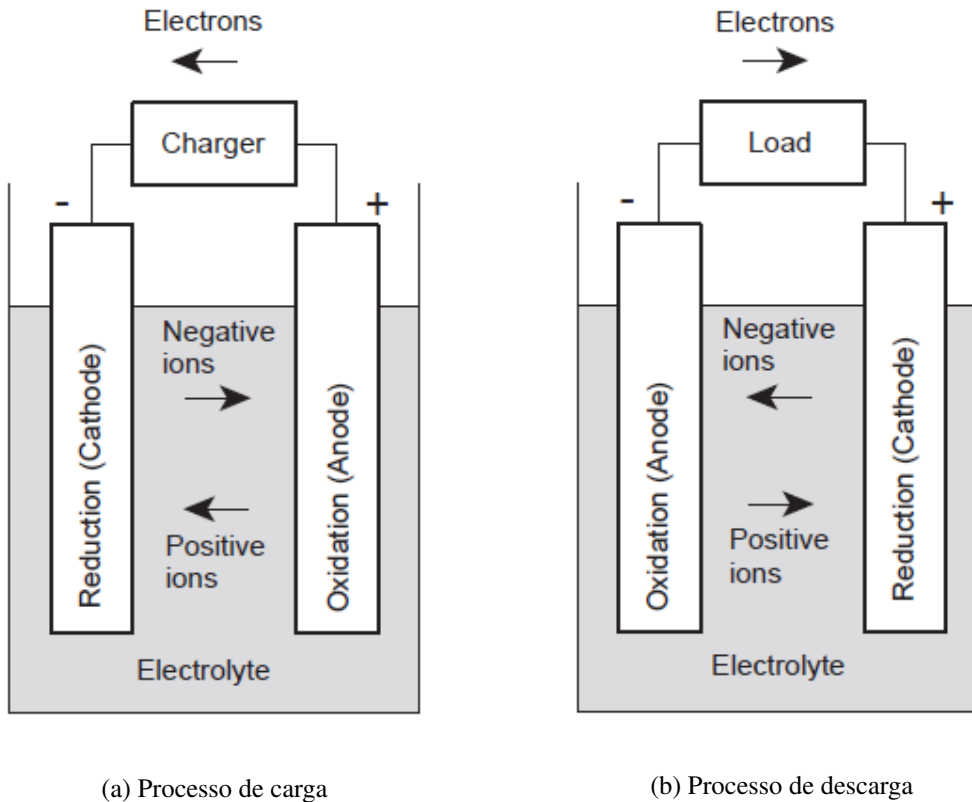
### 2.1 Baterias

Devido à massificação da utilização de dispositivos eletrónicos portáteis, urge o desenvolvimento tecnológico de fontes de alimentação móveis [2]. Desde os telemóveis, e os mais recentes *smartphones*, até aos veículos elétricos e híbridos sem esquecer os atuais relógios inteligentes, existe uma panóplia de dispositivos que exigem uma boa fonte de energia portátil. A par desta necessidade, é também imperativo existir uma forma de gerir, eficazmente, a energia das baterias. Assim sendo, é importante analisar o funcionamento das baterias e as opções existentes no mercado. Desta forma, nesta secção serão apresentados os tipos de bateria mais usuais, conceitos associados e princípio e condições de funcionamento das baterias recarregáveis.

#### 2.1.1 Princípio de Funcionamento

Qualquer bateria é composta por um eléctrodo negativo, outro eléctrodo positivo e um meio encarregue pela condução de iões entre ambos os eléctrodos. Este meio é denominado por eletrólito. Dependendo da tecnologia, algumas baterias podem ainda possuir um separador físico que divide as secções com diferentes polaridades, evitando assim curto-circuitos por contacto dos eléctrodos [5].

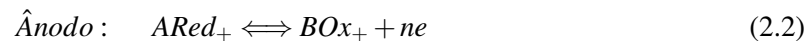
Durante a descarga, o eléctrodo negativo liberta iões para a carga e o eléctrodo positivo recebe iões dessa mesma carga, como está representado na Figura 2.1. Estas reações são denominadas oxidação e redução e podem ser representadas pelas equações 2.1 e 2.2 [6].



(a) Processo de carga

(b) Processo de descarga

Figura 2.1: Operação eletroquímica da bateria nos processos de carga e descarga [6]



Depois de estabelecida a ligação externa, a reação traduz-se na redução de elétrons perto do eletrodo negativo e é criado um gradiente de concentração diferente de zero no eletrólito. As espécies estão distribuídas no meio de forma uniforme, mas têm uma concentração menor do que no início. Durante o processo de carregamento da bateria ocorre o inverso do relatado [5, 6].

É importante esclarecer que, numa bateria, o termo ânodo se refere ao eletrodo em que ocorre a reação de oxidação [5], ou seja, o eletrodo fornece elétrons para uma carga externa. Durante a carga, o fluxo de elétrons é inverso ao fluxo durante a descarga. Ou seja, durante o carregamento o ânodo é o eletrodo positivo e durante o descarregamento o ânodo é o eletrodo negativo. Como, geralmente, o ânodo de uma célula é definido para uma descarga, associa-se este nome ao eletrodo negativo. Já o cátodo é o eletrodo onde ocorre uma reação de redução, ou seja, o eletrodo que recebe elétrons da carga externa. Comparativamente ao ânodo, durante a descarga o cátodo é o eletrodo positivo e durante a carga é o eletrodo negativo e, pelos mesmos motivos da associação do ânodo ao eletrodo negativo, o cátodo é vulgarmente associado ao eletrodo positivo.

### 2.1.2 Terminologia e conceitos básicos

Os conceitos mais gerais são os de célula, módulo e *pack* [6, 7], em que uma célula é definida como a unidade básica usada para gerar energia elétrica a partir de energia química armazenada no seu interior, módulo consiste na união de duas células eletricamente ligadas e o *pack* refere-se à união de dois ou mais módulos. A célula é formada por dois eletrodos colocados num meio denominado eletrólito, como foi já abordado na secção 2.1.1.

Serão agora explorados alguns conceitos relacionados com a capacidade e características técnicas da bateria.

- *Capacidade nominal* — carga total que pode ser obtida a partir de uma bateria completamente carregada em condições específicas de descarga, fornecidas pelo fabricante. Esta unidade é expressa em Ampere-hora (Ah) [6].
- *Capacidade disponível* — carga que, na prática, a bateria possui. É a carga que pode ser retirada à bateria em determinadas condições de carga e temperatura [5].
- *Tensão nominal* — valor de tensão esperado durante a descarga. É a tensão típica de funcionamento [5].
- *Tensão final de descarga (tensão de cut-off)* — tensão mínima que a bateria pode atingir sem ser danificada. Dependendo dos requisitos da aplicação, é, normalmente, a tensão acima da qual a maior parte da capacidade da bateria foi entregue [5].
- *Tensão em circuito aberto (OCV)* — tensão aos terminais da bateria quando esta está em vazio [5]. A estimação do estado de carga é feita recorrendo a esta tensão. Esta tensão é influenciada por efeitos de relaxamento e histerese.
- *Tensão em circuito fechado* — valor de tensão obtido quando a bateria se encontra em condições de carga [5].
- *Resistência interna* — resistência de valor diminuto, na ordem dos mili-ohms, característica de cada bateria e que limita a quantidade de energia a ser entregue num intervalo de tempo. Este valor é especificado pelo fabricante [5].
- *Densidade de energia* — densidade volumétrica de energia armazenada. A unidade é Watt-hora por litro (Wh/l) [5, 6].
- *Densidade de potência* — densidade volumétrica de potência, expressa em Watt por litro (W/l) [6]. É maior quando a bateria está completamente carregada.
- *Energia específica* — expressa em Watt-hora por quilograma (Wh/kg), define a densidade gravimétrica de armazenamento de energia [5, 6].
- *Potência específica* — densidade gravimétrica de potência. É expressa em Watt por quilograma (W/kg) [6].

- *Ciclo de vida* — número de ciclos de carga e descarga a que uma bateria ou célula pode ser exposta antes que a sua capacidade disponível atinja um valor inferior a 80% da capacidade nominal [6].
- *Auto-descarga* — fenómeno associado à perda de capacidade de uma bateria quando esta não está em carga devido às reações químicas que ocorrem constantemente. Este fenómeno ocorre devido a impurezas metálicas [8]. O fenómeno vem expresso em percentagem e representa a capacidade nominal perdida por mês a uma dada temperatura [6].
- *C-rate* — Padrão de medição da capacidade nominal em função de uma taxa de descarga [8]. Múltiplos superiores ou inferiores à *C-rate* representam correntes de descarga ou carga maiores ou menores. Para uma bateria de 600mAh o *C-rate* são 600mA. Se se descarregar a bateria a 2C significa que se descarrega a bateria com uma corrente de 1.2A e que a mesma fica completamente descarregada em meia hora. Por outro lado, descarregar a mesma a 0.5C significa que esta vai ser descarregada com uma corrente de 300mA e que será feita uma descarga completa em duas horas [6].
- *Efeito de recuperação* — em casos de descargas intermitentes, a bateria pode recuperar alguma capacidade nos instantes em que não está em carga. Assim, a capacidade aumenta e o tempo de vida é prolongado. Este efeito ocorrem em todas as baterias e depende do tipo de bateria [9].
- *Efeito de relaxamento* — O efeito de relaxamento regista-se quando a bateria em mantida em repouso depois de um processo de carga ou descarga. A bateria necessita de algum tempo para a tensão aos terminais estabilizar e atingir um novo valor de *steady state* [10].
- *Efeito de histerese* — Devido a este efeito, a tensão em circuito aberto da bateria também depende do histórico de cargas e descargas [10]. Quando se pretende medir esta tensão deve-se aguardar um determinado período de tempo depois de um processo de carga ou descarga para não comprometer os resultados.

### 2.1.3 Tipos de baterias

Existe uma grande variedade de baterias de diferentes tecnologias no mercado. Para uma avaliação das mesmas, deve ter-se em consideração o seguinte [5, 8]:

- densidade de energia;
- ciclo de vida;
- tensão em carga ou descarga;
- impacto ambiental;
- segurança;

- custo e oferta disponível.

Tendo em conta as características apresentadas anteriormente, foram elaboradas as Tabelas 2.1 e 2.2 com uma breve descrição dos tipos de baterias mais comuns [5, 6, 8, 11, 12]. Na Tabela 2.1 estão representadas as características qualitativas das baterias e na Tabela 2.2 é feita uma comparação quantitativa.

Tabela 2.1: Características qualitativas dos tipos de baterias mais comuns

Tipo de Bateria	Constituição	Aplicações
<i>Lead-Acid</i>	Eléttodos: Chumbo e óxido de Chumbo Eletrólito: Ácido sulfúrico	Podem ser usadas como SLI ( <i>automotive starting, lightning and ignition</i> ) e em alarmes, scooters, cadeiras de rodas elétricas, bicicletas elétricas e micro veículos híbridos.
<i>Nickel-Metal Hydride (NiMH)</i>	Eléttodos: Hidróxido de Níquel e mistura de vanádio, titânio, níquel, etc. Eletrólito: Solução alcalina	Usadas em computadores portáteis e veículos elétricos e veículos híbridos.
<i>Lithium-ion (Li-ion)</i>	Eléttodos: Lítio e grafite Eletrólito: Lítio dissolvido	Usadas em computadores portáteis, telemóveis, <i>tablets</i> , consolas de jogos portáteis e veículos híbridos e elétricos.
<i>Lithium-ion Polymer (LiPo/Li-poly/LIP)</i>	Eléttodos: Dióxido de Cobalto e Carbono Eletrólito: Polímero sólido	Usadas em PDAs, GPS, computadores portáteis, <i>tablets</i> e <i>media players</i>
<i>Nickel-cadmium (NiCd)</i>	Eléttodos: Hidróxido de Níquel e Hidróxido de Cádmio Eletrólito: Solução alcalina	São muitas vezes usadas em brinquedos devido à sua robustez

### 2.1.3.1 Outros tipos de baterias

Além das baterias comparados acima, continuam a ser investigados outros tipos de armazenamento eletroquímico de energia com maior densidade de energia para o uso em veículos elétricos.

Tabela 2.2: Características quantitativas dos tipos de baterias mais comuns

Características	Lead-Acid	NiMH	Li-ion	LiPo	NiCd
Tensão nominal (V)	2	1,2	3,7	3,7	1,2
OCV (V) (80% SOC)	2,1	1,4	4,1	4,1	1,35
Densidade de energia	baixa	elevada	muito elevada	muito elevada	média
Energia específica	baixa	baixa	elevada	elevada	elevada
Taxa de auto-descarga	baixa	elevada	baixa	baixa	elevada
Ciclo de vida	curto	longo	longo	longo	longo
Risco de sobreaquecimento	muito baixo	médio	elevado	médio	baixo
Custo	baixo	elevado	elevado	muito elevado	elevado
Reciclagem	possível	possível	possível	possível	possível
Elementos tóxicos	sim	não	sim	não	sim

Desses sistemas eletroquímicos fazem parte as baterias de Enxofre-Lítio (Li-S). Este tipo de baterias, ainda em investigação, tem maior densidade energética que as baterias de íons de Lítio, maior segurança, uma gama de temperaturas de funcionamento maior e um preço inferior, graças à abundância do enxofre. No entanto estas baterias sofrem de uma taxa de auto-descarga elevada e a capacidade nominal diminui rapidamente ao longo dos ciclos e devido a elevadas correntes de descarga [13].

A par das baterias Li-S, também têm sido estudadas baterias de Lítio-Ar (Li-air) com a premissa de serem a próxima geração de armazenamento de energia para dispositivos eletrônicos e veículos elétricos devido à densidade energética teoricamente muito elevada. No entanto, a performance de descarga destas baterias é pobre e exige ainda um maior desenvolvimento [14].

#### **2.1.4 Parâmetros que alteram as características da bateria**

O funcionamento de uma bateria é influenciado por vários fatores internos e externos. Por forma a entender como melhorar o seu funcionamento, é importante analisar e conhecer pormenorizadamente esses fatores e que efeitos causam na bateria.

##### **2.1.4.1 Temperatura**

As variações de temperatura têm uma influência significativa no desempenho da bateria, afetando a capacidade e a característica da tensão da mesma. É difícil de regular este parâmetro, pois as variações de temperatura têm sempre influência negativa no funcionamento da bateria. Por exemplo, em temperaturas ambiente inferiores a 25°C a atividade química na célula diminui e a resistência interna aumenta, diminuindo assim a capacidade de plena carga e aumentando a inclinação da curva de descarga. Por outro lado, em ambientes com temperaturas superiores a 25°C a resistência interna diminui e a capacidade aumenta, aumentando também a eficiência [9], mas pode levar a danos na bateria e existe um aumento do efeito de auto-descarga [5, 15]. Não esquecer também que a temperatura influencia a degradação da bateria [15].

##### **2.1.4.2 Sobrecarga e Sub-carga**

Outro fator a ter em conta quando se desenha um sistema de gestão de baterias está associado aos processos de carga e descarga de uma bateria. Estes processos devem ser sempre feitos de forma controlada tendo sempre em atenção os valores estipulados pelo fabricante. Carregar uma bateria acima do seu valor nominal resulta no aumento da tensão aos seus terminais e no aumento da atividade química no seu interior, o que leva a um aumento da temperatura e da pressão no interior da bateria que, no limite, poderá causar uma explosão [15]. Já no que toca ao descarregamento, se se descarregar excessivamente uma bateria o seu desempenho também será afetado e ser-lhe-ão infligidos danos. Danos esses que poderão ser permanentes devido ao aumento da temperatura e da velocidade de envelhecimento. A profundidade de carga (DOD) representa a quantidade de corrente retirada, numa hora, de uma bateria. Este valor é uma percentagem da capacidade nominal. Na Figura 2.2 está relacionada a DOD com o ciclo de vida de uma bateria.

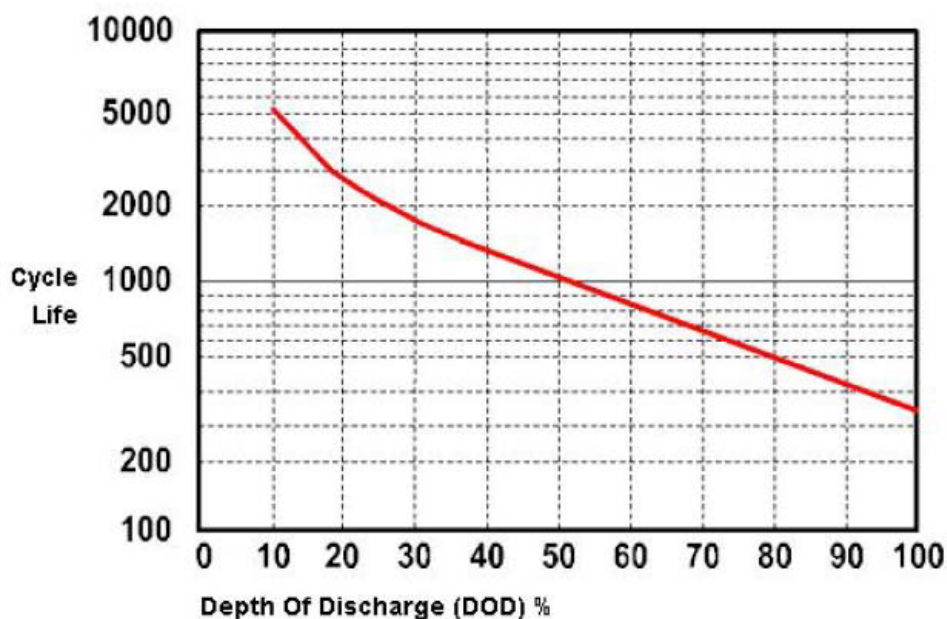


Figura 2.2: Exemplo da relação entre ciclo de vida e DOD[15]

Como é perceptível, quanto maior a descarga menor é o número de ciclos de vida. Assim, por exemplo, nos veículos elétricos híbridos, a DOD é normalmente mantida acima dos 40% [5, 15].

#### 2.1.4.3 Efeito da intensidade da corrente de carga e descarga

Aparentemente, a capacidade de uma bateria diminui com o aumento da taxa de descarga. Quando esta está completamente carregada, a superfície dos eletrodos contém uma quantidade máxima de espécies e quando é iniciada a descarga a corrente flui pela carga e as espécies são consumidas. Como o processo de difusão não pode ser mantido durante todo o processo, é criado um gradiente de concentração ao longo do eletrólito. A carga e o gradiente variam, não linearmente, de forma proporcional. Ou seja para maiores cargas maiores os gradientes de concentração e menores quantidades de espécies na superfície do eletrodo. A tensão de *cut-off* ocorre quando a quantidade de espécies ativas é inferior a um determinado limite, quando deixa de ser possível existir uma reação eletroquímica [9].

Quanto mais baixa a taxa de corrente mais próximo será o comportamento da bateria de uma fonte de energia ideal. O aumento das correntes de descarga pode provocar uma irregular distribuição das espécies pelo eletrodo e um aumento do stress entre as células da bateria, ideia semelhante à da fadiga mecânica [15]. Já durante o processo de carga, deve ter-se em atenção os mesmos aspetos pelos mesmos motivos já referidos [5, 11].

Nas Figuras 2.3 e 2.4 estão representados os efeitos da temperatura e da corrente de descarga na tensão e capacidade da bateria. Como é visível, com o aumento da corrente, a tensão da bateria diminui. Também é perceptível, na Figura 2.3, que com a diminuição da temperatura, aumenta a

velocidade a que a tensão diminui. Na Figura 2.4 percebe-se que a capacidade da bateria também desce com o aumento da corrente exigida e esse decréscimo é mais rápido a temperaturas mais baixas [5].

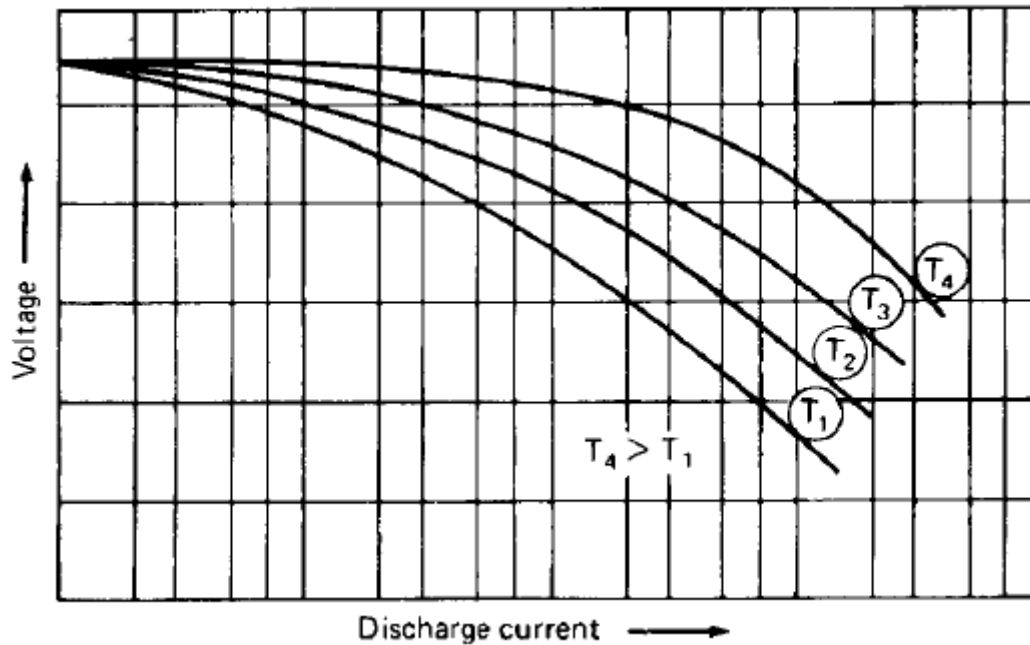


Figura 2.3: Relação entre a corrente de descarga e a tensão da bateria a diferentes temperaturas. A temperatura aumenta de T1 para T4, sendo T4 representativa das temperaturas normais [5]

#### 2.1.4.4 Envelhecimento

A cada ciclo de descarga uma bateria perde parte da sua carga. Como referido previamente, isto resulta da decomposição do eletrólito e da temperatura e condições de carga e descarga. Num estudo do comportamento das baterias, o envelhecimento deve ser tido em conta para conseguir prever o comportamento da mesma e tentar minimizar o fenómeno [9].

## 2.2 Métodos de estimação do SOC

Depois de analisados os tipos de baterias e os sistemas de gestão das mesmas, passa-se agora para o tema central desta dissertação: Estimação do Estado de Carga de uma bateria. O estado de carga de uma bateria é uma grandeza não mensurável. Não é possível ter acesso direto à quantidade de energia restante numa bateria, apenas à tensão nos seus terminais e à corrente que por ela está a passar. Para obter esse valor é necessário recorrer a métodos de estimação [16]. Podem ser seguidos vários métodos de estimação, sendo relatados de seguida os mais usuais [3].



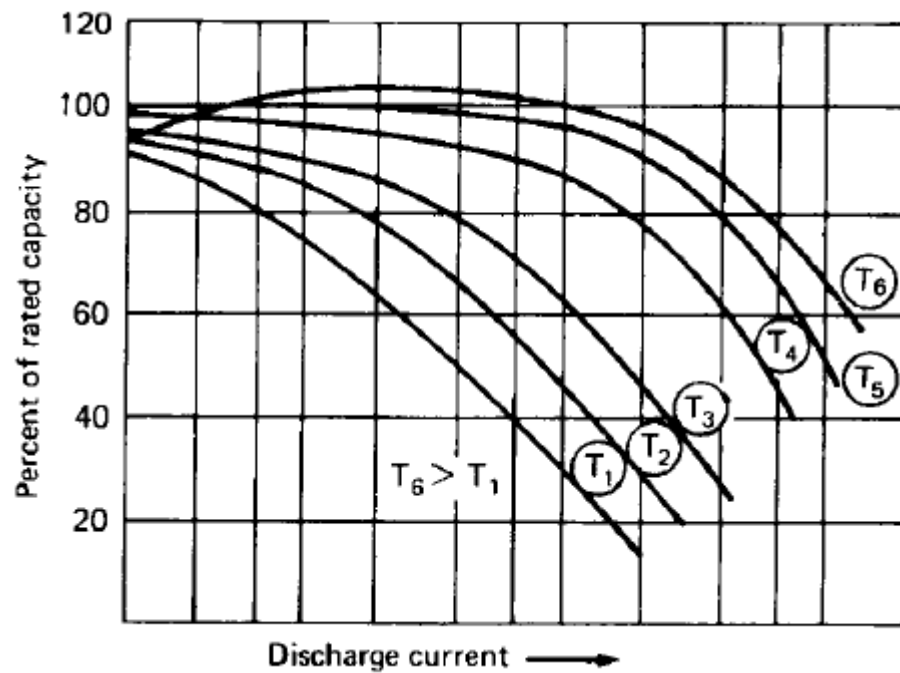


Figura 2.4: Relação entre a corrente de descarga e a capacidade da bateria a diferentes temperaturas. A temperatura aumenta de  $T_1$  para  $T_6$ , sendo  $T_4$  representativa das temperaturas normais [5]

### 2.2.1 Coloumb Counting

Este é o método mais utilizado atualmente em todo o tipo de aplicações de sistemas de gestão de baterias [3]. Telemóveis, computadores portáteis, *smartwatches* e equipamento médico, entre outros equipamentos portáteis que utilizam baterias, recorrem a este método que recorre à medição de energia que entra e que sai do sistema [4].

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{C_N} \int_{t_0}^t \eta I d\tau \quad (2.3)$$

A Equação 2.3 representa este método de estimação, em que  $SOC_0$  é o estado de carga inicial,  $C_N$  é a capacidade nominal da bateria,  $\eta$  a eficiência de Coulomb (que é considerada 1 na descarga e menor que 1 na carga) e  $I$  que assume valores negativos para a corrente de carga e positivos para a corrente de descarga.

Apesar de ser uma abordagem simples para um problema complexo, este método não tem em conta as perdas de energia nem o envelhecimento da bateria e a conseqüente perda de capacidade, daí ser recomendado efetuar regularmente uma calibração das baterias, e implica que se conheça o estado de carga inicial da bateria. Para corrigir o problema do desconhecimento do estado de carga inicial, algumas baterias guardam internamente o estado de carga para permitir a leitura do mesmo pelo aparelho portátil que a utiliza [17].

### 2.2.2 Filtro de Kalman

Este conceito foi estudado por Rudolf Emil Kálmán em 1958. Trata-se da combinação entre a ideia de aplicar uma variável de estado ao filtro de Wiener-Kolmogorov e a aplicação de conceitos de probabilidades e previsões. Este filtro aplica-se em sistemas lineares quando se pretende a estimação e previsão de estados [18, 19].

Dado que o modelo de descarga de uma bateria não segue uma distribuição linear, este filtro não é aplicável. No entanto existe a variante deste filtro para sistemas não lineares, Filtro de Kalman Estendido, que segue o mesmo princípio do Filtro de Kalman e implica a utilização de um modelo de baterias e de um observador de estados. Para a implementação do método, o sistema contínuo não linear é linearizado a cada iteração transformando-o num sistema linear variante no tempo. Depois disso assume-se o funcionamento normal do KF. Ou seja, primeiro prevêem-se os valores do próximo estado, saída e covariância. Depois esses valores são usados de forma a corrigir a estimação do presente estado, sabendo assim o erro da estimação [20, 18, 21].

### 2.2.3 Método da tensão em circuito aberto (OCV)

A aplicação deste método limita-se a fazer uma leitura da tensão aos terminais da bateria quando a mesma se encontra em circuito aberto. Apesar de ser uma forma fiável de seguir o estado de carga da bateria em repouso quando aplicado a par do modelo de descarga da bateria a analisar, o mesmo apresenta falhas quando é aplicado em tempo real numa bateria em utilização uma vez que não considera o efeito de recuperação da bateria. Implica que se deixe a bateria repousar durante várias horas para a mesma recuperar e estabilizar, impedindo assim a utilização deste sistema em tempo real [22].

### 2.2.4 Métodos baseados em lógica difusa e redes neuronais

Este tipo de estimação começa a ser implementado atualmente para a determinação das características das baterias. No entanto, apesar de poder ser aplicado sem o conhecimento detalhado do funcionamento da bateria, é necessário esse conhecimento para desenvolver o algoritmo complexo. Para aplicar este estimador é necessário conhecer detalhadamente o funcionamento da bateria, possuir uma grande quantidade de curvas teste e ainda uma grande capacidade computacional [3].

### 2.2.5 Outros métodos

Além dos acima relatados, existem ainda outros métodos de estimação do SOC com menos expressão. Estão, por exemplo, a ser desenvolvidos estudos em torno da estimação através da tensão aos terminais da bateria. Este modelo consiste no mapeamento da curva OCV em função do SOC. Os parâmetros são constantemente atualizados e é utilizado um observador do mapa para fazer a estimação [3].

Na Tabela 2.3 estão representados os erros de estimação utilizando vários métodos diferentes ou combinações de métodos. De notar que o erro apresentado diz respeito à implementação dos métodos em baterias de Li-ion. É possível verificar que os métodos que apresentam um erro menor são os métodos baseados em Filtros de Kalman.

Tabela 2.3: Erro da estimação do SOC segundo diferentes métodos de estimação [3]

<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Método de estimação do SOC</b>	<b>Erro do método</b>
V. Pop	2006	Método OCV	1,2% (máximo)
H. W. He	2012	Método baseado em modelo de baterias	4,327% (máximo)
E. H. Liao	2011	Modelo baseado em redes neuronais	<4% (máximo)
K. T. Chau	2004	Modelo baseado em redes neuronais e lógica <i>fuzzy</i>	<1% (média)
J. Wang	2007	Modelo baseado em lógica <i>fuzzy</i>	<10% (máximo)
M. Verbrugge	2004	Modelo baseado em algoritmos de <i>Weighted fusion</i>	<10% (máximo)
C. Y. Xia	2007	EKF	0,70%
P. Shi	2006	EKF	<4% (máximo)
Q. H. Mao	2010	<i>Unscented Kalman Filter</i>	<3,85 (máximo)
M. Charkhgard	2010	EKF baseado em redes neuronais	3% (média)
Il-Song Kim	2006	Modelo baseado num observador <i>sliding mode</i>	<3% (máximo)

## 2.3 Modelos de baterias

A modelização de baterias é uma parte de elevada importância do desenvolvimento de tecnologias de baterias e é vital nas aplicações das mesmas. A previsão e estimação da autonomia de veículos elétricos só é possível graças à aplicação de modelos de baterias e técnicas de estimação avançadas. Além da autonomia, um bom modelo de baterias é também essencial para o controlo seguro de cargas e descargas, utilização ótima das baterias, entre outros [13].

A escolha de um modelo de bateria condiciona o desempenho e a fiabilidade do estimador, assim como a qualidade das aproximações também é afetada pela calibração dos parâmetros do modelo [10].

De seguida serão apresentados alguns tipos de modelos e será feita uma avaliação a cada um.

### 2.3.1 Lei de Peukert

Tendo em conta apenas condições ideais, a tensão numa bateria mantém-se sempre constante até ao início de um processo de descarga e esse processo termina quando a bateria atinge uma tensão nula. Além disso, a capacidade ideal de uma bateria é igual em cada estado de carga [9].

Assim sendo, idealmente uma bateria com uma dada capacidade  $C$  a ser descarregada a uma corrente constante  $I$  deverá ter um tempo de vida  $L$  dado pela seguinte equação:

$$L = \frac{C}{I} \quad (2.4)$$

Este modelo não considera as não idealidades portanto só é passível de ser utilizado para baixas correntes de descarga. A Lei de *Peukert* representa um modelo simples e mais preciso daquele

mostrado acima, tendo em consideração a não linearidade entre o tempo de vida da bateria e da corrente de descarga. O tempo de vida  $L$  é então dado por:

$$L = \frac{a}{I^b} \quad (2.5)$$

Em que  $a$  representa um valor próximo da capacidade da bateria e  $b$  um número entre 1,2 e 1,7 [23, 24]. Trata-se de um modelo empírico, fácil de configurar e com bons resultados para implementações em que a corrente de descarga é constante [9].

### 2.3.2 Modelos analíticos

Os modelos analíticos são abordagens de alto nível que podem ser baseados em simulações de representações de baterias ou em expressões analíticas, baseadas em leis físicas, que descrevem a forma como os processos de carga e descarga afetam o desempenho da bateria.

