

Análise Comparativa do Desempenho de Conversores DC-DC Aplicados ao Carregamento de Veículos Elétricos

Yolanda Vicente Sampaio

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

Orientador: Prof. Doutor António João Marques Cardoso

outubro de 2021

Dedicatória

Dedico esta dissertação em especial à minha mãe, Kanguiandala Joana Vicente, por todo o apoio incondicional, por estar sempre disponível e me fornecer todo o amor, e ao meu pai, Manuel José Sampaio, por me incentivar continuamente a dar o melhor de mim.

Dedico também esta dissertação aos meus irmãos Elizabeth, Desimond e Emanuela, por confiarem em mim e por sempre se orgulharem e me incentivarem.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus Pai todo o Poderoso pela saúde, pela sabedoria concedida, pela força para conseguir ultrapassar todos os obstáculos que a vida apresentou até aqui, por não desistir de mim em todas as vezes em que pensei fazê-lo e, mais que tudo, pela minha família.

Em segundo lugar, quero muito agradecer à minha querida mãe, por todo o apoio emocional e por ter estado sempre presente, mesmo que distante, em todas as fases mais difíceis, pela grande força que sempre me dá, por estar sempre a torcer por mim e sempre confiar em mim. Ao meu pai, por todo o apoio e pela força que me dá. Aos meus irmãos, por confiarem em mim, por me apoiarem, por contarem sempre comigo, e por se orgulharem.

Quero também agradecer, de coração, ao meu tio Fernando Garcia Miala, pelo apoio constante e por toda a ajuda que forneceu ao longo da minha formação académica. Aos meus restantes familiares, em especial os meus primos, Petra, Elizabeth e ao Anderson, e aos meus tios, Fátima, João e Maria Manuel, o meu agradecimento pelo amor que me dão e por todo o pensamento positivo que me transmitem.

Agradeço também a todos os meus amigos por todo o apoio e por estarem sempre presentes, nomeadamente a Irene, Cleusia, Aline, Marinela, Ayosvani, Elisa, Isabel, Criz, Patrícia, Jorcénio, e em especial o Wagner, por ter sido sempre o meu grande companheiro nesta batalha vencida.

Quero igualmente expressar profundo agradecimento ao Professor Doutor António João Marques Cardoso pela orientação, total apoio, disponibilidade, pelo conhecimento transmitido, pelas opiniões e críticas, por todas as palavras de incentivo e por ter proporcionado um excelente espaço de trabalho, com recursos laboratoriais de vanguarda disponíveis no CISE | LSE (Laboratório de Sistemas Electromecatrónicos do CISE). Por fim, quero agradecer a todos os professores do meu curso, pois tiveram um papel crucial para a finalização desta etapa e por providenciarem todos os ensinamentos prestados, especialmente os Professores Davide Fonseca, Sílvio Mariano, António Pinheiro e Paula Prata; foi um grande prazer poder trabalhar com vocês. Sem esquecer de agradecer o querido e atencioso Fernando Bento, que foi quem me guiou nesta última fase. Obrigada por toda a atenção e paciência que teve e por todo o apoio prestado.

Agradeço a todos, de coração, e desejo-vos muita saúde e sucessos nos vossos caminhos.

Resumo

O impacto ambiental da infraestrutura de transporte e o aumento do preço dos combustíveis despertaram o interesse em fontes de energias alternativas, menos poluentes e mais baratas. As preocupações com o elevado consumo de combustíveis fósseis e a crescente poluição atmosférica conduziram ao desenvolvimento dos veículos elétricos, híbridos e *plug-in*, mais eficientes e sustentáveis do ponto de vista ambiental.

A energia elétrica consumida por estes veículos pode ser gerada por fontes de energia renováveis, que apresentam menor impacto ambiental. No actual contexto, em que a implementação de micro-redes DC assume uma posição de interesse crescente, importa responder a um conjunto de requisitos técnicos de relevo. Mais concretamente, 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. Em micro-redes DC, os conversores DC-DC de alta potência consideram-se elementos-chave para o carregamento/descarregamento dos VEs.

Neste trabalho, duas topologias de conversores DC-DC são aplicadas ao carregamento/descarregamento de VEs, para um estudo comparativo que pretende avaliar o desempenho de cada topologia de conversor, por meio da variação de parâmetros como a potência de carregamento, a tensão de entrada, a frequência de comutação, entre outros.

Os resultados obtidos a partir de uma simulação coordenada no programa Matlab|Simulink permitiram demonstrar o bom funcionamento de dois sistemas propostos. As conclusões retiradas do estudo comparativo são suportadas através de resultados experimentais.

Palavras-chave

Veículos Elétricos; Conversores DC-DC; Conversores Entrelaçados; Conversores Multinível; Rendimento.

Abstract

The environmental impact of the transportation infrastructure, along with the increment on the price of fossil fuels, aroused interest in alternative, less polluting, and cheaper energy sources. Concerns about the high consumption of fossil fuels and the growing atmospheric pollution led to the development of electric, hybrid, and plug-in electric vehicles (EVs), considered to be more efficient and sustainable from the point of view of environment protection.

The electrical energy consumed by these vehicles can be generated by renewable energy sources, which have a lower environmental impact. In the current framework, where the implementation of DC microgrids assumes a position of increasing interest, it is critical to provide solutions for a set of technical requirements of relevance. More specifically, it will be necessary to create several voltage levels that allow the connection of different types of loads to the DC microgrid. The creation of the appropriate voltage levels will be done resorting to DC-DC converters. In DC microgrids, high-power DC-DC converters are considered key elements for EV charging/discharging.

In this work, two topologies of DC-DC converters are applied to the charging/discharging of EVs, aiming to carry out a comparative study that intends to evaluate the performance of each converter topology, through the variation of parameters such as the charging power, input voltage, switching frequency, among others.

The results obtained from a coordinated simulation in the Matlab|Simulink software allowed to demonstrate the good operation of the two proposed systems. The conclusions taken from the comparative study are supported through experimental data.

Keywords

Electric Vehicles; DC-DC Converters; Interleaved Converters; Multilevel Converters; Efficiency.

Índice

Introdução.....	1
Breve contextualização histórica sobre os veículos elétricos	4
Sistema de energia elétrica AC & DC.....	5
Estado da Arte.....	7
Tecnologias de Veículos Elétricos	7
Sistemas de Armazenamento de Energia.....	8
Bateria.....	9
Supercondensadores	11
Volante de Inércia.....	13
Sistemas de Carregamento de Veículos Elétricos	13
Níveis de Carregamento	14
Princípios de Funcionamento de Conversores DC-DC	17
Introdução.....	17
Conversores DC-DC Unidirecionais.....	18
Conversor DC-DC <i>Buck</i>	18
Conversor DC-DC <i>Boost</i>	20
Conversor DC-DC <i>Boost</i> Entrelaçado	22
Conversor DC-DC <i>Boost</i> Multinível	26
Conversores DC-DC Bidirecionais.....	30
Conversor DC-DC <i>Buck-Boost</i> Bidirecional.....	30
Conversor DC-DC Entrelaçado Bidirecional.....	34
Conversor DC-DC Multinível Bidirecional	37
Sistemas de Carregamento em Estudo	43
Introdução.....	43
Carregador baseado no conversor entrelaçado.....	43
Carregador baseado no conversor Multinível	45
Resultados de Simulação	49
Simulação do conversor DC-DC entrelaçado bidirecional.....	49
Funcionamento em modo <i>buck</i>	50
Funcionamento em modo <i>boost</i>	52
Simulação do conversor DC-DC multinível bidirecional	54
Funcionamento em modo <i>buck</i>	54
Funcionamento em modo <i>boost</i>	57
Resultados experimentais.....	59
Conversor DC-DC entrelaçado bidirecional.....	59
Funcionamento em modo <i>buck</i>	60
Conversor DC-DC multinível bidirecional	62

Funcionamento em modo <i>buck</i>	63
Conclusão e sugestões para trabalhos futuros	67
Conclusão	67
Sugestão para trabalhos futuros	68
Referências Bibliográficas	69

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Esquema de uma célula de bateria [10].....	9
Figura 2.2 – Esquema equivalente de um supercondensador [18].....	12
Figura 3.1 – Esquema de um conversor DC-DC <i>buck</i>	19
Figura 3.2 – Comportamento do conversor DC-DC <i>buck</i> no primeiro modo de funcionamento.	19
Figura 3.3 – Comportamento do conversor DC-DC <i>buck</i> no segundo modo de funcionamento.....	20
Figura 3.4 – Esquema de um conversor DC-DC <i>boost</i>	20
Figura 3.5 – Comportamento do conversor DC-DC <i>boost</i> no primeiro modo de funcionamento.	21
Figura 3.6 – Comportamento do conversor <i>boost</i> no segundo modo de funcionamento.	22
Figura 3.7 – Esquema de um conversor DC-DC <i>boost</i> entrelaçado de N fases.	23
Figura 3.8 – Esquema de um conversor DC-DC <i>boost</i> entrelaçado de duas fases.	23
Figura 3.9 – Comportamento do conversor DC-DC <i>boost</i> entrelaçado no modo 1 de funcionamento.	24
Figura 3.10 – Comportamento do conversor DC-DC <i>boost</i> entrelaçado no modo 2 de funcionamento.	25
Figura 3.11 – Comportamento do conversor DC-DC <i>boost</i> entrelaçado no modo 3 de funcionamento.	25
Figura 3.12 – Comportamento do conversor DC-DC <i>boost</i> entrelaçado no modo 4 de funcionamento.	26
Figura 3.13 – Esquema de um conversor DC-DC <i>boost</i> de três níveis.....	27
Figura 3.14 – Comportamento do conversor DC-DC <i>boost</i> de três níveis no modo 1 de funcionamento.	28
Figura 3.15 – Comportamento do conversor DC-DC <i>boost</i> de três níveis no modo 2 de funcionamento.	28
Figura 3.16 – Comportamento do conversor DC-DC <i>boost</i> de três níveis no modo 3 de funcionamento.	29
Figura 3.17 – Comportamento do conversor DC-DC <i>boost</i> de três níveis no modo 4 de funcionamento.	29
Figura 3.18 – Esquema de um conversor DC-DC <i>buck-boost</i> bidirecional.	30
Figura 3.19 – Comportamento do conversor DC-DC <i>buck-boost</i> bidirecional no estado 1 do seu funcionamento como <i>buck</i>	32
Figura 3.20 – Comportamento do conversor DC-DC <i>buck-boost</i> bidirecional no estado 2 do seu funcionamento como <i>buck</i>	32
Figura 3.21 – Comportamento do conversor DC-DC <i>buck-boost</i> bidirecional no estado 1 do seu funcionamento como <i>boost</i>	33
Figura 3.22 – Comportamento do conversor DC-DC <i>buck-boost</i> bidirecional no estado 2 do seu funcionamento como <i>boost</i>	33
Figura 3.23 – Esquema de um conversor DC-DC entrelaçado bidirecional com duas fases [32].....	34
Figura 3.24 – Comportamento do conversor DC-DC entrelaçado bidirecional no estado 1 do seu funcionamento como <i>buck</i>	35

Figura 3.25 – Comportamento do conversor DC-DC entrelaçado bidirecional no estado 2 do seu funcionamento como <i>buck</i>	36
Figura 3.26 – Comportamento do conversor DC-DC entrelaçado bidirecional no estado 1 do seu funcionamento como <i>boost</i>	37
Figura 3.27 – Comportamento do conversor DC-DC entrelaçado bidirecional no estado 2 do seu funcionamento como <i>boost</i>	37
Figura 3.28 – Esquema de um conversor DC-DC de três níveis bidirecional.	38
Figura 3.29 – Comportamento do conversor DC-DC de três níveis bidirecional no estado 1 do seu funcionamento como <i>buck</i>	39
Figura 3.30 – Comportamento do conversor DC-DC de três níveis bidirecional no estado 2 do seu funcionamento como <i>buck</i>	40
Figura 3.31 – Comportamento do conversor DC-DC de três níveis bidirecional no estado 1 do seu funcionamento como <i>boost</i>	41
Figura 3.32 – Comportamento do conversor DC-DC de três níveis bidirecional no estado 2 do seu funcionamento como <i>boost</i>	41
Figura 5.1 – Estrutura do circuito do conversor entrelaçado implementado em Matlab Simulink.	49
Figura 5.2 – Curva do rendimento em função da corrente de referência.....	51
Figura 5.3 – Rendimento do conversor em função do tempo.....	52
Figura 5.4 – Rendimento do conversor em função do tempo.....	53
Figura 5.5 – Estrutura do circuito do conversor de três níveis implementado em Matlab Simulink.	54
Figura 5.6 – Curva do rendimento em função da corrente de referência.....	56
Figura 5.7 – Rendimento do conversor em função do tempo.....	57
Figura 5.8 – Rendimento do conversor em função do tempo.	58
Figura 6.1 – Bancada de testes com o conversor entrelaçado bidirecional em modo de funcionamento <i>buck</i>	60
Figura 6.2 – Relação entre o rendimento do sistema e a corrente de referência.	61
Figura 6.3 – Comparação das curvas obtidas a nível experimental (pontos a azul) e a nível de simulação (pontos a rosa).....	61
Figura 6.4 – Comparação das curvas obtidas a nível experimental (pontos a azul) e a nível de simulação (pontos a rosa).....	62
Figura 6.5 – Relação entre o rendimento do sistema e a corrente de referência.	63
Figura 6.6 – Comparação das curvas obtidas a nível experimental (pontos a azul) e a nível de simulação (pontos a rosa).....	64
Figura 6.7 – Comparação das curvas obtidas a nível experimental (pontos a azul) e a nível de simulação (pontos a rosa).....	65

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Parâmetros característicos de uma bateria [1], [12], [15].	10
Tabela 2.2 – Níveis de carregamento (baseado em [22], [24], [25]).	15
Tabela 5.1 – Comportamento do conversor entrelaçado em modo de funcionamento <i>buck</i> .	50
Tabela 5.2 – Resposta do comportamento do conversor entrelaçado em modo de funcionamento <i>buck</i> .	51
Tabela 5.3 – Comportamento do conversor entrelaçado em modo de funcionamento <i>boost</i> .	53
Tabela 5.4 – Resposta do comportamento do conversor de três níveis em modo de funcionamento <i>buck</i> .	55
Tabela 5.5 – Resposta do comportamento do conversor de três níveis em modo de funcionamento <i>buck</i> .	56
Tabela 5.6 – Resposta do comportamento do conversor de três níveis em modo de funcionamento <i>boost</i> .	58

Lista de Acrónimos

A	<i>Ampère</i>
AC	<i>Alternating Current</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DoD	<i>Depth of Discharge</i>
F	<i>Farad</i>
G2V	<i>Grid to Vehicle</i>
H	<i>Henry</i>
Hz	<i>Hertz</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
MW	<i>Mega Watt</i>
PI	Controlador Proporcional e Integral
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SAE	Sistema de Armazenamento de Energia
SEE	Sistemas de Energia Elétrica
SI	Sistema Internacional de Unidades
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
V	<i>Voltage</i>
VE	Veículo Elétrico
V2G	<i>Vehicle to Grid</i>
VEH	Veículo Elétrico Híbrido
VEHP	Veículo Elétrico Híbrido <i>Plug-In</i>
W	<i>Watt</i>

Capítulo 1

Introdução

Uma das maiores conquistas da tecnologia foi, precisamente, o desenvolvimento de veículos de combustão interna. Os automóveis têm feito grandes contribuições para o crescimento da sociedade moderna, ao satisfazer muitas necessidades de mobilidade na vida quotidiana. O desenvolvimento particularmente rápido da indústria automóvel impulsionou o progresso da sociedade humana de um modo primitivo para uma sociedade industrial desenvolvida [1]. O elevado número de automóveis em circulação por todo o mundo tem sérias implicações ao nível do meio ambiente e da vida humana. A poluição do ar, o aquecimento global e o rápido esgotamento dos recursos petrolíferos são agora problemas que acarretam extrema preocupação [1], [2]. Dada a emergência climática, a adoção de medidas que promovam o alcance da meta de neutralidade carbónica são uma exigência [3]. Para responder a essas exigências, a adoção de tecnologias mais sustentáveis do ponto de vista ambiental e mais eficientes afigura-se fundamental. Um dos sectores de atividade que mais contribui para a pegada carbónica é precisamente o sector da mobilidade e transportes, representando 25 - 30% do total de emissões de gases poluentes [4]. Este setor assiste a transformações significativas, concretizadas através da adoção crescente de soluções de mobilidade manifestamente mais sustentáveis do ponto de vista ambiental [4], como por exemplo os veículos elétricos (VEs) e elétricos híbridos (VEHs), alimentados a partir de baterias ou células de combustível [1].

A emissão de gases nocivos associados a um VE provém maioritariamente da produção de eletricidade através de fontes não renováveis de energia. Mesmo no pior cenário, uma conjugação de formas de produção de energia elétrica que dê primazia ao uso de carvão, representa uma diminuição significativa nas emissões de gases poluentes, em comparação com as emissões associadas à operação de veículos movidos a gasolina [5]. Com a alteração no 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 [2], [4].

Quase um século após serem superados por modelos propulsionados através de motores de combustão, os VEs reaparecem no cenário automotivo mundial. Esse movimento deverá ser responsável pela substituição progressiva dos motores de combustão interna, por motores elétricos como fonte de força motriz veicular [6]. As preocupações

ambientais, a volatilidade do mercado do petróleo e o desenvolvimento das baterias reabilitaram os VEs, que voltaram a figurar como alternativa ao veículo de combustão, por ser o principal consumidor de petróleo e representar uma das principais fontes geradoras de gases causadores do efeito de estufa. Por conseguinte, o setor automóvel é um dos principais alvos das atuais políticas energéticas e ambientais [4], [6].

No entanto, o aumento de números de veículos em circulação e, por sua vez, as emissões por eles produzidas, representam uma ameaça ao ambiente e à saúde pública, fato que justifica a crescente aposta em VEs [7]. O sucesso dessa aposta depende do desenvolvimento tecnológico multidisciplinar, em áreas como conversão de potência, máquinas elétricas, gestão de energia, técnicas de controlo e, sobretudo, armazenamento de energia [7].

A implementação plena de VEs apresenta ainda muitas dificuldades, principalmente no que toca à autonomia dos veículos, ao armazenamento de energia e à rapidez no carregamento, entre outros fatores. Para ultrapassar essas dificuldades, existe um forte investimento na investigação e desenvolvimento tecnológico de tudo o que está relacionado com VEs.

Com o crescente interesse em VEs, verificou-se também um aumento do número de carregamentos dos veículos. A preferência pelo carregamento efetuado em ambiente doméstico é comum a muitos utilizadores e traduz-se em alterações significativas nos perfis de consumo de energia elétrica a nível residencial [2]. O desenrolar desta revolução da mobilidade tem lugar em paralelo com uma outra importante revolução. Atualmente, verifica-se uma preocupação crescente em melhorar a eficiência energética de habitações e escritórios, o que está a levar os investigadores a propor alterações na estrutura dos sistemas elétricos de energia (SEE) atualmente implementados em ambiente residencial e em escritórios [2]. A utilização de SEE do tipo DC traz também implicações nas arquiteturas dos sistemas de carregamento domésticos. Essas alterações nos SEE promovem assim importantes benefícios no carregamento dos VEs em habitações, dando respostas e contributos significativos para a diminuição da emissão de gases nocivos para a saúde, através do aumento do rendimento dos processos de carregamento dos VEs [2], [5].

Devido à crescente necessidade em transferir energia entre dois barramentos DC com níveis de tensão diferentes, os conversores DC-DC bidirecionais revelam extrema utilidade. Estas tecnologias de conversão de energia são utilizadas de forma independente ou em conjunto com outras tecnologias de conversão de energia, sendo tipicamente empregadas em acionamentos de motores elétricos, em VEs, VEHs, em sistemas de armazenamento de energia, em sistemas de produção de energia renovável, em fontes de alimentação ininterruptas (UPS) e satélites [4], por exemplo. Em VEs e VEHs, os conversores DC-DC fazem a ligação e a transferência de energia entre os vários barramentos

DC existentes nos veículos. Nos processos de carregamento, permitem que a transferência de energia seja feita da rede para o veículo, designada como G2V (*Grid to Vehicle*), ou desde veículo até à rede, designando-se V2G (*Vehicle to Grid*). Durante o funcionamento do veículo, asseguram o controlo do fluxo de energia entre a carga e o barramento DC do acionamento elétrico, permitindo a travagem regenerativa [5], [8].

Face ao elevado crescimento dos VEs, quer na sua produção, quer na sua aquisição, surgem questões ligadas à seleção das soluções mais adequadas para a conversão de energia e o controlo do carregamento e descarregamento do sistema de armazenamento mais comum de um VE – a bateria. Para responder a essas dúvidas, o presente trabalho analisa as diversas arquiteturas de conversores DC-DC, no sentido de perceber e obter maior desempenho nos processos de carregamento/descarregamento do veículo.

