

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

Sistema de Alimentação de um VEC (Veículo Eléctrico de Competição)

Tiago Alberto Correia da Rocha

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

Orientador: Prof. Dr. Armando Luís Sousa Araújo

Julho de 2011

A Dissertação intitulada

“Sistemas de Alimentação de um Veículo Eléctrico Competição”

foi aprovada em provas realizadas em 19-07-2011

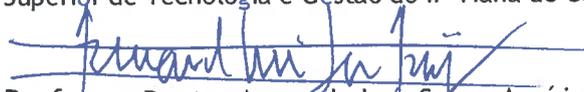
o júri



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



Professor Doutor Paulo Jorge Campos Costa
Professor Adjunto Departamento de Ciências Básicas e da Computação da Escola
Superior de Tecnologia e Gestão do IP Viana do Castelo



Professor Doutor Armando Luís Sousa Araújo
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

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



Autor - Tiago Alberto Correia da Rocha

© Tiago Alberto Correia da Rocha, 2011

Resumo

Nos dias de hoje assiste-se à introdução no mercado de um novo tipo de veículos: os veículos que usam como fonte primária de energia a electricidade. Por outro lado, recentes propostas europeias apontam para a forte redução, ou mesmo eliminação, dos veículos de combustão dentro das cidades.

Assim, prevê-se um incremento acentuado deste novo tipo de veículos para os quais a problemática da alimentação é fundamental. Actualmente decorrem numerosas investigações neste campo, sistemas de alimentação de veículos eléctricos, com o intuito de melhorar a sua eficiência e capacidade de armazenamento de energia.

Deste modo, esta dissertação aborda o projecto, desenvolvimento, análise, simulação e teste de um sistema de alimentação de um veículo eléctrico de competição, VEC.

Na prossecução destes objectivos, esta dissertação começa por apresentar, no capítulo 2, uma resenha histórica bem como o estado da arte dos sistemas de alimentação dos veículos eléctricos

No capítulo 3 efectua-se a modelação do sistema de armazenamento de energia, constituído por baterias e ultracondensadores. É desenvolvido um sistema de testes, capaz de extrair dados experimentais, para a parametrização de modelos de baterias e são retiradas conclusões acerca do modelo usado.

A modelização do veículo eléctrico, numa pista de competição, fundamental para a extracção das energias consumidas, é apresentada no capítulo 4. Esta é usada para a ajuda ao dimensionamento do sistema de armazenamento de energia.

No capítulo 5 desenvolve-se um algoritmo de gestão de energia. Desenvolvido o mesmo este é aplicado numa simulação que abrange todo o sistema de armazenamento, baterias e ultracondensadores, incluindo os conversores de potência e o seu controlo.

O sistema de alimentação auxiliar de dispositivos eléctricos e electrónicos, para o funcionamento integral do veículo, é apresentado no capítulo 6.

A dissertação termina, no capítulo 7, com a apresentação das principais conclusões, bem como das perspectivas de desenvolvimentos futuros.

Esta tese usou o Software PSIM ao abrigo do contracto de parceria POWERSYS/FEUP.

Abstract

Nowadays a new type of vehicles is being introduced into the market: the ones that uses electrical power as its primary energy supply. Also we recently had an European proposal for a big reduction, or elimination, in European cities, of all vehicles based in internal combustion engines.

So we foresee a strong increment of this new kind of vehicles for which ones the primary power supply is the biggest concern. In fact we have several people making R&D in this field, electrical vehicles power supply, mainly batteries and ultracapacitors, the main objectives being increasing volumetric energy as well as efficiency.

So, this thesis intends to present the project and development of the power supply system for an electrical race vehicle, VEC.

Initially, author presents state of the art of this kind of systems.

Modeling of the energy storage system, consisting of batteries and ultracapacitors, is presented in chapter 3. A test bed is developed which enables experimental battery parameter extraction. Conclusions are drawn about the model used.

Modeling of the electric vehicle on a track is crucial for the extraction of consumed energy. This analysis is used as an aid to energy storage system design.

Chapter 5 presents the development of a power management algorithm. It is applied in a simulation that spans the hybrid storage system, including power converters and its controllers.

Project of auxiliary power supplies, capable of powering electric and electronic devices, for the full operation of the vehicle, is shown in chapter 6 of this dissertation.

Finally this thesis concludes with principal results as well as work to be done.

This thesis used PSIM Software under the Partnership contract between POWERSYS and FEUP.

Agradecimentos

Gostaria em primeiro lugar, de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Armando Luís Sousa Araújo, toda a disponibilidade, ajuda e conselhos que me permitiram superar as diversidades encontradas durante a realização deste projecto final de curso.

Agradeço igualmente aos meus pais e irmãos todo o apoio e ajuda que sempre me deram, não só durante a realização desta dissertação mas também ao longo de todo este percurso académico, bem como a educação e tudo o que me proporcionaram e me permitiu chegar até aqui.

A todos os meus colegas de curso e amigos, um bem-haja pela ajuda e conselhos dados.

Aos meus colegas e amigos de laboratório, que partilharam este projecto comigo, não posso deixar de agradecer a ajuda, mas também a amizade que sempre esteve presente na equipa de trabalho.

A vida não se faz só de estudo e trabalho, por isso não posso deixar de agradecer aos meus amigos e companheiros de curso que, ao longo destes cinco anos de faculdade, partilharam casa comigo. Ao André Quintino e ao Henrique Teixeira um muito obrigado pelo apoio, mas sobretudo a amizade.

Índice

Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Enquadramento do projecto VEC - Veículo Eléctrico de Competição	1
1.2 - Objectivos.....	3
1.3 - Estrutura da Dissertação.....	3
Capítulo 2	5
Estado da Arte.....	5
2.1 - Veículo automóvel de propulsão eléctrica	5
2.2 - Sistemas de armazenamento de energia de veículos eléctricos.....	7
2.2.1 - Introdução	7
2.2.2 - Baterias	9
2.2.3 - Tipo de baterias	11
2.2.4 - Modelo da bateria	16
2.2.5 - Ultracondensadores	19
2.2.6 - Modelo de um ultracondensador.....	21
2.2.7 - Topologia híbrida de armazenamento	23
2.3 - Sistemas de carga de baterias.....	26
2.3.1 - Métodos de carga.....	26
Capítulo 3	29
Modelação do sistema de armazenamento de energia	29
3.1 - A bateria	29
3.2 - Sistema de testes à bateria	32
3.3 - Resultados dos testes	35
3.4 - Parametrisação do modelo.....	39
3.5 - Implementação e simulação do modelo da bateria.....	41
3.6 - O ultracondensador.....	43
3.6.1 - Modelo do ultracondensador	44
3.6.2 - Implementação e simulação do modelo do ultracondensador	45
Capítulo 4	47
Modelação da dinâmica do Fiat Uno 45 S em pista.	47
4.1 - Introdução.....	47
4.2 - Modelação do VEC	47
4.2.1 - Força de subida (Grading Resistance)	48
4.2.2 - Atrito de rolamento (Rolling Resistance)	48
4.2.3 - Resistência do ar (Drag Resistance).....	48
4.2.4 - Força de aceleração (Acceleration Force)	49
4.2.5 - Força total de tracção.....	49
4.2.6 - Binário.....	49

4.2.7 - Potência do veículo	50
4.2.8 - Energia consumida	50
4.3 - Dados experimentais do FIAT UNO em pista	50
4.4 - Implementação e simulação do modelo do VEC.....	52
4.5 - Resultados da simulação	53
Capítulo 5	57
Armazenamento híbrido de energia e gestão energética.....	57
5.1 - Topologia híbrida	57
5.2 - Estratégia de controlo de energia	58
5.3 - Dimensionamento do sistema híbrido de armazenamento	61
5.4 - Conversores de potência	63
5.4.1 - Topologias de conversão	64
5.4.2 - Dimensionamento do conversor de meia ponte.....	65
5.5 - Controlo da tensão do barramento	67
5.6 - Simulação do sistema híbrido	67
5.6.1 - Testes ao controlo e ao algoritmo de gestão de energia.....	69
Capítulo 6	71
Sistema de alimentação da electrónica e instrumentação do VEC	71
6.1 - Estudo da forma de alimentação da electrónica e instrumentação	71
6.2 - Topologias de conversão	73
6.2.1 - Dimensionamento do conversor flyback.....	73
6.3 - Implementação e simulação do sistema de conversão auxiliar.....	74
Capítulo 7	77
Conclusões e trabalhos futuros.....	77
7.1 - Conclusões	77
7.2 - Trabalhos futuros	78
Referências	79

Lista de figuras

Figura 1.1 - Diagrama do projecto do veículo eléctrico de competição	2
Figura 1.2 - Diagrama dos sistemas associados aos projectos de cada estudante.....	2
Figura 1.3 - Diagrama de blocos do sistema de conversão.	3
Figura 2.1 - Esquema simplificado de um VE alimentado a baterias (BEV).....	7
Figura 2.2 - Características dos vários sistemas de armazenamento de energia [2].....	9
Figura 2.3 - Curva típica da tensão de uma bateria a descarregar [5].	10
Figura 2.4 - Características de uma bateria em termos de: energia extraída segundo (a) o número de ciclos, (b) temperatura, (c) corrente, e (d) tempo de armazenamento (auto-descarga); (e) tensão de circuito aberto segundo o SOC; (f) resposta transitória impondo um degrau de corrente [7].	11
Figura 2.5 - Custo das células de Ni-MH e Li-ion em função da produção em volume de veículos [6].	14
Figura 2.6 - Diferentes eléctrodos para diferentes tecnologias de iões de lítio, e suas características [10].	15
Figura 2.7 - Comparação de atributos de vários tipos de baterias e ultracondensadores [6]. .	16
Figura 2.8 - Modelo eléctrico (a) Thevenin, (b) de impedância, e (c) runtime [7].	18
Figura 2.9 - Alteração da tensão de circuito aberto normalizada (V_{oc}/V_{max}) para vários tipos de baterias e o UC [6].	20
Figura 2.10 - Circuito equivalente de um UC [5].	21
Figura 2.11 - Modelo RC de malha paralela [18].	22
Figura 2.12 - Modelo RC de linha de transmissão [18].	22
Figura 2.13 - Modelo RC de malhas séries paralelas [18].	23
Figura 2.14 - Modelo geral RC ramos paralelos [18].	23
Figura 2.15 - Comparação dos parâmetros das tecnologias de armazenamento de energia [6].	24

Figura 2.16 - Configuração passiva paralela [20].	24
Figura 2.17 - Configuração ultracondensador/bateria [21].	25
Figura 2.18 - Diagrama de configuração bateria/ultracondensador [21].	25
Figura 2.19 - Configuração em cascata [21].	25
Figura 2.20 - Configuração de múltiplos conversores [21].	25
Figura 2.21 - Configuração de um conversor de múltiplas entradas [21].	26
Figura 3.1 - Pack de baterias Ni-MH, com invólucro, ligações e terminais para sensorização, à esquerda. Na direita um módulo composto por 12 células.	30
Figura 3.2 - Resposta da tensão de uma célula de Ni-MH a diferentes correntes de descarga (5 a 10s) e carga (20 a 25s) [27].	30
Figura 3.3 - Resposta da tensão da bateria a uma carga: dinâmicas de descarga e rest time.	31
Figura 3.4 - Modelo da bateria adoptado.	32
Figura 3.5 - Esquema eléctrico do sistema de testes.	33
Figura 3.6 - Diferentes períodos de aquisição ao longo de um período Toff do teste.	34
Figura 3.7 - Sinóptico do programa de testes.	34
Figura 3.8 - Forma de onda da corrente da bateria a um teste de 5 minutos de descarga e 5 minutos de descanso (rest time), e pormenor.	35
Figura 3.9 - Curva da tensão da bateria a um teste de 5 minutos de descarga e 5 minutos de descanso (rest time), e pormenor.	36
Figura 3.10 - Curva da tensão da bateria a um teste de 5 minutos de descarga e 25 minutos de descanso (rest time), e pormenor.	37
Figura 3.11 - Curva da tensão da bateria a um teste de 5 minutos de descarga e 1 hora de descanso (rest time), e pormenor.	37
Figura 3.12 - Curva da tensão da bateria a um teste de 5 minutos de carga e 1 hora de descanso (rest time).	38
Figura 3.13 - Histerese da tensão de circuito aberto Voc (verde); resposta da tensão da bateria a teste de carga (azul) e descarga (vermelho).	38
Figura 3.14 - Resposta rápida, da bateria de Ni-MH, retirada dos testes.	39
Figura 3.15 - Tensão da malha rápida, $R1C1$ para $t \gg \tau1$, e tensão da bateria em teste.	40
Figura 3.16 - Modelo da bateria implementado em PSIM (esquerda), sistema de teste do modelo (direita).	41
Figura 3.17 - Comparação entre a curva experimental (à esquerda), e a simulada (à direita), com as mesmas condições de corrente ao longo do tempo.	42
Figura 3.18 - Novo modelo da bateria.	42

Figura 3.19 - Comparação entre a curva experimental (à esquerda), e a simulada com o novo modelo (à direita), com 5 minutos em descarga.....	43
Figura 3.20 - Comparação entre a curva experimental (à esquerda), e a simulada com o novo modelo (à direita), com 5 minutos em carga.	43
Figura 3.21 - Modelo linha de transmissão do UC (adaptado de [28]).	44
Figura 3.22 - Curva de carga e descarga do UC da Maxwell BCAP 3000F a corrente constante.	44
Figura 3.23 - Resultado da simulação do modelo do UC.	45
Figura 4.1 - Actuação da força da gravidade devido à inclinação da pista [5].....	48
Figura 4.2 - Actuação do ar no formato de um veículo em movimento [5].	49
Figura 4.3 - Circuito Vasco Sameiro. Zonas de acelerações (a verde) e travagens (a vermelho) e de velocidade aproximadamente constante (sem cor). As linhas azuis demarcam o fim ou início de uma aceleração ou travagem.	51
Figura 4.4 - Modelo do VEC implementado em Simulink.	52
Figura 4.5 -Cálculo das forças que actuam sobre o VEC.	53
Figura 4.6 - Resultados obtidos da simulação do modelo do VEC.	54
Figura 4.7 - Potência na roda do veículo.	54
Figura 5.1 - Esquema eléctrico do sistema de armazenamento e tracção.	58
Figura 5.2 - Algoritmo de controlo de energia do sistema de alimentação.	60
Figura 5.3 - Curva da tensão da bateria simulada, quando sujeita a uma corrente de 35 amperes por um período de 60 segundos.	63
Figura 5.4 - Conversores de potência: a) conversor em meia ponte; b) conversor Cuk utilizado em alguns HEV; c) conversor SEPIC combinado com o conversor LUO [29].	64
Figura 5.5 - Conversor meia ponte Buck-Boost.	65
Figura 5.6 - Método de controlo do sistema de armazenamento.....	67
Figura 5.7 -sistema híbrido de armazenamento de energia implementado em PSIM.	68
Figura 5.8 - Resultado da simulação. Em cima a tensão do barramento CC, em baixo a corrente/potência que o inversor impõe no barramento.	70
Figura 6.1 - Esquemas possíveis de ligações para a alimentação auxiliar.	73
Figura 6.2 - Implementação em PSIM do conversor flyback e do seu controlador de tensão. .	75
Figura 6.3 - Resposta da onda da tensão de saída, com carga (corrente de saída) variável. ..	75

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Características dos BEV, HEV e FCEV [2]	6
Tabela 2.2 - Comparação das diferentes tecnologias de baterias [8]	11
Tabela 2.3 - Critérios de performance do DOE para um VE (curto prazo) [9].	12
Tabela 2.4 - Características das células de UCs de vários fabricantes [15].	20
Tabela 2.5 - Comparação das diferentes tecnologias de armazenamento com o EESU [17]. ..	21
Tabela 3.1 - Estrutura dos dados do teste guardados em documento de texto	35
Tabela 3.2 - Parâmetros do modelo do UC da Maxwell BCAP 3000F.....	45
Tabela 4.1 - Dados obtidos no circuito.	51
Tabela 6.1 - Listagem de dispositivos a utilizar no carro e características eléctricas.	72

Abreviaturas

Lista de abreviaturas

BEV	Battery electric vehicle (veículo eléctrico a bateria)
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DSP	Digital signal processor (Processador de sinal digital)
EDLC	Electric double layer capacitor (condensador dupla camada)
FC	Fuel cell (célula de combustível)
FCEV	Fuel cell electric vehicle (Veículo eléctrico de células de combustível)
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
HESS	Hybrid energy storage system (sistema de armazenamento híbrido de energia)
HEV	Hybrid Electric Vehicle (Veículo eléctrico híbrido)
Ni-MH	Níquel hidreto metálico
PEV	Plug-in Electric Vehicle (Veículo eléctrico de recarregamento pela rede)
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Veículo eléctrico híbrido de recarregamento pela rede)
PWM	Pulse width modulation (modulação por largura de impulso)
SOC	State of charge (estado de carga)
UC	Ultracondensador
VE	Veículo eléctrico (Electric Vehicle)
VEC	Veículo eléctrico de competição
VRLA	Valve regulated lead-acid
ZEV	Zero emission vehicle (veículo com zero emissões)

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Enquadramento do projecto VEC - Veículo Eléctrico de Competição

O Projecto do Veículo Eléctrico de Competição ([VEC](#)) surge da ideia associada a criar, na FEUP, uma competição automóvel, à semelhança do [“Desafio Único”](#), com veículos puramente eléctricos.

Assim, pretende-se, nesta primeira fase, converter um dos veículos associados a esta competição (FIAT UNO 45S), num veículo de competição com tracção totalmente eléctrica.

A concepção de veículos eléctricos coloca vários desafios à engenharia, sendo o armazenamento de energia, um dos maiores obstáculos à comercialização deste tipo de veículos, de forma a concorrer com os veículos com motor de combustão interna.

O desenvolvimento de um veículo eléctrico obriga a que sejam reunidos conteúdos teóricos de diversas áreas de engenharia, desde a engenharia mecânica/automóvel, que influencia directamente a aerodinâmica e a transmissão do veículo, passando pela engenharia electrotécnica, cada vez mais influente e decisiva no desenvolvimento do motor eléctrico e na electrónica de potência, até à engenharia química associada à problemática das baterias.

A equipa que se propôs levar a cabo este desafio é composta por quatro Estudantes de Electrotecnia que tiveram a seu cargo as tarefas associadas à conversão total do veículo. Tal conversão foi dividida em quatro partes fundamentais:

- O projecto associado ao sistema de tracção
- O projecto associado ao sistema de alimentação, que esta dissertação apresenta.
- O projecto associado ao sistema de sensorização e telemetria.
- O projecto associado ao sistema de diagnóstico e detecção de falhas.

A Figura 1.1. ilustra o exposto.

2 - Introdução

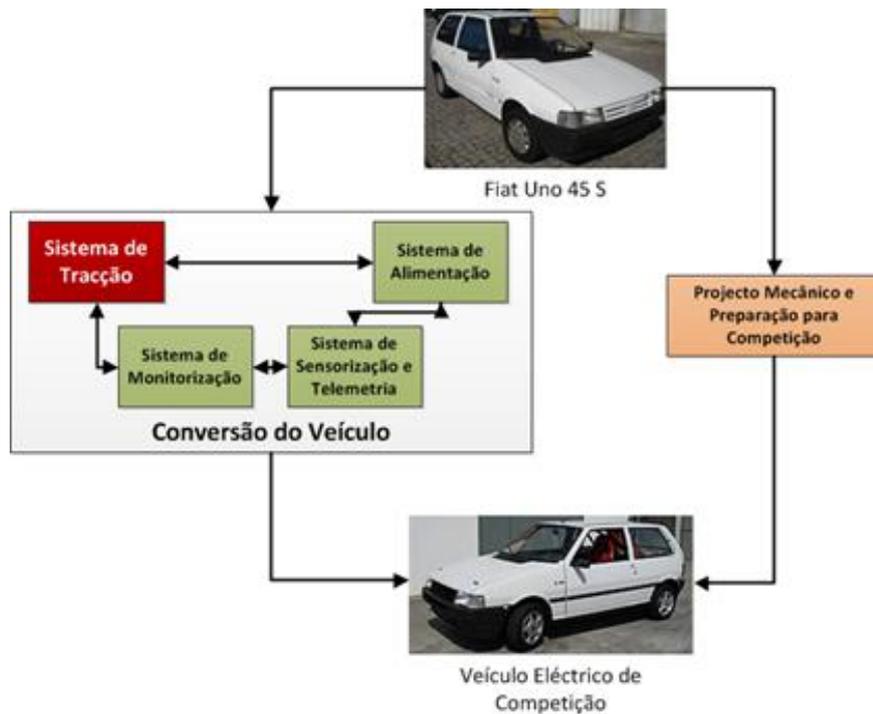


Figura 1.1 - Diagrama do projecto do veículo eléctrico de competição

A Figura 1.2 apresenta a distribuição dos estudantes pelos referidos projectos.

O Estudante Tiago Ramos está encarregue do sistema de tracção, o João Queirós é responsável pela sensorização e telemetria do veículo, o Rui Santos está encarregue do sistema de monitorização, diagnóstico e detecção de falhas, e o Autor desta dissertação é responsável pelo sistema de alimentação e gestão de energia. Visto ser necessário posteriormente interligar todos os sistemas, é imprescindível garantir uma coordenação efectiva dentro desta equipa.

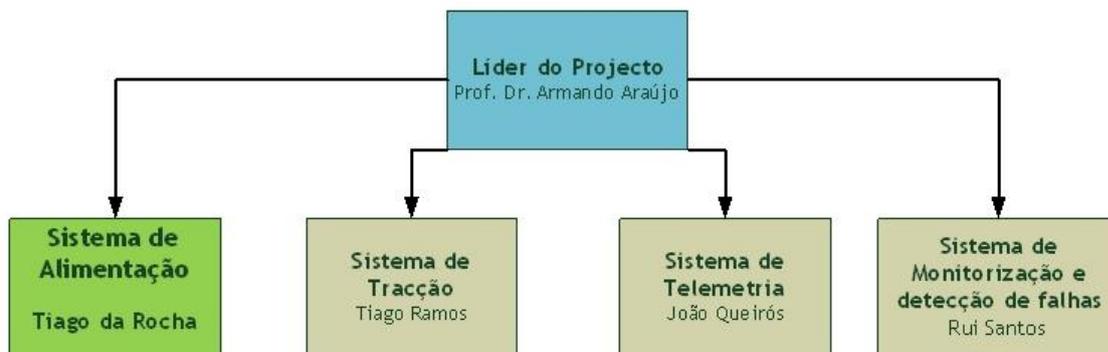


Figura 1.2 - Diagrama dos sistemas associados aos projectos de cada estudante.

O sistema de conversão do veículo teve por base o diagrama de blocos apresentado na Figura 1.3. Da mesma pode verificar-se a necessidade de interligação dos vários subsistemas. De facto é possível distinguir três subsistemas: sendo que na caixa amarela se encontra o sistema mecânico, na azul o sistema de tracção eléctrico, implementado pelo elemento da equipa Tiago Ramos, e na verde o sistema de alimentação desenvolvido pelo autor desta dissertação.

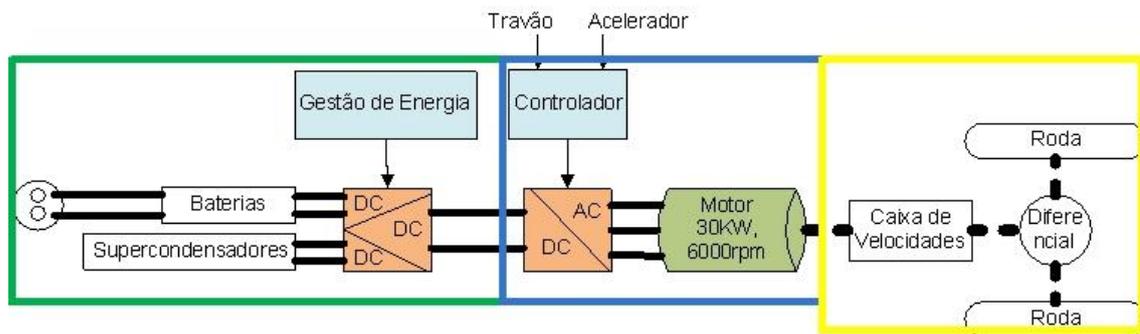


Figura 1.3 - Diagrama de blocos do sistema de conversão.

O projecto VEC usou, no decorrer desta dissertação, um motor de potência 22kW. No entanto, a tese apresentada pelo autor, refere sempre um motor de 30kW, potência semelhante aos motores de combustão do FIAT UNO 45S da Challenge Desafio Único. Assim, toda esta dissertação foi efectuada com base no motor de potência mais elevada.

1.2 - Objectivos

Do exposto pretende-se com esta dissertação apresentar o sistema de alimentação desenvolvido para o Veículo Eléctrico de Competição, VEC.

A mesma possui como principais objectivos:

- Modelar os sistemas de armazenamento de energia, tanto baterias como ultracondensadores.
- Modelar e simular o comportamento do VEC numa pista de competição automóvel, com o intuito de perceber a quantidade de energia dispendida numa prova.
- Simular e testar todo o sistema híbrido de armazenamento, fazendo a gestão e controlo do fluxo de energia, conforme um algoritmo desenvolvido para a optimização da performance do VEC.
- Desenvolver um sistema para as alimentações auxiliares do VEC.

Estando perante um projecto de um veículo de competição é relevante ter em atenção a performance do veículo.

1.3 - Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos. No primeiro e presente capítulo o leitor é introduzido no âmbito da tese, sendo dado a conhecer o projecto VEC, e os objectivos que dela advêm.

O capítulo dois apresenta a análise do estado da arte sobre os veículos eléctricos, focando os sistemas de alimentação dos mesmos.

No capítulo três são modeladas as formas de armazenamento de energia do veículo eléctrico de competição, VEC.

A modelação do VEC em pista permite extrair a energia necessária numa prova. No quarto capítulo desenvolve-se a simulação do VEC no circuito Vasco Sameiro.

No capítulo cinco é modelado o sistema híbrido no que toca ao controlo e gestão da energia, bem como ao controlo dos fluxos de potência entre os diferentes tipos de armazenamento, e o motor.

4 - Introdução

O sexto capítulo trata do desenvolvimento de um sistema de alimentações auxiliares ao funcionamento integral do VEC.

No último capítulo são tecidas conclusões ao trabalho, bem como apresentados trabalhos futuros, possíveis de aperfeiçoar o actual estado do projecto.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 - Veículo automóvel de propulsão eléctrica

O veículo eléctrico (VE), ou do inglês *electric vehicle* (VE), foi inventado em 1834 por Thomas Davenport, e é um veículo que utiliza a propulsão eléctrica [1].

Existiam, na altura, grandes limitações associadas às baterias, já que não eram capazes de receber carga. Esta limitação foi ultrapassada anos mais tarde quando, em 1859 Gaston Plante inventou a bateria de ácido chumbo, capaz de ser recarregada pela rede de distribuição. Outras descobertas foram feitas no campo das baterias, nos fins desse século, gerando uma proliferação na produção de veículos eléctricos por companhias nos Estados Unidos da América, França e Inglaterra. No início do século XX grande parte dos veículos que circulavam nas estradas de Nova Iorque era de tracção eléctrica.

Apesar da evolução do VE, o veículo de motor de combustão interna a gasolina sofreu também grandes desenvolvimentos, incluindo a adição de um motor eléctrico para o arranque do motor de combustão, entre outros melhoramentos. Este veículo começou a ter melhores características face ao VE, nomeadamente a sua velocidade e sobretudo a maior autonomia.

Em 1908, Henry Ford revolucionou a indústria automóvel com a produção em série do modelo T com motor de combustão. O fabrico deste veículo numa linha de montagem diminuía em muito o tempo de produção, bem como o seu preço, fazendo deste, um automóvel barato e de qualidade. O VE foi rapidamente posto de parte pelos fabricantes de veículos e em 1930 acabou por desaparecer.

No início dos anos 70, alguns países, movidos pelas crises energéticas e a questão do aquecimento global, resolveram começar a estudar a viabilidade dos carros eléctricos. Houve, desde então, um crescimento no desenvolvimento dos elementos que constituem o veículo eléctrico, salientando os sistemas de armazenamento de energia, controladores electrónicos, conversores de potência, e motores eléctricos.

Os VEs podem ser agrupados em três classes:

- veículo eléctrico a bateria (*battery electric vehicle* - BEV),
- veículo eléctrico híbrido (*hybrid electric vehicle* - HEV),
- veículo eléctrico a células de combustível (*fuel-cell electric vehicle* - FCEV).

A Tabela 2.1, retirada de [2], apresenta a comparação das principais características dos VEs.

Tabela 2.1 - Características dos BEV, HEV e FCEV [2]

Tipo de VE	VE a baterias	VE híbrido	VE a células de combustível
Propulsão	<ul style="list-style-type: none"> Motor eléctrico 	<ul style="list-style-type: none"> Motor eléctrico Motor de combustão interno 	<ul style="list-style-type: none"> Motor eléctrico
Sistema de energia	<ul style="list-style-type: none"> Bateria Ultracondensador 	<ul style="list-style-type: none"> Bateria Ultracondensador Geração pelo motor de combustão 	<ul style="list-style-type: none"> Células de combustível Necessita de baterias/ultracondensador para aumentar a potência no arranque
Fonte de energia e infra-estrutura	<ul style="list-style-type: none"> Instalações para carregamento eléctrico pela rede 	<ul style="list-style-type: none"> Estações de serviço Instalações para carregamento eléctrico pela rede (para os híbridos Plug In) 	<ul style="list-style-type: none"> Hidrogénio Produção de hidrogénio e transporte da infra-estrutura
Características	<ul style="list-style-type: none"> Zero emissões Alta eficiência energética Independência do petróleo Pouca autonomia Custo inicial elevado Disponível comercialmente 	<ul style="list-style-type: none"> Muito baixas emissões Alta poupança económica nos combustíveis comparado com os veículos a motor de combustão Longa autonomia Dependência de combustíveis fósseis (para os híbridos não Plug In) Altos custos comparado com os veículos a combustão Disponível comercialmente 	<ul style="list-style-type: none"> Zero emissões ou emissões muito baixas Alta eficiência energética Independência do petróleo Autonomia satisfatória Elevado custo Ainda em desenvolvimento
Maiores problemas	<ul style="list-style-type: none"> Baterias e a sua gestão Instalações de recarga Custo 	<ul style="list-style-type: none"> Controlo, optimização e gestão de múltiplas fontes de energia. Dimensionamento e gestão da bateria 	<ul style="list-style-type: none"> Custo das células de combustível, ciclos de vida e segurança Infra-estrutura do hidrogénio

De facto, a principal limitação na utilização do BEV é a baixa autonomia aliada à não existência de infra-estruturas para recarregar ou trocar as baterias. Hoje em dia, os BEVs são usados principalmente em pequenos carros e para percorrer pequenas distâncias.

Outros tipos de veículos têm vindo a ser desenvolvidos, destacando-se os híbridos (HEV). Estes funcionam com um motor de combustão interna combinado com baterias ou outros sistemas de armazenamento de energia eléctrica ou de conversão eléctrica, e um ou mais motores eléctricos, tornando-os assim mais eficientes e menos poluentes. Foram já comercializados alguns destes HEVs, nomeadamente o Honda Insight e o Toyota Prius.

Actualmente a grande valorização do petróleo e seus derivados, bem como a preocupação da poluição ambiental, tem levado à criação e produção em série por parte de grandes fabricantes automóveis, dos veículos totalmente eléctricos, que não fazem qualquer tipo de emissão de gases (*ZEV - zero emission vehicle*). São exemplo disso a Mitsubishi e a Nissan que têm já no mercado os modelos IMiev e LEAF respectivamente. Muitas outras empresas têm protótipos de VEs que estão a ser ou serão brevemente produzidos.

Um veículo eléctrico alimentado a baterias (BEV) tem por base a estrutura apresentada na Figura 2.1. As baterias estão ligadas a um conversor de electrónica de potência que controla a potência entregue ao motor de tracção. Existem, no entanto, variantes a este esquema, como por exemplo o uso de mais que uma forma de armazenamento de energia, ou o uso de mais do que um motor eléctrico. Diferentes tipos de motor podem ser usados, tais como, motores de corrente contínua, de indução e síncronos.