Entre os vários modelos analíticos, podem destacar-se o Modelo Cinético (KiBaM), desenvolvido por Manwell e McGowan, e o Modelo da difusão, desenvolvido por Daler N. Rakhmatov e Sarma Vrudhula, que descrevem os efeitos não lineares da bateria por um sistema de equações diferenciais de derivadas parciais [9].

#### 2.3.2.1 Modelo Cinético da Bateria

Este modelo descreve os processos cinéticos que ocorrem na bateria. Na Figura 2.5 está representado o modelo. Nessa figura, um tanque representa a capacidade disponível para o utilizador,  $c * C$  e o outro tanque representa a capacidade restante,  $(1 - c) * C$ , em que  $C$  representa a capacidade total da bateria dividida pelos dois tanques.

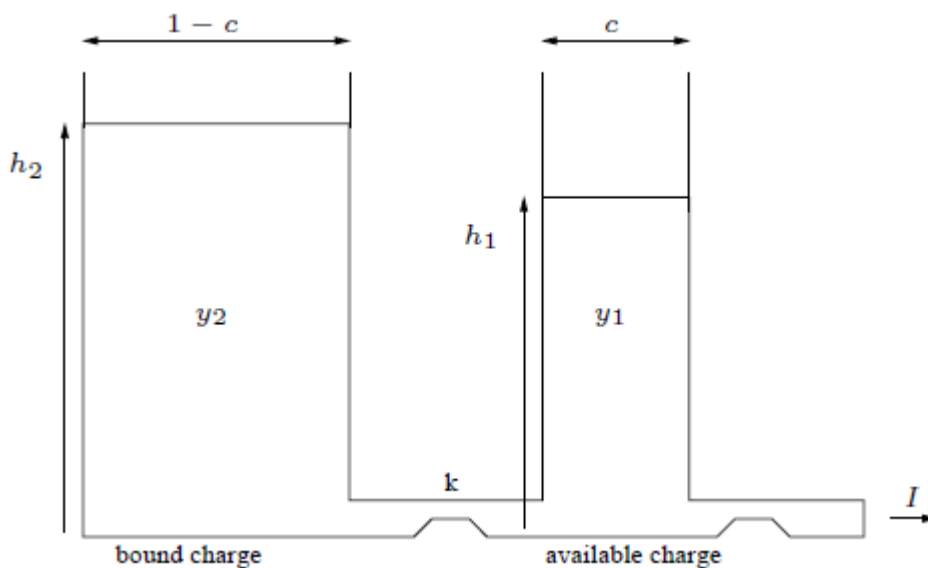


Figura 2.5: Representação do Modelo Cinético da Bateria [23]

A carga da bateria movimenta-se do tanque da carga restante para o tanque da carga disponível, através de uma válvula com condutância fixa  $K$ . O tanque da carga disponível alimenta o sistema com uma corrente  $i(t)$ . A taxa de transferência de carga de um tanque para o outro depende da diferença de alturas entre as cargas dos dois tanques. Estas alturas são definidas por  $h_2 = \frac{y_2}{1-c}$  e por  $h_1 = \frac{y_1}{c}$ , em que  $y_2$  e  $y_1$  traduzem a carga em cada tanque [23].

Esta aproximação é capaz de modelizar o efeito de recuperação de uma bateria. Durante um processo de descarga, a carga disponível diminui, aumentando assim a diferença de alturas entre os dois tanques. Assim que a descarga é interrompida, a carga movimenta-se de um tanque para o outro até que a diferença de alturas entre os dois tanques se anula. Desta forma, durante um período de inatividade a carga disponível é maior e a bateria aparenta ter recuperado capacidade.

Além do efeito de recuperação, este modelo também tem em conta o efeito de taxa de descarga, dado que quando é sujeito a uma corrente de descarga maior, a carga disponível vai ser gasta mais rapidamente, assim como o tempo durante o qual a carga se movimenta entre os dois tanques é mais reduzido. Desta forma, mais carga será inutilizada e a capacidade da bateria é reduzida [23, 9].

As seguintes equações diferenciais representam a evolução da carga nos tanques, linearizada em torno de um ponto de equilíbrio [23]:

$$\begin{cases} \frac{\partial y_1}{\partial t} = -i(t) + k(h_2 - h_1) \\ \frac{\partial y_2}{\partial t} = -k(h_2 - h_1) \end{cases} \quad (2.6)$$

Em que as condições iniciais são  $y_1(0) = c * C$  e  $y_2(0) = (1 - c) * C$ .

Assumindo uma descarga a corrente constante ( $i(t) = I$ ) e usando a transformada de Laplace as equações diferenciais 2.6 são resolvidas e obtém-se o seguinte resultado [23]:

$$\begin{cases} y_1(t) = y_{1,0}e^{-k't} + \frac{(y_0k'c-I)(1-e^{-k't})}{k'} - \frac{I(k't-1)+e^{-k't}}{k'} \\ y_2(t) = y_{2,0}e^{-k't} + y_0(1-c)(1-e^{-k't}) - \frac{I(1-c)(k't-1+e^{-k't})}{k'} \end{cases} \quad (2.7)$$

Em que  $k' = \frac{k}{c(1-c)}$  e  $y_{1,0}$  e  $y_{2,0}$  correspondem às cargas iniciais em cada um dos tanques, com  $y_0 = y_{1,0} + y_{2,0}$ . A partir deste resultado é possível saber o SOC em qualquer instante (note-se que tal é possível apenas para corrente de descarga fixa).

### 2.3.2.2 Modelo de difusão

O modelo de difusão descreve a evolução da concentração das espécies eletroativas no eletrólito da bateria, por forma a prever o tempo de vida de uma determinada bateria a uma dada carga. Este modelo assume que os dois elétrodos são idênticos, ou seja, a bateria é simétrica e tem igual comportamento na oxidação e redução. Assim sendo, apenas se tem em conta nas equações um dos elétrodos e metade da bateria [25].

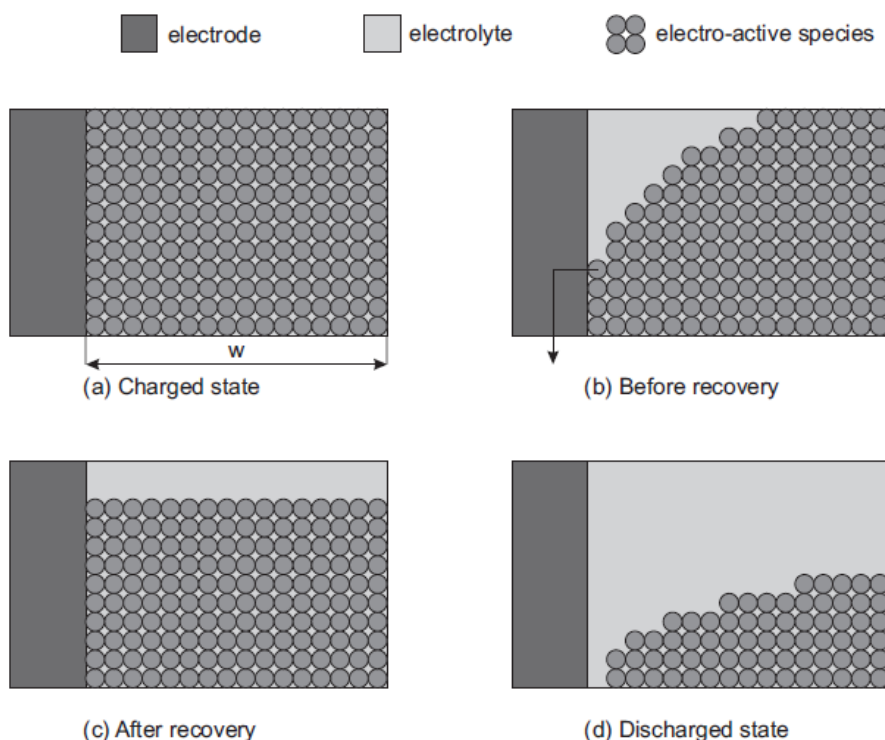


Figura 2.6: Representação de uma descarga segundo o Modelo de Rakhmatov e Vrudhula [23]

Na Figura 2.6 está representado o fenómeno da difusão. Pela análise da figura, inicialmente as espécies estão equitativamente distribuídas pela superfície do eléctrodo. Assim que é iniciada a descarga, a concentração de espécies diminui na superfície do eléctrodo. Devido a isso é criado um gradiente de concentração ao longo do eletrólito. Este gradiente causa, por sua vez, a difusão. Quando a descarga termina, a concentração das espécies junto dos eléctrodos aumenta (efeito de recuperação), homogeneizando assim a concentração à superfície. Uma vez que a bateria sofreu um processo de descarga, a concentração será mais baixa que ao início [23, 26].

Recorrendo às leis de Fick é possível descrever o fenómeno da difusão matematicamente. Assume-se a difusão unidirecional numa dada região,  $C(x,t)$  é a concentração de espécies ativas no eléctrodo no instante  $t$ , na posição  $x$ . Assim pode se escrever [25]:

$$\begin{cases} -J(x,t) = \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \\ \frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \end{cases} \quad (2.8)$$

Em que  $J(x,t)$  é o fluxo do material ativo no instante  $t$  na posição  $x$ . Segundo a Lei de Faraday, o fluxo em  $x = 0$ , posição inicial, é proporcional à corrente  $i(t)$  e o fluxo no final da região considerada,  $x = w$ , é zero. Encontradas as condições iniciais é possível aplicá-las e obter:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{i(t)}{vFA} \\ \left. \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \right|_{x=w} = 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

Sendo  $A$  a área à superfície do elétrodo,  $F = 96485,31 \text{Cmol}^{-1}$  (constante de Faraday) e  $v$  o número de elétrons envolvidos nas reações à superfície do elétrodo. Através da transformada de Laplace é possível encontrar uma solução geral, para corrente constante, para as equações 2.8 tendo em conta as condições em 2.9, obtendo a seguinte solução [25]:

$$\alpha = \int_0^L \frac{i(\tau)}{\sqrt{L-\tau}} d\tau + \sum_{m=1}^{\infty} \int_0^L \frac{i(\tau)}{\sqrt{L-\tau}} + e^{-\frac{\beta^2 m^2}{L-\tau}} d\tau \quad (2.10)$$

Em que  $\alpha = vFA\sqrt{\pi DC} * \phi(L)$ ,  $\beta = \frac{w}{\sqrt{D}}$ ,  $L$  o tempo de vida da bateria,  $m$  um número maior que 1 e  $D$  a constante de difusão [25]. A partir desta equação é possível obter a expressão para a perda de carga aparente da bateria [27]:

$$\sigma(t) = \int_0^t i(\tau) d\tau + \int_0^t i(\tau) (2 * \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\beta^2 m^2 * (t-\tau)}) d\tau \quad (2.11)$$

Sendo  $\beta = \frac{pi*\sqrt{D}}{w}$ . O primeiro termo da expressão acima representa a carga real que a bateria perdeu até ao instante  $t$  e o segundo termo é positivo e diz respeito à carga não disponível (carga remanescente na bateria que não é usada). Quando  $\sigma(t)$  for igual à capacidade da bateria assume-se que a mesma está descarregada.

Apesar das vantagens apresentadas anteriormente, este modelo não tem em conta o efeito da temperatura nem o envelhecimento da bateria. Ao invés dos modelos estocásticos, este modelo é computacionalmente mais exigente mas necessita de menos parâmetros de configuração [28]. A partir deste modelo é também possível obter um modelo elétrico [26] que será apresentado de seguida.

### 2.3.3 Modelos elétricos

Para utilização em simulações, estes são os modelos mais intuitivos, dado que o número de parâmetros necessário é relativamente reduzido. Em comparação com os outros modelos, os modelos elétricos são os que melhor modelizam as características tensão-corrente. Assim sendo, tem sido desenvolvida uma grande quantidade de modelos elétricos ou circuitos equivalentes de baterias [29].

Nestes modelos são utilizadas resistências, condensadores e fontes de tensão e corrente. Tipicamente, a tensão em circuito aberto (OCV) é representada por um condensador de elevada capacidade ou uma fonte de tensão ideal. O resto do circuito representa a resistência interna da bateria e os efeitos de relaxamento com a tensão terminal dinâmica [28, 10].

O modelo equivalente de Thevenin, representado na Figura 2.5, é um dos modelos mais utilizados. Este modelo admite que a tensão em circuito aberto é constante e calcula a resposta para

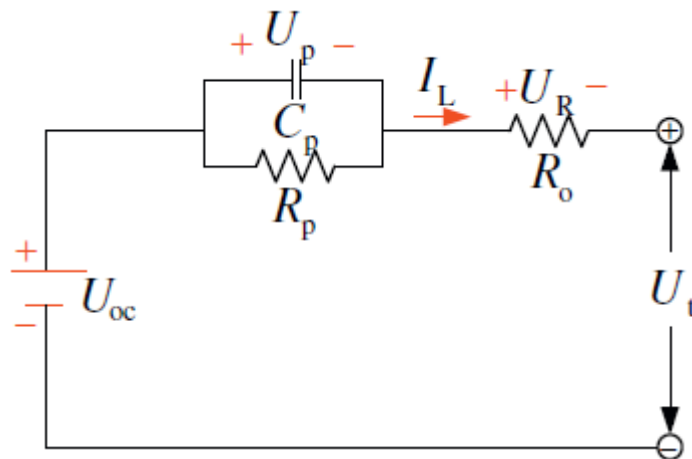


Figura 2.7: Representação do modelo equivalente de Thevenin da bateria [28]

cargas transitórias com recurso a uma série de resistências com a combinação de uma resistência e um condensador em paralelo. A fonte de tensão modeliza o efeito de histerese e o efeito de relaxamento é modelizado pelo paralelo da resistência e o condensador.

A precisão deste sistema é tanto maior quanto maior for o número de paralelos RC. No entanto, o aumento do número destes paralelos também aumenta a complexidade do circuito e, consequentemente, a exigência computacional. Apesar de usada com muita frequência, esta aproximação não modeliza nem o estado de carga nem as temperaturas variáveis da bateria, por isso este modelo é combinado com outros circuitos elétricos para obter melhores resultados [10, 29].

#### 2.3.4 Outros modelos

Além dos modelos acima apresentados, existem outros que não foram abordados neste documento, como é o exemplo dos modelos eletroquímicos e dos modelos estocásticos.

Os modelos eletroquímicos descrevem detalhadamente o comportamento da bateria, sendo, desta forma, muito precisos [23]. O exemplo mais comum destes modelos é o modelo de Marc Doyle, Thomas F. Fuller e John Newman que descreve a carga e descarga de uma bateria de Lítio para um único ciclo. Para a implementação deste modelo recorre-se a informação teórica complexa para desenvolver equações diferenciais para a obtenção dos valores de potencial em função do tempo. Isto leva a uma elevada exigência computacional e a uma elevada complexidade na afinação dos parâmetros. Este modelo é usado geralmente apenas como base de comparação para a obtenção do erro de outros modelos [9, 23].

Já os modelos estocásticos descrevem as baterias com um maior nível de abstração, descrevendo a descarga e o efeito de recuperação como processos estocásticos, ou seja, com origem em eventos aleatórios. Um exemplo deste tipo de modelos é o modelo desenvolvido por Carla-Fabiana Chiasserini e Ramesh R. Rao em que a bateria é descrita como uma cadeia de *Markov* discreta no



tempo, com  $N+1$  estados (de 0 a  $N$ ) em que  $N$  representa o número de unidades de carga disponíveis em uso contínuo. A cada instante, uma unidade de carga é consumida com a probabilidade  $a_1 = q$  ou é recuperada com a probabilidade  $a_0 = 1 - q$ . Atingido o estado 0, quando um número  $X$  de unidades de carga forem consumidas, a bateria encontra-se descarregada.  $X$  é a capacidade teórica da bateria [23].

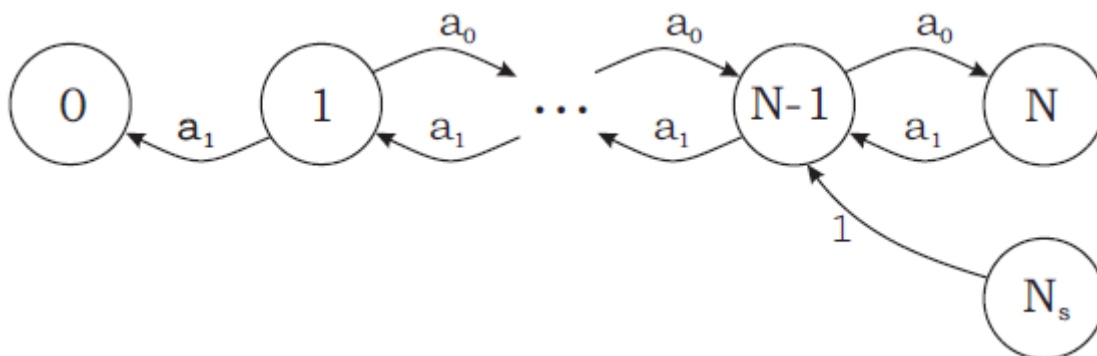


Figura 2.8: Cadeia de Markov [23]

Uma vez que o modelo acima não tem em conta a variação da fração de recuperação durante o processo de descarga e de a corrente poder variar ao longo do tempo, foram desenvolvidos melhoramentos ao modelo mantendo na base a cadeia de *Markov*. Com estes melhoramentos são obtidos, em comparação com o modelo eletroquímico, desvios máximos de 4% e desvios médios de 1%. Apesar de darem uma boa descrição qualitativa do comportamento da bateria a cargas pulsadas, nada se pode afirmar relativamente ao seu comportamento quantitativo [9, 23].

## 2.4 Conclusões

Neste capítulo foi exposta toda a pesquisa realizada por forma a obter a informação necessária ao cumprimento dos objetivos desta dissertação. É então agora possível definir a abordagem a adotar.

A primeira decisão a tomar prende-se com o tipo de baterias a utilizar. Devido à sua densidade de energia, baixa taxa de auto-descarga e longos ciclos de vida, serão utilizadas baterias de polímeros de iões Lítio (Li-poly). Dado que o sistema de estimação do SOC será implementado em tempo real, o mesmo não pode ser muito exigente computacionalmente. Assim sendo, optou-se por um método baseado em Filtro de *Kalman* para sistemas não lineares. Além de não ser muito exigente, este estimador também conduz a estimações com erro muito reduzido de acordo com o estudo efetuado. Uma vez que a utilização de um estimador baseado num Filtro de *Kalman* exige a utilização de um modelo de bateria, vai ser utilizado também um modelo elétrico. No capítulo seguinte vai ser exposto todo o modelo assim como a parametrização e otimização do mesmo.



## Capítulo 3

# Modelo

Tal como referido anteriormente, para uma boa estimativa do SOC de uma bateria é necessário ter um bom modelo da bateria. Este modelo deve ser simples o suficiente para permitir uma implementação em tempo real, mas também deve ser capaz de modelizar muito aproximadamente o comportamento da bateria.

Neste capítulo será feita uma introdução ao modelo a usar, serão apresentados os testes realizados e os resultados obtidos.

### 3.1 Bateria de polímeros de íões de Lítio

Este tipo de bateria foi o escolhido para a aplicação no projeto alvo desta dissertação. É composto por um eletrodo negativo de carbono cristalizado, um eletrodo positivo de lítio e um eletrólito sólido constituído por  $LiPF_6$  e solventes orgânicos [12].

Devido ao facto da existência de um eletrólito sólido ao invés de um líquido, estas baterias têm uma densidade de energia maior. Funcionam numa gama de temperaturas na ordem dos  $0^{\circ}C$  e dos  $45^{\circ}C$  durante o carregamento, e entre os  $-20^{\circ}C$  e os  $65^{\circ}C$  em descarga. As tensões de funcionamento, geralmente, variam entre os 2.5V e os 4.2V. Comparativamente a uma bateria de Níquel (NiCd e NiMH), as baterias de polímeros de íões Lítio têm uma tensão de funcionamento três vezes superior, o que implica um menor *foot print* para o mesmo valor de tensão pretendida na aplicação e um menor custo em equipamento de controlo e proteção [5].

Como referido previamente, um dos cuidados a ter com as baterias prende-se com a proteção contra sobre-cargas e subcargas. Este tipo de baterias não tem qualquer proteção contra estes efeitos, portanto é necessário ter um controlo preciso associado às mesmas para evitar danos nas baterias e no próprio utilizador.

### 3.2 Exposição do modelo

O modelo de uma bateria representa o seu comportamento em diversas condições de utilização com recurso a um sistema de equações diferenciais. Durante um processo de descarga, os eletrões

fluem entre os elétrodos para permitirem a passagem de corrente para a carga. Se, depois de uma descarga, a bateria for deixada a repousar durante um dado período de tempo, a carga da bateria reorganiza-se para se obter uma distribuição uniforme.

Nas equações 3.1 está representado o modelo de uma bateria tendo em conta o efeito de recuperação e o efeito de relaxamento, já abordados no Capítulo 2.1.2. Este modelo segue as equações de Fick, em que a primeira representa o fluxo eletro-activo e a segunda a aplicação da lei da conservação de espécies [23].

$$\begin{cases} -J(x,t) = \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \\ \frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \end{cases} \quad (3.1)$$

Sabendo que uma bateria é simétrica, podemos apenas considerar metade da mesma. Com o recurso à lei de Faraday, sabemos que à superfície,  $x = 0$ , a concentração será proporcional à corrente que sai da bateria. No outro extremo,  $x = w$ , o fluxo é nulo. Consideradas estas condições de fronteira, o resultado são as seguintes equações [23]:

$$\begin{cases} D \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{i(t)}{vFA}, \\ D \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=w} = 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

Em que  $A$  é a área da superfície do elétrodo,  $F$  é a constante de Faraday e  $v$  é o número de eletrões envolvidos na reação na superfície do elétrodo.

Admitindo  $x' = \frac{x}{w}$  e dado que o sistema está escrito em função da concentração de espécies, podemos transformar essas concentrações em cargas ( $h$ ). Considera-se  $h(x' + t) = C(x', t)vFA$  e obtém-se o sistema 3.3. Aplicando as condições fronteiras obtém-se o sistema de equações 3.4 [1].

$$\begin{cases} -J(x,t)vFA = \frac{D}{w} \frac{\partial h(x',t)}{\partial x'} \\ \frac{D}{w} \frac{\partial h(x',t)}{\partial t} = \frac{D}{w^2} \frac{\partial^2 h(x',t)}{\partial x'^2} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\begin{cases} \frac{D}{w} \frac{\partial h(x',t)}{\partial x'} \Big|_{x'=0} = i(t), \\ \frac{D}{w} \frac{\partial h(x',t)}{\partial x'} \Big|_{x'=1} = 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Através da divisão do eletrólito em  $n$  partes, discretiza-se o modelo. Cada divisão tem um comprimento de  $\alpha = \frac{1}{n}$  e a carga em cada divisão é definida como  $h_i$ . Pelo método das diferenças

finitas é possível obter a equação 3.5 [30, 1]

$$\frac{\partial^2 Q(x,t)}{\partial x^2} = \frac{Q(x+\alpha,t) - 2Q(x,t) + Q(x-\alpha,t)}{\alpha^2} \quad (3.5)$$

Esta equação pode ser expressa no formato de espaço de estados presente em 3.6 [30].

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial Q_1(t)}{\partial t} = \frac{1}{\alpha} \left[ \frac{D}{\alpha L^2} (Q_2(t) - Q_1(t)) - i(t) \right] \\ \frac{\partial Q_2(t)}{\partial t} = \frac{1}{\alpha} \left[ \frac{D}{\alpha L^2} (Q_3(t) - Q_2(t)) - (Q_2(t) - Q_1(t)) \right] \\ \dots \\ \frac{\partial Q_{n-1}(t)}{\partial t} = \frac{1}{\alpha} \left[ \frac{D}{\alpha L^2} ((Q_n(t) - Q_{n-1}(t)) - (Q_{n-1}(t) - Q_{n-2}(t))) \right] \\ \frac{\partial Q_n(t)}{\partial t} = \frac{1}{\alpha} \left[ \frac{D}{\alpha L^2} (-(Q_n(t) - Q_{n-1}(t))) \right] \end{array} \right. \quad (3.6)$$

Analisando este sistema de equações pelas diferenças finitas, é possível fazer uma analogia elétrica [26, 30]. Relacionando a carga a uma tensão,  $V_n(t) = h_n(t)$ , e fazendo a substituição  $\frac{D}{\alpha^2 w^2} = \frac{1}{RC}$  obtemos o seguinte sistema de equações 3.7 que dará origem ao conjunto de malhas RC presente na Figura 3.1. Este conjunto infinito de malhas RC modeliza eletricamente uma bateria [1].

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \frac{\partial V_1(t)}{\partial t} + \frac{V_1(t) - V_2(t)}{R_{12}} + i(t) = 0 \\ C_2 \frac{\partial V_2(t)}{\partial t} + \frac{V_2(t) - V_1(t)}{R_{12}} + \frac{V_2(t) - V_3(t)}{R_{23}} \\ C_3 \frac{\partial V_3(t)}{\partial t} + \frac{V_3(t) - V_2(t)}{R_{23}} + \frac{V_3(t) - V_4(t)}{R_{34}} \\ \dots \\ C_{n-1} \frac{\partial V_{n-1}(t)}{\partial t} + \frac{V_{n-1}(t) - V_{n-2}(t)}{R_{n-1n-2}} + \frac{V_{n-1}(t) - V_n(t)}{R_{n-1n}} = 0 \end{array} \right. \quad (3.7)$$

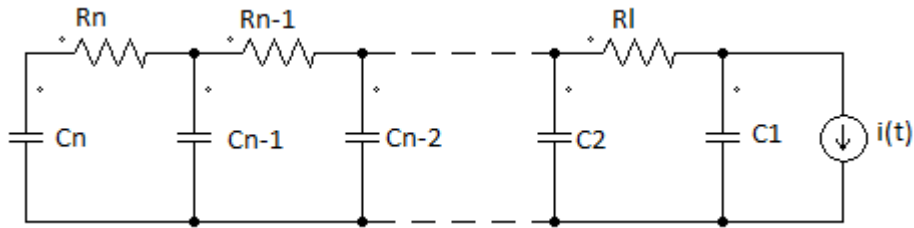


Figura 3.1: Modelo elétrico de uma bateria num conjunto de n malhas RC[1]

### 3.2.1 Simplificação do modelo

Como o modelo discutido anteriormente não é implementável nem praticável matematica e computacionalmente, fez-se uma otimização do algoritmo [30]. Esta otimização simplifica o circuito de n malhas, passando a um circuito com uma malha RC. Este circuito está representado

na Figura 3.2 e as equações dos nós presentes no sistema de equações 3.8. De notar que  $C_1$  e  $C_2$  correspondem à capacidade da bateria, sendo a soma dos mesmos igual a 1.

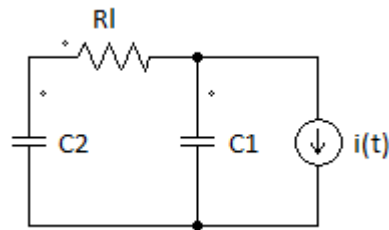


Figura 3.2: Modelo simplificado de uma bateria numa malha RC [1]

$$\begin{cases} C_1 \frac{\partial V_1}{\partial t} = \frac{1}{R_I} (V_2 - V_1) - i(t) \\ C_2 \frac{\partial V_2}{\partial t} = -\frac{1}{R_I} (V_2 - V_1) \end{cases} \quad (3.8)$$

O SOC é obtido a partir da tensão  $V_1$  representada na Figura 3.2 [1], no entanto a tensão aos terminais da bateria não é lida nesse ponto. Na Figura 3.3 está o circuito completo do modelo elétrico da bateria, em que se sabe que a tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) é uma função do SOC e  $R_S$  representa a resistência interna da bateria.

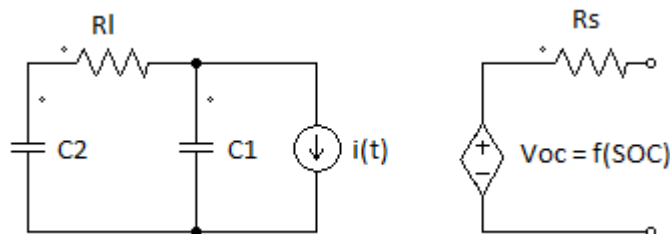


Figura 3.3: Modelo de uma bateria numa malha RC [1]

### 3.3 Parametrização

Para a implementação do modelo anteriormente desenvolvido, é necessário proceder ao estudo e determinação dos parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $R_I$ . Para comprovação do funcionamento do modelo anteriormente desenvolvido, foi reproduzido um teste referente a uma bateria de 0.585Ah. Os parâmetros para o teste foram obtidos a partir da heurística de arrefecimento simulado (SA) e foram utilizadas também referências do software *Dualfoil* [1, 23, 31].

Este teste foi feito submetendo a bateria a várias correntes de descarga, tendo sido essas correntes divididas em 3 patamares: Altas, Médias e Baixas. Os parâmetros foram calculados para cada um desses patamares [1].

Tabela 3.1: Correntes de descarga e tempos de referência (*Dualfoil*) e resultados da parametrização [1]

Corrente de teste (mA)	<i>Dualfoil</i> (min)	Resultados da parametrização		
		$C_1$ (F)	$C_2$ (F)	$R_l$ ( $\Omega$ )
	3	1228,5		
Baixas	108,3	317,2	0,102	0,898
	204,5	156		
	222,7	140,9		
Médias	265,6	113,1	0,103	0,897
	300	96		
	425,6	54,6		
Altas	497,7	41,3	0,101	0,899
	628	26		

Na Tabela 3.1 estão presentes os valores de correntes, os valores obtidos no *Dualfoil* e os parâmetros calculados.

De seguida o modelo de bateria adotado foi comparado com os modelos de baterias KiBaM, de Peukert, e de Difusão, tomando como base os tempos obtidos no *Dualfoil*. Os resultados temporais e os erros associados estão presentes na Tabela 3.2 [1].

Como é verificável, o modelo adotado conduz a resultados semelhantes aos obtidos no *Dualfoil*, sendo até melhores do que todos os outros modelos.

Como referido previamente, a tensão  $V_{OC}$  é uma função do SOC (tensão  $V_1$  no modelo). Esta tensão pode ser estimada com recurso a um dos seguintes modelos [18]:

- **Modelo de Shepherd**  $V_{out} = E_0 - R_s * i_k - \frac{k}{SOC}$ ,  $V_{OC} = E_0 - \frac{k}{SOC}$
- **Modelo Universal Unnewehr**  $V_{out} = E_0 - R_s * i_k - k * SOC$ ,  $V_{OC} = E_0 - k * SOC$
- **Modelo de Nernst**  $V_{out} = E_0 - R_s * i_k + k_2 * \ln(SOC) + k_3 * \ln(1 - SOC)$ ,  $V_{OC} = E_0 + k_2 * \ln(SOC) + k_3 * \ln(1 - SOC)$

Tabela 3.2: Comparação entre os valores de referência do tempo de descarga e valores resultantes da aplicação do modelo de difusão, KiBaM, Peukert e modelo adotado, correntes de descarga contínuas [1]

Corrente de teste (mA)	<i>Dualfoil</i> (min)	Difusão		KiBaM		Peukert		Modelo Adotado		
		TD (min)	ER (%)	TD (min)	ER (%)	TD (min)	ER (%)	TD (min)	ER (%)	
	3	1228.5	13417	9.21	13417	9.21	12288	0.02	11685	4.88
Baixas	108.3	317.2	331.4	4.48	331.4	4.48	321.3	1.29	308.5	2.74
	204.5	156.0	156.0	0	156.0	0	156.0	0	156.0	0
	222.7	140.9	139.9	0.71	139.9	0.71	139.9	9.65	138.55	1.67
Médias	265.6	113.1	110.6	2.21	110.6	2.21	110.6	14.14	113.04	0.053
	300	96.0	93.2	2.91	93.1	3.02	93.1	18.85	97.93	2.01
	425.6	54.6	53.9	1.28	53.5	2.01	53.5	46.52	52.83	3.24
Altas	497.7	41.3	41.4	0.24	40.5	1.94	40.5	66.10	41.3	0
	628.0	26	26.6	2.31	24.9	4.23	24.9	107.30	26.25	0.96
Erro médio relativo (%)			2.59		3.09		29.32		1.73	
Erro máximo			9.21		9.21		107.30		4.88	

Em que  $V_{out}$  é a tensão de saída,  $R_s$  é a resistência de série e  $E_0$ ,  $k$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  são constantes para ajustar o modelo ao valor real da tensão de saída.