Este trabalho encontra-se estruturado da seguinte forma. No primeiro capítulo será feita a introdução e contextualização deste trabalho. No segundo capítulo será apresentado o estado de arte, onde serão focados aspetos como as tecnologias de VEs existentes, os sistemas de armazenamento de energia utilizados ou os níveis de potência atualmente adotados em processos de carregamento. No terceiro capítulo, serão abordadas as topologias de conversores DC-DC com potencial interesse para sistemas de carregamento doméstico implementados em SEE do tipo DC. No quarto capítulo, será explicada toda a teoria envolvente da dissertação, os conversores eletrónicos de potência utilizados e sobre as estratégias de controlo implementadas. No quinto capítulo, serão descritos os modelos de simulação desenvolvidos e os resultados obtidos, para ambos conversores DC-DC. No sexto capítulo, serão descritos os ensaios experimentais levados a cabo, bem como os resultados obtidos. No sétimo e último capítulo, são apresentadas as conclusões referentes ao trabalho desenvolvido, com a indicação de perspetivas de trabalhos futuros.

Breve contextualização histórica sobre os veículos elétricos

Os primórdios do desenvolvimento dos VEs remontam há 150 anos atrás, quando o padre, engenheiro e físico Eslovaco-Húngaro, Ányos I. Jedlik, criou o primeiro motor elétrico, com o objetivo de movimentar um carro de pequena dimensão [2], [9].

Com o passar do tempo, os VEs foram replicados e atualizados, de forma a ultrapassar as suas limitações, para que pudessem ser vistos como uma nova forma alternativa de transporte. No entanto, devido a limitações técnicas, como a falta de capacidade de armazenamento de energia nas baterias, este tipo de veículo acabou por perder popularidade [9]. Por outro lado, fatores como a descoberta de grandes reservas de petróleo [2] e a maior autonomia de condução contribuíram para que os veículos de combustão interna se tornassem mais acessíveis e baratos, tomando assim o poder de dominância do mercado de automóveis. Como consequência, os VEs perderam relevância, passando a ser utilizados sobretudo em projetos de transportes públicos, como por exemplo comboios [2], [9].

Mais recentemente, com a subida significativa dos preços dos derivados do petróleo, bem como a extrema redução global das reservas petrolíferas, o domínio do veículo de combustão interna passou a ter o seu futuro ameaçado. Tendo em conta que a sociedade tem tomado consciência da elevada influência negativa que estes tipos de veículos podem causar ao ambiente, a popularidade dos veículos de combustão interna está a ser seriamente afetada. Desta forma, os VEs reafirmam-se enquanto solução de mobilidade com elevado interesse prático.

No final do século XX, os VEs voltaram à ribalta, ganhando popularidade. Os níveis de produção destes veículos aumentaram, induzindo uma grande competitividade entre as maiores indústrias fabricantes de automóveis. Elencam-se, de seguida, alguns exemplos que motivaram mais sucesso nos VEs. Em 1997, a Toyota criou a sua primeira série de VEH [2], [10], o modelo *Prius*. No ano de 2006, a *Tesla Motors* introduziu o *Tesla Roadster* [2], [10], um veículo puramente elétrico. Outras marcas, como a BMW e a *General Motors* passaram a investir em VEs. Países como a França e a Inglaterra decidiram abolir toda a venda de novos veículos com sistemas de combustão interna até ao ano de 2040, enquanto a Noruega apresentou uma meta mais ambiciosa, visando substituir os veículos de combustão, na sua totalidade, até ao ano de 2025.

Sistema de energia elétrica AC & DC

Contrariamente aos veículos de combustão interna, os VEs têm como fonte de energia principal a energia elétrica, armazenada em baterias recarregáveis, que alimentam o motor elétrico responsável por converter essa energia em movimento. A energia armazenada no veículo é proveniente da rede elétrica, sendo essa energia geralmente produzida a partir de sistema de produção de energia, como centrais elétricas, podendo estas emitir ou não gases poluentes.

No sistema de energia elétrica do tipo AC, as suas grandezas fundamentais mudam de sentido de forma alternada ao longo do tempo, tendo uma forma de onda sinusoidal. Já as grandezas fundamentais do sistema de energia elétrica do tipo DC não apresentam variações de sentido ao longo tempo.

Após a grande disputa histórica testemunhada aquando da descoberta da corrente elétrica, verificou-se que era mais viável efetuar o transporte de energia em alta tensão. Os sistemas de energia AC tornaram-se, assim, mais apetecíveis e viáveis, por facilitarem a realização de transporte de energia em alta tensão. A invenção do transformador teve um papel preponderante neste aspeto.

A topologia básica das redes elétricas é um sistema estritamente hierárquico com claras descrições entre os subsistemas de produção, transporte, distribuição e comercialização. Esta é por natureza unidirecional, com um fluxo de energia desde as grandes centrais até aos consumidores finais, sem qualquer troca de informação em tempo real entre o consumidor e os pontos de geração ou outros pontos da rede. De acordo com [2], embora os sistemas de energia do tipo AC apresentem vantagens relacionadas com a transmissão de energia elétrica, em tensões elevadas e a longas distância, surgem atualmente inúmeros benefícios e argumentos de peso associados à implementação de sistemas de energia do tipo DC. Entre outros aspetos, a crescente prevalência de equipamentos eletrónicos alimentados por energia DC, como as pilhas, baterias, dispositivos portáteis ou VEs, determinam a relevância de sistemas de energia DC.

Devido ao notável crescimento e utilização dos VEs, torna-se necessário realizar o carregamento dos mesmos, sendo expeável que a maioria seja efetuada em ambientes residenciais. Desta forma, a adoção de sistemas do tipo DC em ambiente residencial apresenta particular interesse prático, enquanto forma de integrar fontes de energia renováveis, sistemas de armazenamento e cargas num sistema de arquitetura simplificada e com maior eficiência energética [2], [11].

Capítulo 2

Estado da Arte

Tecnologias de Veículos Elétricos

O veículo puramente elétrico, ou simplesmente veículo elétrico (VE), caracteriza-se por ser um sistema de mobilidade propulsado exclusivamente por motores elétricos, alimentados a partir da energia acumulada em um ou mais sistemas de armazenamento de energia. Por norma, tais sistemas de armazenamento de energia compreendem um conjunto de baterias, que pode eventualmente ser hibridizado com outras tecnologias de armazenamento de energia, nomeadamente supercondensadores, volantes de inércia, células de combustível, entre outros. Por oposição aos veículos de combustão interna, os VEs não emitem quaisquer gases nocivos para o ambiente durante o seu tempo de vida útil, sendo por isso considerados tecnologias 100% limpas [12]. Os VEs são também altamente vantajosos no que concerne às características de funcionamento, uma vez que são manifestamente mais silenciosos, possuem um arranque suave e produzem baixos níveis de vibrações. Para além dos VEs, existem ainda as séries de veículos elétricos híbridos (VEH) e de veículos elétricos híbridos *plug-in* (VEHP) [12], [13].

Os VEH resultam da combinação da tecnologia de VEs com a tecnologia de veículos de combustão interna. O sistema de propulsão baseia-se na utilização de um motor de combustão, auxiliado por um motor elétrico, reduzindo o recurso e o esforço do motor principal [12]. Desta forma, é possível economizar combustível, ao mesmo tempo que se assiste a uma redução do ruído e da emissão de gases poluentes. Dentro desta tecnologia, existem ainda dois tipos básicos de configurações, denominados por Veículos Elétricos Híbridos Série e Veículos Elétricos Híbridos Paralelo [12], [13], [14].

Nos VEH de configuração Série, o processo de combustão no veículo ocorre em primeiro lugar, sendo que a energia oriunda deste processo de combustão carrega as baterias [14]. A energia armazenada nas baterias destina-se a alimentar o motor elétrico, que converte a energia elétrica em energia mecânica e a transmite para o veio de transmissão, permitindo o movimento do veículo.

Nos VEH de configuração Paralelo, a força propulsora do veículo resulta da ligação simultânea do motor de combustão e do motor elétrico ao veio de transmissão. Assim, a potência pode ser fornecida de forma isolada ou por ambos os motores [14].

Os VEHP são também uma configuração de VEH. Neste caso, a energia que alimenta o motor elétrico provém do sistema de armazenamento de energia, cujo carregamento é efetuado a partir da rede elétrica [12], [14].

Sistemas de Armazenamento de Energia

O conceito de VE baseia-se na utilização de fontes de energia alternativas. Estas formas de transporte alternativas enfrentam enormes desafios no que concerne ao armazenamento da energia necessária para a propulsão do veículo [15]. Existem diversas tecnologias com potencial para armazenar e disponibilizar a energia necessária para alimentar um VE, tais como baterias, supercondensadores, células de combustível, volantes de inércia [2], [12], entre outros. Tais tecnologias são classificadas de acordo com a forma de energia armazenada, o formato, o tipo de material [15] e a combinação de aplicação.

Existem ainda outros parâmetros associados às diferentes tecnologias de armazenamento de energia para a utilização em VEs, tais como, energia específica, potência específica, rendimento, requisitos de manutenção, custos, adaptação ambiental, facilidade de uso e segurança [12], [15].

O fluxo bidirecional de energia é uma das mais importantes características dos sistemas de armazenamento de energia utilizados em VEs. Assim, estes assumem a função de fornecer energia para o exterior durante o processo de descarregamento, e de recuperá-la durante o processo de carregamento [1], [12].

O dimensionamento e aplicação de sistemas de armazenamento de energia em VEs configura-se enquanto tarefa particularmente exigente também pela dificuldade na seleção das tecnologias a considerar. Se aplicado isoladamente, uma tecnologia de armazenamento pode ter alta potência específica, mas baixa energia específica; já outras tecnologias de armazenamento podem ter alta energia específica, mas baixa potência específica. Devido a estas limitações, um sistema de armazenamento de energia requer uma combinação de requisitos específicos para lidar perfeitamente com as desvantagens de cada tecnologia [16]. De forma a suprir tais dificuldades e potenciar os benefícios de cada tecnologia [16], é benéfico conjugar várias tecnologias de armazenamento num único sistema, para aprimorar os recursos de armazenamento de energia através da hibridização [16].

Um sistema de armazenamento híbrido é definido como um sistema que integra duas ou mais tecnologias de armazenamento de energia que possuem propriedades e características similares, mas complementares [16].

Em suma, a principal finalidade de um sistema híbrido é juntar as vantagens individuais de uma tecnologia de armazenamento e compensar as suas próprias

desvantagens, maximizando os seus benefícios individuais, ao mesmo tempo que se reduzem os custos e se aumenta o desempenho do sistema [16].

As próximas subseções abordam, de forma breve, as tecnologias de armazenamento de energia mais utilizadas em soluções de mobilidade elétrica.

Bateria

Uma bateria é um dispositivo eletroquímico de armazenamento de energia, que tem a capacidade de converter energia elétrica em energia potencial química durante o processo de carregamento, e que converte a energia química em energia elétrica no processo de descarregamento [1], [12]. Na sua composição, existem várias células elétricas encaixadas, sendo cada célula uma unidade independente e completa que contém todas as propriedades eletroquímicas. Cada célula é composta por dois eletrodos (um positivo e outro negativo) submersos num eletrólito, sólido ou líquido, conforme representado no esquema da Figura 2.1.

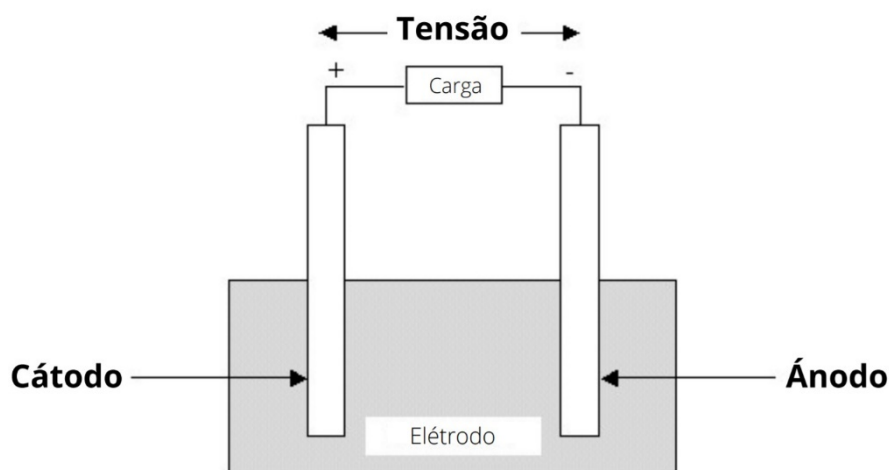


Figura 2.1 – Esquema de uma célula de bateria [10].

Para além dos parâmetros anteriormente mencionados, as baterias apresentam outras características, como a energia armazenada, densidade de energia, rendimento, ciclo de vida e temperatura de operação. Estes parâmetros são apresentados e descritos de forma resumida na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Parâmetros característicos de uma bateria [1], [12], [15].

Característica específica	Descrição
Energia armazenada	Esta depende da sua tensão e da carga armazenada na bateria. No S.I., a energia total é dada por: $E [Wh] = U [V] * C [Ah]$
Energia específica	É a quantidade de energia elétrica armazenada por cada quilograma de massa da bateria. A sua unidade no S.I. é Wh/kg.
Potência específica	É a quantidade de potência obtida por cada quilograma de bateria. A sua unidade no S.I. é W/kg.
Densidade de energia	É a quantidade total de energia armazenada por unidade de volume de bateria. A sua unidade no S.I. é Wh/m ³ .
Rendimento	É definido pela razão entre energia fornecida pela bateria e a quantidade de energia necessária para devolvê-la ao estado observado antes da descarga.
Ciclo de vida	Representa o número de vezes em que a bateria pode ser carregada e descarregada até que a sua capacidade de carga consiga atingir os 80% da capacidade de carga nominal.
Temperatura de operação	Gama de temperatura na qual a bateria apresenta serviço útil; varia com o tipo de bateria.

A principal vantagem deste sistema de armazenamento de energia é a alta densidade de energia. Por outro lado, a sua principal desvantagem é a redução do desempenho e da vida útil, após um limitado número de ciclos de carga e de descarga [11].

As baterias de íões de lítio são as mais comuns em dispositivos eletrônicos e em VEs, graças à sua alta densidade de energia, alta energia específica e potência específica, em relação ao seu peso. Além disso, têm características como baixa taxa de auto-descarga e longa vida útil, o que as tornam plausíveis para a sua implementação em VEs.

Embora ainda esteja em fase de desenvolvimento, a tecnologia de bateria de íões de lítio têm ganho aceitação para aplicações em VEs e VEHS. Existem parâmetros interessantes, como por exemplo [2]:

- Ciclo de vida: 1000 a 3000 ciclos
- Densidade de energia: 250 a 620 W*h*m⁻³
- Rendimento: 80 a 90 %
- Energia específica: 100 a 265 W*h*kg⁻¹
- Potência específica: ~250 a ~340 W*kg⁻¹
- Taxa de auto-descarga: 8 a 30% ao mês
- Temperatura de operação: -20 a 60 °C

- Tensão nominal de cada célula: 3.2 a 3.7 V.

Como toda e qualquer tecnologia, as baterias de íons de lítio possuem vantagens associadas que as destacam quando comparadas com as restantes tecnologias de baterias existentes, dependendo do seu tipo de aplicação. De acordo com [12], [15], [17], as principais vantagens podem ser:

- Ausência de eletrólito líquido;
- Elevada densidade de energia, o que permite armazenar maior quantidade de energia;
- Elevada energia específica e potência específica;
- Elevada tensão por cada célula de bateria;
- Reduzido efeito memória, ou seja, efeito de redução da capacidade de retenção de carga. Esta característica permite que sejam carregadas em qualquer estado de carga;
- Não são prejudiciais para o ambiente;
- Peso reduzido;
- Elevada tolerância a altas temperaturas e temperatura ambiente;
- Reduzida taxa de manutenção;
- Reduzido nível de auto-descarga; entre outras.

Por outro lado, possuem algumas limitações [2], [17], tais como:

- Degradação significativa quando sujeitas a temperaturas extremamente elevadas;
- Dificuldade de transporte e de manuseamento;
- Dificuldade na reciclagem aquando do fim da sua vida útil;
- Elevado custo de produção;
- Necessidade de proteção para sobrecarga e sobre-descarga;
- Necessidade de circuitos de proteção auxiliares;
- Elevada dependência entre tempo de vida e temperatura;
- Sensibilidade a danos causados por colisões.

Supercondensadores

Os supercondensadores são similares aos condensadores eletroquímicos convencionais, no que toca à sua estrutura e funcionamento. No entanto, estes destacam-se, particularmente, pela elevada capacidade de armazenamento de energia. São compostos

por duas camadas de material poroso, separadas por um material isolante, conforme ilustrado na Figura 2.2 [12].

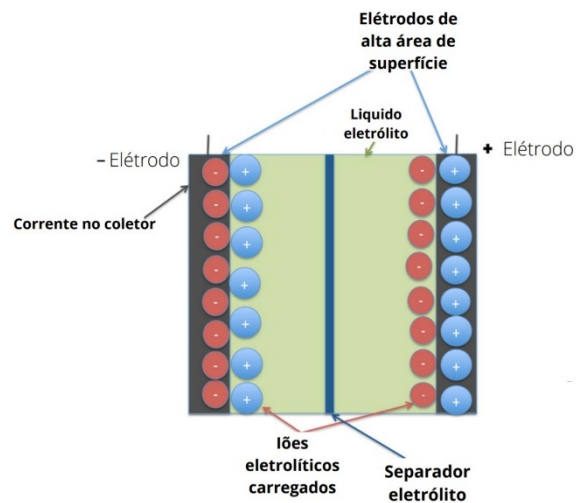


Figura 2.2 – Esquema equivalente de um supercondensador [18].

Devido às frequentes variações de velocidade e de paragens/arranques característicos da utilização de VEs e VEHS, o perfil de carga e de descarga deste sistema de armazenamento apresenta oscilações significativas, observadas em curtos espaços de tempo. Assim, num VE, os supercondensadores são utilizados como principais fornecedores de energia durante as rápidas acelerações do VE, e como armazenadores de energia durante o período de travagem regenerativa, em que importa absorver quantidades apreciáveis de energia num curto espaço de tempo [19]. Os supercondensadores apresentam-se como uma boa solução para recuperação de energia nas travagens regenerativas e para fornecer rapidamente energia durante as acelerações, devido à capacidade desta tecnologia para fornecer energia em curtos intervalos de tempo [1], [12].

Esta tecnologia de condensadores apresenta as seguintes vantagens, quando comparadas com as tecnologias de baterias [20]:

- Carregamentos instantâneos;
- Alta capacidade de armazenamento;
- Alta potência específica;
- Elevado número de ciclos de vida útil;
- Maior rendimento;
- Maior durabilidade;
- Rapidez nos ciclos de carga e descarga.

Por outro lado, apresentam desvantagens tais como, elevado custo, reduzidas tensões por célula, reduzida densidade de energia, reduzida capacidade de armazenamento de energia por longos períodos e reduzida energia específica [2], [12].

Volante de Inércia

O volante de inércia, também chamado de bateria mecânica [2], consiste num dispositivo mecânico de armazenamento de energia, cujo funcionamento é baseado na lei da inércia. Estes dispositivos utilizam e armazenam a energia a partir do movimento rotativo do rotor em torno do seu próprio eixo, para converter energia mecânica em energia elétrica. Os frequentes ciclos de carga e descarga não afetam a sua vida útil. Adicionalmente, os volantes de inércia possuem uma densidade de potência significativa, que é tipicamente superior em cinco a dez vezes à das baterias [11].

Os volantes de inércia são dispositivos adequados para sistemas de armazenamento híbridos ou mesmo em VEHs. Podem ainda auxiliar durante as acelerações e subidas dos veículos, comuns em ciclos tipicamente urbanos, fornecendo aos veículos elevados níveis de potência, por períodos relativamente curtos. Durante os períodos de travagem regenerativa, podem absorver elevados níveis de potência com maior eficácia, em comparação com as baterias convencionais [12], [19]. Possuem os seguintes benefícios, em relação às baterias:

- Elevada densidade de energia e de potência;
- Baixo custo;
- Infinitos ciclos de carga e de descarga;
- Longa vida útil;
- Não possuem efeito de profundidade de descarga (*DoD*);
- Não são sensíveis à temperatura;
- Não são poluentes;
- Possuem elevada capacidade de armazenamento.

Em comparação com as baterias, apresentam desvantagens tais como, reduzida energia específica, níveis de rendimento limitados, ou elevado nível de auto-descarga devido a perdas por atrito (conhecidas como perdas mecânicas) [2].

Sistemas de Carregamento de Veículos Elétricos

Para efetuar, de forma controlada, o carregamento (G2V) e o descarregamento (V2G) de VEs, torna-se fundamental recorrer a sistemas de carregamento. Entre os elementos constituintes dos sistemas de carregamento, destacam-se os conversores eletrónicos de potência, cuja função principal consiste em condicionar e controlar os fluxos

de energia que têm lugar no processo de carregamento dos VEs. Tipicamente, os sistemas de carregamento consistem em conversores AC-DC e/ou em conversores DC-DC, dependendo do tipo de sistema de energia (AC ou DC) ao qual é ligado o sistema de carregamento.

Os conversores eletrônicos de potência desempenham um papel fundamental nos sistemas de carregamentos do VE. Diferentes topologias de conversores desempenham funções como controlar a tensão no barramento DC ou regular o fluxo de potência entre a rede e o veículo (G2V), e entre o veículo e a rede (V2G). Podem ser utilizadas diversas topologias de conversores no sistema de carregamento do VE [21], [22].