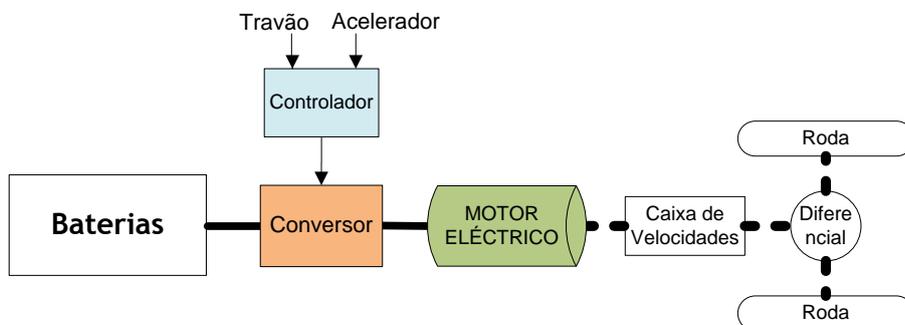


Figura 2.1 - Esquema simplificado de um VE alimentado a baterias (BEV)

Os veículos eléctricos, devido a terem presente uma tracção eléctrica e utilizarem armazenamento de energia com capacidade de bidireccionalidade de potência, têm grande eficiência energética, já que são capazes de regenerar energia aquando da travagem ou durante as descidas.

2.2 - Sistemas de armazenamento de energia de veículos eléctricos

2.2.1 - Introdução

O armazenamento de energia é uma peça fundamental num VE, sendo alvo de um enorme estudo no sentido de superar obstáculos que, nos tempos que correm, se prendem com a autonomia (energia específica), potência específica, eficiência, necessidade de manutenção, custo, impacto ambiental (reciclável) e segurança. Existem diferentes tipos de sistemas de armazenamento de energia (energy storage system - ESS) tais como baterias, ultracondensadores (*UC*), células de combustível (*fuel-cell* - *FC*) e volantes de inércia (do inglês flywheels).

Alguns termos são usados para caracterizar os sistemas de armazenamento, determinando que sistema deverá ser usado para uma aplicação particular. De seguida encontra-se uma breve descrição destas características [3].

Energia específica - é um factor importante na determinação da autonomia, e caracteriza-se como sendo a quantidade de energia total que o ESS consegue armazenar por quilograma de massa (em Wh/kg).

Densidade de energia - semelhante ao termo anterior, mas relativo ao volume, ou seja, a quantidade de energia em watt-hora (Wh) que o sistema consegue fornecer por litro do seu volume. Quanto maior o valor desta característica, mais pequeno é o seu tamanho.

Potência específica e densidade de potência - é um factor importante relacionado com a aceleração, e caracteriza-se como sendo o número de watt por quilograma que o sistema de

armazenamento consegue fornecer. Numa bateria a potência específica é normalmente medida a 80% do estado de carga (SOC). A densidade de potência relaciona a potência com o volume e é expresso em watt por litro (W/l).

Ciclo de vida - é o número de vezes que o ESS pode ser descarregado e carregado durante a sua vida. O ciclo de vida de uma bateria é considerado terminado quando não consegue carregar acima dos 80% do seu SOC.

Custo - é expresso em unidades de moeda por watt-hora.

As baterias são o sistema de armazenamento mais utilizado no mercado, dado o seu baixo preço, grande robustez e facilidade em transportar. A sua energia é acumulada na forma de energia química. O objectivo de ter baterias com uma densidade específica de energia, capaz de substituir os combustíveis fósseis a um preço aceitável, ainda não foi atingido.

Os ultracondensadores armazenam energia por separação e acumulação física de cargas opostas. São fontes de elevada potência mas de baixa energia específica.

A célula de combustível é um dispositivo electroquímico que converte energia química directamente em energia eléctrica, de forma muito eficiente. FCs são semelhantes às baterias, no entanto os materiais activos não fazem parte integral do dispositivo, necessitando de ser alimentada sempre que acabar o combustível [4]. Tem alta energia específica mas sofre, no entanto, de várias desvantagens. Esta tecnologia encontra-se ainda numa fase de desenvolvimento devido ao grande problema que é o manuseamento do hidrogénio, e a sua produção é ainda bastante cara.

Um volante de inércia armazena energia cinética que pode depois ser transformada em energia eléctrica. Este tipo de ESS consiste num disco que roda, e num motor/gerador que está acoplado ao disco para fazer a conversão do tipo de energia. O flywheel consegue armazenar cerca de 4 quilowatt-hora de electricidade e produzir 25 cavalos de potência. Um veículo necessitará de várias unidades de flywheels para ser comparado em performance e alcance aos veículos de motor de combustão interna. Este sistema de armazenamento foi já implementado com sucesso, mas encontra-se ainda numa fase de desenvolvimento científico [3].

As características, em termos de energia e potência específica, que diferenciam estas formas de armazenamento estão apresentadas na Figura 2.2. É possível verificar a alta energia específica das baterias e células de combustível, e por outro lado a alta potência específica dos ultracondensadores [2].

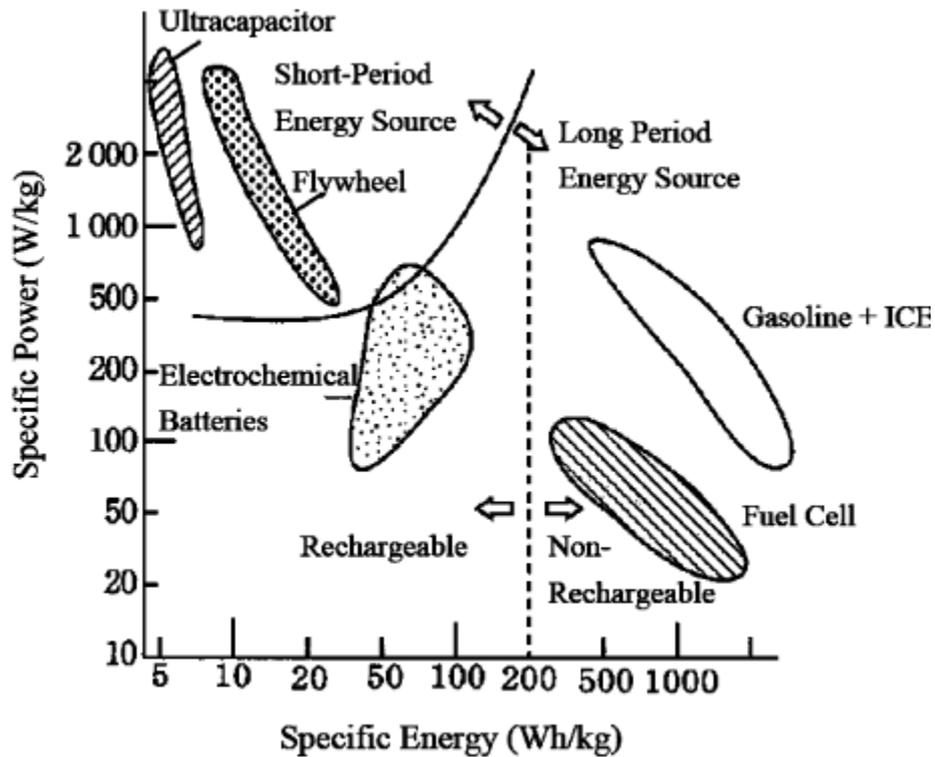


Figura 2.2 - Características dos vários sistemas de armazenamento de energia [2].

Ao combinar dois ou mais ESS com características complementares, um com elevada energia específica e outro com alta potência específica, pode ser construído um dispositivo com maior eficiência, anulando as desvantagens de utilizar apenas um. No caso de se juntar as baterias aos UCs, a energia específica das baterias alia-se à potência específica dos UCs tornando-se num sistema de armazenamento híbrido de grande rendimento.

Em operações que requerem alta potência, com por exemplo acelerar ou subir, ambos os tipos de armazenamento de energia enviam a sua potência para a carga. Por outro lado, quando se está a movimentar um veículo a velocidade constante, ou seja, necessidade de enviar baixas potências, as baterias transmitem a potência necessária. Numa situação de travagem regenerativa, a potência de pico é absorvida pelos UCs e apenas uma parte é absorvida pelas baterias. Desta maneira, todo o sistema se torna mais leve e pequeno do que com a utilização de apenas um tipo de armazenamento [5].

2.2.2 - Baterias

A bateria é um dispositivo que converte energia química em energia eléctrica por meio de uma reacção electroquímica de oxidação-redução. No caso de se tratar de um sistema recarregável, a bateria é recarregada pelo processo inverso. Este tipo de reacção envolve a transferência de electrões de um material para outro por um circuito eléctrico [4].

Uma bateria é composta por várias células juntas. Cada célula consiste em dois eléctrodos (positivo e negativo), imersos num electrólito. Os dois eléctrodos são feitos de materiais diferentes, porosos, reagindo, cada um deles, com o electrólito [6].

A capacidade de uma bateria é especificada normalmente em ampere-hora, que é definido como o número de ampere-hora em que a bateria é descarregada desde a sua capacidade máxima, até a tensão nos seus terminais descer abaixo da tensão designada de cut-off. A Figura 2.3 mostra a curva típica da tensão de uma bateria a descarregar [5].

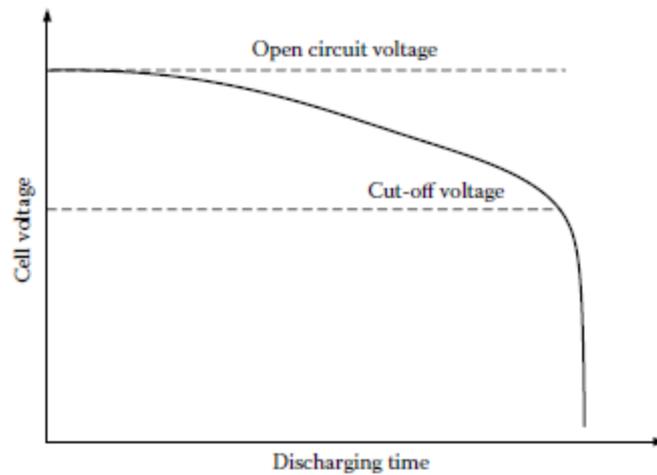


Figura 2.3 - Curva típica da tensão de uma bateria a descarregar [5].

Um parâmetro importante de uma bateria é o estado de carga (*State Of Charge - SOC*), que é definido como o rácio entre a capacidade que está na bateria e a capacidade total da bateria (onde $SOC = 100\%$). O SOC pode ser expresso como

$$SOC = SOC_0 - \int \frac{idt}{Q(i)}, \quad (2.1)$$

onde SOC_0 é o valor inicial do SOC da bateria, $Q(i)$ é a capacidade da bateria em ampere-hora a uma corrente i . i é a corrente na bateria, sendo positiva na descarga e negativa na carga [5].

Existem várias características que actuam directamente na performance de uma bateria e que vão ser descritos de seguida. A capacidade da bateria em ampere-hora é relativa a uma corrente de descarga. Com diferentes correntes de descarga, a capacidade da bateria é alterada, diminuindo com o aumento da gama de corrente. A mesma capacidade diminui ao aumentar o número de ciclos (carga e descarga) por que já passou, o tempo armazenado (devido à auto-descarga) e diminuindo a temperatura. Estas características são mostradas nos gráficos da Figura 2.4 (a)-(d). A tensão da bateria é função do SOC tal como ilustra o gráfico (e) da mesma figura. Outra característica que se denota é a diminuição típica da tensão quando é imposto um degrau de corrente aos terminais da bateria (Figura 2.4 (f)).

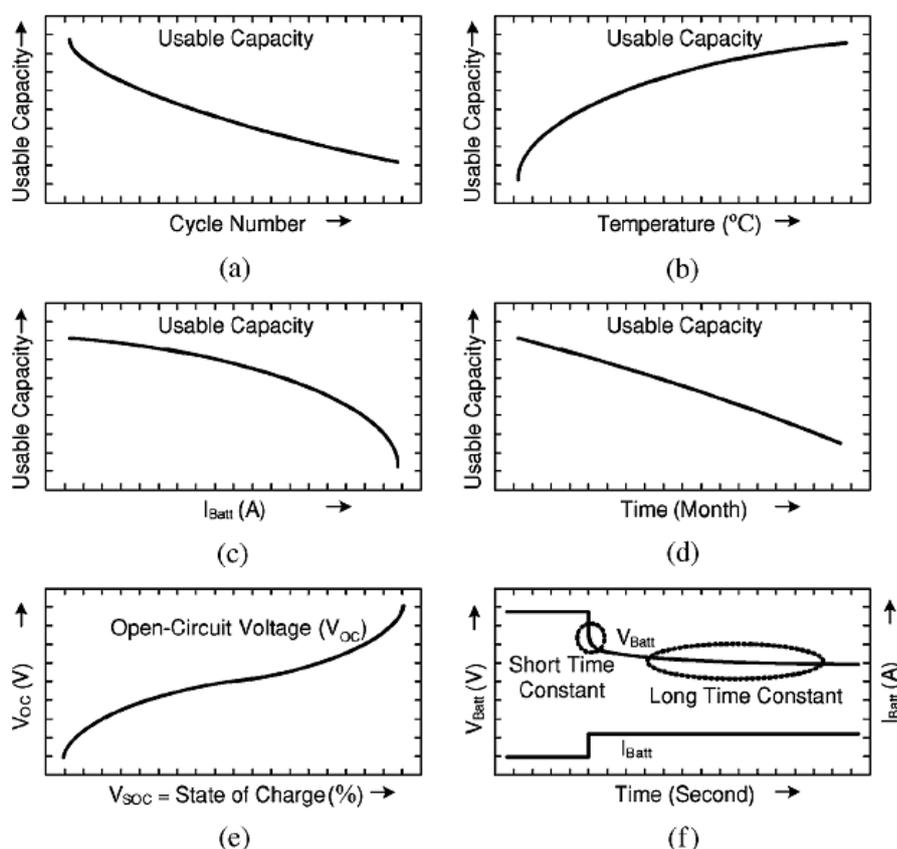


Figura 2.4 - Características de uma bateria em termos de: energia extraída segundo (a) o número de ciclos, (b) temperatura, (c) corrente, e (d) tempo de armazenamento (auto-descarga); (e) tensão de circuito aberto segundo o SOC; (f) resposta transitória impondo um degrau de corrente [7].

2.2.3 - Tipo de baterias

Na Tabela 2.2 são comparadas as diferentes tecnologias de baterias, perante os parâmetros mais relevantes. Na última linha encontram-se as metas da organização USABC (U.S. Advanced Battery Consortium), formada nos Estados Unidos da América pelo Departamento de Energia, na investigação de tecnologias de baterias para os VEs.

Tabela 2.2 - Comparação das diferentes tecnologias de baterias [8]

Tecnologia	Energia específica (Wh/kg)	Densidade energética (Wh/L)	Potência específica (W/kg)	Eficiência (%)	Tempo de carregamento (h)	Auto-descarga (% mês)	Ciclos de vida (n°)
Ácido chumbo	35-50	60-80	120-180	70-92	8-16	3-4	500-800
Ni-MH	30-80	140-300	150-400	66	2-4	>20	1000
ões de lítio	90-160	220-270	1800-3000	94	2-4	5-10	1200
Polímeros de lítio	130-200	250-300	3000+	97	2-4	5-10	500-1000

Nas aplicações em veículos, as características mais interessantes para as baterias são o tempo de vida, potência e energia específica bem como a sua densidade, o custo, e a

segurança. No seguimento deste aspecto, as baterias mais adequadas na utilização em veículos eléctricos são as ácido chumbo (*valve regulated lead-acid - VLRA*), baterias baseadas em níquel e lítio [6].

O Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (USDOE) fixou objectivos, para as performances dos sistemas de baterias a utilizar em VEs, a um curto prazo de tempo, de modo a serem competitivos em relação à actual tecnologia de veículos. Na Tabela 2.3 estão quantificados os vários critérios de performance, para curto prazo, para um VE (pelo USDOE) [9].

Tabela 2.3 - Critérios de performance do DOE para um VE (curto prazo) [9].

Performance criteria	EV-short term
Specific power, $W\ kg^{-1}$	300
Specific energy, $Wh\ kg^{-1}$	150
Power density, $W\ L^{-1}$	460
Energy density, $Wh\ L^{-1}$	230
Pack energy, kWh	40
Pack weight, kg	267
Pack volume, L	174
Life, years	10
Cycle life	1000
System price, \$	6000

De seguida apresentam-se alguns detalhes das três tecnologias de baterias mais usadas em VEs.

Bateria de ácido chumbo

A bateria ácido chumbo foi inventada nos finais do século XIX, por Gaston Plante, como já foi referido anteriormente. Desde então, este sistema de armazenamento de energia tem sido usado no sector automóvel e não só. Tem a vantagem de ser uma tecnologia barata e de ter uma densidade de potência relativamente elevada. É também uma bateria robusta e com elevada maturidade tecnológica. Devido aos elevados requisitos em termos de energia, dado a utilização de chumbo e a baixa densidade de energia, a utilização desta bateria num VE torna o sistema final pesado, sendo assim uma desvantagem [4, 6].

O sistema é composto por chumbo como material activo negativo, óxido de chumbo como material activo positivo e ácido sulfúrico diluído como electrólito. Durante a descarga, o material activo em ambas as placas de eléctrodos é transformado em sulfato de chumbo[6].

Diferentes baterias de ácido chumbo com melhores performances têm sido desenvolvidas para VEs e HEVs. O foco vai para o incremento de energia específica, chegando já a atingir os 43 Wh/Kg em certas baterias deste tipo, bem como a diminuição do tempo de carga. O tempo de vida destas baterias consegue ultrapassar os 600 ciclos [4].

O GM VE-1 é o exemplo de um veículo eléctrico em que foi usado tecnologia de armazenamento ácido chumbo [1].

Bateria baseada em Níquel

Baterias alcalinas têm por base o níquel e usam uma solução alcalina como electrólito [1]. O Níquel é um metal mais leve que o chumbo e tem boas propriedades electroquímicas para aplicações como o armazenamento de energia. Existem quatro tecnologias diferentes de

baterias baseadas em níquel. São elas a níquel ferro, níquel zinco, níquel cádmio e níquel hidreto metálico (Ni-MH) [5].

As baterias níquel ferro foram comercializadas durante os primeiros anos do século XX. A sua utilização esteve focada em empilhadores, veículos espaciais, e alguns veículos de tracção eléctrica. A tensão nominal de circuito aberto é de 1,37V.

Este sistema de baterias tem problemas relativos a formação de gases (hidrogénio e oxigénio), corrosão e de auto-descarga. Necessitam de manter o seu nível de água. As vantagens são a alta densidade de potência comparada com as baterias de ácido chumbo, e são capazes de resistir a mais de 1000 ciclos de descarga profunda.

A tensão nominal de circuito aberto de uma célula de níquel cádmio (Ni-Cd) é 1,3V. As vantagens desta tecnologia são a alta potência específica (mais de 220W/kg), longo ciclo de vida (mais de 1000), robusta, capacidade para ser carregada rapidamente, vasta gama de temperaturas de operação, e uma baixa taxa de auto-descarga [5]. No entanto este tipo de baterias tem vindo a ser descontinuada devido ao seu alto custo, a problemas ambientais e também de saúde relativos ao uso do cádmio [3, 6].

Já a bateria de níquel zinco não é alternativa na utilização nos VEs devido ao seu curto período de vida. A tensão nominal de uma célula deste tipo de tecnologia é de 1,65V [4, 6].

Neste grupo de tecnologia baseada em níquel, apenas a bateria Ni-MH é um sério concorrente nas aplicações em veículos. Esta bateria tem estado no mercado desde o ano de 1992. Esta tecnologia tem sofrido múltiplos avanços nestes anos, evidenciado pelo aumento na energia e potência específica.

A bateria Ni-MH é composta por hidróxido de níquel no eléctrodo positivo e por um multi-componente constituído por uma liga de vanádio, titânio, níquel e outros metais no eléctrodo positivo. A sua tensão nominal é de 1,2V e tem uma energia específica de 65Wh/kg, e uma potência específica de 200W/kg.

Como vantagem esta bateria é selada, não necessitando de manutenção, é amiga do ambiente (não contém cádmio), tem uma curva de descarga plana, e pode ser carregada em menos de 15 minutos. Tem excelentes propriedades térmicas, a possibilidade de operar a tensões elevadas, e boa tolerância a sobrecarga/descarga.

Contudo, e apesar de grandes desenvolvimentos, esta bateria apresenta ainda um custo algo elevado. Os materiais usados são caros e não se torna muito mais barata com uma produção em massa, comparada com as baterias de iões de lítio, evidenciado na Figura 2.5.[4-6]

A tecnologia Ni-MH tem sido considerada como uma boa escolha para aplicar em VEs e HEVs. As fabricantes Toyota e Honda têm usado esta bateria nos seus HEVs, o Prius, e os Insight e Civic.

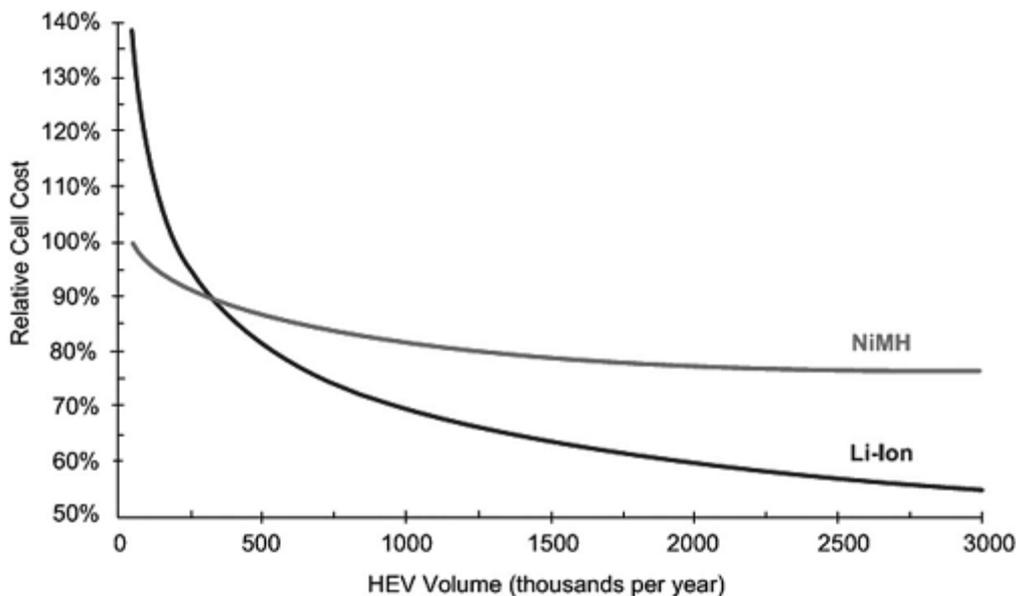


Figura 2.5 - Custo das células de Ni-MH e Li-ion em função da produção em volume de veículos [6].

Bateria baseadas em lítio

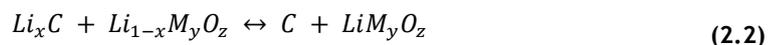
O lítio é o mais leve de todos os metais e apresenta características interessantes do ponto de vista electroquímico. Permite uma tensão termodinâmica bastante elevada, no que resulta em altas energias e potências específicas. Existem duas grandes tecnologias de baterias de lítio: lítio-polímero (Li-Polymer ou Li-P) e iões de lítio (Li-ion ou Li-i).

A bateria de lítio-polímero baseia-se no uso de metal de lítio e um óxido metálico para os eléctrodos negativo e positivo, respectivamente. O óxido metálico é formado por uma estrutura em camadas, no qual iões de lítio podem ser inseridos ou removidos na carga ou descarga, respectivamente. O electrolítico é um polímero sólido e fino, o qual oferece grande segurança e flexibilidade de design.

A célula de Li-Polymer mais interessante utiliza óxido de vanádio. Tem uma tensão nominal de 3V, uma energia específica de 155Wh/kg e uma potência específica de 315W/kg. As maiores vantagens são a baixa taxa de auto-descarga, cerca de 0,5%, capacidade de fabrico com vários tamanhos e feitios, é segura (reduzida actividade do lítio de electrólito sólido), e pode ser rapidamente recarregada (em menos de 90 minutos).

A tecnologia da bateria de iões de lítio foi divulgada em 1991 e, desde então, tem vindo a ser desenvolvida e investigada, sendo hoje em dia considerada a bateria recarregável mais promissora no futuro dos VEs. Existem já inúmeros veículos que incorporam esta tecnologia e é expectável que venha a substituir completamente as baterias de Ni-MH neste sector.

Esta bateria é constituída, no eléctrodo positivo, por óxido metálico, carbono no eléctrodo negativo, e sal de lítio em solvente orgânico no electrólito. A reacção electroquímica geral é descrita em (2.2) [3, 5, 6]. Na Figura 2.6 encontram-se as várias tecnologias de baterias de iões de lítio existentes para os eléctrodos, bem como as características mais relevantes.



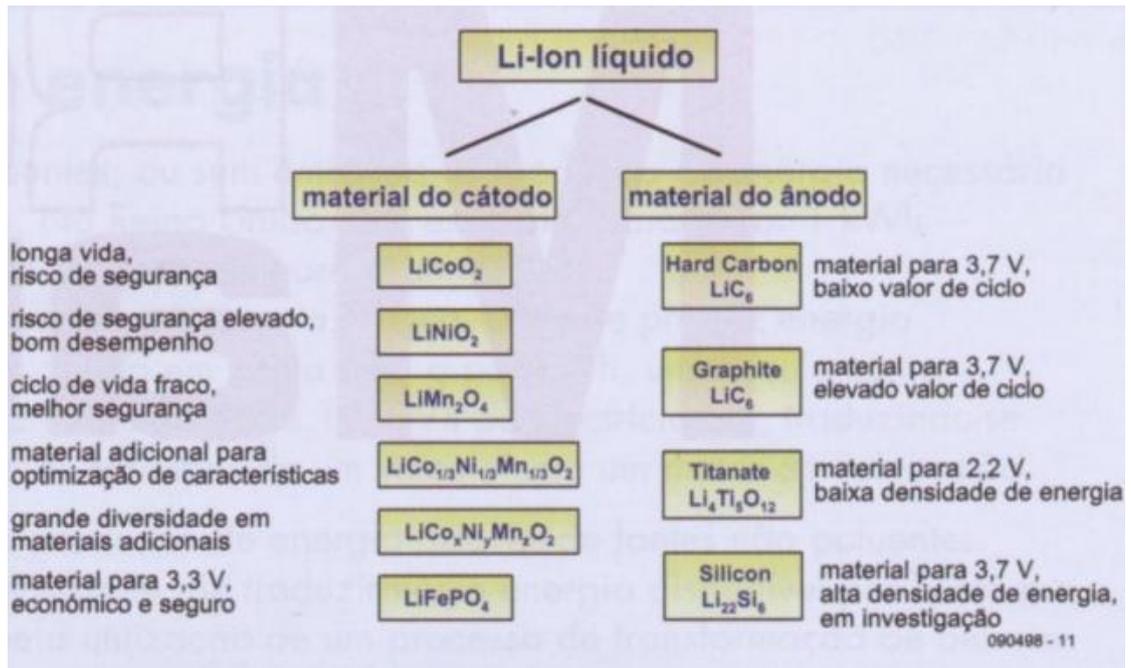


Figura 2.6 - Diferentes eléctrodos para diferentes tecnologias de iões de lítio, e suas características [10].

De maneira geral e para as tecnologias de iões de lítio mais utilizadas, como o caso do cobalto e o níquel oxidado, as vantagens são o baixo efeito de memória, a alta energia específica (cerca de 100Wh/kg), alta potência específica (cerca de 300W/kg), e um tempo de vida de 1000 ciclos. As principais desvantagens são o curto período de vida em termos temporais, o custo, o funcionamento a altas temperaturas, e a sobrecarga e sobredescarga [1, 3, 5, 6].

A segurança é um factor relevante e um problema para este tipo de baterias. Assim, investigações foram e têm sido efectuadas para solucionar esta questão. Existem desenvolvimentos nos tipos de materiais usados como eléctrodo positivo, tanto para reduzir o custo, bem como para melhorar a segurança. Nos eléctrodos negativos o foco vai para materiais activos que reduzam o peso. No caso dos electrólitos as investigações centram-se em materiais capazes de operarem numa maior gama de temperaturas, engrandecendo a segurança, diminuindo a reactividade enquanto se mantém a estabilidade [9].

A tecnologia de iões de lítio mais recentemente comercializada é a célula ferro fosfato (Li_xC_6/Li_yFePO_4). O material utilizado no cátodo tem um baixo preço, é de fácil fabrico, e bastante segura. Tem uma tensão na célula de 3,3V, um quanto inferior às que se baseiam em óxidos (3,5-4.0V) [9].

Já vários fabricantes utilizam a tecnologia de iões de lítio em VEs. O Tesla é um carro eléctrico desportivo. Possui um motor de 185kW de potência o que permite atingir uma velocidade máxima, limitada electronicamente, de 209 Km/h, tem uma aceleração dos zero aos 100 km/h em 4 segundos. Graças à utilização de baterias de iões de lítio frui de uma autonomia de 320 km, bastante elevada para a normal gama de veículos eléctricos a baterias, disponíveis actualmente no mercado.

Uma das principais características que um veículo de competição tem é a necessidade de altas potências para as acelerações. A tecnologia de iões de lítio apresenta-se com grandes potencialidades na utilização para esta área, devido à sua elevada potência específica, não deixando de exaltar também a elevada energia específica.

Na Figura 2.7 são apresentados os atributos dos três tipos de baterias focados anteriormente, bem como do ultracondensador, no sentido de comparar as características de um sistema de armazenamento de energia.

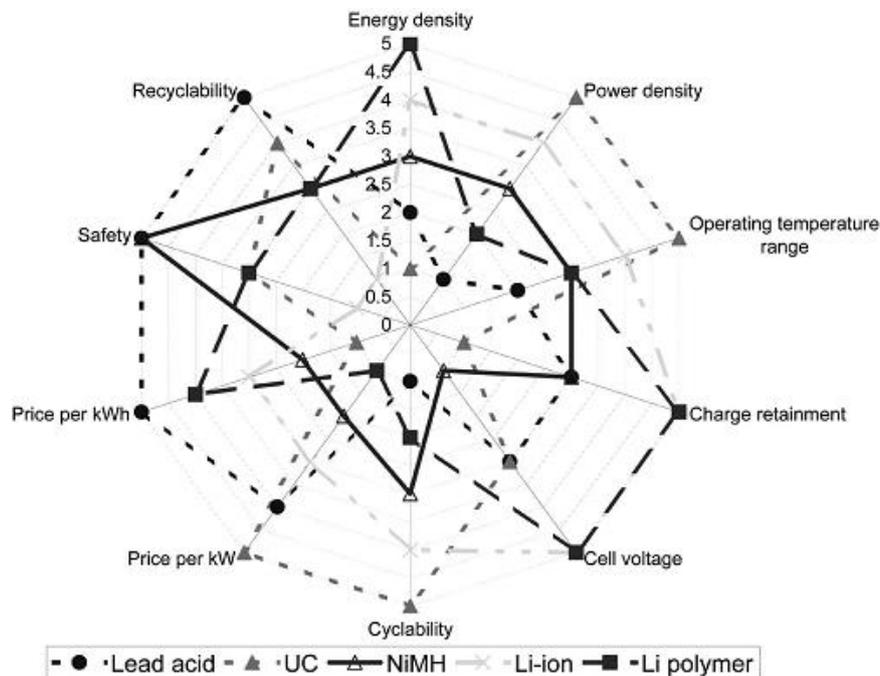


Figura 2.7 - Comparação de atributos de vários tipos de baterias e ultracondensadores [6].

Baterias Futuras

Actualmente, o desenvolvimento de novas tecnologias de baterias está bem assente na comunidade científica. A característica que tem mais foco é a energia específica, dada a sua importância nos VEs.