Dado que nenhum destes modelos permitiu obter resultados satisfatórios, foi desenvolvida a função 3.9 [1].

$$V_{OC}(V_1 * k) = a * (\exp^{1-b*V_1*k}) + c * (V_1 * k)^3 + d * (V_1 * k)^2 + e * (V_1 * k) + f \quad (3.9)$$

É possível ver uma representação desta aproximação na Figura 3.4 adotados os coeficientes presentes na Tabela 3.3, obtidos a partir do método dos mínimos quadrados do Matlab [1].

Tabela 3.3: Coeficientes da função  $V_{OC}$

Coeficientes
a = -0.2402
b = 0.4438
c = $5.358 * 10^{-7}$
d = $-3.349 * 10^{-5}$
e = 0.003508
f = 3.653

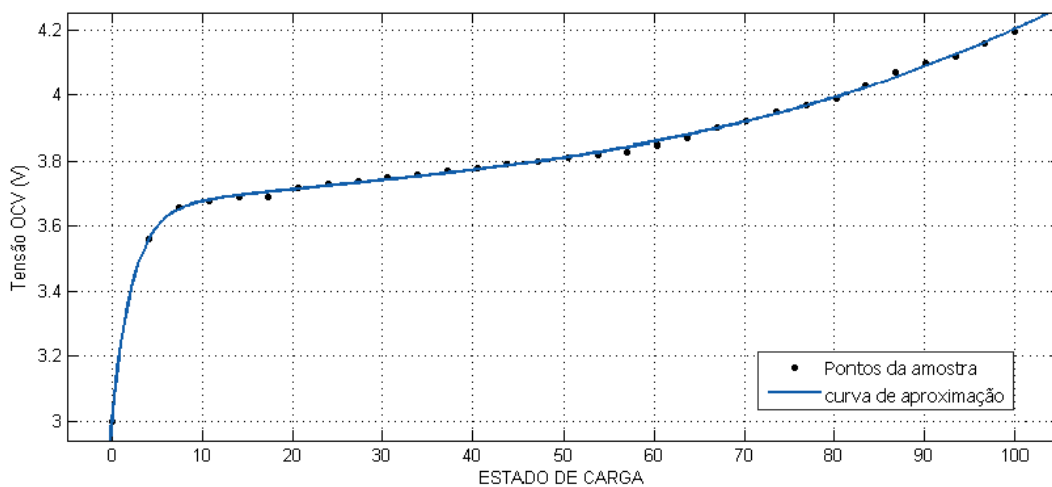


Figura 3.4: Valores amostrados e curva resultante da aproximação da função  $V_{OC}$  [1]

### 3.3.1 Otimização do modelo

Comprovado o funcionamento do modelo desenvolvido, partiu-se para a parametrização da bateria que será alvo de teste nesta dissertação. Trata-se de uma bateria de 11Ah, cujas especificações estão presentes na Tabela 3.4.

Depois de conhecidas as especificações da bateria, foram fixados os parâmetros  $C_1$  e  $C_2$  com os valores presentes na tabela 3.5.



Tabela 3.4: Especificações da bateria utilizada nesta dissertação [1]

Parâmetro	Valor nominal	Observações
Modelo	10059156SH5	
Capacidade típica Capacidade mínima	11000mAh 10500mAh	Descarga a 1C, tensão de <i>cut-off</i> 3V
Tensão nominal	3.7V	Tensão média, descarga a 1C
Condições de carga ( <i>standard</i> )	1C(11000mA), 4.2V(CC.Cv), 50mA	O tempo total de carregamento vai ser inferior a 2.5h
Máxima corrente de carga	1C(11000mA)	
Máxima tensão de carga	4.2V	
Máxima corrente de descarga	5C(55000mA)	Com corrente contínua
Tensão de <i>cut-off</i>	3V	
Gama de temperaturas na carga Gama de temperaturas na descarga	0 a 45°C -20 a 60°C	Com um máximo de 90% de humidade relativa

Tabela 3.5: Parâmetros  $C_1$  e  $C_2$ 

Capacidades
$C_1 = 0.2017$ F
$C_2 = 0.7983$ F

De facto, analisando a Tabela 3.1 percebe-se que os valores de  $C_1$  e  $C_2$  se mantêm quase constantes, sendo a única variação o valor de  $R_l$ . Depois de analisados todos os resultados chegou-se à conclusão que se poderiam melhorar os resultados, representados na Tabela 3.2, utilizando uma resistência variável continuamente com a corrente em vez de utilizar 3 resistências diferentes para 3 níveis de correntes distintos [1]. Assim sendo, aplicou-se o modelo presente na Figura 3.5.

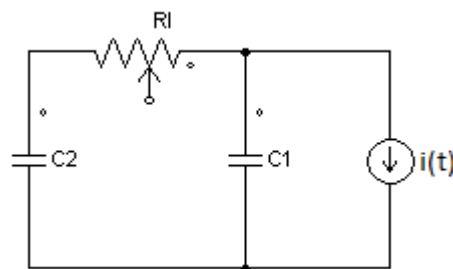


Figura 3.5: Modelo de uma bateria numa malha RC com resistência variável

Para a determinação da resistência de ligação,  $R_l$ , foi desenvolvida uma nova expressão para a mesma, pelo método dos mínimos quadrados do Matlab. Esta expressão polinomial ajusta o valor da resistência em função da corrente que é exigida à bateria em cada instante e está representada em 3.10 e ilustrada graficamente na Figura 3.6 [1].

$$R_l = -0.0341i^3 + 3.419i^2 - 93.9i + 700 \quad (3.10)$$

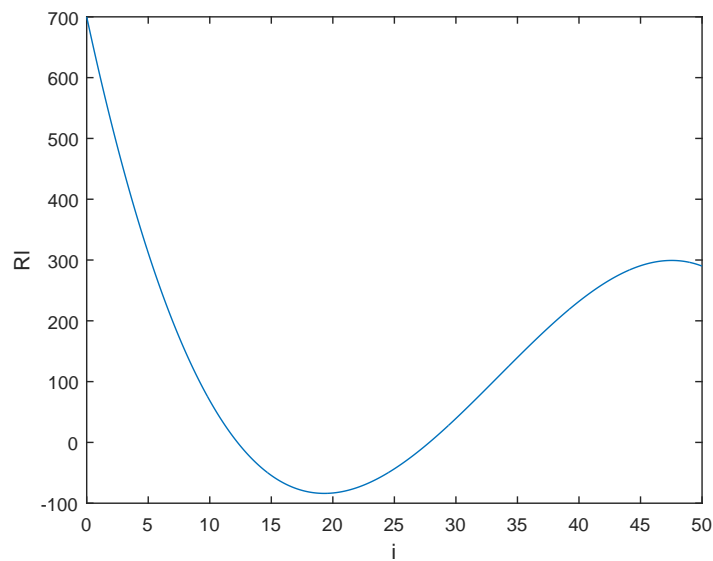


Figura 3.6: Variação do valor da resistência de ligação em função do valor da corrente

O valor desta resistência considera-se que satura para valores inferiores a  $200 \Omega$ . Quando  $R_l$  toma valores inferiores a este, o modelo comporta-se como um paralelo de condensadores o que leva a um aumento do erro de estimação e, no limite, à divergência do filtro [1].

### 3.4 Conclusões

Se por um lado é essencial obter uma estimação do SOC da bateria, por outro lado é de enorme importância ter o conhecimento do comportamento da bateria ao longo do processo de descarga. Para isso é necessário ter um bom modelo da bateria em uso. Como já referido anteriormente, o modelo elétrico de bateria desenvolvido nesta dissertação tem como base o modelo da difusão.

Este modelo desenvolvido foi depois afinado com a otimização dos parâmetros, através da heurística do arrefecimento simulado, e recorrendo à utilização de uma resistência variável. Para confirmar o bom funcionamento dessa otimização, os parâmetros foram implementados em PSIM e, comparado com os modelos de difusão, KiBaM e Peukert, percebeu-se que o modelo desenvolvido levou a menores erros [1]. De seguida será introduzido o Filtro de Kalman que será aplicado a este modelo na tentativa de diminuir este erro obtido.

## Capítulo 4

# Filtro de Kalman

Tal como já referido na Secção 2.2.2, este filtro estimador foi desenvolvido em 1958 por Rudolf Emil Kálmán. Foi fundamental na Era Espacial e foi aplicado pela primeira vez para estimar trajetórias e para resolver problemas de controlo no projeto Apollo [19]. Atualmente o KF também tem sido utilizado na estimação do estado de carga de baterias e essa é a aplicação que será aprofundada nesta Dissertação.

O KF é um estimador aplicado em sistemas lineares e, além de estimar o estado seguinte, dá uma indicação do erro associado à estimação. Para aplicar este filtro, é necessário desenvolver um modelo descrito num sistema de espaço de estados, representado no sistema 4.1.

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k \\ y_k = C_k x_k + D_k u_k + v_k \end{cases} \quad (4.1)$$

Na primeira equação,  $x_{k+1}$  refere-se à estimação do estado corrente,  $u_k$  à entrada do sistema e  $w_k$  ao ruído. Já na segunda equação, está definida a saída do sistema,  $y_k$ , e o ruído do sensor,  $v_k$ . Este ruído afeta as medições, mas não afeta a estimação. As matrizes  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  representam informações relativas à dinâmica do sistema.

A estimação é feita em dois passos. No primeiro passo é estimado o estado seguinte e o erro dessa estimação. De seguida os valores são medidos, comparados com os valores estimados e são corrigidas as estimações e os erros.

Como é visível na Figura 4.1, a saída de um passo é a entrada do passo seguinte e assim sucessivamente, sendo que para a primeira estimação é necessário inicializar as variáveis do sistema. Na figura,  $Q$  representa o ruído do sistema e  $R$  o ruído ambiente. Mesmo sabendo que os ruídos não são puramente gaussianos, assume-se  $Q$  e  $R$  como ruído branco gaussiano.

### 4.1 Exemplo de aplicação

Por forma a situar este filtro numa aplicação prática, será agora descrito um exemplo de uma aplicação linear do mesmo (exemplo adaptado de [32]).

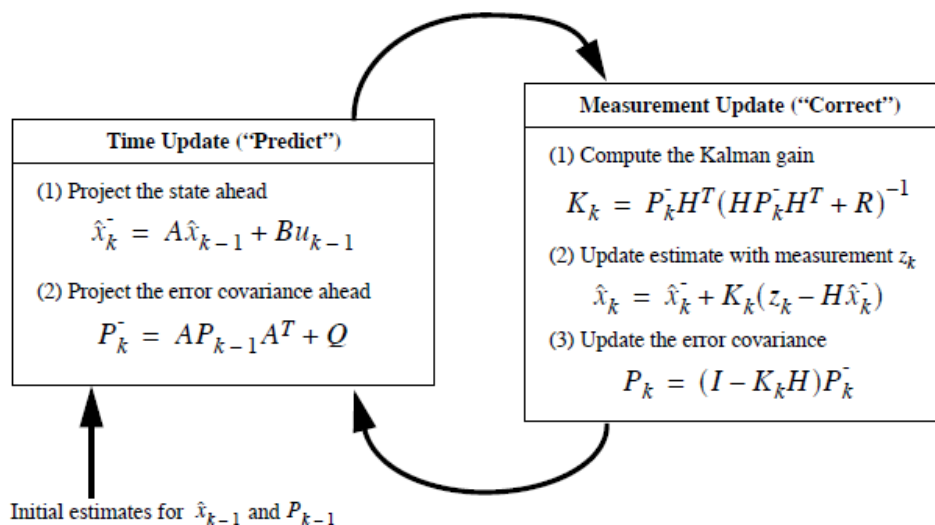


Figura 4.1: Passos iterativos do Filtro de Kalman [20]

Considera-se então um robô desenvolvido para se deslocar numa floresta que necessita de saber constantemente aonde se situa. O estado atual do robô é expresso por  $\vec{x}_k = (\vec{p}, \vec{v})$ , em que  $\vec{p}$  representa a posição do robô e  $\vec{v}$  a velocidade a que se desloca. Este robô está equipado com um recetor GPS, mas esse recetor tem uma precisão de apenas 10m e este robô precisa de algo mais preciso para, por exemplo, não cair de nenhum penhasco.

Além do recetor GPS também se tem conhecimento das ordens enviadas para o robô se mover. Portanto, se não existirem interferências externas, podemos saber em que posição se encontra o robô. No entanto também se sabe que existem interferências, como vento e a falta de aderência das rodas, que alteram a posição esperada do robô, logo não se pode ter certezas relativas à posição do robô só a partir das ordens dadas ao mesmo. Assim, existe informação proveniente dos satélites GPS e previsões do movimento do robô, mas esta última previsão pode estar errada. Nesta situação pode então aplicar-se um Filtro de Kalman.

Não são conhecidas nem a posição nem a velocidade reais do robô e estas podem tomar uma vasta variedade de valores. No entanto sabe-se que uns valores são mais prováveis de estar corretos do que outros. Então, o KF assume ambas as variáveis como distribuições Gaussianas, e cada variável tem uma média e uma covariância. Se relacionarmos ambas as variáveis, ou seja, se a posição estiver dependente da velocidade, chegamos então ao objetivo da aplicação do KF: agregar o máximo de variáveis possível diminuindo a incerteza. Uma das variáveis permite perceber que valores as outras podem ter.

Desta forma podemos utilizar os valores pouco precisos obtidos no sensor GPS e combinar esses valores com a velocidade a que as rodas se movem e obter uma previsão da posição mais precisa.

## 4.2 Filtro de Kalman Estendido

Como referido na secção anterior, o Filtro de Kalman é ótimo quando aplicado em sistemas lineares. Dado que o modelo de descarga de uma bateria não segue uma distribuição linear, este filtro não é aplicável. No entanto existe a variante deste filtro para sistemas não lineares, Filtro de Kalman Estendido, que segue o mesmo princípio do Filtro de Kalman. Para a implementação do método, o sistema contínuo não linear é linearizado a cada iteração transformando-o num sistema linear variante no tempo. É neste tipo de aplicações que se têm obtido os resultados mais interessantes com a utilização do KF [20].

Tal como no KF, existe uma previsão do estado seguinte, erro e covariância. De seguida são feitas medições e esses valores permitem fazer uma correção das estimações, do erro e da covariância. Apesar de não ter um comportamento tão bom como o KF, devido à perda de qualidade agregada à linearização, o EKF permite obter boas estimações [18, 21, 20].

## 4.3 Aplicação do EKF no modelo

Depois de feito todo o estudo relativo ao EKF, desenvolveu-se uma aplicação do modelo de bateria adotado para este estimador. O circuito elétrico deste sistema, está representado na Figura 4.2.

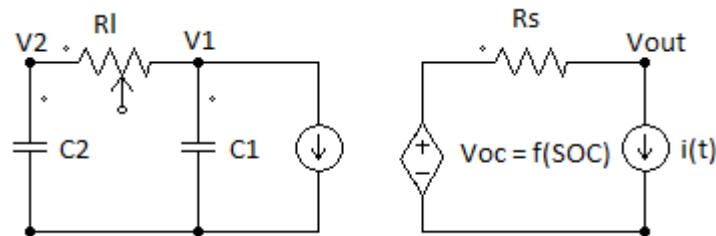


Figura 4.2: Modelo elétrico completo de uma bateria com resistência variável

Foi feita uma representação do modelo num espaço de estados [1].

$$x = \begin{bmatrix} V_1 & V_2 \end{bmatrix}^T \quad (4.2)$$

Assumindo como entrada do sistema  $u(t) = i$  e a saída  $y(t) = V_{out}$ , obtém-se a seguinte representação do modelo na forma de espaço de estados [1]:

$$\dot{x} = f(x, u) + w \quad (4.3)$$

$$y = g(x, u) + v \quad (4.4)$$

Em que:

$$f(x, u) \begin{bmatrix} \frac{-u}{C_1} + \frac{1}{R_l * C_1} (V_2 - V_1) \\ \frac{-1}{R_l * C_2} (V_2 - V_1) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$g(x, u) = V_{OC} - R_s * u \quad (4.6)$$

Admitindo que  $w$  e  $v$  representam o ruído do processo e o ruído de medida, respetivamente. Como já referido, estes são considerados ruído branco gaussiano.

Dado que esse modelo é não linear, procede-se à linearização das funções  $f$  e  $g$  recorrendo à expansão da série de Taylor de primeira ordem [33] e obtém-se o seguinte modelo linearizado [1]:

$$\dot{x} = A * x + B * u + w \quad (4.7)$$

$$y = C * x + D * u + v \quad (4.8)$$

As matrizes A, B, C e D são definidas da seguinte forma [1]:

$$A = \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \Big|_{x(t), u(t)} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_l C_1} & \frac{1}{R_l C_1} \\ \frac{1}{R_l C_2} & -\frac{1}{R_l C_2} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$B = \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \Big|_{x(t), u(t)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$C = \frac{\partial g(x, u)}{\partial x} \Big|_{x(t), u(t)} = \begin{bmatrix} 0 & -b * k * a * \exp^{1-b * V_1 * k} + 3 * c * k^3 * V_1^2 + 2 * d * k^2 * V_1 + e * k \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$D = \frac{\partial g(x, u)}{\partial u} \Big|_{x(t), u(t)} = \begin{bmatrix} -R_s \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Discretizando o modelo, obtém-se o seguinte espaço de estados:

$$x_{k+1} = \hat{A}_k * x_k + \hat{B}_k * u_k + w_k \quad (4.13)$$

$$y_k = \hat{C}_k * x_k + \hat{D}_k * u_k + v_k \quad (4.14)$$

E obtém-se também as seguintes matrizes A, B, C e D discretas [1]:

$$\hat{A}_k = \begin{bmatrix} \frac{C_1 + C_2 * e^{-\frac{T C_1 + T C_2}{C_1 C_2 R_l}}}{C_1 + C_2} & \frac{C_2 - C_2 * e^{-\frac{T C_1 + T C_2}{C_1 C_2 R_l}}}{C_1 + C_2} \\ \frac{C_1 - C_1 * e^{-\frac{T C_1 + T C_2}{C_1 C_2 R_l}}}{C_1 + C_2} & \frac{C_2 + C_1 * e^{-\frac{T C_1 + T C_2}{C_1 C_2 R_l}}}{C_1 + C_2} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Tabela 4.1: Inicializações do sistema

Inicializações
$R_l = 360 \Omega$
$C_1 = 0.2017$
$C_2 = 0.7983$
$a = -0.2402$
$b = 0.4438$
$c = 5.358 * 10^{-7}$
$d = -3.349 * 10^{-5}$
$e = 0.003508$
$f = 3.653$
$T = 1 \text{ s}$
$R_s = 0.02 \Omega$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{TC_1+TC_2+(C_2)^2 * R_l * e^{-\frac{TC_1+TC_2}{C_1 C_2 R_l}}}{(C_1+C_2)^2} \\ -\frac{TC_1+TC_2+C_1 C_2 * R_l * e^{-\frac{TC_1+TC_2}{C_1 C_2 R_l}} + C_1 C_2 R_l}{(C_1+C_2)^2} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$\hat{C}_k = C = \left. \frac{\partial g(x, u)}{\partial x} \right|_{x(t), u(t)} = \begin{bmatrix} 0 & -b * k * a * \exp^{1-b * V_1 * k} + 3 * c * k^3 * V_1^2 + 2 * d * k^2 * V_1 + e * k \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$\hat{D}_k = D = \left. \frac{\partial g(x, u)}{\partial u} \right|_{x(t), u(t)} = \begin{bmatrix} -R_s \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Com o todo o espaço de estados definido e discretizado é agora possível aplicar o EKF. Este espaço de estados recebe a tensão aos terminais da bateria e a corrente que está a ser retirada da mesma. A partir daí é determinado o SOC.

Como já exposto anteriormente, para ser iniciado o algoritmo é necessário que sejam inicializadas algumas variáveis. Assim sendo, na Tabela 4.1 estão representados todos os valores introduzidos na inicialização [1].

É também necessário inicializar ainda o estado inicial,  $x_0$ , e respetiva covariância,  $P_0$ , a matriz de covariância do ruído da medição,  $R$ , e ainda a matriz de covariância do ruído do processo,  $Q$  [1].

Uma vez que se considera uma bateria completamente carregada, o seu estado inicial corresponde à sua capacidade máxima:

$$x_0 = \begin{bmatrix} 11 * 3600 & 11 * 3600 \end{bmatrix}^T \quad (4.19)$$

A incerteza desta inicialização é reduzida, logo  $P_0$  é inicializado como:

$$P_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Para inicializar a matriz R, foi considerada a seguinte equação [1]:

$$R = k_R * \text{diag}(\sigma_i^2) \quad (4.21)$$

Em que  $\sigma_i$  corresponde ao valor nominal de desvio entre a medição e o sinal e  $k_R$  é uma constante maior que 1. Neste caso, sendo que o desvio é  $0.1 * 10^{-3}$  e assumindo que a incerteza não é elevada,  $k_R = 1.2$ , então R é inicializada como [1]:

$$R = 0.12 * 10^{-3} \quad (4.22)$$

Para terminar, a matriz do ruído do processo, Q, foi inicializada com valores de incerteza mais elevados, refletindo menor confiança no processo [1].

$$Q = \begin{bmatrix} 1.2 & 0 \\ 0 & 1.2 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

## 4.4 Conclusões

Terminado este capítulo é possível verificar que a implementação do EKF levou a estimações mais aproximadas dos valores reais. Com o EKF foi possível obter uma redução do erro da tensão estimada, tal como era esperado. Note-se que, como tal, assumiu-se que o erro para a estimação do SOC será também pequeno.

De seguida o mesmo modelo será implementado num micro-controlador para posteriormente fazer estimações em tempo real. Os resultados dessa implementação serão analisados no capítulo seguinte.



## Capítulo 5

# Implementação e Resultados

Depois de feito todo o estudo prévio relativo às baterias, sistemas de gestão de baterias e estimadores de estado de carga e aprovados todos os modelos desenvolvidos e aproximações, foi implementado o algoritmo em linguagem C a partir de uma implementação prévia existente em Matlab [1].

Os testes iniciais não foram feitos em tempo real. Recorreu-se aos resultados obtidos numa carga eletrónica (BK Precision 8510) relativos ao ensaio de um descarregamento parcial de uma bateria de 11Ah, segundo o percurso de teste NEDC [1] que será posteriormente detalhado. Como base de comparação foram usados os resultados da carga eletrónica, que utiliza o método de Coulomb Counting como estimador.

Analisados e aprovados os resultados já existentes em Matlab [1], o mesmo algoritmo foi implementado em linguagem C para poder posteriormente ser aplicado no micro-controlador.

### 5.1 Validação do algoritmo

O ponto de partida neste desenvolvimento, foi a implementação do algoritmo desenvolvido no Matlab [1]. Inicialmente estes resultados serão comparados com os dados obtidos na carga eletrónica. Posteriormente estes serão a base de comparação para aprovar a implementação do algoritmo em C. Na Figura 5.1 estão representados os diagramas de fluxo das implementações do algoritmo no Matlab e no micro-controlador.

#### 5.1.1 Implementação em Matlab

Na Figura 5.2 está representada a variação da corrente de descarga da bateria neste teste. Não foi submetida a uma corrente de descarga constante de modo a ser possível avaliar a robustez do estimador e também a simular uma condição de uso real de uma bateria num carro elétrico.

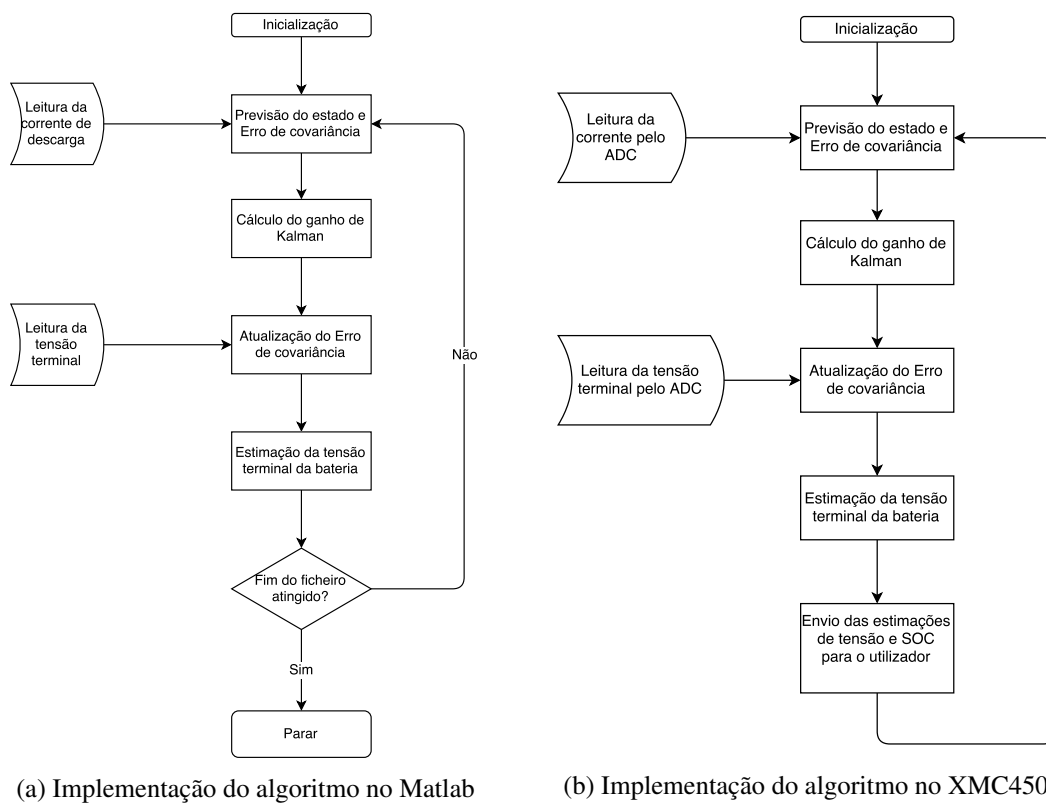


Figura 5.1: Diagramas de fluxo das implementações do algoritmo

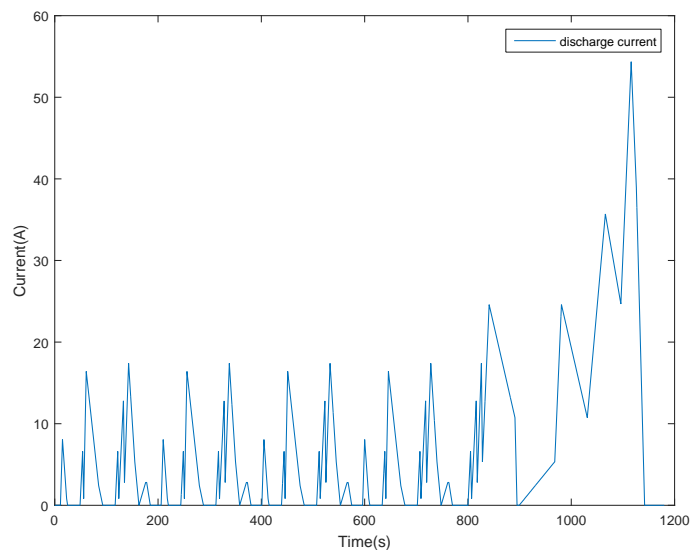


Figura 5.2: Corrente de descarga da bateria durante o ensaio

Nas Figuras 5.3b e B.5b estão representadas as estimações do SOC e da tensão da bateria feitas no Matlab com recurso ao modelo matemático e ao EKF comparadas com os valores da carga eletrónica.

### 5.1.2 Implementação em C

Como já referido previamente, este algoritmo será implementado num micro-controlador. Desta forma foi necessário desenvolver o mesmo em linguagem C. A partir dos resultados validados apresentados previamente, partiu-se para a implementação do algoritmo em C.

Para converter o código existente em Matlab para linguagem C foi necessário adaptar o mesmo à linearização do sistema, uma vez que em Matlab existe uma função capaz de linearizar um sistema não linear (função  $c2d()$ ). Assim, as matrizes relativas ao sistema não linear foram linearizadas, como demonstrado no capítulo anterior, e foram aplicadas diretamente essas linearizações no programa em C. Para comprovar a boa adaptação das linguagens de programação, foi primeiramente implementado o código C num computador usando o *software* Visual Studio 2015 antes de passar à aplicação no micro-controlador.

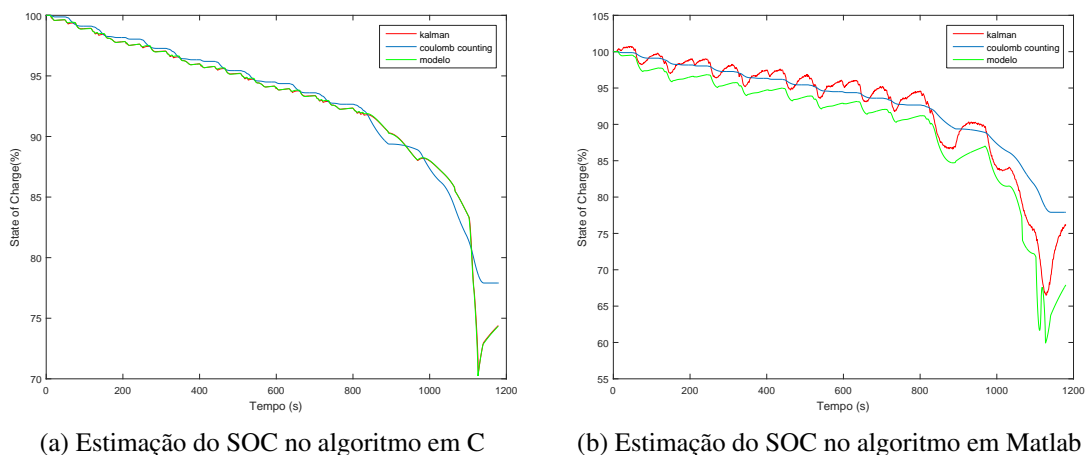


Figura 5.3: Comparação entre os algoritmos em C e Matlab

A base de comparação para a validação desta conversão foram os resultados obtidos no Matlab, sendo essa comparação feita lado a lado na Figura 5.3. São visíveis as diferenças entre os resultados da estimação do SOC no algoritmo em C e em Matlab. Os resultados com o recurso ao modelo matemático e os resultados com o recurso ao filtro de Kalman estão muito próximos um do outro, ao contrário do que acontece no estimador implementado em Matlab.

No Anexo B estão representados todos os resultados em maior detalhe. Nas Figuras B.2 e B.3 é possível ver a comparação entre os erros de estimação do EKF e do modelo matemático em ambas as implementações. A Figura B.4 contempla os erros das estimções do SOC, comparativamente ao SOC medido na carga eletrónica.

Relativamente ao erro do modelo matemático, é perceptível que os resultados da nova implementação são sensivelmente melhores. Já no que toca ao erro da implementação do EKF, o algoritmo em C teve erros substancialmente maiores do que os erros do algoritmo Matlab. Apesar disto e de ser necessário rever esta implementação, os resultados estão dentro dos valores aceitáveis. Quanto ao erro da estimação do SOC, foram obtidos resultados melhores no algoritmo

implementado em C, comparativamente aos obtidos anteriormente no Matlab, estando a diferença na ordem dos 4 pontos percentuais.

Finalmente, na Figura B.5 está representada a estimação da tensão da bateria com recurso ao modelo matemático e ao Filtro de Kalman comparativamente aos valores lidos na carga eletrónica.

## 5.2 Implementação no micro-controlador

Depois de validado o bom funcionamento do algoritmo em linguagem C no computador, o mesmo foi implementado num micro-controlador da Infineon: XMC4500. Para comparar o funcionamento do micro-controlador com o do computador onde foi desenvolvido o algoritmo, foi novamente executado o teste com os dados previamente recolhidos antes de partir para a execução em tempo real.

Para correr este teste inicial foi necessário recorrer a uma placa de desenvolvimento para o controlador escolhido que contemplasse um *slot* para cartão de memória microSD, como a presente na Figura 5.4, de forma a permitir o carregamento para o micro-controlador do registo da descarga utilizado, no formato .csv.