A rede de energia elétrica convencional fornece energia em tensão e corrente AC [23]. Contudo, existem muitas cargas que necessitam de tensão DC para a sua alimentação, como é o caso dos procedimentos de carregamento de VEs. Para isso, é necessário proceder à conversão de AC para DC [23]. A tensão e corrente no barramento DC devem ser cuidadosamente reguladas, para que se efetue o carregamento das baterias do VE. Para atingir tais objetivos, a integração de um conversor DC-DC é essencial.

Estes conversores comportam-se como uma carga não-linear. Resultado desta característica, observa-se a injeção de harmônicos de corrente na rede AC, o que limita o fator de potência da entrada. Para obter o fator de potência unitário e alto rendimento no processo de carregamento, importa adotar medidas de correção do fator de potência em sistemas de carregamento AC-DC. Para o efeito, os conversores DC-DC convencionais *boost*, *buck* e *buck-boost* são as topologias tipicamente selecionadas (os princípios de funcionamento destas topologias serão explanados mais à frente). Nesses carregadores, a conversão de AC para DC é tipicamente assegurada por um retificador de ponte completa. Este retificador pode ser controlado ou não controlado, em função das tecnologias de dispositivos semicondutores que sejam empregues [21].

Num cenário em que as redes de energia elétrica DC se tornam prevalentes, a arquitetura dos sistemas de carregamento de VEs torna-se extremamente simples, dado que todos os requisitos e funções essenciais inerentes ao procedimento podem ser asseguradas por um único conversor DC-DC.

Níveis de Carregamento

Encontram-se definidos três níveis distintos de potência de carregamento. Estes são diferenciados de acordo com a velocidade de carregamento e com o tempo necessário para recarregar as baterias, ou qualquer outro sistema de armazenamento de energia em causa. Estes níveis de carregamento impactam na arquitetura dos conversores eletrônicos de potência adotados, bem como no posicionamento dos mesmos, como será descrito mais

adiante. São apresentados, de seguida, os três níveis de carregamento, bem como as suas características.

O nível 1, também denominado como modo de carregamento lento, é geralmente adotado em ambiente residencial, nos períodos em que os VEs se encontram imobilizados na garagem. O carregamento, efetuado através do carregador instalado a bordo do veículo, possui a capacidade para converter a energia AC proveniente de uma tomada convencional de tensão 230 V_{AC} monofásica para energia DC. Por ser efetuado a um nível reduzido de potência, o período de tempo para atingir a carga completa é significativo [2], [22].

O nível 2 corresponde a um modo de carregamento semirrápido. Este é geralmente utilizado em instalações públicas e privadas [24], dado que pode implicar a utilização de uma tomada de tensão de 400 V_{AC} trifásica. É indicado para veículos que possuam conversores eletrónicos de potência *on-board* monofásicos e trifásicos [2]. Por fornecer mais potência, este nível tem associada uma taxa de carregamento mais elevada, em comparação ao nível 1.

O nível 3 é denominado por nível de carregamento rápido em energia DC. Utiliza um carregador *off-board* com tensão de saída que pode chegar até 600 V_{DC} [2]. Destina-se a aplicações públicas e comerciais [22], [24]. Este tipo de carregamento apenas é possível devido às classificações de alta tensão, corrente e potência.

As características associadas a cada nível de carregamento são resumidas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Níveis de carregamento (baseado em [22], [24], [25]).

Níveis de carregamento	Localização do carregador	Descrição	Nível de potência	Tempo de carregamento
Nível 1 – 230 V _{AC}	<i>on-board</i> , monofásico	Carregamento lento, efetuado em ambiente residencial	1.4 kW (12 A)	14 – 17 h
Nível 2 – 400 V _{AC}	<i>on-board</i> , monofásico ou trifásico	Carregamento efetuado em parques de estacionamento	4 kW (17 A)	4 – 6 h
Nível 3 – 200 – 450 V _{DC} 200 – 450 V _{DC} 200 – 600 V _{DC}	<i>off-board</i> , trifásico	Carregamento rápido, efetuado em estações de carregamento público	36 kW (80 A) 90 kW (200 A) 240 kW (400 A)	0.4 – 1 h 10 – 20 min < 10 min

De acordo com [24], os carregadores de VEs são classificados em função de vários critérios.

Relativamente ao posicionamento dos mesmos, podem ser classificados enquanto carregadores *on-board* (i.e., encontram-se integrados na estrutura do próprio veículo) ou *off-board* (i.e., encontram-se instalados fora do veículo).

Os carregadores *on-board* têm capacidade de processamento de energia limitada, devido a restrições de peso, espaço e custo. Para suprir estes problemas, os carregadores podem ser integrados nos acionamentos elétricos, assumindo funções quer na propulsão do veículo, quer no carregamento do mesmo [11], [24]. Outras das vantagens dos carregadores *on-board* reside no facto de estes permitirem que os proprietários dos VEs carreguem os seus automóveis em qualquer local onde esteja disponível uma fonte de energia adequada [11]. Já um carregador do tipo *off-board* pode ser projetado para altas taxas de carregamento e tem associadas menos limitações de peso e tamanho.

No que respeita ao fluxo de energia entre rede e veículo, os carregadores podem ser classificados enquanto carregadores unidirecionais e bidirecionais. Carregadores unidirecionais apenas permitem o fluxo de energia entre a rede elétrica e o veículo (G2V). Já os carregadores bidirecionais permitem o fluxo de energia em ambas as direções (G2V e V2G).

Capítulo 3

Princípios de Funcionamento de Conversores DC-DC

Introdução

Conversores DC-DC são componentes eletrônicos de potência responsáveis pela conversão e controlo da energia elétrica em DC. Nestes conversores, os parâmetros tensão, corrente elétrica e frequência são controlados. São compostos por dispositivos semicondutores ativos (como IGBT, MOSFET, entre outros) com comando à condução e ao corte de modo cíclico [26], através de um sinal PWM. Integram também elementos passivos (como bobinas, díodos, condensadores e resistências) [27].

O *duty cycle* é definido como sendo a percentagem do período de comutação em que o semicondutor a controlar se encontra no estado de condução [8]. Em conversores DC-DC, o *duty cycle* é a principal característica que controla a tensão na saída. Será representado ao longo deste trabalho pela letra d , e é definido pela equação (3.1).

$$d = T_{on}/T_s \quad (3.1)$$

O ganho estático de tensão de um conversor é definido pela razão entre a tensão de saída e a tensão de entrada do conversor, e é definido pela equação (3.2).

$$G = V_{out}/V_{in} \quad (3.2)$$

Existem diversas formas de classificação de conversores DC-DC, tendo em conta parâmetros como o sentido do fluxo de energia, a implementação (ou ausência) de isolamento galvânico, a razão entre as tensões de entrada e de saída, entre outros. No que respeita à implementação de isolamento galvânico, os conversores DC-DC podem ser classificados em duas categorias, os conversores isolados e os não-isolados. A diferença entre eles é dada pela implementação (ou não) de um transformador de isolamento galvânico na configuração. Os não-isolados possuem uma construção mais simples, pois abdicam do uso de transformadores na sua constituição. A maior complexidade do conversor DC-DC isolado reside no facto de este possuir um transformador de média ou alta frequência na sua estrutura, necessitando de pelo menos dois conversores na sua configuração (retificador e inversor), para garantir o fluxo de potência AC no transformador

[8]. Neste trabalho, serão destacadas as categorias de conversores DC-DC não-isolados, devido à sua estrutura simples.

Conforme abordado no capítulo anterior, a classificação de conversores DC-DC pode também ter em conta os fluxos de energia permitidos pelo conversor. Assim, distinguem-se conversores unidirecionais e conversores bidirecionais. Estes últimos apresentam interesse acrescido para a aplicação em causa (carregamento de VEs), dado o interesse em contemplar funcionalidades de envio de energia para a rede elétrica.

De acordo com [28], [29], o modo de operação de um conversor, pode ser analisado com base em um canal. Com base na quantidade de energia que é entregue à carga durante cada período de comutação, o funcionamento do conversor pode ser classificado em modo de condução contínua ou modo de condução descontínua. Se toda a energia armazenada na bobina do conversor for entregue à carga durante cada ciclo de comutação, observa-se o modo de condução descontínua. Neste modo, a corrente que flui através da bobina decai temporariamente para zero. Se apenas parte da energia armazenada na bobina for entregue à carga durante cada período de comutação, diz-se que o conversor está a operar em modo de condução contínua. O modo de condução é um fator fundamental na determinação das características elétricas do conversor [28], [29]. No presente trabalho, apenas será analisado o modo de condução contínua, tendo em conta as vantagens inerentes ao mesmo e a simplicidade na explanação do funcionamento dos conversores.

Conversores DC-DC Unidirecionais

Por definição, um conversor DC-DC unidirecional é um sistema que permite aplicar à carga um determinado valor de tensão DC em que o seu valor médio pode ser superior ou inferior ao valor da tensão DC de entrada, de acordo as necessidades. Este tipo de configuração permite que o fluxo de potência seja feito apenas num único sentido, seja pelas tecnologias de semicondutores utilizadas, seja pela arquitetura do próprio conversor. Serão seguidamente apresentadas e descritas as estruturas de conversores DC-DC unidirecionais mais comuns na literatura.

Conversor DC-DC *Buck*

Sendo este um tipo de conversor unidirecional, o fluxo de corrente ocorre desde a fonte até à carga. Este tipo de conversor é denominado por abaixador de tensão, pois tem como função aplicar à carga uma tensão contínua de valor médio inferior à tensão da fonte de alimentação. Uma topologia básica para este tipo de conversor é apresentada na Figura 3.1.

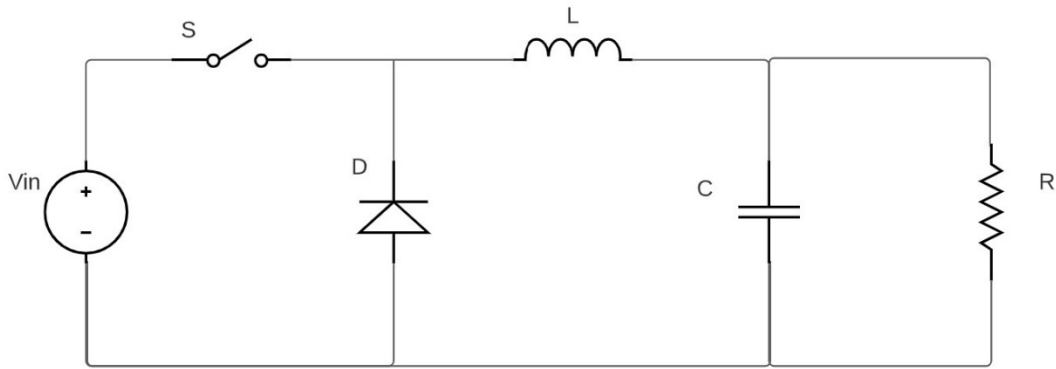


Figura 3.1 – Esquema de um conversor DC-DC *buck*.

Como se pode verificar, este conversor consiste numa fonte de tensão DC, V_{in} , um semicondutor controlado S , um díodo D , um filtro indutivo L , um filtro capacitivo C e uma carga resistiva R . Em regime permanente, o ganho para este conversor é apresentado na equação (3.3).

$$G = V_{out}/V_{in} = d \quad (3.1)$$

O princípio de funcionamento do conversor é simples, e pode ser dividido em dois modos:

- Primeiro modo: o interruptor S encontra-se à condução e o díodo D encontra-se inversamente polarizado. Neste cenário, a corrente flui desde a fonte até à carga. Este modo de operação é apresentado na Figura 3.2.

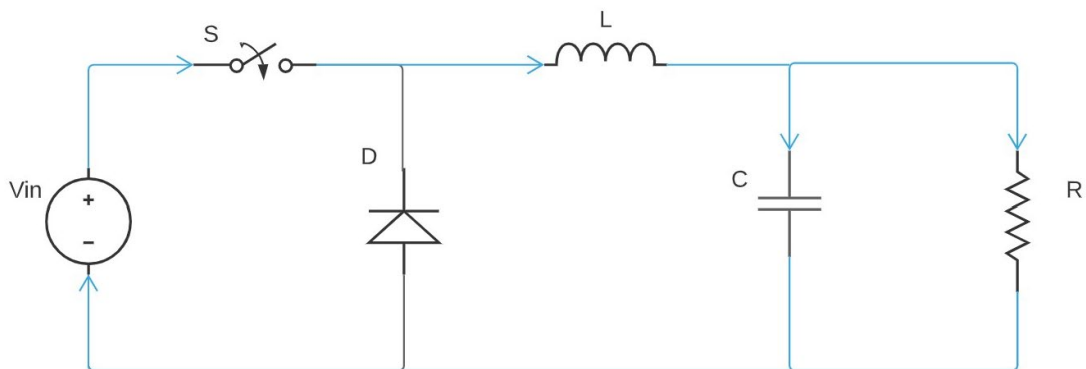


Figura 3.2 – Comportamento do conversor DC-DC *buck* no primeiro modo de funcionamento.

Analisando o presente circuito, verifica-se que o interruptor está fechado ($S = 1$), sendo acionado por um sinal PWM. A corrente começa a fluir desde a fonte, através da bobina, facto esse que tem como consequência o aumento do seu campo magnético à medida que a corrente aumenta. Essa corrente distribui-se entre o condensador (que é carregado) e a carga. Neste primeiro instante, o díodo não está a conduzir, pois o sentido de circulação da corrente leva a que este seja polarizado inversamente. Este modo termina no instante em que o interruptor abre.

- Segundo modo: o interruptor S encontra-se inativo e o diodo D encontra-se diretamente polarizado. Este cenário é apresentado na Figura 3.3.

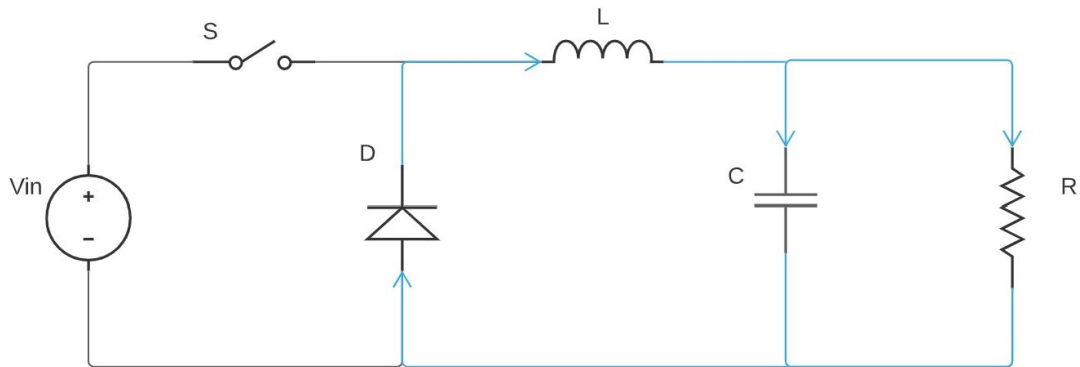


Figura 3.3 – Comportamento do conversor DC-DC *buck* no segundo modo de funcionamento.

Neste modo, o interruptor está aberto ($S = 0$), ou seja, deixa de receber sinal PWM. Neste instante, a fonte deixa de alimentar diretamente a carga. A carga passa a ser alimentada pela corrente armazenada na bobina. A energia previamente acumulada na bobina sustenta o restante circuito, isto é, a corrente flui através do condensador, tendo o retorno através do diodo, que se encontra em condução, passando pela carga. Quando a corrente na bobina se aproxima do valor 0, o condensador passará a ser o principal responsável por fornecer energia à carga, devido ao modo de condução contínua.

O ciclo descrito reinicia no instante em que o interruptor é novamente acionado.

Conversor DC-DC *Boost*

Este tipo de conversor DC-DC tem por objetivo aplicar à carga uma tensão contínua de valor médio superior à tensão da fonte de alimentação. Na Figura 3.4 é apresentada uma topologia básica para este tipo de conversor.

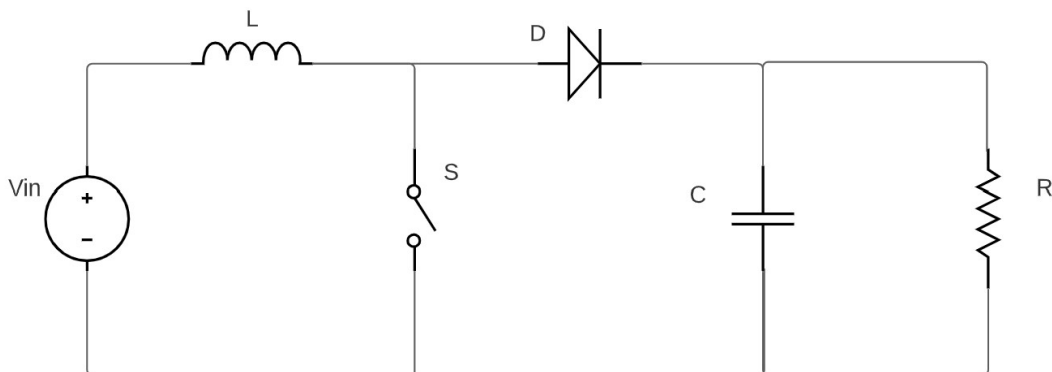


Figura 3.4 – Esquema de um conversor DC-DC *boost*.

Em modo de condução contínua, o ganho deste tipo de conversor é função do *duty cycle*, sendo definido pela expressão apresentada na equação (3.4):

$$G = V_{out}/V_{in} = \frac{1}{1-d} \quad (3.2)$$

Como se pode verificar na Figura 3.4, a estrutura deste conversor consiste numa fonte de tensão DC, que está representada por V_{in} , um semiconductor controlado S , um díodo D , um filtro indutivo L , um filtro capacitivo C e uma carga resistiva R . O seu princípio de funcionamento pode dividir-se em dois modos:

- Primeiro modo: o interruptor S encontra-se à condução e o díodo D encontra-se inversamente polarizado, o que impede a condução de corrente elétrica. Em simultâneo, o condensador está a fornecer energia à carga. Tal acontece por se estar perante a análise do funcionamento do conversor no modo de condução contínua. Este modo de funcionamento encontra-se ilustrado na Figura 3.5.

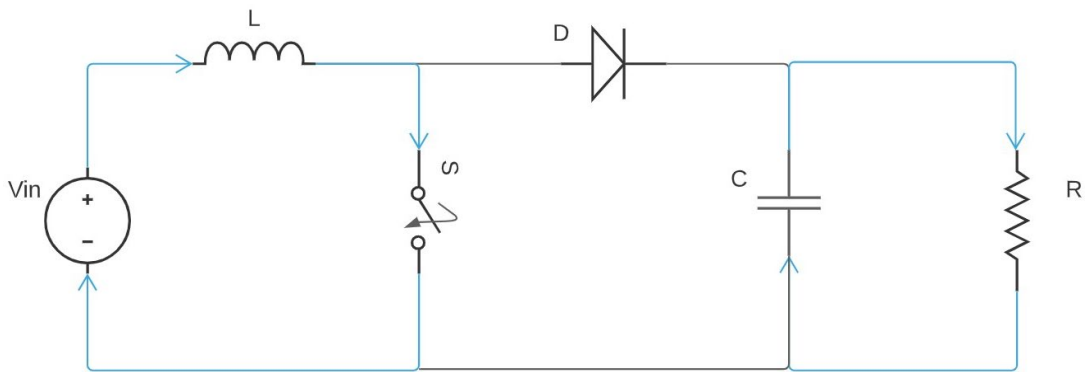


Figura 3.5 – Comportamento do conversor DC-DC *boost* no primeiro modo de funcionamento.

Pode verificar-se que, quando o interruptor é acionado pelo sinal PWM ($S = 1$), a corrente flui através da bobina e do interruptor, pelo facto de o circuito estar fechado. Neste modo, a corrente na bobina aumenta e, por consequência, o seu campo magnético também. Assim, a bobina está a armazenar energia. Este modo termina no instante em que o interruptor abre.

- Segundo modo: o interruptor S encontra-se desligado e o díodo D encontra-se diretamente polarizado, estando, portanto, à condução. A Figura 3.6 apresenta este modo de funcionamento.

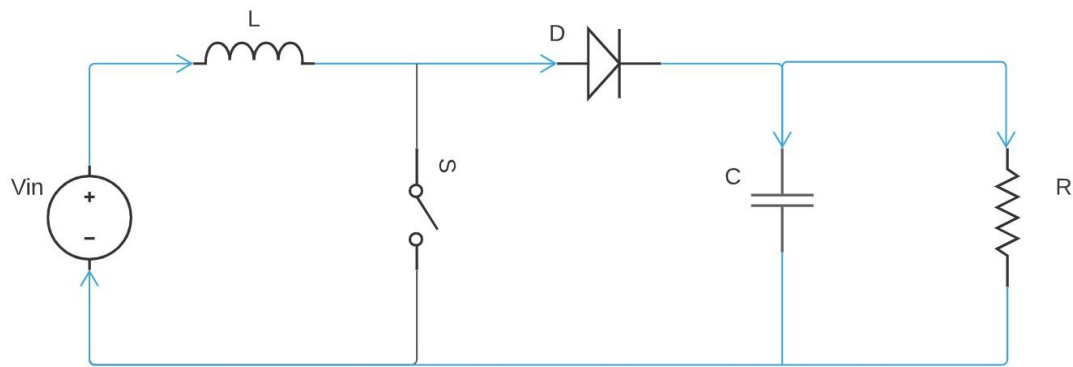


Figura 3.6 – Comportamento do conversor *boost* no segundo modo de funcionamento.