As células de baterias metal/ar são uma das principais tecnologias, pois conseguem oferecer, pelo menos teoricamente, alta energia específica. Existem no entanto dois grandes problemas com este tipo de baterias. Têm uma elevada resistência interna, mesmo com baixas correntes, baixando a sua eficiência de carga e descarga para os 50-60%, enquanto a bateria de lítio convencional consegue superar os 80%. Outra desvantagem prende-se com o facto ter poucos ciclos de vida. O sistema zinco/ar e lítio/ar são os dois tipos de baterias metal/ar mais promissoras nesta área.

Outra tecnologia em desenvolvimento é a célula lítio/enxofre. Tem a vantagem de usar o enxofre que é um elemento bastante barato. Necessita, no entanto, ainda de algum desenvolvimento pois não tem uma longa vida em termos de ciclos. O desenvolvimento desta tecnologia pode levar a uma bateria capaz de obter uma energia específica de 800Wh/kg, que pode ser uma vantagem em relação às outras baterias, em termos de custo, impacto ambiental, e performance [9].

2.2.4 - Modelo da bateria

Para a simulação e desenvolvimento do sistema de alimentação e estratégias de controlo, é importante desenvolver um modelo, bastante aproximado, dos componentes do sistema de armazenamento utilizados.

Neste caso, diferentes modelos de baterias, com diferentes graus de complexidade têm sido desenvolvidos. Os modelos criados dividem-se em três categorias: modelos electroquímicos, modelos matemáticos, e modelos eléctricos.

Os modelos electroquímicos são usados principalmente para otimizar os aspectos físicos das baterias, caracterizar os mecanismos fundamentais do fornecimento de energia e relacionar os parâmetros de desenho da bateria com a informação macroscópica (corrente e tensão da bateria) e microscópica (distribuição da concentração). No entanto estes tipos de modelos são complexos e são necessários dias para fazer a simulação. Isto porque envolvem algoritmos numéricos complexos, e requerem informação específica da bateria, que em geral é difícil de obter.

Os modelos matemáticos são, na maior parte dos casos, muito abstractos para serem incorporados na prática, mas ainda assim úteis no sentido do design do sistema. Adoptam equações empíricas ou métodos matemáticos, para preverem comportamentos no sistema, tais como a capacidade, a eficiência ou o comportamento temporal. Como contrapartida, este tipo de modelo não consegue dar informações sobre a dinâmica corrente-tensão, essencial para a simulação e optimização do circuito da bateria. De maneira geral, os modelos matemáticos são usados apenas para aplicações específicas com erros nos resultados na ordem dos 5 a 20%.

O modelo eléctrico utiliza a combinação de fontes de tensão, resistências e condensadores. Tem uma precisão entre os 1 e os 5% de erro. Este tipo de modelo é bastante intuitivo e é bastante útil pois permite ser utilizado em simuladores com possibilidade de ser interligado com outro tipo de circuitos. Existem inúmeros modelos eléctricos de baterias, desde as de ácido chumbo até às mais recentes baterias de lítio [7, 11].

O modelo eléctrico mais simples consiste numa fonte de tensão ideal em série com uma resistência interna. No entanto, dada a sua simplicidade não leva em consideração a resposta dinâmica da bateria.

A maioria dos modelos de baterias recai sobre três categorias: modelo Thevenin, impedância, e runtime. São também usadas combinações entre eles.

O modelo eléctrico Thevenin (Figura 2.8(a)) consiste numa fonte de tensão de circuito aberto $V_{OC}(SOC)$ constante, a um determinado SOC, numa resistência série (R_{Series}) e numa malha RC paralela ($R_{Transient}$ e $C_{Transient}$) para prever a resposta da bateria aos regimes transitórios de carga. Devido a se assumir a tensão de circuito aberto constante, não é possível observar as variações da tensão em regime estacionário, bem como a informação a nível temporal da bateria. Ao aumentar o número de malhas RC paralelas, a precisão da resposta do modelo aumenta.

O modelo de impedância (Figura 2.8(b)), tal como o modelo Thevenin, apenas se torna preciso para um determinado SOC e temperatura. Utiliza, porém o método de espectroscopia dieléctrica para prever respostas AC.

Por fim, o modelo eléctrico runtime compreende um circuito algo complexo (Figura 2.8(c)), com o sentido de prever respostas ao nível temporal (runtime response), e variações em regime estacionário da bateria, para correntes constantes. Com correntes de carga alternadas, a precisão do modelo diminui.

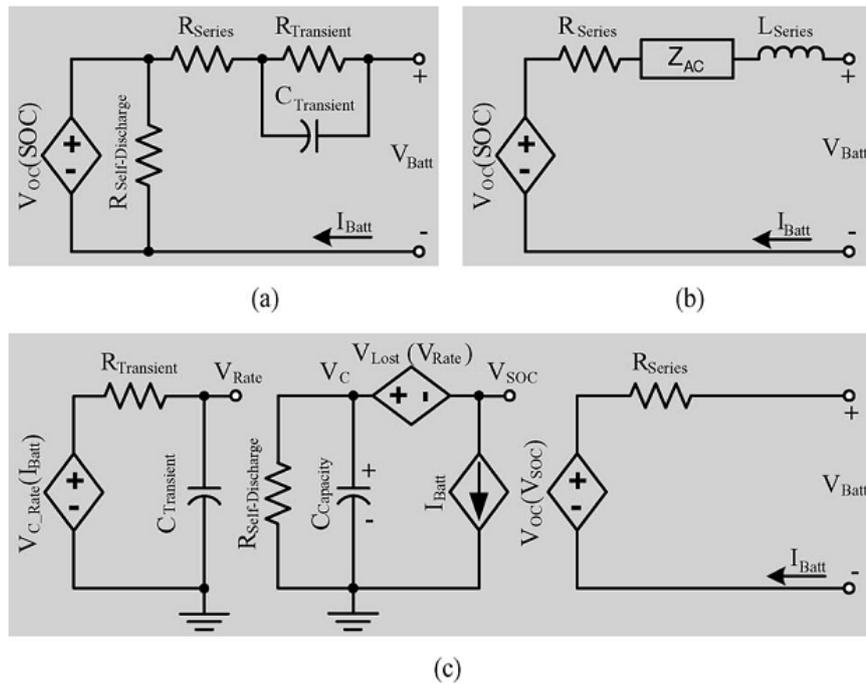


Figura 2.8 - Modelo eléctrico (a) Thevenin, (b) de impedância, e (c) runtime [7].

Com a combinação destes circuitos, existe a possibilidade de aproveitar as vantagens de cada modelo de forma a aumentar as características modeladas. Vários autores publicaram modelos que utilizam este método para aumentarem a precisão em termos de previsão do SOC, resposta transitória, runtime e efeitos da temperatura na modelação de vários tipos de baterias [7, 11].

No caso dos veículos eléctricos, existe uma característica que deve ser modelada, para aumentar o rigor da simulação, que é o caso das respostas transitórias para cargas de curta duração (menor que 1 segundo). Kroeze, em [11], apresenta um modelo eléctrico para baterias de iões de lítio, Ni-MH e ácido-chumbo, capaz de modelar os parâmetros necessários para a simulação de baterias de um VE.

Extracção de parâmetros

Para determinar os parâmetros de um modelo é necessário efectuar uma série de testes experimentais. Estes testes terão de levar em conta todas as características que se pretende modelar. Os principais testes são: descarregar a bateria perante diferentes temperaturas, diferentes números de ciclos de vida, e diferentes tempos de armazenamento (informação de auto-descarga) para se saber as suas influências na capacidade da bateria; a medição da tensão de circuito aberto com diferentes estados de carga, e diferentes impulsos de corrente (resposta transitória); e a descarga da bateria com vários níveis de correntes.

Para tornar o processo mais rápido e simples é normal conceber-se um sistema capaz de testar as baterias, com a monitorização de todos os dados necessários para a parametrização do modelo.

Os parâmetros de um modelo são normalmente função de múltiplos factores, como a corrente, a temperatura, o SOC, e número de ciclos de descarga que a bateria já sofreu. Fazer a extracção dos parâmetros segundo todos estes factores é, por isso, uma tarefa complexa. São tomadas simplificações com o intuito de aligeirar o processo.

Os parâmetros são calculados interpolando os resultados dos testes com expressões polinomiais e exponenciais que são a solução dos parâmetros do modelo. Estes problemas podem não ser resolvidos com os métodos numéricos normais. Uma solução é recorrer a métodos evolucionários, com o sentido de utilizar algoritmos de optimização avançados [12, 13].

2.2.5 - Ultracondensadores

Um ultracondensador caracteriza-se por ter uma potência específica elevada, que pode alcançar os 3 kW/kg, e ciclos de vida superiores a 500 mil, muito superior do que qualquer tipo de bateria. Contudo a sua energia específica é bastante baixa, sendo necessário actuar juntamente com outra fonte de energia [3, 5].

A tecnologia do ultracondensador, para aplicações em veículos eléctricos, tem sido desenvolvida desde os anos 90. A maior parte dessa investigação recai sobre os condensadores de dupla camada (electric double-layer capacitor - EDLC), que usam eléctrodos de carbono poroso. A evolução desta tecnologia depende de progressos em materiais e de combinações para alcançar melhores performances [3].

A energia é armazenada acumulando e separando fisicamente cargas opostas. As cargas são acumuladas em duas placas paralelas (eléctrodos) divididas por um material dieléctrico. A capacidade C representa a relação entre a carga armazenada, q , e a tensão, V , entre os eléctrodos, como mostra a equação (2.3). A capacidade depende da permissividade do dieléctrico, ϵ , da área das placas, A , e da distância entre as placas, d , tal como em (2.4). A equação (2.5) refere que a energia armazenada no condensador depende da sua capacidade e do quadrado da tensão.

$$q = CV, \quad (2.3)$$

$$C = \frac{\epsilon A}{d}, \quad (2.4)$$

$$E = \frac{1}{2} CV^2, \quad (2.5)$$

A quantidade de energia armazenada num condensador pode ser ampliada ao aumentar a capacidade ou a tensão. No entanto a tensão é limitada pela tensão de ruptura do dieléctrico, que está também directamente ligada à distância entre as placas. A capacidade pode ser engrandecida, aumentando a área das placas, aumentando a permissividade, ou diminuindo a distância entre as placas [14]. Até agora, a tensão de uma célula de um UC com electrólito aquoso é cerca de 0,9V, e com electrólito sólido é de 2,3 a 3,3V [5].

A capacidade desta tecnologia ter bastantes ciclos de vida deve-se a, idealmente, não haver reacções químicas nos eléctrodos. Outra vantagem dos UCs é a alta eficiência, que é apenas função da resistência óhmica dos eléctrodos.

Uma característica única desta tecnologia é o facto de a sua tensão ser directamente proporcional ao seu estado de carga, e de também poder ser completamente descarregado. A Figura 2.9 mostra a tensão de circuito aberto normalizada para diferentes tipos de baterias e o UC [6].

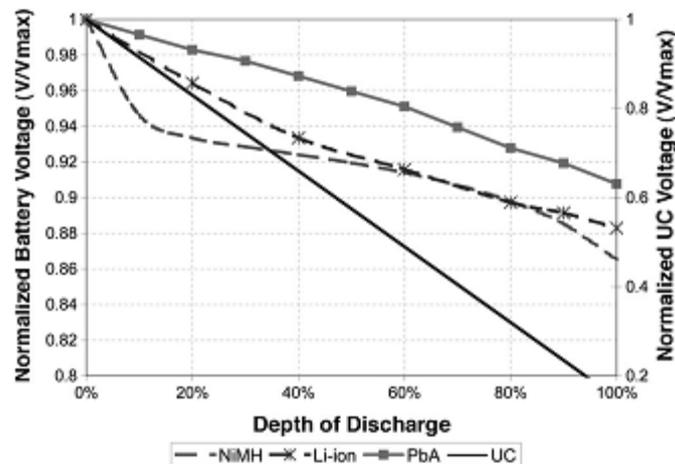


Figura 2.9 - Alteração da tensão de circuito aberto normalizada (V_{oc}/V_{max}) para vários tipos de baterias e o UC [6].

Segundo o Departamento de energia dos Estados Unidos (USDOE), os objectivos em termos de desenvolvimento da tecnologia dos UCs, para integração em VEs e HEVs, são obter células com mais de 15Wh/kg de energia específica e 1600W/kg de potência específica. Até agora, nenhuns dos ultracondensadores presentes no mercado alcançaram a meta da energia específica.

Existem actualmente vários fabricantes de UCs que comercializam tanto células simples, como módulos, tais como a Maxwell, Ness, EPCOS, Nippon Chemi-Com, entre outros (Tabela 2.4) [15].

Tabela 2.4 - Características das células de UCs de vários fabricantes [15].

Fabricante	Tensão (V)	Capacidade (F)	Densidade de energia (Wh/kg)	Densidade de potência (W/kg)
Maxwell	2.7	3000	5.52	13800
NessCap	2.7	5000	5.44	13000
BatScap	2.7	2600	5.3	18000
Vina Tech	2.7	600	5	4000
ApowerCap	2.7	450	5.89	24600
JSR Micro	3.8	2000	12.1	9000

Mais recentemente, investigadores têm juntado esforços em combinar as propriedades das baterias com as dos condensadores num único dispositivo. Uma das tecnologias mais recentes leva à combinação das características dos condensadores com as de iões de lítio. Esta combinação aumenta a energia específica deste tipo de dispositivos [16].

Outro método para garantir mais energia nos UCs é aumentar a tensão aos seus terminais. Para isso é necessário investigar materiais que possam servir de dieléctrico, com alta permissividade.

A empresa EESstor, baseada nos Estados Unidos da América, anunciou ter inventado um dispositivo capaz de funcionar a uma tensão de até 3500 V, com uma capacidade total de 30 Farads, o que fornece um armazenamento de 52,22 kWh de energia! A vantagem está nas camadas do dieléctrico, formadas de um material de alta permissividade. A patente reclama também que a potência de carga e descarga é praticamente ilimitada, podendo ser carregado nuns míseros 3 minutos! A patente [17] fornece uma tabela de comparação entre as

diferentes tecnologias de armazenamento a baterias e o dispositivo desenvolvido pela EESstor, o EESU (Tabela 2.5).

Sendo esta tecnologia possível de ser comercializada, poderá revolucionar o mundo do armazenamento de energia, sobretudo o dos veículos eléctricos.

Tabela 2.5 - Comparação das diferentes tecnologias de armazenamento com o EESU [17].

The parameters of each technology to store 52.22 kW · h of electrical energy are indicated - (data from manufacturers' specification sheets).

	EESU	NiMH	LA (Gel)	Ni-Z	Li-Ion
Weight (pounds)	286.56	1716	3646	1920	752
Volume (inch ³)	4541	17,881	43,045	34,780	5697
Discharge rate/ 30 days	0.1%	5%	1%	1%	1%
Charging time (full)	*3-6 min	1.5 hr	8.0 hr	1.5 hr	6.0 hr
Life reduced with deep cycle use	none	moderate	high	moderate	high
Hazardous materials	NONE	YES	YES	YES	YES

*The charging time is restricted by the converter circuits not the EESU.

2.2.6 - Modelo de um ultracondensador

O ultracondensador pode, tal como a bateria, ser modelado com um circuito eléctrico equivalente. A performance de um UC é representada pela tensão ao terminais durante a descarga e carga com diferentes fluxos de correntes. O modelo mais simples consiste na capacidade C , a resistência série R_s (também chamada de resistência série equivalente - R_{ESR} ou resistência interna) que simula as perdas óhmicas internas, e a resistência de fugas do dieléctrico R_L (Figura 2.10). A tensão nos terminais do UC durante a descarga pode ser expressa como

$$V_t = V_C - iR_s. \tag{2.6}$$

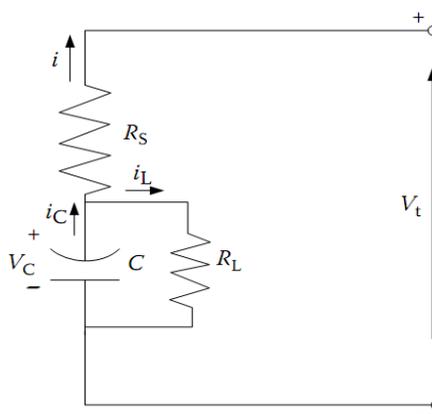


Figura 2.10 - Circuito equivalente de um UC [5].

Em [18], o Autor compara o resultado da simulação deste modelo com um teste experimental de um UC na carga e descarga (com as mesmas características). A vantagem da utilização deste modelo é a sua simplicidade, tornando fácil a incorporação na plataforma de software bem como o processamento. A principal desvantagem é o facto de o modelo RC não ser capaz de capturar a resposta dinâmica da tensão.

Outros modelos mais detalhados foram investigados de forma a obter uma melhor modelização. Estes modelos podem ser categorizados em três classes: o modelo RC de ramo paralelo, o modelo RC de linha de transmissão, e o modelo RC série-paralelo. O número de malhas RC em cada modelo pode ser alterado, aumentando ou diminuindo a precisão. Normalmente são usadas 2 a 3 malhas RC.

O modelo RC de ramo paralelo tem o objectivo de simular o comportamento do UC durante a carga e descarga. Quando o UC em carga é parado, a tensão vai diminuindo (ou aumentando caso se esteja a falar de uma descarga) durante vários minutos até ficar constante. A esta resposta da tensão se dá o nome de resposta dinâmica.

Cada malha RC tem uma constante de tempo diferente: rápido (R_f e C_f), médio (R_m e C_m), e lento (R_s e C_s) (Figura 2.11). O termo rápido demonstra o comportamento de carga e descarga numa ordem abaixo de um segundo. O termo médio domina a escala dos segundos. O ramo lento rege a característica da carga e descarga na ordem dos minutos.

O modelo RC de malha paralela tem uma boa resposta do comportamento dinâmico do UC durante o processo de carga e descarga. A precisão do modelo é mais elevada do que o modelo RC simples. No entanto, para tensões abaixo dos 40% da tensão nominal, o erro entre o modelo e o comportamento real é mais elevado. Os parâmetros podem ser facilmente retirados por testes experimentais simples [18].

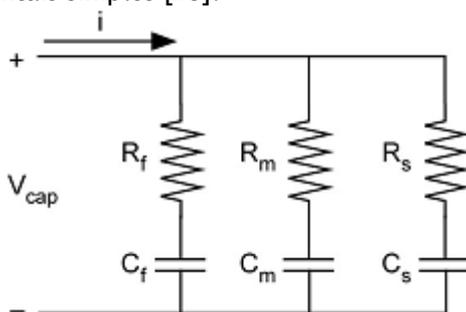


Figura 2.11 - Modelo RC de malha paralela [18].

O modelo RC linha de transmissão (Figura 2.12) é baseado na teoria do eléctrodo poroso. Desta teoria, o modelo é referido como um modelo de uma linha de transmissão. A estrutura física e as características do UC são directamente simuladas. Tal como o anterior, também este modelo é capaz de simular os comportamentos dinâmicos e temporais, sendo os parâmetros modelizados por testes experimentais a corrente constante. Tem a desvantagem de ter uma expressão analítica complexa.

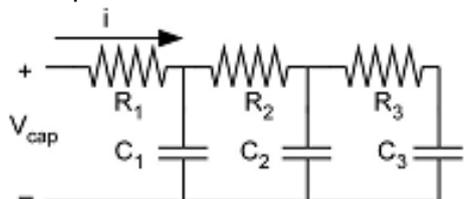


Figura 2.12 - Modelo RC de linha de transmissão [18].

A Figura 2.13 mostra o circuito com três ramos RC série-paralelo. R_a representa a resistência interna, C_a e os ramos RC paralelos equivalem às impedâncias dos poros do UC. Para aumentar a precisão do modelo, os parâmetros podem depender da temperatura, tensão e frequência de operação do UC. Os parâmetros do modelo podem ser adquiridos pelo teste da espectroscopia dieléctrica.

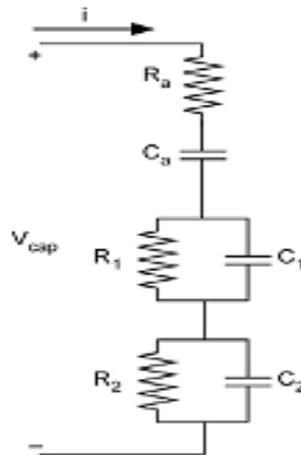


Figura 2.13 - Modelo RC de malhas séries paralelas [18].

De reparar que os modelos RC anteriores não modelizam a resistência de fugas do UC, no entanto ela deve ser considerada. O UC tem ainda associada uma indutância parasita que deve ser modelada, especialmente a funcionamentos a uma frequência mais elevada. Lisheng, em [18], sugere um modelo geral, em que o número de malhas pode ser estendido para o infinito (Figura 2.14).

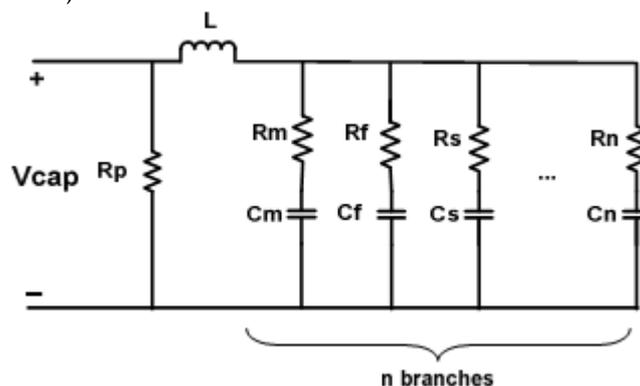


Figura 2.14 - Modelo geral RC ramos paralelos [18].

2.2.7 - Topologia híbrida de armazenamento

Devido às acelerações e travagens de um veículo eléctrico de competição, o perfil de carga e descarga do armazenamento de energia é bastante variado. A potência média necessária do ESS é bastante mais baixa do que nos picos de potência, das acelerações, de curta duração. Tendo presente as tecnologias de baterias da actualidade, estas têm de assegurar um trade-off entre energia específica, potência específica e ciclos de vida. A dificuldade em obter simultaneamente valores elevados destas três condições leva a sugerir que o sistema de armazenamento deverá ser híbrido, combinando fontes de alta energia e fontes de alta potência.

As fontes de energia específica são principalmente as baterias e as fuel cells, enquanto a fonte de potência que tem recebido mais atenção tem sido os ultracondensadores [1, 5]. A Figura 2.15 mostra que ao combinar baterias com UCs se eleva a performance do ESS [6]. Nos últimos anos diferentes topologias para sistemas de armazenamento de energia híbrido (hybrid energy storage system - HESS) têm sido estudadas.

O tipo de ligação mais simples está representado na Figura 2.16 (ligação passiva paralela), em que as duas tecnologias de armazenamento estão ligadas ao barramento DC paralelamente. Esta configuração obriga que a tensão dos dois ESS seja igual, o que limita a potência fornecida pelo UC. A melhor aplicação para esta configuração é em sistemas que necessitem de um impulso elevado de potência (arranque de um motor) seguido por um longo período de baixa potência. Devido a não se poder controlar o fluxo de potência de cada fonte, esta topologia não tem grande vantagem na utilização em VEs [19].

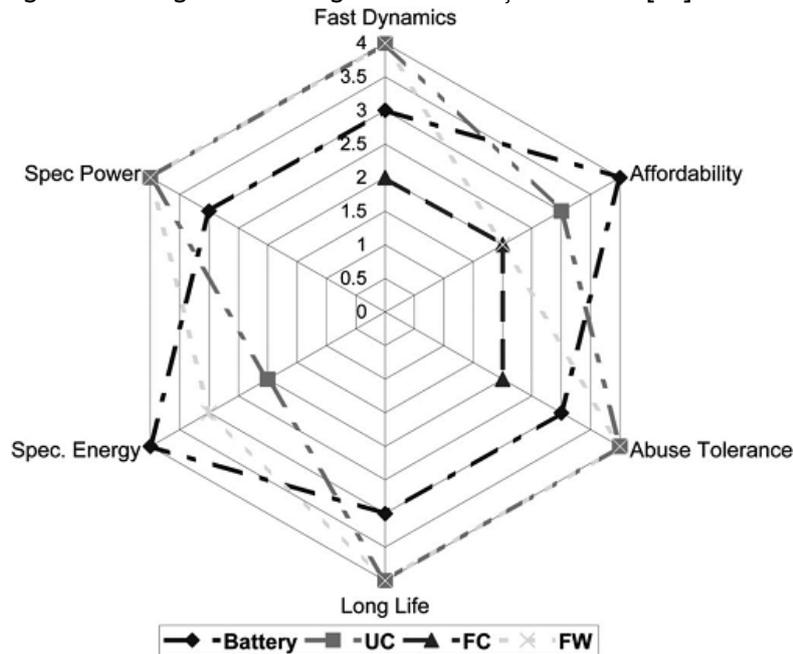


Figura 2.15 - Comparação dos parâmetros das tecnologias de armazenamento de energia [6].



Figura 2.16 - Configuração passiva paralela [20].

Na Figura 2.17 encontra-se o diagrama da configuração UC/bateria. Com a utilização de um conversor bidireccional DC/DC para fazer a interface com o UC, é possível diferenciar a tensão, controlando a potência e energia fornecida pelo UC. A bateria está directamente ligada ao barramento DC, podendo-se manter a tensão desse barramento praticamente constante. Tem o inconveniente de a energia de travagem regenerativa não poder ser controlada para ser absorvida pelo UC. A tensão da bateria tem de ser a que se pretende para o bom funcionamento do inversor. Esta é a topologia HESS mais estudada e investigada [21].

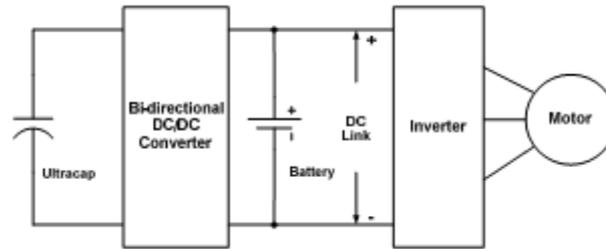


Figura 2.17 - Configuração ultracondensador/bateria [21].

Trocando o UC pela bateria obtém-se a configuração representada no diagrama da Figura 2.18. Neste caso é a tensão da bateria que pode ser mantida a um nível inferior ao do barramento. O UC está ligado directamente ao barramento trabalhando com um filtro passa baixo. Esta topologia admite a possibilidade de flutuação de tensão no barramento, no entanto, a eficiência do inversor baixa [6, 21].

Para aumentar a variação da tensão de funcionamento do UC, da topologia anterior, foi adicionada outro conversor bidireccional entre o UC e o barramento DC (Figura 2.19).

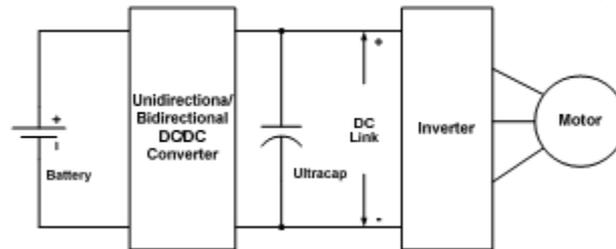


Figura 2.18 - Diagrama de configuração bateria/ultracondensador [21].

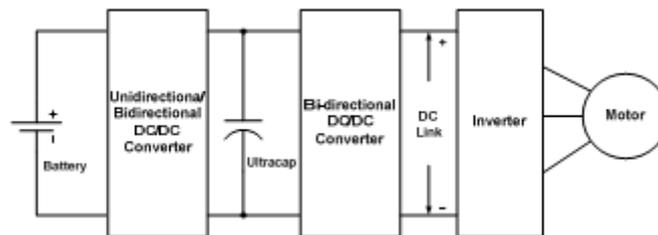


Figura 2.19 - Configuração em cascata [21].

A topologia da Figura 2.20 caracteriza-se por cada fonte de energia estar ligada ao barramento DC por um conversor dedicado. Dada esta característica, é possível retirar o máximo rendimento de cada fonte providenciando um elevado nível de flexibilidade. Permite a implementação de várias topologias e estratégias de controlo [6, 19, 21].

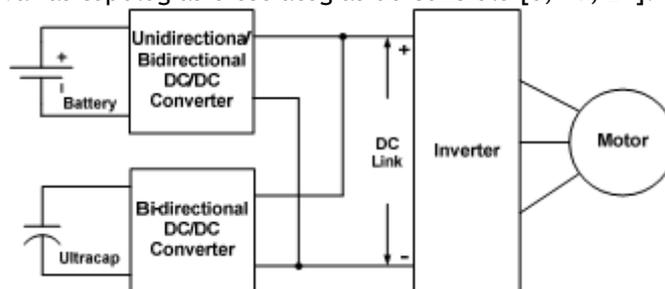


Figura 2.20 - Configuração de múltiplos conversores [21]

Outro tipo de topologia alternativa é a estrutura de múltiplas entradas (Figura 2.21). Todo o sistema é visto como um único processo com múltiplas portas de interface, regulando as tensões e gerindo os fluxos de potência. Tem a vantagem de ser possível partilhar todos os

recursos da estrutura (dispositivos de conversão) e diminuir a redundância. Como resultado a eficiência aumenta, pela diminuição das perdas. Contudo, esta topologia está mais associada a sistemas onde incluam fontes de energia, como por exemplo células de combustível, painéis fotovoltaicos, entre outros [22].

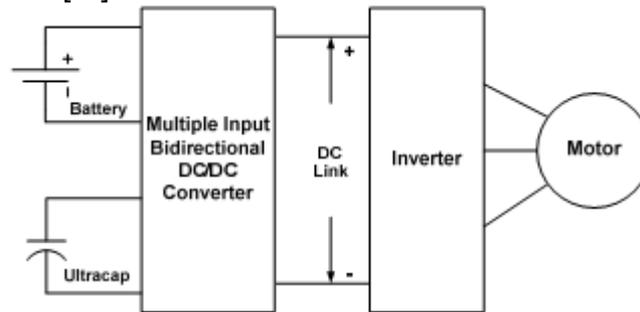


Figura 2.21 - Configuração de um conversor de múltiplas entradas [21].

2.3 - Sistemas de carga de baterias

A carga é o processo de repor energia numa bateria descarregada, até à sua capacidade nominal. Para que a bateria possa receber energia, deve ser carregada com um método apropriado, definido pela tecnologia da mesma. Torna-se necessária a utilização de conversores de electrónica de potência, controlados de modo a respeitar as exigências do método de carga.

2.3.1 - Métodos de carga

O método de carga é determinado pela tolerância da bateria às sobrecargas. Em geral, as baterias formadas por electrólitos aquosos, como as ácido-chumbo, níquel-cádmio e Ni-MH têm reacções gasosas que permitem a sobrecarga. Ao contrário da tecnologia de iões de lítio que não permite. Neste último caso, as baterias devem ter um controlo individual por célula, designado de balanceamento celular (de cell balancing). De referir que a sobrecarga provoca degradação na bateria, diminuindo o seu tempo de vida.

Existem quatro métodos básicos de carga que se caracterizam por ser em tensão constante, corrente constante, a combinação destas duas (corrente e tensão), e impulsos de corrente.

Em tensão constante, a corrente fornecida à bateria vai diminuindo até uma corrente mínima ser atingida. As tecnologias de ácido-chumbo e iões de lítio são as que usam mais frequentemente este modo. Em corrente constante, a tensão varia, aumentando para manter a referência de corrente, até alcançar a tensão que indica carga completa. Este sistema é usado pelas baterias de níquel-cádmio e Ni-MH.

Um modo de carga bastante usado é o de corrente constante seguida de tensão constante. A bateria começa por receber uma corrente constante até a tensão atingir o limite (no caso das Ni-MH e ácido-chumbo é a tensão a partir da qual se começam a formar gases). Depois o controlo passa a ser feito a uma tensão constante, fazendo diminuir a corrente até um valor mínimo. As três tecnologias de baterias podem ser carregadas por este método.

O modo de carga por impulsos de corrente (pulse charger) caracteriza-se por carregar a bateria com impulsos de corrente, fornecendo um período de descanso com cerca de 20 a 30 milissegundos. Esta estratégia permite que as reações químicas estabilizem, neutralizando o electrólito. Este método pode reduzir reacções químicas indesejadas, tais como a formação de gases e aparecimento de cristais, aumentando assim o número de ciclos de vida da bateria.