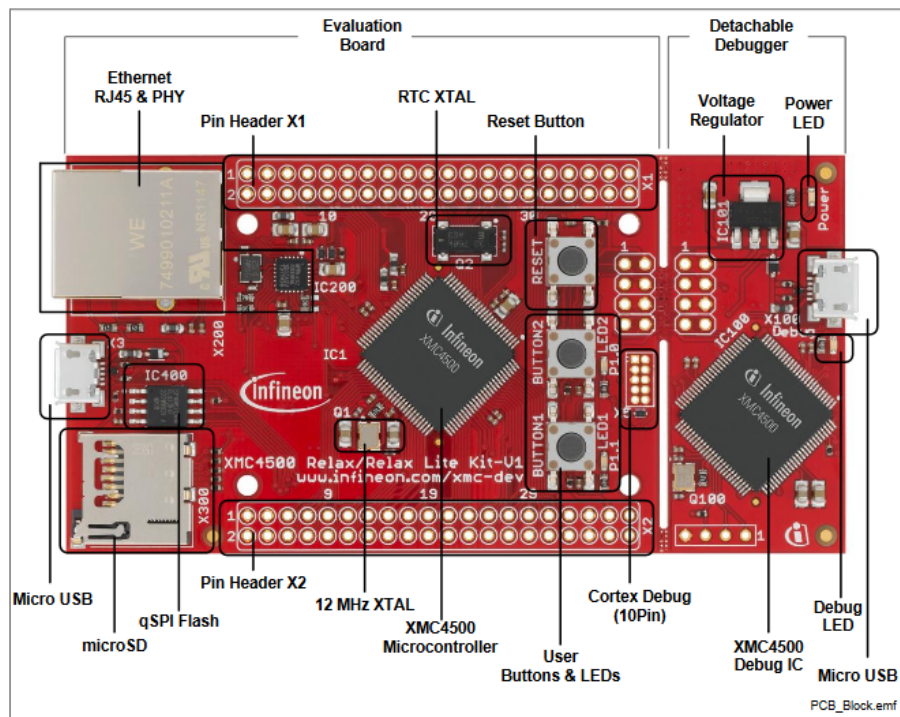


Figura 5.4: Placa de desenvolvimento XMC4500 Relax Kit V1 [34]

O ambiente de desenvolvimento utilizado para programar o controlador é fornecido pela empresa produtora do mesmo, o DAVE. Este *software* tem uma componente de programação em código C e outra componente que recorre a blocos para a utilização de periféricos de *hardware*, como é o caso dos pinos de entradas/saídas ou interrupções temporais. Nesta primeira aplicação

foi utilizada a versão 4 deste ambiente de desenvolvimento. Uma vez que foram utilizados dados existentes no cartão de memória, foi também necessário utilizar um bloco para a comunicação com o periférico referido, *FATFS*. A configuração deste bloco está presente na Figura 5.5.

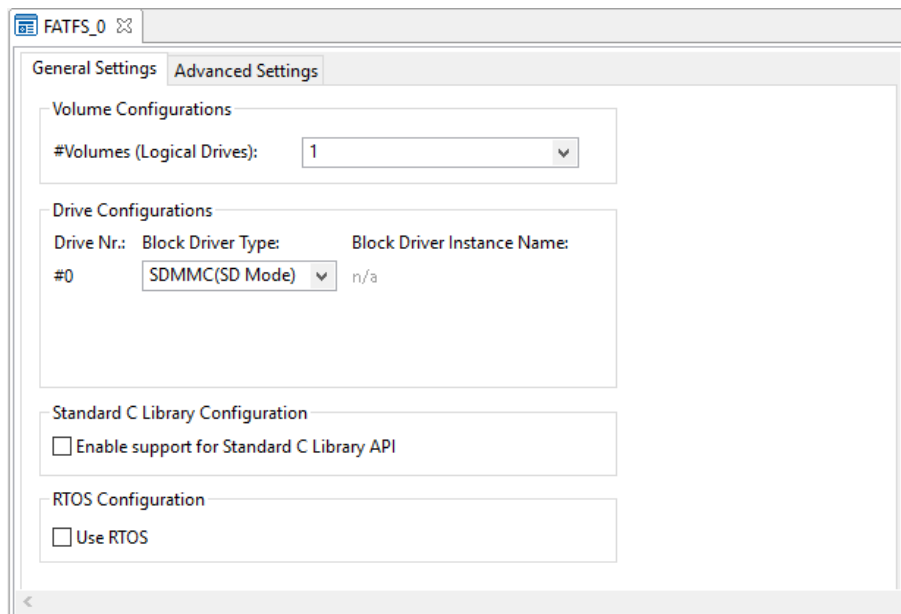


Figura 5.5: Configurações do bloco de comunicação com o cartão de memória

Os restantes blocos utilizados e a forma como estes comunicam entre si estão presentes nas Figuras 5.6 e 5.7 respetivamente.

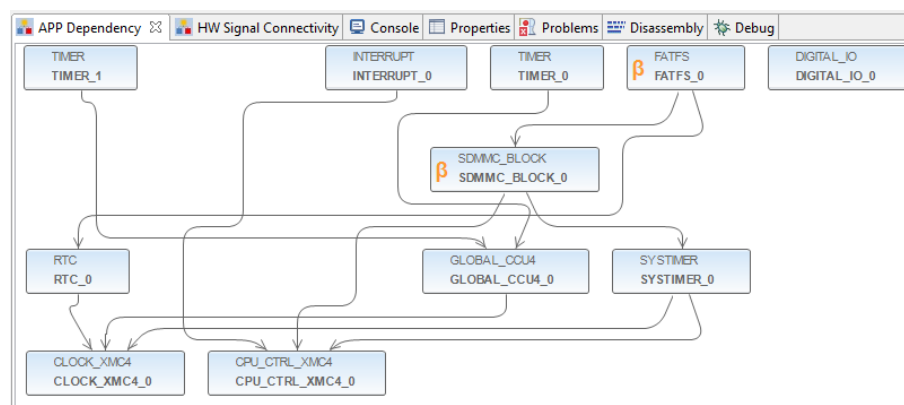


Figura 5.6: Blocos utilizados no teste do micro-controlador com dados previamente recolhidos

Depois de configurado o controlador, o programa apresentado na secção anterior foi executado utilizando os mesmos dados. Os resultados obtidos foram os mesmos que os obtidos na implementação do algoritmo em linguagem C no computador e, desta forma, foi possível partir para a implementação em tempo real do algoritmo.

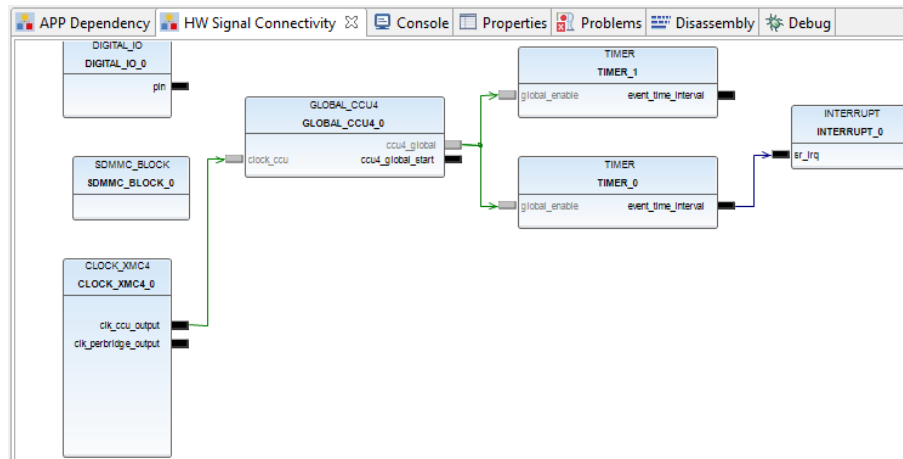


Figura 5.7: Interface entre os blocos utilizados no primeiro teste do micro-controlador

Para poder correr este sistema em tempo real foi também necessário desenvolver uma forma de aquisição dos dados necessário para o micro-controlador, já que deixaram de ser utilizados dados recolhidos previamente na carga eletrónica e passaram a ser utilizados dados em tempo real.

Uma vez que era pretendido fazer a recolha dos dados para um ficheiro externo para posterior análise e também ter acesso aos dados de descarga em tempo real, foi necessário utilizar outra versão do *software* de desenvolvimento. Isto prendeu-se com o facto de a versão mais recente do Dave não ter ainda disponível a aplicação *xSPY* que permite tanto a monitorização dos dados em tempo real como a recolha dos mesmos para um ficheiro. Assim, o código teve que ser transferido e adaptado para o *software* DAVE 3.

Ao nível do *software* foi desenvolvida uma rotina de aquisição de tensões pelo ADC que faz 100 medidas e depois aplica uma média aritmética para posteriormente fazer a conversão para os valores de tensão e corrente da bateria. Para ser feita a leitura dos valores do ADC a cada segundo e mostrar esses valores no computador foi necessário usar novamente a componente de seleção dos blocos. O conjunto de blocos utilizados está presente na Figura 5.8.

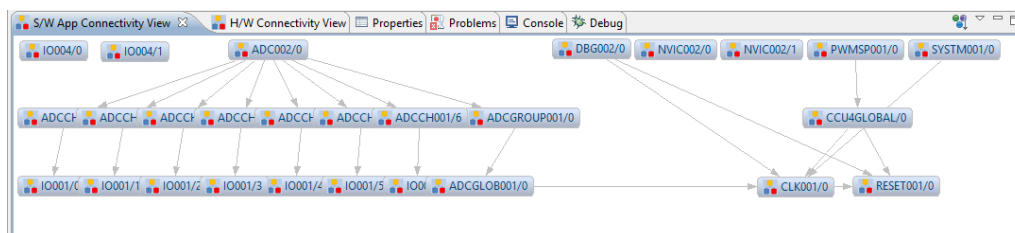


Figura 5.8: Blocos utilizados no DAVE v3 para a implementação em tempo real

Para a aquisição das tensões no ADC foi necessário utilizar o bloco *ADC002*. Só era necessário configurar 2 ADCs (um para tensão e outro para corrente), no entanto foram já configurados 7 blocos por forma a facilitar uma combinação posterior com o modelo térmico da bateria que fará

uso de 5 sensores de temperatura, usando assim mais 5 conversores do micro-controlador. A leitura dos valores do ADC é feita com recurso à função seguinte:

```
ADCCH001_GetResult( const ADCCH001_HandleType* HandlePtr ,  
                    uint16_t* ResultPtr )
```

O algoritmo desenvolvido prevê que seja feita uma estimação a cada segundo, tendo isto sido tido em conta na altura da discretização do espaço de estados. Assim, foi necessário recorrer também a uma interrupção temporal a cada segundo. Para isso foi utilizado o bloco *SYSTM001* no ambiente de desenvolvimento. A configuração desse bloco está presente na Figura 5.9.

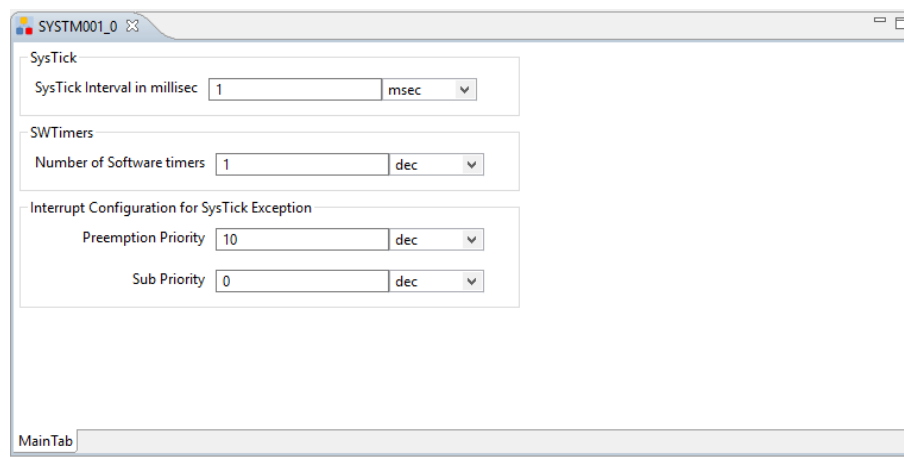


Figura 5.9: Configuração do bloco de interrupção temporal no DAVE v3

Por forma a fazer uma monitorização em tempo real dos valores estimados foi desenvolvido um ambiente gráfico muito básico que permite também que seja guardado um registo num ficheiro para posterior análise dos dados. Para isto foi utilizado o bloco *DBG002*. A configuração deste bloco está presente na Figura 5.10 e a interface na Figura 5.11.

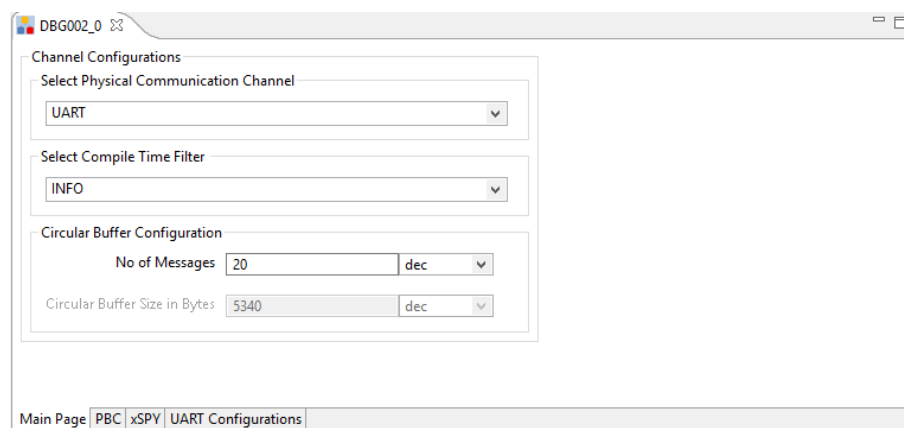


Figura 5.10: Configuração do bloco de interface com o utilizador no DAVE v3

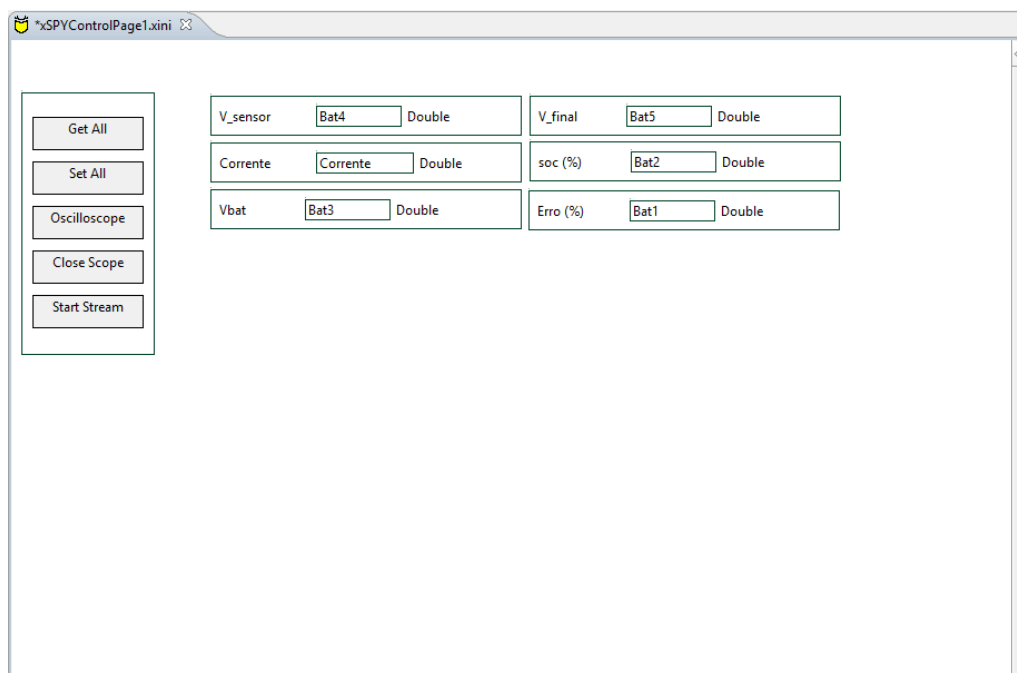


Figura 5.11: Interface gráfica desenvolvida no DAVE v3

Relativamente ao *hardware* foi desenhada uma placa de circuito impresso, detalhada no Anexo A. A leitura da corrente é feita através de um sensor de corrente LEM LA 55-P, com as características presentes na Tabela 5.1 e a tensão da bateria é lida através de um divisor de tensão resistivo, dado que o ADC apenas faz leituras de até 3.3V. Sabendo que o sensor de corrente dá uma saída em corrente, foi necessário dimensionar uma resistência de saída para o sensor por forma a obter uma leitura dentro da gama admissível do ADC do micro-controlador. Essa resistência tem o valor de 68Ω. Uma vez que o sensor de corrente requer uma alimentação de ±15V foi também escolhida fonte DC-DC da Traco Power: TEL 15-2423. Esta fonte tem saída positiva e negativa para alimentar o sensor a partir do módulo de 6 células, com uma gama de tensão de entrada entre os 18V e os 36V.

Tabela 5.1: Valores de referência do sensor LEM LA 55-P

$I_{PN}$	50 A
$I_{SN}$	50 mA
Conversion Ratio	1:1000
$V_C$	± 12..15 V

### 5.2.1 Tempo de execução

Uma vez que o algoritmo deve correr a uma frequência de 1Hz, foi feita a medição do tempo de execução do algoritmo no micro-controlador para saber de que forma se poderia aumentar o



número de células independentes a serem medidas na mesma unidade de processamento. O micro-controlador foi ligado a um osciloscópio e percebeu-se que o algoritmo fazia todos os cálculos relativos a uma célula em menos de 2ms, como está visível na Figura 5.12.

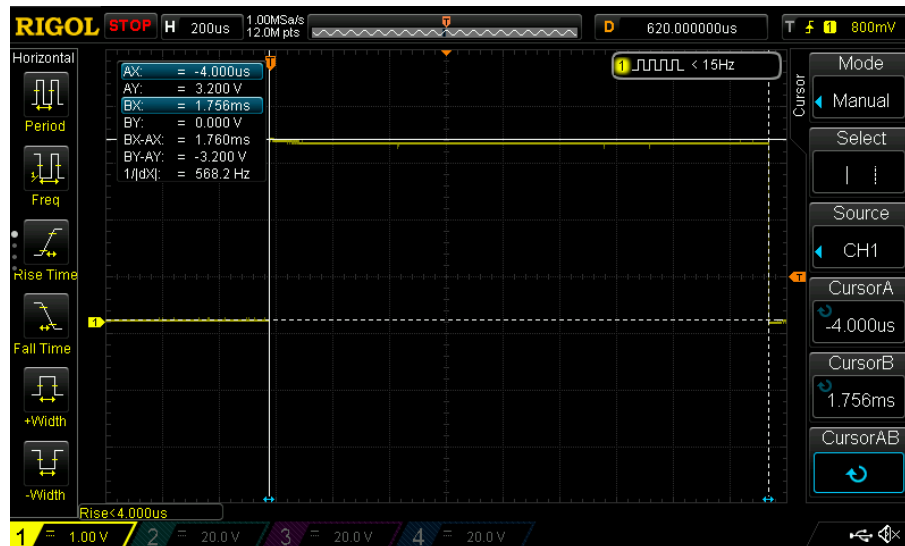


Figura 5.12: Tempo de execução do algoritmo no micro-controlador

### 5.3 Resultados

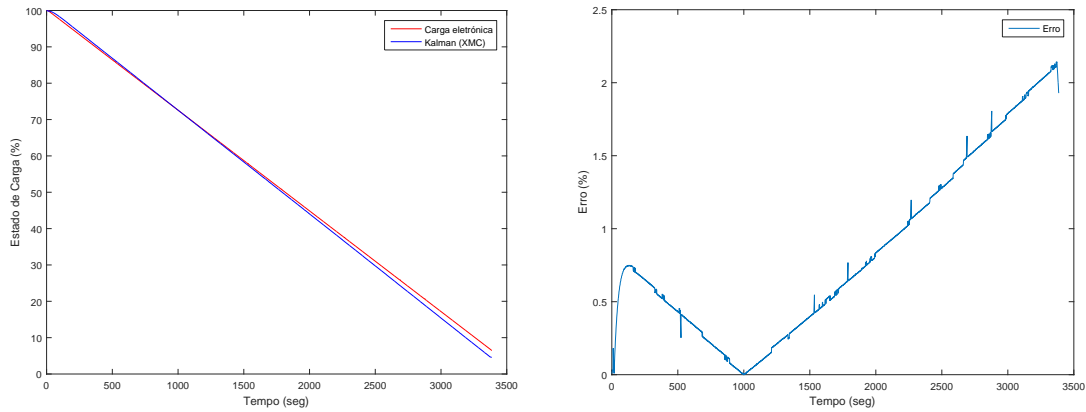
Para testar o correto funcionamento do algoritmo e de todo o sistema de estimação, foi realizada uma série de testes a uma bateria de 11Ah, dado que o modelo está otimizado para baterias de lítio com esta capacidade. No entanto, para testar o bom funcionamento do sistema com outras baterias, foi também realizado um teste de corrente constante numa bateria de 10Ah.

De seguida serão apresentados os percursos de teste utilizados na descarga da bateria e os resultados obtidos. Para realizar descargas pulsadas da bateria, foram seguidos alguns ciclos de teste normalizados por entidades governamentais europeias e americanas, habitualmente utilizados para medir os valores de emissões e de consumo de veículos com motores de combustão. Existem ainda mais ciclos de teste que não serão abordados, como é o caso dos *Worldwide Harmonized Light vehicles Test Procedures*, e os ciclos japoneses *10-15 mode cycle* e *JC08 cycle* [35]. Nestes ciclos, dado que só eram conhecidos os valores de velocidade em cada um dos percursos, foi feita a conversão de velocidade para corrente retirada às baterias em cada instante de acordo com as dimensões do VEC da FEUP [36] e esses valores de corrente assim como a estimação do SOC e o erro dessa estimação e a tensão aos terminais da bateria durante o processo de descarregamento estão representados no Anexo D.

Para comprovar o bom funcionamento do algoritmo, os resultados obtidos foram comparados com os dados provenientes da carga eletrónica utilizada para descarregar a bateria.

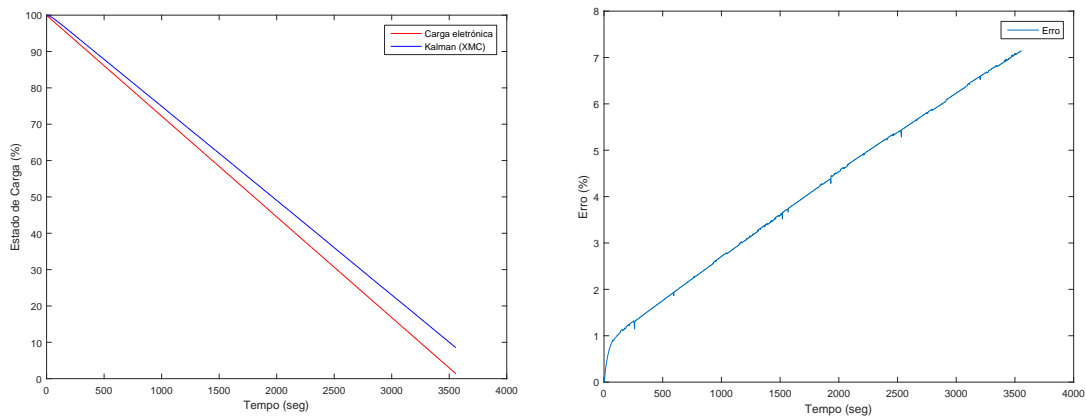
### 5.3.1 Corrente constante

Os primeiros testes realizados foram descargas completas em corrente constante a 1C. Foram utilizadas baterias de 11Ah e 10Ah cujos resultados estão apresentados nas Figuras 5.13 e 5.14, respetivamente.



(a) Variação do SOC numa descarga a 1C de uma ba- (b) Erro absoluto da estimação do SOC numa des-  
teria de 11Ah carga a 1C de uma bateria de 11Ah

Figura 5.13: SOC e Erro da estimação do SOC numa bateria de 10Ah numa descarga a 1C



(a) Variação do SOC numa descarga a 1C de uma ba- (b) Erro da estimação do SOC numa descarga a 1C de  
teria de 10Ah uma bateria de 10Ah

Figura 5.14: SOC e Erro da estimação do SOC numa bateria de 10Ah numa descarga a 1C

Na Figura 5.13 vemos representada a evolução do SOC e é perceptível que a estimação se aproximou muito satisfatoriamente do valor real, tendo sido obtido um erro a rondar os 2%. Com este erro confirmou-se que o sistema tinha um funcionamento perfeitamente aceitável e foi aprovada a passagem para testes com correntes pulsadas. Como é visível na Figura 5.14, o erro da estimação numa célula de 10Ah é superior ao erro associado à estimação do SOC na célula de 11Ah. No entanto, como se trata de um erro inferior a 8% consideraram-se os resultados como satisfatórios. Apesar disso, caso o modelo fosse aplicado a uma bateria de capacidade diferente os parâmetros deveriam ser recalculados por forma a obter o funcionamento ótimo.

Os resultados mais detalhados deste teste encontram-se no Anexo C. Além da estimação do SOC e o erro dessa estimação, estão ainda presentes a corrente de descarga e a tensão aos terminais da bateria durante o processo de descarregamento.

### 5.3.2 Percurso NEDC

Um conhecido percurso utilizado para testar as emissões de gases poluentes e o consumo do combustível por parte dos veículos de combustão é o New European Drive Cycle (NEDC) [37]. Este ciclo, desenvolvido pela União Europeia, também é aplicado em veículos puramente elétricos para determinação de consumos e autonomia. É um ciclo de referência para homologar veículos na Europa até à norma Euro6, mas é criticado por peritos que alegam ser um percurso que não representa condições reais de condução devido à existência de acelerações suaves e muitos períodos de velocidades constantes. Por estes motivos estão em desenvolvimento novos percursos para substituir este [35].

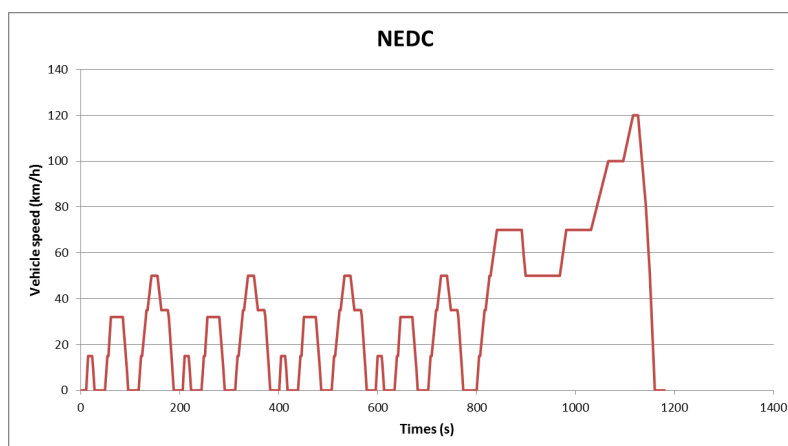
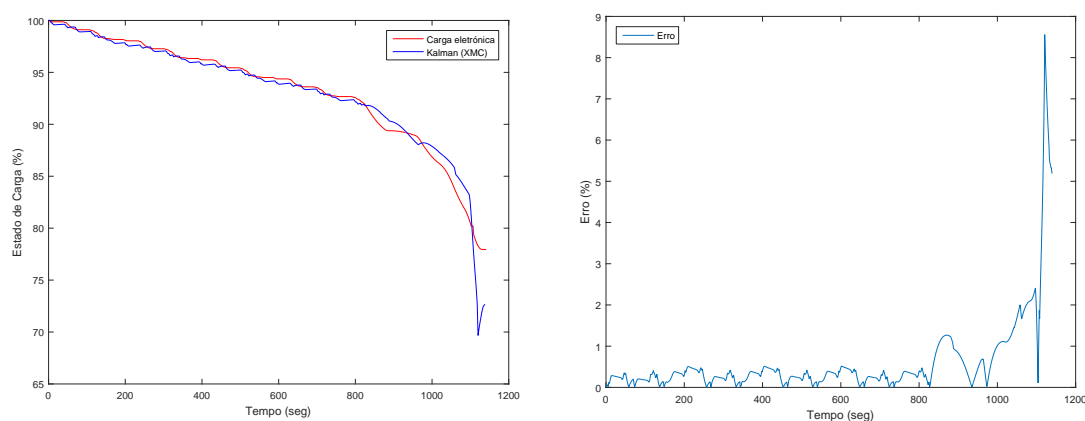


Figura 5.15: Variação de velocidade no percurso NEDC [35]

Este percurso tem uma distância de 11023 metros e a duração de 1180 segundos, a uma velocidade média de 33.6 km/h. Conta com uma secção que simula um percurso urbano, com 1017 metros durante cerca de 192 segundos, repetida 4 vezes, e uma secção final que representa um percurso extra-urbano, de 6956 metros e duração de 400 segundos [35, 38]. Na Figura 5.15 está representada a variação de velocidades ao longo do percurso.

A partir deste perfil de velocidade, foi feito um perfil de corrente de descarga para uma bateria. Esse perfil de descarga está visível na Figura 5.2, mas, devido a uma limitação da carga eletrónica, não foi possível retirar correntes superiores a 50A e a corrente máxima retirada da bateria num instante na parte final do percurso é de 54,36A. Assim, esse perfil com a limitação de 50A no final do percurso está representado na Figura D.1 no Anexo D.

Foi este o percurso utilizado inicialmente para comprovar o funcionamento do algoritmo com correntes pulsadas. Como é visível pela Figura 5.16 o comportamento do sistema em tempo real foi semelhante ao do sistema inicial que funcionava através da leitura de dados previamente



(a) Variação do SOC numa descarga pulsada segundo o NEDC  
 (b) Erro da estimação do SOC numa descarga pulsada segundo o NEDC

Figura 5.16: SOC e Erro da estimação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso NEDC

recolhidos na carga eletrónica. Foi obtido um erro na ordem dos 9%, inferior aos cerca de 12% obtidos no teste de ensaio inicial utilizado apenas para confirmação do bom funcionamento do algoritmo. Esta diferença foi obtida apenas na secção final do percurso e coincide com a ligeira diferença na corrente de descarga devido à limitação da carga eletrónica mencionada previamente.

### 5.3.3 Percursos Artemis

Outros testes aplicados para medições de emissões de gases poluentes são os *Common Artemis Driving Cycles* (CADC), desenvolvidos no âmbito do projeto *European Artemis (Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems)* [39, 40]. Existem 4 variantes destes testes para diferentes percursos: *Urban*, *Rural Road*, *Motorway 130 km/h* e *Motorway 150 km/h*. Na Tabela 5.2 está um comparativo dos diferentes percursos.

Tabela 5.2: Características dos percursos Artemis [40]

	Urban	Rural Road	Motoway 130	Motorway 150
<b>Duration (s)</b>	920	1081	1067	1067
<b>Distance (km)</b>	4,47	17,27	28,74	29,55
<b>Average speed (km/h)</b>	17,5	57,5	97	99,7
<b>Maximum speed (km/h)</b>	58	112	132	150
Speed distribution (%)				
Idle ( $S = 0$ km/h)	29	3	2	2
Low speed ( $0 < S \leq 50$ )	69	31	15	15
Medium speed ( $50 < S \leq 90$ )	22	59	13	13
High speed ( $S > 90$ )	0	7	70	70

### 5.3.3.1 Artemis Urban

Este percurso, com a duração de 920 segundos e um comprimento de 4.47 km, simula situações de para-arranca numa utilização em percursos urbanos. A velocidade máxima atingida são os 58 km/h e esse percurso completo está representado no gráfico da Figura 5.17.

