



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Controlo e Gestão do Carregamento de Sistemas de Armazenamento de Energia em Veículos Elétricos, Efetuado com Recurso a Conversores DC-DC

João Pedro Matos Lopes Fidalgo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor António João Marques Cardoso

Covilhã, Outubro de 2017

Dedicatória

Gostaria de dedicar este trabalho aos meus pais, João Fidalgo e Ana Fidalgo, por toda a ajuda, apoio e presença, não só neste ano mas em todo o meu percurso académico.

Queria dedicar, também, à minha avó materna Maria Adelina D'Acensão Matos e ao meu avô paterno Marçal Lobo Fidalgo, mesmo não estando presentes fisicamente, sempre acreditaram em mim e estiveram do meu lado.

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado contou com importantes apoios e incentivos sem os quais não se teria tornado uma realidade e pelos quais estarei eternamente grato.

Agradeço ao Professor Doutor António João Marques Cardoso por toda a orientação, supervisão, total apoio, disponibilidade, pelo saber que me transmitiu, pelas opiniões e críticas, total colaboração no solucionar de dúvidas e problemas que foram surgindo ao longo deste trabalho e por todas as palavras de incentivo. Quero ainda ressaltar o fato de me ter proporcionado um espaço de trabalho e material laboratorial (CISE - Centro de Investigação em Sistema Electromecatrónicos) de forma a ser possível a realização desta dissertação com sucesso.

Aos membros do CISE, em especial ao aluno de doutoramento Fernando Bento agradeço todo o auxílio e colaboração ao longo deste trabalho, sempre que foi necessário.

Agradeço a todos os meus amigos, tanto da Covilhã como da Universidade e do curso, por sempre terem estado do meu lado ao longo do meu percurso académico nesta universidade.

Por último, tendo consciência que sozinho nada me teria sido possível, dirijo um forte agradecimento a toda a minha família, em especial aos meus pais e ao meu avô Fernando Lopes por todo o apoio e motivação ao longo deste ano.

Resumo

As descobertas científicas e o avanço tecnológico observados no último século e meio foram vertiginosos, superando em muito tudo o que havia sido descoberto até aos meados do século XIX. O avanço tecnológico e o desenvolvimento da sociedade moderna estão interligados, confundindo-se ao ponto de muitas dessas descobertas serem encaradas como naturais e, portanto, torna-se inconcebível imaginar a nossa existência sem essas descobertas.

Mas não se pense que o insaciável apetite pelas descobertas e pela evolução se contenta com o que já foi conseguido. Tal não faz parte do espírito humano e busca-se sempre a eficiência máxima dos engenhos desenvolvidos. Essa eficiência é imposta por fatores como os próprios indivíduos, os mercados, a economia, o meio ambiente ou as necessidades energéticas. Este estudo visa investigar e desenvolver um carregador destinado a veículos elétricos, direcionado para Sistemas Elétricos de Energia (SEE) do tipo DC, de forma a dar resposta e soluções ao nível da eficiência energética, com repercussão nos restantes fatores.

A maioria dos dispositivos elétricos e eletrónicos das habitações são compatíveis com a utilização de alimentação do tipo DC, o que obriga à existência de retificação de energia AC para DC. Com a implementação de SEE do tipo DC, é possível obter ganhos ao nível da eficiência energética, pela eliminação de etapas de conversão de energia. Com a mudança no paradigma da produção e consumo de energia, estão em vias de ser implementadas redes DC à escala doméstica e de bairros. Estas permitem reduzir o número de etapas de conversão de energia, bem como as perdas na distribuição dessa mesma energia. Na implementação de redes DC, será necessário criar vários níveis de tensão, que permitam a ligação de diferentes tipos de cargas à rede. A criação dos níveis de tensão adequados será feita com recurso a conversores DC-DC.

No tocante aos veículos elétricos, a temática do carregamento/d Descarregamento de um veículo elétrico para uma micro-rede ganhou hoje uma importância acrescida, pois os veículos, para além de consumidores, podem também ser fornecedores de energia. Como o carregamento/d Descarregamento se processa a níveis de potência elevados, importa usar dispositivos destinados a minimizar as perdas resultantes dos processos de conversão de energia.

No sentido de apurar a efetividade dos métodos aplicados, recorreu-se a um protótipo do conversor DC-DC multinível modular, para a realização dos ensaios experimentais e obtenção de resultados pretendidos.

Palavras-chave

Veículo Elétrico, Conversores DC-DC, Sistemas de Armazenamento de Energia, Carregamento, Descarregamento.

Abstract

The scientific discoveries and the technological advance observed in the last century and a half were vertiginous, far exceeding everything that had been discovered until the mid-nineteenth century. The technological advancement and development of modern society are interlinked, confusing themselves to the point that many of these discoveries are regarded as natural, and therefore it becomes inconceivable to imagine our existence without these discoveries.

But do not think that the insatiable appetite for discoveries and evolution is content with what has already been achieved. This is not part of the human spirit, and the maximum efficiency of the developed equipment is always sought. This efficiency is imposed by factors such as individuals themselves, markets, economics, the environment, or energetic needs. This study aims to investigate and develop a charger for electric vehicles, directed to DC Electric Energy Systems (ESS), in order to provide answers and solutions in terms of energy efficiency, with repercussion on the other factors.

Most home electrical and electronic devices are compatible with the use of DC power type, which requires the existence of rectification of AC power to DC. With the implementation of DC type ESS, it is possible to achieve gains in energy efficiency by eliminating energy conversion steps. With the change in the paradigm of energy production and consumption, DC networks are being implemented at the domestic and neighborhood levels. These allow to reduce the number of stages of energy conversion, as well as losses in the distribution of that same energy. In the implementation of DC grids, it will be necessary to create several voltage levels, which allow the connection of different types of loads to the network. The appropriate voltage levels will be created using DC-DC converters.

With regard to electric vehicles, the issue of charging / discharging an electric vehicle into a micro-grid has gained increasing importance today as vehicles, as well as consumers, can also be energy providers. As charging / discharging takes place at high power levels, devices designed to minimize losses resulting from power conversion processes must be used.

In order to ascertain the effectiveness of the applied methods, a prototype of the modular multilevel DC-DC converter was used to carry out the experimental tests and obtain the desired results.

Keywords

Electric Vehicle, DC-DC Converters, Energy Storage Systems, Charging, Discharging.

Índice

Introdução	1
Veículos Elétricos	4
AC vs DC.....	6
Estado de arte	9
Níveis de carregamento	9
Conversores DC-DC bidirecionais.....	10
Configurações existentes, propriedades e comparações.....	11
Métodos para aumentar o desempenho dos conversores	13
Algoritmos de controlo	13
Falhas.....	15
Sistemas de Armazenamento de Energia	16
Baterias.....	16
Supercondensadores	18
Volante de Inércia.....	20
Sistemas de armazenamento de energia híbridos (HES)	20
Estratégia de Gestão da Energia (EMS).....	21
Projetos semelhantes.....	22
Dimensionamento do sistema de carregamento	25
Conversor DC-DC Multinível Modular	25
Estratégia de controlo.....	26
Estratégia de Gestão de Energia	27
Controlo de Dead Time.....	30
Configuração do Sistema de Armazenamento	31
Banco de Baterias	32
Banco de Supercondensadores	32
Resultados de simulação	35
Estrutura do circuito.....	35
Comportamento do circuito em circunstâncias normais	35
Carregamento.....	36
Descarregamento.....	39
Resultados experimentais.....	43
Comportamento do circuito em circunstâncias normais	43
Para o caso do carregamento.....	43
No caso do descarregamento	44
Conclusão e sugestões para trabalhos futuros	47
Conclusão	47
Sugestão para trabalhos futuros	47

Bibliografia 49

Lista de Figuras

Figura 1 - Sistema de distribuição de energia elétrica numa habitação. Estrutura típica.	3
Figura 2 - Sistema de distribuição de energia elétrica numa habitação. Estrutura proposta....	3
Figura 3 - Diagrama simplificado de um carregamento feito em AC vs DC.....	7
Figura 4 - Conversor Buck-Boost.	11
Figura 5 - Conversor Half-Bridge Isolado.	12
Figura 6 - Conversor Full-Bridge Isolado.	12
Figura 7 - Conversor Multinível Modular	13
Figura 8 - Controlador PI	14
Figura 9 - Controlador PID	14
Figura 10 - Esquema equivalente da bateria.	16
Figura 11 - Esquema equivalente do supercondensador	19
Figura 12 - Topologia de um sistema de armazenamento de energia híbrido	21
Figura 13 - Conversor DC-DC Multinível	26
Figura 14 - Controlador PI.	27
Figura 15 - Controlador Fuzzy.	27
Figura 16 - Evolução da corrente em função do estado de carga para o carregamento.	28
Figura 17 - Evolução da corrente em função do estado de carga para o descarregamento. ..	29
Figura 18 - Estratégia de Dead Time	30
Figura 19 - Fase de carregamento com estratégia de Dead Time.	30
Figura 20 - Fase de descarregamento com estratégia de Dead Time.	31
Figura 21 - Estratégia de Dead Time implementada	31
Figura 22- Estrutura do circuito implementado em MATLAB Simulink.....	35
Figura 23 - Estado de carga do Supercondensador numa janela temporal de 5 segundos.	36
Figura 24 - Estado de carga da Bateria numa janela temporal de 5 segundos.	36
Figura 25 - Estado de Carga do Supercondensador a 30 %.	36
Figura 26 - Estado de Carga da Bateria a 20 %.	37
Figura 27 - Nível de tensão do supercondensador numa janela temporal de 5 segundos.....	37
Figura 28 - Nível de tensão da bateria numa janela temporal de 5 segundos.	37
Figura 29 - Nível de tensão do supercondensador.	37
Figura 30 - Nível de tensão na bateria	37
Figura 31 - Corrente na carga do supercondensador numa janela temporal de 5 segundos. ..	38
Figura 32 - Corrente na carga da bateria numa janela temporal de 5 segundos.	38
Figura 33 - Corrente na carga do supercondensador.	38
Figura 34 - Corrente na carga da bateria.	38
Figura 35 - Controlador Fuzzy para o supercondensador numa janela temporal de 5 segundos	39
Figura 36 - Controlador Fuzzy para a bateria numa janela temporal de 5 segundos.	39

Figura 37 - Estado de Carga do Supercondensador numa janela temporal de 5 segundos.	39
Figura 38 - Estado de Carga da Bateria numa janela temporal de 5 segundos.	39
Figura 39 - Evolução do Estado de Carga do Supercondensador com início a 90 %.	40
Figura 40 - Evolução do Estado de Carga da Bateria com início a 80 %.	40
Figura 41 - Tensão na carga do supercondensador para uma janela temporal de 5 segundos.	40
Figura 42 - Tensão na carga da bateria para uma janela temporal de 5 segundos.	40
Figura 43 - Tensão na carga do supercondensador.	40
Figura 44 - Tensão na carga da bateria.	41
Figura 45 - Níveis de corrente de descarregamento do supercondensador para uma janela temporal de 5 segundos.	41
Figura 46 - Níveis de corrente de descarregamento da bateria para uma janela temporal de 5 segundos.	41
Figura 47 - Níveis de corrente de descarregamento do supercondensador.	41
Figura 48 - Níveis de corrente de descarregamento da bateria.	41
Figura 49 - Controlador Fuzzy para o supercondensador numa janela temporal de 5 segundos.	42
Figura 50 - Controlador Fuzzy para a bateria numa janela temporal de 5 segundos.	42
Figura 51 - Resposta do controlador Fuzzy para o carregamento.	43
Figura 52 - Comportamento da corrente no primeiro módulo em carregamento.	44
Figura 53 - Comportamento da corrente no segundo módulo em carregamento.	44
Figura 54 - Evolução do estado de carga ao longo do tempo.	44
Figura 55 - Resposta do controlador Fuzzy para o descarregamento.	45
Figura 56 - Comportamento da corrente no primeiro módulo em descarregamento.	45
Figura 57 - Comportamento da corrente no segundo módulo em descarregamento.	45
Figura 58 - Evolução do estado de carga ao longo do tempo.	46

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Níveis de carregamento.	10
Tabela 2 - Níveis de carregamento aplicados	28
Tabela 3 - Níveis de descarregamento aplicados	29

Lista de Acrónimos

AC	<i>Alternating Current</i>
DC	<i>Direct Current</i>
SEE	<i>Sistemas Eléctricos de Energia</i>
G2V	<i>Grid to Vehicle</i>
V2G	<i>Vehicle to Grid</i>
IEEE	<i>Institute of Eletrical and Electronics Engineers</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
PI	<i>Proporcional Integral</i>
PID	<i>Proporcional Integral Derivativo</i>
HES	<i>Hybrid Energy Storage</i>
ECMS	<i>Equivalent Fuel Consumption Minimization Strategy</i>
EMS	<i>Energy Management System</i>
SOC	<i>State of Charge</i>

Capítulo 1

Introdução

O Homem e a suas atividades, em especial desde o início da era da industrialização, são os responsáveis, quase em exclusivo, pela poluição do nosso planeta. A atividade industrial, a atividade extrativa e os transportes são os maiores geradores de gases que são lançados para a atmosfera, os quais vão provocar o tão nocivo efeito de estufa. De acordo com inúmeros estudos científicos, estes gases podem mesmo vir a colocar em causa a sobrevivência das espécies, da humanidade e do planeta Terra.

Para obviar esta iminente tragédia, importa alterar de forma rápida e consistente muitos dos comportamentos que assumimos nos dias de hoje, garantindo, ao mesmo tempo, a manutenção do nosso estilo de vida, sem colocar em causa a nossa existência, a qualidade do ar, a qualidade da água e de outros elementos essenciais. Por todo o planeta têm-se levantado vozes que chamam a atenção para o estado a que chegámos e para a necessidade de rever comportamentos. De um modo geral, têm vindo a ser dados passos para combater o estado atual. No entanto, esta luta tem sido feita de avanços e recuos, sendo que muitos desses recuos têm por base os interesses económicos que se sobrepõem, na maioria das vezes, à própria preservação ambiental.

Grandes avanços têm acontecido com as Conferências das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas, das quais saiu, em 2015, o Acordo de Paris, que foi reconhecido pela grande maioria dos países participantes. Com este acordo, pretende-se reger as emissões de gases causadores de efeito de estufa, limitando o aquecimento global a uma meta de 2 graus Celsius até ao ano 2040. No entanto, esta ambição tem vindo a ser condicionada por uma atitude negativa de muitos países e pelo abandono, por parte de alguns desses países, das políticas de defesa ambiental.

A indústria automóvel e o transporte de pessoas e bens são alguns dos principais responsáveis pela produção de gases causadores do efeito de estufa. Para contribuir para a inversão deste imenso problema, os estados e os fabricantes têm vindo a estudar e a aplicar medidas que possam minorar a emissão de gases causadores do efeito de estufa. Se do lado da produção automóvel têm vindo a ser introduzidas novas técnicas e materiais construtivos mais amigos do ambiente, com redução acentuada do consumo de recursos naturais e energéticos, do lado dos veículos em si assistimos à introdução de tecnologias de motorização que podem complementar, ou mesmo substituir com sucesso, os motores de explosão e combustão. Para o conseguir, a indústria tem apostado em veículos híbridos e em veículos totalmente elétricos. Esta aposta, inicialmente tímida e limitada a um número reduzido de marcas, tem vindo a revelar-se uma aposta certa, que vai sendo extensível a todas as outras, dando mesmo origem a novas marcas. O objetivo passa pela criação de novos e melhores

veículos elétricos, derivados de fortes investimentos na investigação e desenvolvimento da tecnologia elétrica, principalmente no tocante ao aumento da eficiência e da autonomia.

Com a alteração do paradigma da motorização, a indústria automóvel dá um passo gigantesco para diminuir consideravelmente a emissão de gases causadores do efeito de estufa, bem como de outros gases nocivos para a atmosfera. Simultaneamente, alguns países estão a preparar-se para, de forma faseada, proibirem a comercialização de veículos com motorizações a combustão e a explosão.

A aposta elétrica não é totalmente pacífica e apresenta ainda muitas debilidades, principalmente no tocante à autonomia dos veículos, ao armazenamento de energia e à rapidez de carregamento, entre outras. Ainda assim, a necessidade imperiosa de alterar os comportamentos do Homem tem levado ao desenvolvimento da tecnologia elétrica e a um forte investimento na investigação e desenvolvimento tecnológico de tudo o que está relacionado com a eficiência dos veículos elétricos. Com o aumento do número de veículos elétricos, verificou-se também um aumento do número de carregamentos de veículos. A preferência pelo carregamento feito ao nível doméstico, comum a muitos dos utilizadores de veículos elétricos, introduziu alterações significativas nos perfis de consumo de energia elétrica ao nível residencial. Por outro lado, verifica-se uma preocupação crescente em melhorar a eficiência energética de habitações e escritórios, que está a levar os investigadores a propor alterações na estrutura dos sistemas elétricos de energia (SEE) atualmente implementados em ambiente residencial e de escritórios, como apresentado na Figura 1.

A existência de evidências em outros trabalhos e dissertações [1], deram a conhecer estudos em que foram propostas alternativas aos SEE atualmente implementados em ambiente residencial e de escritórios. Apesar das pequenas diferenças entre os vários modelos e as diferentes propostas, foi possível verificar, pelas demonstrações observadas, que é exequível reduzir as perdas relacionadas com a conversão de energia elétrica AC para DC, desde que sejam implementadas algumas variações e ajustes, como podemos observar ao comparar a Figura 1 e a Figura 2. Para além dos estudos que apontam para a redução significativa das perdas de energia elétrica, quando se utilizam SEE do tipo DC, existem mesmo instituições internacionais, como o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), que estão a desenvolver iniciativas como o “*DC in the Home*”, destinadas a determinar as vantagens e benefícios dos SEE do tipo DC, por oposição aos SEE do tipo AC atualmente implementados em habitações e escritórios, como apresentado na Figura 2.