Neste modo, o interruptor é desligado através do sinal PWM ($S = 0$). Como consequência, o diodo está diretamente polarizado, entrando em condução. Assim, a bobina é forçada a descarregar a energia acumulada através do condensador e da carga. Como se está perante o modo de condução contínua, o condensador será responsável por fornecer energia para a carga a partir do instante em que a corrente na bobina se aproxima do valor nulo.

O ciclo descrito acima repete-se a partir do momento em que o interruptor é novamente acionado.

Conversor DC-DC *Boost* Entrelaçado

Ao funcionamento do conversor DC-DC *boost* convencional, como elevador de tensão, pode ser associada a topologia de conversor entrelaçado. Esta topologia resulta da associação de dois ou mais conversores DC-DC *boost*, através da ligação destes em paralelo. Cada conversor *boost* convencional utilizado na implementação do conversor entrelaçado constituirá uma fase deste último conversor. O filtro de saída é partilhado entre as N fases do conversor entrelaçado [30]. Este conversor usa a técnica de intercalação, que consiste em distribuir a potência entre as fases do conversor [31]. Este é um tipo de conversor DC-DC unidirecional e não-isolado.

Estando perante um sistema DC, de potência considerável, em que a maioria das fontes de energia têm uma tensão de saída bastante reduzida, o conversor *boost* entrelaçado é uma opção a considerar [29]. É apresentada, na Figura 3.7, a configuração genérica de um conversor DC-DC *boost* entrelaçado composto por N fases.

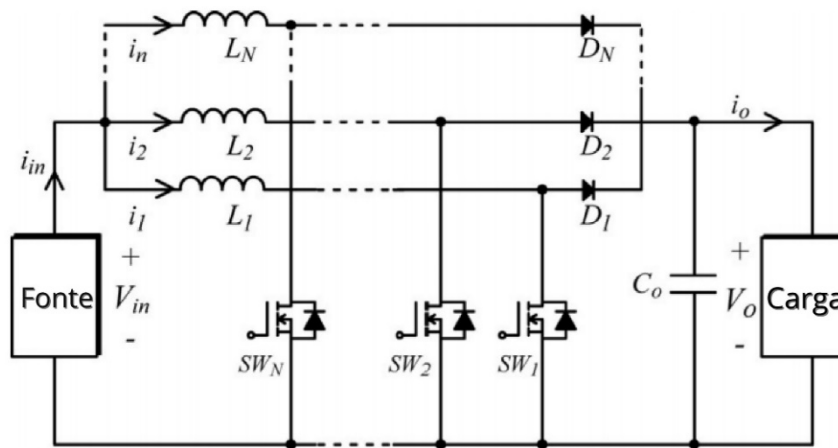


Figura 3.7 – Esquema de um conversor DC-DC *boost* entrelaçado de N fases.

O comando dos interruptores do conversor é efetuado com um determinado ângulo de defasamento, simétrico, entre as fases [30]. A técnica de intercalação é utilizada em aplicações nas quais se deseja ter uma ondulação mínima na corrente de entrada, fazendo com que a frequência de ondulação resultante seja proporcional ao número de fases do conversor [30]. O defasamento a aplicar é determinado com base no número de fases do conversor, sendo calculado através da equação (3.5):

$$\phi = \frac{2\pi}{N} \quad (3.3)$$

É de notar que o defasamento é importante para que as fases do conversor não sejam ligadas e/ou desligadas simultaneamente.

Para perceber o funcionamento deste conversor, e como forma de simplificação, será apresentada seguidamente a configuração de um conversor DC-DC *boost* entrelaçado com duas fases. Tal implica que os interruptores do conversor serão comandados por sinais PWM defasados de 180° entre si. O conversor em análise é apresentado na Figura 3.8.

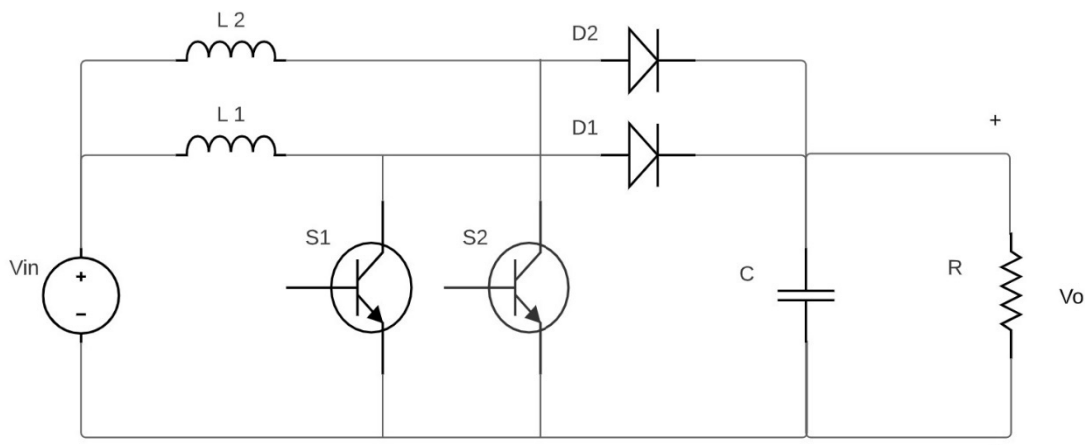


Figura 3.8 – Esquema de um conversor DC-DC *boost* entrelaçado de duas fases.

Na Figura 3.8, V_{in} representa a fonte de tensão de entrada DC, comum às duas fases, V_o representa a saída do conversor, L_1 , D_1 e S_1 representam o ramo do primeiro conversor/fase, enquanto L_2 , D_2 e S_2 representam o ramo do segundo conversor/fase. À saída do conversor, encontram-se um filtro capacitivo C e uma carga resistiva R . O modo de funcionamento é mais complexo, se comparado com o conversor *boost* convencional, e divide-se nos quatro modos abaixo indicados:

- Modo 1: Ocorre quando S_1 se encontra ligado e S_2 se encontra desligado;
- Modo 2: Ocorre quando S_1 se encontra desligado e S_2 permanece desligado;
- Modo 3: Ocorre quando S_1 se mantém desligado e S_2 se encontra ligado;
- Modo 4: Ocorre quando S_1 e S_2 se encontram desligados.

Descrevem-se, seguidamente, as condições observadas em cada um dos referidos modos de funcionamento.

No modo 1, o interruptor S_1 encontra-se ativo e o díodo D_1 encontra-se inversamente polarizado. A fonte de tensão fornece energia à bobina L_1 , resultando assim no aumento progressivo da corrente, que também flui através de S_1 . Em simultâneo, a bobina L_2 está a fornecer energia para a carga, através do díodo D_2 , que se encontra à condução por estar diretamente polarizado. Uma representação para este modo de funcionamento é apresentada na Figura 3.9.

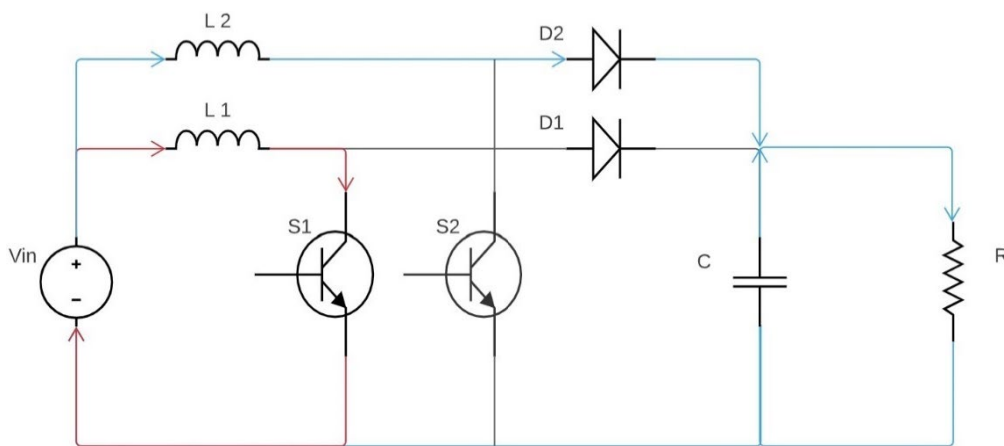


Figura 3.9 – Comportamento do conversor DC-DC *boost* entrelaçado no modo 1 de funcionamento.

No modo 2, o interruptor S_1 encontra-se ao corte, enquanto os díodos D_1 e D_2 se encontram em condução. As bobinas L_1 e L_2 descarregam a energia acumulada e fornecem-na à carga, resultando na redução progressiva da corrente que flui através das mesmas. Este modo de funcionamento é representado na Figura 3.10.

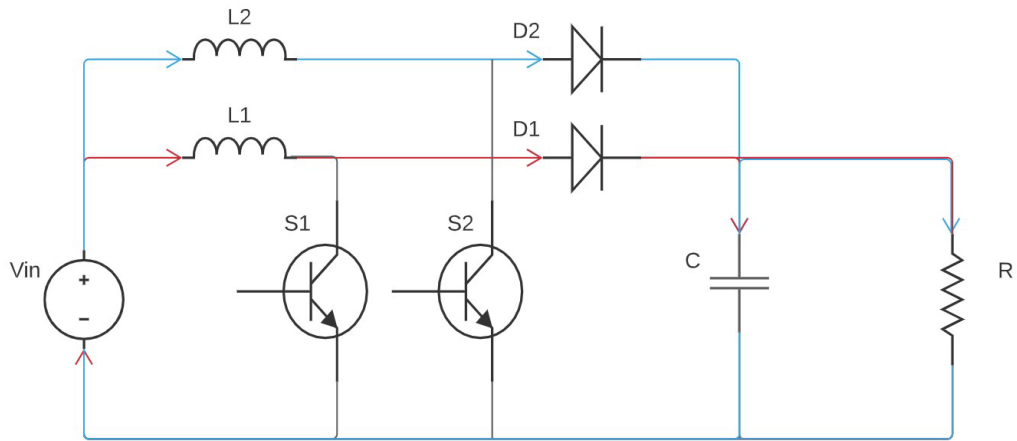


Figura 3.10 – Comportamento do conversor DC-DC *boost* entrelaçado no modo 2 de funcionamento.

No modo 3, o interruptor S_2 encontra-se ativo e o diodo D_1 encontra-se diretamente polarizado. Neste modo, a bobina L_1 é forçada a fornecer energia à carga, enquanto a fonte fornece energia à bobina L_2 , através de S_2 . Por consequência disso, D_2 está inversamente polarizado. A representação deste modo de funcionamento é apresentada na Figura 3.11.

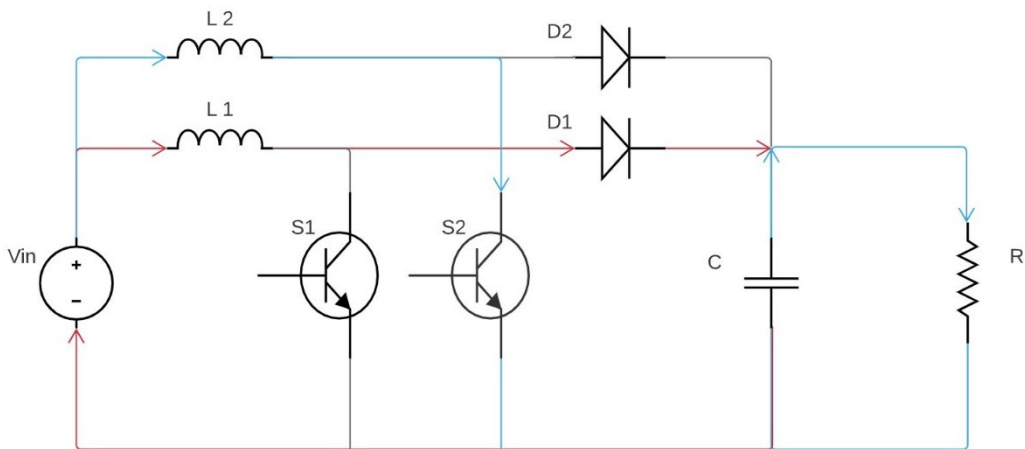


Figura 3.11 – Comportamento do conversor DC-DC *boost* entrelaçado no modo 3 de funcionamento.

O modo 4 é semelhante ao modo de funcionamento 2, pois ambos os diodos se encontram em condução. Ao mesmo tempo, a energia que foi armazenada nas bobinas é entregue à carga. A sua representação encontra-se na Figura 3.12.

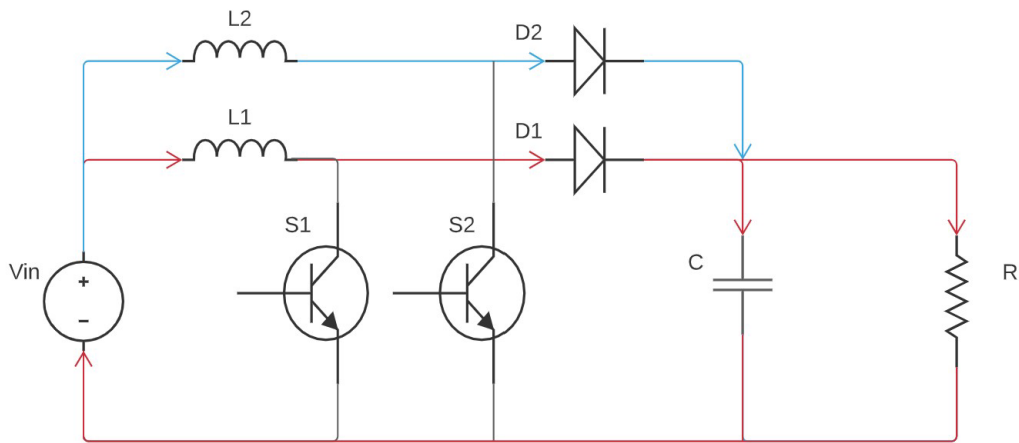


Figura 3.12 – Comportamento do conversor DC-DC *boost* entrelaçado no modo 4 de funcionamento.

A utilização desta topologia assume particular interesse em aplicações que envolvam elevados valores de corrente de entrada no conversor [30], [32], dado que a corrente de entrada do conversor é dividida igualmente entre as fases [32]. Dessa forma, é possível utilizar componentes com capacidades elétricas reduzidas e de custo reduzido [30]. Este facto proporciona ganhos importantes em termos de rendimento global do conversor, que por sua vez se traduz em menor *stress* térmico aplicado aos semicondutores e aos restantes elementos do conversor.

Conversor DC-DC *Boost* Multinível

Os conversores multinível são sistemas reversíveis de conversão de energia elétrica, adequados ao processamento de valores elevados de potência (podem atingir a ordem dos MW), úteis em aplicações como a transmissão de energia em DC ou a tração elétrica [33]. São sistemas de conversão de energia compostos por uma matriz de semicondutores de potência e condensadores que, quando devidamente interligados e controlados, podem gerar uma forma de onda de tensão de vários níveis, com frequência, fase e amplitude controláveis, através da comutação adequada dos semicondutores de potência [34].

O número de níveis do conversor pode ser definido como o número de valores de tensão DC, que pode ser gerado pelo conversor entre o terminal de saída e o terminal de referência dentro do conversor [34]. Nesta secção, será analisada uma topologia do conversor DC-DC do tipo *boost* unidirecional para três níveis, em que o fluxo ocorre apenas desde a fonte de tensão até à carga, sendo que os semicondutores presentes na sua configuração são acionados pelos sinais PWM, que se encontram desfasados de 180° entre si. O ganho estático deste conversor é dado pela equação (3.6).

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 - d} \quad (3.4)$$

Já o desfasamento a aplicar entre os sinais PWM de controlo deste conversor é calculado a partir da equação (3.7).

$$\phi = \frac{2\pi}{N-1} \quad (3.5)$$

A topologia do conversor *boost* de três níveis é apresentada na Figura 3.13.

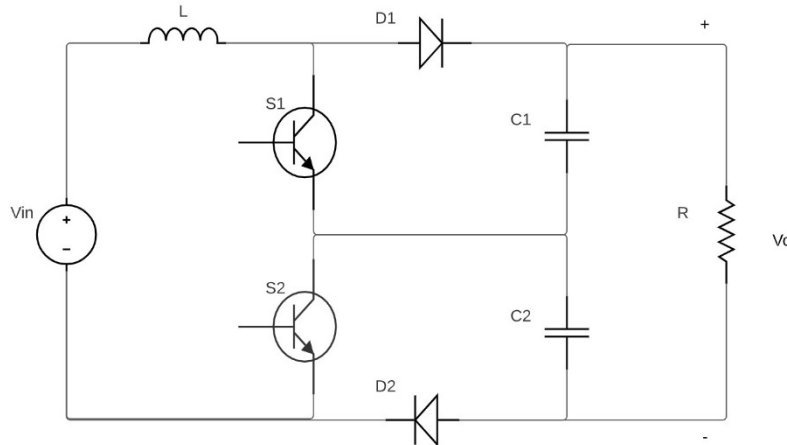


Figura 3.13 – Esquema de um conversor DC-DC *boost* de três níveis.

Analisando o esquema elétrico do conversor DC-DC *boost* multinível, verifica-se que este é formado por uma fonte de tensão DC V_{in} , uma carga indutiva L , dois semicondutores S_1 e S_2 , dois díodos D_1 e D_2 , duas cargas capacitivas C_1 e C_2 e uma carga com uma tensão de saída do circuito V_o . O funcionamento deste conversor pode ser dividido em quatro modos, indicados a seguir:

- Modo 1: Ocorre quando S_1 se encontra ligado e S_2 se encontra desligado;
- Modo 2: Ocorre quando S_1 se encontra desligado e S_2 permanece desligado;
- Modo 3: Ocorre quando S_1 se mantém desligado e S_2 se encontra ligado;
- Modo 4: Ocorre quando S_1 e S_2 se encontram desligados.

Descrevem-se, seguidamente, as condições observadas em cada um dos referidos modos de funcionamento.

No modo 1, o interruptor S_1 encontra-se ativo e o díodo D_1 encontra-se inversamente polarizado, ao passo que o díodo D_2 encontra-se em condução. A fonte de tensão está a fornecer energia para a bobina L , resultando no aumento progressivo da corrente da mesma, através de S_1 . Ao mesmo tempo, o condensador C_2 carrega, enquanto o condensador C_1 está a fornecer energia para a carga. Uma representação para este modo de funcionamento é apresentada na Figura 3.14.

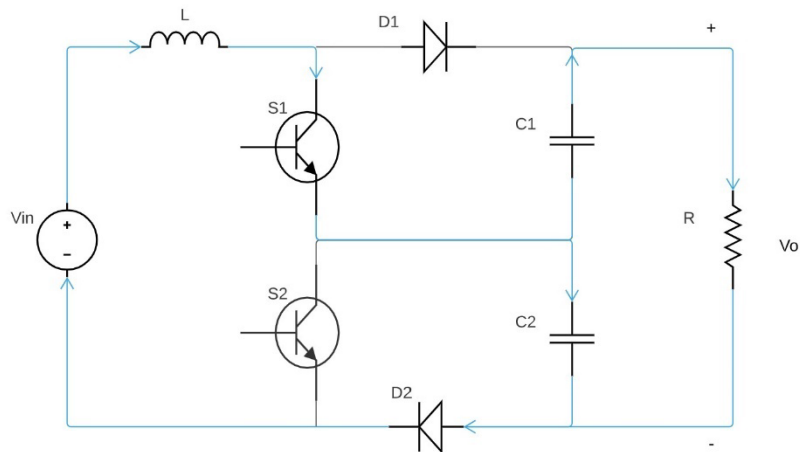


Figura 3.14 – Comportamento do conversor DC-DC *boost* de três níveis no modo 1 de funcionamento.

No modo 2, os interruptores S_1 e S_2 encontram-se ao corte e os díodos D_1 e D_2 encontram-se em condução. A bobina L descarrega a energia acumulada para a carga, resultando na redução progressiva da corrente através da mesma. Assim, o fluxo de corrente ocorre desde a bobina L , através do diodo D_1 , passando pelos condensadores C_1 e C_2 e para a carga. Este modo de funcionamento pode ser visualizado na Figura 3.15.

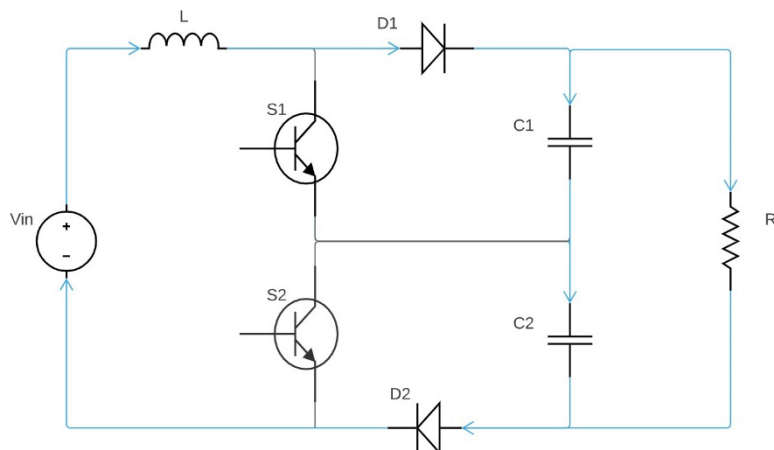


Figura 3.15 – Comportamento do conversor DC-DC *boost* de três níveis no modo 2 de funcionamento.