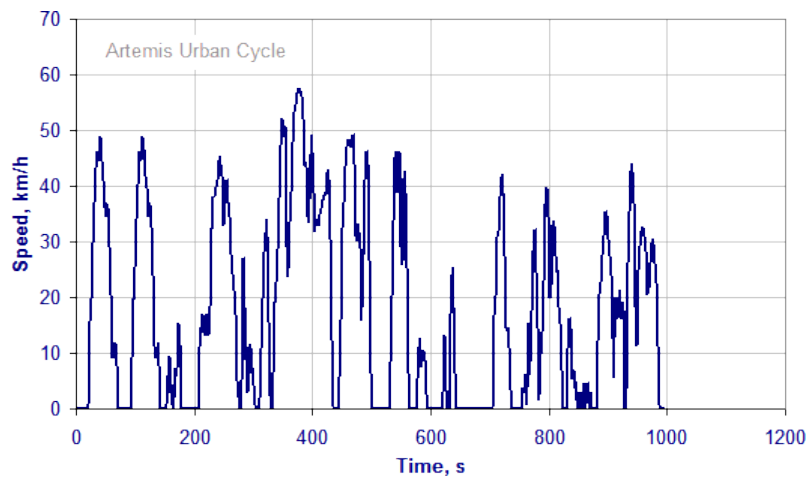
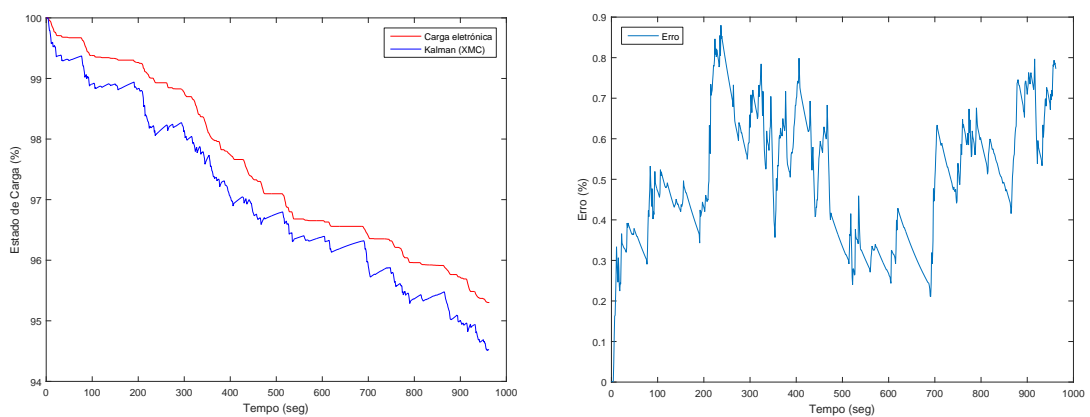


Figura 5.17: Variação de velocidade no percurso Artemis Urban [40]

Estes valores de velocidade foram traduzidos em correntes de descarga da bateria, obtendo o perfil de descarregamento pulsado presente na Figura D.5, presente no Anexo D.



(a) Variação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso Artemis Urban

(b) Erro da estimação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso Artemis Urban

Figura 5.18: SOC e Erro da estimação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso Artemis Urban

Pela análise à Figura 5.18 é possível ver que foi possível obter uma estimação muito aproximada da realidade, com um erro sempre inferior a 1%.

### 5.3.3.2 Artemis Rural Road

Este ciclo simula situações de condução em percursos rurais, numa distância de cerca de 17 km com a duração de 1082 segundos. A velocidade máxima atingida são os 112 km/h e na Figura 5.19 está representada a variação de velocidades ao longo do percurso.

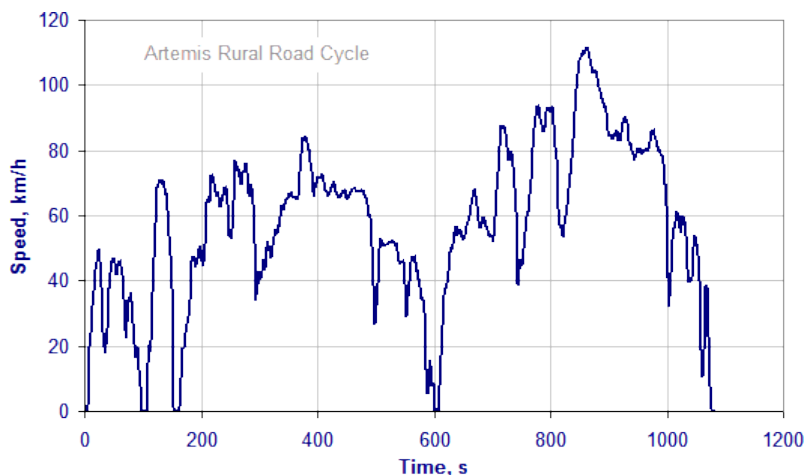
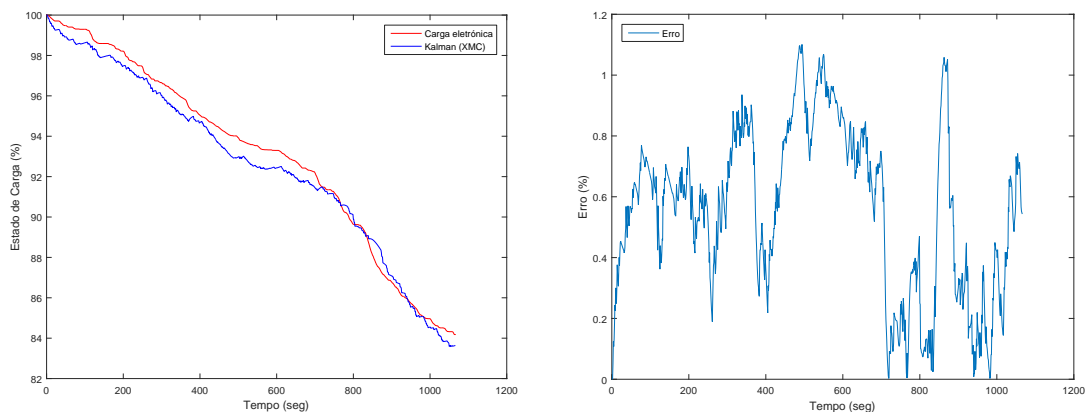


Figura 5.19: Variação de velocidade no percurso Artemis Rural Road [40]

Esta variação de velocidades foi traduzida no perfil de correntes pulsadas representado no gráfico da Figura D.9, no Anexo D.



(a) Variação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso Artemis Rural  
(b) Erro da estimação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso Artemis Rural

Figura 5.20: SOC e Erro da estimação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso Artemis Rural

Aplicado este perfil de descarga à bateria em teste foram obtidos os resultados presentes na Figura 5.20. É perceptível que os resultados obtidos representam uma aproximação fiável da realidade, tendo sido obtido um erro máximo a ronda o 1%, semelhante ao resultado do teste anterior.

### 5.3.3.3 Artemis Motorway 130 km/h e 150 km/h

Por forma a testar o desempenho dos veículos em circulação em auto-estrada foram desenvolvidos os ciclos *Artemis Motorway* nas variantes de 130 km/h e 150 km/h. São dois percursos muito semelhantes havendo apenas uma diferença numa secção final do ciclo, como é visível na Figura 5.21.

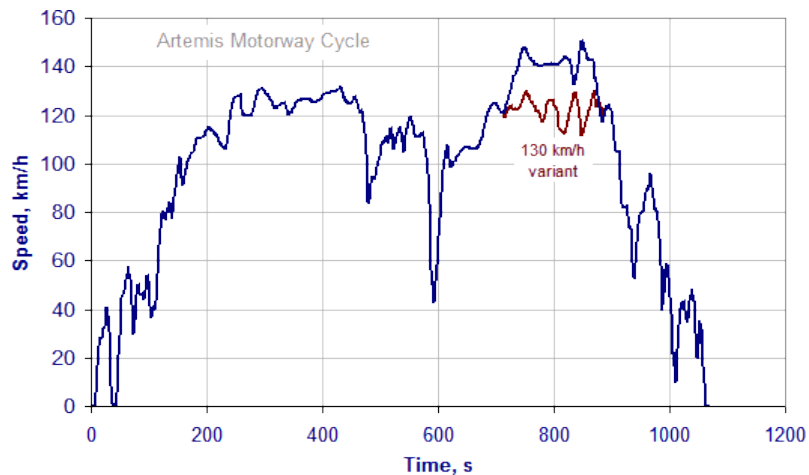
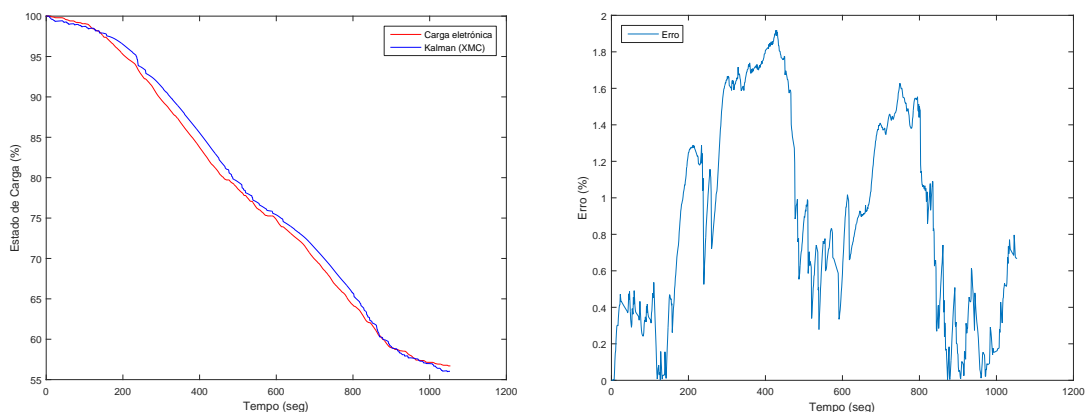


Figura 5.21: Variação de velocidade nos percursos Artemis Motorway 130km/h e 150km/h [40]

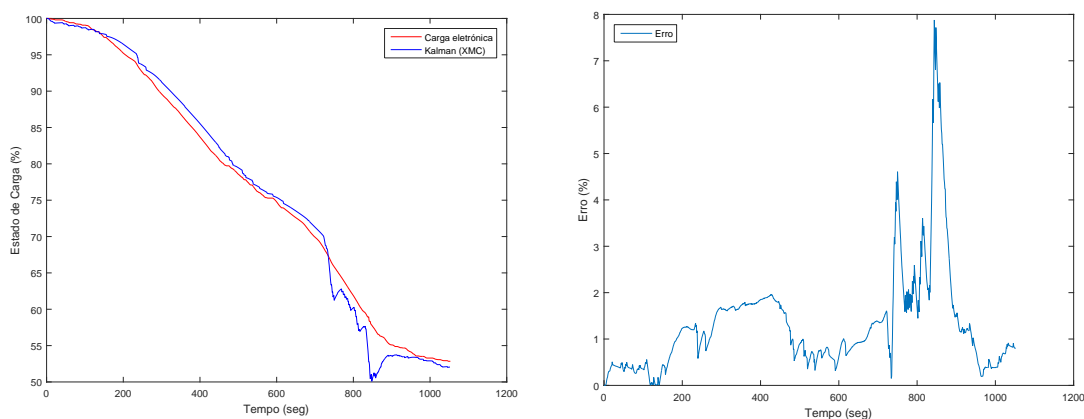
Esta variação de velocidades foi traduzida em dois perfis de correntes pulsadas representados nos gráficos das Figuras D.13, para o ciclo *Artemis Motorway 130 km/h*, e D.17, para o ciclo *Artemis Motorway 150 km/h*, no Anexo D.



(a) Variação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso Artemis Motorway 130 km/h

(b) Erro da estimação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso Artemis Motorway 130 km/h

Figura 5.22: SOC e Erro da estimação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso Artemis Motorway 130 km/h



(a) Variação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso Artemis Motorway 150 km/h  
 (b) Erro da estimação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso Artemis Motorway 150 km/h

Figura 5.23: SOC e Erro da estimação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso Artemis Motorway 150 km/h

Depois de obtidos os perfis de corrente pulsada foi possível aplicá-los em duas descargas de uma bateria e foram obtidos os resultados presentes nas Figuras 5.22 e 5.23. Como é visível pela análise dos gráficos, os erros mantiveram-se dentro de valores aceitáveis, tendo sido obtido um erro máximo inferior a 2% no caso do ciclo *Motorway 130 km/h* e inferior a 8% no ciclo *Motorway 150 km/h*.

### 5.3.4 Percursos US EPA

Além dos ciclos europeus também existem os testes normalizados americanos da *Environmental Protection Agency* (EPA) [41]. Há vários modelos de ciclos de teste em dinamómetro, sendo que para os efeitos de teste desta dissertação só vão ser utilizados três percursos: *EPA Federal Test Procedure*, *EPA Highway Fuel Economy Test* e *EPA Urban Dynamometer Driving Schedule*.

#### 5.3.4.1 EPA Urban Dynamometer Driving Schedule

Também conhecido como "LA4" ou "*the city test*", o ciclo *EPA Urban Dynamometer Driving Schedule* representa condições de condução citadina [41]. A velocidade ao longo deste percurso está representada na Figura 5.24.



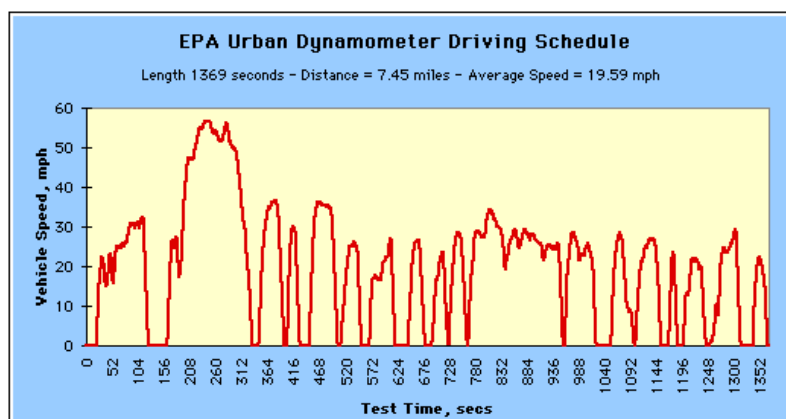
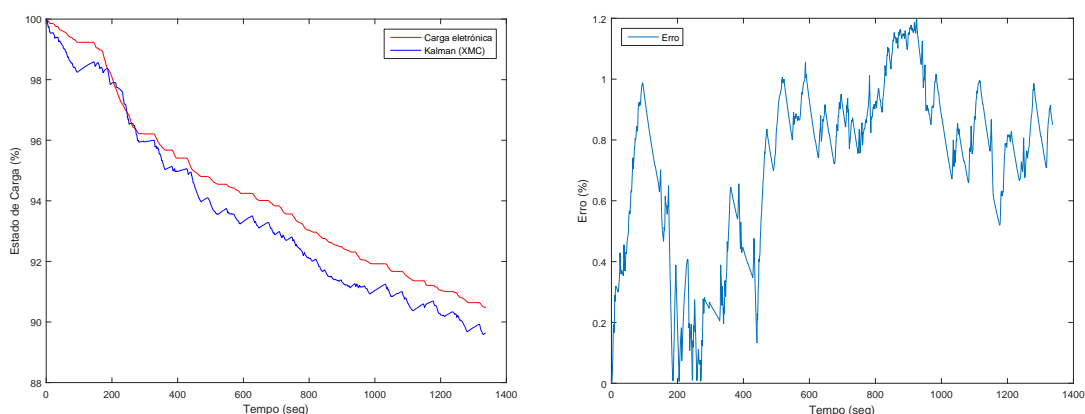


Figura 5.24: Variação de velocidade no percurso EPA UDDS [41]

Esta variação de velocidade foi convertida numa variação de corrente a ser retirada à bateria conforme representado na Figura D.29, no Anexo D e foram obtidos os resultados presentes na Figura 5.25.



(a) Variação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso EPA UDDS  
(b) Erro da estimativa do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso EPA UDDS

Figura 5.25: SOC e Erro da estimativa do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso EPA UDDS

Pela análise destes resultados é possível verificar que os resultados também se mostram satisfatórios, tendo sido novamente obtida uma aproximação com um erro máximo inferior a 1.2%.

### 5.3.4.2 EPA Federal Test Procedure

O ciclo *EPA Federal Test Procedure* é composto pelo teste *EPA Urban Dynamometer Driving Schedule* seguido pelos 505 segundos iniciais do mesmo teste. Também é conhecido por "EPA75"[41]. A velocidade ao longo deste percurso está representada na Figura 5.26.

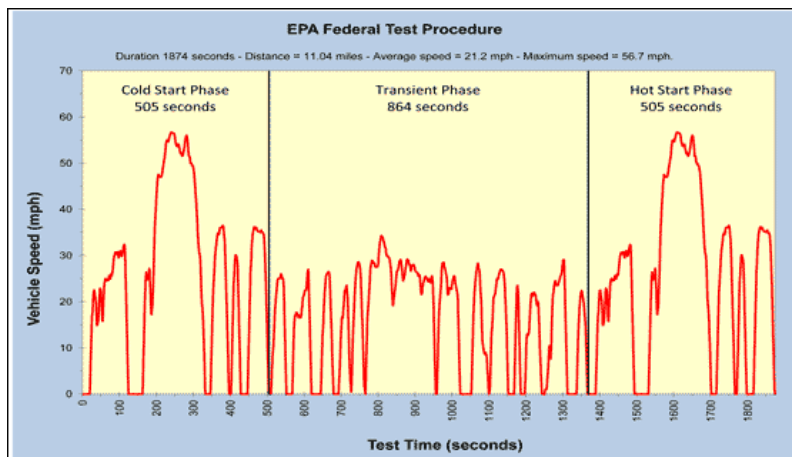
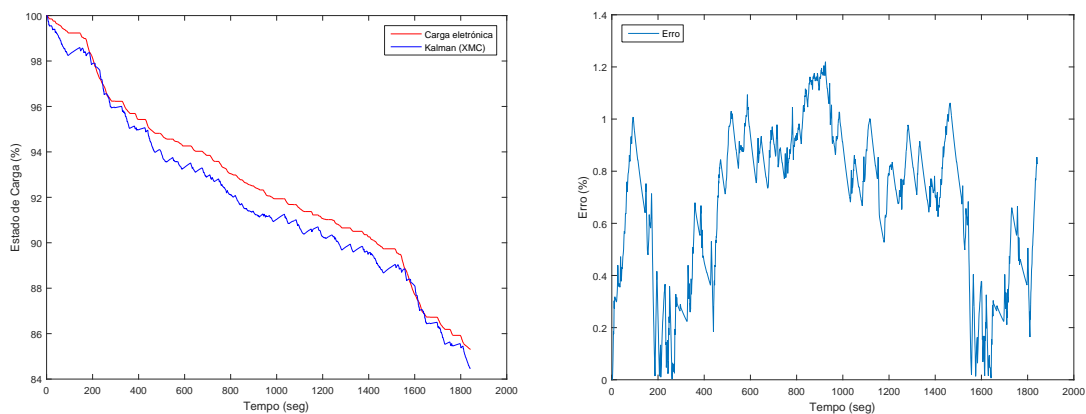


Figura 5.26: Variação de velocidade no percurso EPA Federal Test Procedure [41]

A partir deste perfil de velocidade, foi feito um perfil de corrente de descarga para uma bateria. Esse perfil está representado na Figura D.21 no Anexo D.



(a) Variação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso EPA FTP (b) Erro da estimativa do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso EPA FTP

Figura 5.27: SOC e Erro da estimativa do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso EPA FTP

Foram obtidos os resultados presentes na Figura 5.27. Analisada a variação do erro desta estimativa, é perceptível que o erro máximo rondou os 1,2%, tal como no ciclo anterior.

### 5.3.4.3 EPA Highway Fuel Economy Test

O ciclo final escolhido trata-se de uma representação de um percurso em auto-estrada com velocidades inferiores a 100 km/h (60 mph) [41]. A velocidade ao longo deste percurso está representada na Figura 5.28.

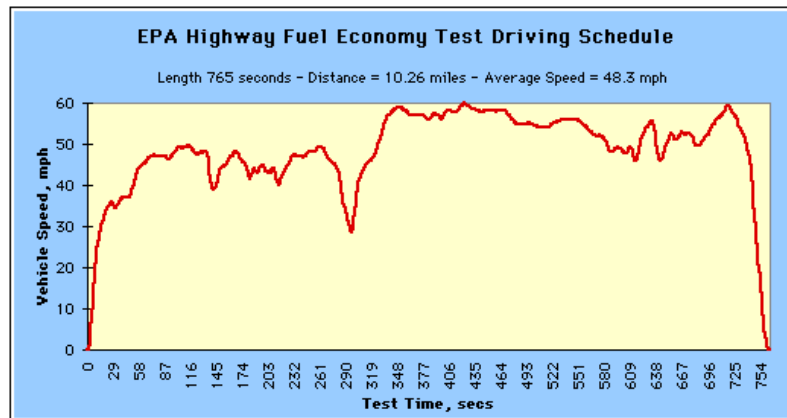
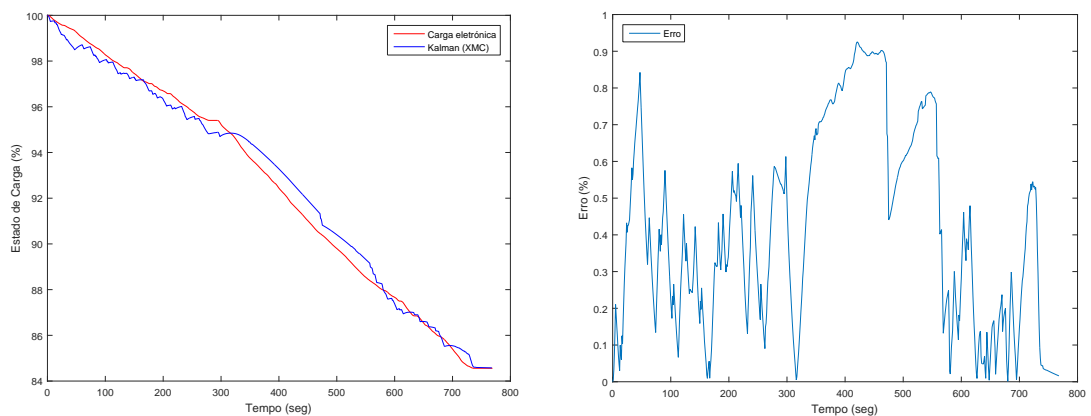


Figura 5.28: Variação de velocidade no percurso EPA Highway Fuel Economy Test [41]

Mais uma vez esta variação de velocidade foi traduzida numa variação de corrente retirada à bateria, tal como representado na Figura D.25 no Anexo D.



(a) Variação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso EPA HWFET  
(b) Erro da estimação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso EPA HWFET

Figura 5.29: SOC e Erro da estimação do SOC numa descarga pulsada segundo o percurso EPA HWFET

Analisando os resultados da Figura 5.29 pode-se afirmar que mais uma vez a estimação se manteve muito próxima do valor real, tendo sido obtido um erro máximo inferior a 1%.

### 5.3.5 Erros de estimação do SOC

Depois de todos os testes realizados é possível fazer a comparação dos erros e obter um panorama global do comportamento do estimador. Assim sendo, na Tabela 5.3 estão presentes os erros máximos e médios durante os testes com cada um dos ciclos apresentados previamente.

Como se pode verificar, o estimador teve um comportamento muito próximo dos valores reais, tendo sido obtido um erro máximo absoluto inferior a 9% e um erro médio máximo de 1,3%.

Tabela 5.3: Comparação dos erros obtidos nos diferentes ciclos utilizados

	NEDC	Artemis				EPA		
		Urban	Rural	MW 130	MW 150	UDDS	FTP	HWFET
Erro médio (%)	0,5981	0,4997	0,5574	0,8868	1,304	0,7168	0,6726	0,418
Erro máximo (%)	8,5601	0,88	1,101	1,9192	7,88	1,1997	1,2198	0,9253

## 5.4 Conclusões

Depois de realizados todos os testes em tempo real é possível afirmar que o sistema é robusto e tem um comportamento satisfatório e dentro do esperado a partir dos resultados obtidos antes da implementação em tempo real.

Foram replicados os testes em [1] para obter uma base de comparação. Depois de validados os resultados obtidos na simulação no micro-controlador, passou-se à implementação do algoritmo em tempo real. Com a exceção do teste com recurso ao ciclo NEDC, todas as estimações das descargas pulsadas se mostraram próximas da realidade, com um erro médio sempre inferior aos 2%. Mesmo nos piores casos o estimador foi capaz de obter um erro máximo inferior a 9%, inferior aos erros de 25% dos estimadores atuais relatados por utilizadores de veículos elétricos.

## Capítulo 6

# Conclusão e trabalho futuro

### 6.1 Conclusão

O objetivo central desta dissertação envolvia, essencialmente, o desenvolvimento de um estimador em tempo real do SOC de cada uma das células da bateria do VEC da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Este documento aborda todo o estudo envolvido para a definição da abordagem escolhida, assim como todos os processos do desenvolvimento do sistema e os resultados obtidos nos diferentes passos do projeto. Foi feito um estudo aos diferentes tipos de baterias existentes, assim como aos estimadores do SOC atuais. Dado que vários estimadores necessitam de um modelo de bateria, inclusivamente o método escolhido, foi também realizado um estudo aos diferentes modelos de baterias existentes.

Completado o estudo foram feitas as decisões relativas à abordagem a adotar. Foi decidida que a bateria a utilizar seria uma bateria de polímeros de íões Lítio, com 11Ah de capacidade, o Filtro de *Kalman* Estendido como estimador e um modelo elétrico de bateria baseado nas equações da difusão. O estimador foi escolhido com base nos baixos erros, de acordo com a bibliografia encontrada. A par do desenvolvimento do modelo, foram também estudados os parâmetros e inicializações desses mesmos modelos. Esta fase é de extrema importância no EKF, ao contrário do que sucede com o KF linear.

Seguidamente foi feita a implementação do modelo no Matlab para comprovar o seu bom funcionamento. Tanto o modelo como o EKF revelaram resultados muito próximos dos valores reais, comprovando que o sistema é robusto. Depois de validados os resultados, passou-se à conversão do sistema discretizado para linguagem C para posterior implementação em tempo real. Esta conversão demonstrou também resultados satisfatórios, permitindo assim que o algoritmo fosse implementado no micro-controlador. Feita essa implementação foram feitos testes em tempo real a resposta do sistema. Nesses testes foram realizadas descargas a corrente constante a uma bateria de 11Ah e a outra de 10Ah. Depois, utilizando apenas baterias de 11Ah, foram realizadas descargas com correntes pulsadas. Essas correntes foram calculadas com base em testes normalizados feitos a veículos com motores de combustão interna a fim de testar as suas emissões. Tanto nos

testes com correntes constantes, como nos testes com correntes pulsadas os resultados obtidos foram satisfatórios e comprovaram o bom funcionamento do sistema estimador.

Apesar dos bons resultados obtidos, tanto nas simulações como em tempo real, o sistema requer algumas melhorias, uma vez que o mesmo não tem em conta o envelhecimento da bateria e, caso seja aplicado a baterias com outra capacidade, necessita de afinação nos parâmetros do modelo.

## 6.2 Trabalho futuro

Tal como referido, este sistema tem algumas fraquezas que merecem atenção, nomeadamente na medida em que o envelhecimento de uma bateria é um fator de elevada importância e que afeta consideravelmente o funcionamento da mesma. Uma vez que a capacidade efetiva de uma bateria é diminuída a cada ciclo de descarga, os resultados deste estimador serão tanto piores quanto maior a utilização da bateria uma vez que o mesmo tem em conta apenas a capacidade nominal da bateria. Por outro lado, será também necessário aplicar este modelo num pack de baterias.

Além da estimação do SOC, outra importante função de um sistema de gestão de baterias é a gestão da temperatura das mesmas. Assim sendo, numa seguinte fase do projeto seria interessante combinar a estimação do SOC da bateria com o modelo térmico da mesma e assim poder ter uma melhor gestão do estado de saúde.

## Anexo A

# Placa de aquisição de tensão e corrente da bateria

Para poder implementar o estimador em tempo real no micro-controlador foi necessário desenvolver uma plataforma de *hardware* capaz de converter os valores de tensão e corrente da bateria em valores interpretáveis pelo o ADC do controlador. Desta forma foi desenvolvida a placa de circuito impresso representada na Figura A.1 cujo circuito está presente na Figura A.2.

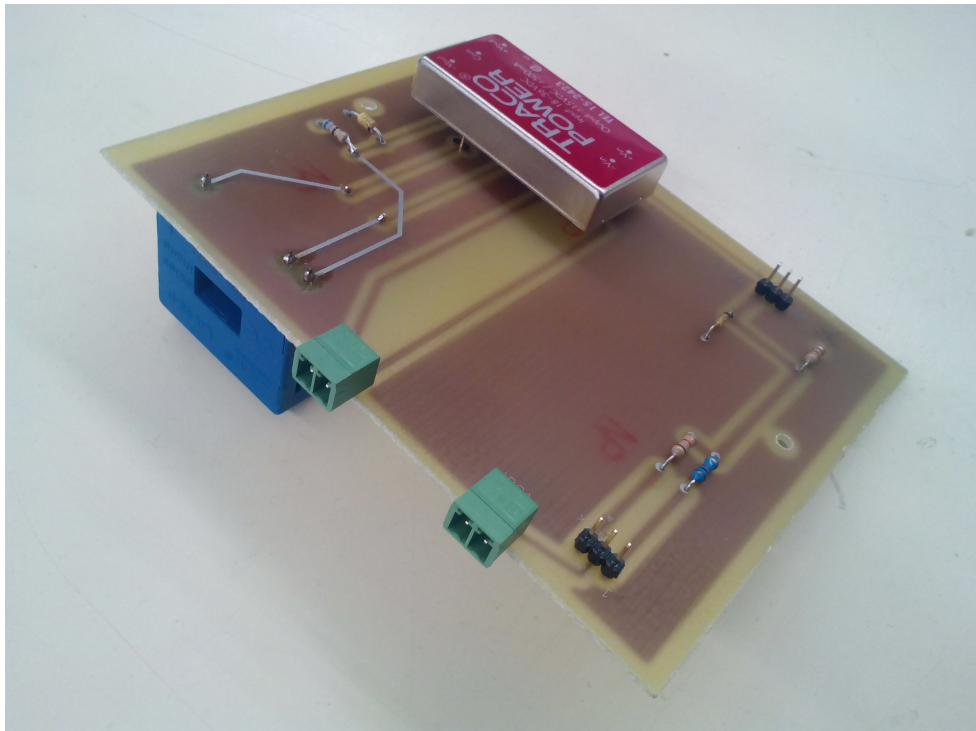


Figura A.1: Placa de circuito impresso desenvolvida

A placa conta com a possibilidade de adquirir valores para o módulo de 6 séries de 4 células em paralelo ou para apenas uma só célula. Essa seleção é feita através da colocação de um *jumper*

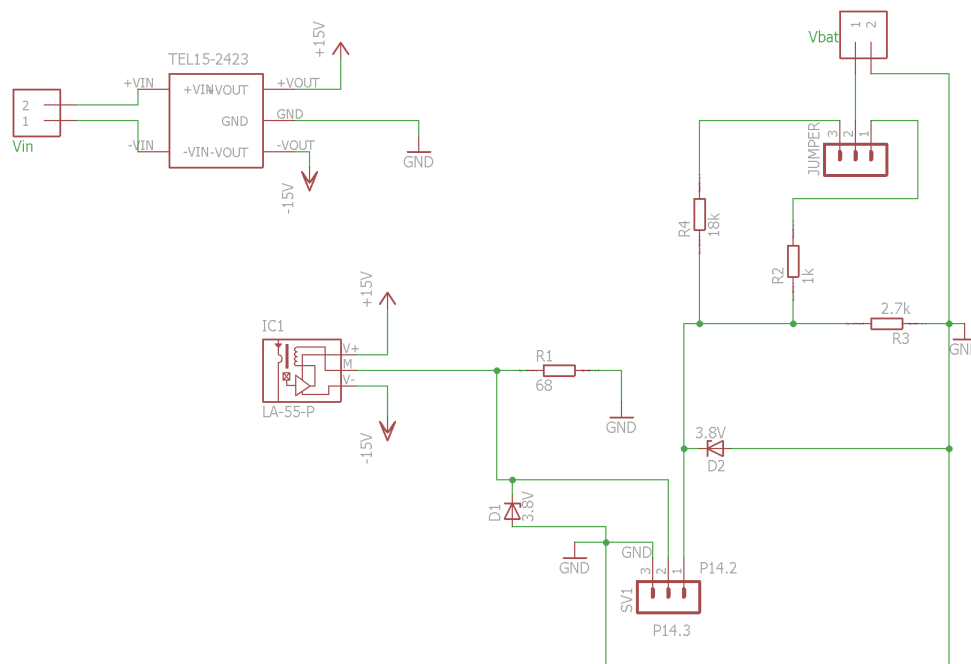


Figura A.2: Circuito da placa de aquisição

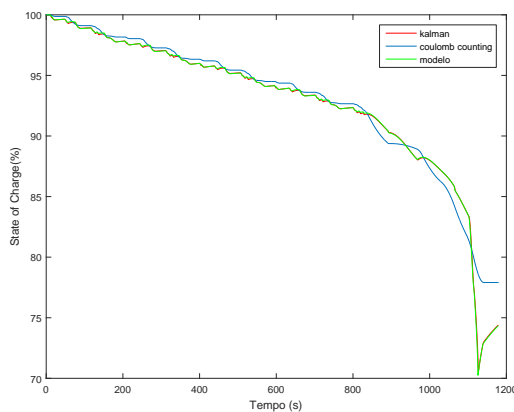
nos pinos presentes junto ao conector de aquisição (Vbat). O sensor de corrente utilizado é um sensor bidirecional LEM LA 55-P. Este sensor de Hall tem um ganho de 1:1000 [42]. Dado que o sensor de corrente necessita de ser alimentado por duas tensões (+15V e -15V), foi utilizado um conversor DC-DC isolado da Traco Power TEL15-2423 que se alimenta a partir do módulo de baterias já que a tensão nominal do módulo são 22.2V e a gama de tensões de entrada do conversor é entre 18V e 36V.