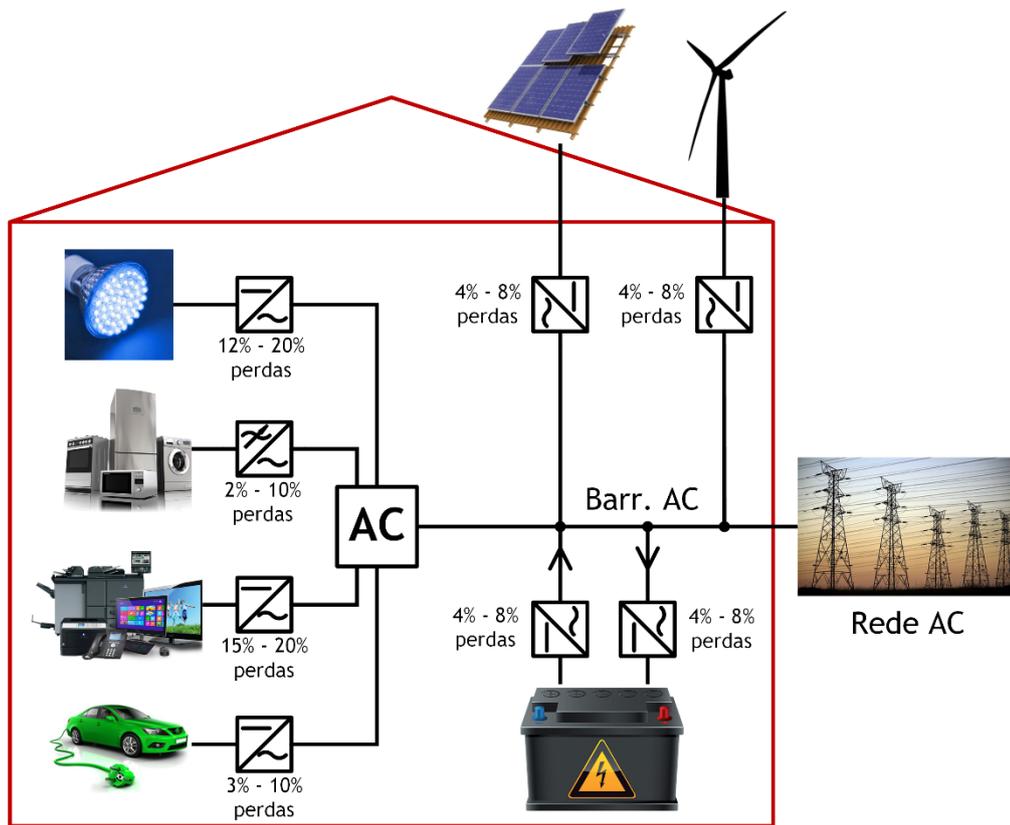


Figura 1 - Sistema de distribuição de energia elétrica numa habitação. Estrutura típica [1].

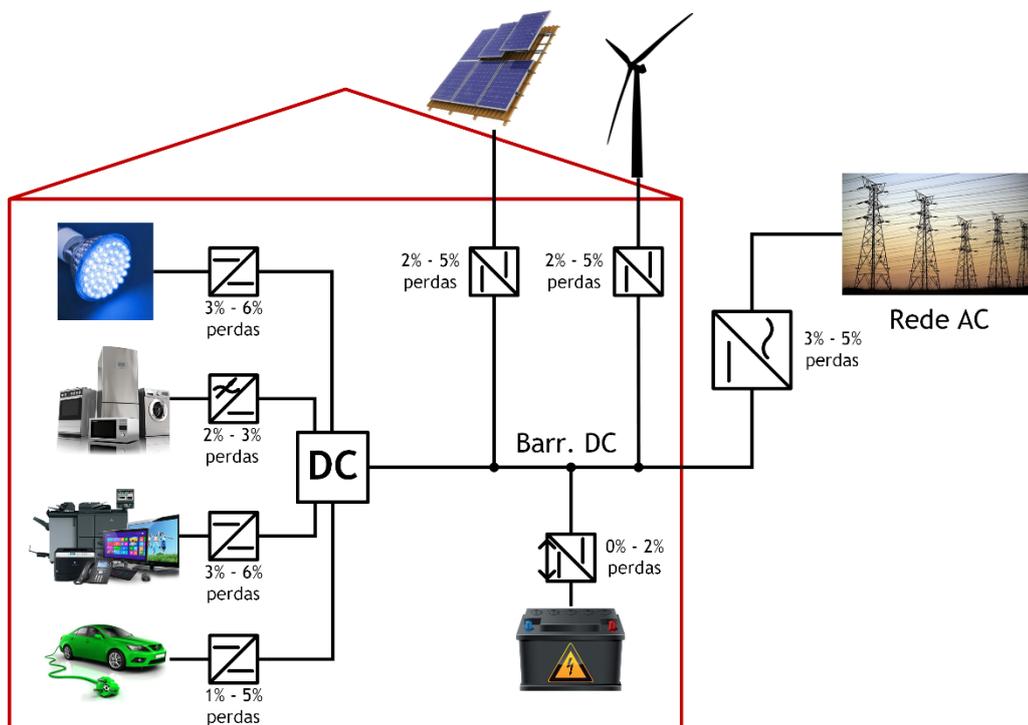


Figura 2 - Sistema de distribuição de energia elétrica numa habitação. Estrutura proposta [1].

A implementação de um SEE do tipo DC implica o recurso a conversores DC-DC, para que sejam satisfeitos alguns requisitos, como por exemplo os diferentes níveis de tensão

necessários ao bom funcionamento dos vários elementos constituintes do SEE: luminárias, eletrodomésticos, computadores, carregadores e outros dispositivos. Estes conversores irão, assim, desempenhar uma função determinante no desenvolvimento de SEE do tipo DC em habitações e escritórios, enquanto conversores da energia elétrica.

Para além dos conversores DC-DC, a implementação de SEE do tipo DC implica ainda outras medidas, que se revelam fundamentais para o seu perfeito funcionamento, como sejam sistemas auxiliares de compatibilidade DC e sistemas de proteção próprios. Neste tipo de redes é impraticável o recurso aos sistemas de proteção atualmente disponíveis, compatíveis com SEE do tipo AC.

O estudo sobre a utilização de SEE do tipo DC e as vantagens deste tipo de sistemas no carregamento dos veículos em habitações procura também dar respostas e contributos para a diminuição da emissão de gases nocivos para a saúde, bem como para o aumento da eficiência do carregamento dos veículos e da sua rapidez de carregamento, como apresentado na Figura 2.

Assim, o trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação foca-se em especial sobre as questões do carregamento e descarregamento dos vários sistemas de armazenamento de energia existentes nos veículos elétricos, num contexto de utilização generalizada de SEE do tipo DC em habitações e escritórios.

No primeiro capítulo vai ser feita a introdução e contextualização do trabalho.

No segundo capítulo será apresentado o estado de arte, onde serão focados aspetos do trabalho, como sejam os vários níveis de carregamento, as topologias dos conversores DC-DC, os sistemas de armazenamento de energia e estratégia de gestão e carregamento de energia mais comuns.

No terceiro capítulo, é explicada toda a teoria envolvente da dissertação, o conversor eletrónico de potência escolhido e as estratégias de controlo implementadas.

No quarto capítulo, é apresentada a simulação e por sua vez os resultados da mesma.

Por fim, no quinto capítulo são apresentados os ensaios experimentais levados a cabo, bem como os resultados obtidos.

1.1. Veículos Elétricos

O veículo elétrico, tal como o conhecemos atualmente, é um veículo cuja força motriz é obtida através da energia elétrica acumulada em uma ou mais baterias, destinadas a alimentar um ou mais motores elétricos, que transmitem o movimento de rotação às rodas. Entre muitas vantagens, estes veículos não emitem qualquer tipo de gases nocivos para o ambiente, assim como não produzem qualquer tipo de ruído.

Circulam também nas nossas estradas os veículos híbridos. Estes são o resultado da combinação de motores elétricos com motores de combustão interna, sendo geralmente motores de explosão ou de combustão, conjugados com um motor elétrico auxiliar, que funciona a velocidades mais baixas, reduzindo o recurso e o esforço do motor principal. Esta

conjugação permite reduzir, de forma acentuada, os consumos e as emissões de gases nocivos para a atmosfera.

Existe ainda um outro tipo de veículos que recorre a células de combustível. São veículos cujo motor é alimentado por uma célula de combustível, a qual é constituída por um agente redutor e um agente oxidante capazes de produzir energia elétrica.

Os indícios do aparecimento do primeiro veículo movido por um motor elétrico remontam ao ano de 1827, momento em que um padre Eslovaco-Húngaro trabalhou pela primeira vez no desenvolvimento do primeiro motor elétrico. Este motor teria como função fazer mover um pequeno carro. Poucos anos passaram até que esta tentativa viesse a ser replicada de forma mais séria e os veículos elétricos comesçassem a ser vistos como alternativa. Um pouco por todo o lado, eram feitas experiências e testes destinados a criar melhores veículos elétricos. Mas a necessidade de percorrer grandes distâncias, a descoberta de enormes reservas de petróleo e o domínio do *lobby* petrolífero, fez com que os motores de explosão e combustão iniciassem o seu domínio. Os veículos elétricos ficaram, assim, confinados a pequenos projetos ou a transportes públicos, como comboios, ou outros veículos citadinos em carris [2].

No entanto, a fase de domínio do petróleo está agora condenada, devido à tomada de consciência, por parte dos povos, das enormíssimas desvantagens dos veículos com motorizações convencionais. Esta necessidade de mudança é impulsionada, sobretudo, pela elevada poluição atmosférica, bem como pelas drásticas reduções das reservas petrolíferas mundiais e elevados custos de exploração de petróleo. Desta forma, os veículos com motores tradicionais estão a dar, gradualmente, o seu lugar a veículos híbridos e a veículos totalmente elétricos.

Só nos finais do século XX é que os veículos automóveis híbridos e elétricos começaram a ser encarados com mais seriedade e as ténues tentativas de produzir e comercializar automóveis elétricos principiaram a dar passos gigantescos. Muitas marcas deram início a uma investigação e desenvolvimento sustentado que pudesse alcançar o sucesso. Hoje em dia, veículos automóveis, motas, autocarros, comboios, entre outros tipos de transporte totalmente elétricos, híbridos ou com células de combustível são um dado adquirido. Os veículos híbridos ou totalmente elétricos ganharam um grande impulso em 1997, muito por culpa da marca *Toyota*, com o seu modelo *Prius* [3], um veículo híbrido e, mais tarde, em 2008, com a *Tesla* e o seu *Roadster* [4], totalmente elétrico. Estes foram dois dos exemplos mais marcantes, que mostraram às restantes marcas que era possível apostar em novas formas de motorização com sucesso.

Os bons ventos continuam em 2016, segundo se depreende das notícias e das informações relativamente à venda de automóveis em toda a Europa, onde os números apontam para a venda, a nível europeu, de mais de 50.000 veículos automóveis elétricos, nos primeiros 6 meses do ano, o que representa um crescimento de 11.3% [5]. Os grandes construtores europeus, como a Renault, a VW e a BMW, a par da Nissan e da Tesla, detêm a maior fatia de vendas. Por países, a França e a Noruega, seguidos do Reino Unido, Alemanha e Áustria são os grandes líderes nas aquisições.

Perante todo este crescimento na produção e na aquisição de automóveis elétricos, muitas dúvidas começam a surgir, principalmente no que concerne ao carregamento realizado de forma eficiente e com sucesso, vertente em que se tem trabalhado afincadamente, num passado relativamente recente, para garantir resultados positivos.

1.2. AC vs DC

Os SEE do tipo DC e do tipo AC diferenciam-se pela forma como os eletrões se deslocam num circuito elétrico. Foram fruto de alguma disputa aquando da descoberta da corrente elétrica, no final do século XIX, sendo que estes sistemas têm aplicabilidades diferentes, consoante o que se pretende conseguir.

De forma geral, os dispositivos eletrónicos e todo o tipo de baterias, são compatíveis com uma alimentação do tipo DC.

Apesar de os SEE do tipo AC apresentarem vantagens relacionadas com o transporte de energia elétrica a longas distâncias, devem ser consideradas as vantagens da implementação de SEE do tipo DC, nomeadamente na fase de distribuição da energia aos consumidores domésticos, local onde a maioria dos equipamentos utilizados requerem uma alimentação do tipo DC. O circuito da energia elétrica desde a sua produção até ao seu consumo é o seguinte:

1. A energia é produzida nas centrais elétricas ou locais de produção como barragens, aerogeradores, sistemas fotovoltaicos, centrais termoelétricas, centrais nucleares, etc.;
2. A energia é injetada na rede elétrica, que tem como função fazer o seu transporte;
3. A tensão é reduzida, recorrendo a transformadores, obtendo-se assim os níveis de tensão necessários para a ligação dos aparelhos elétricos e eletrónicos nos locais de consumo;
4. A energia é agora retificada (conversão de AC para DC), para que possa ser utilizada nos eletrodomésticos, maquinaria, aparelhos eletrónicos e armazenada em pilhas e baterias de telemóveis ou outros *gadgets*.

Na Figura 3 podemos observar as várias formas de carregamento de veículos elétricos em SEE do tipo AC.

Este estudo pretende demonstrar o ganho qualitativo e as vantagens da transição para um SEE baseado em DC. Assim, a produção e transporte de energia seriam feitos em AC, sendo seguidamente convertida para DC, eliminando passos intermédios do sistema convencional final, consoante o uso que se pretenda, quer seja para o carregamento de veículos elétricos, para o funcionamento de eletrodomésticos ou de dispositivos de iluminação, entre outros. Dada a incidência crescente do carregamento de veículos elétricos em ambiente residencial, é possível obter uma vantagem significativa pela utilização de SEE do tipo DC, dada a redução significativa no número de etapas de conversão de energia que se encontra associada a esta solução.

É neste momento que os conversores DC-DC desempenham uma função determinante e se revelam de máxima importância para o desenvolvimento de SEE do tipo DC. A capacidade para suportar o fluxo bidirecional de energia é outra das funcionalidades inerentes a diversas topologias de conversores DC-DC. Através da sua bidirecionalidade, é possível estabelecer a ligação entre a rede e o veículo (G2V) e também fazer a ligação entre o veículo e a rede (V2G). Esta funcionalidade (V2G) será estudada ao longo deste trabalho.

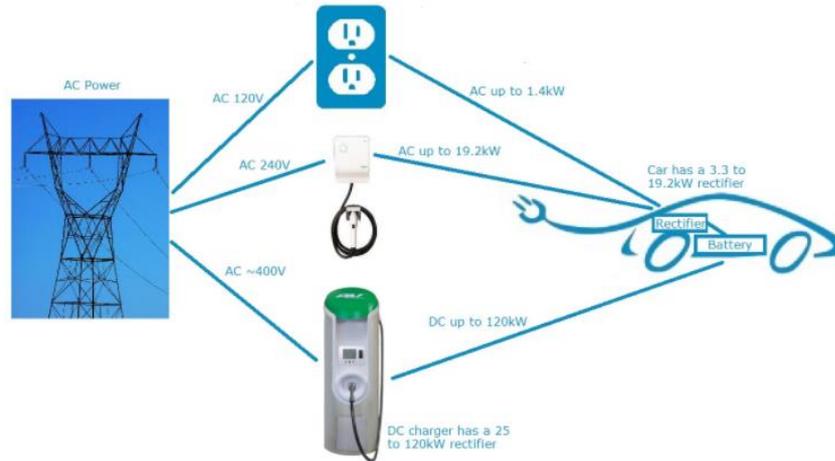


Figura 3 - Diagrama simplificado de um carregamento feito em AC vs DC. Retirado de [6]

Capítulo 2

Estado de arte

O fato de existirem diferentes sistemas de produção, transporte e consumo de energia elétrica, obriga à existência de diferentes tipos de conversores eletrônicos de potência, destinados a elevar ou reduzir, consoante as situações e necessidades, os níveis de tensão ou de corrente, para que a energia possa ser transportada e utilizada sem problemas, com o mínimo de perdas.

Neste trabalho, o estudo da aplicação de conversores DC-DC bidirecionais nos sistemas de carregamento de veículos totalmente elétricos ou híbridos, indicia importantes mais-valias face aos conversores tradicionais. O elevado rendimento e outras vantagens que este tipo de conversor aporta, revela-se como uma opção cada vez mais válida e que interessa ponderar aquando da escolha dos sistemas de carregamento a implementar pelos consumidores domésticos possuidores de veículos automóveis elétricos ou híbridos. A tudo isto, soma-se ainda a possibilidade de estabelecer um fluxo bidirecional de energia, permitindo que os sistemas acumuladores de energia elétrica do veículo possam também injetar uma percentagem de energia elétrica armazenada na rede elétrica.

2.1. Níveis de carregamento

No tocante ao carregamento de veículos elétricos e híbridos, devem ser considerados três níveis de carregamento diferenciados. Esta diferenciação está relacionada com as velocidades de carregamento, o tempo de imobilização dos veículos e as potências disponíveis. Assim, são considerados os seguintes níveis de carregamento: nível 1, nível 2 e nível 3.

O nível 1 corresponde a um tipo de carregamento destinado a ambientes domésticos, em que o carregamento é realizado a uma tensão de 230 V AC. Os carregadores que se enquadram no nível 1 incorporam um conversor monofásico *on-board*, sendo utilizados para o carregamento lento de veículos, em situações de imobilização prolongada, onde o condutor estaciona o veículo na garagem da habitação ao final do dia de trabalho e só retoma a sua utilização na manhã do dia seguinte.

O nível 2 caracteriza-se por potências mais elevadas, sendo realizado a 400 V AC. Pode utilizar conversores *on-board* monofásicos ou trifásicos. Neste nível, o fato de se trabalhar com potências mais elevadas e outro tipo de conversores permite obter velocidades de carregamento mais rápidas do que no carregamento de nível 1. A arquitetura deste sistema é característica de situações em que a imobilização do veículo é de duração média.

Para o nível 3, a tensão disponível é de 600 V AC ou 600 V DC, utilizando exclusivamente conversores *off-board* trifásicos. Este nível de carregamento também é conhecido como *fast*

DC charging [7], [8], sendo a sua utilização destinada a imobilizações de veículos por períodos inferiores a uma hora. Estes sistemas encontram-se instalados em estações de carregamento existentes em locais estrategicamente distribuídos ao longo das vias de comunicação e permitem tempos de carregamento muito curtos, pelo fato de utilizar elevados níveis de potência.

Tabela 1 - Níveis de carregamento [8] (adaptado).