O Reflex ou impulso de carga negativo utiliza a estratégia do modo anterior, com a adição de um impulso negativo de curta duração no período de descanso. Este impulso de descarga tem uma duração típica de 5 milissegundos, e tem o valor de duas a três vezes o valor do impulso de carga. O impulso negativo desaloja qualquer bolha de gás que possa ser produzida nos eléctrodos durante a carga rápida, acelerando a estabilização do processo e por conseguinte todo o sistema de carga, prevenindo a degradação da bateria.

Existem outros modos de carga de baterias, mas no entanto, não têm grande importância no tema dos veículos eléctricos.

Os métodos que permitem determinar quando finalizar a carga variam conforme a tecnologia da bateria. Em baterias de iões de lítio o sistema de carga é normalmente feito em corrente constante - tensão constante, e a tensão da célula ao atingir os 4,2V mantém-se constante até a corrente descer abaixo de um limite (3% da corrente nominal). Normalmente a carga demora três horas.

Já nas baterias de Ni-MH a carga convém que seja rápida, já que reduz as formações cristalinas, que é causa do efeito de memória neste tipo de baterias. O método para saber se a carga está finalizada é muito mais complicado que o anterior. Neste caso do Ni-MH, a tensão é praticamente constante durante todo o SOC (cerca de 8 a 16mV de variação). A solução encontrada é a de combinar a variação de tensão, o aumento da temperatura, e o tempo de carga, para saber quando terminar a carga [23].

Capítulo 3

Modelação do sistema de armazenamento de energia

3.1 - A bateria

As baterias de iões de lítio, como já foi referido anteriormente, são as que têm melhores características para serem utilizadas no Veículo Eléctrico de Competição. No entanto, devido a este tipo de bateria ter um custo elevado, optou-se por utilizar a tecnologia de níquel hidreto metálico. Este tipo de baterias é utilizado por vários fabricantes de veículos híbridos como, por exemplo, a Toyota e a Honda. As informações disponíveis destas células de Ni-MH são a sua tensão nominal de 1,2V e a capacidade de 5,5Ah. Cada pack de baterias contém 11 módulos de baterias, compostos por 12 células em série, perfazendo um total de 132 células de Ni-MH por pack (Figura 3.1). A energia total armazenada em cada pack tem portanto um valor de 871,2Wh.

Não tendo em mão a informação acerca de um modelo desta bateria, houve a necessidade de a modelar e parametrizar. O modelo eléctrico da bateria tem um papel fundamental na simulação de todo o sistema de alimentação do VEC, pois permite obter a dinâmica da tensão perante casos distintos do funcionamento do veículo, bem como em diferentes condições das mesmas, para assim se conseguir obter uma simulação mais próxima da realidade.



Figura 3.1 - Pack de baterias Ni-MH, com invólucro, ligações e terminais para sensorização, à esquerda. Na direita um módulo composto por 12 células.

As formas de onda típicas da dinâmica na tensão de uma bateria são apresentadas em vários artigos: [24], [25], [26] e [27]. Os Autores impõem uma variação praticamente instantânea da corrente na bateria, observando a resposta da tensão. Os resultados práticos, levados a cabo nestes artigos, levam a admitir que a bateria, quando é forçada a uma descarga tende a baixar a sua tensão, enquanto ao ser forçada a uma carga a sua tensão tende a subir, conforme é ilustrado na Figura 3.2.

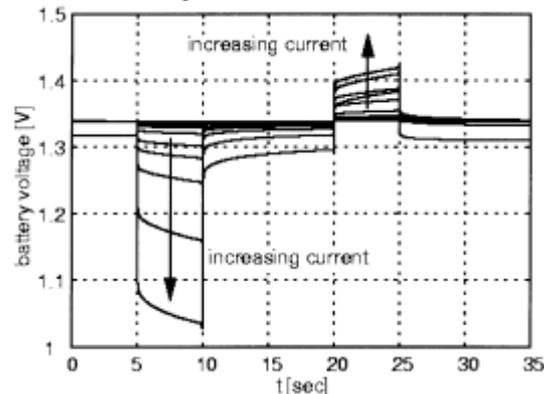


Figura 3.2 - Resposta da tensão de uma célula de Ni-MH a diferentes correntes de descarga (5 a 10s) e carga (20 a 25s) [27].

Com o intuito de comparar a resposta da tensão das baterias, de Ni-MH utilizadas no projecto VEC, com a relatada nos artigos, desenvolveu-se um sistema de teste.

Como referido anteriormente as baterias estão disponíveis em módulos de 12 células em série. Tornou-se impossível separá-las fisicamente, pelo que todos os testes são feitos ao módulo completo.

Para forçar a bateria a uma variação brusca de corrente, colocou-se esta em paralelo com resistências de potência. Ao fechar o circuito foi possível verificar, com a ajuda de um osciloscópio digital, a resposta da tensão à corrente de descarga imposta, bem como, aquando da abertura do circuito (rest time) (Figura 3.3).



Figura 3.3 - Resposta da tensão da bateria a uma carga: dinâmicas de descarga e rest time.

Das imagens capturadas é possível observar, quando a bateria é ligada à carga dissipativa, que existe uma queda de tensão instantânea, e uma dinâmica mais lenta, nos segundos seguintes. Quando o circuito é aberto, ou seja, a corrente que estava a circular da bateria para a carga torna-se zero, a tensão da bateria sobe instantaneamente e tem uma resposta mais lenta nos segundos seguintes.

O modelo da bateria deve ter em conta estas características dinâmicas da tensão das células de Ni-MH, bem como a alteração da tensão em circuito aberto conforme o seu SOC, temperatura e número de ciclos por que já passou. No entanto, torna-se difícil de estabelecer uma relação entre número de ciclos - tensão em circuito aberto, já que levaria a fazer um teste exaustivo com centenas de cargas e descargas, e por isso é descartada, para já, a hipótese de ser modelada. Seria também interessante modelar a temperatura no funcionamento da bateria pois, como se sabe tem influência nas características da tensão em circuito aberto e na dinâmica [11]. No entanto, para simplificar os cálculos da modelação/parametrização, achou-se por bem afastar o efeito da temperatura, e admitir que os testes foram todos feitos a uma temperatura semelhante e constante.

O modelo apresentado por Schweighofer em [27] permite modelar a resposta transitória e estacionária da tensão para um determinado SOC. O modelo está representado no circuito da Figura 3.4, onde V_{bat} é a tensão aos terminais da bateria e a corrente a circular na bateria é designada de I_{bat} . A tensão em circuito aberto V_{oc} é representada por uma fonte de tensão e modela o valor de tensão que a bateria apresenta, depois de estabilizada em circuito aberto.

Esta última tensão V_{oc} possui valores distintos para cada estado de carga, ou seja, é função do SOC. Com estados de carga altos, V_{oc} tem valores superiores, do que num estado de carga inferior, conforme foi referido no capítulo anterior. Acrescentando ainda, nas baterias de Ni-MH, V_{oc} tem valores diferentes para quando está em carga ou descarga.

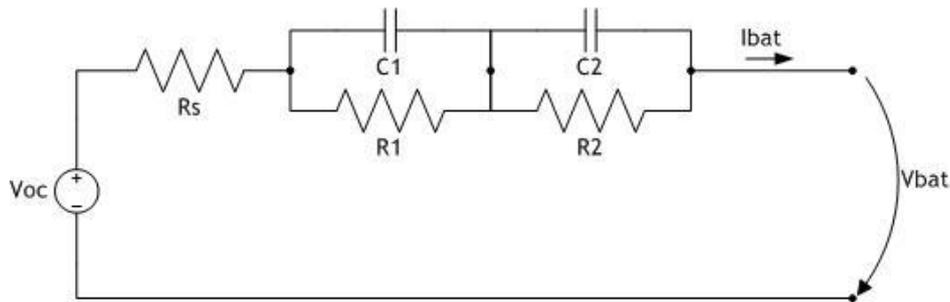


Figura 3.4 - Modelo da bateria adoptado.

A resistência R_s , designada de resistência interna ou série, modela as resistências internas presentes na bateria por parte dos conectores, eléctrodos e electrólito. A resposta instantânea da tensão a um degrau de corrente (carga), visualizado na Figura 3.3, é modelada por esta resistência série.

A dinâmica da tensão a uma variação da corrente na bateria é modelada pelas duas malhas RC. A primeira malha R_1C_1 modela uma resposta transitória mais rápida, na ordem das décimas de segundo, enquanto a malha R_2C_2 define uma resposta mais lenta da bateria, podendo mesmo chegar a várias horas.

Os parâmetros deste modelo variam com o estado de carga da bateria. Com o intuito de parametrizar, este modelo, foi necessário desenvolver um procedimento de teste capaz de fornecer dados experimentais da bateria.

3.2 - Sistema de testes à bateria

O teste consiste em impor degraus de corrente e observar a resposta da tensão na bateria para diferentes estados de carga. Assim, o procedimento de teste que se desenvolveu foi semelhante aos elaborados em [25] e [27], e consiste em colocar a bateria em descarga ou carga durante um determinado período de tempo T_{on} . Após esse tempo abre-se o circuito e espera-se que a tensão estabilize durante um tempo T_{off} . Esta última tensão depois de estabilizada é a tensão de circuito aberto, importante também para parametrizar o modelo. Ao repetir o teste ao longo do tempo, o estado de carga da bateria altera-se, consoante a bateria seja testada para carga ou descarga, sendo assim possível obter dados experimentais para diferentes estados de carga.

Desenvolveu-se um sistema capaz de implementar este procedimento. O esquema eléctrico do mesmo encontra-se ilustrado na Figura 3.5 e consiste na bateria colocada em série com um relé de estado sólido, uma carga R_{load} ou uma fonte controlada em corrente, e uma resistência de precisão R_{shunt} . Para testes de descarga utilizou-se a carga resistiva R_{load} , neste caso um reóstato de potência. Já nos testes de carga, a fonte de corrente controlada substituiu o reóstato. A resistência Shunt permite calcular a corrente a circular no circuito pela medição da queda tensão.

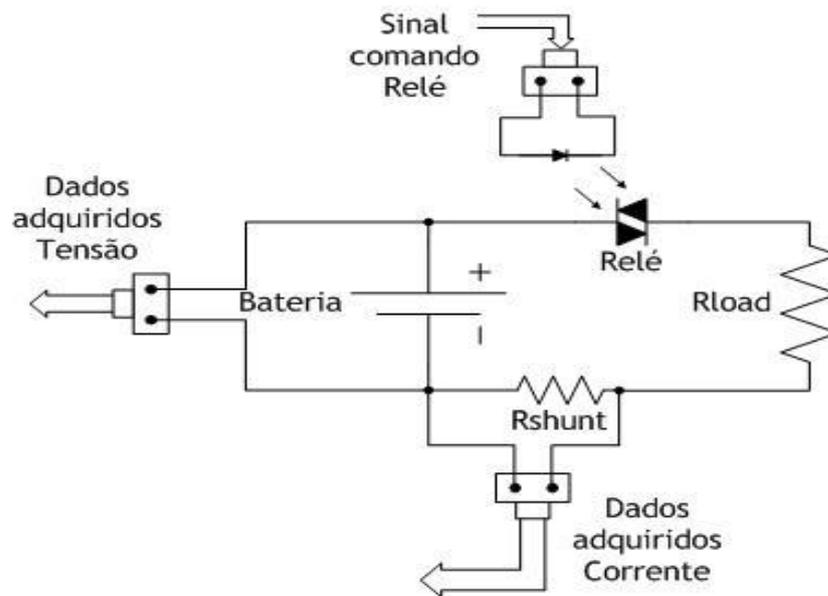


Figura 3.5 - Esquema elétrico do sistema de testes.

Utilizou-se a plataforma Labview com uma placa de aquisição de dados para fazer o comando do relé e adquirir as tensões provenientes da bateria e da resistência de precisão.

Usou-se a placa NI PCI 6221, capaz de adquirir a uma velocidade de 250kS por segundo. As aquisições da tensão e da corrente foram feitas em tempos semelhantes à mesma frequência, em dois canais distintos, o que fez diminuir a frequência de aquisição para metade, ou seja, 125kHz. Verificando a curva da resposta da tensão a uma variação de corrente, apercebeu-se que a velocidade de 125kHz chegou perfeitamente para capturar a dinâmica mais rápida da bateria. Noutro tipo de baterias, como por exemplo as de tecnologia de iões de lítio, que têm uma resposta temporal muito mais rápida, seria necessária uma velocidade de aquisição superior a esta.

Dado que a variação da tensão não é a mesma ao longo do tempo que decorre o teste, a aquisição dos dados da tensão e corrente à frequência mais elevada não é apropriada, pelo que se decidiu utilizar três frequências diferentes, conforme a variação da tensão. A Figura 3.6 explicita os locais de diferentes períodos de aquisição, onde T1 é obviamente o tempo onde a frequência é maior, T2 tem uma frequência menor, e T3 tem um período entre aquisições na ordem dos segundos. No sinóptico do programa (Figura 3.7), os tempos de aquisição e as frequências podem ser definidos pelo utilizador, conforme as necessidades, para cada período atrás citado.

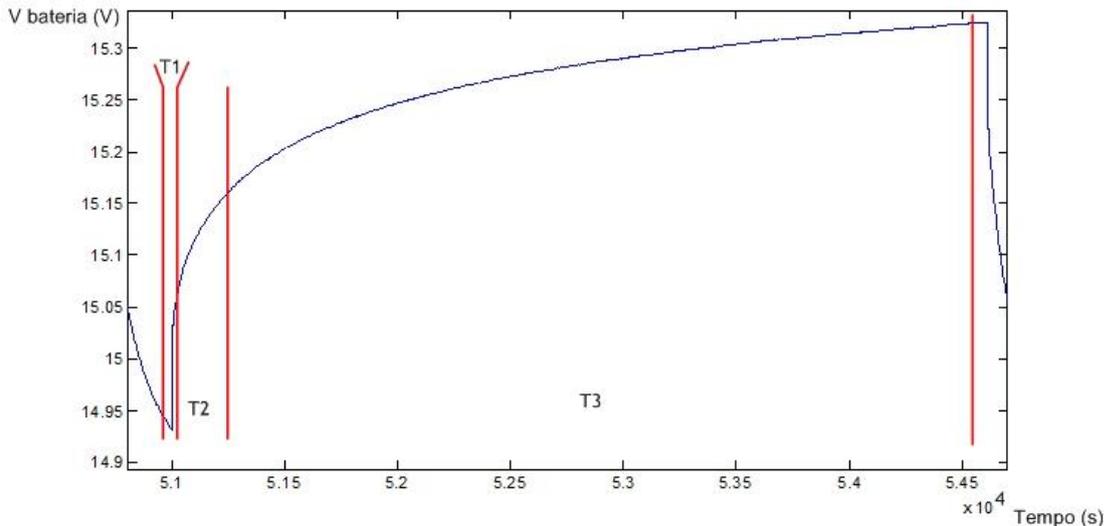


Figura 3.6 - Diferentes períodos de aquisição ao longo de um período Toff do teste.

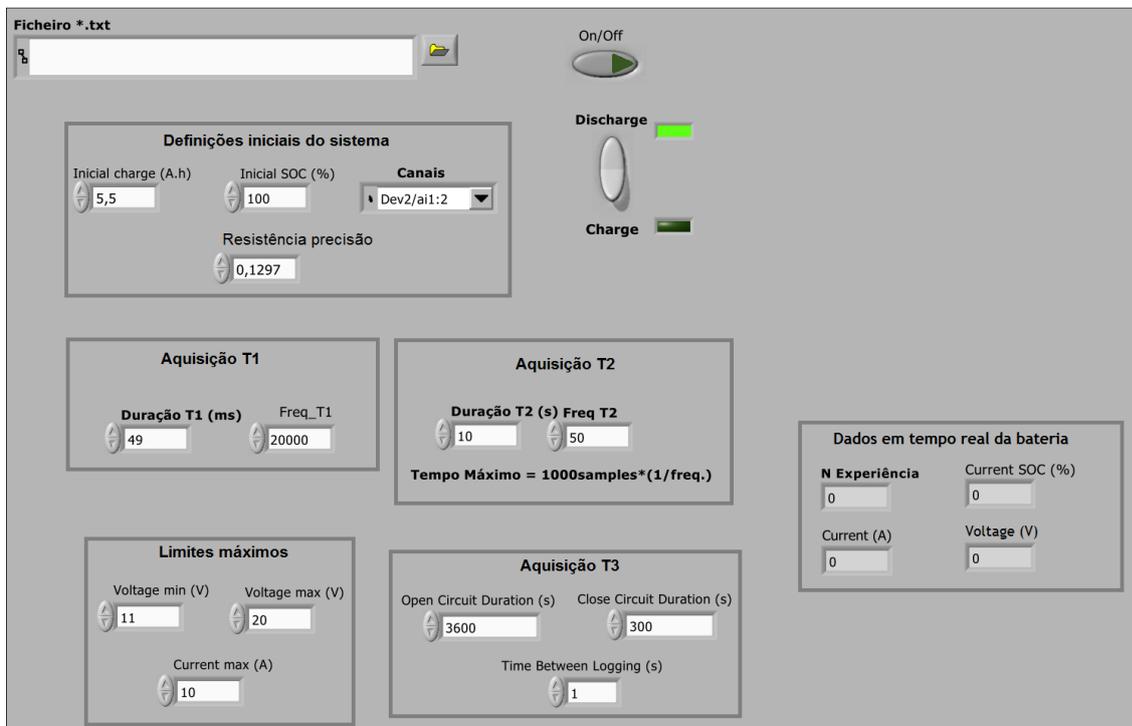


Figura 3.7 - Sinóptico do programa de testes.

O estado de carga da bateria era calculado, em tempo real, e consistiu na integração da corrente ao longo do tempo. Para poder fazer este cálculo, o programa necessitava de dados iniciais, que tinham de ser preenchidos no sinóptico, antes do início do teste.

Ainda no painel frontal é possível definir limites quanto à tensão máxima e mínima, bem como a corrente máxima, a que a bateria estava sujeita nos testes. Estes valores serviram como protecções para que o sistema parasse de imediato caso algum deles fosse ultrapassado.

Todos os dados dos testes são guardados num documento de texto, conforme ilustrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Estrutura dos dados do teste guardados em documento de texto

<i>Tempo (h:m:s)</i>	<i>Tensão (V)</i>	<i>Corrente (A)</i>	<i>Nº do teste</i>	<i>SOC (%)</i>
14:28:50,468750	16,3190	2,7016	2	85,3354
14:28:51,468750	16,3173	2,7014	2	85,3231
14:28:52,468750	16,3160	2,7011	2	85,3108
14:28:53,468750	16,3145	2,7009	2	85,2985

3.3 - Resultados dos testes

O tratamento dos dados, para sua análise, realizou-se em Matlab. Aí foram reconstruídas as formas de onda da tensão na bateria e respectiva corrente ao longo do tempo dos testes.

A Figura 3.8 ilustra o formato da corrente na bateria ao longo de um teste de descarga. O ideal seria obter uma corrente constante durante todo o teste. No entanto, a carga utilizada para o teste é uma resistência de potência, não conseguindo manter-se uma corrente constante devido à queda da tensão na bateria.

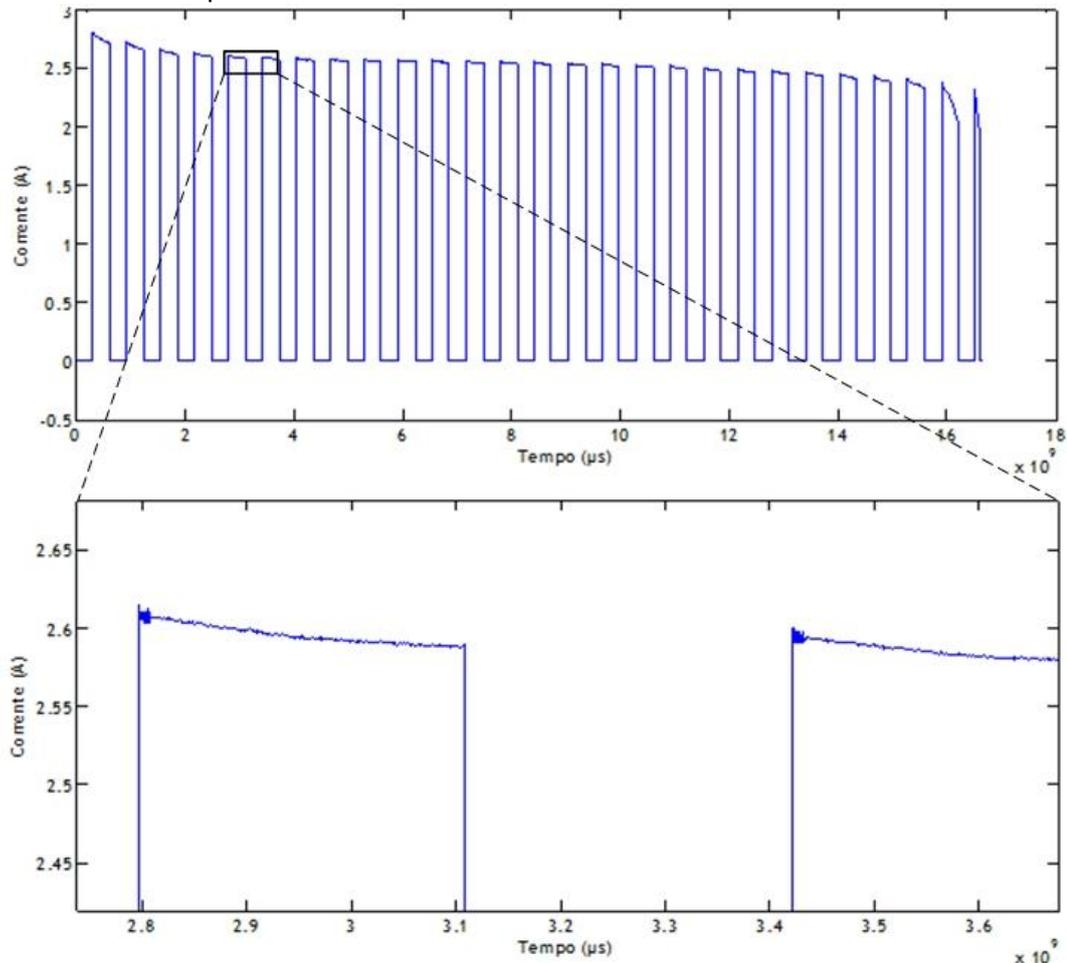


Figura 3.8 - Forma de onda da corrente da bateria a um teste de 5 minutos de descarga e 5 minutos de descanso (rest time), e pormenor.

Na Figura 3.9 está representada a forma de onda da tensão da bateria sujeita a um teste de 5 minutos de descarga e 5 minutos de descanso. Este foi o primeiro teste feito pelo

sistema desenvolvido. Das curvas retiradas concluiu-se que o tempo de descanso teria de ser superior, já que não se consegue perceber para que valor tende a tensão de circuito aberto.

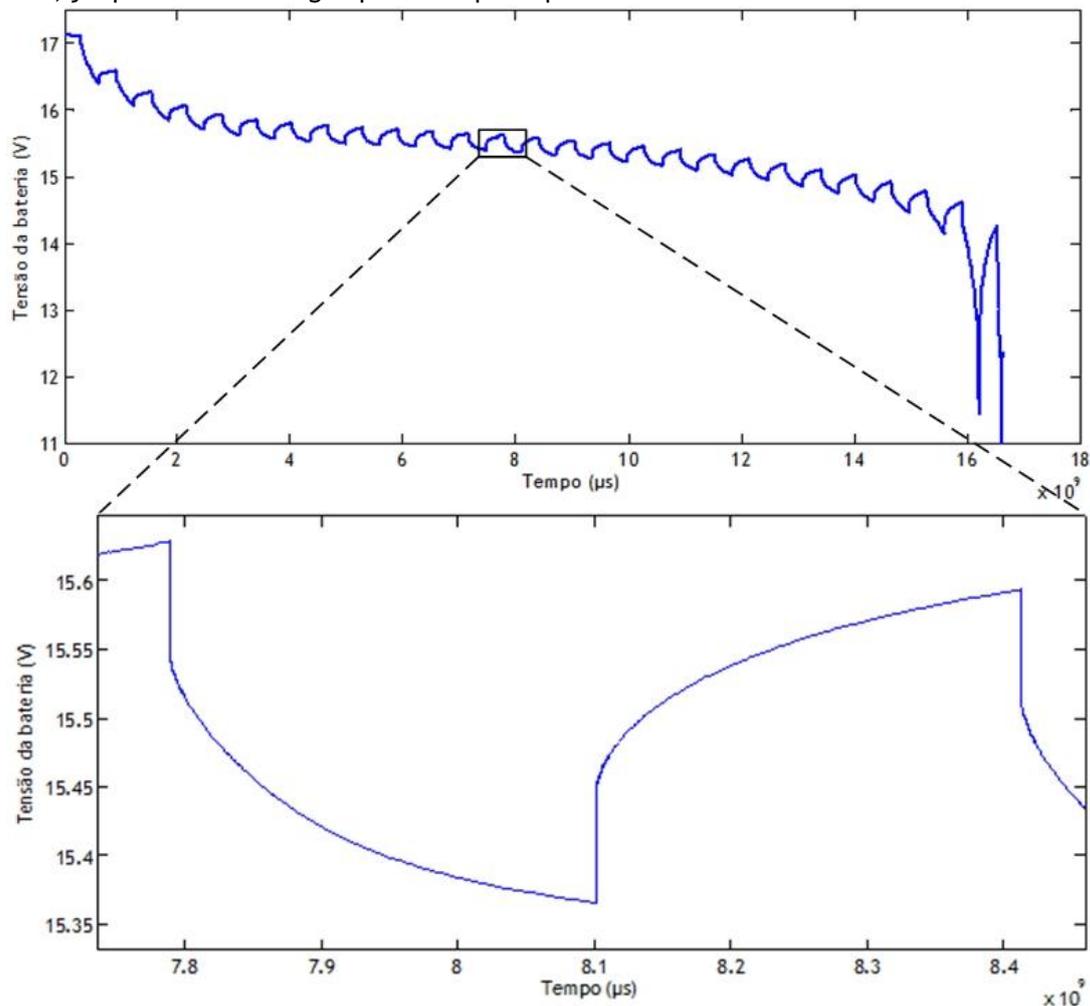


Figura 3.9 - Curva da tensão da bateria a um teste de 5 minutos de descarga e 5 minutos de descanso (rest time), e pormenor.

Com o intuito de se perceber para que valor tendia a dita tensão, realizou-se outro teste, desta vez com um período de descanso de 25 minutos. Na Figura 3.10 encontra-se o resultado. É possível observar que mesmo os 25 minutos não são suficientes.

Decidiu-se refazer o teste, com um rest time de uma hora, o que levou cerca de 28 horas a estar concluído. A Figura 3.11 retrata a forma de onda da tensão durante o teste. No pormenor já se pode visualizar uma tendência da tensão em circuito aberto. De facto, conclui-se que existe uma dinâmica muito lenta da tensão.

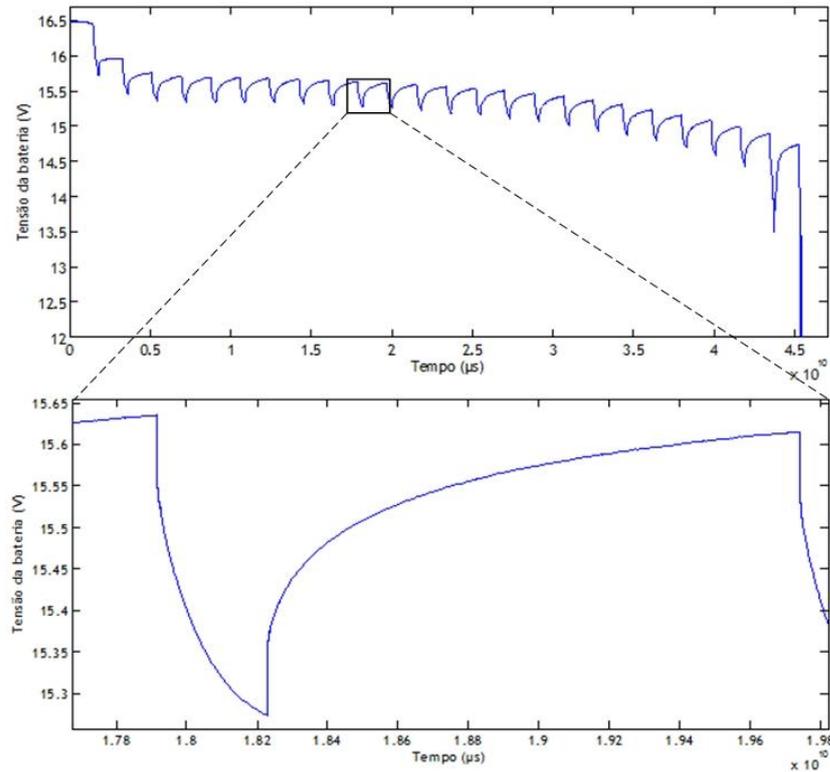


Figura 3.10 - Curva da tensão da bateria a um teste de 5 minutos de descarga e 25 minutos de descanso (rest time), e pormenor.

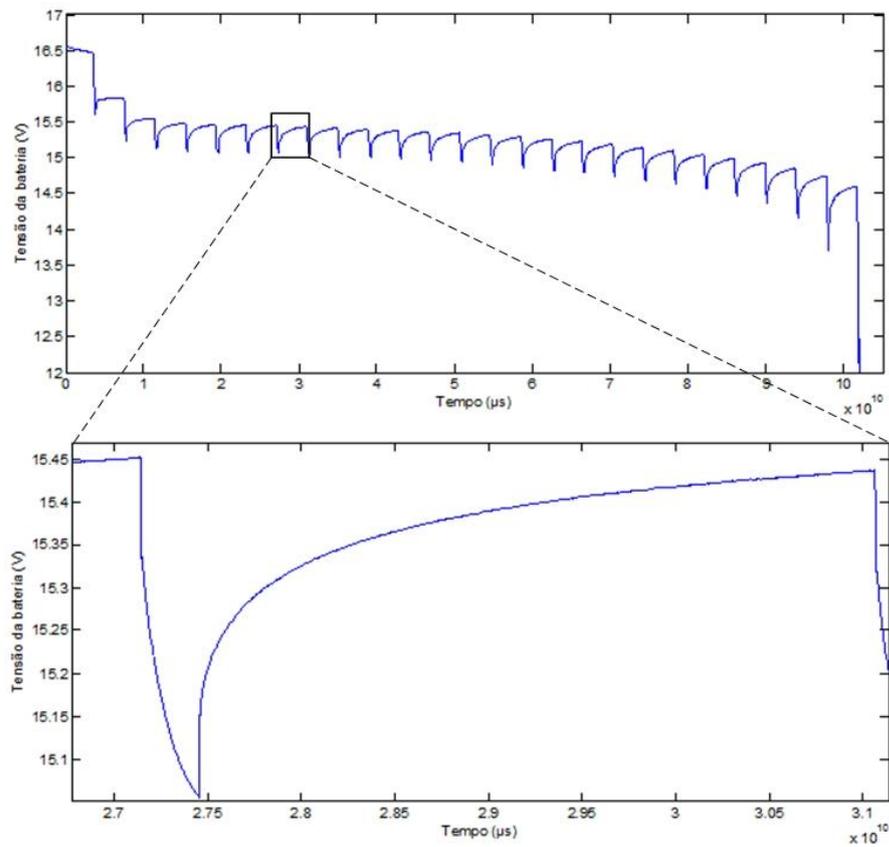


Figura 3.11 - Curva da tensão da bateria a um teste de 5 minutos de descarga e 1 hora de descanso (rest time), e pormenor.

Foi testada também a bateria em carregamento. O resultado encontra-se na Figura 3.12.