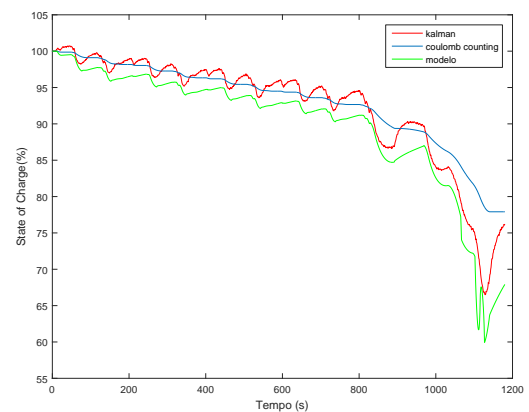
## Anexo B

# Resultados da implementação do algoritmo em linguagem C

Neste anexo estão representados em detalhe todos os comparativos entre as implementações do algoritmo em linguagem C e no Matlab, como referido no Capítulo 5.

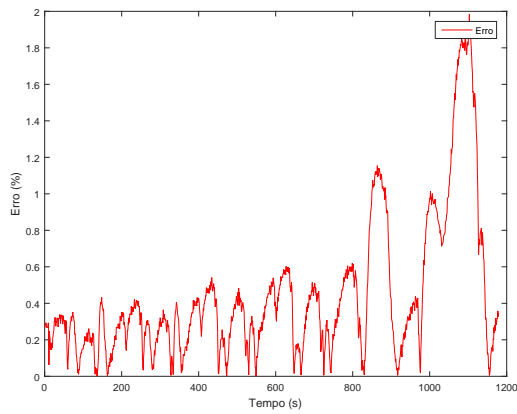


(a) Estimação do SOC no algoritmo em C

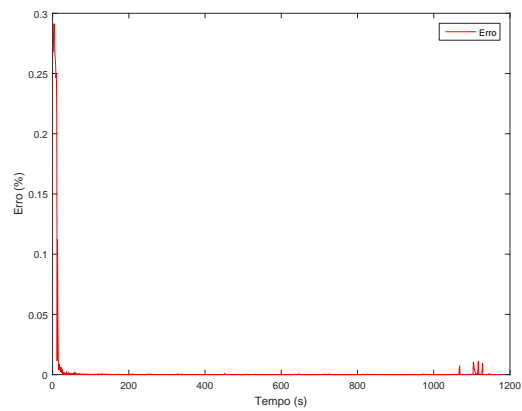


(b) Estimação do SOC no algoritmo em Matlab

Figura B.1: Comparação entre os algoritmos em C e Matlab

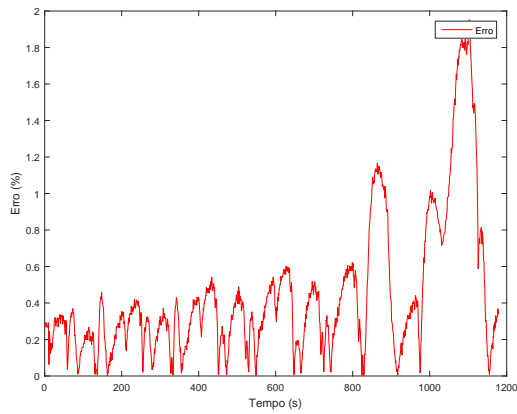


(a) Erro do KF no algoritmo em C

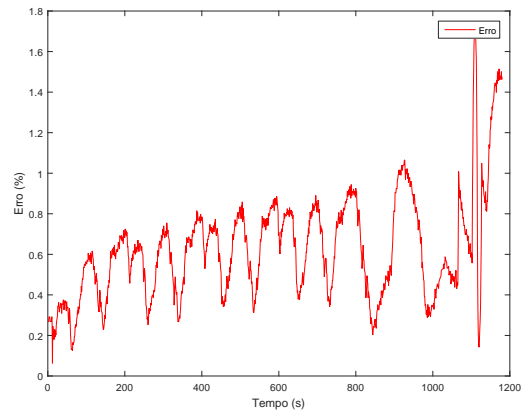


(b) Erro do KF no algoritmo em Matlab

Figura B.2: Comparação entre os erros estimados do KF em C e Matlab

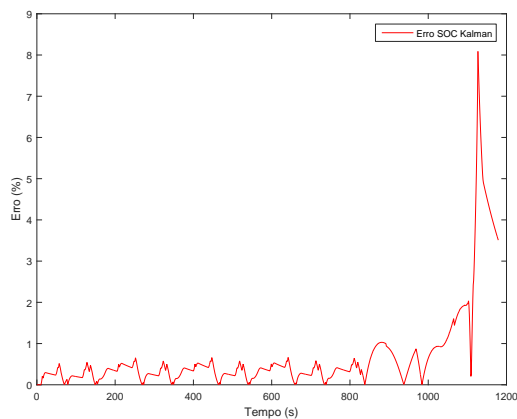


(a) Erro do modelo matemático no algoritmo em C

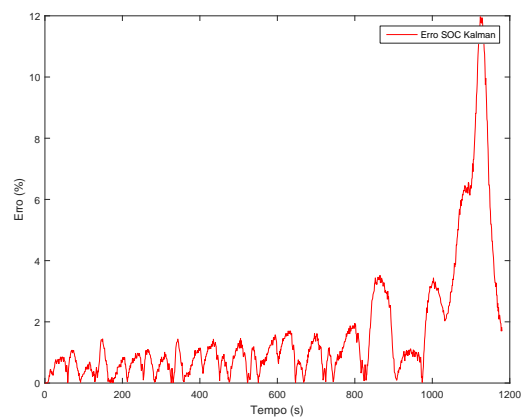


(b) Erro do modelo matemático em Matlab

Figura B.3: Comparação entre os erros estimados do modelo em C e Matlab

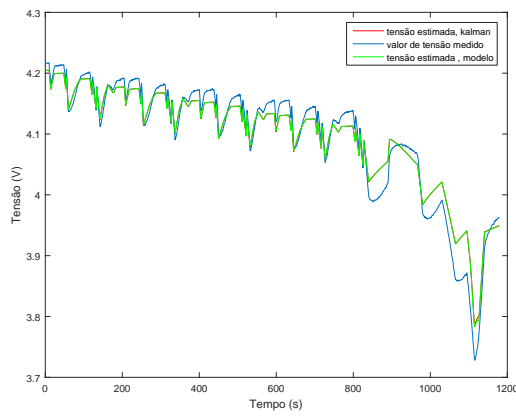


(a) Erro do SOC em C

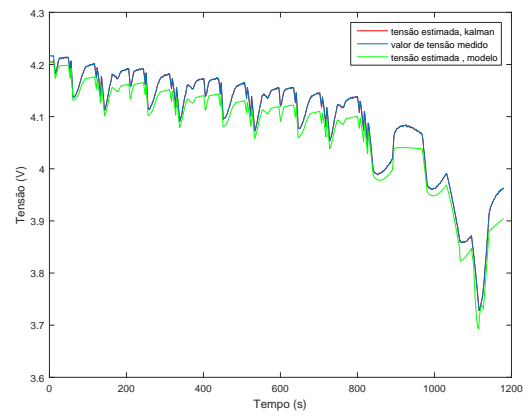


(b) Erro do SOC em Matlab

Figura B.4: Comparação entre os erros de estimação do SOC em C e Matlab



(a) Tensão de saída estimada em C



(b) Tensão de saída estimada em Matlab

Figura B.5: Comparação entre as estimações da tensão em C e Matlab



## Anexo C

# Descargas a 1C

Neste anexo estão presentes todos os resultados em detalhe das descargas a 1C de uma bateria de 11Ah e outra de 10Ah referidas no Capítulo 5.

### C.1 Bateria 11Ah

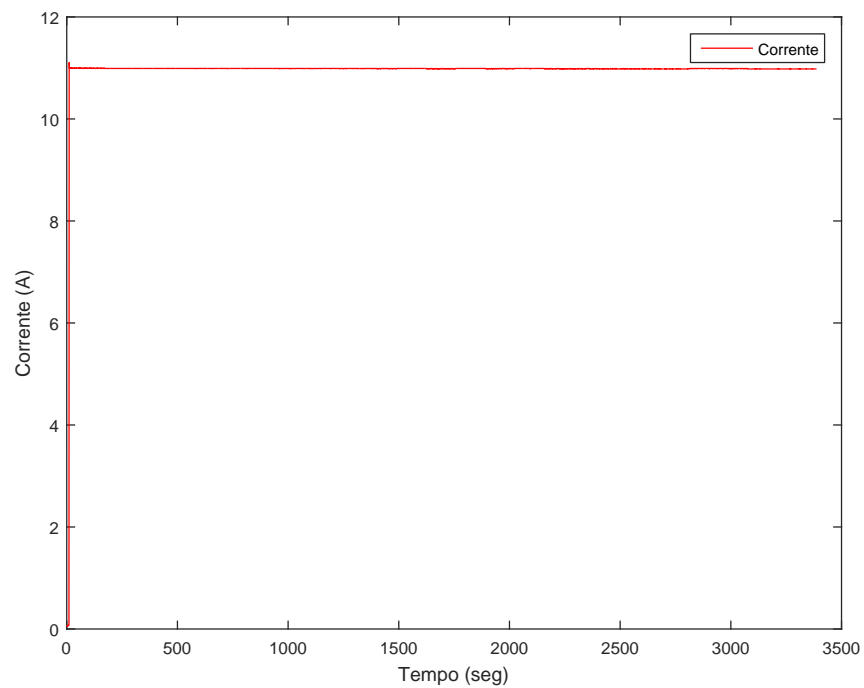


Figura C.1: Perfil de corrente na descarga a 1C de uma bateria de 11Ah

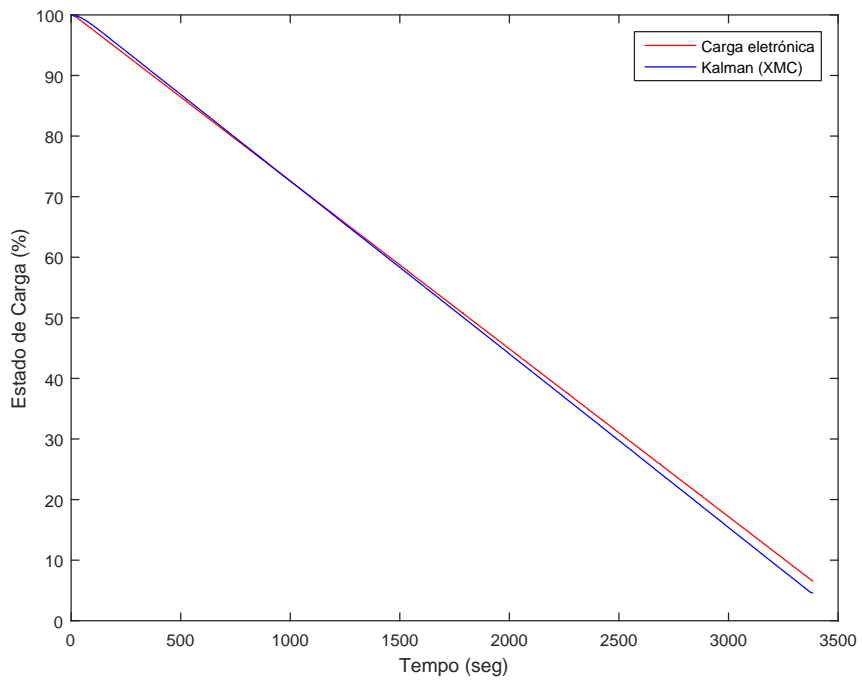


Figura C.2: Estimação do SOC na descarga a 1C de uma bateria de 11Ah

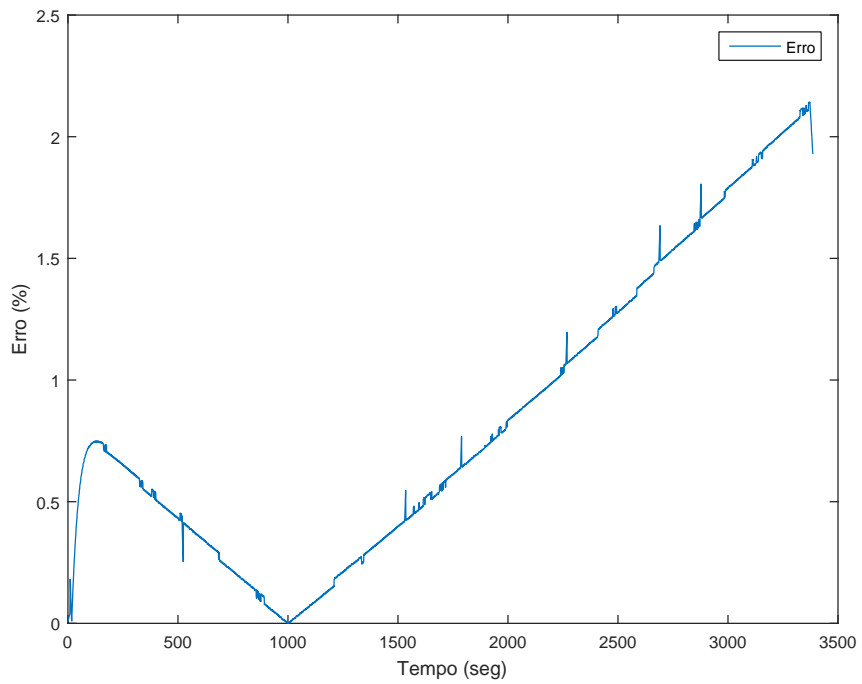


Figura C.3: Erro absoluto da estimativa do SOC na descarga a 1C de uma bateria de 11Ah

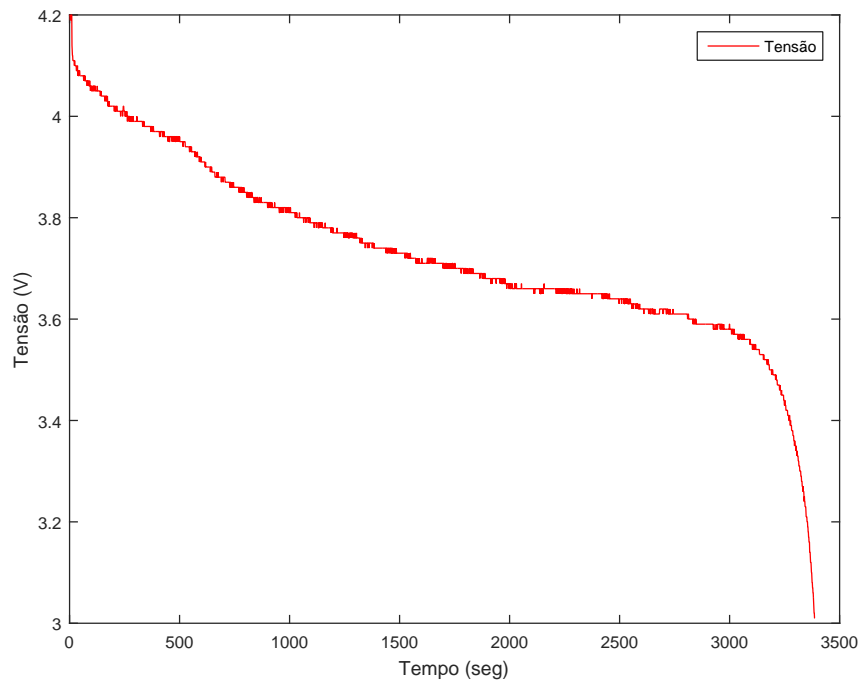


Figura C.4: Variação da tensão na descarga a 1C de uma bateria de 11Ah

## C.2 Bateria 10Ah

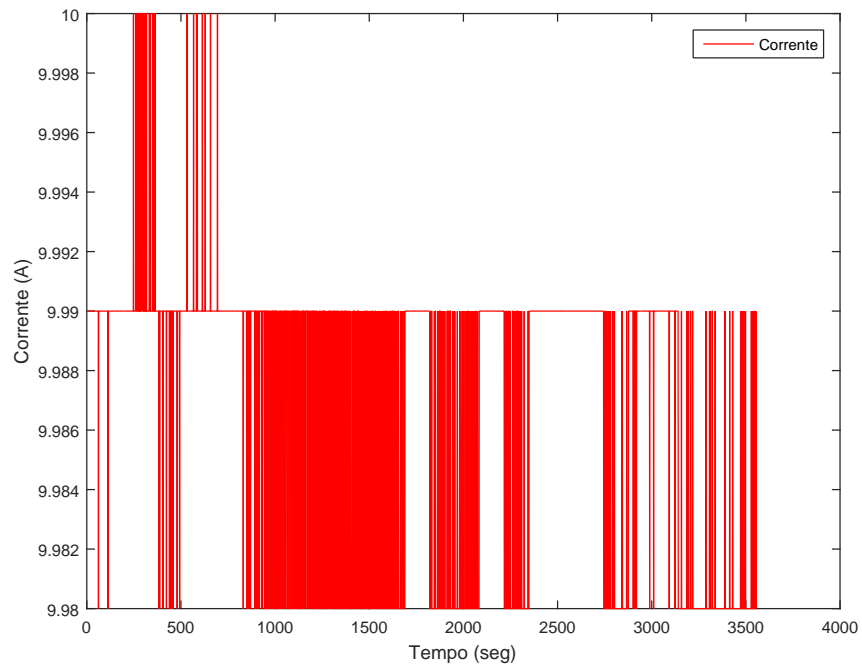


Figura C.5: Perfil de corrente na descarga a 1C de uma bateria de 10Ah

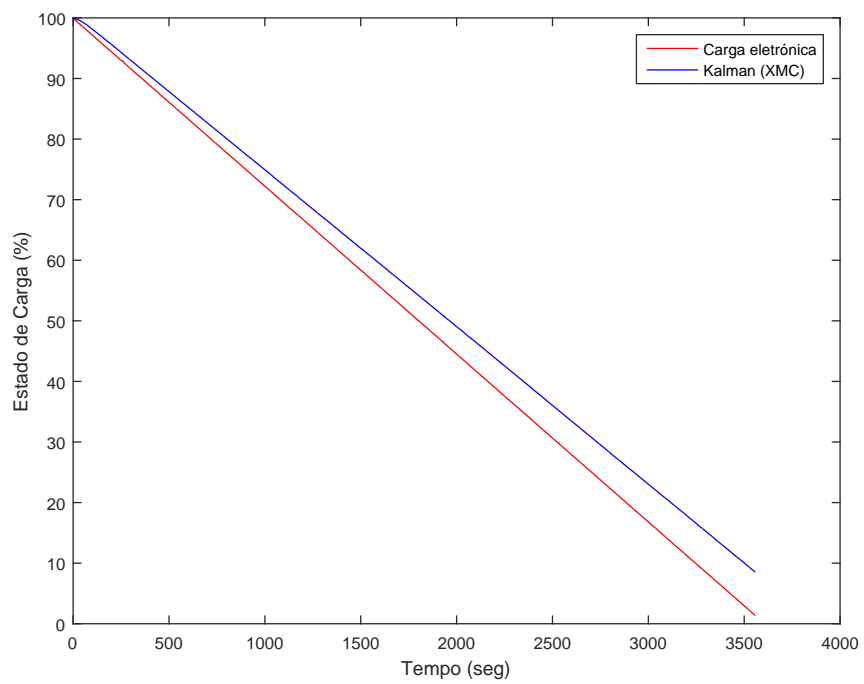


Figura C.6: Estimação do SOC na descarga a 1C de uma bateria de 10Ah

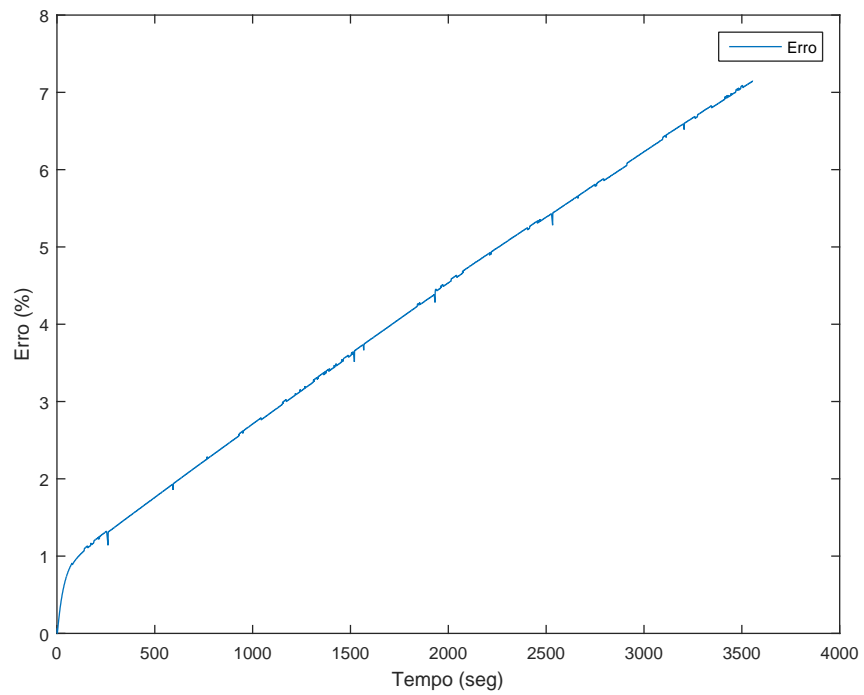


Figura C.7: Erro absoluto da estimação do SOC na descarga a 1C de uma bateria de 10Ah



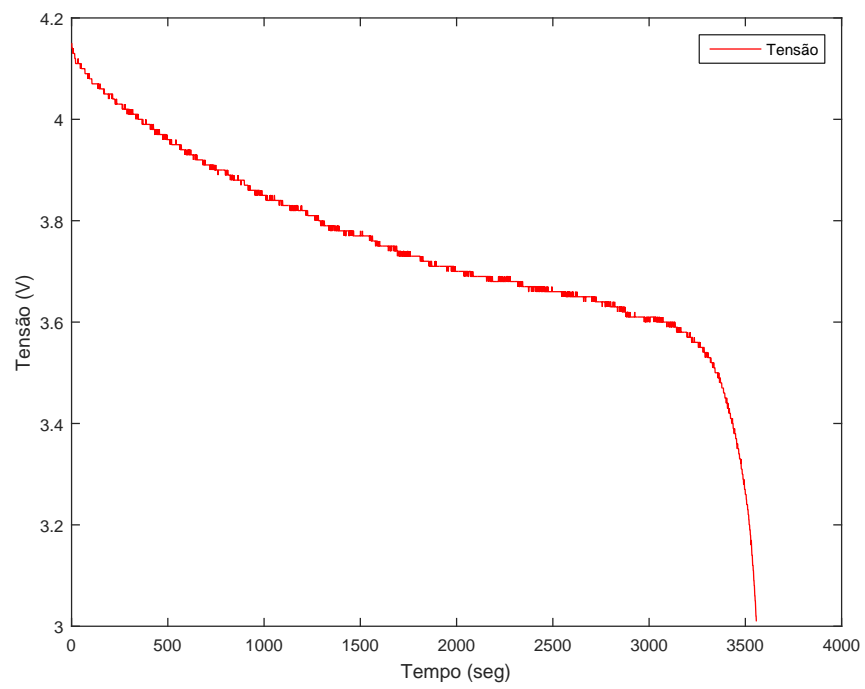


Figura C.8: Variação da tensão na descarga a 1C de uma bateria de 10Ah



## Anexo D

# Descargas pulsadas

Neste anexo estão presentes todos os resultados em detalhe das descargas com cargas pulsadas referidas no Capítulo 5. Estão representados os resultados dos testes com recurso aos ciclos NEDC, Artemis (Urban, Rural Road, e Motorway 130km/h e 150km/h) e EPA (Federal Test Procedure, Highway Fuel Economy Test e Urban).