Nível de Carregamento	Localização do conversor	Arquitetura do conversor	Utilização típica	Potência	Tempo do carregamento
Nível 1 - 230 V AC	<i>On-Board</i>	Monofásico	Doméstico ou empresarial	1.4 kW (12 A) 1.9 kW (20 A)	4 - 11 Horas 11 - 36 Horas
Nível 2 - 400 V AC	<i>On-Board</i>	Monofásico ou trifásico	Parques de estacionamento, tanto públicos como privados	4 kW (7 A) 8 kW (32 A) 19.2 kW (80 A)	1 - 4 Horas 2 - 6 Horas 2 - 3 Horas
Nível 3 - 600 V AC ou 600 V DC	<i>Off-Board</i>	Trifásico	Estação de carregamento	50 kW 100 kW	0.4 - 1 Hora 0.2 - 0.5 Hora

Os valores acima apresentados são referentes a sistemas de tensão, corrente e potência baseados em barramentos AC. Ainda assim, é expectável que os valores tensão de um hipotético sistema de carregamento alimentado a partir de um barramento DC não estarão longe dos valores apresentados na tabela. Como é possível verificar em [9], os níveis de tensão DC a adotar num sistema elétrico de energia DC que reúnem maior consenso são 350 V DC e 700 V DC.

2.2. Conversores DC-DC bidirecionais

Os carregadores *on-board* bidirecionais são comumente usados em ambiente residencial, para carregamentos lentos. Por sua vez, os carregadores *off-board* bidirecionais são usados para carregamentos rápidos e aplicações em que se pretenda também o fornecimento de energia, por parte da bateria do veículo, à rede elétrica [7].

Tipicamente, os carregadores bidirecionais AC-DC possuem duas etapas de conversão: numa primeira fase é feita a retificação da energia proveniente da rede elétrica, através de um retificador; na segunda fase é regulado o nível de corrente a fornecer à bateria através de um conversor DC-DC.

Para além da classificação quanto à direção do fluxo de energia, estes conversores podem ainda ser classificados quanto à presença, ou não, de isolamento galvânico.

No funcionamento em modo de carregamento, deve obter-se uma corrente sinusoidal, com a fase bem definida, de forma a controlar a potência ativa e reativa ao longo do carregamento. No funcionamento em modo de descarregamento, a corrente injetada na rede elétrica deve ser novamente sinusoidal. Isto é válido apenas para conversores AC-DC, uma vez que a utilização de conversores DC-DC dispensa o controlo da potência reativa, que não existe em sistemas elétricos de energia do tipo DC.

Um carregador bidirecional suporta fluxo de energia entre a rede e o veículo (G2V), bem como fluxo de energia entre o veículo e a rede (V2G) [10].

2.2.1. Configurações existentes, propriedades e comparações

As diversas topologias de carregadores dos veículos elétricos e híbridos levam a que este estudo considere a análise de algumas das topologias de conversores DC-DC mais comuns [7].

Conversor *Buck-Boost* - Este conversor reúne, num único dispositivo, as características de um conversor *buck* e de um conversor *boost*. Apresenta como vantagem o fato de ser constituído por um reduzido número de componentes. No entanto, apresenta como desvantagens o elevado *ripple* na tensão de entrada e o elevado *stress* elétrico. A Figura 4 apresenta o esquema deste mesmo conversor.

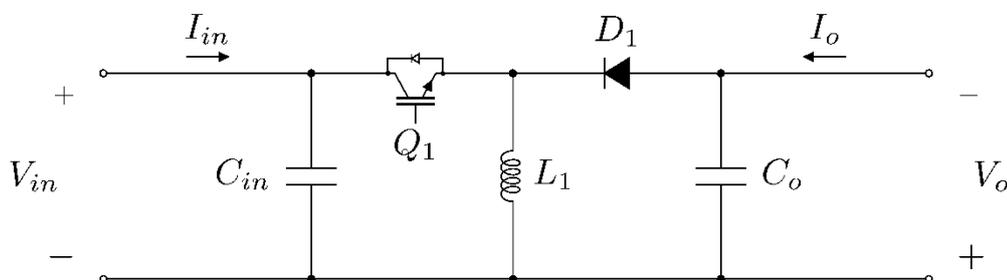


Figura 4 - Conversor Buck-Boost.

Conversor *Half-Bridge Isolado* - Caracteriza-se pelo número reduzido de componentes necessários para a sua conceção, resultando num menor custo de produção e facilidade no controlo. Possui um elevado *stress* ao nível dos componentes e o mesmo número de componentes ativos e passivos que o conversor *buck-boost* de dois quadrantes, contendo apenas uma bobina. Caracteriza-se também pelo elevado rendimento, resultante da reduzida corrente que flui através da bobina, e das reduzidas perdas de comutação associadas a este conversor. No funcionamento em modo *boost*, a condução descontínua à saída do conversor configura-se como uma desvantagem relevante desta topologia. Na Figura 5 é apresentado esse mesmo conversor.

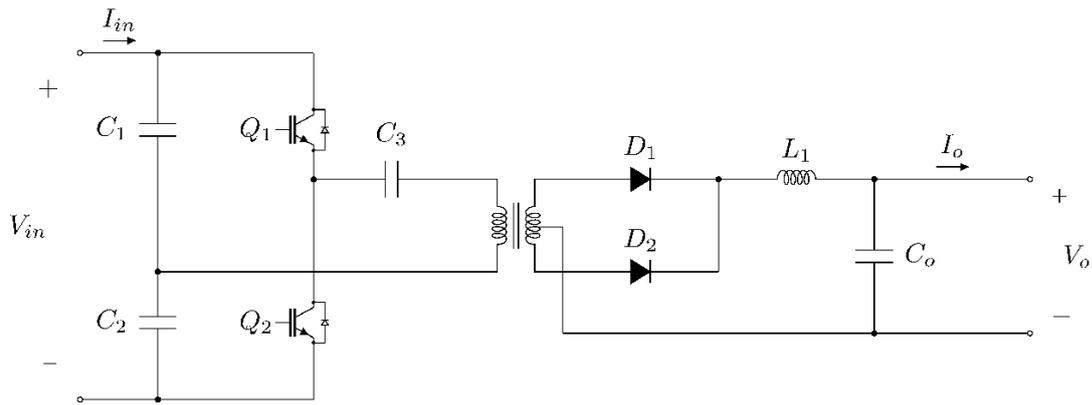


Figura 5 - Conversor Half-Bridge Isolado.

Conversor Full-Bridge Isolado - Esta configuração destaca-se pelo fato de ter mais componentes e entradas PWM na sua constituição. O controle deste conversor apresenta um grau de complexidade significativo e o seu custo é mais elevado, devido à sua complexidade e quantidade de componentes. Por outro lado, tem um menor *stress* com esses componentes, uma elevada taxa de conversão e nível de potência. Na Figura 6 é apresentado o esquema deste conversor.

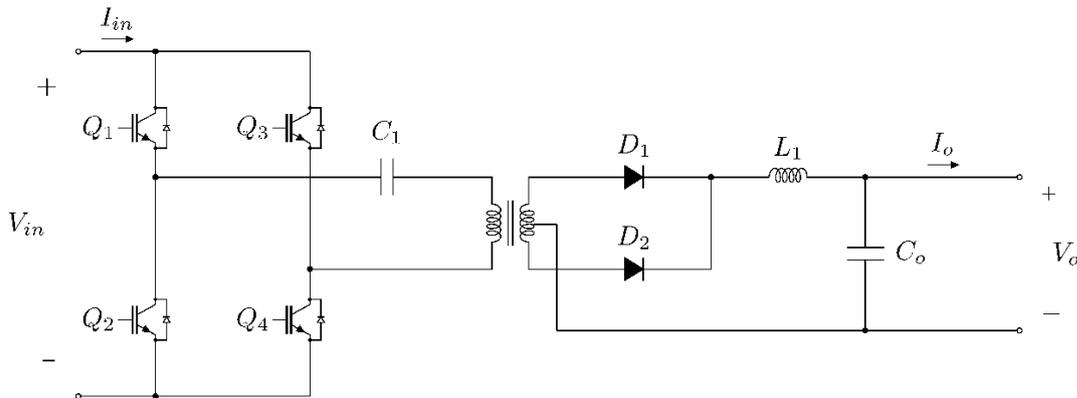


Figura 6 - Conversor Full-Bridge Isolado.

Conversor Multinível - Esta topologia requer um circuito de controle adicional. Em regra, a utilização de componentes adicionais tem o reverso da medalha: o aumento dos custos de produção, com o consequente aumento do custo de venda e uma maior complexidade. Mas tem como vantagens um menor *stress* de trabalho e, conseqüentemente, uma redução de perdas nos componentes. Caracteriza-se ainda pela elevada eficiência, tamanho e frequência de comutação reduzidos. Inclui imunidade a interferência eletromagnética (EMI), um pequeno filtro de baixo custo e componentes de alta frequência. Na Figura 7 encontramos o esquema deste conversor.

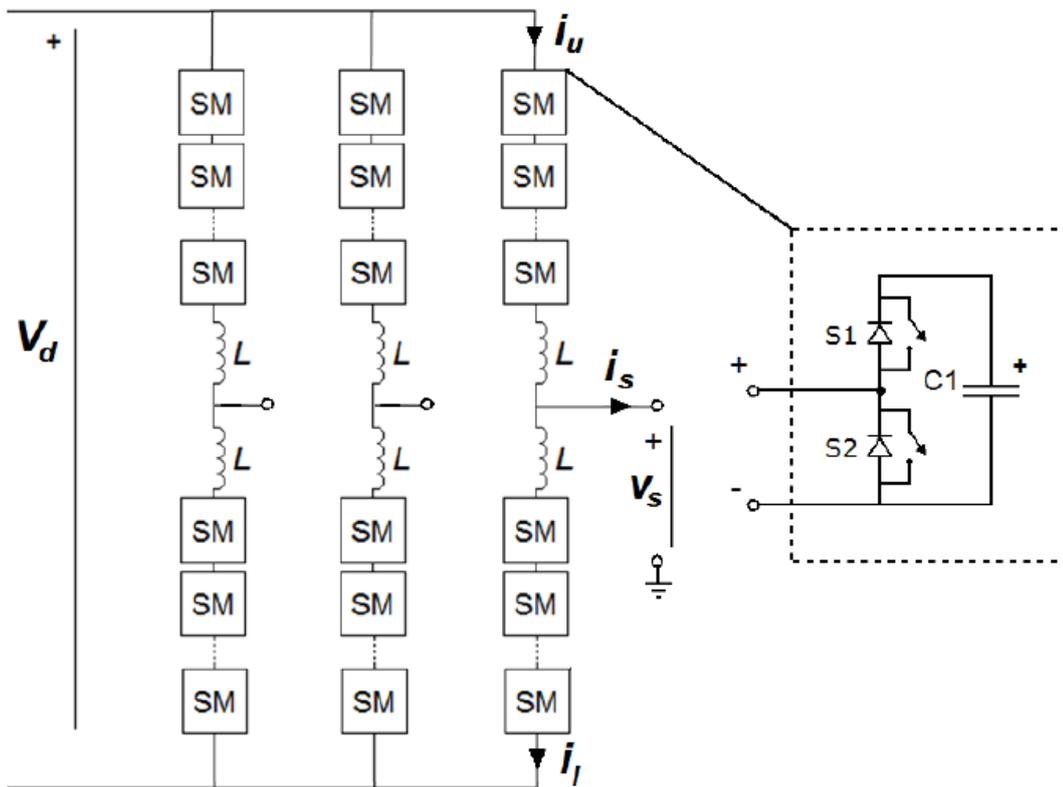


Figura 7 - Conversor Multinível Modular. Retirado de [11]

2.2.2. Métodos para aumentar o desempenho dos conversores

Com base ainda em [7] encontramos métodos para aumentar o desempenho dos conversores:

- *Interleaved*: Redução da corrente de carregamento da bateria, nível de potência limitado;
- *Resonant Circuit*: Perdas e *stress* de comutação reduzidas, elevada eficiência;
- *Zero voltage and current switching*: Tamanho e peso reduzidos;

2.2.3. Algoritmos de controlo

Por fim, ainda em [7], são descritos alguns dos algoritmos de controlo mais comuns que, para além da ação de controlo, ajudam também a melhorar a resposta do conversor:

- O controlo Proporcional Integral (PI) é uma técnica de controlo que junta a ação proporcional e a ação integral, cujo valor de entrada é dado pelo erro da variável a controlar. Num controlador de tensão do tipo PI, o erro da tensão é dado pela diferença entre a tensão de referência V_{ref} e a tensão de saída V_{out} . Na Figura 8 encontra-se um esquema que representa a estrutura típica de um controlador PI.

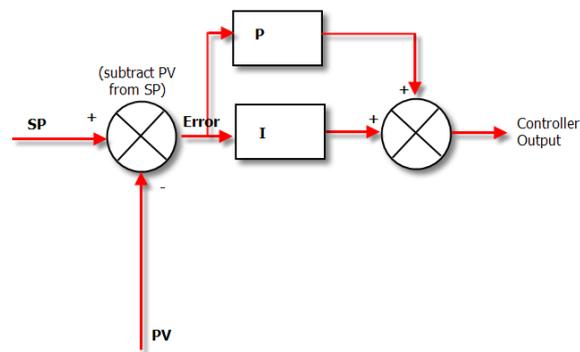


Figura 8 - Controlador PI. Retirado de [12].

- O controlo Proporcional Integral Derivativo (PID) é um controlador cuja base e princípios de funcionamento são iguais aos do controlador PI. A diferença está na ação derivativa, adicionada ao controlador, que faz com que o *overshoot* do controlador seja muito menor, e a sua resposta mais rápida. Na Figura 9 é apresentado um esquema do mesmo.

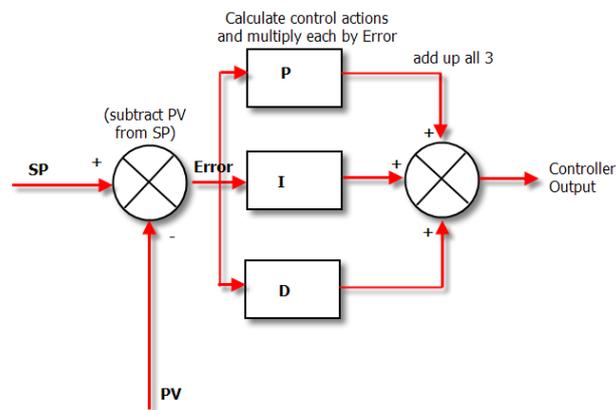


Figura 9 - Controlador PID. Retirado de [12].

- O *Sliding Mode* ou controlo em modo de deslizamento é um método de controlo que afeta o comportamento de um sistema não linear, através da aplicação de sinais de controlo descontínuos. Em conversores eletrónicos de potência, isso implica a utilização de comutação *ON/OFF* como estratégia de controlo. O tempo de permanência em cada um dos níveis (alto e baixo) determina o valor médio aplicado pelo controlador ao sistema a controlar, permitindo assim que o erro do sistema convirja para zero.

- A Lógica *Fuzzy* ou lógica difusa, é uma lógica que funciona numa base de verdade parcial, onde os valores das variáveis lógicas podem assumir qualquer valor compreendido entre 0 e 1, o que vai fazer com que estados anteriormente indetermináveis agora sejam assumidos pelo controlador.

- O controlo através de *Neural Network* assenta na base de inteligência artificial, que foi inspirado nas redes neuronais biológicas que constituem a inteligência animal. Estes sistemas podem possuir processos de aprendizagem, de forma a executarem tarefas de forma autónoma.

2.3. Falhas

Devido a variadíssimos fatores internos e externos aos conversores DC-DC, as falhas bem como as contingências que lhe estão associadas, são algo a que os sistemas elétricos e eletrônicos estarão sempre sujeitos. Compete aos responsáveis técnicos pela sua conceção e desenvolvimento, tal como os responsáveis pela sua manutenção, tomar as medidas necessárias para superar essa problemática, através do uso de dispositivos mais eficientes, ou minimizando-as recorrendo a estratégias de contenção que permitam obter redundância aquando da ocorrência de possíveis falhas.

Sabendo que este tipo de sistemas eletrônicos, destinados a trabalhar com oscilações de potência, se encontram expostos a alguns tipos de falhas ao longo da sua vida útil, importa desenvolver estratégias de antecipação de problemas, implementando sistemas destinados ao diagnóstico de falhas [13], e ainda de estratégias de reconfiguração do sistema caso as falhas sejam efetivamente verificadas [14] - [16].

No que concerne ao diagnóstico de falhas, como é possível constatar em [10], o método de diagnóstico proposto utiliza dados obtidos através da medição da corrente, tensão e potência na carga. A evolução da tensão medida aos terminais dos condensadores posicionados no barramento de saída do conversor multinível é monitorizada, de forma a detetar desequilíbrios resultantes da ocorrência de falhas, o que leva à deteção e localização da falha no sistema. Após essa deteção, o sistema pode prosseguir para a fase da reconfiguração do funcionamento do conversor.

No que diz respeito à reconfiguração dos conversores DC-DC multinível caso se confirme a existência de falhas, existem dois tipos de estratégias. Em [14] e [15], a estratégia de reconfiguração considerada consiste na aplicação de um *bypass* aos módulos defeituosos do conversor. Assim, um conversor que possua 4 a 5 módulos na sua composição, havendo um deles que colapsa devido a uma falha, passa a funcionar com menos um módulo, devido ao isolamento do módulo avariado, sem comprometer, no entanto, o funcionamento e o desempenho do conversor. Já em [13] e [16], onde é utilizado um sistema trifásico, aquilo que acontece no caso de uma situação de falha é que a fase afetada passa a funcionar em circuito aberto, o que significa que o sistema trifásico dá lugar a um sistema bifásico, não comprometendo o seu funcionamento.

2.4. Sistemas de Armazenamento de Energia

Os sistemas de armazenamento de energia são um dos elementos mais sensíveis dos veículos elétricos atuais. É sobre eles que recai grande parte do ônus do sucesso destes veículos, no presente e no futuro. A responsabilidade é de tal ordem, que os sistemas de armazenamento de energia têm sido o foco de um maciço estudo, investigação e desenvolvimento, visando atingir autonomias mais alargadas, maiores rendimentos no tocante aos carregamentos, redução de perdas de energia, e diversificação de sistemas de armazenamento de energia. Estes vão muito para além das baterias, às quais se juntaram as tecnologias de supercondensadores, de volante de inércia, de sistemas híbridos, entre outros. Para além de servirem para armazenar energia, algumas destas tecnologias têm ainda uma função estabilizadora dos sistemas de armazenamento de energia, como um todo.