Ao longo do modo 3, o interruptor S_2 encontra-se ativo e os díodos D_1 e D_2 encontram-se diretamente polarizados. O fluxo de corrente ocorre desde a bobina L , pois é forçada a fornecer energia à carga, através do diodo D_1 . Simultaneamente, o condensador C_1 carrega e o C_2 descarrega. Parte da energia armazenada na bobina é fornecida para a carga. A representação deste modo de funcionamento é apresentada na Figura 3.16.

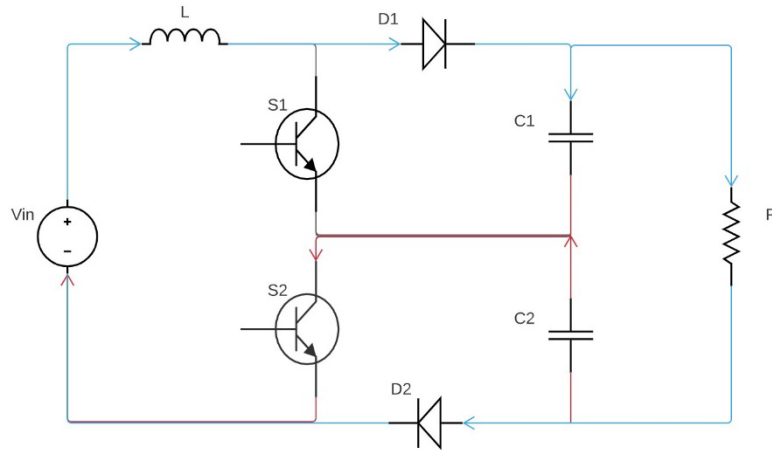


Figura 3.16 – Comportamento do conversor DC-DC *boost* de três níveis no modo 3 de funcionamento.

No modo 4, o interruptor S_2 encontra-se ao corte e os díodos D_1 e D_2 encontram-se em condução. A bobina L fornece energia à carga, sendo que o fluxo de corrente ocorre desde a bobina L , através do díodo D_1 , para os condensadores C_1 e C_2 e para a carga, com retorno pelo díodo D_2 . Este modo de funcionamento pode ser visualizado na Figura 3.17.

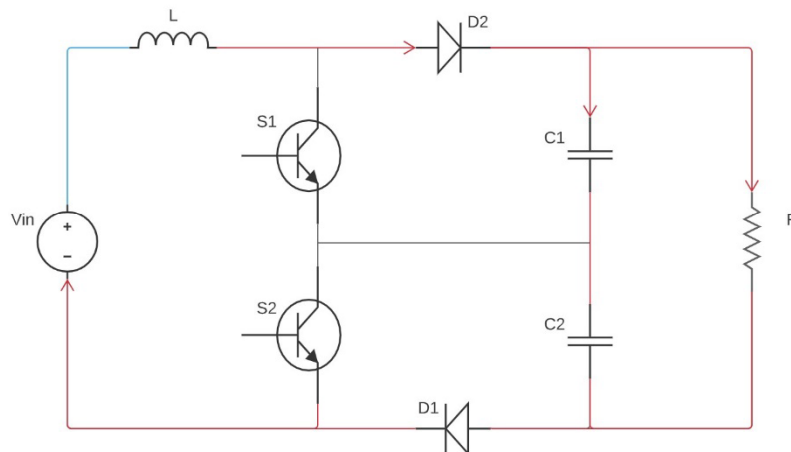


Figura 3.17 – Comportamento do conversor DC-DC *boost* de três níveis no modo 4 de funcionamento.

O conversor realiza a operação em múltiplos níveis, com o intuito de efetuar a divisão da tensão. A configuração da saída permite a alteração direta para uma tensão simétrica, com a comutação adequada dos semicondutores. No caso do conversor de três níveis, os condensadores de saída são carregados com metade da tensão do barramento DC de saída, denotadas como V_{o1} e V_{o2} :

$$V_{o1} = \frac{V_{out}}{2} \quad (3.6)$$

$$V_{o2} = \frac{V_{out}}{2} \quad (3.7)$$

O valor da tensão dos condensadores de saída corresponde a metade da tensão total de saída V_{out} , por se tratar de um conversor DC-DC *boost* de três níveis. Tal denominação

para o conversor justifica-se pelo facto de o valor da tensão de saída poder ser controlada para três níveis de tensão diferentes.

Conversores DC-DC Bidirecionais

Um conversor DC-DC bidirecional é definido como sendo um sistema que transforma um determinado valor de tensão DC de entrada em um valor de tensão DC à sua saída, podendo essa tensão ser superior ou inferior ao valor de tensão de entrada. Tem a particularidade de permitir o fluxo de potência entre a entrada e a saída, e vice-versa [8].

Em termos construtivos, a principal diferença entre este tipo de conversores e os conversores unidirecionais reside na substituição dos díodos, presentes nas configurações dos conversores unidirecionais, por dispositivos semicondutores controlados, presentes nas configurações dos conversores bidirecionais. Assim, abre-se a possibilidade para que o fluxo de corrente tenha sentido contrário, ou seja, que possa também ser efetuado da saída para a entrada [8], [26]. Os conversores DC-DC bidirecionais mais básicos, de um modo geral, derivam dos conversores DC-DC *buck* e DC-DC *boost* [8].

Conversor DC-DC *Buck-Boost* Bidirecional

O conversor DC-DC *buck-boost* bidirecional resulta da combinação dos conversores DC-DC *buck* e DC-DC *boost* convencionais, anteriormente abordados. Este é um tipo de conversor bidirecional, pois o fluxo de corrente pode ocorrer em ambos os sentidos. Tal como qualquer outro tipo de conversor DC-DC, o objetivo principal é de converter um determinado valor de tensão DC num outro valor médio, que pode ser mais reduzido ou mais elevado. A Figura 3.18 apresenta o esquema de um conversor DC-DC *buck-boost* bidirecional.

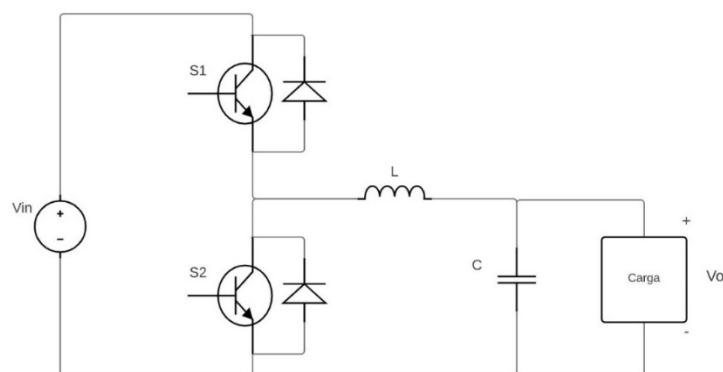


Figura 3.18 – Esquema de um conversor DC-DC *buck-boost* bidirecional.

Em modo de condução contínua, o ganho para este tipo de conversor é dado pela expressão apresentada na equação (3.10):

$$G = \frac{d}{1-d} \quad (3.8)$$

No esquema apresentado na Figura 3.18, pode verificar-se que o conversor é constituído por uma fonte de alimentação DC V_{in} , dois semicondutores controlados S_1 e S_2 , cada um deles com um diodo em antiparalelo integrado na sua estrutura, um filtro indutivo L , um filtro capacitivo C e uma carga à qual é aplicada a tensão de saída do circuito V_o . O circuito é construído de maneira a ser possível o fluxo de corrente em dois sentidos. O funcionamento deste conversor pode ser dividido em dois modos:

- Modo 1: o funcionamento como *buck*, em que a corrente flui da fonte para a carga;
- Modo 2: o funcionamento como *boost*, em que a corrente flui da carga para a fonte.

Modo 1 – Funcionamento como *buck*

Neste modo, o conversor atua como o conversor DC-DC *buck* unidirecional convencional, tendo apenas o fluxo de corrente desde a fonte até à carga. Para se obter este modo de funcionamento, implica que o semicondutor S_2 seja mantido permanentemente desligado. Assim, o semicondutor a ser comandado é o S_1 . Este circuito possui dois estados de funcionamento:

- Estado 1: o semicondutor S_1 encontra-se em condução e o diodo em antiparalelo com o semicondutor S_2 encontra-se inversamente polarizado.
- Estado 2: o semicondutor S_1 encontra-se ao corte e o diodo em antiparalelo com o semicondutor S_2 encontra-se diretamente polarizado.

No estado 1, o semicondutor S_1 encontra-se em condução e o diodo em antiparalelo com o semicondutor S_2 encontra-se inversamente polarizado. Desta forma, a fonte de alimentação fornece energia para a bobina, para o condensador e para a carga, enquanto o diodo em antiparalelo com S_2 se encontra inversamente polarizado, conforme representado na Figura 3.19.

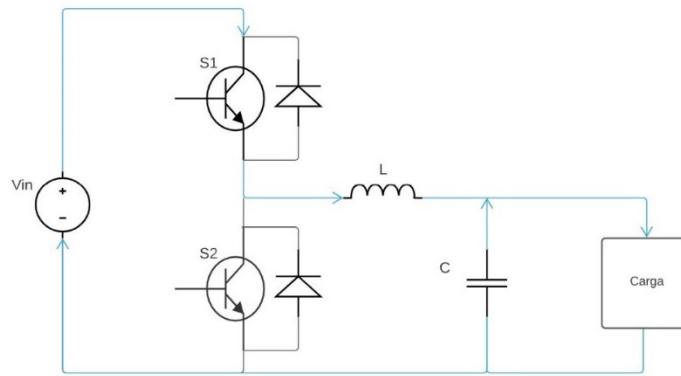


Figura 3.19 – Comportamento do conversor DC-DC *buck-boost* bidirecional no estado 1 do seu funcionamento como *buck*.

No estado 2, o semicondutor S_1 não se encontra em condução e o díodo em antiparalelo com o semicondutor S_2 encontra-se diretamente polarizado. A bobina passa a fornecer a energia acumulada para a carga e para o condensador (o condensador está a carregar). A Figura 3.20 representa este estado de funcionamento, bem como o sentido do fluxo de corrente.

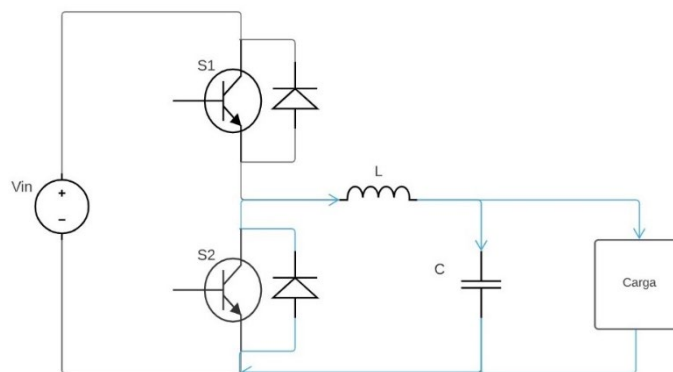


Figura 3.20 – Comportamento do conversor DC-DC *buck-boost* bidirecional no estado 2 do seu funcionamento como *buck*.

Modo 2 – Funcionamento como *boost*

Para que se observe o fluxo de energia da carga para a fonte, este conversor assumirá o funcionamento como o conversor DC-DC *boost* convencional. O semicondutor S_1 deve permanecer desligado, passando o semicondutor S_2 a ser controlado. Desta forma, o circuito possui dois estados de funcionamento:

- Estado 1: o semicondutor S_2 encontra-se em condução e o díodo em antiparalelo com S_1 encontra-se inversamente polarizado.

- Estado 2: o semicondutor S_2 encontra-se ao corte e o díodo em antiparalelo com S_1 encontra-se diretamente polarizado.

No modo 1, o semicondutor S_2 encontra-se em condução e o díodo em antiparalelo com S_1 encontra-se inversamente polarizado. Desta forma, a corrente flui desde o condensador (condensador está a descarregar) e a carga, passando pela bobina através do semicondutor S_2 , como apresentado na Figura 3.21.

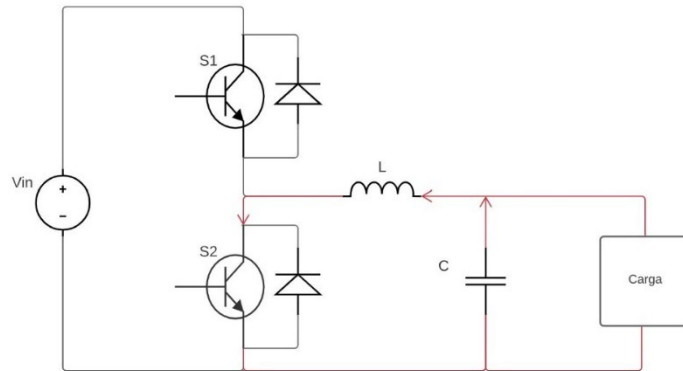


Figura 3.21 – Comportamento do conversor DC-DC *buck-boost* bidirecional no estado 1 do seu funcionamento como *boost*.

No modo 2, o semicondutor S_2 encontra-se ao corte e o díodo em antiparalelo com S_1 encontra-se diretamente polarizado, o que permite que o fluxo de corrente seja realizado desde o condensador e a carga (que nesta situação pode ser designada como fonte, por fornecer energia) até à fonte de alimentação (que é agora a carga, por receber energia), através da bobina e do díodo em antiparalelo com S_1 . Este estado de funcionamento é representado na Figura 3.22.

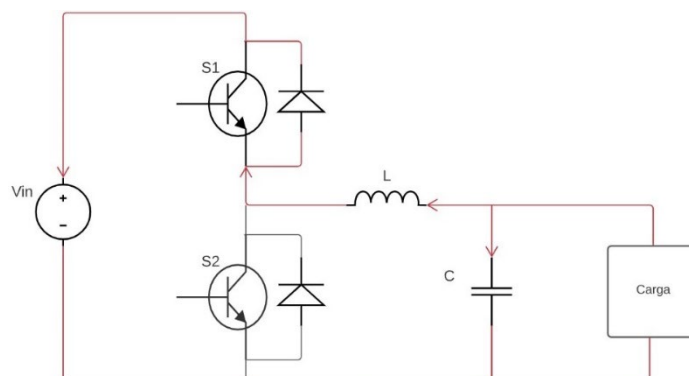


Figura 3.22 – Comportamento do conversor DC-DC *buck-boost* bidirecional no estado 2 do seu funcionamento como *boost*.

Conversor DC-DC Entrelaçado Bidirecional

Como já foi definido, os conversores DC-DC entrelaçados resultam da ligação de vários conversores convencionais em paralelo, sendo que o filtro de saída é compartilhado pelas N fases. A comutação entre fases é efetuada com um determinado ângulo de defasamento, que no caso do conversor de duas fases é de 180° .

Sendo que se trata de um conversor bidirecional, o conversor DC-DC entrelaçado bidirecional resultará da associação entre o conversor DC-DC bidirecional (*buck-boost*) e o conversor DC-DC entrelaçado. Assim, para construir um conversor DC-DC entrelaçado bidirecional com duas fases, serão usados dois módulos de conversores *buck-boost* bidirecional ligados em paralelo. Quando o fluxo de corrente ocorre desde a fonte até à carga, o conversor encontra-se a operar em modo *buck*; quando a corrente flui desde a carga até à fonte, o conversor encontra-se a operar em modo *boost*. Um exemplo para este tipo de conversor é apresentado na Figura 3.23.

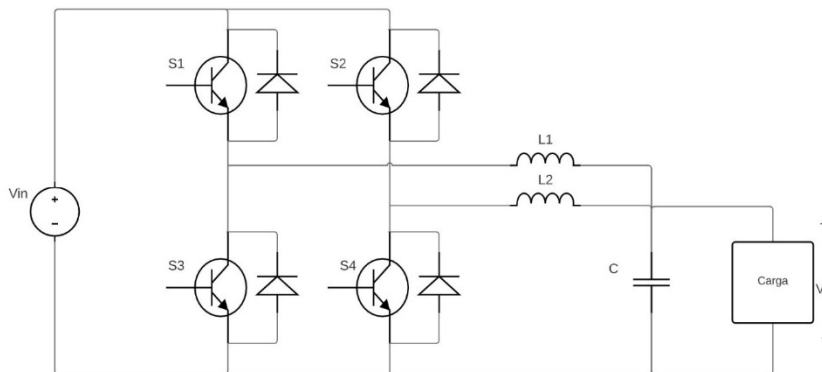


Figura 3.23 – Esquema de um conversor DC-DC entrelaçado bidirecional com duas fases [32].

Na Figura 3.23, V_{in} representa a fonte de tensão de entrada e V_o representa a tensão de saída do conversor. O conversor é também constituído por um filtro capacitivo C e uma carga resistiva R . O funcionamento do conversor em modo *buck* é assegurado pelos componentes (S_1, L_1 e D_{S_3}) e (S_2, L_2 e D_{S_4}). Já o funcionamento do conversor em modo *boost* é assegurado pelos componentes (S_3, L_1 e D_{S_1}) e (S_4, L_2 e D_{S_2}). Ambos os modos de operação do conversor DC-DC entrelaçado bidirecional são apresentados e detalhados a seguir.

Modo 1 – Funcionamento como *buck*

Para que o conversor entrelaçado atue como *buck* (abaixador de tensão), é necessário que os semicondutores S_1 e S_2 se encontrem sob a atuação do sinal PWM, enquanto os semicondutores S_3 e S_4 se encontram desligados. Este modo implica que a fonte forneça energia para a carga (a bateria está a carregar). Os semicondutores S_1 e S_2 são comutados

através da aplicação de sinais PWM que se encontram desfasados de 180° entre si [32]. Para analisar os estados de funcionamento do conversor, e para simplicidade, assume-se que os sinais PWM aplicados a S_1 e S_2 têm *duty cycle* igual a 0,5, sendo por isso complementares entre si. Nestas condições, o conversor entrelaçado apresenta dois estados de funcionamento:

- Estado 1: o semicondutor S_1 encontra-se ligado e o semicondutor S_2 encontra-se desligado.
- Estado 2: o semicondutor S_1 encontra-se desligado e o semicondutor S_2 encontra-se ligado.

No estado 1, S_1 encontra-se ativo e o diódo em antiparalelo com S_3 encontra-se inversamente polarizado. Como a fonte está a fornecer energia à carga (bateria), verifica-se que a corrente passa pela bobina L_1 , pelo condensador C e pela carga. Enquanto isso, o semicondutor S_2 encontra-se inativo e o diódo em antiparalelo com S_4 encontra-se diretamente polarizado, o que leva a que a corrente atravessasse a bobina L_2 , o condensador C e a carga (bateria) – Figura 3.24.

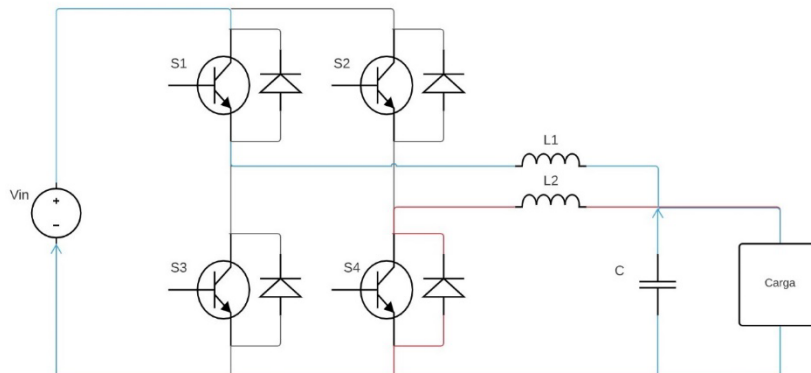


Figura 3.24 – Comportamento do conversor DC-DC entrelaçado bidirecional no estado 1 do seu funcionamento como *buck*.

No estado 2, S_1 encontra-se inativo e o diódo em antiparalelo com S_3 encontra-se diretamente polarizado. A corrente flui desde a bobina L_1 , passando pelo condensador C e pela carga (bateria) através do diódo em antiparalelo em S_3 . O semicondutor S_2 encontra-se ativo e o diódo em antiparalelo com S_4 encontra-se inversamente polarizado. A corrente flui desde a fonte até à carga através da bobina L_2 para o condensador C e para a carga (bateria) – Figura 3.25.

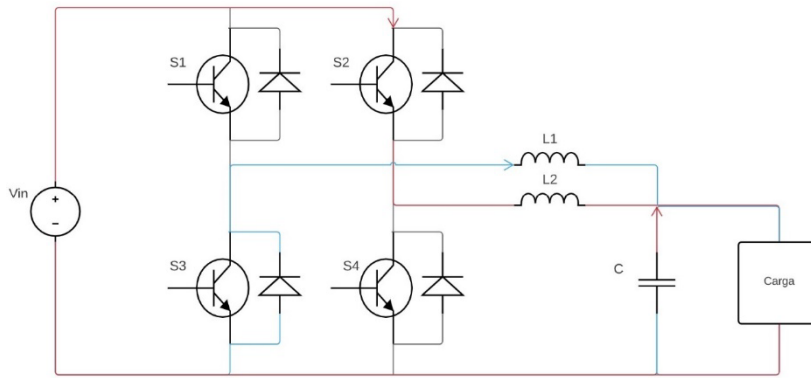


Figura 3.25 – Comportamento do conversor DC-DC entrelaçado bidirecional no estado 2 do seu funcionamento como *buck*.