### D.1 Percurso NEDC

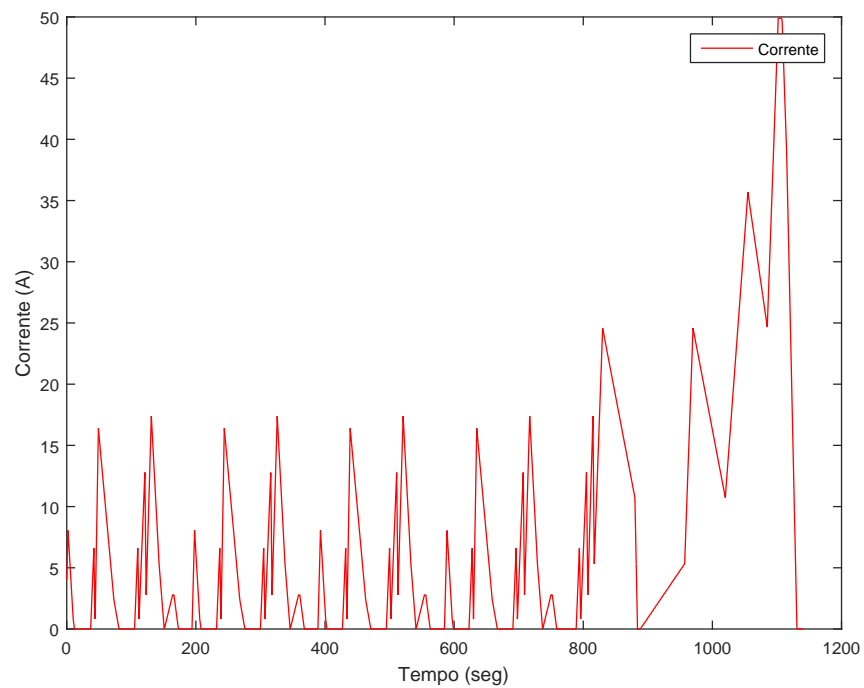


Figura D.1: Perfil de corrente de descarga segundo o percurso NEDC

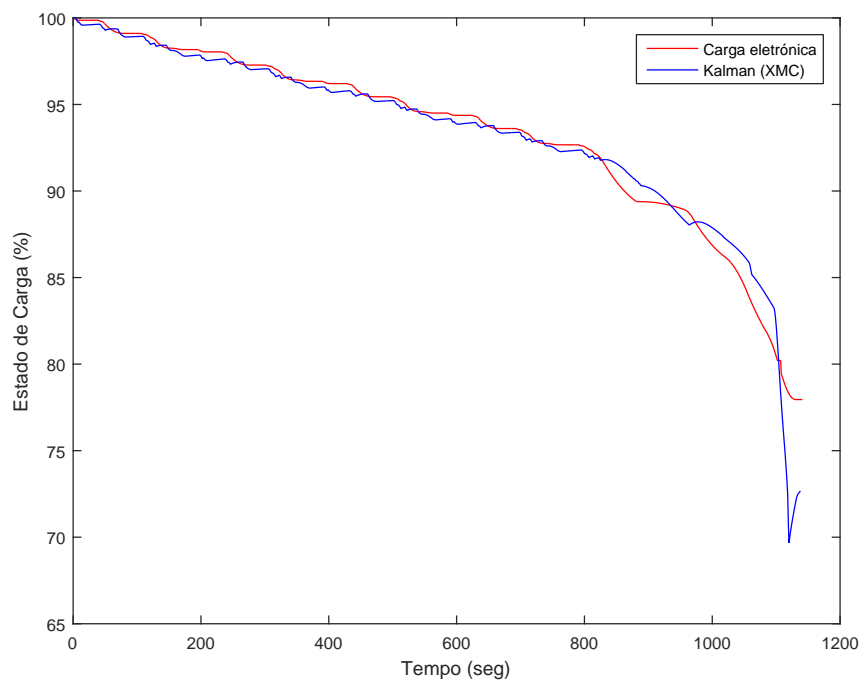


Figura D.2: Estimação do SOC na descarga segundo o percurso NEDC

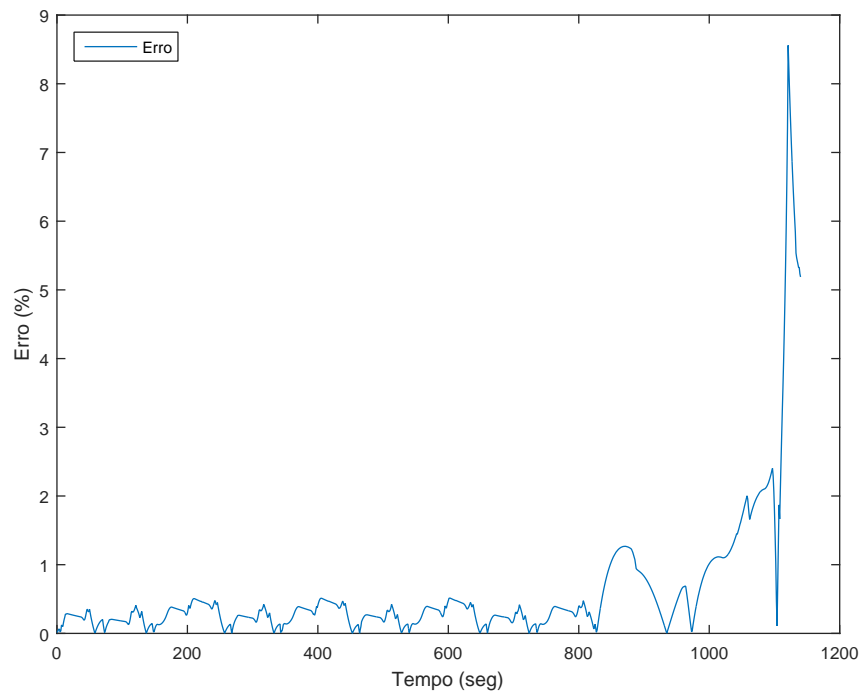


Figura D.3: Erro da estimativa do SOC na descarga segundo o percurso NEDC

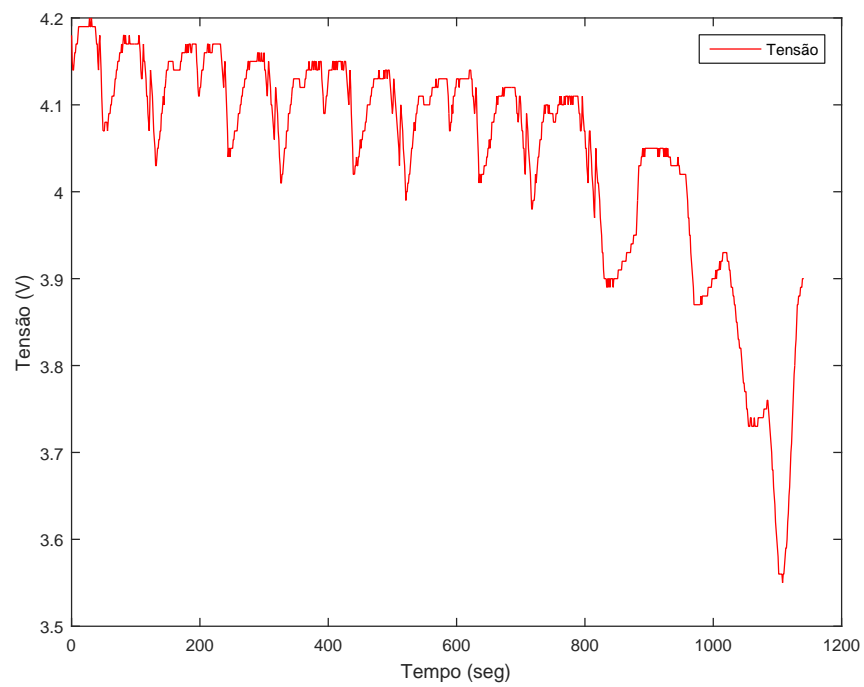


Figura D.4: Variação da tensão na descarga segundo o percurso NEDC

## D.2 Percursos Artemis

### D.2.1 Artemis Urban

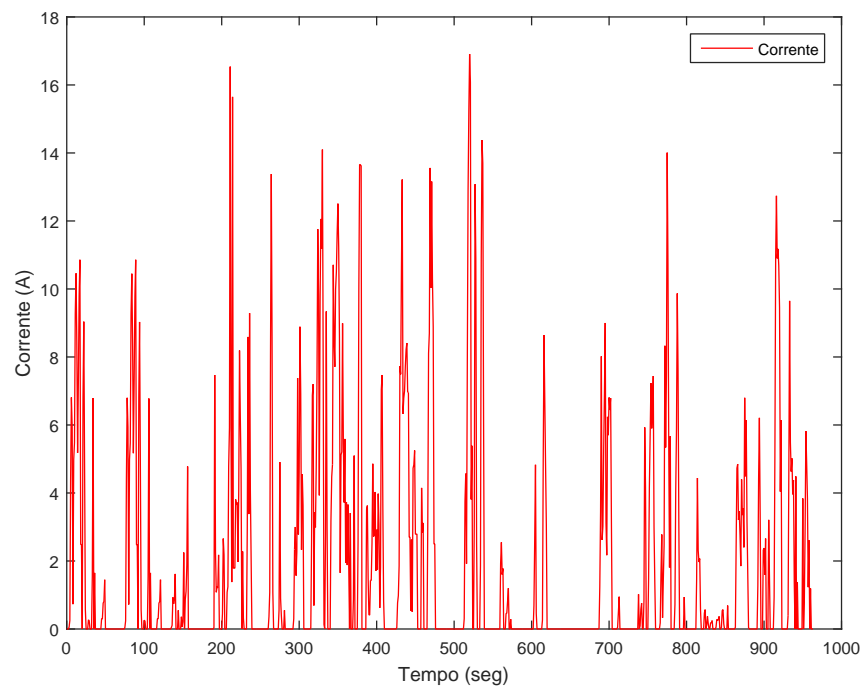


Figura D.5: Perfil de corrente de descarga segundo o percurso Artemis Urban

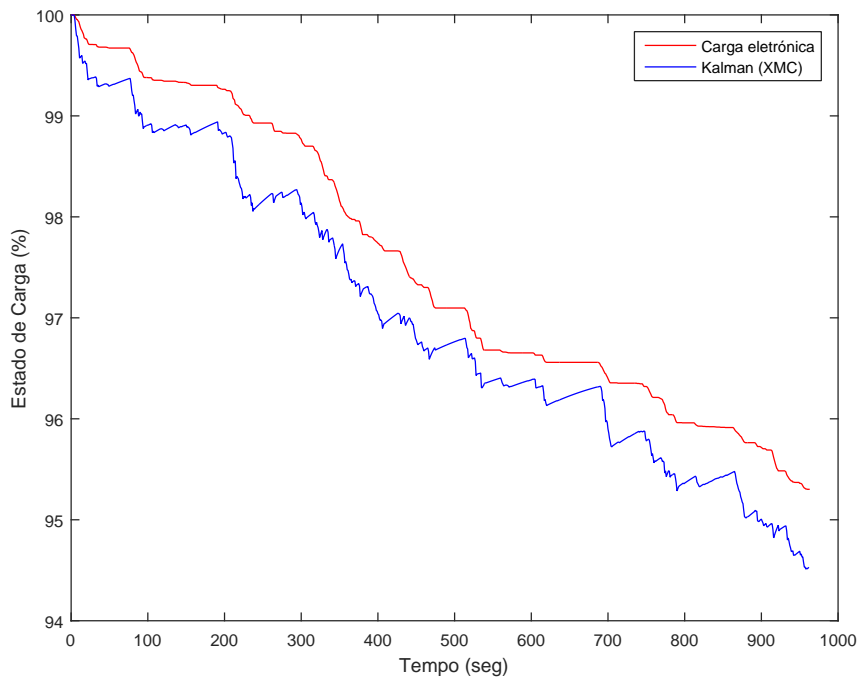


Figura D.6: Estimação do SOC na descarga segundo o percurso Artemis Urban

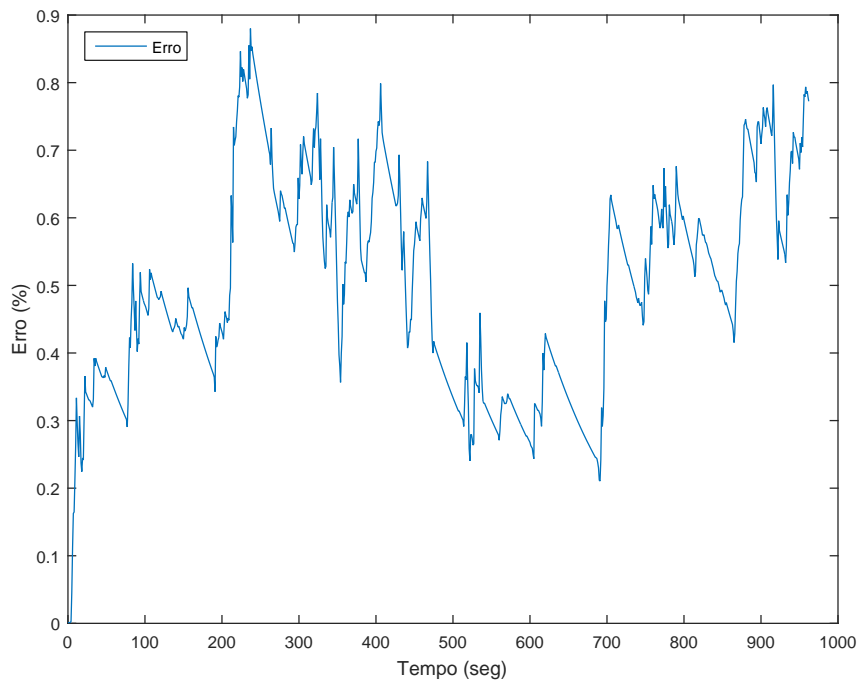


Figura D.7: Erro da estimativa do SOC na descarga segundo o percurso Artemis Urban

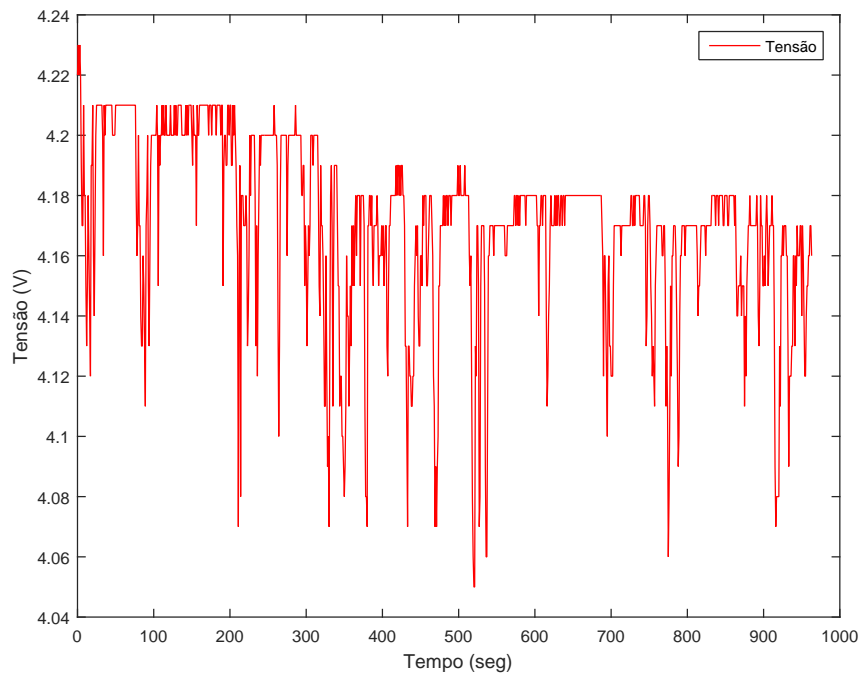


Figura D.8: Variação da tensão na descarga segundo o percurso Artemis Urban

### D.2.2 Artemis Rural Road

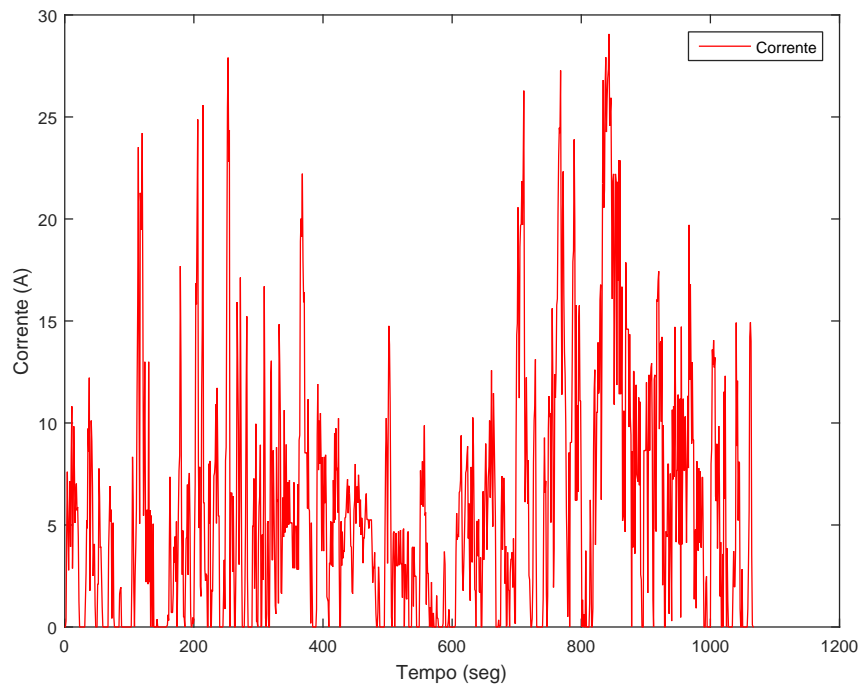


Figura D.9: Perfil de corrente de descarga segundo o percurso Artemis Rural

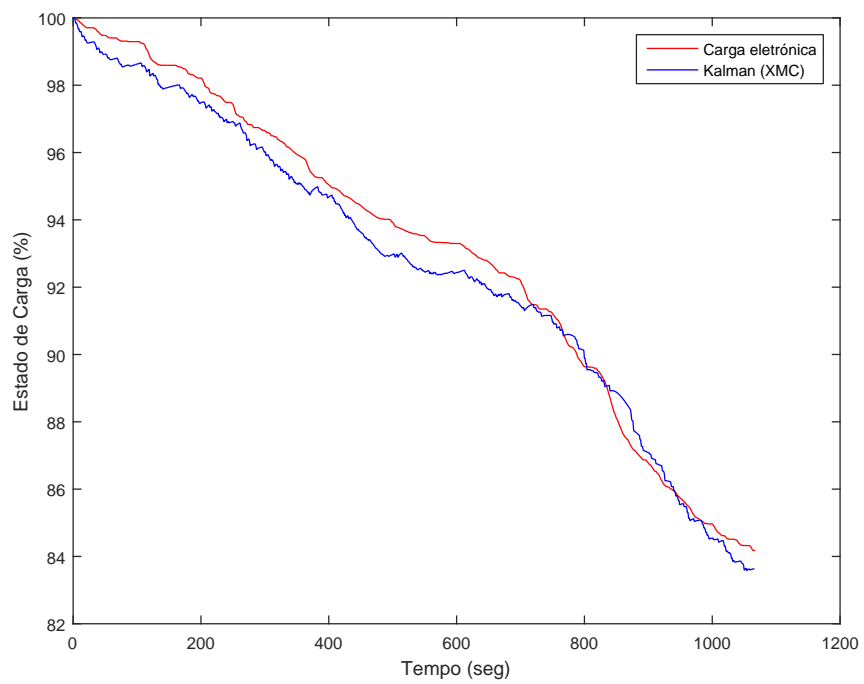


Figura D.10: Estimação do SOC na descarga segundo o percurso Artemis Rural

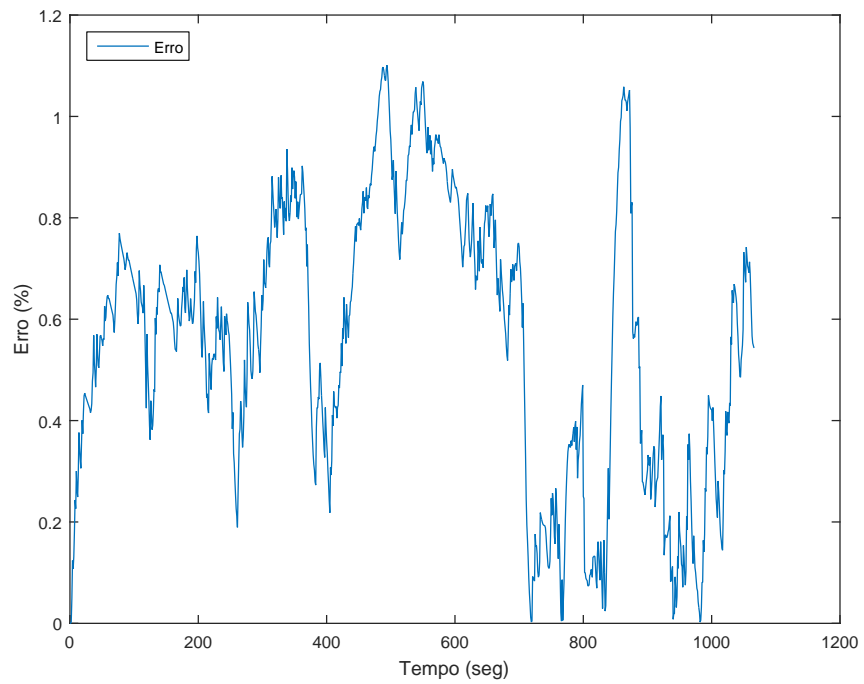


Figura D.11: Erro da estimativa do SOC na descarga segundo o percurso Artemis Rural



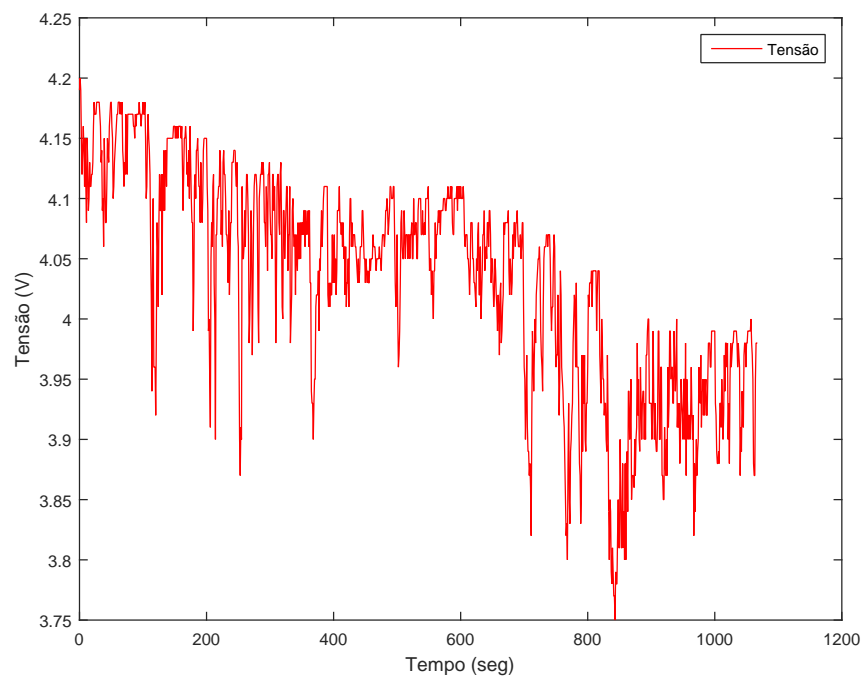


Figura D.12: Variação da tensão na descarga segundo o percurso Artemis Rural

### D.2.3 Artemis Motorway 130km/h

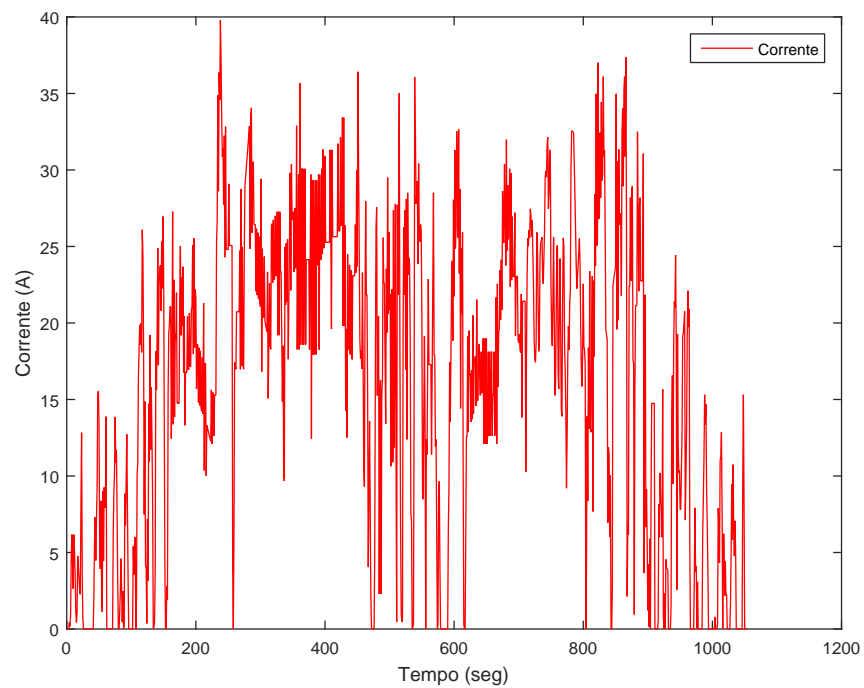


Figura D.13: Perfil de corrente de descarga segundo o percurso Artemis Motorway 130 km/h

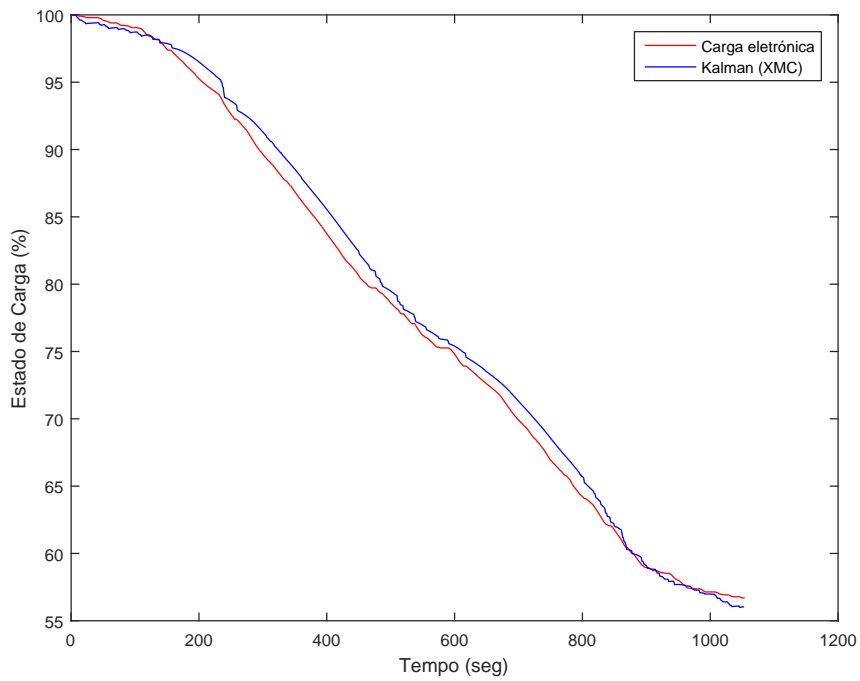


Figura D.14: Estimação do SOC na descarga segundo o percurso Artemis Motorway 130 km/h

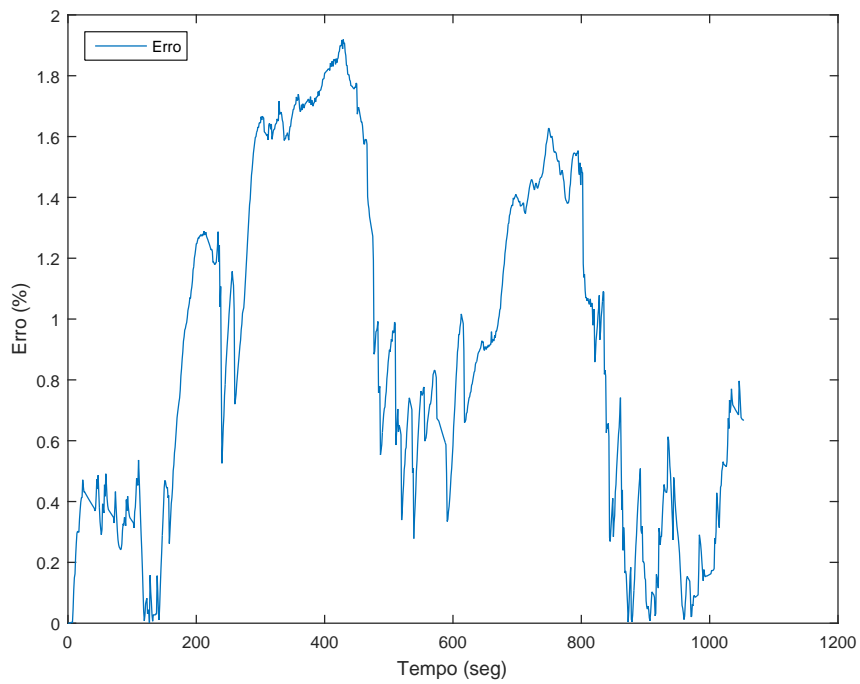


Figura D.15: Erro da estimativa do SOC na descarga segundo o percurso Artemis Motorway 130 km/h

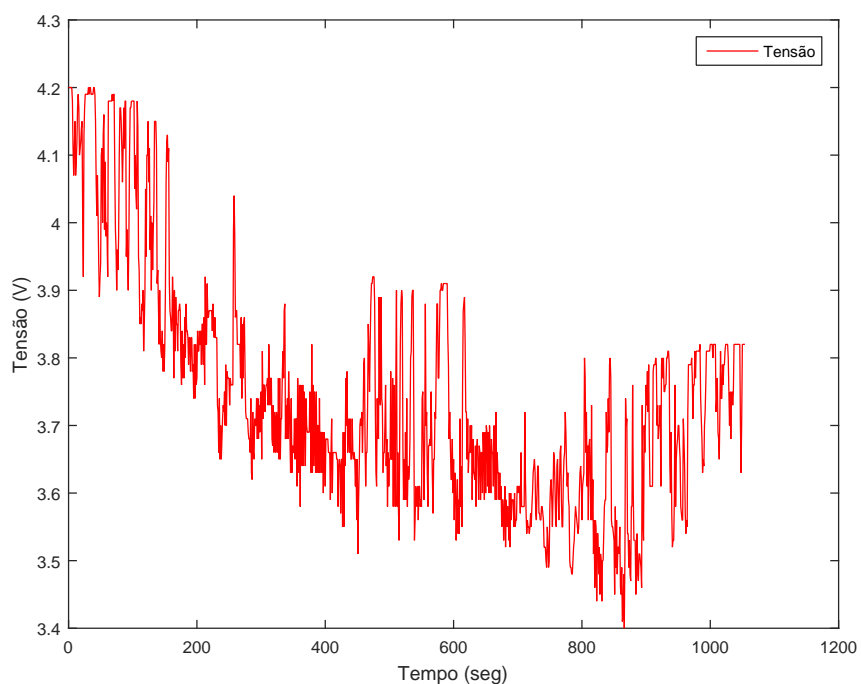


Figura D.16: Variação da tensão na descarga segundo o percurso Artemis Motorway 130 km/h

### D.2.4 Artemis Motorway 150km/h

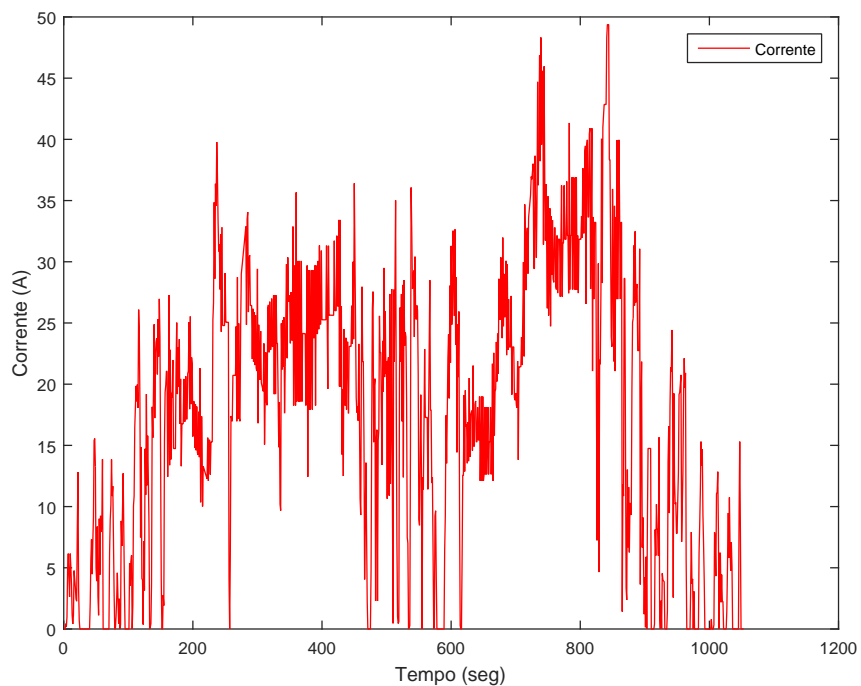


Figura D.17: Perfil de corrente de descarga segundo o percurso Artemis Motorway 150 km/h

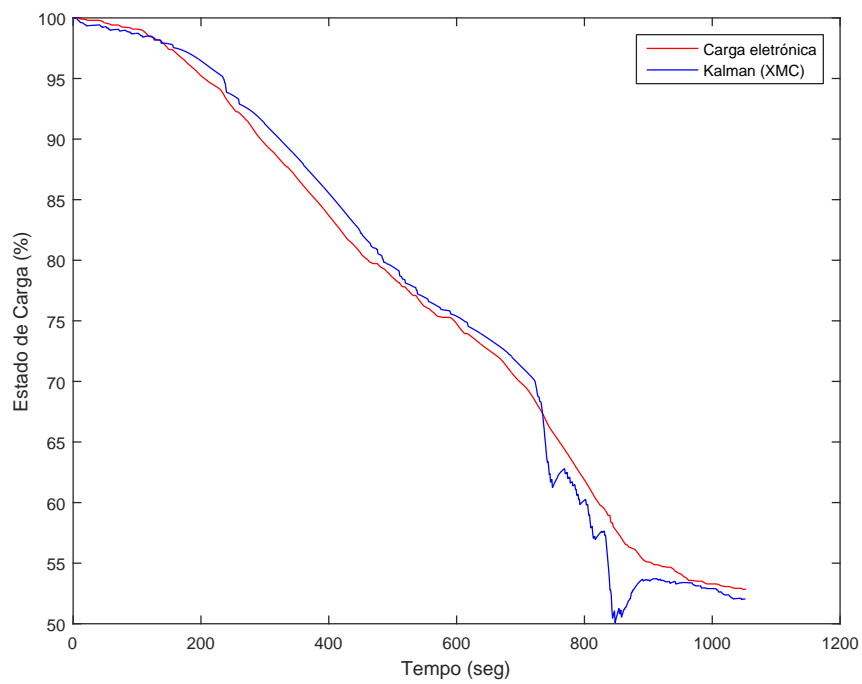


Figura D.18: Estimação do SOC na descarga segundo o percurso Artemis Motorway 150 km/h

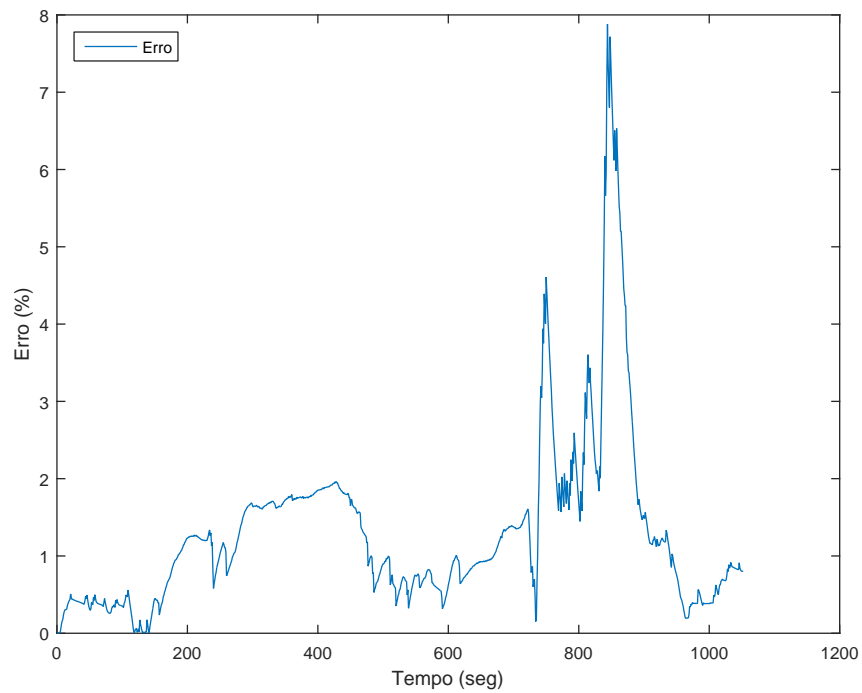


Figura D.19: Erro da estimativa do SOC na descarga segundo o percurso Artemis Motorway 150 km/h

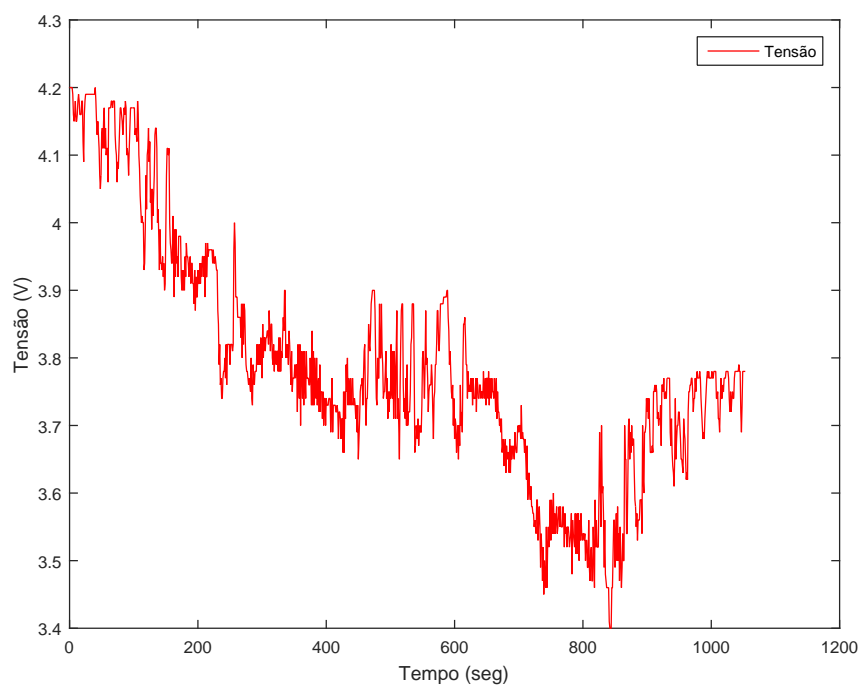


Figura D.20: Variação da tensão na descarga segundo o percurso Artemis Motorway 150 km/h