2.4.1. Baterias

São dispositivos destinados ao armazenamento de energia, cuja existência é anterior ao aparecimento dos veículos automóveis, desempenhando nestes veículos a função de disponibilizar energia para variadíssimas funções. São constituídas por uma ou mais células eletroquímicas, que convertem a energia química armazenada em energia elétrica. A importância deste dispositivo e das suas características (tamanho, peso ou quantidade de energia armazenada e disponibilizada) para o desempenho dos veículos é cada vez maior. Os utilizadores devem ter uma atenção especial relativamente à sua manutenção e outros cuidados a ter para com as baterias, de forma a estender o seu tempo de vida útil. Na Figura 10 é apresentado o esquema equivalente da bateria.

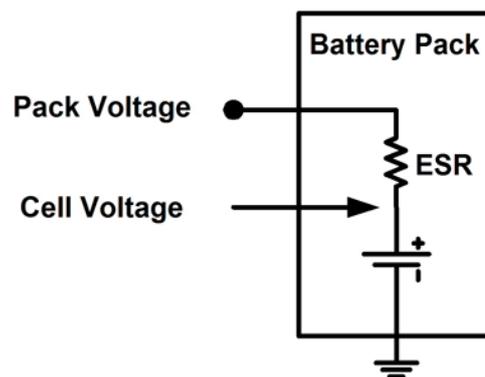


Figura 10 - Esquema equivalente da bateria. Retirado de [17].

Este estudo opta por analisar a bateria de íons de Lítio, visto ser a bateria mais comumente utilizada em veículos elétricos e híbridos, em virtude de ser aquela que apresenta maiores vantagens face às outras tecnologias de baterias disponíveis no mercado. Representam um menor perigo relativamente às agressões ambientais, comparativamente às

baterias de chumbo e não são afetadas pelo efeito de memória, verificado recorrentemente, por exemplo, em baterias de níquel [18].

As baterias de íons de Lítio apresentam algumas características interessantes, que as tornam apetecíveis para aplicação em veículos elétricos [18]:

- 1) Densidade energética: 250-620 Wh/l;
- 2) Energia específica: 100-265 Wh/kg;
- 3) Potência específica: 250-340 W/kg;
- 4) Eficiência na carga/descarga: 80-90 %;
- 5) Taxa de auto-descarga: 8-30 % ao mês;
- 6) Ciclos de carga/descarga: 1000-3000 ciclos;
- 7) Tensão nominal de uma célula: 3.2 - 3.7 V (consoante a topologia da bateria);
- 8) Temperatura admissível: -20 °C até 60 °C.

Tal como qualquer outra tecnologia de armazenamento de energia, as baterias de íons de lítio apresentam vantagens e desvantagens [18], [19]. Do lado das vantagens destacam-se:

- Elevada tensão de cada célula;
- Ausência de eletrólito líquido;
- Altas densidades energéticas e de potência;
- Vários tamanhos e capacidades;
- Dispositivos leves, comparativamente a outras tecnologias;
- Disponibilizam células até 1000 Ah;
- Permitem cargas/descargas rápidas, admitindo também ciclos de descarga profundos;
- A taxa de auto-descarga é baixa;
- Podem alcançar eficiência de carga/descarga superiores a 95%;
- Não possuem efeito de memória;
- O tempo de vida é bastante significativo;
- Permitem a implementação de estratégias de carregamento do tipo *fast charging* (estratégias que disponibilizam potência máxima) até atingir o estado de carga de 80 %.

Por seu turno, apresentam as seguintes desvantagens:

- Resistência interna elevada;
- Preços de produção elevados;
- Instabilidade química do lítio;
- Dificuldades de transporte e de manuseamento;
- Degradação significativa quando sujeitas a altas temperaturas;
- Perda de capacidade após situações de sobrecarga;
- Requerem a existência de circuitos de proteção auxiliares;
- Sensibilidade a danos causados por colisões;

- Dificuldade em determinar o seu estado de carga (SOC);
- Dificuldades na reciclagem em fim da sua vida útil.

Existe ainda pouco conhecimento acerca deste tipo de baterias, pelo que estas representam um fértil campo de estudo.

As baterias são dispositivos que encerram em si algumas fragilidades, que podem ser amplificadas devido a manutenção e manuseamento incorretos, podendo deles resultar os seguintes problemas [19]:

- Sobreaquecimento, motivado pela instalação e utilização de aplicações que exijam descargas demasiado rápidas da bateria podem, em alguns casos, causar situações de sobreaquecimento e, em situações ainda mais críticas, levar à explosão da própria bateria.
- Deposição de lítio nos eléctrodos, resultante do carregamento rápido, que pode levar à acumulação de lítio na forma de metal na superfície do ânodo. Esta acumulação vai ter como consequência a perda irreversível de capacidades da bateria, ou mesmo curto-circuitos internos nos eléctrodos.
- Falhas mecânicas, motivadas pela introdução ou extração de iões de lítio no ânodo e no cátodo. Estas alterações vão ter como resultado o aparecimento do chamado *stress* mecânico no material. Esse *stress* acontece principalmente quando se procede ao carregamento da bateria a uma taxa superior à taxa a que o lítio pode homogeneizar no material ativo por difusão.

Embora as temperaturas admissíveis para as baterias tenham sido consideradas neste estudo, como um dos fatores mais importantes para evitar problemas de sobreaquecimento e de possível explosão, e após a consulta de alguns artigos relativamente a esta matéria [20], concluiu-se que uma correta escolha dos materiais construtivos permite a criação de baterias de iões de lítio menos suscetíveis a possíveis danos resultantes da exposição a elevadas temperaturas ambientes ou de funcionamento. Essa correta escolha permitirá ainda o prolongar da vida útil desses dispositivos para além do expectável, tanto no seu estado de repouso, como em funcionamento.

2.4.2. Supercondensadores

Os supercondensadores são em tudo semelhantes aos condensadores tradicionais, mas superando-os pelo facto de possuírem uma capacitância muito superior às dos condensadores. Os supercondensadores são engenhos destinados a armazenar energia, que se caracterizam pela sua baixa densidade energética, alta densidade de potência e um ciclo de vida excepcionalmente extenso. São compostos por um coletor positivo, seguido de um eléctrodo positivo, um separador, um eléctrodo negativo e, por fim, um coletor negativo [21]. Na Figura 11 é apresentado o esquema do circuito equivalente do supercondensador.

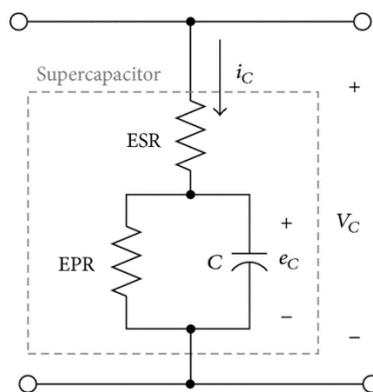


Figura 11 - Esquema equivalente do supercondensador. Retirado de [22].

Esta tecnologia começa a ter, nos dias de hoje, uma importância imensa enquanto sistema de armazenamento de energia aplicado aos veículos elétricos. A maior capacidade para suportar ciclos de carregamento e de descarregamento mais rápidos assume-se como uma mais-valia desta tecnologia, que contribui para uma maior eficiência dos veículos elétricos e para que o sistema não sobrecarregue as baterias.

Existem alguns tipos de supercondensadores, nomeadamente, os condensadores de dupla camada, os pseudocondensadores e os condensadores híbridos. Aqueles que se revelam mais rentáveis (supercondensadores de dupla camada) são também os mais comuns e serão por isso aplicados neste trabalho [21].

A tecnologia de supercondensadores tem como principais vantagens:

- Ausência de emissões de dióxido de carbono;
- Ciclos de carga e descarga mais rápidos do que nas baterias;
- Podem fornecer tensões mais elevadas;
- A tensão aos seus terminais é independente do material utilizado no supercondensador;
- Suportam mais ciclos de carga e descarga do que as baterias;
- Dispõem de potência específica elevada;
- Suportam uma maior gama de temperaturas;
- Possuem baixa resistência interna;

Apesar das enormes vantagens oferecidas por esta tecnologia, existem também algumas desvantagens:

- São mais volumosos que as baterias;
- O armazenamento de energia é feito por curtos períodos de tempo;
- Tem uma reduzida capacidade de armazenamento;
- Nem sempre descarregam na totalidade;
- A sua energia específica é baixa;
- Apresentam uma taxa de auto-descarga elevada.

2.4.3. Volante de Inércia

Os volantes de inércia são dispositivos que têm vindo a desempenhar um papel muito importante nos veículos elétricos e híbridos. São sistemas de armazenamento de energia mecânica baseados na lei da inércia podendo, por isso, ser também chamados de baterias mecânicas. São dispositivos que aproveitam e absorvem a energia mecânica, resultante da rotação de uma massa em torno de um eixo, para produzir energia elétrica. As quantidades de energia armazenadas estão relacionadas com as massas e as geometrias que constituem o elemento rotativo, dependendo ainda da velocidade a que é feita a rotação.

Os volantes de inércia são geralmente compostos por um invólucro com capacidade para criar um ambiente de vácuo, eliminando a resistência do ar ao movimento do elemento rotativo. O elemento rotativo, elaborado em fibra de carbono ou fibra de vidro, é constituído por um rotor e por chumaceiras magnéticas inferiores e superiores. A sua construção pretende que as peças em movimento sofram o mínimo de atrito, para poderem atingir velocidades de funcionamento elevadas e, conseqüentemente, armazenar a maior quantidade de energia mecânica possível [23].

Comparativamente com as baterias, os volantes de inércia têm as seguintes vantagens:

- Tempo útil de vida praticamente infinito;
- Dimensões mais reduzidas;
- Não sofrem efeitos devido às temperaturas extremas;
- Não têm avarias semelhantes às ocorridas em baterias;
- Utilizam apenas materiais inertes;
- Facilidade em determinar a energia armazenada;
- Perdas reduzidas quando em funcionamento ou em *stand-by*;
- Respondem rapidamente a perturbações;
- Eficiente resposta aos aumentos de carga;
- Disponibilizam quantidades elevadas de energia e potência, necessárias para alguns tipos de aplicações;
- Requisitos de manutenção reduzidos.

São apontadas como desvantagens desta tecnologia o armazenamento de energia por curtos períodos de tempo, e os níveis de rendimento limitados, sobretudo nos modelos mais antigos.

2.4.4. Sistemas de armazenamento de energia híbridos (HES)

Os sistemas de armazenamento de energia híbridos, também conhecidos por HES (da sigla inglesa *Hybrid Energy Storage*) combinam, num único sistema, a grande capacidade de armazenamento das baterias, com a capacidade que os supercondensadores têm em

disponibilizar rapidamente a energia. Este sistema surge em resposta a um avanço tecnológico no campo das baterias que não corresponde ao que seria expectável, face às necessidades de eficiência desses dispositivos para o sucesso dos veículos eléctricos junto dos consumidores.

Na Figura 12 é apresentado um esquema de uma topologia híbrida.

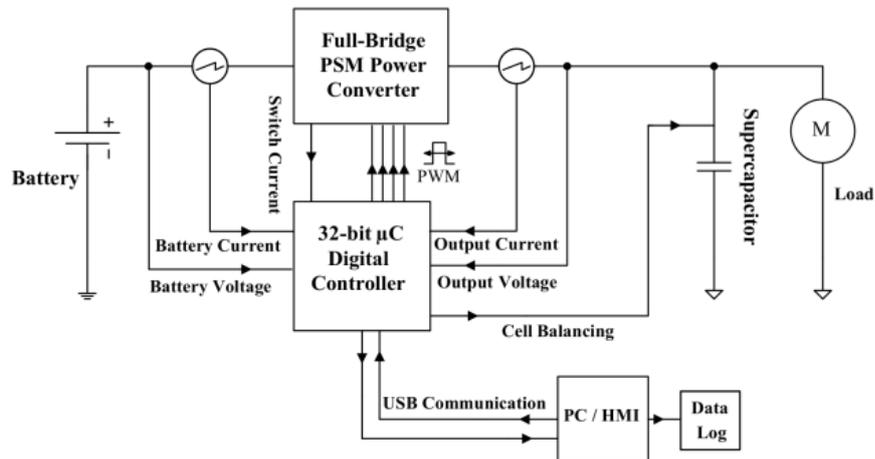


Figura 12 - Topologia de um sistema de armazenamento de energia híbrido [24].

A topologia apresentada em [24] é inspirada pelas séries eléctricas híbridas com *powertrain*. Nestes sistemas, o motor encontra-se desacoplado das rodas. É à bateria que compete o fornecimento de toda a energia necessária ao bom funcionamento do veículo. Por outro lado, na topologia HES proposta em [24], a bateria, tal como acontece nos motores de combustão da série híbrida, é desacoplada da carga, sendo sobre os supercondensadores que recai a responsabilidade de satisfazer as necessidades de carga de todos os sistemas do veículo. Toda a estratégia de controlo está integrada num microcontrolador, responsável pela gestão da energia. Nesta estratégia, a bateria encontra-se programada no sentido de continuamente conseguir fornecer uma corrente constante aos supercondensadores.

2.5. Estratégia de Gestão da Energia (EMS)

Os grandes objetivos que se pretendem atingir com a implementação de estratégias de gestão da energia (EMS, da sigla inglesa *Energy Management Strategy*) passam por garantir uma utilização otimizada da energia existente nos sistemas de armazenamento de energia e, ao mesmo tempo, reduzir os riscos de danos que possam ser infligidos a esses mesmos sistemas. Em virtude de as baterias serem componentes com tempos de vida útil reduzidos, torna-se necessário tomar medidas destinadas à otimização desses tempos, aumentando assim a fiabilidade desses componentes. Este tipo de medidas são de extrema importância para o bom funcionamento dos veículos eléctricos e, por consequência, na redução de custos de utilização, paralelamente aos custos de manutenção.

Entre outras, essas medidas incluem uma correta estimativa do estado da carga (SOC, da sigla inglesa *State of Charge*) dos sistemas de armazenamento de energia e a utilização desse valor para o controlo do carregamento e descarregamento dos mesmos. Outra medida será a adaptação da tensão de alimentação do *powertrain*, recorrendo a conversores DC-DC sempre que se justifique.

Existem duas maneiras de encarar as EMS: através da revisão de baixo nível, ou da revisão de alto nível [25].

A revisão de baixo nível passa pela seleção dos componentes de eletrónica de potência, ou sistemas de armazenamento híbridos discutidos na secção 2.4.4. No processo de seleção das topologias de conversores eletrónicos de potência (DC-DC, AC-AC, DC-AC e AC-DC), é necessário ter em conta diversas questões relacionadas com a conversão e a transferência de energia, controlo da fonte e os componentes de saída do sistema. No caso dos sistemas de armazenamento híbridos, a revisão de baixo nível diz respeito à arquitetura do sistema de transferência de energia, onde as estratégias de controlo de fluxo de energia são importantes.

A revisão de alto nível tem como objetivo atingir os melhores resultados devendo ser utilizado um apertado controlo de supervisão. No sentido de se conseguir otimizar esse controlo, ele pode ser dividido em duas partes: uma parte baseada em regras que partem do conhecimento, da intuição e da experiência humana, com recurso à lógica *Fuzzy*, de forma a obtermos estratégias de nivelamento da carga; uma segunda parte que se divide, por sua vez, em outras duas: uma que assenta numa abordagem de otimização, que sendo global, recorre à programação dinâmica, à programação linear e algoritmos genéticos, entre outros, para conseguir assim minimizar os custos da operação; outra, que funciona em tempo real, utiliza algumas das variáveis do sistema, como por exemplo a função de custo instantâneo. A otimização em tempo real consiste na minimização do consumo de combustível (ECMS), controlo do desacoplamento, entre outras.

2.6. Projetos semelhantes

Ao longo da pesquisa deste trabalho, foram encontrados vários projetos que visam o desenvolvimento de carregadores de veículos elétricos.

O presente estudo diferencia-se desses trabalhos pelo fato de alguns deles se centrarem maioritariamente nos andares de conversão AC-DC, como em [26].

Há também aqueles que acabam por se concentrar em conversores DC-DC para o carregamento de veículos elétricos, como por exemplo em [27], onde é feito um estudo de conversores DC-DC para o carregamento, e ainda os trabalhos [28] e [29], em que se pretende fazer o carregamento do veículo, recorrendo ao conversor DC-DC *Full-Bridge*. Embora a utilização desta topologia conduza a resultados extremamente satisfatórios, o seu grau de complexidade, preço e controlabilidade tornam o conversor DC-DC *Full-Bridge* numa opção

pouco interessante, sobretudo do ponto de vista económico. Para além disso, nem todos os estudos analisados têm em conta mais do que uma tecnologia de armazenamento de energia, ou sequer uma estratégia de gestão de energia.

Assim sendo, este estudo opta por utilizar um conversor DC-DC multinível, uma vez que permite suportar elevados valores de potência e tensão, dois fatores muito importantes para o correto e eficaz carregamento de veículos elétricos. Por outro lado, e uma vez que os sistemas de armazenamento de energia têm associados elevados níveis de tensão aos seus terminais, tem de existir um barramento DC de tensão elevada na habitação. Através da utilização deste conversor, de tamanho reduzido e capaz de suportar altas frequências, é possível atingir ganhos de eficiência e, simultaneamente, otimizar o sistema de armazenamento de energia, ao reduzir as situações de *stress* e de perdas nos seus componentes.

Para controlar este mesmo conversor, vai ser utilizado um controlador PI, que fará o controlo da corrente de carregamento. Pela utilização deste conversor, capaz de suportar tensões elevadas, podemos fazer o correto controlo da corrente, quer nos processos de carregamento, quer nos processos de descarregamento feitos ao nível doméstico.

Utilizar-se-á como base de sistemas de armazenamento de energia as tecnologias de baterias e de supercondensadores, de forma a obter um sistema de armazenamento de energia robusto, eficiente e versátil.

A estratégia de gestão da energia será feita a nível alto, com base em regras. Sendo assim, optou-se por recorrer à lógica *Fuzzy*, dada a sua simplicidade de implementação e boa controlabilidade.