Modo 2 – Funcionamento como *boost*

Para que o conversor entrelaçado atue como *boost* (elevador de tensão), é necessário que os semicondutores S_3 e S_4 se encontrem sob o comando de um sinal PWM, enquanto os semicondutores S_1 e S_2 se encontram desligados. Este modo leva ao descarregamento da bateria, isto é, a corrente flui desde a carga até à fonte de alimentação. Os semicondutores S_3 e S_4 são atuados pelos sinais PWM, desfasados de 180° entre si. Também na análise deste modo, é assumido que os sinais PWM aplicados a S_3 e S_4 têm *duty cycle* igual a 0.5. Neste modo, o conversor apresenta dois estados de funcionamento:

- Estado 1: o semicondutor S_3 encontra-se ligado e o semicondutor S_4 encontra-se desligado.
- Estado 2: o semicondutor S_3 encontra-se desligado e o semicondutor S_4 encontra-se ligado.

No primeiro estado, em que S_3 se encontra ativo, pode facilmente verificar-se que a corrente flui desde o condensador C e da carga (bateria), passando pela bobina L_1 e por S_3 , até atingir a fonte. Enquanto isso, o semicondutor S_4 encontra-se inativo e o diodo em antiparalelo com S_2 encontra-se diretamente polarizado; a corrente flui desde o condensador C e da carga (bateria), passando pela bobina L_2 e pelo diodo em antiparalelo com S_2 , D_{S_2} , até à fonte. Este estado encontra-se ilustrado na Figura 3.26.

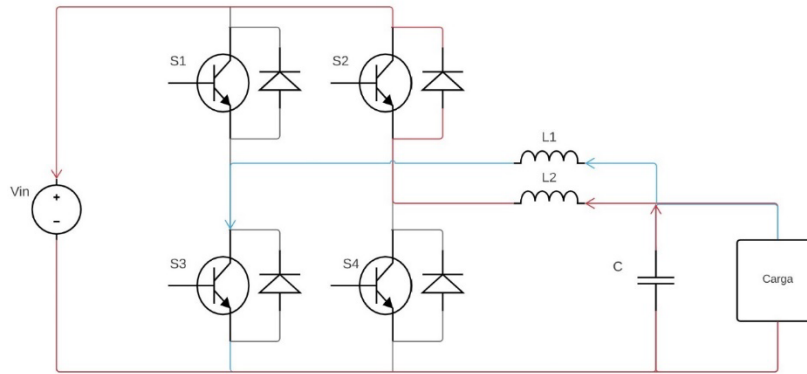


Figura 3.26 – Comportamento do conversor DC-DC entrelaçado bidirecional no estado 1 do seu funcionamento como *boost*.

No segundo estado, S_3 encontra-se inativo e o díodo em antiparalelo com S_1 encontra-se diretamente polarizado. Verifica-se, também, que a corrente flui desde o condensador C e da carga (bateria), passando pela bobina L_1 e pelo díodo em antiparalelo com S_1 até à fonte. O semicondutor S_4 encontra-se ativo e o díodo em antiparalelo com S_2 está inversamente polarizado. A corrente flui pelo condensador C , pela carga (bateria) e pela bobina L_2 , através de S_4 . Este estado é representado na Figura 3.27.

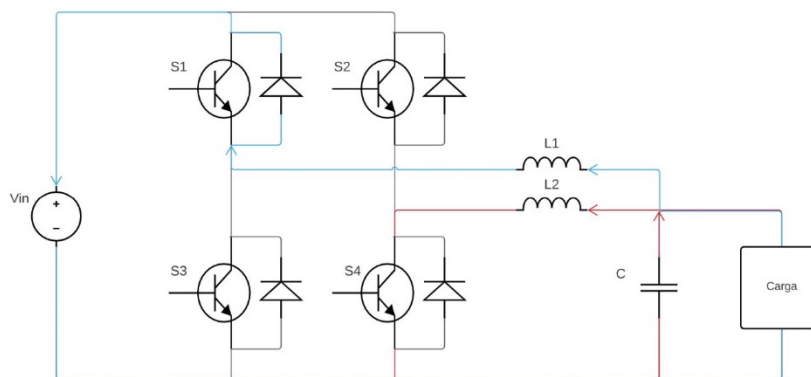


Figura 3.27 – Comportamento do conversor DC-DC entrelaçado bidirecional no estado 2 do seu funcionamento como *boost*.

É de notar que, para os presentes cenários, quer em funcionamento do conversor em modo *buck*, quer em modo *boost*, existem intervalos de tempo em que o condensador se encontra em carregamento e outros em que o mesmo se encontra em descarregamento, conforme apresentado na Figura 3.24 a Figura 3.27.

Conversor DC-DC Multinível Bidirecional

O conversor DC-DC multinível bidirecional é uma geração de conversores bidirecionais apta para produzir N níveis de tensão. O controlo do fluxo de corrente é efetuado através do controlo apropriado dos semicondutores presentes na configuração do conversor.

Por se tratar de um conversor bidirecional, será então associada a topologia de funcionamento do conversor DC-DC bidirecional (*buck-boost*) à topologia do conversor DC-DC multinível. Neste caso, serão associados dois módulos de conversores *buck-boost* em cascata (série). Nesta configuração, o fluxo de corrente ocorre desde a fonte até à carga, quando o conversor se encontra a operar em modo *buck*; quando a corrente flui desde a carga até a fonte, o conversor encontra-se a operar em modo *boost*. A estrutura típica de um conversor DC-DC com três níveis, é apresentada na Figura 3.28.

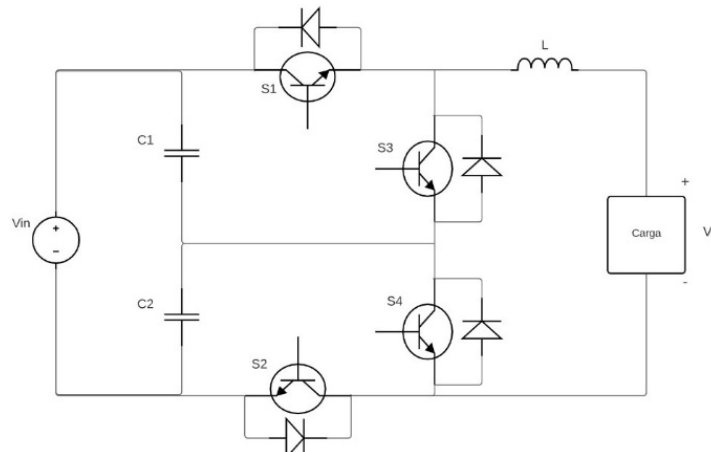


Figura 3.28 – Esquema de um conversor DC-DC de três níveis bidirecional.

O ganho deste tipo de conversor é apresentado pela equação (3.11):

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 - d} \quad (3.9)$$

Analisando o circuito característico para este conversor representado na Figura 3.28, verifica-se que o mesmo é composto por uma fonte de tensão DC V_{in} , quatro semicondutores ativos S_1, S_2, S_3 e S_4 , uma carga indutiva L , duas cargas capacitivas C_1 e C_2 , a carga do conversor (que nesta situação é uma bateria, o alvo de estudo nesta dissertação) e V_o representa a tensão de saída do conversor. O funcionamento deste conversor pode ser dividido em dois modos:

- Modo 1: o funcionamento como *buck*, em que a corrente flui da fonte para a carga;
- Modo 2: o funcionamento como *boost*, em que a corrente flui da carga para a fonte.

Todos os componentes do conversor são envolvidos no funcionamento do conversor, quer em modo *buck*, quer em modo *boost*. Ambos os modos de operação para o conversor DC-DC de três níveis bidirecional são apresentados a seguir.

Modo 1 – Funcionamento como *buck*

Para obter o funcionamento em modo *buck* (abaixador de tensão), é necessário que os semicondutores S_1 e S_2 estejam sob o comando do sinal PWM. Este modo implica que o

fluxo de corrente ocorra desde a fonte de tensão até à carga (a bateria está a carregar), como se pode observar na Figura 3.29. Os semicondutores S_1 e S_2 são comutados através dos sinais PWM, que se encontram desfasados de 180° entre si [32], [35]. Para analisar os estados de funcionamento do conversor, e para simplicidade, assume-se que os sinais PWM aplicados a S_1 e S_2 têm o *duty cycle* igual a 0.5, sendo por isso complementares entre si. Assim, neste modo, o conversor multinível possui dois estados de funcionamento:

- Estado 1: o semicondutor S_1 encontra-se ligado e o semicondutor S_2 encontra-se desligado.
- Estado 2: o semicondutor S_2 encontra-se ligado e o semicondutor S_1 encontra-se desligado.

No estado 1, S_1 encontra-se ativo e o díodo em antiparalelo com S_4 encontra-se diretamente polarizado. A corrente flui desde a fonte de tensão, descrevendo o percurso definido pelo interruptor S_1 , a bobina L , a carga, o díodo em antiparalelo com S_4 e o condensador C_2 .

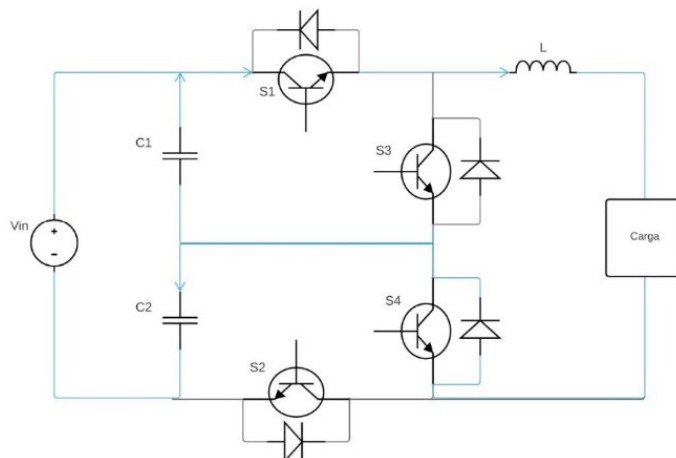


Figura 3.29 – Comportamento do conversor DC-DC de três níveis bidirecional no estado 1 do seu funcionamento como *buck*.

No estado 2, S_2 encontra-se ativo e o díodo em antiparalelo com S_3 encontra-se diretamente polarizado. A corrente flui desde a fonte de tensão, carregando o condensador C_1 . Estabelece-se o percurso definido pelo díodo em antiparalelo com o interruptor S_3 , a bobina L , a carga e o semicondutor S_2 . O condensador C_2 encontra-se em descarregamento (Figura 3.30).

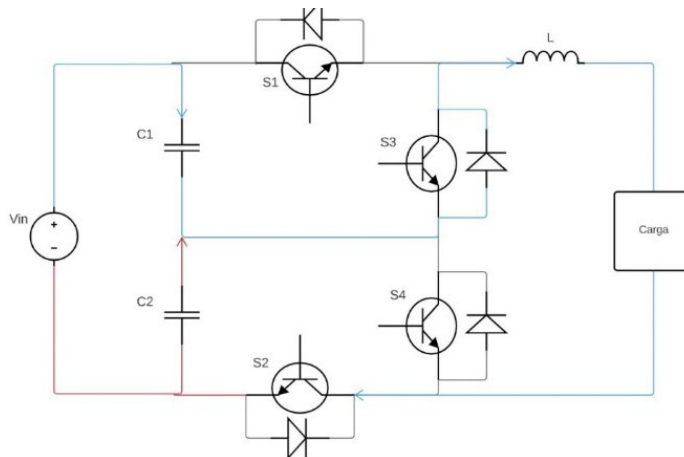


Figura 3.30 – Comportamento do conversor DC-DC de três níveis bidirecional no estado 2 do seu funcionamento como *buck*.

Modo 2 – Funcionamento como *Boost*

Para o conversor multinível atuar como um conversor *boost* (elevador de tensão), é necessário que os semicondutores S_3 e S_4 se encontrem sob o comando de um sinal PWM. Este modo implica que a bateria se encontre em descarga, isto é, a corrente flui desde a carga até à fonte de alimentação, assegurando assim o funcionamento bidirecional do conversor. Os semicondutores são atuados pelos sinais PWM desfasados de 180° entre si. Também na análise deste modo, é assumido que os sinais PWM aplicados a S_3 e S_4 têm o *duty cycle* igual a 0.5. Neste modo, o conversor apresenta dois estados de funcionamento:

- Estado 1: o semicondutor S_3 encontra-se ligado e o semicondutor S_4 encontra-se desligado.
- Estado 2: o semicondutor S_4 encontra-se ligado e o semicondutor S_3 encontra-se desligado.

No primeiro estado, sendo que S_3 se encontra ativo, pode facilmente verificar-se que a corrente flui desde a carga, passando pela bobina L , através do semicondutor S_3 , do condensador C_1 , pela carga, regressando pelo diodo em antiparalelo com S_2 . O condensador C_1 encontra-se em descarregamento de energia, enquanto o condensador C_2 carrega – Figura 3.31.

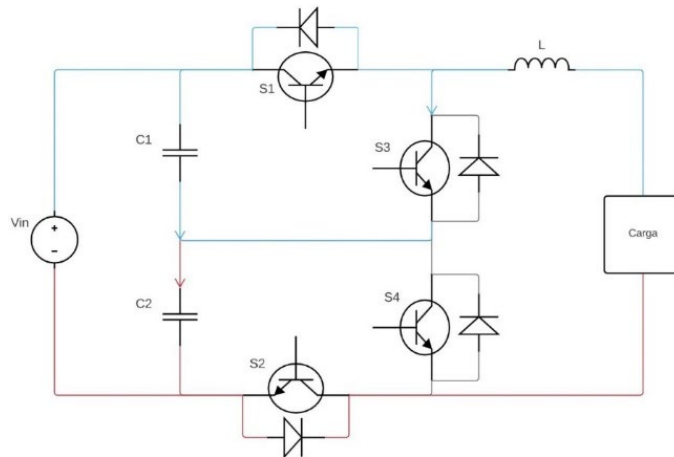


Figura 3.31 – Comportamento do conversor DC-DC de três níveis bidirecional no estado 1 do seu funcionamento como *boost*.

No segundo estado, S_4 encontra-se ativo e o diodo em antiparalelo de S_1 encontra-se diretamente polarizado. A corrente flui desde a carga, passando pela bobina L , o diodo em antiparalelo com S_1 , a fonte, o condensador C_2 e o semicondutor S_4 (Figura 3.32).

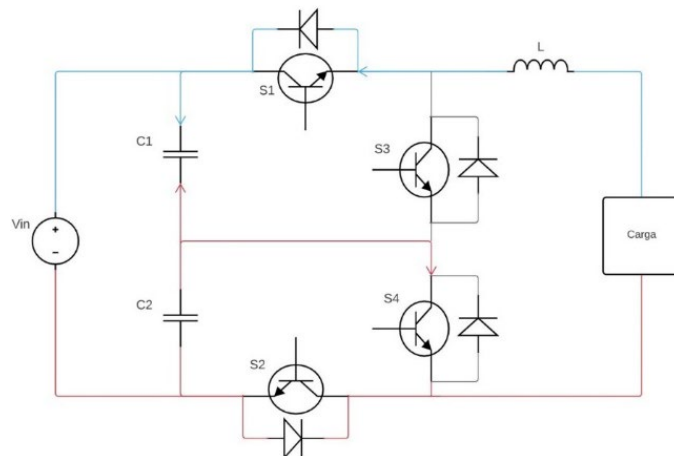


Figura 3.32 – Comportamento do conversor DC-DC de três níveis bidirecional no estado 2 do seu funcionamento como *boost*.

Capítulo 4

Sistemas de Carregamento em Estudo

Introdução

Este capítulo contém toda a informação sobre os conversores utilizados no carregamento do VE, os conversores DC-DC entrelaçado e multinível, e as estratégias de controlo implementadas.

Para efeitos de controlo dos conversores, é aplicada uma estratégia de modulação baseada no deslocamento de fase. Como apresentado no Capítulo 3, é aplicado um desfaseamento de 120° entre os sinais de comando utilizados. Este deslocamento de fase depende do número de módulos que constituem o conversor.

Para configurações com valores de tensão e carga elevados, pode ser considerada a adoção de um controlador de corrente e/ou tensão simples, de forma a controlar eficazmente o conversor em estudo. Sob estas condições, um controlador PI de malha fechada simples, cujo valor de entrada é dado pelo erro da corrente de saída do conversor (expresso pela diferença entre I_{ref} e I_L), afigura-se como a opção mais viável e adequada.

Relativamente à configuração do sistema de armazenamento de energia, nomeadamente o banco de baterias, foram efetuadas pesquisas e cálculos para o dimensionamento das baterias de um VE convencional, de forma a testar as situações de carregamento e descarregamento a nível de simulação e, posteriormente, a nível experimental. Desta forma, o estudo de simulação contempla a utilização de uma bateria de características idênticas à bateria de um *Tesla Model S*.

Carregador baseado no conversor entrelaçado

No caso do sistema de carregamento baseado no conversor entrelaçado, este é constituído por uma fonte de alimentação DC, um conversor DC-DC entrelaçado bidirecional trifásico, um controlador Proporcional e Integral (PI), uma bateria como carga do sistema de carregamento e um gerador de sinais PWM.

A fonte de alimentação é o parâmetro fundamental para o funcionamento do sistema, tendo este o valor de 380 V . Para testar o desempenho do sistema sob diferentes condições de alimentação, o parâmetro tensão de alimentação sofreu alterações. Atendendo às características da bateria utilizada, o valor de tensão da fonte de alimentação foi variado

entre os 380 V e os 160 V, com intervalos de 20 V. Nesta situação, verificou-se que só se conseguia obter valores corretos desde os 380 V até aos 160 V.

O sistema de carregamento é constituído por um conversor DC-DC entrelaçado bidirecional de três fases, constituído por três módulos, onde cada módulo contém dois semicondutores, tendo um total de seis IGBTs. Desta forma, o conversor funciona em modo *buck* quando o fluxo de corrente ocorre desde a fonte de alimentação até à carga do sistema. Assume o funcionamento como conversor *boost* quando o fluxo de corrente ocorre desde a carga até à fonte de alimentação.

O conversor entrelaçado trifásico contém três módulos, onde cada módulo é composto por dois semicondutores ligados em série, totalizando seis semicondutores (S_1 , S_3 e S_5 ; S_2 , S_4 e S_6). Cada semicondutor tem associada uma resistência interna de $5 \times 10^{-3} \Omega$; já o diodo em antiparalelo tem tensão de polarização igual a 0.91 V e uma resistência interna de $5.7 \times 10^{-3} \Omega$. Cada módulo contém uma bobina, designada por L_c , com uma resistência interna de 0.05 Ω e uma indutância de valor $7.5 \times 10^{-3} H$.

O procedimento de carregamento em análise é efetuado a corrente constante. Desta forma, considera-se a aplicação de um controlador PI para efetuar o controlo da corrente. O valor de entrada do controlador é dado pelo erro da corrente de saída do sistema (expresso pela diferença entre I_{ref} e I_L), conforme mencionado anteriormente. I_{ref} representa o valor da corrente de entrada (valor de referência ou *setpoint*) e I_L indica a corrente de saída do conversor. No processo de dimensionamento do controlador, foram utilizadas as equações (4.1) e (4.2) para cálculo do valor do ganho proporcional K_p e do ganho integral K_i [2].

$$K_p = \alpha * L_c \quad (4.1)$$

$$K_i = \alpha * R_c \quad (4.2)$$

Nestas equações, α representa o valor de *rising time*, L_c a indutância da bobina do conversor e R_L o valor da resistência parasita associada à bobina aplicada no conversor.

Com base nas condições definidas em (4.1) e (4.2), foram definidos os seguintes ganhos para o controlador de corrente: ganho proporcional K_p de 0.01 e ganho integral K_i de 0.1.

A corrente de referência, I_{ref} , foi outro parâmetro importante neste processo de simulação, por definir a potência à qual é efetuado o processo de carregamento. Este parâmetro foi variado entre os valores de $-50 A$ a $+50 A$. É importante mencionar que valores positivos de corrente I_{ref} correspondem ao processo de carregamento, enquanto valores negativos da mesma grandeza correspondem ao processo de descarregamento.

Os sinais PWM são obtidos a partir do gerador de sinais. Admite-se como entrada o sinal de *duty cycle*, que foi obtido através do controlador PI. É através deste gerador que se

obtêm os sinais de comando PWM1, PWM2 e PWM3, desfasados de 120° , que comandam os semicondutores do conversor em estudo. Outro parâmetro fundamental para o comando dos sinais PWM é a frequência de comutação, que neste caso foi variada entre os 5 *kHz* e os 100 *kHz*.

São também incorporadas funções de encaminhamento de sinal, cujo objetivo passa por aplicar os sinais de comando aos semicondutores indicados, para obter o modo de funcionamento do conversor pretendido, quer seja em modo *buck* quer em modo *boost*.

Para o banco de baterias, analisou-se a composição de um banco de baterias presente em um *Tesla* modelo S4. Este banco de baterias é composto por 7104 células de baterias de iões de lítio, distribuídas por 16 módulos, 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 ligados em paralelo. O conjunto de baterias, possui uma capacidade de energia de 85 *kWh*, uma tensão nominal de 380 *V* e uma capacidade de 223 *Ah*. Para o presente trabalho, foi dimensionado um conjunto de baterias com uma capacidade de energia de 85 *kWh*, com uma tensão nominal de 140 *V* e uma capacidade de 223 *Ah*. Para avaliação do desempenho do conversor sob diversas condições, considerou-se a variação do estado de carga da bateria entre 30 % e 100 %.