## D.3 Percursos EPA

### D.3.1 EPA Federal Test Procedure

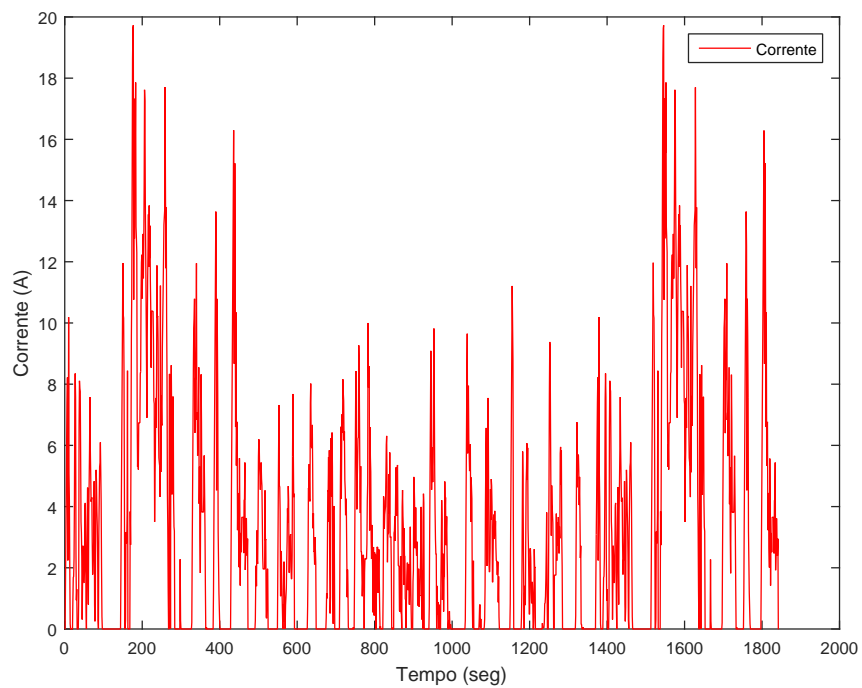


Figura D.21: Perfil de corrente de descarga segundo o percurso EPA FTP

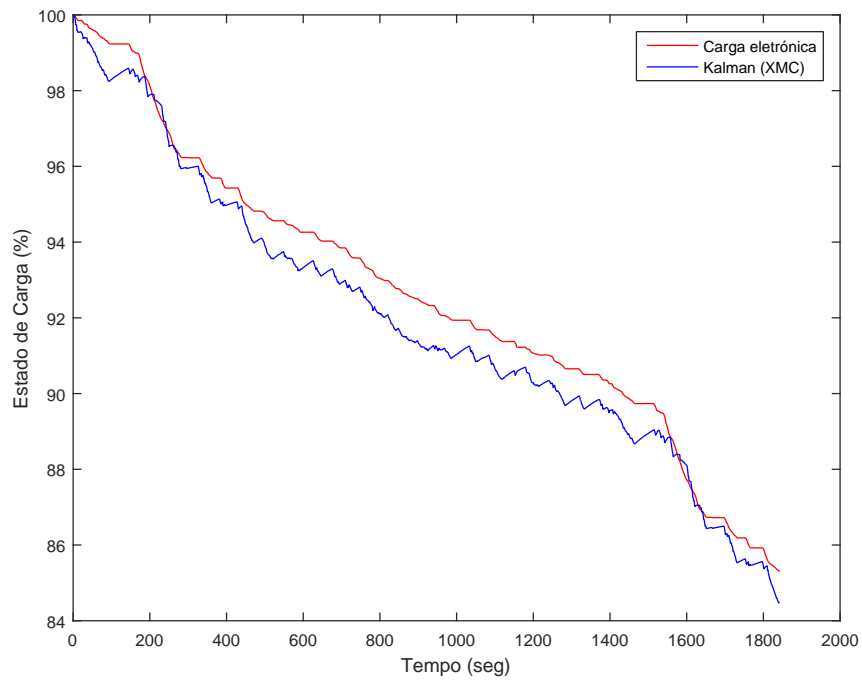


Figura D.22: Estimação do SOC na descarga segundo o percurso EPA FTP

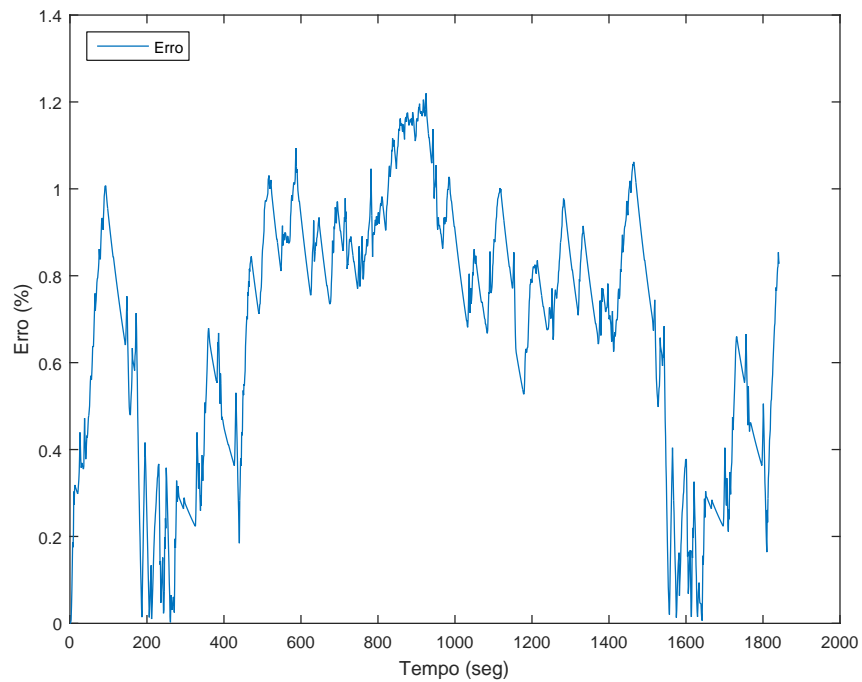


Figura D.23: Erro da estimativa do SOC na descarga segundo o percurso EPA FTP

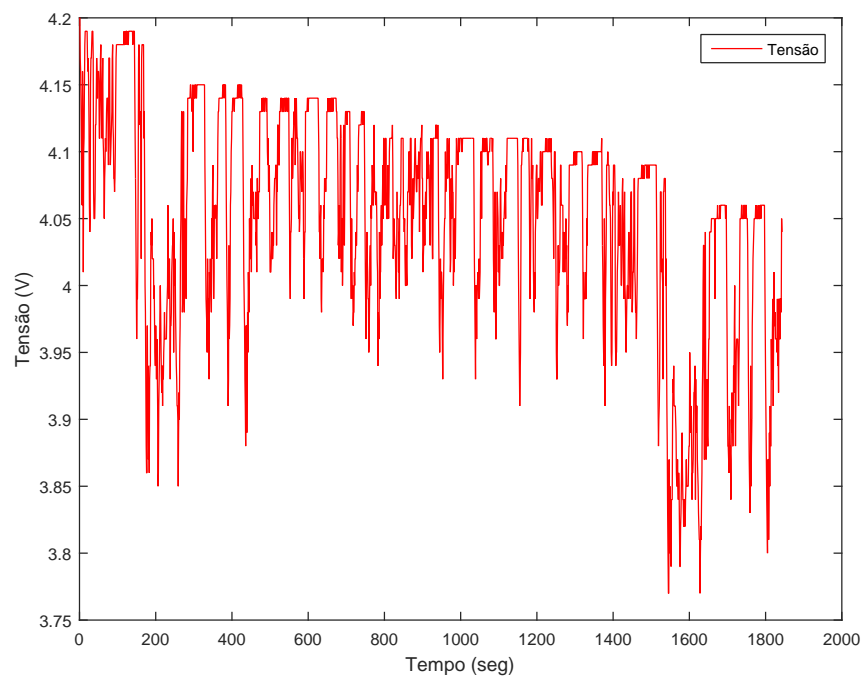


Figura D.24: Variação da tensão na descarga segundo o percurso EPA FTP

### D.3.2 EPA Highway Fuel Economy Test

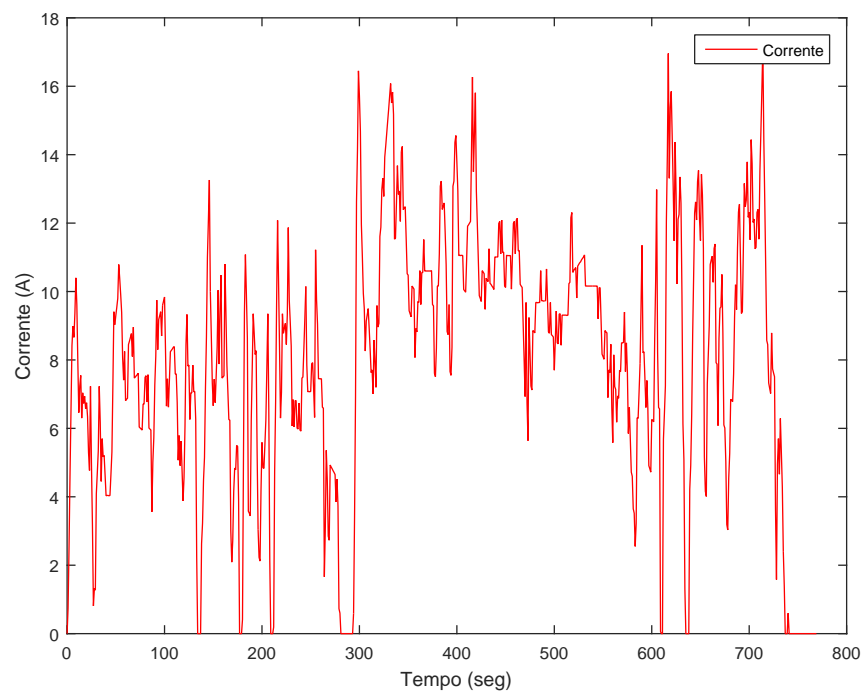


Figura D.25: Perfil de corrente de descarga segundo o percurso EPA HWFET

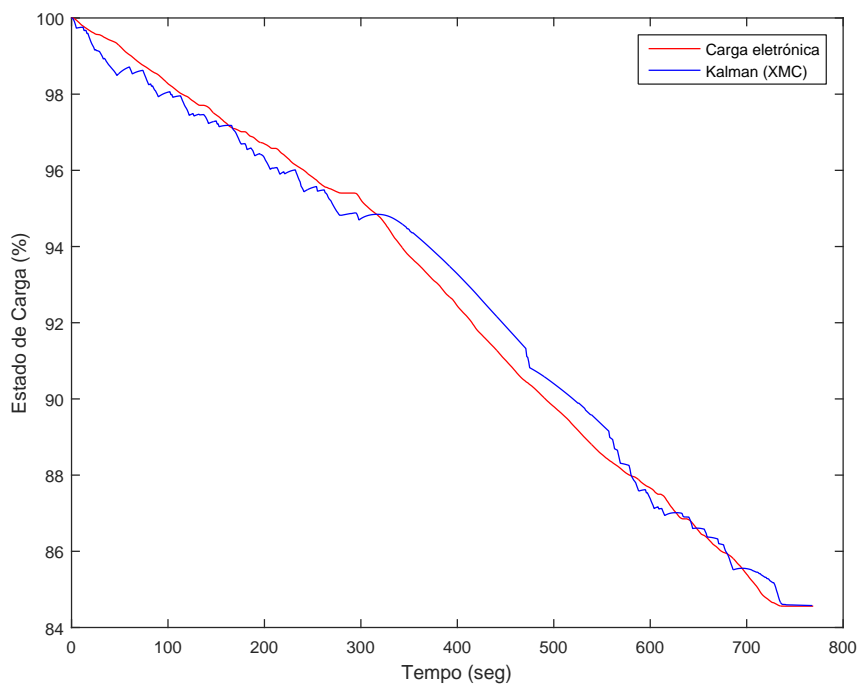


Figura D.26: Estimação do SOC na descarga segundo o percurso EPA HWFET

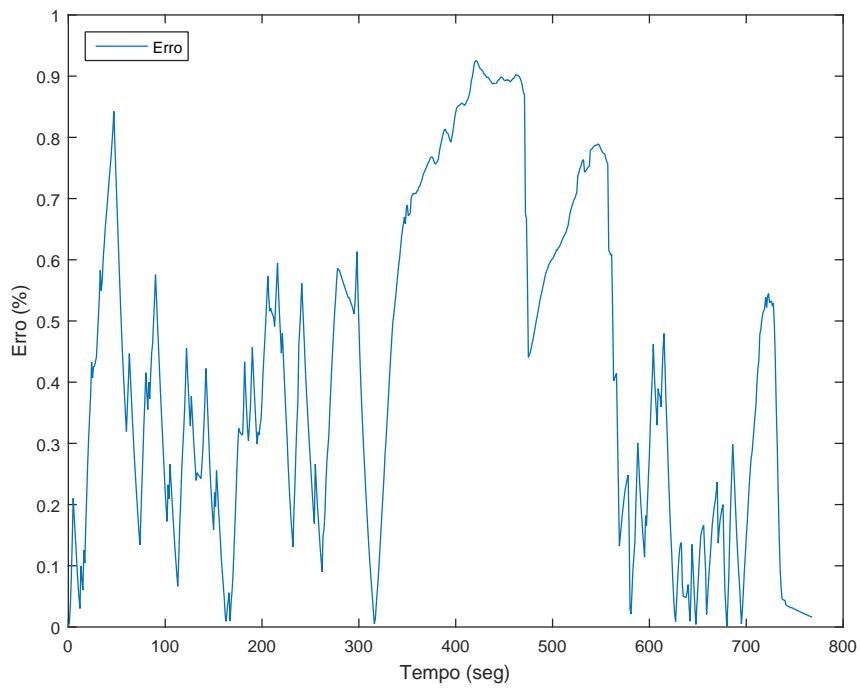


Figura D.27: Erro da estimação do SOC na descarga segundo o percurso EPA HWFET



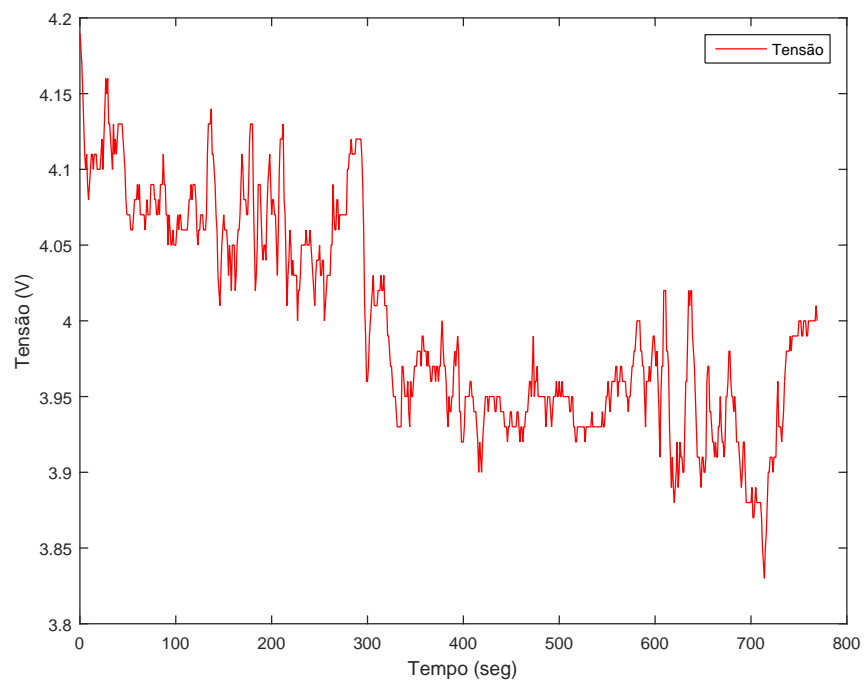


Figura D.28: Variação da tensão na descarga segundo o percurso EPA HWFET

### D.3.3 EPA Urban

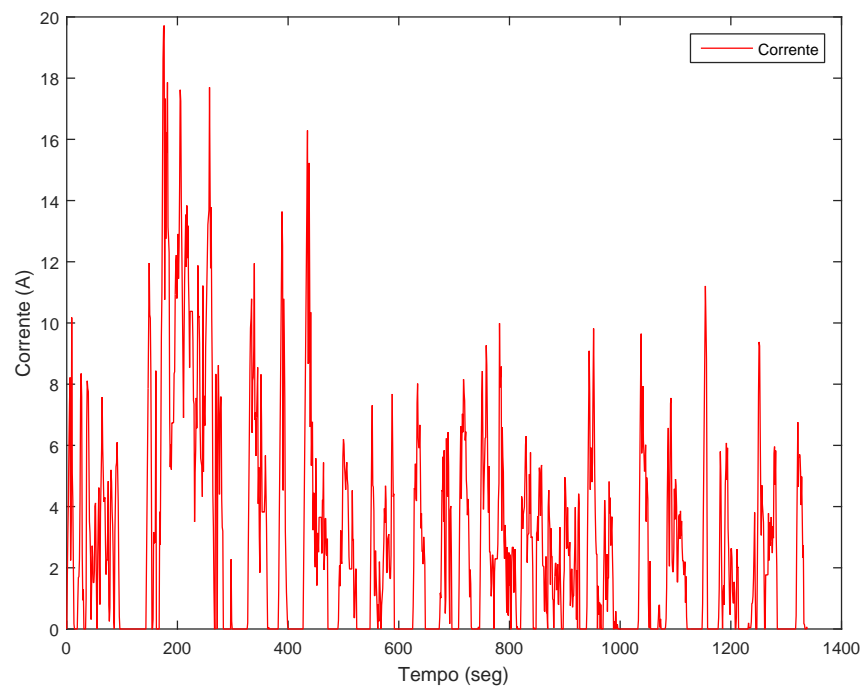


Figura D.29: Perfil de corrente de descarga segundo o percurso EPA Urban

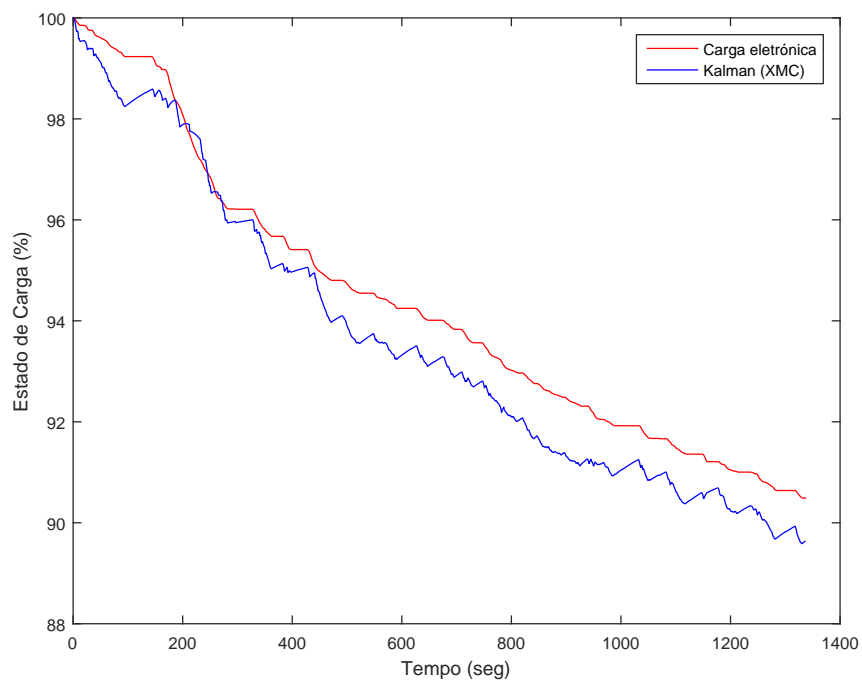


Figura D.30: Estimação do SOC na descarga segundo o percurso EPA Urban

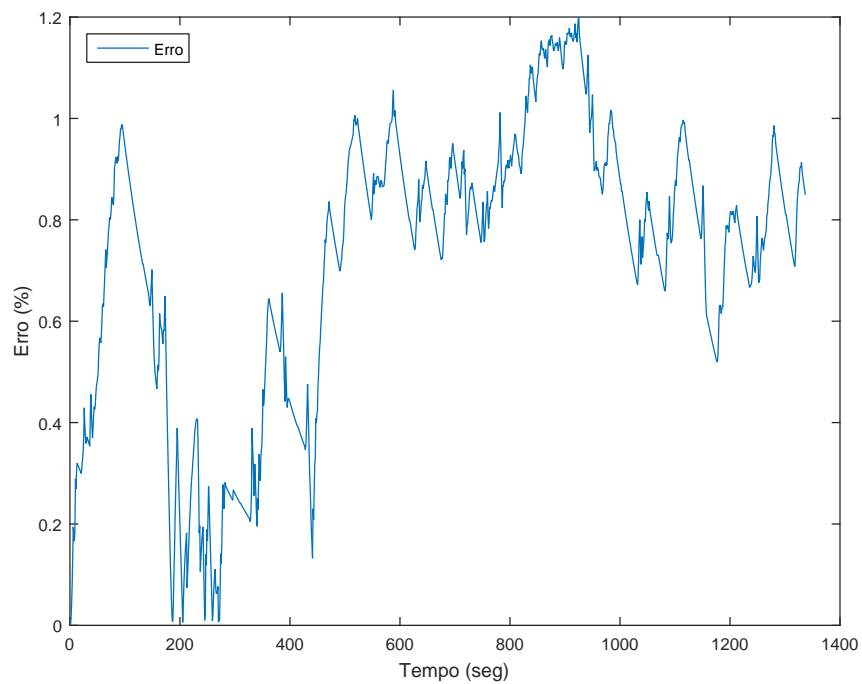


Figura D.31: Erro da estimativa do SOC na descarga segundo o percurso EPA Urban

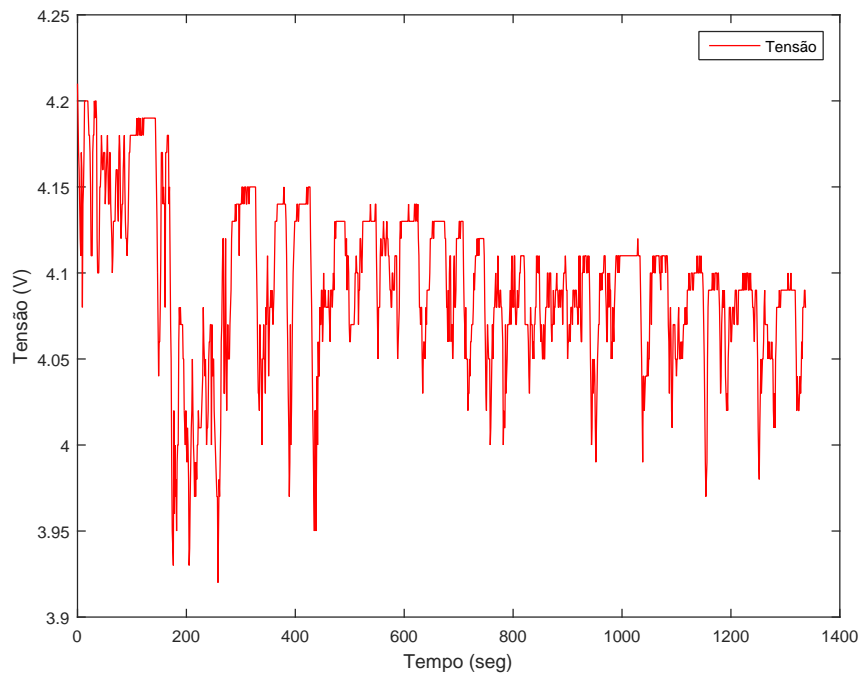


Figura D.32: Variação da tensão na descarga segundo o percurso EPA Urban



# Bibliografia

- [1] Sónia Carina Lopes da Costa. Análise e Desenvolvimento de um Método de Estimação de Estado de Carga de Baterias Baseado em Filtros de Kalman. Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [2] Jian Cao and Ali Emadi. Batteries Need Electronics. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 5(March):27–35, 2011. doi:10.1109/MIE.2011.940251.
- [3] Languang Lu, Xuebing Han, Jianqiu Li, Jianfeng Hua, and Minggao Ouyang. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 226:272–288, mar 2013. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775312016163>, doi:10.1016/j.jpowsour.2012.10.060.
- [4] Battery University. How to Measure State-of-charge, 2015. URL: [http://batteryuniversity.com/learn/article/how\\_to\\_measure\\_state\\_of\\_charge](http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_measure_state_of_charge) [last accessed 2015-12-14].
- [5] David Linden and Thomas B. Reddy. *Handbook Of Batteries*. McGraw-Hill, 3rd edition, 2001.
- [6] Henk Jan Bergveld, Wanda S Kruijt, and Peter H L Notten. *Battery Management Systems*. 2001. URL: [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-0843-2\\_2](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-0843-2_2) \delimiter"026E30F\$npapers2://publication/uuid/5661C031-9973-49C1-AD0E-B24D99357EED, doi:10.1007/978-94-017-0843-2.
- [7] Matteo Muratori. *Thermal Characterization of Lithium-Ion Battery Cell*. PhD thesis, 2009.
- [8] Vanessa Gomes and Cruz Ogawa. Proposta de identificação dos parâmetros do modelo partida de veículos automotivos. Master's thesis, Universidade de São Paulo, 2011.
- [9] Ravishankar Rao, Sarma Vrudhula, and Daler N. Rakhmatov. Battery Modeling for Energy-Aware System Design. *Computer*, 36(12):77 – 87, 2003. doi:10.1109/MC.2003.1250886.

- [10] Hanlei Zhang and Mo Yuen Chow. Comprehensive dynamic battery modeling for PHEV applications. *2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pages 1–6, 2010. doi:10.1109/PES.2010.5590108.
- [11] Isaac Scott and Se-Hee Lee. Battery Energy Storage. In *Large Energy Storage Systems Handbook*. CRC Press, 2011.
- [12] Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, and Yulong Ding. Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19(3):291–312, mar 2009. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S100200710800381X>, doi:10.1016/j.pnsc.2008.07.014.
- [13] Abbas Fotouhi, Daniel J. Auger, Karsten Propp, Stefano Longo, and Mark Wild. A review on electric vehicle battery modelling: From Lithium-ion toward Lithium–Sulphur. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56:1008–1021, 2016. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115013921>, doi:10.1016/j.rser.2015.12.009.
- [14] Fang Wang, Haojun Li, Qixing Wu, Jie Fang, Yang Huang, Chunli Yin, Yanghai Xu, and Zhongkuan Luo. Improving the performance of a non-aqueous lithium-air battery by defective titanium dioxides with oxygen vacancies. *Electrochimica Acta*, 202:1–7, 2016. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013468616307952>, doi:10.1016/j.electacta.2016.04.007.
- [15] Lorenzo Serrao, Zakaria Chehab, Yann Guezennec, and Giorgio Rizzoni. An aging model of Ni-MH batteries for hybrid electric vehicles. *2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC*, 2005:78–85, 2005. doi:10.1109/VPPC.2005.1554536.
- [16] Kong-soon Ng, Yao-feng Huang, Chin-sien Moo, and Yao-ching Hsieh. An Enhanced Coulomb Counting Method for Estimating State-of-Charge and State-of-Health of Lead-Acid Batteries. *Telecommunications Energy Conference, 2009. INTELEC 2009. 31st International*, Ng, K., Hu:1–5, 2009. doi:10.1109/INTLEC.2009.5351796.
- [17] Battery University. How does a Smart Battery Work?, 2015. URL: [http://batteryuniversity.com/learn/article/inner\\_workings\\_of\\_a\\_smart\\_battery](http://batteryuniversity.com/learn/article/inner_workings_of_a_smart_battery) [last accessed 2015-12-14].
- [18] Gregory L. Plett. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs. *Journal of Power Sources*, 134(2):252–261, aug 2004. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775304003593>, doi:10.1016/j.jpowsour.2004.02.031.
- [19] Mohinder S. Grewal and Angus P. Andrews. *Kalman filtering: Theory and Practice Using Matlab*. 3rd edition, 2008. doi:10.1002/9780470377819.

- [20] Greg Welch and Gary Bishop. An Introduction to the Kalman Filter. *Siggraph 2001*, (1):81, 2001. doi:10.1.1.117.6808.
- [21] D. Andre, A. Nuhic, T. Soczka-Guth, and D.U. Sauer. Comparative study of a structured neural network and an extended Kalman filter for state of health determination of lithium-ion batteries in hybrid electricvehicles. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(3):951–961, mar 2013. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197612002448>, doi:10.1016/j.engappai.2012.09.013.
- [22] Federico Baronti Habiballah Rahimi-eichi, Unnati Ojha, and Mo-Yuen Chow. Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles. *Industrial Electronics Magazine*, 7(2):4 – 16, 2013. doi:10.1109/MIE.2013.2250351.
- [23] M.R. Jongerden and B.R. Haverkort. Which battery model to use? *Software, IET*, 3(6):445–457, 2009. doi:10.1049/iet-sen.2009.0001.
- [24] Austin Hausmann and Christopher Depcik. Expanding the Peukert equation for battery capacity modeling through inclusion of a temperature dependency. *Journal of Power Sources*, 235:148–158, aug 2013. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775313002322>, doi:10.1016/j.jpowsour.2013.01.174.
- [25] D.N. Rakhmatov and S.B.K. Vrudhula. An analytical high-level battery model for use in energy management of portable electronic systems. *Computer Aided Design, 2001. ICCAD 2001. IEEE/ACM International Conference on*, pages 488–493, 2001. doi:10.1109/ICCAD.2001.968687.
- [26] Armando Araujo. Um modelo de bateria para cálculo do estado de descarga. *renováveis magazine*, pages 42–44, 2013.
- [27] Ravishankar Rao, Sarma Vrudhula, and Naehyuck Chang. Battery optimization vs energy optimization: Which to choose and when? *IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design, Digest of Technical Papers, ICCAD, 2005*:438–444, 2005. doi:10.1109/ICCAD.2005.1560108.
- [28] Hongwen He, Rui Xiong, Hongqiang Guo, and Shuchun Li. Comparison study on the battery models used for the energy management of batteries in electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 64:113–121, dec 2012. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890412001987>, doi:10.1016/j.enconman.2012.04.014.
- [29] Ryan C. Kroeze and Philip T. Krein. Electrical battery model for use in dynamic electric vehicle simulations. *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pages 1336–1342, 2008. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4592119>, doi:10.1109/PESC.2008.4592119.

- [30] Daniel F. Magalhaes, Armando S. Araujo, and Adriano S. Carvalho. A model for battery lifetime calculation implementable in circuit simulators. *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, pages 1–6, 2013. URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84911409932&partnerID=tZ0tx3y1>, doi:10.1109/EVS.2013.6915012.
- [31] D. Rakhmatov, S. Vrudhula, and D.A. Wallach. A model for battery lifetime analysis for organizing applications on a pocket computer. *Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, IEEE Transactions on*, 11(6):1019–1030, 2003.
- [32] Tim Babb. How a Kalman filter works, in pictures, 2015. URL: <http://www.bzarg.com/p/how-a-kalman-filter-works-in-pictures/> [last accessed 06-02-2016].
- [33] Jerrold Eldon Marsden and Anthony Tromba. *Vector Calculus*. W. H. Freeman, 5th edition, 2003.
- [34] Infineon Technologies AG. Board User’s Manual: XMC 4500 Relax Kit & XMC 4500 Relax Lite Kit Board User’s Manual Microcontroller, 2014. URL: <http://www.infineon.com/dgdl/Board{ }Users{ }Manual{ }XMC4500{ }Relax{ }Kit-V1{ }R1.2{ }released{ }5B1{ }5D.pdf?fileId=db3a3043437e2e9601438fd1662060b4>.
- [35] Romain Nicolas. The different driving cycles, 2013. URL: <http://www.car-engineer.com/the-different-driving-cycles/> [last accessed 02-06-2016].
- [36] Diana da Costa Soares. Estudo de Sistema de Interface entre Múltiplas Fontes Energéticas Associadas à Tração de um HEV. Master’s thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [37] Augusto F. Pacheco, Mario E.S. Martins, and Hua Zhao. New European Drive Cycle (NEDC) simulation of a passenger car with a HCCI engine: Emissions and fuel consumption results. *Fuel*, 111:733–739, sep 2013. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236113002482>, doi:10.1016/j.fuel.2013.03.060.
- [38] Diogo Bastos and Martins Ledo. Powertrain de um veículo elétrico – estudo térmico da bateria e projeto mecânico. Master’s thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [39] Michel André. The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. *The Science of the total environment*, 334-335:73–84, dec 2004. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969704003584>, doi:10.1016/j.scitotenv.2004.04.070.
- [40] DieselNet. Common Artemis Driving Cycles, 2011. URL: <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/artemis.php> [last accessed 31-05-2016].



- [41] US Environmental Protection Agency. Dynamometer Drive Schedules. URL: <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules> [last accessed 03-06-2016].
- [42] LEM. Current Transducer LA 55-P Datasheet, 2014. URL: <http://www.lem.com/docs/products/la{ }55-p.pdf>.