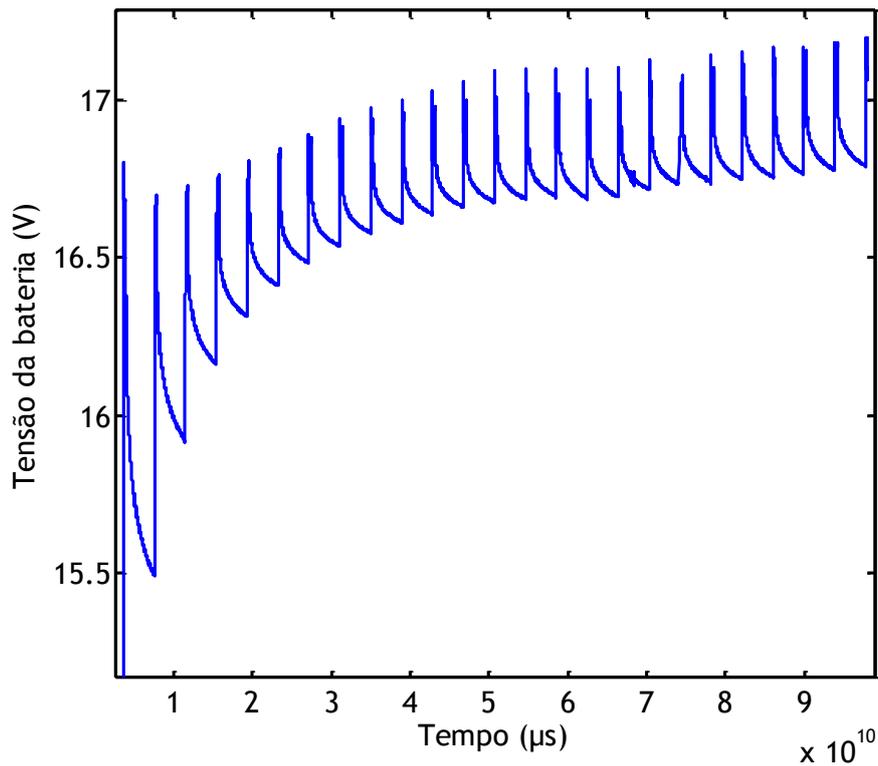


Figura 3.12 - Curva da tensão da bateria a um teste de 5 minutos de carga e 1 hora de descanso (rest time).

Da comparação das curvas da tensão da bateria em carga e descarga, é possível observar que a tensão em circuito aberto, V_{oc} , tem uma característica comparada com a histerese em materiais magnéticos. A Figura 3.13 ilustra o descrito. Na carga, a tensão de circuito aberto tende a subir mais do que quando se coloca a bateria a descarregar.

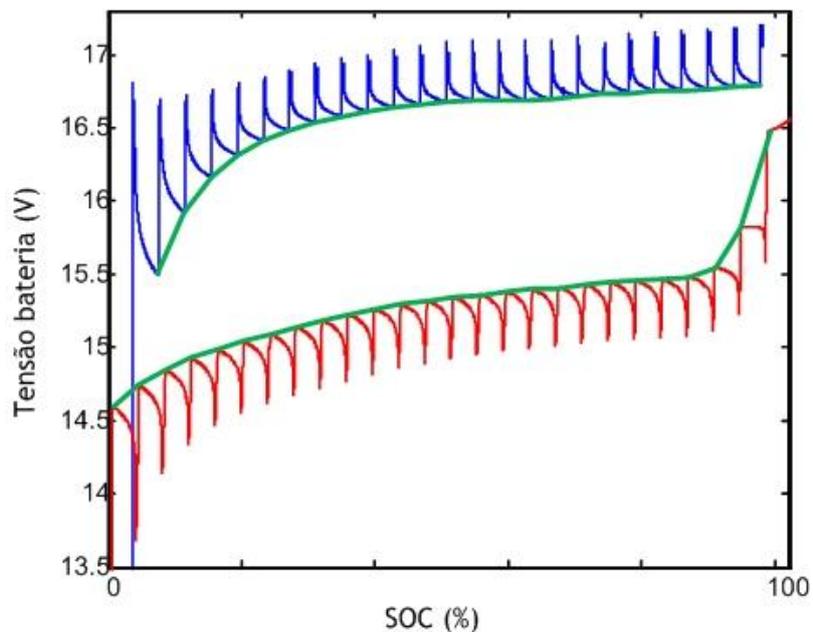


Figura 3.13 - Histerese da tensão de circuito aberto V_{oc} (verde); resposta da tensão da bateria a teste de carga (azul) e descarga (vermelho).

3.4 - Parametrização do modelo

O teste às baterias, anteriormente tecido, permite retirar os dados necessários para a parametrização do modelo da bateria adoptado nesta dissertação.

Analizou-se o modelo da Figura 3.4 e retirou-se a expressão da tensão da bateria V_{bat} em função do tempo, admitindo um degrau de corrente:

$$V_{bat}(t) = V_{oc} - R_s I_{bat} - \left(R_1 I_{bat} - R_1 I_{bat} \times e^{-\frac{t}{R_1 C_1}} \right) - \left(R_2 I_{bat} - R_2 I_{bat} \times e^{-\frac{t}{R_2 C_2}} \right) \quad (3.1)$$

Da expressão (3.1) é possível observar que, quando existe uma corrente positiva, ou seja, a bateria fornece potência a uma carga, a tensão da mesma desce. Pelo contrário, quando a bateria é carregada, a corrente é negativa, a tensão sobe.

A influência da resistência interna, R_s , e da malha $R_2 C_2$, de maior constante de tempo, na dinâmica da tensão, é bem explícita nos resultados dos testes anteriormente apresentados. Já a interferência da malha rápida $R_1 C_1$, só é possível observar aplicando zoom ao gráfico. A Figura 3.14 expõe a queda de tensão instantânea provocada pela resistência R_s , e a resposta da malha rápida, a um degrau de corrente. Concluiu-se, pelo gráfico, que a constante de tempo da malha rápida é inferior a um segundo.

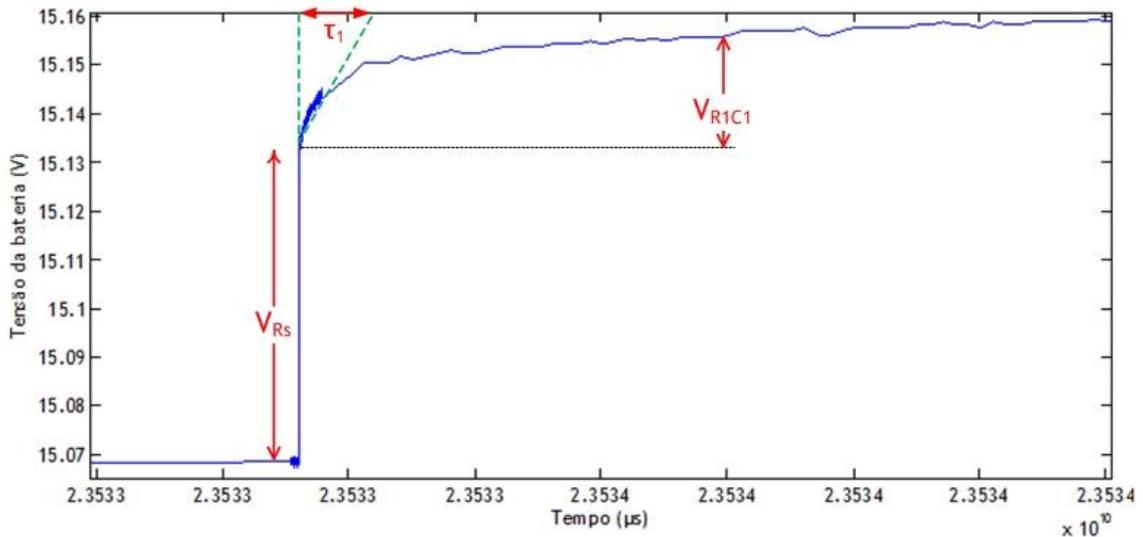


Figura 3.14 - Resposta rápida, da bateria de Ni-MH, retirada dos testes.

Os parâmetros do modelo podem ser obtidos fazendo *fitting* aos dados experimentais. Existem inúmeros métodos iterativos de fitting, em que todos têm por base a diminuição do erro entre o valor da função obtida pelos cálculos do fitting, e os dados experimentais.

Outra hipótese é parametrizar, quando possível, o modelo, estudando analiticamente as curvas dos dados experimentais.

Começou-se por analisar a queda de tensão instantânea em R_s . Sabendo essa diferença de tensão, e verificando o degrau de corrente nesse instante, é possível achar R_s recorrendo à lei de Ohm:

$$R_s = \frac{V_{Rs}}{I_{Rs}} \quad (3.2)$$

De seguida foi estudada a tensão da bateria, de um período de descanso (rest time). Considerou-se que, para os pontos deste período em que $t \gg \tau_1$, a tensão da malha rápida, R_1C_1 , estava estabilizada no seu valor máximo. A esse valor de tensão deu-se o nome de 'a', conforme ilustra a Figura 3.15.

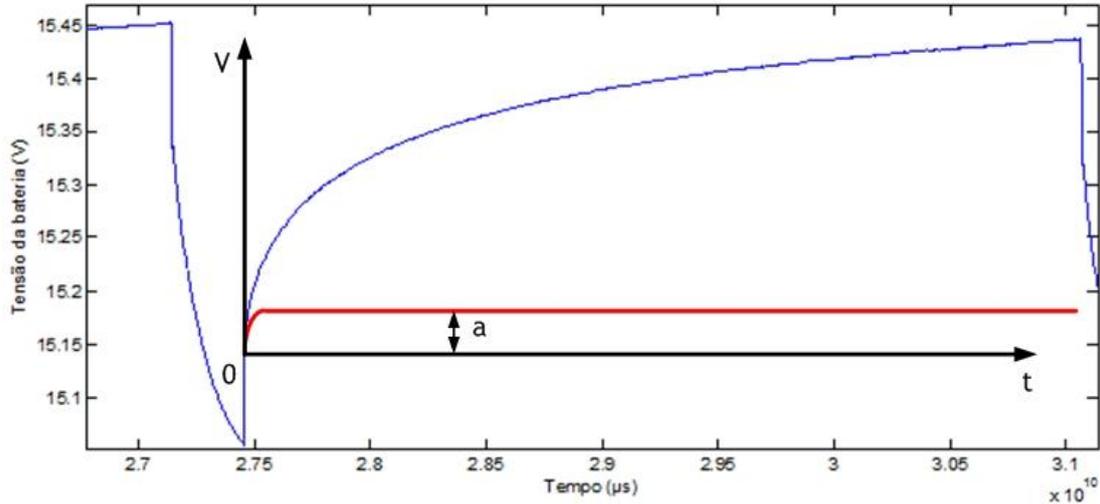


Figura 3.15 - Tensão da malha rápida, R_1C_1 para $t \gg \tau_1$, e tensão da bateria em teste.

Assim, na malha lenta:

$$V_{R_2C_2}(t) = b(1 - e^{-t/\tau_2}) \quad (3.3)$$

com b como a tensão final para que tende a exponencial da malha R_2C_2 .

A tensão da bateria, contando com os valores das duas malhas, fica:

$$\begin{cases} b(1 - e^{-t_1/\tau_2}) + a = y_1 \\ b(1 - e^{-t_2/\tau_2}) + a = y_2, \quad \forall t \gg \tau_1, \\ b(1 - e^{-t_3/\tau_2}) + a = y_3 \end{cases} \quad (3.4)$$

em que y_x é o valor da tensão da bateria no tempo t_x . Com este sistema de 3 equações a 3 incógnitas, é possível retirar os valores de a , b e τ_2 .

De referir que os pontos $y_x(t_x)$ são referenciados a um novo sistema de coordenadas como ilustra a Figura 3.15.

Para o cálculo do τ_1 basta retirar um ponto experimental da tensão, num tempo inferior ao τ_1 . Este τ_1 pode ser relativamente bem retirado da Figura 3.14, com um valor aproximado de 1 décima de segundo. A expressão da tensão em $t < \tau_1$ é dada por:

$$a(1 - e^{-t/\tau_1}) + b(1 - e^{-t/\tau_2}) = y_4, \quad \forall t < \tau_1. \quad (3.5)$$

Após análise do período de descanso da bateria, foram retirados já os valores de a , b , τ_1 e τ_2 . De seguida estudou-se o período da descarga, com o intuito de extrair os parâmetros C_1 , R_1 , R_2 , e C_2 .

Ao saber o valor de a , é possível calcular R_1 , segundo a lei de Ohm. Isto porque a é o valor para que tende a exponencial da malha mais rápida, ou seja, quando a capacidade fica em circuito aberto, e a corrente passa toda através da resistência. Assim sendo:

$$R_1 = \frac{a}{I_{bat}} \quad (3.6)$$

Com R_1 e τ_1 , em mão, vem que:

$$C_1 = \frac{\tau_1}{R_1} \quad (3.7)$$

R_2 e C_2 descobrem-se solucionando um sistema de duas equações a duas incógnitas, onde $y_5(t_5)$ e $y_6(t_6)$ são pontos retirados dos testes experimentais, no período de descarga.

$$\begin{cases} R_2 I_{bat} (1 - e^{-t_5/R_2 C_2}) = V_{oc} - V_{Rs} - a - y_5 \\ R_2 I_{bat} (1 - e^{-t_6/R_2 C_2}) = V_{oc} - V_{Rs} - a - y_6 \end{cases}, \quad \forall t \gg \tau_1 \quad (3.8)$$

É desta forma possível obter os parâmetros do modelo.

Desenvolveu-se uma folha de cálculo onde se incluíram as equações anteriores, para assim ser mais rápida a determinação dos parâmetros da bateria. De lembrar que os parâmetros são dependentes do estado de carga, por isso os cálculos anteriores devem ser feitos para cada carga e descarga presente no teste efectuado, de modo a ter um modelo parametrizado em função do SOC.

Parametrizou-se o modelo da bateria testada para um SOC de 75%. Os resultados obtidos foram:

$$\begin{aligned} V_{oc} &= 15,451V; \\ R_s &= 0,028\Omega; \\ R_1 &= 0,01\Omega; \\ C_1 &= 14,659F; \\ R_2 &= 0,137\Omega; \\ C_2 &= 1036,746F; \end{aligned}$$

3.5 - Implementação e simulação do modelo da bateria

Recorreu-se à ferramenta de simulação PSIM, com o intuito de implementar o modelo da bateria de Ni-MH testada e parametrizada anteriormente. Na Figura 3.16 à esquerda é possível observar o modelo da bateria implementado que, para mais facilmente ser trabalhado, foi constituído como um sub-circuito. À direita, a bateria, já como um sub-circuito, ligada a uma fonte de corrente controlada, com o intuito de fazer um teste idêntico ao efectuado experimentalmente, para assim se poderem comparar os resultados.

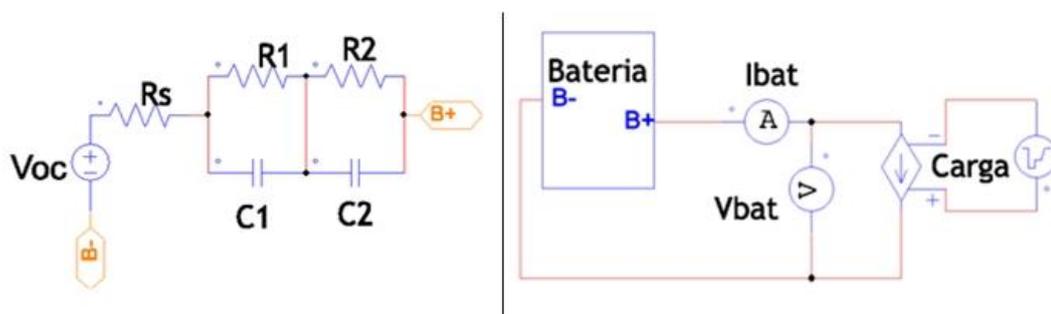


Figura 3.16 - Modelo da bateria implementado em PSIM (esquerda), sistema de teste do modelo (direita).

Na Figura 3.17 os resultados da simulação podem ser comparados com os dados experimentais. Observa-se que o comportamento dos dois gráficos é semelhante no período de descarga. Porém, no período em que a corrente pára de fluir pela bateria, as curvas dos dois gráficos desfasam-se, alterando o comportamento de uma em relação à outra.

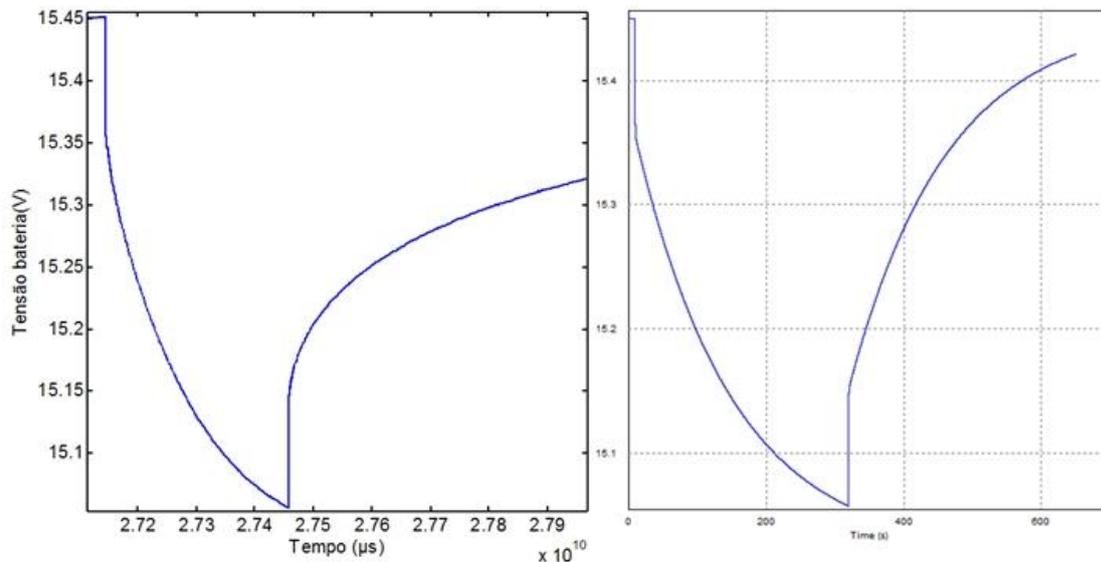


Figura 3.17 - Comparação entre a curva experimental (à esquerda), e a simulada (à direita), com as mesmas condições de corrente ao longo do tempo.

De facto, estes resultados levam a concluir que o modelo adoptado não foi o mais correcto.

Windarko em [26] recorre a um modelo de bateria semelhante ao estudado atrás, porém acrescenta uma malha RC, que apenas tem influência quando a bateria se encontra em circuito aberto, ou seja, em rest time; precisamente onde o modelo estudado falha. A Figura 3.18 esclarece esta alteração ao modelo.

A nova malha RC entra em série com a resistência R_2 , e um interruptor, coloca ou retira a influência da malha no modelo.

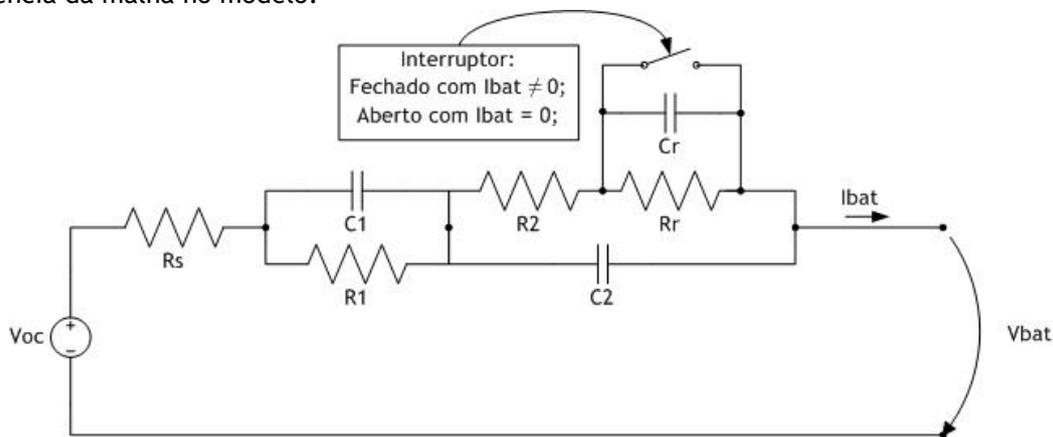


Figura 3.18 - Novo modelo da bateria.

Este novo modelo é, no entanto, mais difícil de ser observado analiticamente. Contudo para verificar o seu comportamento, implementaram-se as alterações ao modelo antigo, e ajustaram-se os valores da nova malha até se obter uma curva muito semelhante à dos dados experimentais, como elucida a Figura 3.19.

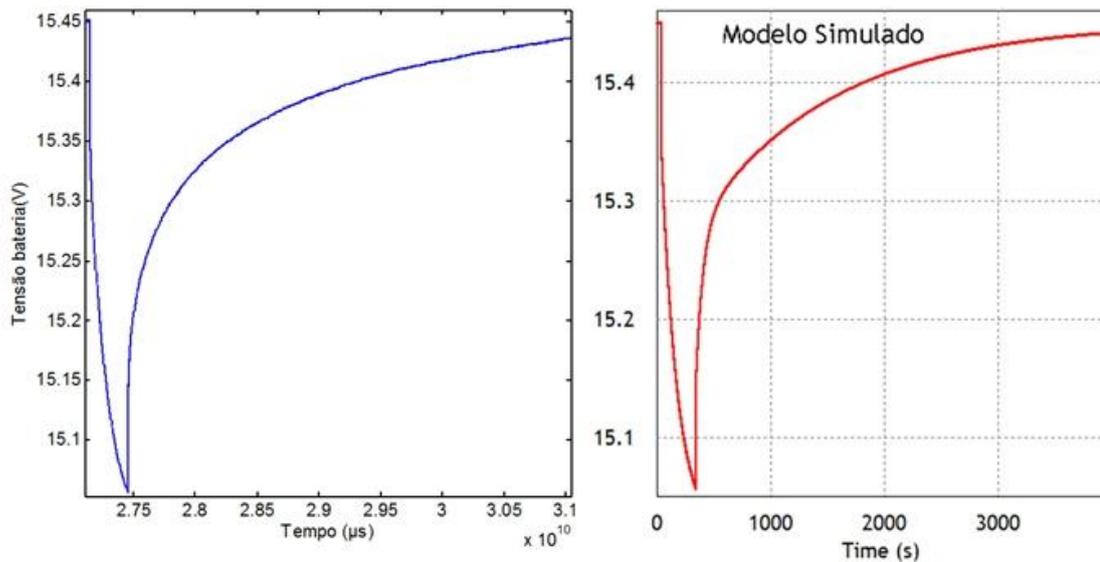


Figura 3.19 - Comparação entre a curva experimental (à esquerda), e a simulada com o novo modelo (à direita), com 5 minutos em descarga.

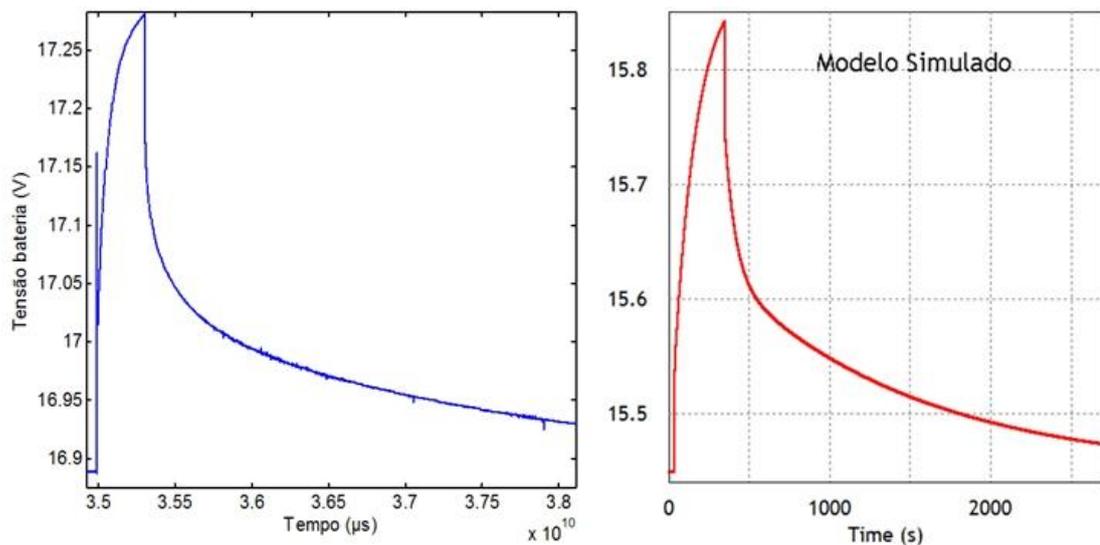


Figura 3.20 - Comparação entre a curva experimental (à esquerda), e a simulada com o novo modelo (à direita), com 5 minutos em carga.

De referir que os parâmetros foram apenas ajustados manualmente, e que, mesmo assim, se obtém uma resposta muito parecida à experimental. Tem portanto ainda possibilidade de ser melhorado, ao ser estudado e ao se recorrer a dados experimentais para o parametrizar.

Concluí-se assim que este último modelo tem melhores características para a modelação da bateria de Ni-MH, embora mais complicado de analisar e parametrizar, que o modelo estudado pelo Autor desta dissertação.

3.6 - O ultracondensador

O ultracondensador é um dispositivo com pouca capacidade de armazenamento de energia, mas, no entanto, possui uma potência bastante elevada, capaz de fornecer picos de corrente, por exemplo, para o arranque de um veículo eléctrico.

Não tendo disponíveis UC's para testes experimentais, recorreu-se à literatura, com o intuito de conceber um modelo de funcionamento desta tecnologia.

3.6.1 - Modelo do ultracondensador

Sejin, em [28], elabora testes experimentais com o intuito de parametrizar o modelo do UC. O Autor começa por identificar um modelo simples, com uma resistência equivalente em série com um condensador. No entanto, pelo funcionamento físico do UC, a sua capacidade varia quase linearmente com a tensão aos seus terminais.

Outro aspecto que o modelo de um UC deve modelar é a propagação da carga. O modelo final apresentado é o de linha de transmissão RC, ilustrado na Figura 3.21.

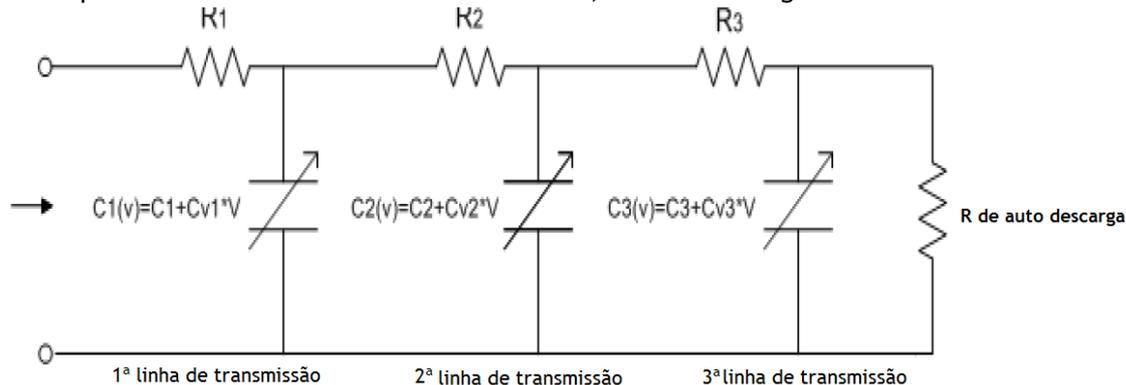


Figura 3.21 - Modelo linha de transmissão do UC (adaptado de [28]).

A primeira malha consiste numa resistência total R_1 e de uma capacidade $C_1(v)$ para respostas rápidas. As restantes malhas são usadas para descrever uma resposta mais lenta. Para ter em conta a dependência da capacidade com a tensão, as capacidades são variáveis e são funções lineares da tensão. A resistência de auto descarga permite modelar aspectos práticos do UC.

O modelo assume que numa variação de corrente rápida, apenas a primeira malha actua modificando a tensão aos terminais do UC. Este tempo de resposta é de apenas alguns segundos. Passado alguns minutos, a carga é redistribuída pelas restantes malhas. A terceira malha apenas actua passados 10 minutos.

Os dados experimentais para parametrização do modelo podem ser obtidos realizando um teste de carga e descarga do UC a corrente constante. No artigo, a carga e a descarga são feitas a uma corrente de 3 amperes. A resposta da tensão está ilustrada na Figura 3.22. A carga é feita a corrente constante até a tensão alcançar a tensão máxima. Passados alguns segundos, é feita a descarga.



Figura 3.22 - Curva de carga e descarga do UC da Maxwell BCAP 3000F a corrente constante.

O cálculo dos parâmetros é feito examinando o modelo analiticamente. Sije et al analisam todas as malhas do modelo, e retirando valores dos dados experimentais, parametrizam o mesmo.

Os parâmetros obtidos, para o ultracondensador da Maxwell BCAP 3000F, estão indicados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Parâmetros do modelo do UC da Maxwell BCAP 3000F.

Parâmetros	Valor
R1	1.38m Ω
C1	1973F
Cv1	240.39F
R2	6.83 Ω
C2	592.07F
Cv2	56.28F
R3	17.65 Ω
C3	64.31F
Cv3	439.2F

3.6.2 - Implementação e simulação do modelo do ultracondensador

O modelo do ultracondensador foi implementado em PSIM. Os parâmetros da Tabela 3.2 foram incorporados nos componentes que compõe o modelo. No entanto a variação das capacidades em função da tensão não foi modelada.

Após se ter simulado o modelo para as condições de teste, com correntes de 3 amperes de carga e descarga, o resultado esta ilustrado na Figura 3.23.

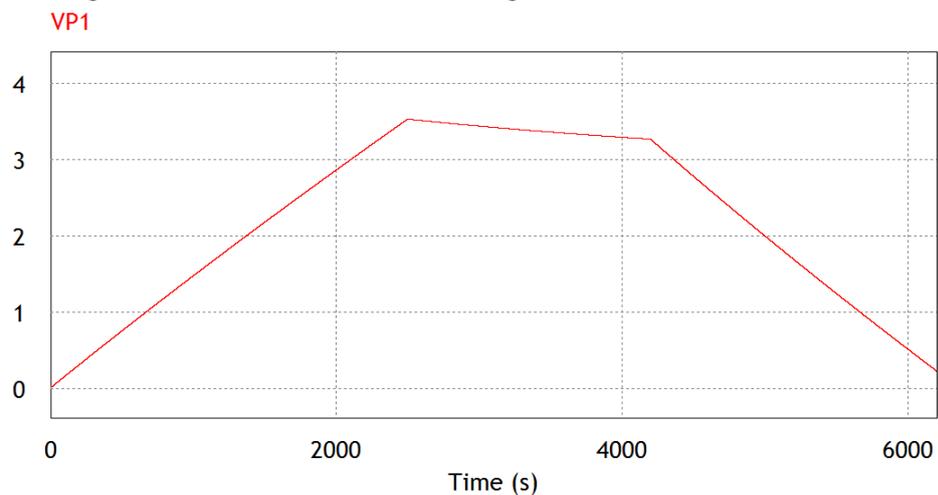


Figura 3.23 - Resultado da simulação do modelo do UC.

Capítulo 4

Modelação da dinâmica do Fiat Uno 45 S em pista.

4.1 - Introdução

A modelação dinâmica de um veículo eléctrico é essencial para conseguir perceber, com alguma certeza, a energia necessária para uma prova de competição. Com esse sentido desenvolveu-se um modelo do VEC.

Foi dito anteriormente que o projecto VEC tem o objectivo de poder concorrer nas provas da Challenge Desafio Único na categoria FEUP1. Nesta competição corre-se com o FIAT UNO 45 S e para isso existem determinadas regras que têm de ser cumpridas. A maioria delas está relacionada com as potências dos motores utilizados. O VEC tem por isso de ter um motor com uma potência que ronde os 45 cavalos. As características de velocidades são semelhantes na pista, embora o motor eléctrico tenha mais binário inicial comparado ao motor de combustão, que obtém maior binário a uma velocidade superior.