Os parâmetros obtidos na simulação foram verificados através de dois osciloscópios *Scope1* e *Scope2*. O *Scope1* dá-nos os valores e as curvas dos seguintes parâmetros: impulsos de controlo que funcionam em determinado modo (*buck* ou *boost*), corrente de entrada I_{in} , tensão de entrada V_{in} , corrente de saída I_{out} , tensão de saída V_{out} , corrente na bobina I_L e tensão da bateria V_{bat} . Já o *Scope2* dá-nos os valores e as curvas dos seguintes parâmetros: IGBTs em funcionamento, o *duty cycle* d , a potências de entrada e de saída P_{in} e P_{out} , respetivamente, e o rendimento do sistema *rend*.

Carregador baseado no conversor multinível

O sistema de carregamento baseado no conversor multinível é composto por uma fonte de alimentação DC, o conversor DC-DC multinível bidirecional, cuja tensão de saída pode assumir três diferentes níveis de tensão, o controlador PI, um banco de baterias e um gerador de sinais PWM.

A fonte de alimentação é o elemento fundamental para o funcionamento do sistema, sendo este alimentado a 380 *V*. Para analisar o desempenho do sistema em função da tensão de alimentação, o parâmetro tensão de alimentação foi variado de forma decrescente, entre os 380 *V* e os 160 *V*, com intervalos de 20 *V*.

O sistema de carregamento é de um conversor DC-DC bidirecional de três níveis, o que indica que se poderá obter três diferentes níveis de tensão à sua saída. É constituído por

dois módulos, onde cada módulo contém dois semicondutores (S_1, S_4 e S_2, S_3), tendo um total de quatro IGBT's. Desta forma, o conversor funciona em modo *buck* quando o fluxo de corrente ocorre desde a fonte de alimentação até à carga do sistema, e funciona em modo *boost* quando o fluxo de corrente ocorre desde a carga até à fonte de alimentação.

O conversor contém dois módulos, onde cada módulo é composto por dois semicondutores ligados em série. Os IGBTs utilizados têm uma resistência interna de $14.7 \times 10^{-3} \Omega$, com uma queda de tensão em condução de $1.38 V$. Já o diodo em antiparalelo tem tensão de polarização igual a $0.91 V$ e uma resistência interna de $5.7 \times 10^{-3} \Omega$. Faz também parte integrante do conversor uma bobina, designada por L_c , com uma resistência interna de 0.05Ω e uma indutância de valor de $7.5 \times 10^{-3} H$, bem como dois condensadores, C_1 e C_2 , com valores de $340 \times 10^{-6} F$.

O procedimento de carregamento em análise é efetuado a corrente constante. Desta forma, considera-se a aplicação de um controlador PI para efetuar o controlo das tensões. O valor de entrada do controlador é dado pelo erro da corrente de saída do sistema (expresso pela diferença entre I_{ref} e I_L), como mencionado anteriormente. I_{ref} representa o valor da corrente de entrada (valor de referência ou *setpoint*) e I_L indica a corrente de saída do conversor.

Com base nas condições definidas em (4.1) e (4.2), foram definidos os seguintes ganhos para o controlador de corrente: ganho proporcional K_p de 0.8 e ganho integral K_i de 10.

A corrente de referência, I_{ref} , foi outro parâmetro importante neste processo de simulação, por definir a potência à qual é efetuado o processo de carregamento. Este parâmetro foi variado entre os valores de $-50 A$ a $+50 A$. É importante mencionar que valores positivos de corrente I_{ref} correspondem ao processo de carregamento, enquanto valores negativos da mesma grandeza correspondem ao processo de descarregamento.

O controlador PI dedicado ao controlo de tensão recebe informação relativa à diferença entre as tensões nos condensadores V_{c1} e V_{c2} . Os valores dos ganhos do controlador obtidos foram de 0.1 para o ganho proporcional K_p e de 0 para o ganho integral K_i .

O valor de *duty cycle* determinado pelos controladores PI é aplicado ao gerador de sinais PWM. Aqui, são gerados os sinais de comando, desfasados de 180° , e com frequência que varia entre os $5000 Hz$ e $100 kHz$.

O conjunto de baterias aplicado na simulação tem características idênticas àsquelas consideradas no sistema de carregamento baseado no conversor entrelaçado. Assim, a bateria possui uma capacidade de armazenamento de $85 kWh$, com uma tensão nominal de

140 V e uma capacidade de 223 Ah. O parâmetro a ser variado para avaliação do desempenho é o seu estado de carga, que tem variação entre 30 % e 100 %.

Os parâmetros obtidos na simulação foram verificados através de dois osciloscópios *Scope1* e o *Scope2*. O *Scope1* dá-nos os valores e as curvas dos seguintes parâmetros: sinais de controlo (isto é, os sinais PWM), corrente de entrada I_{in} , tensão de entrada V_{in} , corrente de saída do conversor I_{out} , tensão de saída do conversor V_{out} , corrente na bobina I_L e tensão aos terminais da bateria V_{bat} . Já o *Scope2* apresenta os valores e as curvas dos seguintes parâmetros: sinais PWM aplicados aos IGBTs em funcionamento, *duty cycle*, tensões aos terminais dos condensadores, V_{c1} e V_{c2} , potências de entrada P_{in} e de saída P_{out} , respetivamente, e o rendimento do sistema *rend*.

Capítulo 5

Resultados de Simulação

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para o funcionamento dos dois sistemas de carregamento, contemplando diferentes valores de estado de carga da bateria, tanto para as situações de carregamento como de descarregamento do VE, obtidos através do software de MATLAB|Simulink. São discutidos dois cenários enquanto caso de estudo, para cada um dos modos de funcionamento dos conversores.

Simulação do conversor DC-DC entrelaçado bidirecional

A Figura 5.1 apresenta a estrutura do sistema de carregamento, baseado no conversor entrelaçado, aplicado em ambiente de simulação. Como explicado anteriormente no Capítulo 3, o conversor DC-DC entrelaçado é formado por 4 blocos fundamentais para a simulação. Estes são, o bloco do controlador PI, o gerador de sinais PWM, o conversor DC-DC entrelaçado bidirecional e o bloco *Signal Routing*. Ao funcionamento deste, foram acrescentados uma fonte de alimentação DC e um sistema de armazenamento de energia, a bateria. Os parâmetros fundamentais analisados neste conversor foram adquiridos com o auxílio de um osciloscópio.

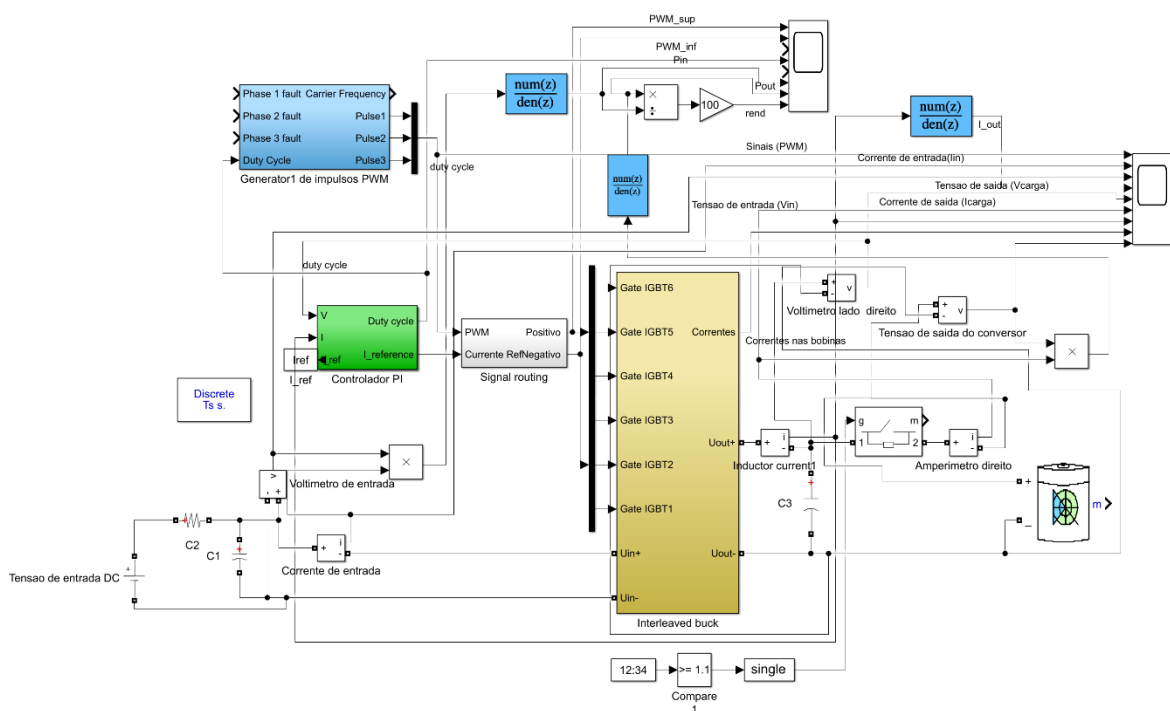


Figura 5.1 – Estrutura do circuito do conversor entrelaçado implementado em Matlab|Simulink.

Funcionamento em modo *buck*

De forma a obter os melhores resultados, são apresentadas as formas de onda do rendimento do conversor para diversos valores de corrente de entrada ou de referência, para o modo de carregamento do VE. São apresentados, na Tabela 5.1 e na Figura 5.2, os resultados da simulação obtidos no funcionamento do conversor DC-DC entrelaçado bidirecional para diferentes valores de corrente de carregamento, e diferentes estados de carga da bateria.

A Tabela 5.1 contém os valores da resposta do sistema para o estado de carregamento do VE, a uma frequência de comutação de 1000 Hz, a uma tensão de alimentação de 380 V_{DC}, obtendo-se à saída do sistema uma tensão de 150 V_{DC}. Neste cenário, a corrente de referência é o parâmetro que sofre variação, variando entre 1 A e 50 A.

O conversor apresenta valores de rendimento acima de 70%, em toda a gama de valores de corrente. Observa-se que o rendimento aumenta gradualmente com o aumento da corrente. Isto indica que a relação entre a potência de entrada e a potência de saída se aproxima de 1 e que a percentagem de energia dissipada no conversor reduz progressivamente.

Tabela 5.1 – Comportamento do conversor entrelaçado em modo de funcionamento *buck*.

Fc [Hz] = 1 kHz	Vin [V] = 380 V	SoC [%] = 30 %	Vout [V] = 150V	
duty cycle	Pin [W]	Pout [W]	Rend [%]	Iin [A]
0.08406	205.4	149.8	72.931	1
0.09977	283.2	224.9	79.414	1.5
0.1178	360.5	299.4	83.051	2
0.1274	437.7	373.5	85.332	2.5
0.1422	514.6	447.9	87.039	3
0.1512	596.2	522.3	87.605	3.5
0.1897	821.9	748.5	91.069	5
0.2893	1589	1498	94.273	10
0.3662	2350	2242	95.404	15
0.4031	3111	2999	96.399	20
0.4062	3872	3748	96.797	25
0.4054	4633	4496	97.043	30
0.4095	5396	5243	97.165	35
0.4063	6159	5993	97.305	40
0.4085	6924	6744	97.400	45
0.4086	7691	7493	98.426	50

A Figura 5.2 representa os dados de rendimento em função da corrente de carregamento, referente modo de funcionamento *buck*. Este apresenta um comportamento crescente com o aumento do valor da corrente de carregamento. Observam-se valores de rendimento compreendidos entre 72 % e 98 %.

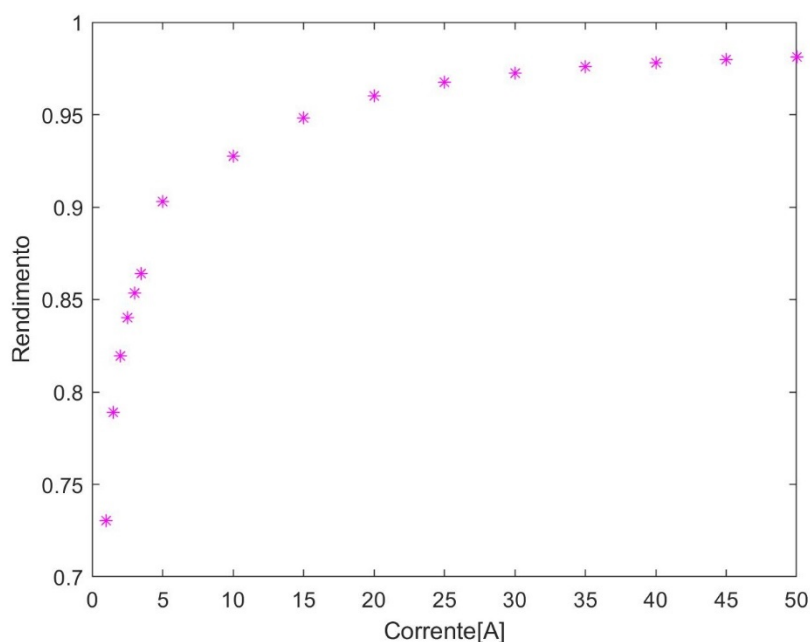


Figura 5.2 – Curva do rendimento em função da corrente de referência.

A Tabela 5.2 compila os dados relativos ao funcionamento do conversor em condição de carregamento do VE, a uma frequência de comutação de 1000 Hz, uma tensão de alimentação de 380 V_{DC} e uma corrente de carregamento de 5 A, obtendo-se à saída do sistema uma tensão de 156 V_{DC}. Neste cenário, foi variado o estado de carga da bateria. Sendo que estamos em modo de carregamento, é fundamental analisar o comportamento do conversor neste modo de funcionamento, tendo o foco no seu rendimento.

Tabela 5.2 – Resposta do comportamento do conversor entrelaçado em modo de funcionamento *buck*.

Fc [Hz] = 1 kHz Vin [V] = 380 V Iin [A] = 5 A Vout [V] = 156 V				
duty cycle	Pin [W]	Pout [W]	Rend [%]	SoC [%]
0.1897	821.9	748.5	91.069	30
0.1885	826.1	752.3	91.067	40
0.1901	833.4	759.3	91.109	50
0.1932	832.2	758.1	91.096	60
0.1954	831.3	757.3	91.098	70
0.1958	831.8	757.0	91.008	80
0.1958	832.8	760.1	91.27	90
0.2092	893.9	820.3	91.766	100

Tendo em conta os valores obtidos na Tabela 5.2, no modo de funcionamento *buck*, o rendimento do sistema tem valores em torno de 91 %, como se pode observar. Sendo assim, conclui-se que o estado de carga da bateria não impacta no rendimento do processo de carregamento.

Através da tabela acima apresentada, para uma frequência de 1000 Hz, para um valor de tensão de entrada de 380 V_{DC}, a uma corrente de referência de 5 A e para valores de estado de carga da bateria variando entre 30 % a 100 %, pode-se observar na Figura 5.3, o comportamento do rendimento do conversor em função do tempo, dado em segundos, em resposta aos parâmetros anteriormente inseridos.

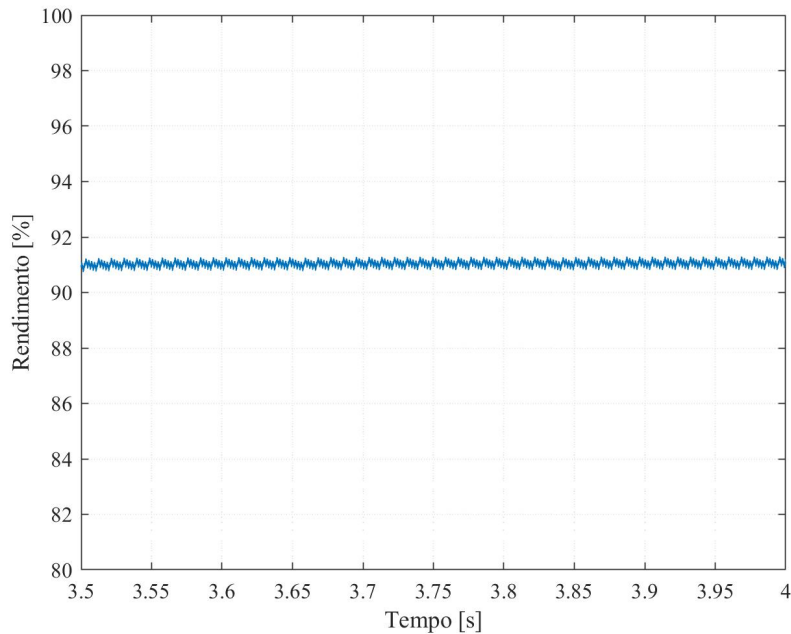


Figura 5.3 – Rendimento do conversor em função do tempo

Funcionamento em modo *boost*

A Tabela 5.3 apresenta os valores obtidos no estado de descarregamento do VE, ou seja, quando o fluxo de corrente ocorre desde a bateria até à fonte de alimentação. O sistema foi operado a uma frequência de comutação de 1000 Hz, a uma tensão de alimentação de 380 V_{DC}, obtendo-se aos terminais da bateria uma tensão de 156 V_{DC}. A corrente é apresentada com o sinal negativo, indicando que a bateria está a fornecer energia para a fonte. O conversor apresenta valores de rendimento em torno dos 91 %, registando-se um ligeiro decréscimo à medida que a bateria vai descarregando, até aos 90 %.

Tabela 5.3 – Comportamento do conversor entrelaçado em modo de funcionamento *boost*.

$F_c[\text{Hz}] = 1\text{kHz}$	$V_{in}[\text{V}] = 380\text{V}$	$I_{in}[\text{A}] = -5\text{A}$	$V_{out}[\text{V}] = 156\text{V}$	
<i>duty cycle</i>	$P_{in}[\text{W}]$	$P_{out}[\text{W}]$	$\text{Rend}[\%]$	$\text{SoC}[\%]$
0.2997	-817.3	-744.3	91.068	100
0.3266	-759.7	-686.3	90.338	90
0.3280	-757.4	-684.0	90.309	80
0.3286	-755.6	-682.3	90.299	70
0.3286	-755.6	-681.2	90.154	60
0.3286	-753.8	-679.5	90.143	50
0.3285	-751.2	-677.1	90.136	40
0.3285	-747.1	-673.1	90.095	30

Tendo em conta os valores obtidos na Tabela 5.3 no modo de funcionamento *boost*, observa-se que o rendimento do sistema apresenta valores em torno dos 90 %. De facto, tais valores são em tudo semelhantes àqueles obtidos em modo de carregamento (Tabela 5.2). Desta forma, constata-se que o desempenho do sistema em termos de rendimento não é afetado pelo modo de funcionamento do sistema.

Observa-se na Figura 5.4 o comportamento do rendimento do conversor em função do tempo, dado em segundos. Esta condição diz respeito aos resultados apresentados na Tabela 5.3 em que, o sistema é operado a uma frequência de 1000 *Hz*, com um valor de tensão de entrada de 380 V_{DC} , a uma corrente de referência de -5 *A*, indicando que a corrente tem fluxo oposto, ou seja, desde a carga até a fonte de alimentação, variando-se os valores de estado de carga da bateria entre 100 % a 30 %.

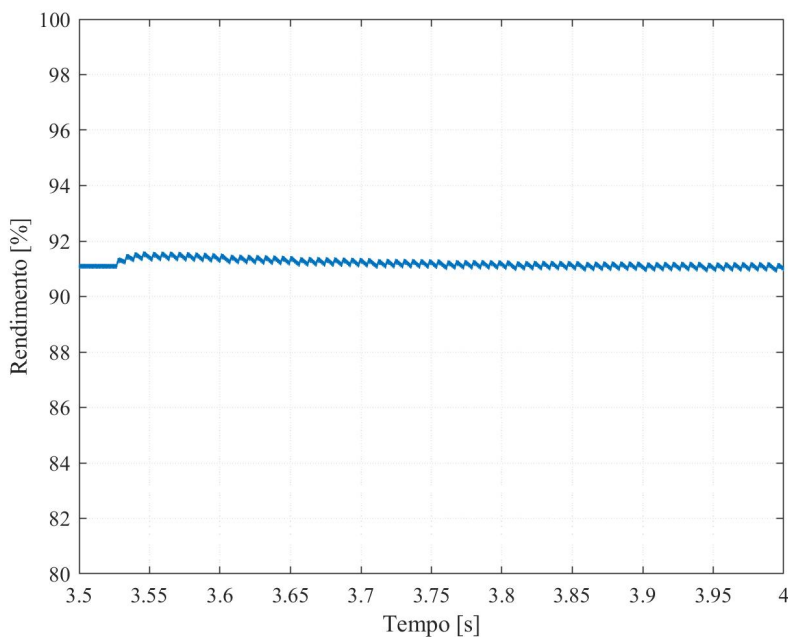


Figura 5.4 – Rendimento do conversor em função do tempo.