Capítulo 3

Dimensionamento do sistema de carregamento

Este capítulo contém a informação sobre o conversor utilizado, a estratégia de controlo do mesmo, a estratégia de gestão de energia para o carregamento e descarregamento, e estratégia de reconfiguração do conversor, após a ocorrência de falhas. De forma a validar estas estratégias, foram desenvolvidos modelos, a nível de simulação, no *software* MATLAB|*Simulink*.

3.1. Conversor DC-DC Multinível Modular

Nesta dissertação irá ser utilizado um conversor DC-DC multinível modular, devido à sua estrutura modular e características intrínsecas, que tornam esta topologia de conversores DC-DC particularmente interessante para aplicações que tenham a si associados elevados valores de potência e tensão. Com este conversor é também possível reduzir o *stress* resultante da aplicação de tensões elevadas aos terminais dos *Insulated Gate Bipolar Transistors* (IGBTs), bem como as perdas por comutação destes semicondutores, uma vez que é de tamanho reduzido e suporta elevadas frequências, como apresentado no Capítulo 2.

Ao utilizar este conversor, é possível recorrer a uma estratégia de controlo de corrente, que acaba por ser mais importante, uma vez que são utilizados sistemas de armazenamento de energia.

Como se pode constatar em [30], o conversor multinível modular é comparado com um conversor *boost* e um *buck*, ambos com configuração em cascata. Ao analisar em pormenor, consegue-se chegar à conclusão de que o conversor multinível modular é o ideal para este tipo de aplicações, que envolvem fluxo de energia bidirecional e sistemas de armazenamento de energia.

Adaptou-se a topologia selecionada ao sistema de carregamento, como está representado na Figura 13. Este sistema de carregamento é constituído por uma meia-ponte, composta por dois módulos, tendo cada módulo dois semicondutores (S1/S2 e S3/S4). Com esta configuração, é possível implementar múltiplas cargas e fontes no conversor ao mesmo tempo e obter resultados extremamente satisfatórios. Ao utilizar esta topologia modular conseguem-se obter os resultados pretendidos de carregar e descarregar, de forma eficiente, tanto baterias como supercondensadores.

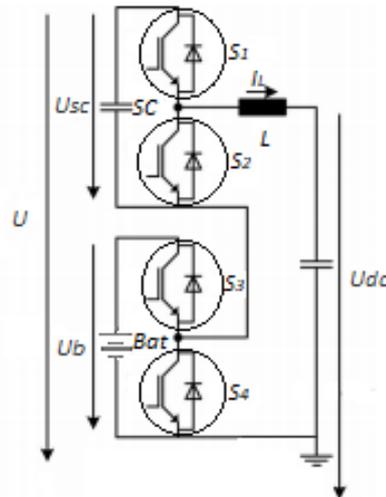


Figura 13 - Conversor DC-DC Multinível. Adaptado de [30].

3.2. Estratégia de controlo

De forma a controlar o conversor (Figura 13), é aplicada uma estratégia de modulação de deslocamento de fase, que consiste na aplicação de um deslocamento de fase de π rad entre cada sinal de controlo. O deslocamento de fase entre cada sinal de controlo dos semicondutores depende do número de módulos que constituem o conversor, e é dado por $2\pi/N$, sendo N o número de módulos do conversor. Esta técnica de deslocamento de fase possui muito mais vantagens do que outras técnicas de modulação disponíveis para implementação [30].

Os conversores de potência requerem, geralmente, estratégias de controlo complexas. Várias estratégias de controlo estão disponíveis, com diferentes graus de complexidade. Para configurações com valores de tensão elevados e níveis de carga elevados, um controlador de corrente simples pode ser aplicado de forma a controlar eficazmente o conversor, com resultados estáveis e razoáveis. Sob estas condições, um controlador PI cujo valor de entrada é dado pelo erro da corrente de saída (dado pela diferença entre I_{ref} e I_{carga}), consegue satisfazer as necessidades pretendidas com sucesso.

O controlador presente em [30] é baseado numa estrutura de controlo constituída por dois *loops*, denominada *outer current loop/inner voltage loop*. No entanto, para efeitos de controlo do conversor utilizado nesta dissertação, a utilização de um simples controlador PI de um único *loop* demonstra ser eficaz e estável.

No processo de dimensionamento do controlador PI, foi utilizada a formulação presente em [20] para calcular os valores de K_p (1) e K_i (2),

$$K_p = \alpha \cdot L \quad (1)$$

$$K_i = \alpha \cdot R_L \quad (2)$$

sendo α o valor de *rising time*, L o valor da indutância do conversor e R_L o valor da resistência parasita da indutância aplicada. O valor de α , que pode variar entre 10 % e 90 %, é estabelecido em 50 %.

É através do controlador PI que vai ser calculado o valor de *Duty Cycle* dos sinais de *Pulse Width Modulation* (PWM) que controlam os semicondutores do conversor. A Figura 14 apresenta o controlador PI implementado na simulação.

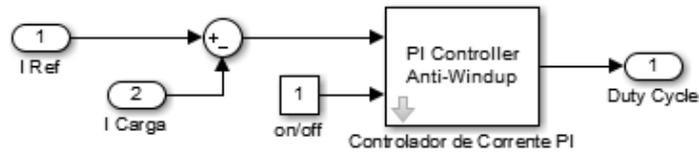


Figura 14 - Controlador PI.

3.3. Estratégia de Gestão de Energia

Tal como referido anteriormente, existem várias estratégias de gestão de energia aplicáveis em sistemas de carregamento de veículos elétricos. Decidiu-se optar pela utilização de lógica *Fuzzy* para a execução desta tarefa, uma vez que a aplicação desta estratégia de gestão é de aplicação bastante fácil, prática e versátil para este tipo de aplicações [31].

O nível de corrente a que é feito o carregamento/descarregamento de cada um dos dispositivos de armazenamento de energia é determinado através da informação sobre o estado de carga dos diferentes sistemas de armazenamento de energia. Desta forma, consegue-se controlar a corrente de carregamento/descarregamento dos sistemas de armazenamento de energia, por forma a obter os valores pretendidos (Figura 15).

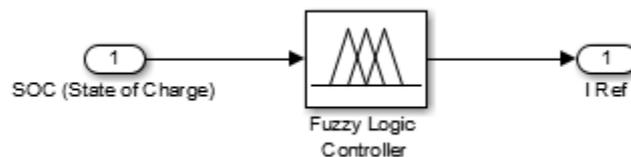


Figura 15 - Controlador Fuzzy.

Como se pretende ter um carregamento otimizado e eficiente para aplicações domésticas, optou-se pelos valores de corrente presentes na Tabela 2, de modo a obter resultados extremamente satisfatórios e fiáveis. Como se trata de um carregamento doméstico, o carregamento envolve níveis de potência relativamente reduzidos (1.4 kW a 1.9 kW), pelo que os valores da corrente de carregamento se situam no máximo a 20 A. Assim, é possível fazer um controlo de todo o sistema em função do estado de carga dos sistemas de

armazenamento. Como se pode observar na Tabela 2, foram projetados três casos para serem aplicados e estudados para a situação de carregamento.

Tabela 2 - Níveis de carregamento aplicados.

Caso	Valor de estado de carga (SOC)	Corrente (I)
1	0 % - 30 %	0 A - 20 A
2	30 % - 75 %	20 A
3	75 % - 100 %	20 A - 0 A

A Figura 16 representa a evolução da corrente no controlador Fuzzy em função do seu estado de carga, definido para a situação de carregamento, da variável de entrada estado de carga ou *state of charge* (SOC) e da variável de saída (I). No primeiro caso, o SOC está compreendido entre 0 % e 30 % e, conseqüentemente, o valor de I varia entre 0 A e 20 A. No segundo caso, onde o valor de SOC está compreendido entre 30 % e 75 %, o valor de I é de 20 A. Por fim, no caso 3, em que o valor de SOC se encontra entre 75 % e 100 %, o valor de I está compreendido entre 20 A e 0 A.

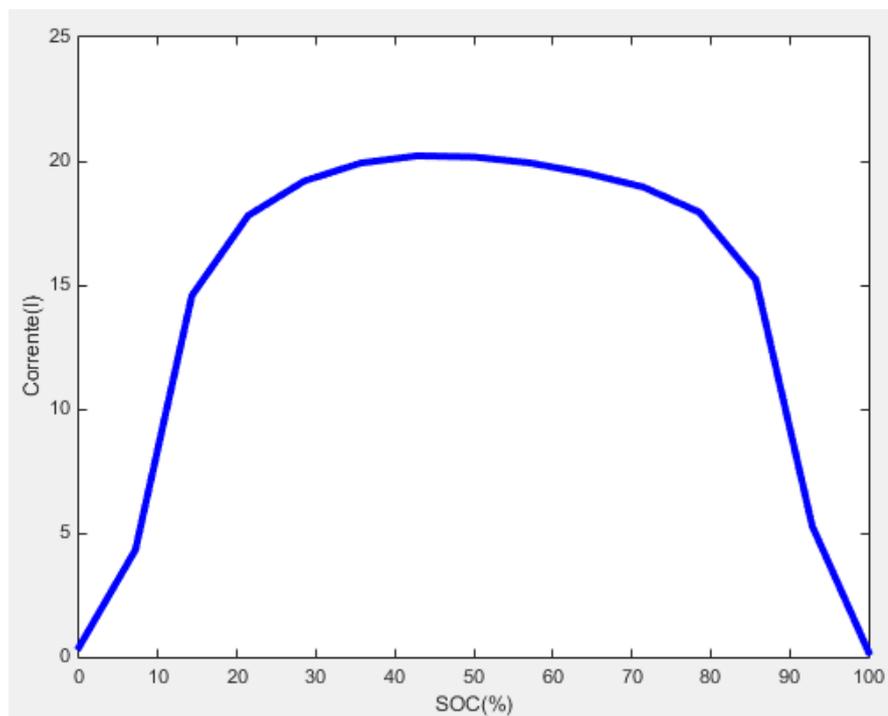


Figura 16 - Evolução da corrente em função do estado de carga para o carregamento.

Foram também projetados três casos para o descarregamento. Os valores de corrente adotados para o descarregamento foram os seguintes, apresentados na Tabela 3:

Tabela 3 - Níveis de descarregamento aplicados.

Caso	Valor de estado de carga (SOC)	Corrente (I)
1	0 % - 50 %	-2 A -> -20 A
2	50 % - 60 %	- 20 A
3	60 % - 100 %	- 20 A -> -2 A

Na Figura 17 observa-se o primeiro caso em que, quando o SOC está compreendido entre 0 % e 50 %, o valor de I varia de -2 A até -20 A. No segundo caso, onde o valor de SOC está compreendido entre 50 % e 60 %, o valor de I correspondente é de 20 A. Por fim, é apresentado o caso 3, quando o valor de SOC se encontra entre 60 % e 100 %, o valor de I é compreendido entre -20 A e -2 A.

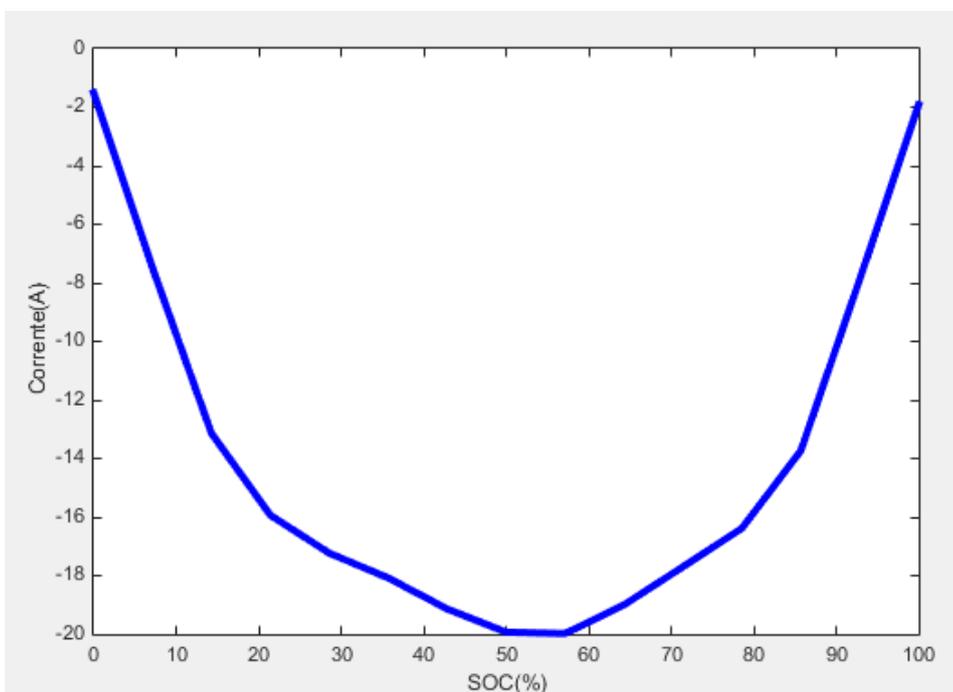


Figura 17 - Evolução da corrente em função do estado de carga para o descarregamento.

É de notar que valores de corrente positivos encontram-se associados a situações de carregamento, enquanto que valores de corrente negativos estão associados a situações de descarregamento.

3.4. Controlo de *Dead Time*

A utilização de conversores bidirecionais para efeitos de controlo de carregamento/descarregamento de sistemas de armazenamento de energia deve obedecer a algumas condicionantes. De forma a realizar a comutação dos IGBTs sem provocar um curto-circuito da fonte, torna-se necessário adotar uma estratégia de *Dead Time*, de forma a criar um atraso no tempo da comutação em que um IGBT passa do estado de condução para o estado de corte, ou vice-versa, como apresentado na Figura 19 e Figura 20.

Para além disso, esta estratégia demonstra ser mais uma forma de controlar o conversor que permite melhorar o seu rendimento. Ao aplicarmos uma estratégia de *Dead Time*, consegue-se também, em alguns casos, realizar o *soft switching*. Com isto, é possível limitar o *offset* DC relativo ao estado de transição. Existem vários tipos de técnicas de *Dead Time* [32], mas foi a técnica apresentada em [33] e na Figura 18, a técnica utilizada e adaptada, devido à sua simplicidade e eficiência. Na Figura 21, é apresentada a estratégia de *Dead Time* implementada. Os resultados da implementação desta estratégia na fase de carregamento são apresentados na Figura 19, enquanto que na Figura 20 são apresentados os resultados obtidos na fase de descarregamento.

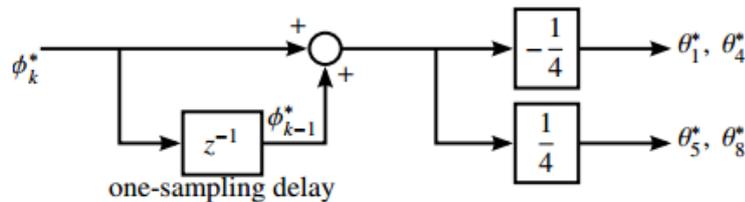


Figura 18 - Estratégia de *Dead Time* [29].

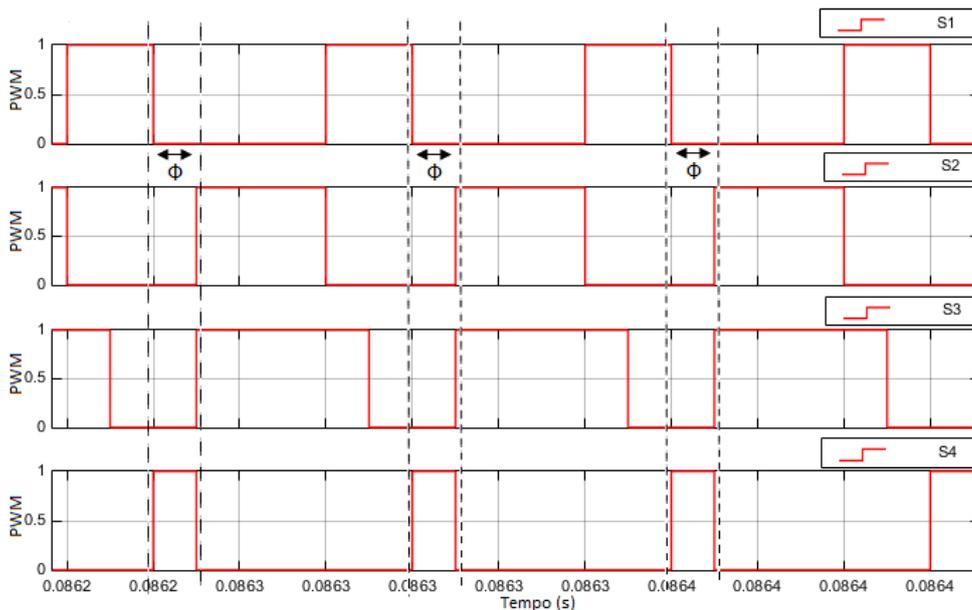


Figura 19 - Fase de carregamento com estratégia de *Dead Time*.

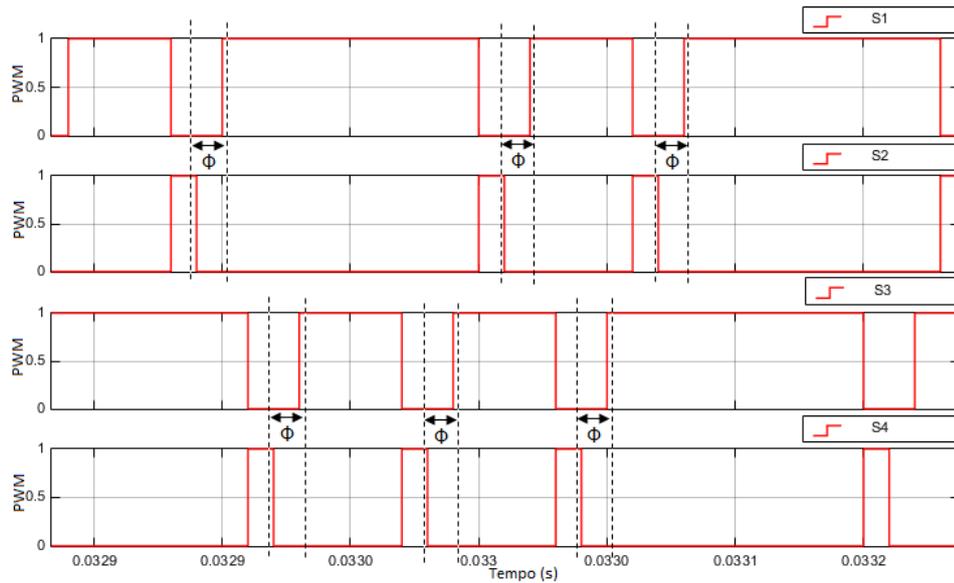


Figura 20 - Fase de descarregamento com estratégia de Dead Time.