Assim, sabendo que o desempenho do VEC deve ser semelhante ao dos outros veículos na competição, desenvolveu-se e simulou-se um modelo do veículo a competir numa prova.

4.2 - Modelação do VEC

A energia dispendida por um veículo no percurso de uma pista de competição depende de várias forças que são aplicadas no carro. Estas distinguem-se por serem de resistência ou a favor do sentido de movimento do veículo.

Como forças de resistência existem a resistência de rolamento (*Rolling Resistance*) e a resistência do ar (*Drag Resistance*). Ao haver inclinação na pista, existe também uma outra força contrária ao movimento, caso o veículo esteja a subir, a que se chama força de subida (*Grading Resistance*). Na aceleração do veículo está associada uma força chamada de força de aceleração.

De salientar que não são modeladas as forças de inércia dos componentes rotativos, pelo desconhecimento da massa das mesmas, e por estas terem menor influência na modelação de um veículo.

4.2.1 - Força de subida (Grading Resistance)

Para conseguir fazer subir o veículo numa rampa é necessário exercer uma força paralela à inclinação da rampa, com uma amplitude que depende directamente do ângulo da rampa segundo a seguinte equação:

$$F_g = M \times g \times \sin \alpha \text{ [N]} \quad (4.1)$$

tal que M é a massa do veículo em Kg, g a aceleração da gravidade ($9,8 \text{ m/s}^2$) e α o ângulo de inclinação (Figura 4.1).

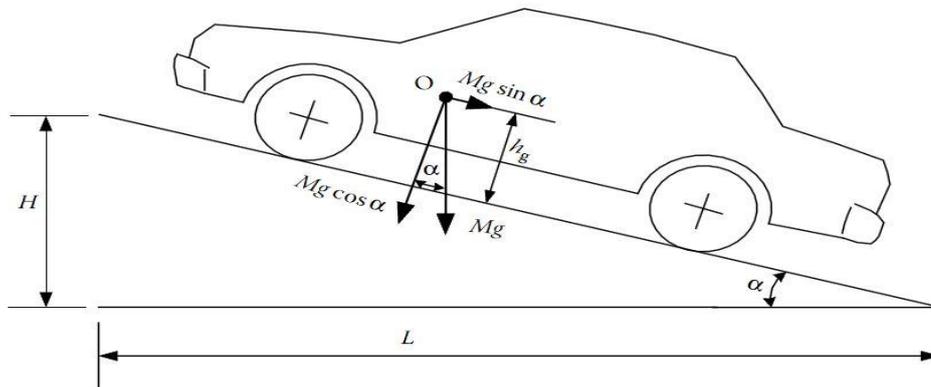


Figura 4.1 - Actuação da força da gravidade devido à inclinação da pista [5].

4.2.2 - Atrito de rolamento (Rolling Resistance)

O atrito de rolamento dos pneus nas superfícies de contacto com o chão advém da histerese nos materiais do pneu. Esta resistência ao movimento do carro depende do tipo de material de que é composto o piso. Num piso com areia, o valor da força provocado por esta resistência é superior comparada com o caso de uma pista de alcatrão.

É necessária uma força F_r , para superar esta resistência tal que:

$$F_r = P \times fr \text{ [N]} \quad (4.2)$$

em que P é o peso na roda e fr é designado como o coeficiente de resistência de rolamento (*Rolling Resistance Coefficient*). Este coeficiente tem valores próximos de 0,013 para pisos de alcatrão [5].

Quando existe uma inclinação da pista, esta deve ser quantificada tornando:

$$F_r = P \times fr \times \cos \alpha \text{ [N]} \quad (4.3)$$

em que α é o ângulo da inclinação da pista em graus.

Outros factores que alteram o coeficiente são, por exemplo, a pressão e temperatura dos pneus.

4.2.3 - Resistência do ar (Drag Resistance)

A resistência do ar é definida pela influência que o ar tem na movimentação do carro (Figura 4.2). Esta força resistiva é expressa da seguinte maneira:

$$F_w = 0,5 \times \rho \times A_f \times C_d \times (v - v_w)^2 \text{ [N]} \quad (4.4)$$

em que:

- ρ corresponde à densidade do ar (Kg/m^3). A densidade atmosférica é função da altura em relação ao nível do mar. Neste trabalho considerou-se o pior caso que é estar ao nível do mar, ou seja uma densidade de $1,2 \text{ Kg/m}^3$;

- A_f é a área frontal do veículo. No caso do FIAT UNO este valor foi tabelado pelo fabricante de 1.83m^2 ;
- C_d é o coeficiente de fricção do ar (*aerodynamic drag coefficient*) que varia conforme as linhas da carcaça do veículo. No caso do FIAT UNO este coeficiente toma o valor de 0.34;
- v velocidade do veículo (m/s)
- v_w velocidade do vento contra a direcção do movimento do carro.

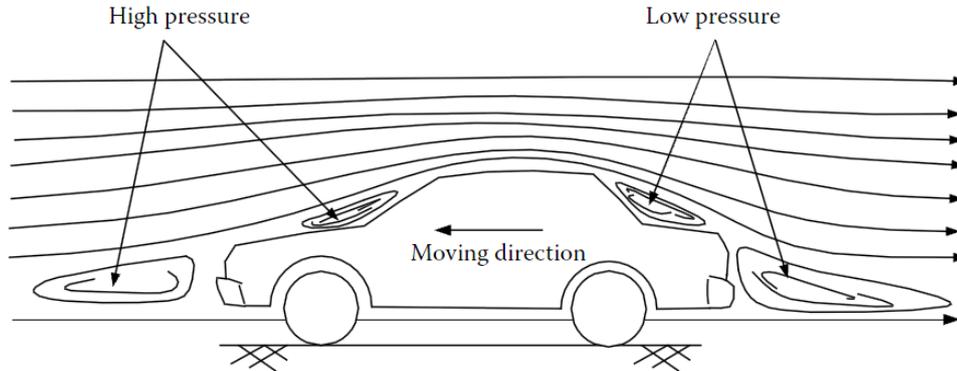


Figura 4.2 - Actuação do ar no formato de um veículo em movimento [5].

É possível observar pela equação anterior que o atrito do ar é influenciado pelo quadrado da velocidade.

4.2.4 - Força de aceleração (Acceleration Force)

Força aplicada a um veículo para obter uma aceleração a , e que depende linearmente da massa do veículo:

$$F_a = m \times a \text{ [N]} \quad (4.5)$$

Assim, a força total necessária para movimentar um veículo, com uma aceleração a , a uma velocidade v , é a soma de todas estas forças anteriormente citadas.

4.2.5 - Força total de tracção

O total de todas as forças empregues no veículo é portanto a soma de todas elas.

$$F_{total} = F_g + Fr + F_w + F_a \text{ [N]} \quad (4.6)$$

4.2.6 - Binário

O binário necessário para exercer uma força F numa roda de raio r_w é dado por:

$$T_w = F_{total} \times r_w \text{ [Nm]} \quad (4.7)$$

O raio da roda do Fiat Uno 45 S é de aproximadamente 0.272m.

O binário na roda surge multiplicando o binário do motor aos rácios existentes na transmissão e na caixa de velocidades (R_{GT}). Deste modo, e sabendo que a transmissão tem uma eficiência E_T , o binário do motor:

$$T_M = \frac{T_w}{R_{GT} \times E_T} \text{ [Nm]} \quad (4.8)$$

4.2.7 - Potência do veículo

A potência de um veículo está relacionada com a velocidade e a força instantânea que está a ser exercida para colocar o carro em determinado movimento:

$$P = F_{total} \times v [W] \quad (4.9)$$

Assim sendo, ao estar actuada uma força proveniente do motor, esta terá uma relação linear com a velocidade.

De referir que existem perdas e que estas deverão ser contabilizadas. A eficiência de todo o drive train (E_{DT}) tem em conta a eficiência da transmissão mais caixa de velocidades (E_T) e do motor (E_M).

$$E_{DT} = E_M \times E_T \quad (4.10)$$

Tendo em conta este aspecto, a potência do motor advém:

$$P_M = \frac{F_{total} \times v}{E_{DT}} [W] \quad (4.11)$$

4.2.8 - Energia consumida

A energia é o integral da potência no tempo. Assim, vem:

$$E = \int P(t) dt [Joules ou Ws] \quad (4.12)$$

4.3 - Dados experimentais do FIAT UNO em pista

A energia que um veículo gasta numa prova de competição pode ser calculada conhecendo os parâmetros para cálculo das forças de atrito e resistivas, modeladas pelas equações anteriores. Desta forma ao se saber as características destes veículos em prova, é possível retirar informações ao nível da energia dispendida por estes.

Pelas equações, a energia é calculada pela potência, que por sua vez depende directamente das forças que actuam no carro. Os parâmetros desconhecidos para o cálculo dessas forças são a inclinação da pista, a velocidade e a aceleração.

Para obter os dados/parâmetros necessários, optou-se por ir a um circuito automóvel com um FIAT UNO 54 S. O circuito Vasco Sameiro em Braga foi o escolhido. A aquisição da velocidade instantânea foi impossível, pelo que se decidiu retirar os locais, no circuito, de arranque e travagem, com as respectivas velocidades (Figura 4.3). Por falta de valores, considerou-se acelerações médias nas diferentes parcelas da pista.

Considerou-se ainda que a pista é plana e portanto a força de subida/descida é nula. Outro aspecto levado a cabo foi que o veículo não se encontra na primeira volta, ou seja, não parte da linha de partida, por isso vem com velocidade positiva na entrada para a recta da meta, que neste caso pode ser considerada como a partida (0m).

A velocidade do vento é considerada nula nesta simulação.

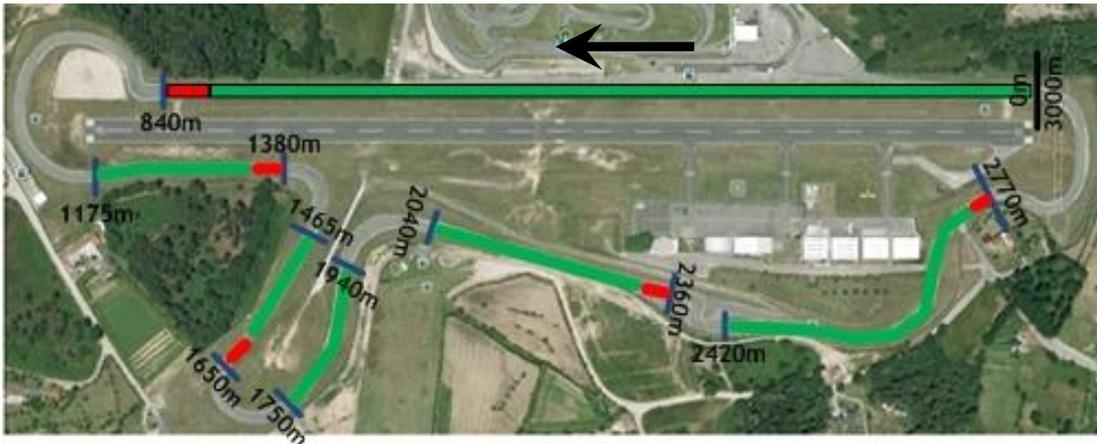


Figura 4.3 - Circuito Vasco Sameiro. Zonas de acelerações (a verde) e travagens (a vermelho) e de velocidade aproximadamente constante (sem cor). As linhas azuis demarcam o fim ou início de uma aceleração ou travagem.

Os resultados experimentais foram tabelados da seguinte maneira:

Tabela 4.1 - Dados obtidos no circuito.

Distância (m)	Velocidade (km/h)	Velocidade (m/s)	Aceleração (m/s ²)
0	90	25	0,57
780	140	38,89	-9,45
840	70	19,44	0,37
1175	90	25	0,94
1340	110	30,55	-6,94
1380	70	19,44	0
1465	70	19,44	0,85
1610	90	25	-4,34
1650	60	16,67	0
1750	60	16,67	0,91
1940	90	25	0
2040	90	25	0,73
2310	115	31,94	-7,4
2360	60	16,67	0
2420	60	16,67	0,80
2730	100	27,78	-4,92
2770	70	19,44	0,54
3000	90	25	

Os valores da aceleração foram obtidos recorrendo às equações gerais do movimento uniformemente acelerado, e pela definição de aceleração média entre dois pontos (4.13).

$$\begin{cases} x_f = x_0 + v_0 t + 0,5 a t^2 \\ a = \frac{v_f - v_0}{t} \end{cases} \quad (4.13)$$

O resultado deste sistema em ordem à aceleração é:

$$a = \frac{0,5v_f^2 - 0,5v_0^2}{x_f - x_0}, \quad (4.14)$$

onde x_f é a distância final, x_0 a inicial, v_f a velocidade final e v_i a inicial.

Tendo uma base de dados das pistas, com tamanho das rectas e acelerações médias praticadas nestas, tornou-se possível a utilização de um método matemático contínuo para o cálculo da energia consumida.

4.4 - Implementação e simulação do modelo do VEC

Desenvolveu-se em Matlab Simulink um sistema capaz de interligar as equações que regem o modelo do VEC (Figura 4.4).

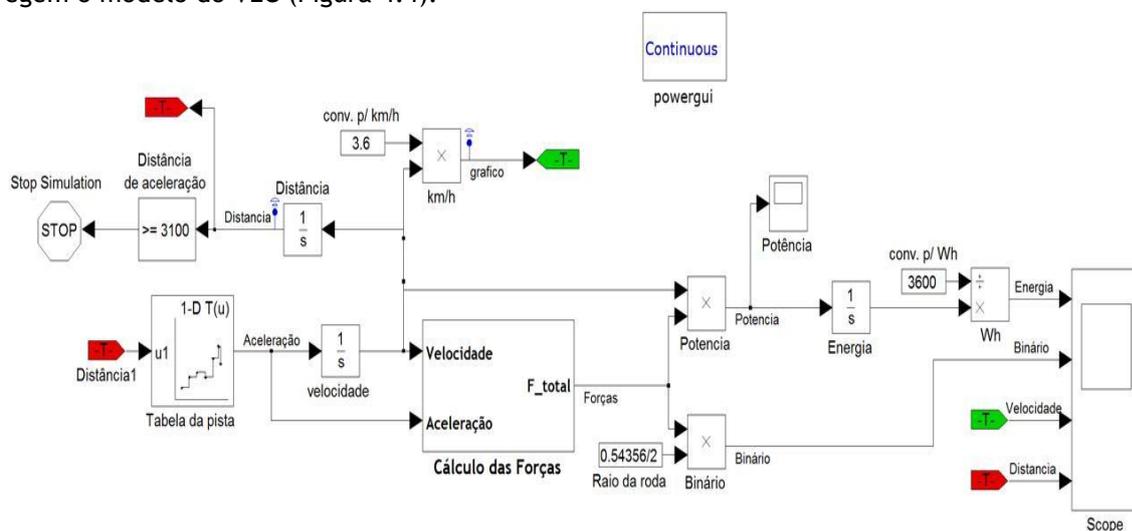


Figura 4.4 - Modelo do VEC implementado em Simulink.

Os valores das acelerações e distâncias percorridas foram implementados numa tabela unidimensional, a que se deu o nome de Tabela da pista. Esta tabela tem como entrada a distância percorrida e verifica em que parcela da pista se encontra no preciso momento, colocando na saída a respectiva aceleração. A velocidade é calculada pelo integral da aceleração, e a distância, por sua vez é calculada pelo integral da velocidade.

A aceleração e velocidade são ambas necessárias para o cálculo das forças que actuam no carro, nesse instante. O bloco “Cálculo das Forças” é exactamente isso que faz. Nas Figura 4.5 está apresentado o conteúdo desse bloco. É aqui que são calculadas as forças de subida, a resistência de rolamento, a força da resistência do ar e a força de aceleração.

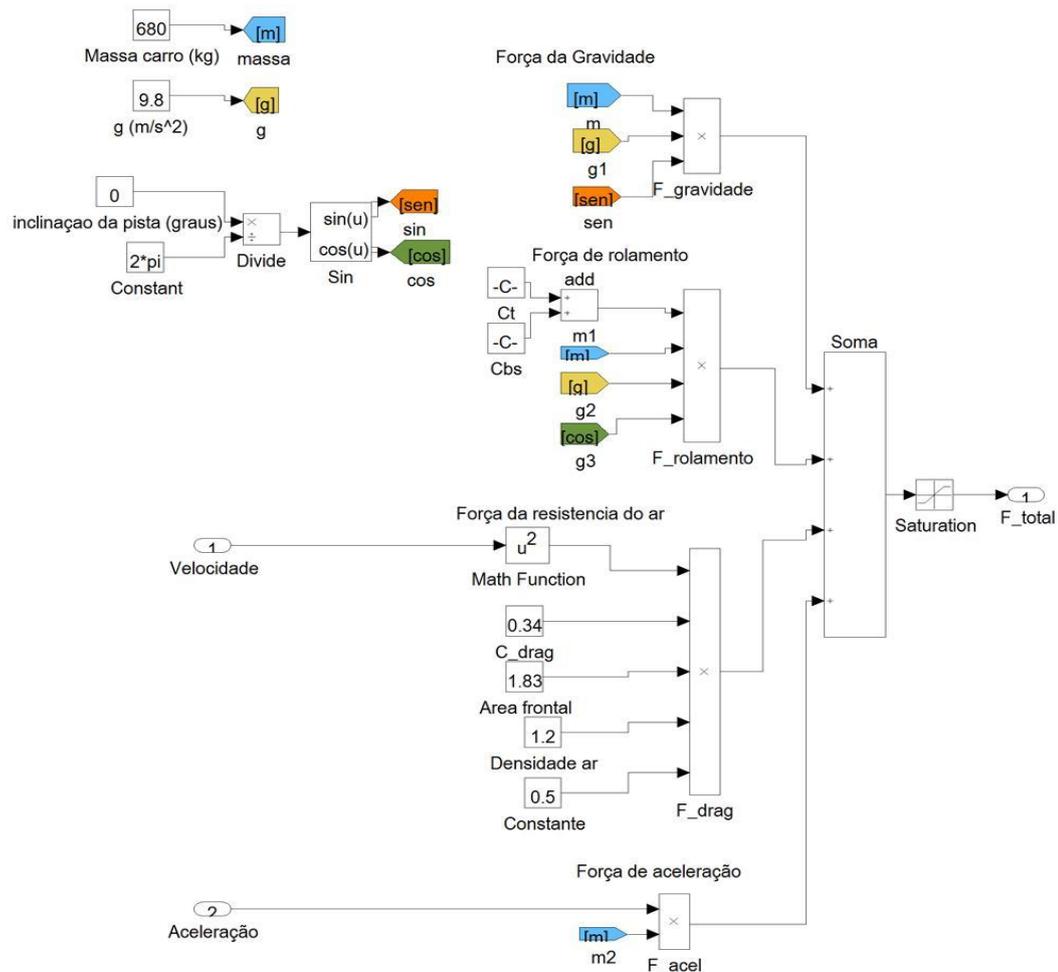


Figura 4.5 -Cálculo das forças que actuam sobre o VEC.

Para obter resultados mais fidedignos na simulação, pesou-se o VEC com o motor, 2 packs de baterias de Ni-MH e o piloto. O carro apresentou-se com um peso de aproximadamente 680kg, e foi esse o peso considerado na simulação.

De salientar que as eficiências do drivetrain e do motor não são contabilizadas, sendo mais tarde abordadas.

Outro aspecto a ter em conta, é o facto de o VEC não poder regenerar toda a energia de travagem para as baterias, dado que este é auxiliado pelo travão nas rodas. Por isso, a força quando negativa, na travagem, é limitada. Na saída da "Soma" de todas as forças, presente na imagem acima, existe um bloco que limita esse mesmo valor.

Após se ter calculado a soma das forças, esta é utilizada para calcular o binário e a potência. A energia é o integral da potência e vem em Watt segundo. É feita uma conversão posteriormente para Wh.

4.5 - Resultados da simulação

Na Figura 4.6 estão apresentados resultados de diferentes variáveis. De referir que todos estes resultados estão em função do tempo. Nos resultados, a distância desde o ponto de partida vai aumentando progressivamente até atingir os 3000m, ou seja, o fim do circuito. O tempo que o veículo simulado demorou a dar uma volta à pista foi aproximadamente 117 segundos. Nas provas do Desafio Único, os FIAT UNO 45 S fazem a pista em cerca de 110

segundos. O desvio nos tempos pode dever-se à falta de precisão na recolha de dados experimentais.

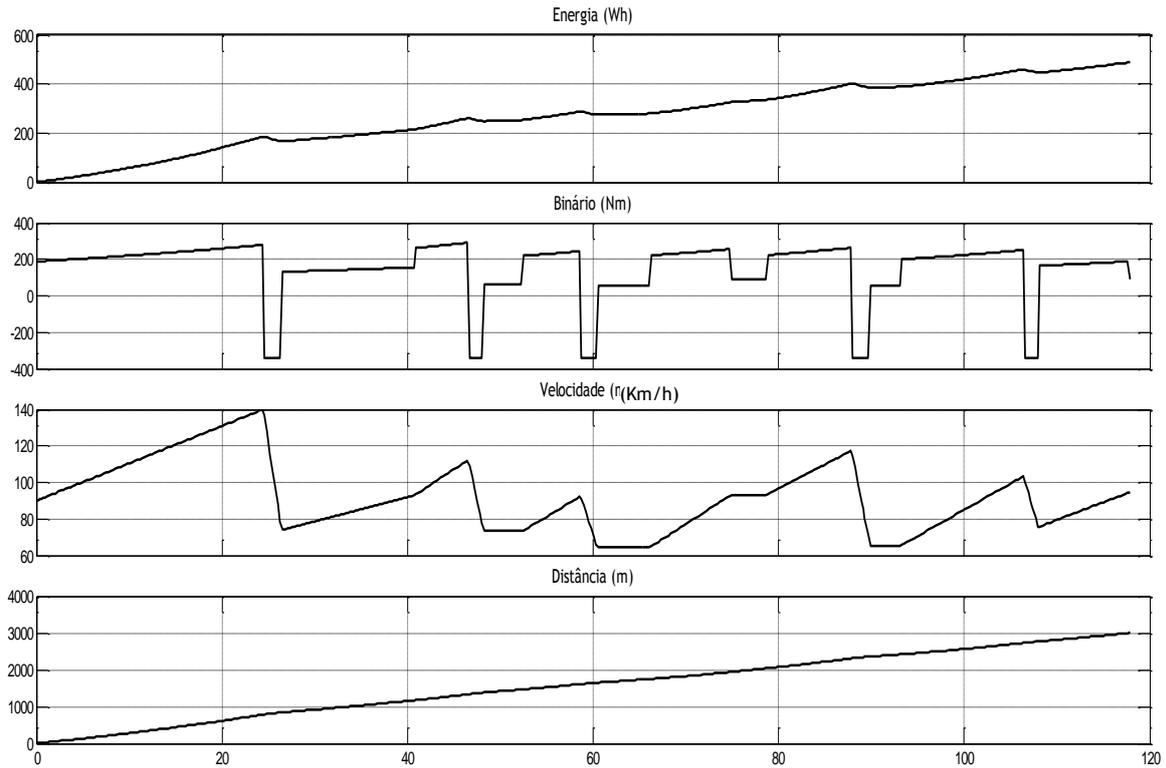


Figura 4.6 - Resultados obtidos da simulação do modelo do VEC.

A velocidade varia dependendo da zona da pista em que se está, conseguindo verificar as acelerações e travagens. No fim da recta da meta o carro atinge o máximo de velocidade de 140km/h.

Em termos de potência, verifica-se que a potência máxima é atingida aos 140km/h, e tem o valor de 40kW. Nas travagens a potência torna-se negativa e é regenerada.

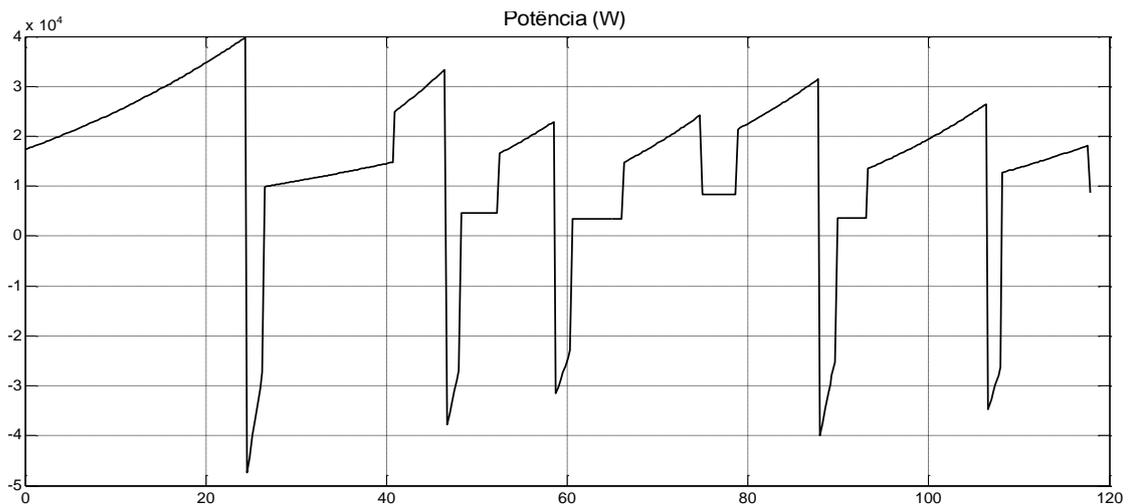


Figura 4.7 - Potência na roda do veículo.

O binário nas rodas é positivo nas acelerações, e negativo quando se pretende travar. O binário negativo está limitado conforme atrás descrito.

No gráfico que se refere à energia é possível verificar que, numa travagem, o valor da energia necessário, para percorrer uma determinada distância desce, ou seja, a energia da travagem é levada em conta como regenerada.

Pode-se verificar que a energia total necessária, para ser empregue na roda, para percorrer os 3000m de pista é cerca de 500Wh. Tendo presente a energia de um pack de baterias de Ni-MH que constitui o sistema de armazenamento de um veículo híbrido, cerca de 870Wh, pode-se concluir que esse pack daria para um pouco mais de uma volta. No entanto ainda não estão contabilizadas as eficiências de todos os sistemas do veículo, ou seja, o pack de baterias dá para percorrer ainda menor distância. No capítulo 5 são contabilizadas todas as eficiências, e é dimensionado o sistema de armazenamento para um determinado número de voltas.

Capítulo 5

Armazenamento híbrido de energia e gestão energética

5.1 - Topologia híbrida

Um veículo destinado à competição automóvel está sujeito a grandes acelerações. Estas podem-se dizer de positivas quando se refere ao arranque, ou negativas nas travagens. De facto, um bom automóvel de competição tem de ser capaz de fazer a travagem o mais perto da curva possível, para assim ganhar tempo. Ao sair da curva a aceleração é o factor mais importante numa prova. Estas acelerações elevadas pedidas pelo piloto ao carro são fornecidas pelo motor eléctrico, acima do seu regime nominal, por curtos períodos de tempo.

Mas não é só ao motor que se pede um aumento do binário, pois para o motor poder exercer estes picos de binário, também o sistema de armazenamento tem de lhe ser capaz fornecer maior potência. Um sistema de armazenamento constituído apenas por baterias, e dimensionado para fornecer uma potência igual à nominal do motor, terá de se sujeitar a fornecer uma potência acima do seu regime nominal, com o prejuízo de poder danificar as baterias. Dimensionar um sistema de armazenamento a baterias para uma potência de pico do motor eléctrico, que pode passar três vezes a sua potência nominal, pode levar a um grande aumento do número de baterias, e conseqüentemente de peso e espaço, injustificado para o período de sobrecarga solicitada pelo motor.

A solução para este problema é a utilização, já discutida no capítulo do Estado da Arte, de uma tecnologia que seja capaz de fornecer as altas potências pelos períodos de acelerações mais intensas. O ultracondensador é a tecnologia capaz de solucionar este problema. Ou seja, a integração de ultracondensadores juntamente com baterias resolve o problema das sobreintensidades de potência, tanto positivas (acelerações) como negativas (travagens regenerativas).

Os ultracondensadores são uma mais-valia para este sistema de competição, pois o piloto ao enfrentar uma curva tem de travar, fornecendo a energia da travagem que vai carregar os ultracondensadores. No fim da curva pede-se uma forte aceleração ao motor, que por sua vez solicita uma maior potência ao armazenamento de energia, do qual os ultracondensadores, carregados previamente na travagem, fornecem a potência desejada.

Existem várias maneiras de interligar as duas tecnologias de armazenamento de energia. Foram referidas no Estado da Arte as topologias mais comuns. Depois de um estudo acerca da melhor topologia a usar neste caso, chegou-se à conclusão que a topologia paralela, onde cada fonte de energia se liga ao barramento CC por um conversor de potência independente, Figura 5.1, seria a mais flexível, capaz de absorver qualquer tipo de controlo mais exigente do sistema de armazenamento.

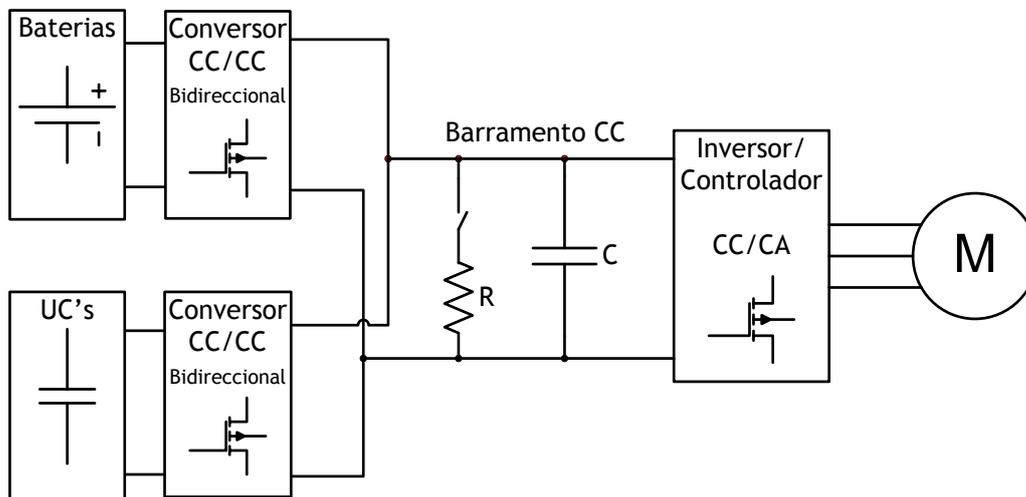


Figura 5.1 - Esquema eléctrico do sistema de armazenamento e tracção.

O funcionamento da topologia escolhida é de fácil compreensão. A entrada do inversor que controla o motor eléctrico está ligada ao barramento CC. A tensão no barramento deve por isso ter um valor de referência constante, não ultrapassando certos limites de modo a melhorar o funcionamento do inversor. Os conversores das fontes de energia são controlados de modo a manter a tensão do barramento CC constante.

O inversor ao impor binário no motor retira energia do barramento CC fazendo diminuir a tensão do mesmo. Pelo contrário, numa travagem do veículo, a energia regenerada circula no sentido inverso, e portanto a tensão tende a aumentar. O sistema de armazenamento, seguindo uma estratégia e o algoritmo de gestão de energia, devem controlar o fluxo de potência de cada conversor das fontes de energia, com o intuito de garantirem a referência de tensão do barramento.

O barramento de corrente contínua sofre influência directa de conversores de potência comutados, por isso para manter a tensão com um ripple máximo admissível é necessário colocar uma capacidade no barramento.

Numa travagem, a energia regenerada pelo motor é colocada no barramento CC. Se o sistema de armazenamento de energia não conseguir adquirir toda essa energia, tem de haver um dispositivo que a possa dissipar. A solução é usar uma resistência de alta potência capaz de dissipar uma certa quantidade de energia, para não por em perigo os constituintes de todo o sistema. Esta resistência entra em condução sempre que a tensão ultrapassar um valor máximo referenciado.