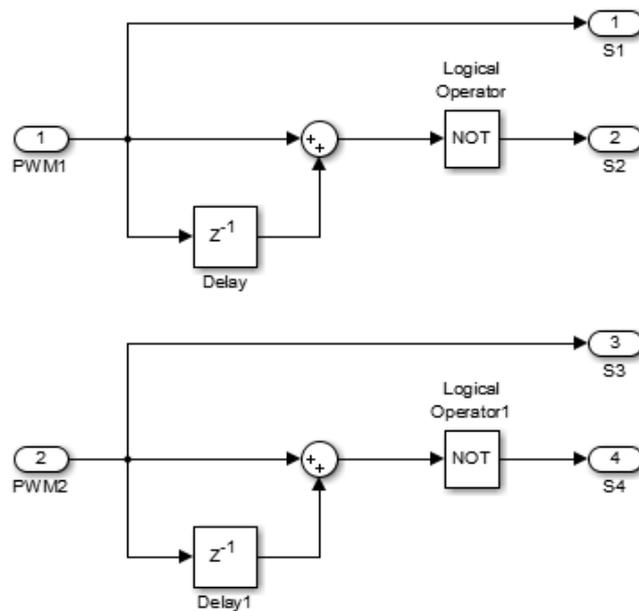


Figura 21 - Estratégia de Dead Time implementada.

3.5. Configuração do Sistema de Armazenamento

Na questão da configuração do sistema de armazenamento de energia, nomeadamente o banco de baterias e supercondensadores, foram feitas pesquisas e cálculos para dimensionar um banco de baterias e um banco de supercondensadores de um veículo elétrico convencional, de forma a testar as situações de carregamento/descarregamento em simulação e, posteriormente, a nível experimental.

3.5.1. Banco de Baterias

No caso do banco de baterias, analisou-se a composição de um banco de baterias presente num *Tesla Model S*. Este banco de baterias é composto por 7104 células de bateria de íões de lítio, distribuídas por 16 módulos [34] que se encontram ligados em série. Cada módulo contém 6 grupos, ligados em série entre si. As 74 células que constituem cada um desses grupos encontram-se ligadas em paralelo [35]-[36].

O conjunto de baterias, que possui uma capacidade de 85 kWh, tem uma tensão nominal de 380 V e uma capacidade de 223 Ah.

Para este trabalho foi dimensionado um conjunto de baterias, com uma capacidade de 85kWh, com uma tensão nominal de 300V e uma capacidade de 283Ah.

3.5.2 Banco de Supercondensadores

A abordagem a ter no caso do banco de supercondensadores já é diferente da abordagem adotada no processo de dimensionamento do banco de baterias. Em [37], observamos um estudo em que a bateria de um carro é totalmente substituída por um conjunto de supercondensadores. Este mesmo estudo foi usado como base para o cálculo e dimensionamento do banco de supercondensadores a ser utilizado nesta dissertação, uma vez que ainda não existem carros elétricos disponíveis comercialmente que funcionem única e exclusivamente com supercondensadores, ou que recorram a sistemas de armazenamento de energia híbridos, compostos por baterias e supercondensadores. Em [37], observa-se que é utilizado como base o modelo *Maxwell PowerCage Ultracapacitor* de 2.7 kF de 2.5 V. Portanto, para obter uma tensão de 400 V aos terminais do banco de supercondensadores, terão de ser ligados 160 supercondensadores em série ($400 \text{ V} / 2.5 \text{ V} = 160$), o que significa que teremos uma capacitância de conversão de 16.875 F ($2700 \text{ F} / 160 = 16.875 \text{ F}$).

No entanto, a tendência aponta para a adoção de sistemas de armazenamento de energia mistos ou híbridos de baterias e supercondensadores, uma vez que suportam os diversos cenários de consumo de energia num veículo elétrico.

Por um lado, há a necessidade, em situações particulares, como por exemplo arranque, ou travagem regenerativa, de possuir um sistema que tenha capacidade para rapidamente carregar e descarregar quantidades significativas de energia sem ficar danificado, como é o caso dos supercondensadores e, por outro lado, ter um sistema que acabe por suportar o resto do funcionamento do veículo, como por exemplo a alimentação dos motores, sendo que esse trabalho fica ao cargo da bateria.

Assim sendo, e tendo em conta o que foi apresentado em 3.5.1., para as baterias, e 3.5.2., para os supercondensadores, o sistema de armazenamento de energia híbrido constituído pelos dois componentes acima dimensionados teria de uma tensão no barramento DC do veículo muito elevada. Optou-se, então, por uma estratégia diferente, sendo que a bateria representaria 80 % da capacidade de armazenamento de energia do veículo (240 V de

tensão nominal e uma capacidade de 178.4 Ah), enquanto que o supercondensador representaria 20 % da capacidade de armazenamento de energia do veículo, com uma tensão de 80 V e uma capacitância de 3.375 F.

Capítulo 4

Resultados de simulação

Neste capítulo é apresentada toda a estrutura implementada na simulação, que foi feita através do *software* MATLAB|Simulink. Os resultados obtidos para as situações de carregamento e de descarregamento.

4.1. Estrutura do circuito

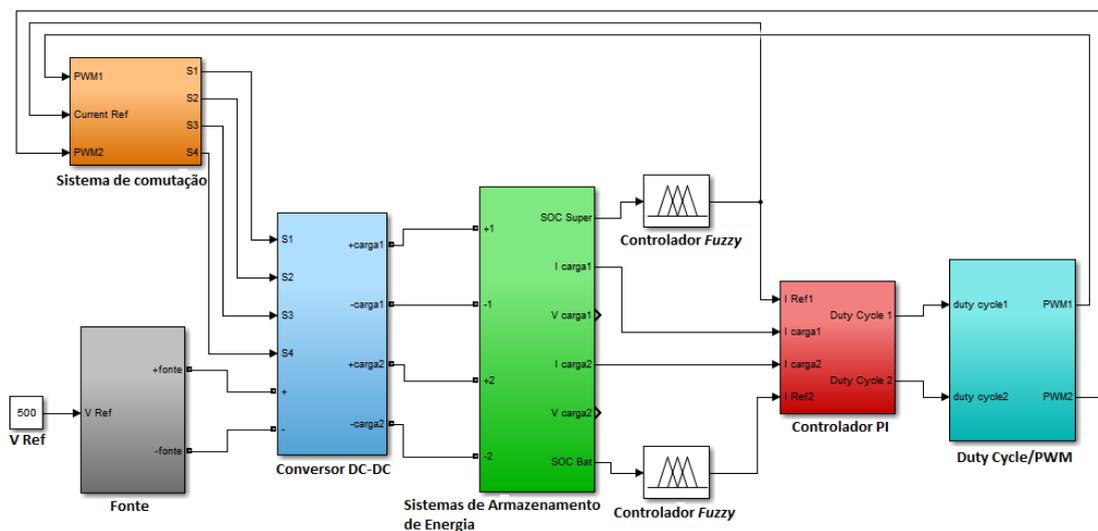


Figura 22- Estrutura do circuito implementado em MATLAB|Simulink.

Na Figura 22 é apresentada a estrutura do circuito de carregamento/descarregamento implementado em ambiente de simulação. O bloco a cinzento representa a fonte de tensão; o bloco laranja o sistema de comutação entre controlo de carregamento/descarregamento, onde é também feito o controlo de *Dead Time*; o bloco azul o conversor DC-DC multinível; o bloco verde contém os sistemas de armazenamento de energia (bateria e supercondensador); o bloco vermelho o controlador PI e, por fim, o bloco azul contém o gerador de PWM.

Serão agora apresentados os resultados da simulação obtidos para o funcionamento do conversor em circunstâncias normais, com diferentes tempos de amostragem e diferentes valores de estado de carga, tanto para carregamento como para o descarregamento.

4.2. Comportamento do circuito em circunstâncias normais

De forma a obter os melhores resultados, são apresentadas as formas de onda da corrente e tensão na carga, e valor de corrente de carregamento/descarregamento produzido pelo controlador *Fuzzy*, considerando janelas temporais de 5 segundos e 3600 segundos (1 hora). O

estado de carga inicial de ambos os sistemas de armazenamento é de 30 % no supercondensador e de 20 % na bateria, para o carregamento; por sua vez, o estado de carga inicial dos sistemas de armazenamento é de 90 % para o supercondensador e de 80% para a bateria, no descarregamento.

4.2.1. Carregamento

Como é possível constatar na Figura 23, o estado de carga do supercondensador é de 100 %, apresentando uma evolução estável ao longo dos 5 segundos em análise estando, por isso, concluído o processo de carregamento do supercondensador. Pela Figura 24, verifica-se que o estado de carga inicial da bateria é de 20 %, apresentando uma ligeira tendência de crescimento.

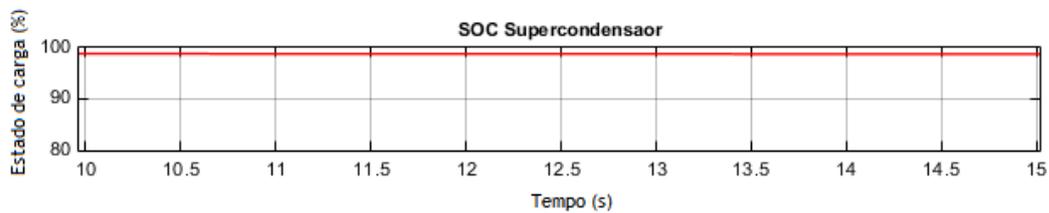


Figura 23 - Estado de carga do Supercondensador numa janela temporal de 5 segundos.

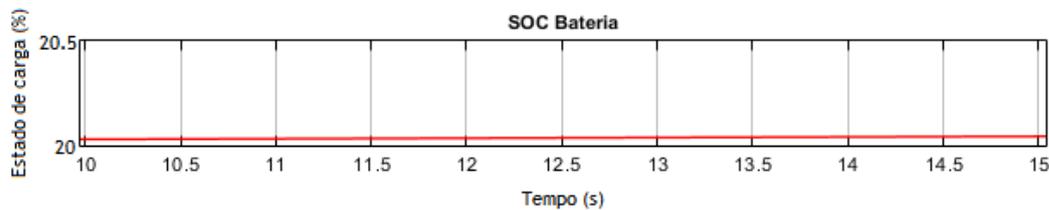


Figura 24 - Estado de carga da Bateria numa janela temporal de 5 segundos.

Na janela temporal de 3600 segundos (Figura 25), o estado de carga inicial do supercondensador é de 30 %. O carregamento é concluído em menos de 100 segundos, pelo que é possível também verificar o fenómeno de auto descarregamento do supercondensador na fase mais avançada do processo. Pela Figura 26, verifica-se que o estado de carga inicial da bateria é de 20 %, apresentando uma tendência de crescimento, acabando por atingir um estado de carga de 30 % após uma hora.

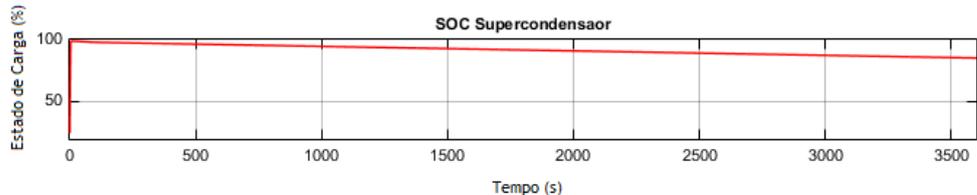


Figura 25 - Estado de Carga do Supercondensador a 30 %.

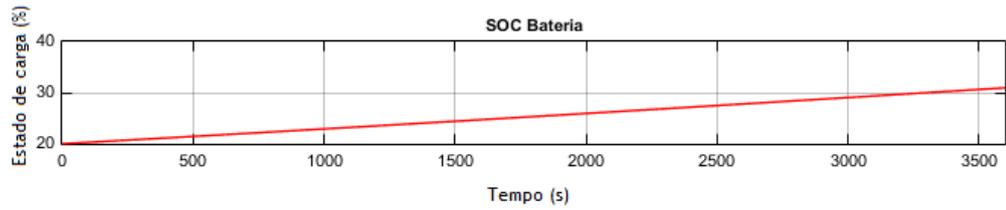


Figura 26 - Estado de Carga da Bateria a 20 %.

Considerando novamente uma janela temporal de 5 segundos, podemos ver que as tensões do supercondensador (Figura 27), e da bateria (Figura 28) se encontram dentro dos valores esperados.

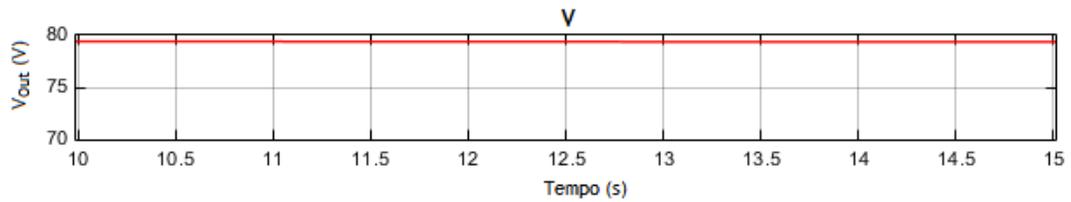


Figura 27 - Nível de tensão do supercondensador numa janela temporal de 5 segundos.

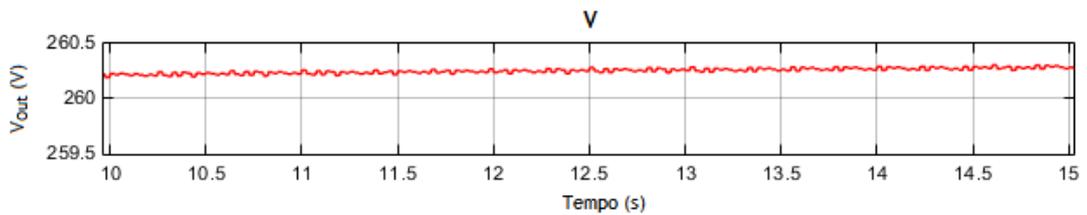


Figura 28 - Nível de tensão da bateria numa janela temporal de 5 segundos.

Analisando agora a forma de onda da tensão para o supercondensador (Figura 29), e para a bateria (Figura 30), é possível verificar e concluir que a tensão do supercondensador começa a baixar ao longo do período de auto descarga, enquanto que a tensão aos terminais da bateria tem um aumento durante este período de tempo.

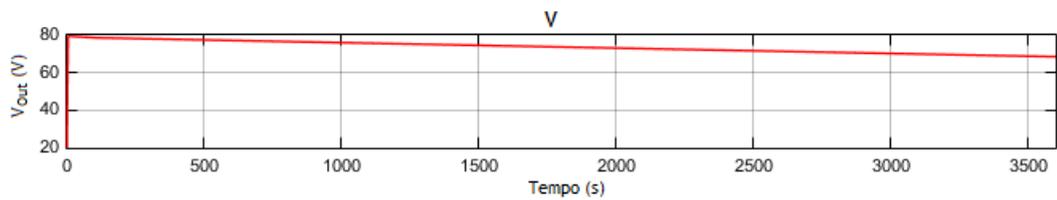


Figura 29 - Nível de tensão do supercondensador.

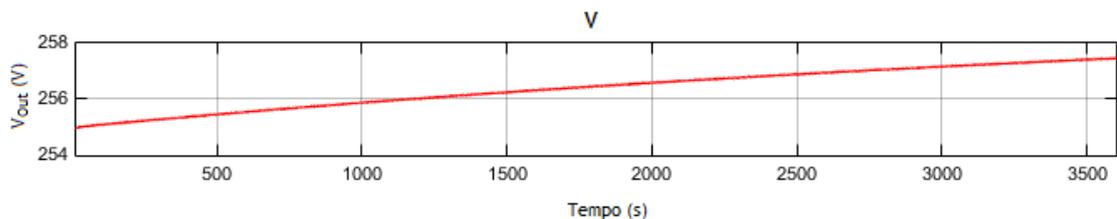


Figura 30 - Nível de tensão na bateria.

A Figura 31 mostra as formas de onda da corrente na carga, para o supercondensador, e na Figura 32, para a bateria, numa janela temporal de 5 segundos. Por sua vez, a Figura 33 e a Figura 34 mostram também as formas de onda da corrente no supercondensador e na bateria, considerando agora uma janela temporal de 3600 segundos.

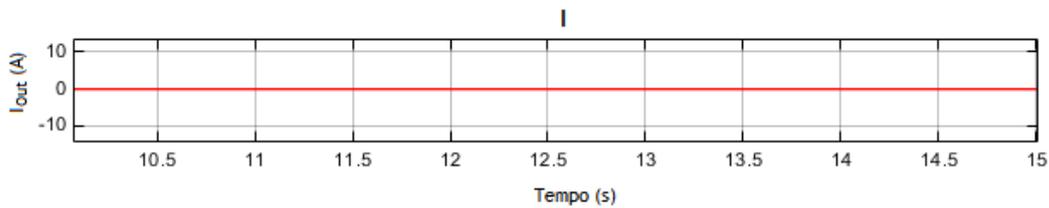


Figura 31 - Corrente na carga do supercondensador numa janela temporal de 5 segundos.

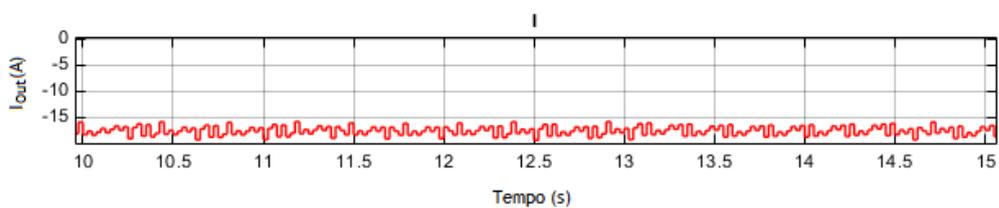


Figura 32 - Corrente na carga da bateria numa janela temporal de 5 segundos.

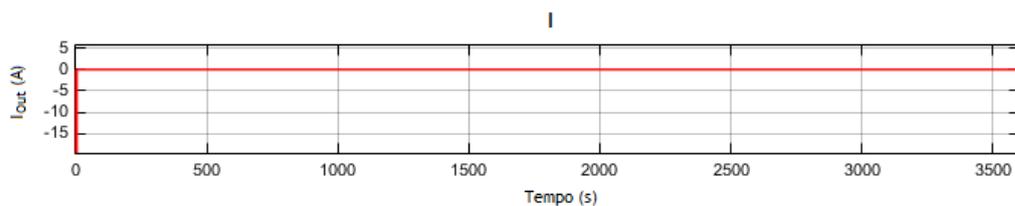


Figura 33 - Corrente na carga do supercondensador.

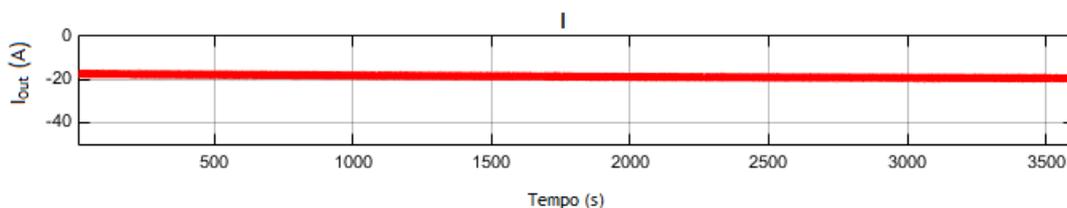


Figura 34 - Corrente na carga da bateria.

Da análise destas figuras, é possível concluir que os níveis de corrente estão dentro dos valores pretendidos e implementados.

Analisando agora as figuras da lógica *Fuzzy* (Figura 35 para o supercondensador, e Figura 36 para a bateria), e comparando estas figuras com as formas de onda da corrente (Figura 31 e Figura 32), é possível observar que a estratégia de controlo e gestão implementada vai de encontro àquilo que era expectável. Os resultados ao fim de uma hora vão ser coincidentes com que foi apresentado no Capítulo 3, secção 3.3.

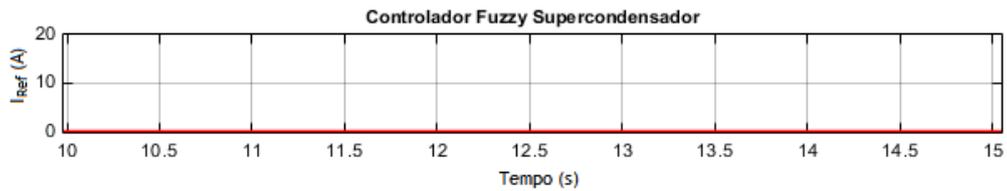


Figura 35 - Controlador Fuzzy para o supercondensador numa janela temporal de 5 segundos.



Figura 36 - Controlador Fuzzy para a bateria numa janela temporal de 5 segundos.

4.2.2. Descarregamento

Com uma janela temporal de 5 segundos, a Figura 37 apresenta o estado de carga do supercondensador, e a Figura 38 apresenta o estado de carga da bateria. Conseguimos observar com mais detalhe o desenvolvimento do estado de carga de cada um dos sistemas de armazenamento de energia.

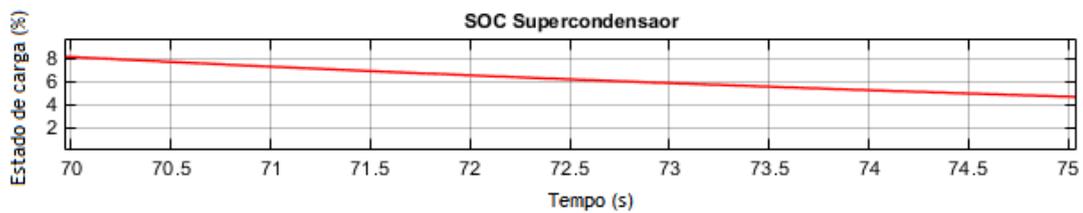


Figura 37 - Estado de Carga do Supercondensador numa janela temporal de 5 segundos.

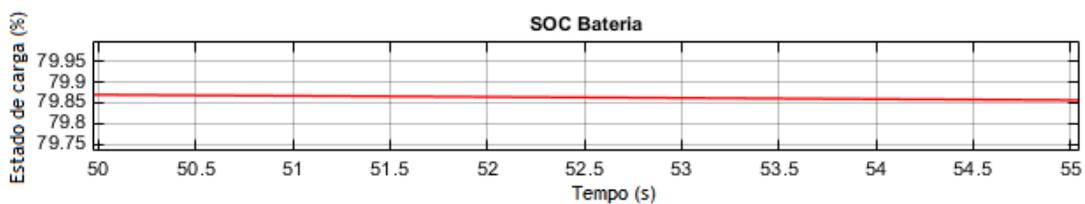


Figura 38 - Estado de Carga da Bateria numa janela temporal de 5 segundos.

Como é possível ver na Figura 39, para o supercondensador, com estado de carga a 90 %, e na Figura 40, para a bateria, em que o estado de carga inicial é de 80 %, conseguimos observar que os sistemas de armazenamento de energia descarregam a ritmos diferentes. O supercondensador completa o processo de descarregamento em cerca de 200 segundos, enquanto que a bateria descarrega perto de 10 %, indo de 80 % para 70 %. A janela temporal considerada é de 3600 segundos.

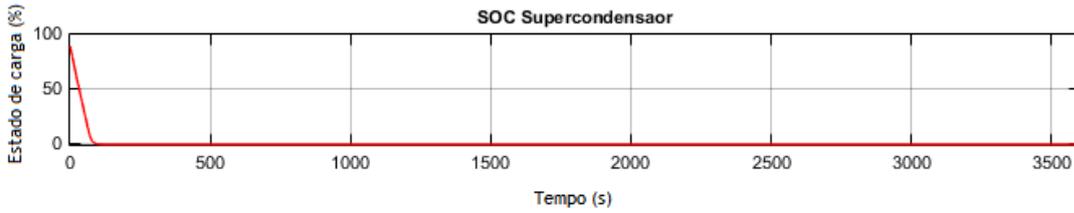


Figura 39 - Evolução do Estado de Carga do Supercondensador com início a 90 %.

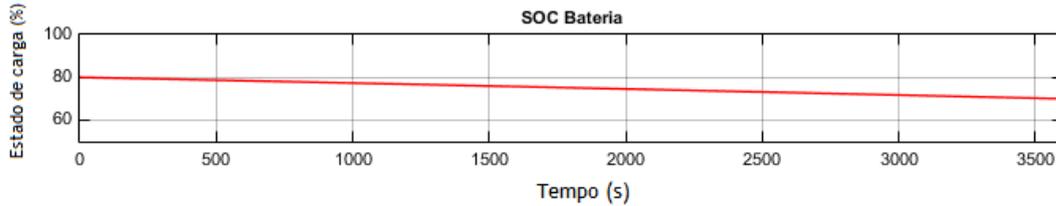


Figura 40 - Evolução do Estado de Carga da Bateria com início a 80 %.

Analisando agora a tensão para o supercondensador (Figura 41 e Figura 43), e para a bateria (Figura 42 e Figura 44), podemos concluir que esta variável se encontra dentro dos valores implementados.

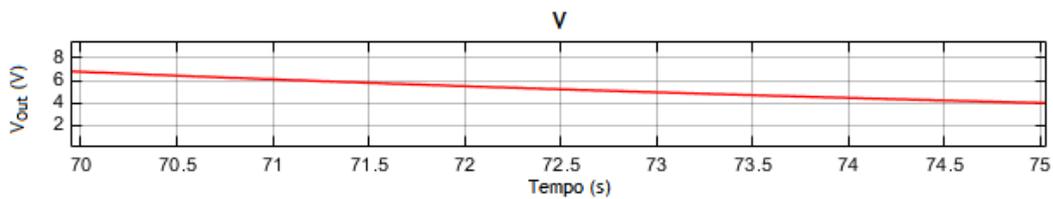


Figura 41 - Tensão na carga do supercondensador para uma janela temporal de 5 segundos.

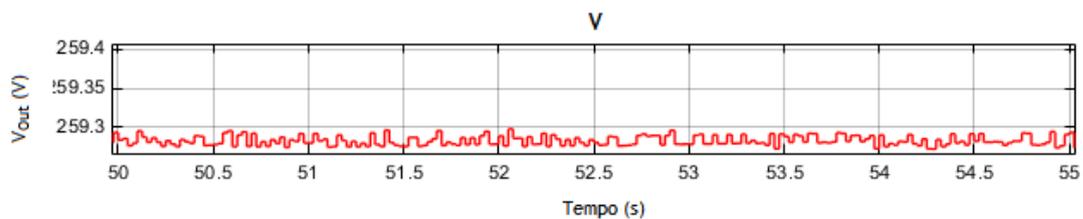


Figura 42 - Tensão na carga da bateria para uma janela temporal de 5 segundos.

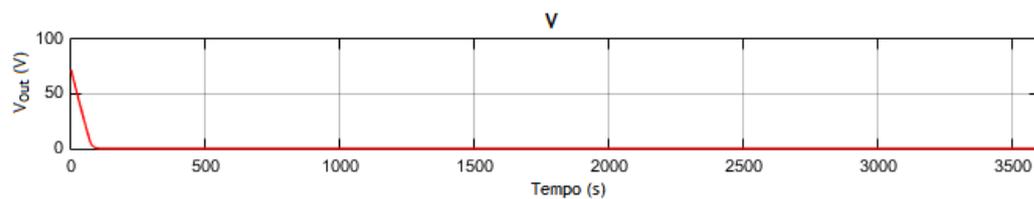


Figura 43 - Tensão na carga do supercondensador.

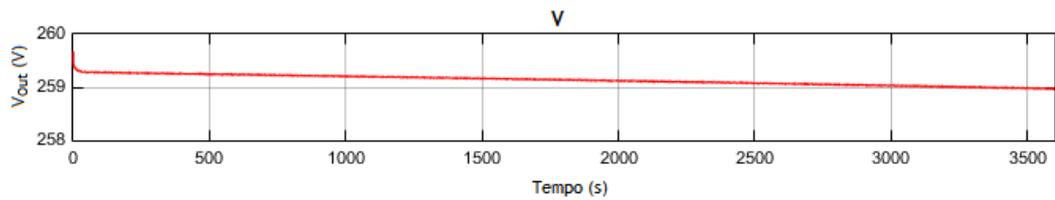


Figura 44 - Tensão na carga da bateria.

A Figura 45 e Figura 47 mostram as formas de onda da corrente na descarga do supercondensador, enquanto a Figura 46 e Figura 48 mostram as formas de onda da corrente de descarga da bateria.

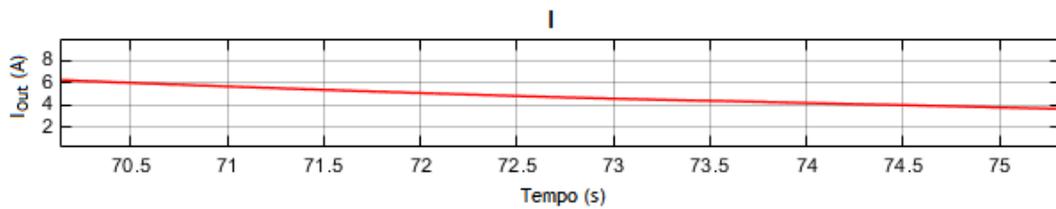


Figura 45 - Níveis de corrente de descarregamento do supercondensador para uma janela temporal de 5 segundos.

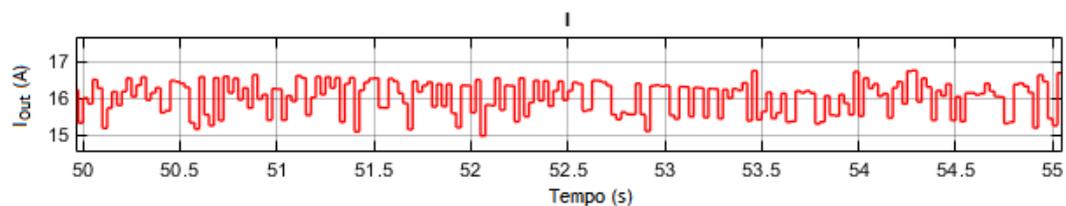


Figura 46 - Níveis de corrente de descarregamento da bateria para uma janela temporal de 5 segundos.

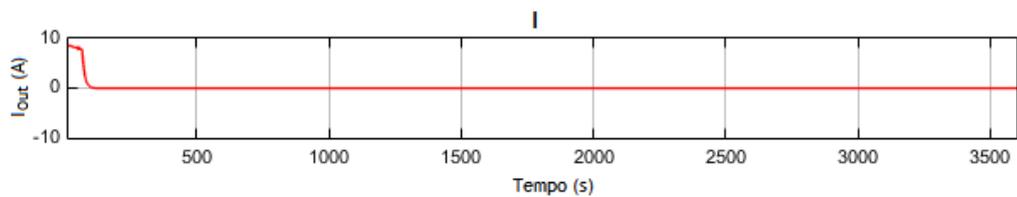


Figura 47 - Níveis de corrente de descarregamento do supercondensador.

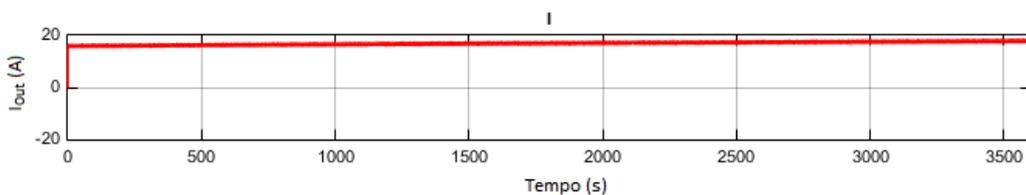


Figura 48 - Níveis de corrente de descarregamento da bateria.

Podemos concluir agora que os níveis de corrente estão dentro dos valores pretendidos. Ao analisar as figuras da lógica Fuzzy (Figura 49 para o supercondensador, e Figura 50 para a bateria), e comparando estas figuras com as imagens da corrente (Figura 45 e Figura 46), é

possível observar que a estratégia de controlo e gestão implementada vai de encontro àquilo que era expectável.

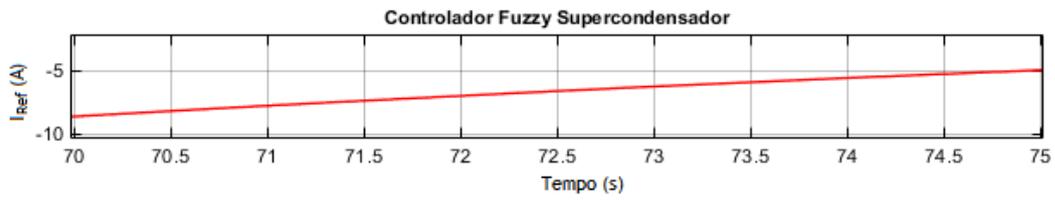


Figura 49 - Controlador Fuzzy para o supercondensador numa janela temporal de 5 segundos.

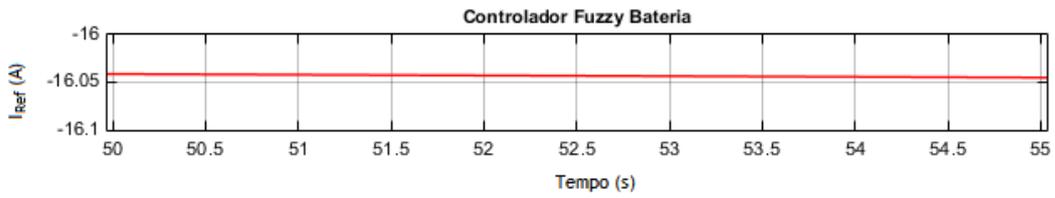


Figura 50 - Controlador Fuzzy para a bateria numa janela temporal de 5 segundos.

Capítulo 5

Resultados experimentais

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a nível experimental, para o carregamento e o descarregamento dos sistemas de armazenamento de energia.

5.1. Comportamento do circuito em circunstâncias normais

São apresentados os resultados obtidos ao nível experimental, das formas de onda da tensão e corrente na carga, e valor de referência da corrente de carregamento/descarregamento, imposto pelo controlador *Fuzzy*. A tensão do barramento DC é de 50 V, sendo o conversor DC-DC composto por dois módulos.

Só é apresentada uma figura para o estado de carga e para o controlador *Fuzzy*, pois foi utilizado o mesmo controlador *Fuzzy* para os dois módulos do conversor. O desempenho da plataforma de desenvolvimento dSPACE é limitado de forma significativa quando se utilizam dois controladores *Fuzzy*.

5.1.1. Para o caso do carregamento

É apresentada na Figura 51 a evolução do valor de referência da corrente, que se encontra à saída do controlador *Fuzzy*.

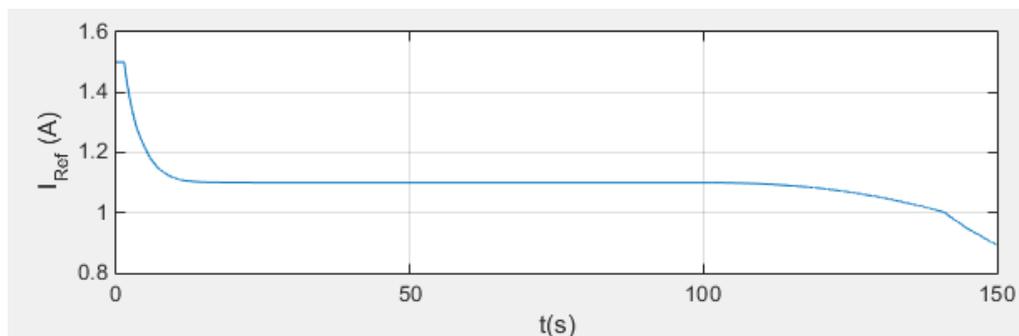


Figura 51 - Resposta do controlador *Fuzzy* para o carregamento.