5.2 - Estratégia de controlo de energia

Para delinear uma estratégia de controlo da energia é necessário, antes de tudo ter a noção de quais são os objectivos do veículo, de acordo com a sua função. Neste caso trata-se

de um veículo desenvolvido com o propósito de competir, e dadas as características de um veículo destinado à competição, é possível formular uma estratégia de controlo de energia que valorize a performance, seguida da poupança de energia com o intuito de diminuir a quantidade de energia necessária para a competição, diminuindo o peso e volume do sistema de armazenamento.

Na Figura 5.2 encontra-se apresentado o algoritmo desenvolvido. A estratégia desenvolvida pode ser explicada recorrendo a exemplos do funcionamento do carro numa prova. Convém primeiro definir algumas variáveis para melhor compreensão dos próximos parágrafos.

A definição de velocidade baixa é relativa ao tipo de competição e pista em que se compete. Por exemplo, num circuito como o de Portimão em que a velocidade média é elevada, a gama de velocidades baixas são superiores comparadas a uma rampa, onde a velocidade média é muito inferior.

O SOC dos UC's é directamente proporcional à tensão como já foi discutido anteriormente. Por isso o mínimo do estado de carga dos UC's é determinado quando a tensão chega a um limite mínimo.

Quando o carro se encontra a baixa velocidade e com uma aceleração positiva, a potência retirada do barramento CC é compensada primeiramente pelas baterias até a potência destas chegar ao limite; e quando a potência eléctrica do motor ultrapassar a fornecida pelas baterias, os ultracondensadores debitam a diferença.

Esta primeira estratégia pode ser explicada da seguinte maneira: numa aceleração reduzida, em que a potência pedida pelo motor é inferior à potência máxima das baterias, a utilização dos UC's é dispensada, já que uma aceleração mais brusca deve estar eminente, e a energia neles contida ajuda nessa ocasião.

Ainda no caso anterior, se os UC's estiverem descarregados, podem carregar através do barramento pela energia das baterias que aí está a ser depositada. Isto porque, dada a velocidade baixa espera-se, uma aceleração acentuada a qualquer instante, e os UC's devem por isso estar carregados.

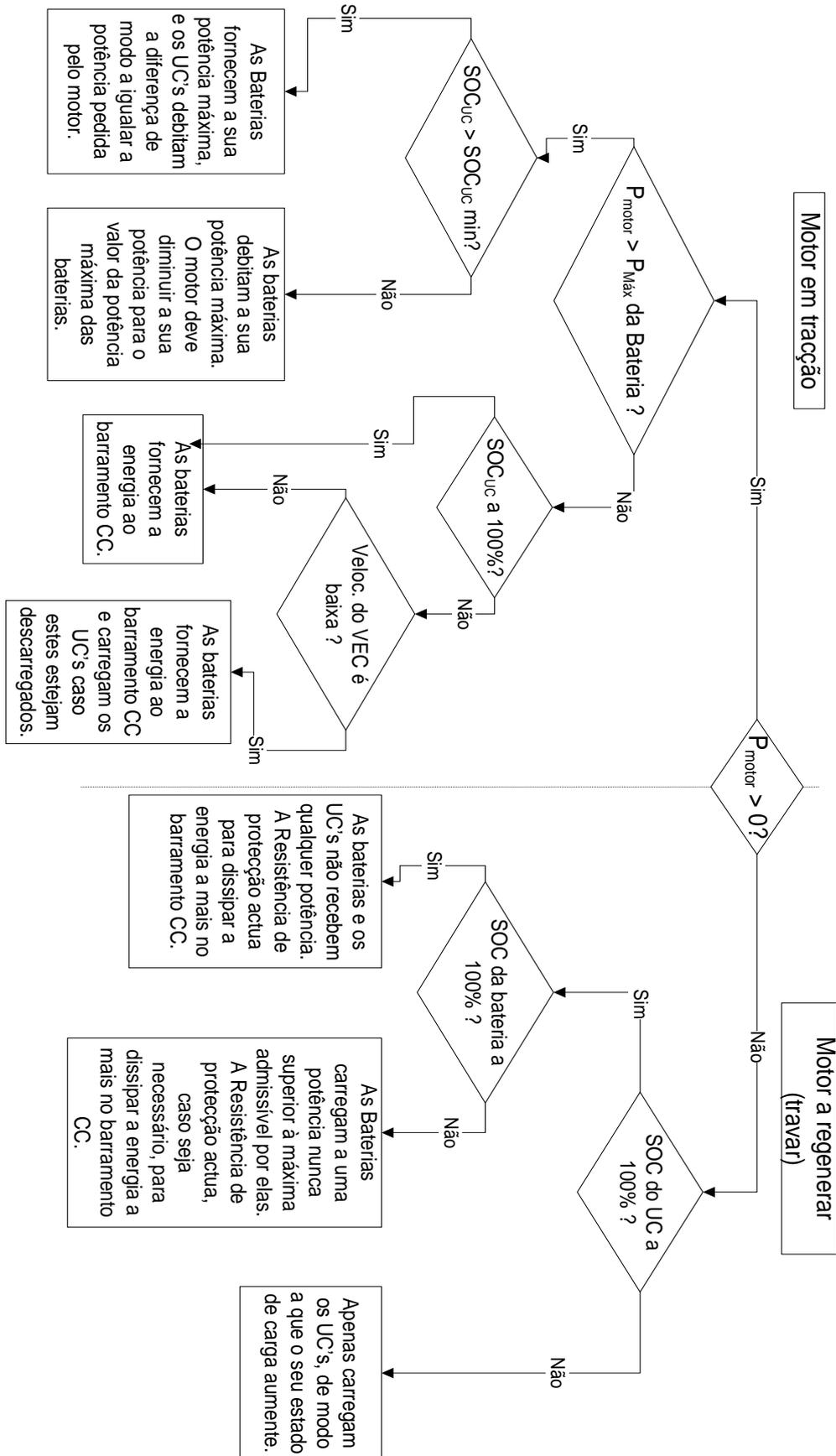


Figura 5.2 - Algoritmo de controlo de energia do sistema de alimentação.

Quando a potência solicitada pelo motor ultrapassa a potência capaz de ser fornecida pelas baterias, os UC's actuam dando a diferença que as baterias não são capazes. Isto caso os UC's estejam com um mínimo de energia, ou seja, acima de uma tensão. Se por algum motivo o seu estado de carga esteja abaixo do limite, estes param de fornecer energia, e deve ser dada indicação ao controlador do motor para reduzir o binário produzido.

A outra parte do algoritmo corresponde à regeneração de energia, quando o motor está a exercer a travagem regenerativa. Quando isso acontece os ultracondensadores são os primeiros a receber a energia vinda da travagem. Se, porventura, os UC's estiverem carregados enquanto está a decorrer a regeneração, as baterias carregam com uma potência nunca superior ao limite permitido. Assim, caso a potência gerada pelo motor seja superior a esse limite, a tensão no barramento sobe, e a resistência de protecção actua. O mesmo acontece quando as baterias estão carregadas a 100% e não possam receber energia. Nesse caso toda a energia regenerada é dissipada na resistência.

Pequenos acertos podem ser trabalhados neste algoritmo, como por exemplo na regeneração, em que a velocidade do veículo seja considerada ainda elevada, e os UC's estão perto de estar carregados, as baterias podem receber também energia, dividindo-a, de certa maneira pelo sistema híbrido. Isto porque, dada a velocidade do VEC, os UC's não conseguem armazenar toda a energia que ainda virá do resto da travagem, podendo assim ser aproveitada para carregar as baterias. Estes pormenores fortificam o algoritmo, aumentando a eficiência e performance da gestão de energia.

5.3 - Dimensionamento do sistema híbrido de armazenamento

O sistema híbrido de armazenamento de energia quer-se o mais leve possível, mas também capaz de fornecer a potência e ter a autonomia necessária numa prova.

Em termos de capacidade de energia necessária numa prova, considerou-se que o VEC deve conseguir fazer 5 voltas ao circuito Vasco Sameiro. No capítulo anterior verificou-se que numa volta o veículo consome cerca de 500Wh, ou seja, nas 5 voltas são 2500Wh. No entanto esta é a energia necessária na roda sem contabilizar quaisquer tipos de perdas por parte do power train, motor e conversores de potência. É por isso essencial definir a eficiência de cada um, para se saber a eficiência de todo o sistema.

Recorrendo aos dados dos fabricantes, a eficiência do motor ronda os 93%, e a do inversor está na ordem dos 96%. O drivetrain, que se compõe pela caixa de velocidades mais a transmissão, tem uma eficiência na ordem dos 90%. Os conversores CC/CC, que interligam os diferentes tipos de armazenamento e o barramento CC, discutido na secção seguinte, conseguem obter eficiências que rondam os 90%.

Para melhor percepção das perdas, seria necessário ter em mão as características de todos os semicondutores e elementos passivos que compõem os conversores, bem como as correntes e tensões a que são sujeitos.

A eficiência total de todo o sistema, desde as rodas às baterias fica-se então pelos 72,3%. Tendo em conta estas perdas, a energia acumulada nas baterias para realizar as 5 voltas ao circuito passa a ser: 3193 Wh.

No entanto as baterias, como foi discutido no Estado da Arte, não devem exceder limites de carga ou descarga, com o intuito de não as danificar. Por isso, o estado de carga das baterias não deve descer abaixo dos 15%. Devido a mais esta imposição, a capacidade das baterias do veículo terá de ser de $3193 \times 1,15 = 3672 \text{ Wh}$.

Para conseguir obter a energia atrás calculada, com as baterias de Ni-MH apresentadas no capítulo 3, em que um pack teria cerca de 871Wh, são necessários 5 packs, perfazendo um total de 4355 Wh.

O motor escolhido para o projecto foi o PMS 156 W produzido pela PERM Motor, com 30kW de potência cerca de 40,2 cavalos. O motor utiliza a tecnologia de ímanes permanentes de neodímio-ferro-boro. Para obter a potência máxima é aconselhada, pelo datasheet, a utilização de uma tensão de 320Vcc na entrada do inversor, ou seja, no barramento CC.

Decidiu-se colocar o pack com as suas células todas em série, dando 158V de tensão nominal, cerca de metade da tensão do barramento. Deste modo, 132 células de Ni-MH são colocadas em série. Compor uma bateria com maior número de células em série não é aconselhado, já que um problema que ocorre frequentemente é o desbalanceamento das células.

As baterias, usadas no VEC, servem de sistema de armazenamento de energia em veículos híbridos, em que o motor eléctrico possui uma potência nominal de 15kW. Assim sendo, a corrente capaz de ser cedida pelas baterias, para alimentar esse motor, é de aproximadamente 100A. No entanto, um HEV apenas utiliza a tracção eléctrica durante um curto período tempo, de arranque do veículo, o que não acontece com o VEC em que, o período de potência máxima do motor, chega a atingir um minuto, dependendo da pista/circuito.

Não tendo em mão dados relativos à potência capaz de ser debitada pela bateria, recorreu-se ao seu modelo, de modo a testar o comportamento da bateria a diferentes potências. Verificou-se a queda da tensão, provocada por uma corrente de descarga contínua durante um minuto, simulando o modelo da bateria criado em PSIM. De facto, este tipo de bateria tem uma resistência interna bastante elevada, estando na origem da grande queda de tensão, quando atravessada por correntes elevadas. Para o bom funcionamento da bateria, esta não deve baixar o valor de 1 volt de tensão por célula, não danificando assim as mesmas. O teste de simulação consiste em verificar, no fim do período de 60 segundos, qual a queda de tensão gerada, verificando que não desce abaixo dos 132V. Depois de simulada com várias correntes, chegou-se à conclusão que com uma corrente de aproximadamente 30 a 35 amperes, a bateria tende a baixar o valor da tensão para o valor mínimo, ao fim do tempo. A Figura 5.3 ilustra a resposta da tensão da bateria quando simulada com a corrente de 35A.

Concluí-se que as baterias são assim capazes de debitar uma potência por pack que ronda os 5kW. As 5 séries de baterias em paralelo conseguem fornecer uma potência constante de 25kW.

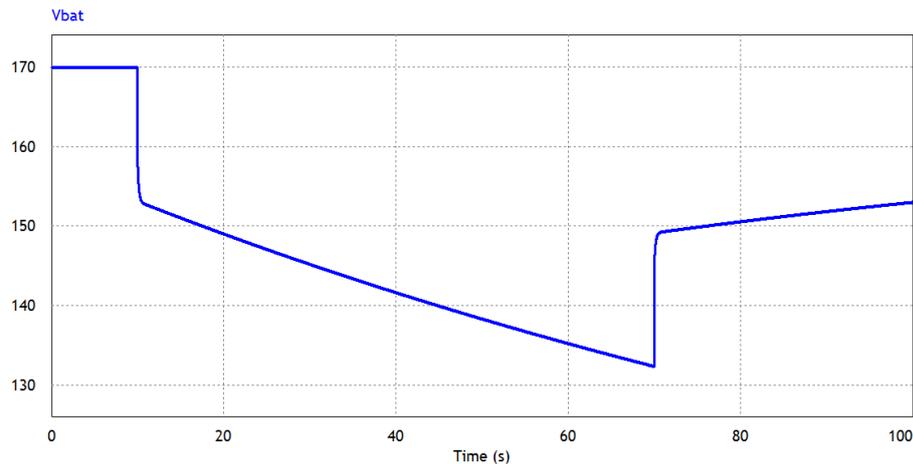


Figura 5.3 - Curva da tensão da bateria simulada, quando sujeita a uma corrente de 35 amperes por um período de 60 segundos.

Já os UC's devem ser capazes de armazenar a energia das travagens. Têm por isso de receber a potência de pico do motor. O datasheet do motor não informa qual a potência de pico do mesmo. Refere no entanto que o binário do motor pode atingir os 30% acima do nominal. Considerou-se que a potência de frenagem possa chegar aos 40kW.

A energia que os UC's devem armazenar é definida pela energia total regenerada numa travagem. No caso do circuito Vasco Sameiro, a maior travagem realiza-se depois da recta da meta, em que o veículo desacelera dos 140 para os 70km/h. Recorreu-se ao modelo do VEC para retirar a energia regenerada nesta travagem. Chegou-se ao resultado de aproximadamente 50Wh.

Este valor de energia dos UC's é capaz de ser fornecido ao motor durante 9 segundos a 20kW. Portanto, os UC's asseguram também um "boost" relativamente elevado na aceleração do motor.

Dado que a tensão dos ultracondensadores varia linearmente com o estado da carga, é necessário ter precaução no dimensionamento do banco de UC's. O factor multiplicativo de um conversor CC/CC não deve ultrapassar as quatro vezes. Logo, a tensão mínima dos UC's deve ser $320/4 = 80V$. Na prática é aceitável que a queda de tensão do banco de condensadores atinja os 50%. Desta forma, a tensão máxima será $V_{UC} = 80 * 2 = 160V$.

Da equação (2.5) da energia de um UC, descrita no capítulo 2, é possível retirar que:

$$E = \frac{1}{2} C \left(V_{UC}^2 - \frac{V_{UC}^2}{2} \right) \Rightarrow C = \frac{8E}{3V_{UC}^2} \quad (5.1)$$

Para este caso: $C_{total} = 18,75F$. A capacidade de cada célula do banco é $C_{cell} = \frac{Ns}{Np} C_{total}$.

Verificou-se o mercado de UC's, para encontrar uma solução para estes requisitos. Encontrou-se o produto BMOD0250 da Maxwell, que consiste em 6 células dispostas em série, perfazendo 16V. Este módulo tem ainda 250F de capacidade. Colocando 9 destes módulos em série obtém-se uma capacidade total de 27,78Farads e uma tensão de 144V. A energia total deste banco, admitindo uma descarga até 80V, é de 55,3Wh.

5.4 - Conversores de potência

Os conversores de potência, aplicados no sistema de armazenamento híbrido, têm requisitos que foram já, nesta dissertação, indirectamente colocados e que devem ser

cumpridos. Antes de se poder optar pela topologia do conversor, é necessário definir bem esses requisitos:

- Ambos os conversores devem ser bidireccionais em corrente;
- Não é necessário haver isolamento entre as duas tensões de conversão;
- A tensão do barramento CC é de 320V;
- A tensão das baterias ronda os 158V e a sua potência máxima é de 25kW;
- A tensão do banco dos UC's varia entre 80 e 144V a uma potência de 40kW;

5.4.1 - Topologias de conversão

Varias topologias de conversores abrangem os requisitos atrás mencionados. Na Figura 5.4 encontram-se ilustrados os conversores mais utilizados no ramo dos veículos eléctricos e híbridos, na conversão das tensões entre as fontes de energia e o barramento CC. Todas estas topologias apresentadas possuem as exigências impostas, no entanto, a escolha de uma para a utilização no sistema de armazenamento vai depender de factores como a eficiência, o número de componentes utilizados, e o tamanho dos componentes passivos.

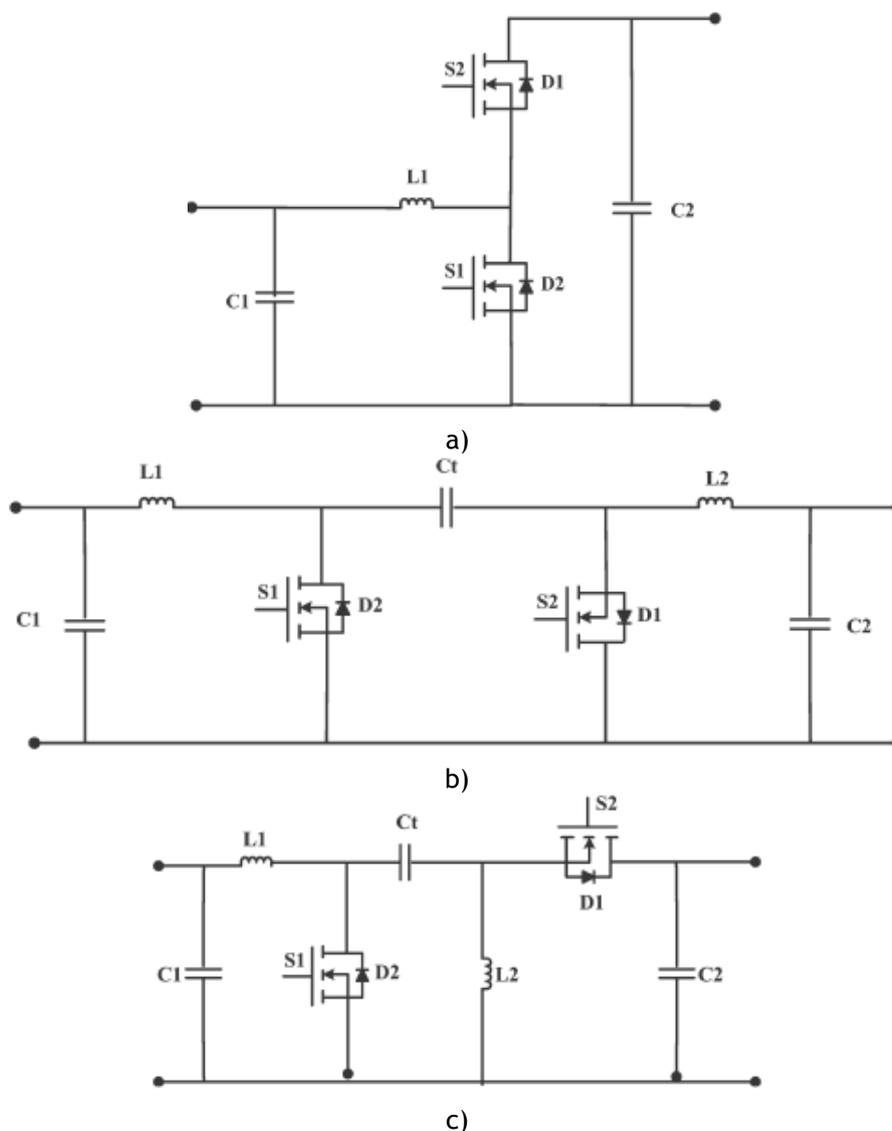


Figura 5.4 - Conversores de potência: a) conversor em meia ponte; b) conversor Cuk utilizado em alguns HEV; c) conversor SEPIC combinado com o conversor LUO [29].

Relativamente aos componentes passivos, existem vários factores que determinam o seu tamanho. Quanto às indutâncias dos conversores, a corrente média que passa nas bobinas influencia a secção do cobre, e quanto menor o ripple de corrente pretendido maior terá de ser o valor da indutância. No caso dos condensadores, o tamanho é influenciado pela corrente eficaz que o atravessa, já que determina as suas perdas; a corrente pico a pico influencia na tensão do condensador, e o ripple de tensão pretendido que quanto menor, maior o valor da capacidade.

Em [30], Schupbach relaciona as topologias em termos de duty cycle e correntes dos componentes activos e passivos. Comparando as correntes nos componentes activos chega-se à conclusão que os conversores Cuk e o SEPIC combinado com Luo têm maiores correntes do que a topologia em meia ponte. O mesmo acontece para os componentes passivos, onde o conversor meia ponte consegue ter menos perdas.

Em termos de número de componentes, a configuração em meia ponte, comparada com as outras duas, tem menos componentes, chamando a atenção para a diferença do número de bobinas. Mesmo o tamanho da própria bobina, chega a ser metade das outras duas topologias.

A maior desvantagem encontrada para o conversor em meia ponte reside no facto de, na operação de elevar a tensão para o barramento CC, o modo descontínuo da corrente de saída obriga a aumentar o tamanho do condensador do barramento CC.

Fica assim bem claro, que o conversor com maior eficiência, menor número de componentes e menor tamanho dos componentes passivos é o da configuração em meia ponte, e por isso se escolheu a mesma para a aplicação desejada.

5.4.2 - Dimensionamento do conversor de meia ponte

Na Figura 5.5 está ilustrado o esquema da meia ponte e nela nomeadas as diferentes correntes e tensões. Dimensionaram-se os conversores das baterias e dos UC's definindo primeiro apenas o fluxo de potência numa direcção, ou seja, diferenciando as configurações Buck e Boost presentes na topologia.

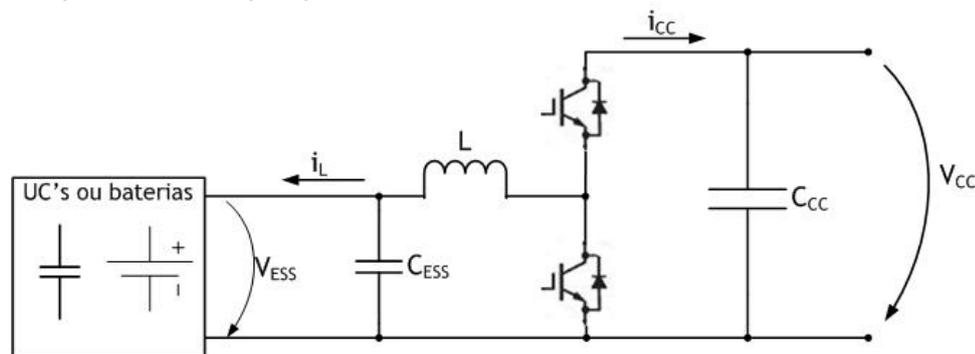


Figura 5.5 - Conversor meia ponte Buck-Boost.

De seguida é dimensionado o conversor no modo Buck: o ripple de corrente na bobina é

$$\Delta i_L = \frac{V_{CC} D (1 - D)}{f_s L}, \quad (5.2)$$

onde f_s é a frequência de comutação e D o duty cycle.

Δi_L torna-se máximo quando o duty cycle está próximo de 0,5, por isso,

$$D = \frac{V_{ESS}}{V_{CC}} \quad (5.3)$$

onde V_{ESS} é a tensão do sistema de armazenamento, ou seja, a tensão das baterias ou dos UC's.

A indutância é calculada segundo:

$$L = \frac{V_{CC} D_{buck} (1 - D_{buck})}{f_s \Delta i_L} \quad (5.4)$$

A capacidade do lado do sistema de armazenamento de energia depende do ripple da tensão ΔV_{ESS} :

$$C_{ESS} = \frac{\Delta i_L}{8 \Delta V_{ESS} f_s} \quad (5.5)$$

Já no modo boost, o duty cycle é:

$$D = 1 - \frac{V_{ESS}}{V_{CC}} \quad (5.6)$$

A indutância da bobina é calculada segundo:

$$L = \frac{V_{CC} D_{boost} (1 - D_{boost})}{f_s \Delta i_L} \quad (5.7)$$

O valor da capacidade do condensador do lado do barramento é calculado conforme o ripple ΔV_{CC} desejado, e depende da corrente máxima que circula para o barramento:

$$C_{CC} = \frac{I_{CC \text{ Máx}} D_{boost}}{\Delta V_{CC} f_s} \quad (5.8)$$

A bobina dimensionou-se tanto para o funcionamento do conversor em buck como em boost. O valor de indutância a utilizar é aquele que for maior, ou seja:

$$L = \text{Máx} \left[\frac{V_{CC} D_{buck} (1 - D_{buck})}{f_s \Delta i_L}; \frac{V_{CC} D_{boost} (1 - D_{boost})}{f_s \Delta i_L} \right] \quad (5.9)$$

O condensador associado à parte de mais baixa tensão é dimensionado conforme a equação (5.5).

Já a capacidade do lado do barramento CC calculou-se segundo critérios de relacionamento dos conversores CC/CC das baterias e dos UC's. Isto porque estes dois conversores podem conduzir no modo boost ao mesmo tempo, e nesse caso o ripple da tensão no barramento é maior. Assim, a capacidade C_{CC} obtém-se pela equação (5.10).

$$C_{CC} = \frac{I_{CC \text{ Máx}} D_{boost \text{ bateria}}}{\Delta V_{CC} f_s} + \frac{I_{CC \text{ Máx UC}} D_{boost \text{ UC}}}{\Delta V_{CC} f_s} \quad (5.10)$$

A frequência de comutação dos semicondutores de potência deve ser escolhida segundo um trade-off entre as perdas nos semicondutores e o tamanho dos componentes passivos. Desta forma preferiu-se a comutação a uma frequência de 10kHz.

Calcularam-se primeiro os componentes do conversor para o banco de UC's: a corrente de ripple admissível é de 5% da potência máxima de entrada, ou seja, os 40kW, para a tensão mínima de 80V, resultando em 25A.

Em termos de ripple de tensão, decidiu-se que o máximo seria 5% da tensão mínima dos UC's, portanto 4V.

Os resultados para os componentes passivos são: $L_{UC} = 0,32mH$ e $C_{UC} = 80\mu F$.

No caso das baterias optou-se também por admitir ripples que não ultrapassassem os 5%. Os valores dos componentes são: $L_{bat} = 0,85mH$ e $C_{bat} = 23,8\mu F$.

Em termos da capacidade do barramento CC, esta calculou-se para um ripple máximo de 5%, neste caso, de 16V, resultando uma capacidade final de aproximadamente 1mF.

5.5 - Controlo da tensão do barramento

A tensão no barramento CC tem de ser constante. Para isso, o controlo dos conversores de potência das fontes de energia devem estar em sintonia. A solução que se empregou, foi a de fazer apenas um controlo da tensão do barramento, e partilhá-lo pelos dois conversores.

Este controlador de tensão fornece uma referência em corrente. Essa referência é processada segundo o algoritmo de controlo de energia. Após ter corrido o algoritmo de gestão energética, o controlador de cada conversor recebe a referência de corrente. O controlo de cada conversor fez-se em corrente. O esquema da Figura 5.6 exemplifica este método de controlo.

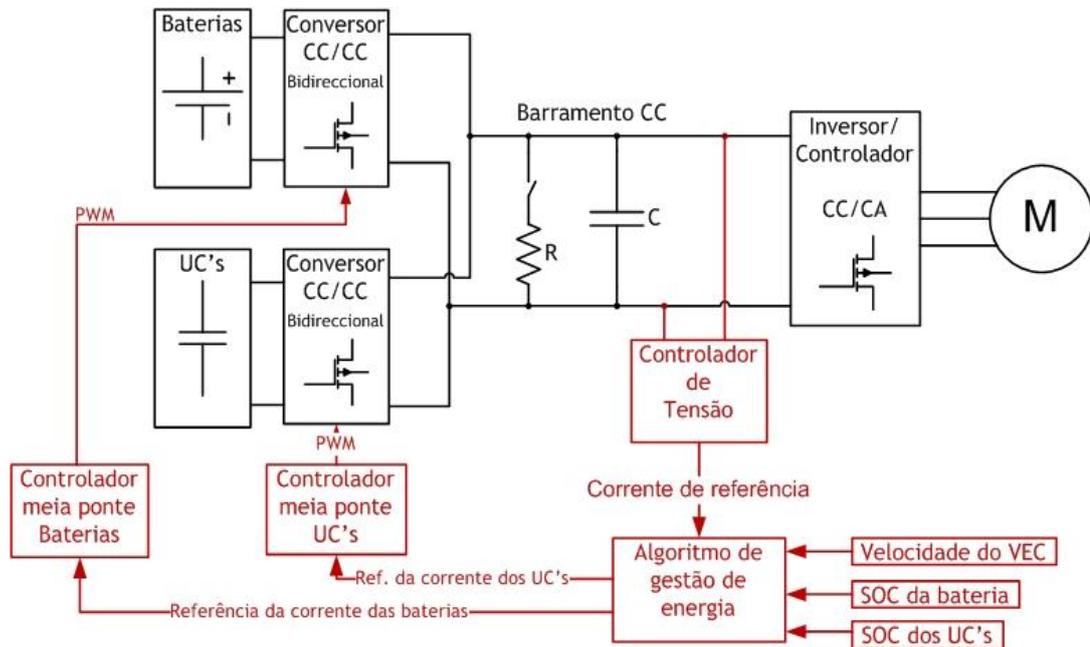


Figura 5.6 - Método de controlo do sistema de armazenamento.

5.6 - Simulação do sistema híbrido

A simulação de todo o sistema híbrido de alimentação valida a estratégia desenvolvida, quer da topologia híbrida, do algoritmo de gestão de energia e do controlo da tensão do barramento CC. Para simular o sistema, foi necessário, antes de tudo, modelar a carga do barramento. Esta carga é protagonizada pelo inversor, que tanto pode estar a consumir, como a regenerar energia para o barramento. Basicamente o inversor é visto pelo barramento como uma fonte de corrente.

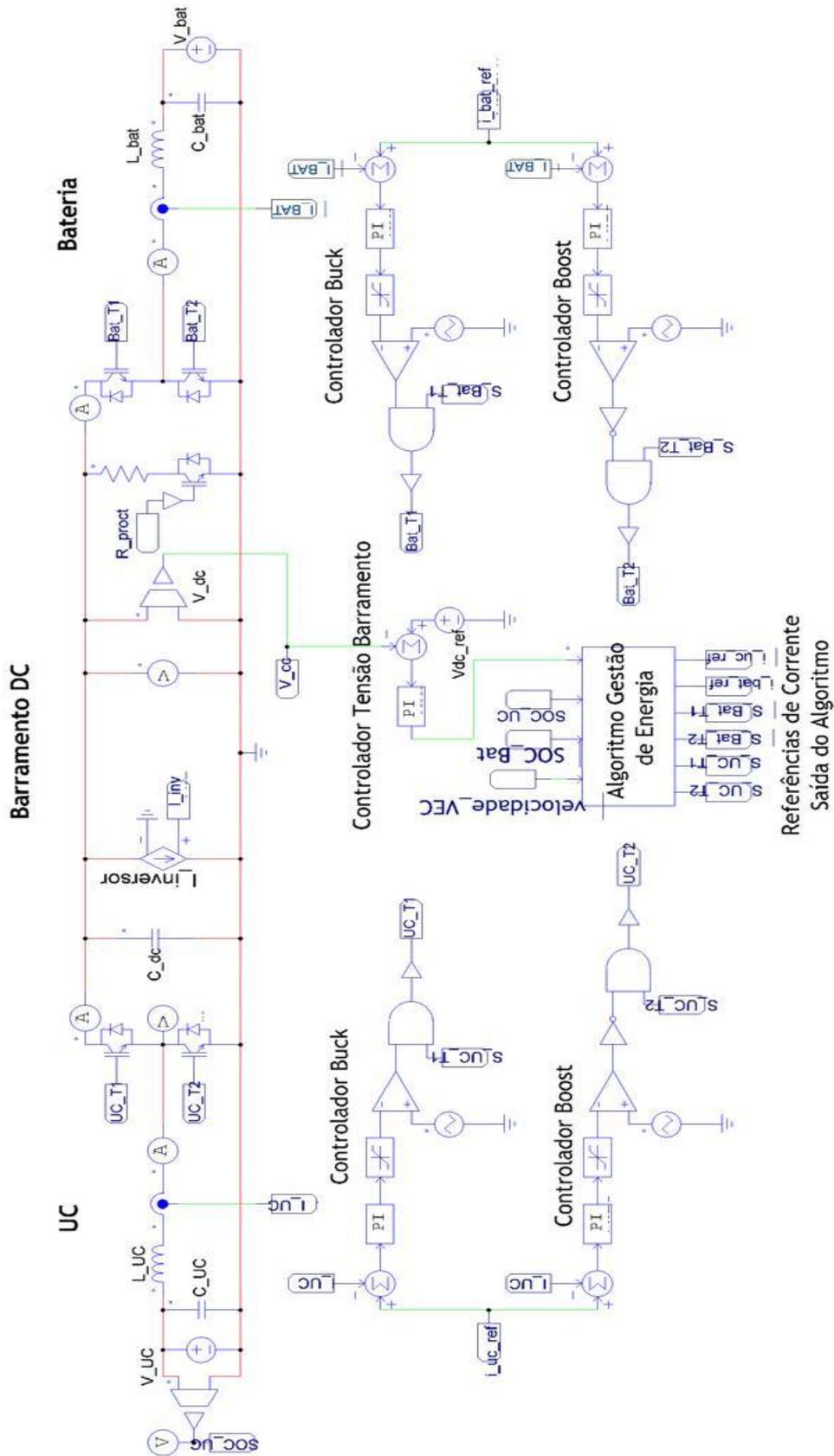


Figura 5.7 - sistema híbrido de armazenamento de energia implementado em PSIM.