Analisando a forma de onda da Figura 52 e da Figura 53, para a corrente, é possível verificar e concluir que a corrente de carregamento dos sistemas de armazenamento se encontra em concordância com a forma de onda apresentada na Figura 55.

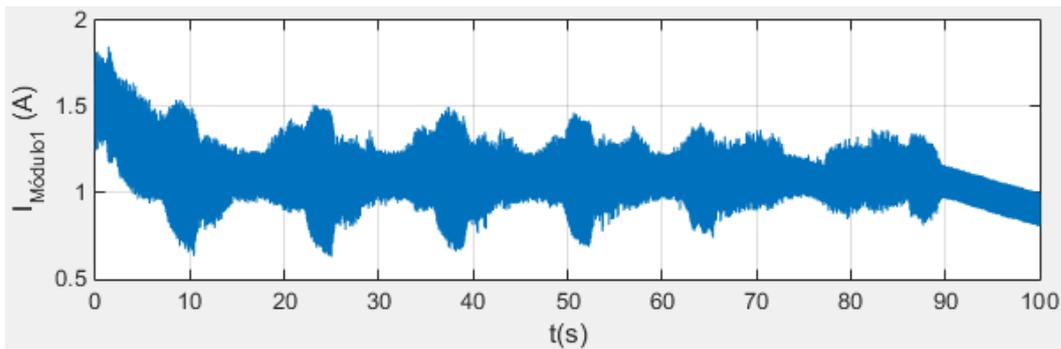


Figura 52 - Comportamento da corrente no primeiro módulo em carregamento.

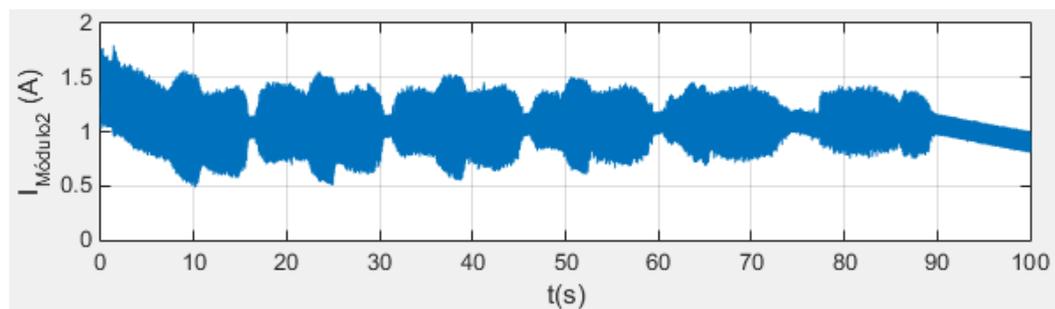


Figura 53 - Comportamento da corrente no segundo módulo em carregamento.

A Figura 54 mostra a forma de onda do estado de carga, estimado em um dos módulos do sistema de armazenamento de energia, e a sua evolução ao longo do período de carregamento.

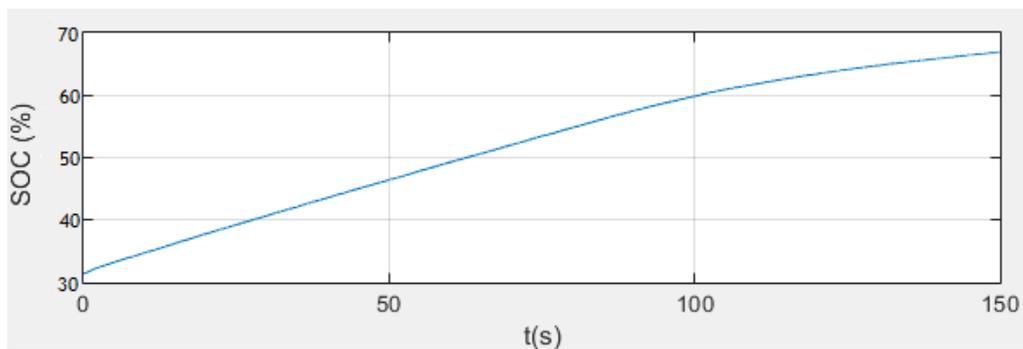


Figura 54 - Evolução do estado de carga ao longo do tempo.

5.1.2. No caso do descarregamento

A Figura 55 apresenta o valor de referência da corrente que se encontra à saída do controlador *Fuzzy*.

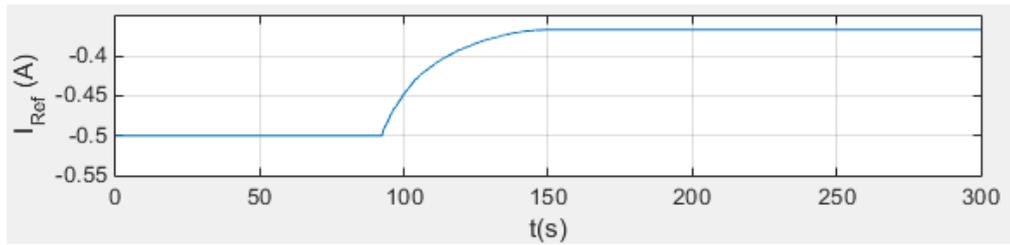


Figura 55 - Resposta do controlador Fuzzy para o descarregamento.

A Figura 56 e a Figura 57 apresentam as formas de onda da corrente na carga.

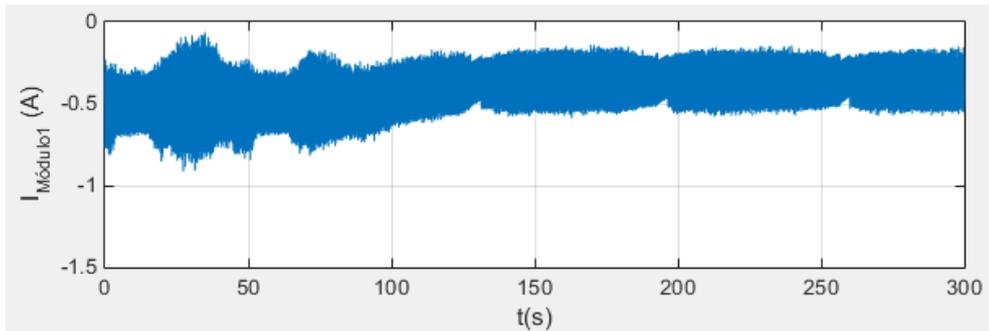


Figura 56 - Comportamento da corrente no primeiro módulo em descarregamento.

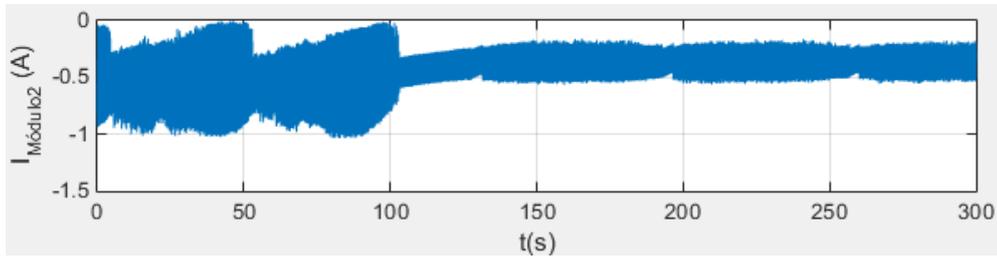


Figura 57 - Comportamento da corrente no segundo módulo em descarregamento.

Podemos concluir agora que os níveis de corrente estão dentro dos valores pretendidos. Ao analisar a figura da lógica Fuzzy (Figura 55), e comparando esta figura com a imagem da corrente (Figura 56 e Figura 57), é possível observar que a estratégia de controlo e gestão implementada vai de encontro àquilo que era expectável.

Analisando agora o estado de carga (Figura 58), podemos concluir que os módulos se encontram em descarregamento.

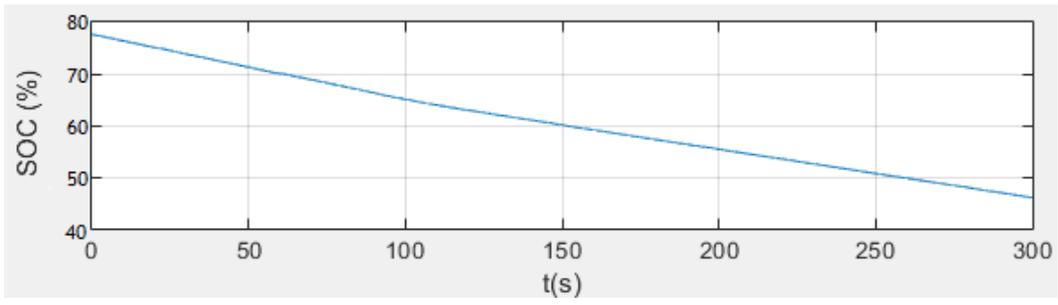


Figura 58 - Evolução do estado de carga ao longo do tempo.

Capítulo 6

Conclusão e sugestões para trabalhos futuros

6.1. Conclusão

A necessidade de inverter o rumo a que o Homem estava a levar o planeta Terra, obriga-o a tomar medidas de contenção e a implementar estratégias de inversão desse rumo destrutivo. É nesse contexto que a utilização de veículos elétricos ganha, a cada dia que passa, uma importância cada vez maior. Aliado a esta importância encontram-se os conversores DC-DC. A qualidade e a eficiência que estes conversores vêm emprestar aos sistemas de carregamento e descarregamento de veículos, são uma mais-valia reconhecida para o sucesso do novo paradigma de deslocação de pessoas e bens que são os veículos elétricos. Os conversores DC-DC, com o ganho que representam a nível industrial e doméstico dão também eles um forte contributo para a erradicação da utilização dos combustíveis fósseis.

As falhas e as consequências que daí advêm serão sempre uma realidade que temos que ter presente nos nossos sistemas elétricos, embora a utilização de conversores DC-DC, representem um ganho de eficiência, temos que ter em conta a utilização destes dispositivos não é imune ao aparecimento de falhas que comprometem o funcionamento do conversor e das cargas que lhe estão associadas. Neste contexto, tão importante como a utilização destes conversores, é vital implementar medidas destinadas a prevenir e a conter estas situações que podem comprometer a eficiência de todo o sistema.

As expectativas iniciais dos ganhos qualitativos que os conversores DC-DC nos podem permitir alcançar, assentavam em indícios já existentes que vieram a ser confirmadas com sucesso pelo nosso estudo, onde as simulações e os testes experimentais realizados deram um contributo decisivo.

6.2. Sugestão para trabalhos futuros

Tendo em conta o trabalho desenvolvido na dissertação e o conhecimento sobre veículos elétricos e o potencial que estes representam, podem ser propostas algumas sugestões para trabalhos futuros nesta área, com um grande potencial de crescimento:

- Aumentar o desempenho da estratégia de gestão e controlo do carregamento/descarregamento, que torne estas tarefas mais autónomas;
- Incorporar mais e outros tipos de sistemas de armazenamento de energia (Flywheel, HES, Fuel Cell).

Bibliografia

- [1] - F. Bento, "Fault Tolerant DC-DC Converters", Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior, Junho 2016.
- [2] - M. Guarnieri, "Looking back to electric cars," *2012 Third IEEE HISTory of ELECTro-technology CONference (HISTELCON)*, Pavia, 2012, pp. 1-6.
- [3] - Toyota Prius - O primeiro carro híbrido. [Online]. Disponível: <https://www.toyota.pt/new-cars/prius/index.json>. [Consultado: 08-Nov-2016].
- [4] - About Tesla | Tesla Europe. [Online]. Disponível: https://www.tesla.com/en_EU/about. [Consultado:08-Nov-2016].
- [5] - 'Electric vehicles in Europe - 2016 | Transport & Environment'. [Online]. Disponível: <https://www.transportenvironment.org/publications/electric-vehicles-europe-2016>. [Consultado: 04-Nov-2016].
- [6] - AC versus DC charging - what is the difference - Plug In America. [Online]. Disponível: <https://pluginamerica.org/ac-versus-dc-charging-what-difference/>. [Consultado: 08-Nov-2016].
- [7] - M. Yilmaz and P. T. Krein, "Review of integrated charging methods for plug-in electric and hybrid vehicles," *2012 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES 2012)*, Istanbul, 2012, pp. 346-351.
- [8] - M. Yilmaz and P. T. Krein, "Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 5, pp. 2151-2169, May 2013.
- [9] - D. Petropoulos, L. Mackay, L. Ramirez-Elizondo, M. Popov and P. Bauer, "Transient analysis of DC distribution grids," *2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, Nuremberg, 2017, pp. 316-321.
- [10] - Jiang, Jiuchun, Yan Bao, and Le Yi Wang. "Topology of a bidirectional converter for energy interaction between electric vehicles and the grid." *Energies* 7.8 (2014): 4858-4894.
- [11] - A three-phase modular multilevel converter and the schematic diagram of. [Online]. Disponível: https://www.researchgate.net/figure/261419844_fig1_Figure-1-A-three-phase-modular-multilevel-converter-and-the-schematic-diagram-of-a. [Consultado: 24-Nov-2016].
- [12] - O Controle PID de Forma Simples e Descomplicada. [Online]. Disponível: Retirado de <https://www.citisystems.com.br/controle-pid/>. [Consultado: 25-Nov-2016].
- [13] - E. Ribeiro, A. J. M. Cardoso and C. Boccaletti, "Fault-Tolerant Strategy for a Photovoltaic DC-DC Converter," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 6, pp. 3008-3018, June 2013.
- [14] - F. H. Khan and L. M. Tolbert, "Multiple Load-Source Integration in a Multilevel Modular Capacitor Clamped DC-DC Converter Featuring Fault Tolerant Capability," *Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Anaheim, CA, USA, 2007, pp. 361-367.

- [15] - Khan, F. H., and L. M. Tolbert, "Bi-directional power management and fault tolerant feature in a 5-kW multilevel dc-dc converter with modular architecture." *IET Power Electronics* 2.5 (2009): 595-604.
- [16] - M. Gleissner and M. M. Bakran, "Design and Control of Fault-Tolerant Nonisolated Multiphase Multilevel DC-DC Converters for Automotive Power Systems," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 2, pp. 1785-1795, March-April 2016.
- [17] - Fundamentals of battery charging: Part 1 - Electronic Products. [Online]. Disponível: https://www.electronicproducts.com/Power_Products/Batteries_and_Fuel_Cells/Fundamentals_of_battery_charging_Part_1.aspx. [Consultado: 28-Nov-2016].
- [18] - Divya, K. C., and Jacob Østergaard, "Battery energy storage technology for power systems—An overview." *Electric Power Systems Research* 79.4 (2009): 511-520.
- [19]- Chester Simpson, "Characteristics of rechargeable batteries", [Consultado: 28-Nov-2016]. [Online]. Disponível: <http://www.ti.com/lit/an/snva533/snva533.pdf>.
- [20] - Broussely, M., et al. "Main aging mechanisms in Li ion batteries." *Journal of Power Sources* 146.1 (2005): 90-96.
- [21] - González, Ander, et al. "Review on supercapacitors: technologies and materials." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58 (2016): 1189-1206.
- [22] - Equivalent circuit of a supercapacitor. [Online]. Disponível: https://www.researchgate.net/figure/283954451_fig2_Equivalent-circuit-of-a-supercapacitor. [Consultado: 28-Nov-2016].
- [23] - R. Peña-Alzola, R. Sebastián, J. Quesada and A. Colmenar, "Review of flywheel based energy storage systems," *2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Malaga, 2011, pp. 1-6.
- [24] - Parvini, Yasha. *Modeling, hybridization, and optimal charging of electrical energy storage systems*. Diss. Clemson University, 2016.
- [25] - Tie, Siang Fui, and Chee Wei Tan, "A review of energy sources and energy management system in electric vehicles." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20 (2013): 82-102.
- [26] - J. Sousa, "Sistema bidirecional de carga de baterias para o FEUP VEC", Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Julho de 2013.
- [27] - Al Sakka, Monzer, Joeri Van Mierlo, and Hamid Gualous, "DC/DC converters for electric vehicles" *Electric Vehicles-Modelling and Simulations*. InTech, 2011.
- [28] - Mayer, Robson, Adriano Péres, and Sérgio Vidal Garcia Oliveira, "Conversor cc-cc multifásico bidirecional em corrente não isolado aplicado a sistemas elétricos de tração de veículos elétricos e híbridos." *Blumenau, SC, Brasil* (2014).
- [29] - Wan, Hongmei. "High efficiency DC-DC converter for EV battery charger using hybrid resonant and PWM technique." (2012).
- [30] - D. Montesinos-Miracle, M. Massot-Campos, J. Bergas-Jane, S. Galceran-Arellano and A. Rufer, "Design and Control of a Modular Multilevel DC/DC Converter for Regenerative Applications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 8, pp. 3970-3979, Aug. 2013.

- [31] - A. A. Ferreira, J. A. Pomilio, G. Spiazzi and L. de Araujo Silva, "Energy Management Fuzzy Logic Supervisory for Electric Vehicle Power Supplies System," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 1, pp. 107-115, Jan. 2008.
- [32] - J. S. Yu, G. Jin, S. L. Cheng and W. T. Ng, "Digital dead-time control for an integrated tri-mode buck-boost DC-DC converter," *2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)*, Seoul, 2015, pp. 1768-1771.
- [33] - K. Takagi and H. Fujita, "Dynamic control and dead-time compensation method of an isolated dual-active-bridge DC-DC converter," *2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*, Geneva, 2015, pp. 1-10.
- [34] - Model S Fire | Tesla Europe. [Online]. Disponível: https://www.tesla.com/en_EU/blog/model-s-fire?redirect=no. [Consultado: 02-Mar-2017]
- [35] - Straubel, Jeffrey, et al. "Method and apparatus for mounting, cooling, connecting and protecting batteries." U.S. Patent Application No. 11/129,118.
- [36] - Rawlinson, Peter Dore. "Vehicle battery pack ballistic shield." U.S. Patent No. 8,286,743. 16 Oct. 2012.
- [37] - Advanced electric vehicle conversion project - Battery management system. [Online]. Disponível: http://www.metricmind.com/ac_honda/ultracaps.htm. [Consultado: 02-Mar-2017]