Implementou-se todo o sistema híbrido em PSIM. Na Figura 5.7 encontra-se uma representação desta simulação.

As baterias e UC's estão modelados por uma fonte de tensão contínua. O algoritmo de gestão energética foi desenvolvido em linguagem de programação C, e embutido na simulação. Cada conversor meia ponte, das baterias e UC's, tem dois controladores distintos, para os dois pontos de funcionamento possíveis de cada conversor de potência (buck e boost).

5.6.1 - Testes ao controlo e ao algoritmo de gestão de energia

Primeiramente testou-se cada conversor, de modo a poderem ser ajustados os seus controladores PI. Manualmente, todos os 5 controladores PI existentes na simulação foram ajustados, até se encontrar um resultado satisfatório.

Na Figura 5.8 encontra-se um resultado simulado, onde é possível observar em baixo, a corrente que o inversor impõe no barramento. Neste caso, a ambas as fontes de energia é imposta a mesma referência de corrente. No gráfico de cima verifica-se que a tensão do barramento tende a ser controlada e mantida nos 320V.

Mesmo assim, não se pode deixar de analisar a tensão aquando de uma variação brusca da corrente no inversor. Na primeira variação de potência, em que o inversor acaba de retirar corrente do barramento, e passa a colocar potência no barramento, a tensão tem uma subida relativa. Este caso pode ser comparado à realidade da seguinte maneira: o motor/veículo está com uma certa velocidade, e quando o piloto trava existe regeneração de energia do motor para o barramento, daí a potência ser negativa.

De facto quanto maior for a inclinação, ou seja a derivada da potência/corrente que o inversor coloca no barramento, mais a tensão tende a aumentar ou diminuir. Neste caso, uma solução possível era a de implementar um controlo não linear, como exemplo um controlador fuzzy, em vez dos PI presentes.

Concluí-se, mesmo assim, o bom funcionamento dos controladores dos conversores de potência, mas também da estrutura de controlo anteriormente apresentada.

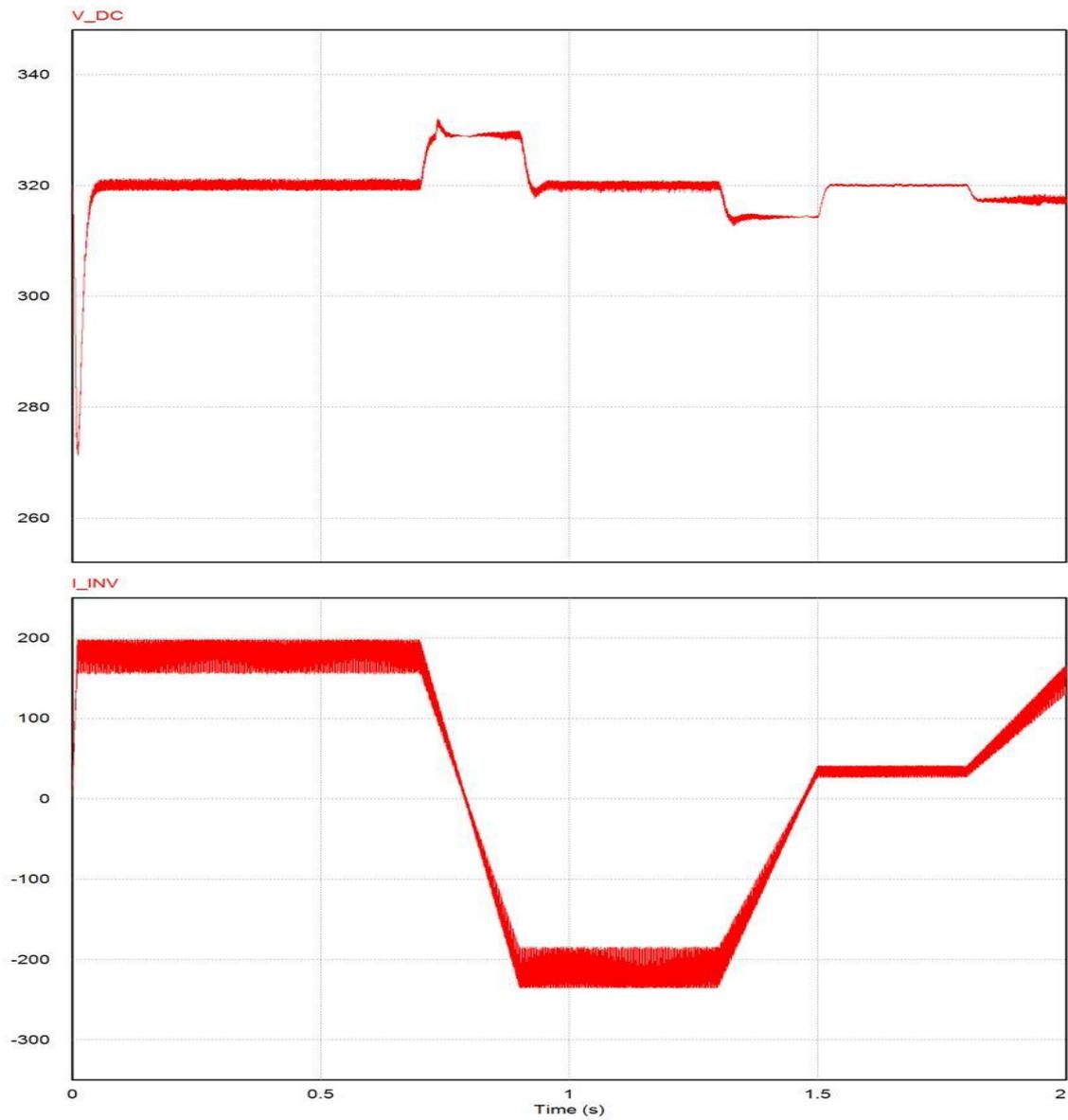


Figura 5.8 - Resultado da simulação. Em cima a tensão do barramento CC, em baixo a corrente/potência que o inversor impõe no barramento.

Capítulo 6

Sistema de alimentação da electrónica e instrumentação do VEC

6.1 - Estudo da forma de alimentação da electrónica e instrumentação

Um veículo eléctrico tem incorporado muita electrónica, quer de comutação quer de controlo e instrumentação para o seu funcionamento. Existem também outros dispositivos que requerem energia eléctrica, como o caso das luzes de indicação de travagem, iluminação dianteira, e displays para indicação de velocidades, estado de carga das baterias, e informações adicionais.

Mas ainda outros tipos de cargas terão de receber uma alimentação também a tensões baixas. Os motores síncronos de alta potência para uso em veículos eléctricos têm pouco volume e área de superfície de contacto com o ar. Por consequência, as perdas de potência geradas pelo motor não têm por onde dissipar, fazendo aumentar muito a temperatura do motor. Como é sabido este tipo de motores não toleram temperaturas muito elevadas, pois as propriedades electromagnéticas dos ímanes permanentes alteram-se danificando o motor. A solução acolhida pelos fabricantes foi a de recorrer à refrigeração a água para poder dissipar o calor do motor. Este tipo de refrigeração requer a utilização de bombas para circulação de água, bem como de ventilador para arrefecer o líquido num radiador. Estes pequenos motores trabalham com tensões na ordem dos 12Vcc.

É necessário haver uma forma de alimentar estas cargas para que o veículo funcione da melhor maneira. Várias hipóteses foram estudadas, até se chegar à solução final. Os dispositivos de maior potência no carro, falados anteriormente com maior pormenor, são alimentados a uma tensão de 12Vcc. Já a electrónica de comutação, controlo e instrumentação, é alimentada tanto a 12V, como é o caso de alguns sensores e alguma electrónica analógica, e a 5V no caso de microcontroladores e dispositivos digitais.

Realizou-se uma lista de dispositivos (Tabela 6.1) a serem alimentados com as tensões e potências máximas com que funcionam.

Tabela 6.1 - Listagem de dispositivos a utilizar no carro e características eléctricas.

Dispositivo	Tensão cc	Potência
Bomba de água PAD12	12V	$\cong 12W$
Ventilador de radiador	12V	$\cong 120W$
Bomba de vácuo	12V	$\cong 84W$
Relé corta alimentação para 500A	12V	1,7W
Lâmpada Xenon H4 x2	12V	35W x2 = 70W
Display LCD	12V	10W
Transmissor Xbeepro	12V	<5W
Electrónica restante	12V e 5V	<20W

Os dispositivos das cinco primeiras linhas da tabela são dispositivos de maior potência e de elevada robustez. Já os restantes itens requerem uma alimentação muito bem regulada.

Os motores utilizados na refrigeração têm correntes de arranque elevadas, gerando ruídos na tensão, que podem danificar os componentes electrónicos que estejam a ser alimentados pela mesma fonte, ou influenciar um mau funcionamento, por exemplo, na medida de sensores. Para evitar este tipo de problemas decidiu-se projectar dois conversores distintos. Um conversor de potência alimenta os dispositivos como os motores para refrigeração, e iluminação do veículo. Outro conversor alimenta toda a electrónica “sensível” como microcontroladores, sensores, electrónica de aquisição, e outros dispositivos de baixa potência. Este último conversor requer-se isolado.

Outro aspecto importante de definir é saber de onde retirar a energia que vai alimentar os dispositivos. Existem várias hipóteses exequíveis. De seguida apontam-se as duas mais viáveis.

No caso A da Figura 6.1 existe um armazenamento auxiliar de energia feito por intermédio de baterias. Estas baterias fornecem autonomia aos dispositivos auxiliares, e ligam ao barramento CC por um conversor de potência unidireccional com o propósito de as carregar, ou seja, apenas existe trânsito de potência do barramento para as baterias. Podem ser carregadas com energia vinda da travagem, ou simplesmente do sistema de armazenamento de energia principal.

No caso B os conversores da alimentação dos dispositivos de baixa tensão ligam directamente às baterias do sistema de armazenamento.

Ambos os casos têm vantagens e desvantagens. Em A existe a vantagem de que quando, por algum motivo, as baterias do sistema de armazenamento estejam desligadas do barramento CC, os sistemas auxiliares tenham sempre alimentação. No entanto, existem mais perdas que no caso B, devido a ter mais um conversor de potência. Por esse motivo decidiu-se optar pelo caso B.

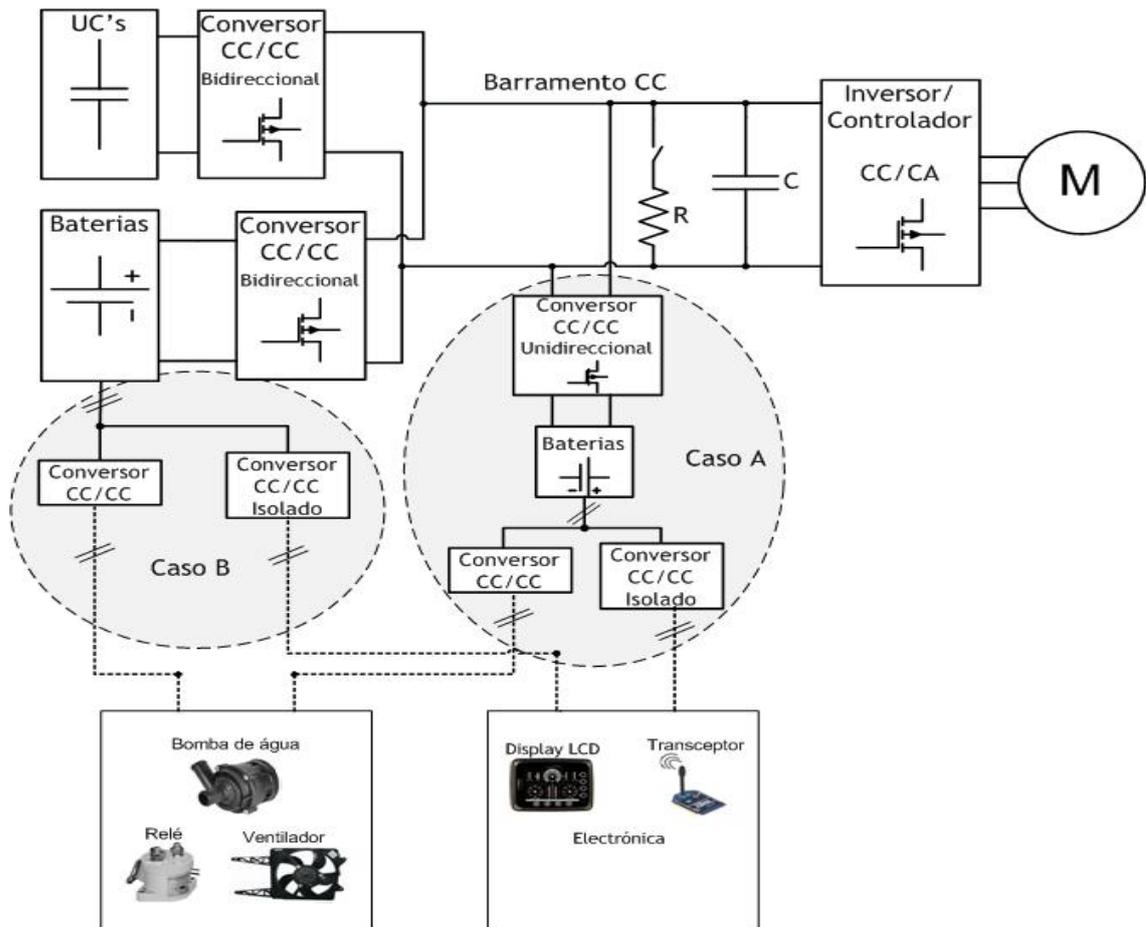


Figura 6.1 - Esquemas possíveis de ligações para a alimentação auxiliar.

6.2 - Topologias de conversão

Ambos os conversores são do tipo step down, com tensão de entrada aproximadamente 160 V (tensão das baterias) e 12V na saída.

O conversor não isolado suporta dispositivos cuja potência pode ultrapassar os 290W. Neste caso, dada a potência já envolvida, a utilização da topologia buck é bem empregue.

No caso da alimentação dos dispositivos de menor potência, a topologia flyback garante os requisitos. O isolamento, neste caso, garante a independência das massas de maior potência, para com a electrónica auxiliar. A potência não ultrapassa os 35W, pelo que esta topologia não tem quaisquer dificuldades em a converter.

6.2.1 - Dimensionamento do conversor flyback

Dimensionou-se o conversor flyback, de acordo com os seguintes requisitos:

- $V_o=12V$;
- $P_o(\text{Máx})=35W$;
- $V_{in}(\text{min})=132V$;
- $V_{in}(\text{Máx})=190V$

A frequência de comutação deve ter um valor elevado pois assim reduz o tamanho dos componentes passivos no circuito de conversão. No entanto, quanto maior a frequência,

maiores as perdas. Escolheu-se, por isso, uma frequência de comutação de 50kHz, que apresenta um bom compromisso entre as perdas e a dimensão dos componentes.

O dimensionamento do transformador da topologia flyback foi baseado em [31]. O transformador nesta topologia aproveita a indutância de magnetização para armazenar energia.

A corrente na entrada é máxima quando a tensão é mínima, e a potência for máxima. $I_{in} = 35/132 = 265mA$.

O modo que se pretende assegurar é o descontínuo. Neste caso, o transistor deve estar a conduzir o máximo meio período. Para assegurar o modo descontínuo escolheu-se 40% do período, o que equivale a 8µs. Considerando isto, a corrente média na bobina do primário fica $I_{Lp} = I_{in}/D = 663mA$.

A corrente de pico é o dobro da corrente média, ou seja, $I_{Lp\ peak} = 1,33A$.

A bobina do do primário do transformador fica com uma indutância de:

$$L_p = V \times \frac{\Delta t}{\Delta I} = 794 \mu H, \quad (6.1)$$

com Δt os 40% do período, e considerando a corrente descontínua.

Sabendo que o nível de saturação da ferrite é cerca de 0,35T, escolheu-se uma densidade máxima de fluxo de 0,2T. Assim é possível fazer o cálculo do número de voltas do enrolamento primário:

$$N_p = \frac{V \times t}{B \times A_e} = \frac{132 \times 8 \times 10^{-6}}{0.2 \times 47.7 \times 10^{-6}} \cong 111 \text{ voltas} \quad (6.2)$$

O enrolamento do secundário calculou-se de forma semelhante ao primário.

A corrente média de saída é $I_o = 35/12 = 2,9A$.

Para corrente média à que levar em conta o tempo em que a energia é transferida para a saída do conversor, equivalente ao tempo que o diodo conduz. No pior dos casos o valor é 50% do período. Portanto 5,8A. A corrente de pico é o dobro da corrente média, ou seja, 11,6A.

Por analogia à parte do cálculo da indutância do enrolamento primário, temos que:

$$L_s = V \times \frac{\Delta t}{\Delta I} = 10 \mu H \quad (6.3)$$

Da relação entre as indutâncias e o número de espira vem:

$$L_s = \left(\frac{N_s}{N_p} \right)^2 \times L_p \Rightarrow N_s = 12 \text{ voltas} \quad (6.4)$$

O condensador de saída calculou-se assumindo um ripple de corrente de 0.5%, ou seja, 0.6V. Resultando numa capacidade de aproximadamente 2,8mF.

6.3 - Implementação e simulação do sistema de conversão auxiliar

De seguida implementou-se o conversor flyback (Figura 6.2) com uma carga e tensão de entrada variáveis ao longo do tempo, com o intuito de confirmar o bom funcionamento do mesmo.

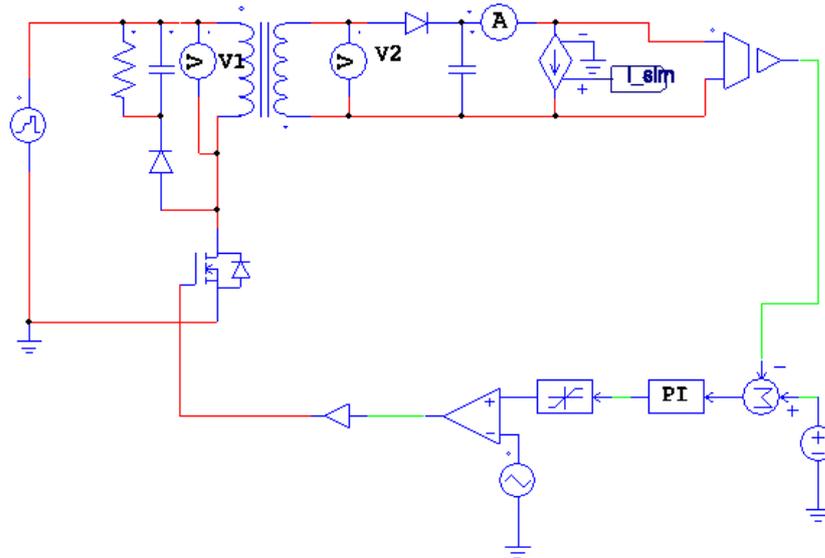


Figura 6.2 - Implementação em PSIM do conversor flyback e do seu controlador de tensão.

O valor do controlador PI foi ajustado manualmente até se ter conseguido uma boa resposta. Na Figura 6.3 encontra-se apresentado o resultado de uma simulação com carga variável. É possível observar o bom comportamento do conversor/controlador, mesmo a variações de carga rápidas. De referir que a escala de tempo do gráfico é bastante pequena.

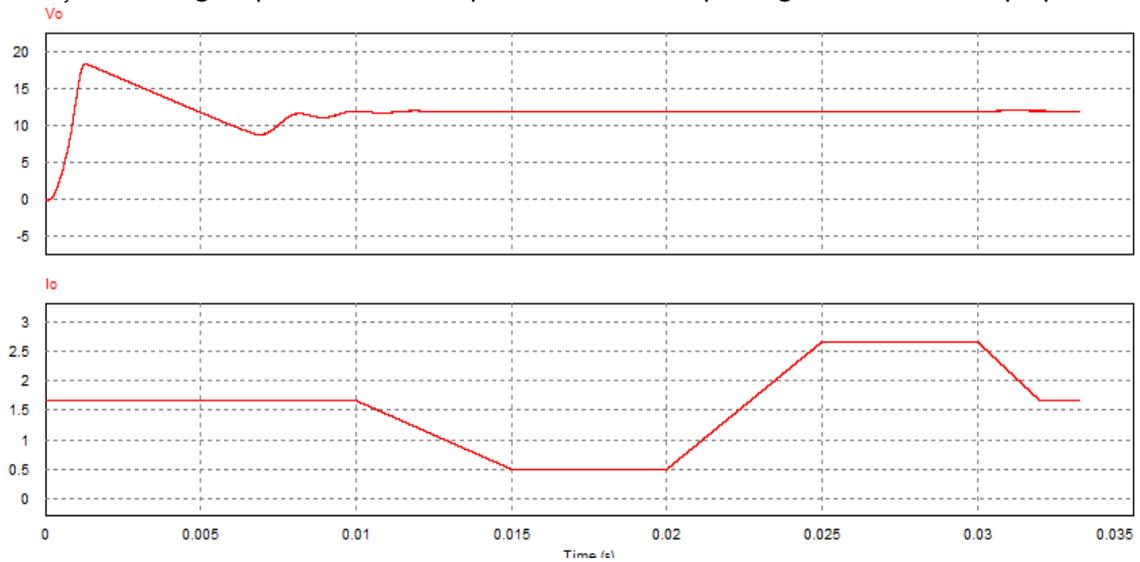


Figura 6.3 - Resposta da onda da tensão de saída, com carga (corrente de saída) variável.

Concluí-se assim o bom funcionamento do conversor para a alimentação da electrónica auxiliar, com uma resposta bastante rápida por parte do controlador implementado, necessária para o bom funcionamento da electrónica de aquisição, controlo e processamento dados.

Capítulo 7

Conclusões e trabalhos futuros

7.1 - Conclusões

Do projecto apresentado são retiradas conclusões finais.

O capítulo 1 desta tese serviu de uma introdução ao projecto VEC, identificando os objectivos tanto do projecto como desta tese em si.

No capítulo 2 analisou-se o estado da arte dos veículos eléctricos, bem como da sua alimentação.

No capítulo da modelação das fontes de energia, a serem implementadas no VEC, são retiradas conclusões ao sistema de teste desenvolvido, bem como aos modelos analisados.

O sistema de teste desenvolvido permite extrair dados da bateria. No entanto, a ferramenta utilizada (o Labview), para a implementação deste sistema, deixa algumas dificuldades na medida em que a programação se torna de difícil compreensão devido à extensão do programa.

Dos testes realizados à bateria de Ni-MH denota-se a elevada queda de tensão, protagonizada pela resposta mais lenta. Esta dinâmica, mais lenta, considerou-se ser incapaz de ser modelada pelo modelo das duas malhas RC. Concluiu-se ainda que o modelo levado a cabo por Windarko em [25], consegue modelar essa dinâmica da bateria de Ni-MH.

O modelo do VEC desenvolvido, no capítulo 4, para o circuito Vasco Sameiro, é capaz de fornecer informações importantes acerca da energia necessária para correr uma volta. Calcularam-se as eficiências do power train, e chegou-se à conclusão que seriam obrigatórios 5 packs de baterias Ni-MH (5,5Ah com 158V) para conseguir chegar ao fim de 5 voltas.

Os conversores de potência, dimensionados no capítulo 5, permitem o controlo de fluxo de potência do sistema híbrido de energia que, segundo um algoritmo de gestão energético, controla a tensão do barramento CC do veículo. Simulou-se todo o sistema híbrido, verificando o bom funcionamento tanto dos controladores ligados aos conversores de potência, bem como da tensão do barramento CC.

No capítulo 6, analisou-se a alimentação auxiliar do veículo para a electrónica e instrumentação do VEC, onde se também incluem motores auxiliares de refrigeração. Estipulou-se a forma de alimentação e dimensionou-se um conversor flyback capaz de alimentar a electrónica “sensível”. Da simulação concluiu-se que este conversor tem boas características para a implementação no veículo.

7.2 - Trabalhos futuros

O presente trabalho abre portas para o tema muito vasto que é o sistema de alimentação de um veículo eléctrico. Do seguimento desta dissertação, vários trabalhos futuros podem ser desenvolvidos no âmbito do Veículo Eléctrico de Competição:

- O modelo de bateria proposto por Windarko em [26], seria interessante de parametrizar para as baterias de Ni-MH, do sistema de armazenamento do VEC.
- O sistema de testes desenvolvido na plataforma Labview não será interessante de sofrer melhoramentos já que, a programação a ele associado torna-se de difícil compreensão quando o programa começa a ficar extenso. A solução passará pela utilização de uma DSP, capaz de guardar os dados num cartão de memória. Aquando do teste acabado, o ficheiro do cartão de memória seria aberto por um GUI (Graphical User Interface) produzido no Matlab, que processa os dados do ficheiro, fornecendo de seguida os parâmetros do modelo da bateria.
- A integração dos efeitos da temperatura na dinâmica da bateria.
- A integração de um banco de ultracondensadores no VEC e parametrização do seu modelo.
- A interligação do sistema simulado do armazenamento híbrido de energia com um sistema simulado de tracção eléctrico e o modelo do VEC. Com estes pontos todos interligados seria possível obter o modelo total do VEC. Com esse modelo poder-se-ia simular o comportamento do carro em diferentes pistas.
- Estudo de formas de balanceamento das células das baterias colocadas em série.
- A implementação prática do sistema de alimentação auxiliar simulado nesta dissertação, deve ser consumado, de modo a ser embutido no VEC.

Referências

1. Chan, C.C., *The state of the art of electric and hybrid vehicles*. Proceedings of the IEEE, 2002. **90**(2): p. 247-275.
2. Chan, C.C., *The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles*. Proceedings of the IEEE, 2007. **95**(4): p. 704-718.
3. Bansal, R., *Electric Vehicles*, in *Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives*. 2005, CRC Press. p. 55-96.
4. Linden, D. and T.B. Reddy, *Handbook of Batteries (3rd Edition)*. 2002, McGraw-Hill.
5. *Front Matter*, in *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*. 2009, CRC Press.
6. Lukic, S.M., et al., *Energy storage systems for automotive applications*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008. **55**(6): p. 2258-2267.
7. Chen, M. and G.A. Rincon-Mora, *Accurate electrical battery model capable of predicting, runtime and I-V performance*. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006. **21**(2): p. 504-511.
8. V. Isastia, S.M., *Overview on Automotive Energy Storage Systems*. International Review of Electrical Engineering-IREE, 2009. **4**.
9. Elton J. Cairns, P.A., *Batteries for Electric and Hybrid-Electric Vehicles*. Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng. , 2010: p. 299-320.
10. Rodrigues, G.B.T., *Modelação e Simulação de um Formula Student Eléctrico* 2009.
11. Kroeze, R.C. and P.T. Krein, *Electrical Battery Model for Use in Dynamic Electric Vehicle Simulations*. 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Vols 1-10, 2008: p. 1336-1342.
12. E. Bertolazzi, F.B., M. Da Lio, M. Mateotti. *Hybrid vehicle optimization: lead acid battery modellization*. in *EVER09: International Conference & Exhibition on Ecological vehicles Renewable Energies*. 2009. Monaco.
13. Kumar, P. and P. Bauer. *Parameter extraction of battery models using multiobjective optimization genetic algorithms*. in *Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2010 14th International*. 2010.
14. Ribeiro, P.F., et al., *Energy storage systems for advanced power applications*. Proceedings of the IEEE, 2001. **89**(12): p. 1744-1756.
15. Burke, A.F., *Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles*. Proceedings of the IEEE, 2007. **95**(4): p. 806-820.
16. H. Gualous, G.A., *ESSCAP'2008 - Lithium Ion capacitor characterization and modeling*. 2008.
17. Weir, R.D., et al., *Fabrication of electrical energy storage unit components useful in e.g. bus involves screen-printing Teflon plastic-coated steel plate with poly(ethylene terephthalate) and alumina-coated composition modified barium titanate ceramic powder*, EESTOR INC (EEST-Non-standard). p. 1789980-A2:.
18. Lisheng, S. and M.L. Crow. *Comparison of ultracapacitor electric circuit models*. in *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*. 2008.
19. Vazquez, S., et al., *Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010. **57**(12): p. 3881-3895.
20. Kohler, T.P., D. Buecherl, and H.G. Herzog. *Investigation of control strategies for hybrid energy storage systems in hybrid electric vehicles*. 2009.
21. Cao, J. and A. Emadi. *A new battery/ultra-capacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid and plug-in hybrid electric vehicles*. 2009.
22. Tao, H., J.L. Duarte, and M.A.M. Hendrix, *Multiport Converters for Hybrid Power Sources*. 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Vols 1-10, 2008: p. 3412-3418.

23. <http://batteryuniversity.com>. Fevereiro de 2011].
24. Gao, L.J., S.Y. Liu, and R.A. Dougal, *Dynamic lithium-ion battery model for system simulation*. Ieee Transactions on Components and Packaging Technologies, 2002. **25**(3): p. 495-505.
25. Abu-Sharkh, S. and D. Doerffel, *Rapid test and non-linear model characterisation of solid-state lithium-ion batteries*. Journal of Power Sources, 2004. **130**(1-2): p. 266-274.
26. Windarko, N.A., C. Jaeho, and C. Gyo-Bum. *Improvement of electrical modeling of NiMH battery for application of Microgrid System*. in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE*. 2010.
27. Schweighofer, B., K.M. Raab, and G. Bresseur, *Modeling of high power automotive batteries by the use of an automated test system*. Ieee Transactions on Instrumentation and Measurement, 2003. **52**(4): p. 1087-1091.
28. Sejin, N., et al. *PSiM based electric modeling of supercapacitors for line voltage regulation of electric train system*. in *Power and Energy Conference, 2008. PECon 2008. IEEE 2nd International*. 2008.
29. Amjadi, Z. and S.S. Williamson, *Power-Electronics-Based Solutions for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Energy Storage and Management Systems*. Ieee Transactions on Industrial Electronics, 2010. **57**(2): p. 608-616.
30. Schupbach, R.M. and J.C. Balda, *Comparing DC-DC converters for power management in hybrid electric vehicles*. Ieee Iemdc'03: Ieee International Electric Machines and Drives Conference, Vols 1-3, 2003: p. 1369-1374
1989.
31. Abraham Pressman, K.B., Taylor Morey, *Switching Power Supply Design*, ed. M.G. Hill. 2009.