Simulação do conversor DC-DC multinível bidirecional

A Figura 5.5 apresenta a estrutura do sistema de carregamento/descarregamento baseado no conversor multinível, implementado em ambiente de simulação. Como mencionado no Capítulo 3, este conversor DC-DC multinível é também constituído por 3 blocos fundamentais, a saber, o bloco do controlador PI, o bloco do gerador de sinais PWM e o bloco do conversor DC-DC multinível bidirecional. Para testar o funcionamento deste conversor, foram adicionados ao sistema uma fonte de alimentação DC e uma bateria. Os parâmetros fundamentais analisados neste conversor foram visualizados com o auxílio a um osciloscópio.

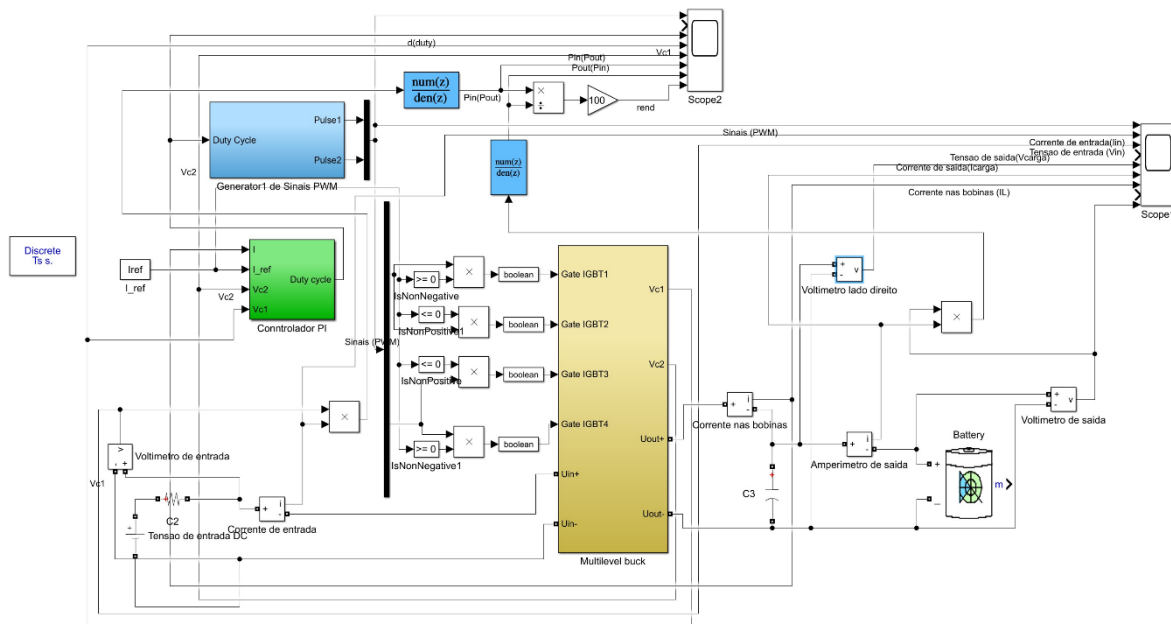


Figura 5.5 – Estrutura do circuito do conversor de três níveis implementado em Matlab|Simulink.

De forma a obter os melhores resultados, são apresentadas as formas de onda do rendimento do conversor em função da corrente de referência do sistema, para o modo de carregamento do VE. São apresentados, na Tabela 5.4 e na Figura 5.6, os resultados obtidos a nível de simulação do funcionamento do conversor DC-DC multinível bidirecional, para diferentes valores de corrente de alimentação e para diferentes valores de estados de carga da bateria.

Funcionamento em modo *buck*

A Tabela 5.4 apresenta os dados relativos ao modo de carregamento do VE, efetuado a uma frequência de comutação de 1000 Hz , a uma tensão de alimentação de 380 V_{DC} , obtendo-se à saída do sistema uma tensão de 150 V_{DC} . Neste cenário, a corrente de referência é o parâmetro que sofre alteração, sendo variada entre 1 A até 50 A .

Para a gama de valores de corrente de carregamento considerada, o conversor apresenta valores de rendimento do sistema variando entre os 94.8 % e 98.7 %. À medida que a corrente aumenta, o rendimento sofre um ligeiro decréscimo. Apesar disso, observa-se que a gama de variação do rendimento observada é limitada, o que indica uma menor suscetibilidade desta topologia de conversor DC-DC a variações nos níveis de potência de carregamento.

Tabela 5.4 – Resposta do comportamento do conversor de três níveis em modo de funcionamento *buck*.

Fc [Hz] = 1 kHz Vin [V] = 380 V SoC [%] = 30 % Vout [V] = 150 V						
<i>duty cycle</i>	<i>Pin [W]</i>	<i>Pout [W]</i>	<i>Vc1 [V]</i>	<i>Vc2 [V]</i>	<i>Rend [%]</i>	<i>Iin [A]</i>
0.4082	151.9	150.0	189.6	190.4	98.749	1
0.3959	227.9	224.3	189.5	190.5	98.420	1.5
0.3827	304.0	299.5	189.4	190.6	98.519	2
0.4166	380.1	374.3	189.3	190.7	98.474	2.5
0.3962	456.3	449.1	189.2	190.8	98.422	3
0.4310	532.6	524.2	189.1	190.9	98.423	3.5
0.4628	761.8	748.6	187.3	192.6	98.267	5
0.4583	1530	1496	185.3	194.6	97.778	10
0.4411	2305	2245	183.9	196.1	97.397	15
0.4747	3086	2995	183.5	196.5	97.051	20
0.4588	3873	3745	181.0	198.9	96.695	25
0.4724	4668	4495	180.7	199.3	96.294	30
0.4748	5468	5246	179.0	201.0	95.940	35
0.4656	6275	5998	177.8	202.2	95.586	40
0.4377	7089	6749	175.2	204.7	95.204	45
0.4684	7909	7502	175.3	204.7	94.854	50

As tensões dos condensadores V_{c1} e V_{c2} apresentam valores próximos, o que indica a manutenção do equilíbrio entre os dois condensadores, condição importante em conversores multinível.

A Figura 5.6 apresenta a relação entre o rendimento do conversor, no presente modo de funcionamento, em função da corrente. O conversor tem valores de rendimento mais elevado para valores de corrente reduzidos, tendo valores próximos de 99 %. Tal comportamento é justificado pela importância relativa das perdas por condução nos dispositivos semicondutores do conversor. À medida que a corrente aumenta, o rendimento vai reduzindo gradualmente, ou seja, o rendimento vai baixando com o aumento da corrente de carregamento.

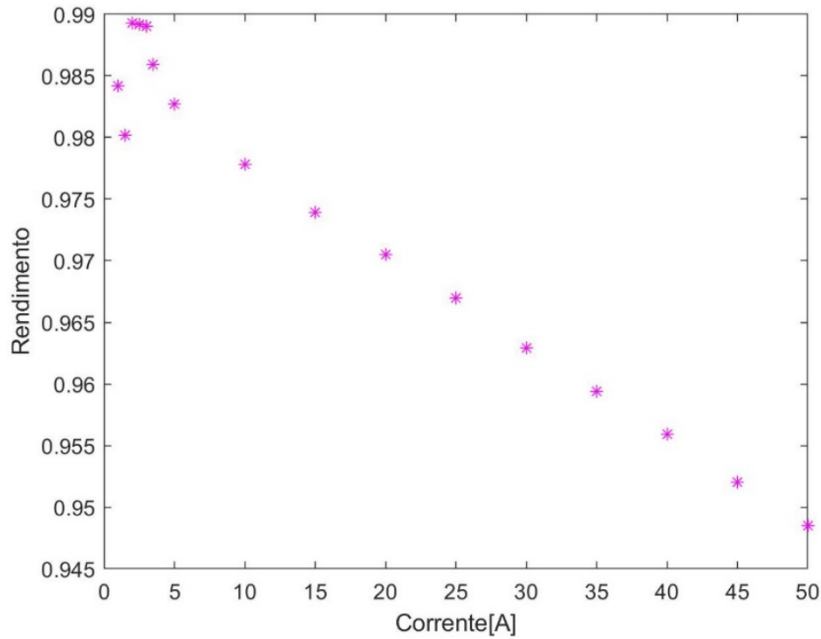


Figura 5.6 – Curva do rendimento em função da corrente de referência.

A Tabela 5.5 compila os dados relativos ao modo de carregamento do VE, a uma frequência de comutação de 1000 Hz, com uma tensão de alimentação de 380 V_{DC}. A corrente de carregamento é mantida constante, a 5 A, obtendo-se à saída do sistema uma tensão de 160 V_{DC}. Neste caso, o parâmetro a variar é o estado de carga da bateria. Sendo que estamos perante o modo de carregamento, é fundamental analisar o comportamento do conversor neste modo de funcionamento, observando o rendimento. À semelhança do comportamento observado para o conversor entrelaçado, verifica-se a uniformidade nos valores de rendimento obtidos, independentemente do estado de carga da bateria. Verifica-se ainda na Tabela 5.5 que, as tensões de saída do conversor V_{c1} e V_{c2} estão equilibradas, não apresentando uma grande discrepância nos seus valores de tensão.

Tabela 5.5 – Resposta do comportamento do conversor de três níveis em modo de funcionamento *buck*.

Fc [Hz] = 1 kHz		Vin [V] = 380 V		Iin [A] = 5 A		Vout [V] = 160 V	
duty cycle	Pin [W]	Pout [W]	Vc1 [V]	Vc2 [V]	Rend [%]	SoC [%]	
0.4628	761.8	748.6	187.3	192.6	98.267	30	
0.4570	765.7	752.5	188.5	191.5	98.276	40	
0.4470	768.2	754.7	188.6	191.4	98.243	50	
0.4790	769.8	756.4	188.6	191.4	98.259	60	
0.4508	771.1	757.1	188.6	191.4	98.184	70	
0.4259	772.1	758.1	188.8	191.2	98.187	80	
0.4033	773.0	759.5	188.7	191.3	98.254	90	
0.4019	832.8	819.1	188.6	191.4	98.355	100	

Na Figura 5.7 observa-se a evolução do rendimento do conversor em função do tempo, dado em segundos. Tendo em conta os valores da Tabela 5.5, no modo de funcionamento *buck*, o rendimento do sistema tem valores em torno dos 98 %.

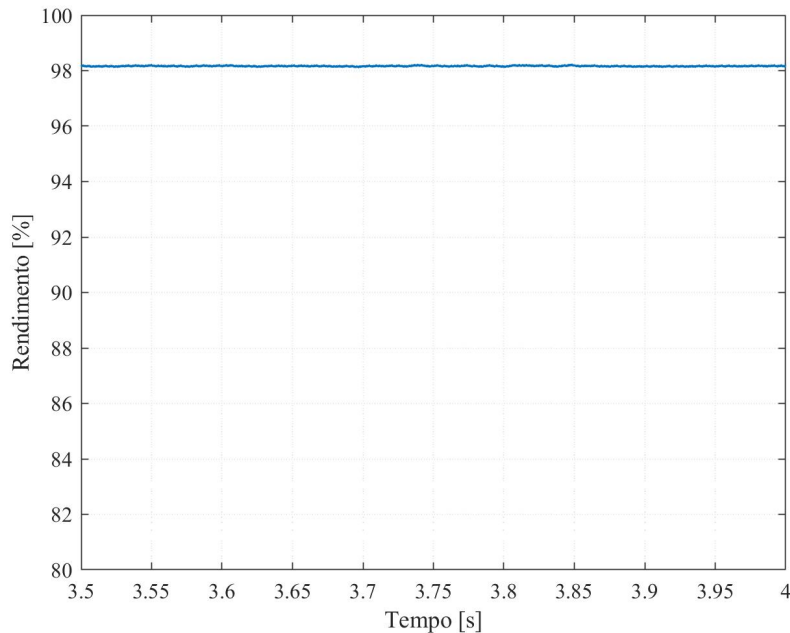


Figura 5.7 – Rendimento do conversor em função do tempo.

Funcionamento em modo *boost*

Nesta secção, são descritos os resultados obtidos para o funcionamento do conversor DC-DC em modo de descarregamento do VE. A Tabela 5.6 apresenta os valores obtidos no modo de descarregamento do VE, sendo que o fluxo de corrente ocorre desde a bateria até à fonte de alimentação. O sistema foi operado a uma frequência de comutação de 1000 Hz, a uma tensão de alimentação de 380 V_{DC}, obtendo-se à saída do sistema uma tensão de 150 V_{DC}. A corrente de descarregamento é mantida constante, a -5 A. Neste caso, o parâmetro a variar é o estado de carga da bateria. Como mencionado anteriormente, a corrente é apresentada com o sinal negativo, o que indica que a bateria está a fornecer energia para a fonte. Analisando os dados da tabela, verifica-se que o conversor apresenta valores de rendimento em torno dos 98 %, não sofrendo oscilações apreciáveis.

Tabela 5.6 – Resposta do comportamento do conversor de três níveis em modo de funcionamento *boost*.

Fc [Hz] = 1 kHz		Vin[V] = 380 V		Iin [A] = -5 A		Vout [V] = 150 V	
<i>duty cycle</i>	<i>Pin [W]</i>	<i>Pout [W]</i>	<i>Vc1 [V]</i>	<i>Vc 2 [V]</i>	<i>Rend [%]</i>	<i>SoC [%]</i>	
0.5925	-816.4	-802.5	188.7	191.4	98.297	100	
0.5897	-755.8	-741.9	188.7	191.3	98.161	90	
0.6129	-755.4	-741.0	188.9	191.2	98.094	80	
0.6246	-754.5	-739.8	188.8	191.2	98.052	70	
0.6237	-753.2	-738.1	188.8	191.2	97.995	60	
0.5762	-750.4	-735.8	188.8	191.2	98.054	50	
0.5999	-747.4	-732.7	188.7	191.3	98.033	40	
0.6175	-741.3	-727.2	188.7	191.3	98.098	30	

Pode observar-se que as tensões aos terminais dos condensadores, V_{c1} e V_{c2} apresentam valores próximos, indicativo do equilíbrio das tensões dos dois condensadores.

A Figura 5.8 representa a evolução temporal do rendimento do conversor em modo *boost*, ou seja, em modo de descarregamento.

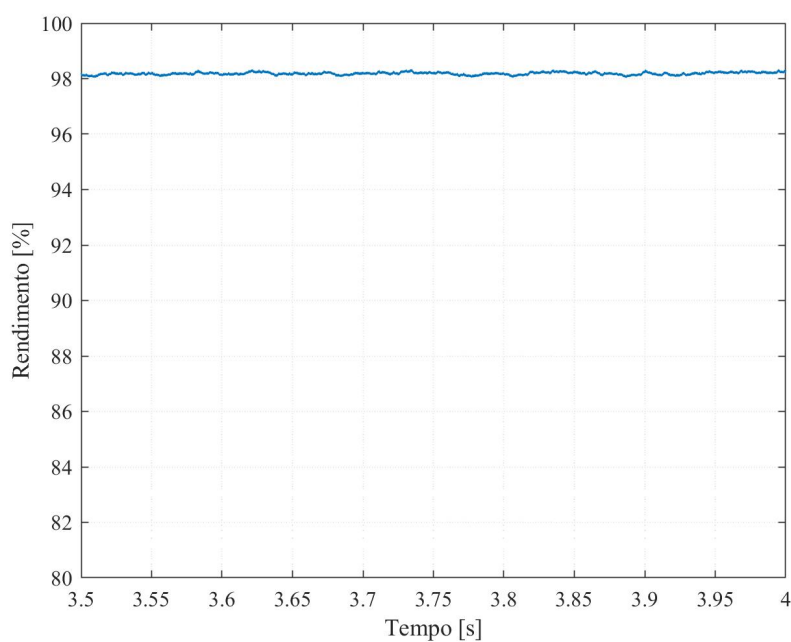


Figura 5.8 – Rendimento do conversor em função do tempo.

Capítulo 6

Resultados experimentais

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na fase experimental dos ensaios efetuados com as duas topologias de conversores DC-DC. São também estabelecidas comparações entre os resultados obtidos a nível experimental e a nível de simulação. A apresentação de resultados encontra-se estruturada em função das topologias em análise.

Conversor DC-DC entrelaçado bidirecional

Para a construção do conversor foram utilizados os semicondutores de potência do módulo *Power PACK 3-phase bridge SKiiP 132 GD* e respetivo *gate driver*. Também para a construção do conversor entrelaçado foram integrados elementos passivos discretos, de parâmetros idênticos àqueles utilizados em ambiente de simulação. Assim, foram aplicadas três bobinas de 7.6 mH e um condensador eletrolítico de $680\text{ }\mu\text{F}$. Para simplicidade, a carga do sistema é representada por um reóstato, cuja resistência é variada por forma a obter os pares ‘tensão de saída-corrente de carregamento’ desejados. Sendo o conversor e as estratégias de controlo aplicadas o foco deste estudo, é este o fator fundamental e que importa considerar no cenário em estudo. Durante os ensaios, foram testadas as técnicas de controlo de corrente através dos algoritmos de controlo PI implementados na plataforma de desenvolvimento dSPACE. Com o intuito de visualizar as correntes e tensões presentes no circuito, foi utilizado o programa *Control Desk*, responsável por assegurar o controlo e gestão da plataforma dSPACE. Esta ferramenta permite igualmente visualizar e registar os dados a nível experimental. Ao longo dos testes, os dados da corrente e tensão na entrada e saída do conversor foram recolhidos pelos sensores e enviados em tempo real para o computador. Estes dados foram guardados em ficheiros de extensão *.mat* numa pasta a designar pelo utilizador. Posteriormente, esses dados são importados para o *software* Matlab com o intuito de visualizar os mesmos e criar gráficos ilustrativos da sua evolução ao longo do tempo, permitindo efetuar as devidas comparações. É também através da plataforma dSPACE que é efetuada a gestão e envio dos sinais PWM enviados para os semicondutores S_2, S_4 e S_6 do conversor. Visto que este foi implementado com a topologia entrelaçado bidirecional a funcionar em modo de carregamento, foram necessários três sinais de PWM, de modo a ativar os semicondutores úteis neste modo de funcionamento. Consequentemente, os semicondutores S_1, S_3 e S_5 encontram-se inativos.

A Figura 6.1 representa a montagem experimental utilizada nos testes laboratoriais relativos ao modo de carregamento.

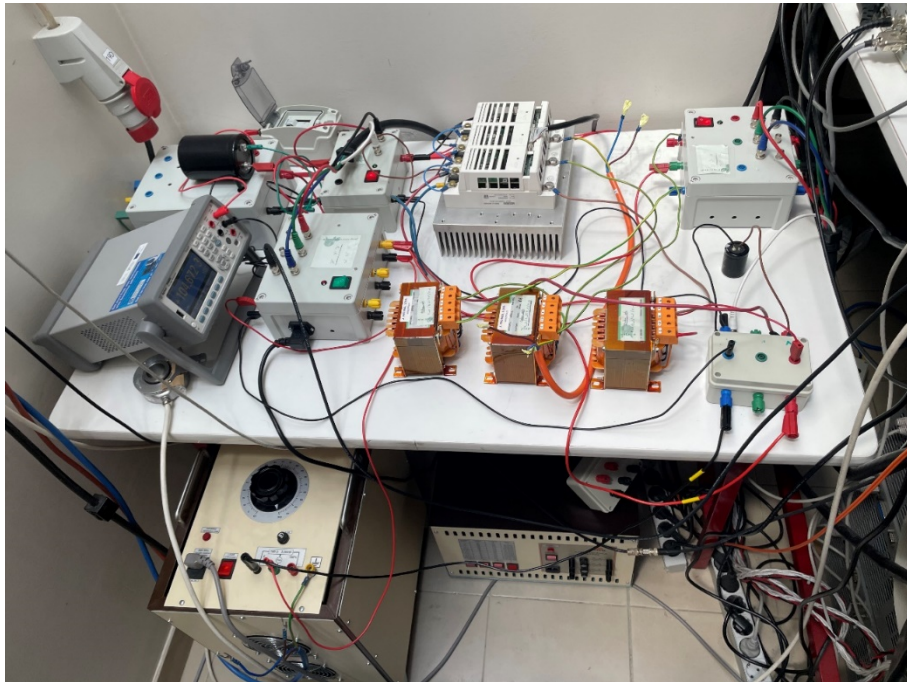


Figura 6.0.1 – Bancada de testes com o conversor entrelaçado bidirecional em modo de funcionamento *buck*.

São apresentados dados que relacionam o rendimento e a corrente de referência de carregamento. As curvas foram obtidas para uma tensão de alimentação do barramento DC de 300 V, a uma frequência de comutação de 1000 Hz. Foram realizados testes considerando diversos níveis de tensão de saída – 100 V, 120 V, 140 V e 160 V. Por limitações físicas da montagem experimental, a aquisição de dados relativos às séries relativas às tensões de saída de 140 V e 160 V não contemplou toda a gama de correntes.

Com base nas conclusões retiradas através dos resultados de simulação, optou-se por realizar ensaios e a aquisição de dados experimentais apenas para o modo de carregamento. O funcionamento e desempenho de ambos os sistemas de carregamento é deveras idêntico quer para o modo de carregamento, quer para o modo de descarregamento.

Funcionamento em modo *buck*

A Figura 6.2 apresenta o comportamento do conversor referente modo de funcionamento *buck* (carregamento), considerando uma tensão de saída de 120 V. Observa-se a evolução crescente do rendimento de acordo com o aumento da corrente de carregamento. Os valores de rendimento aferidos oscilam entre 82 % e os 87 %.

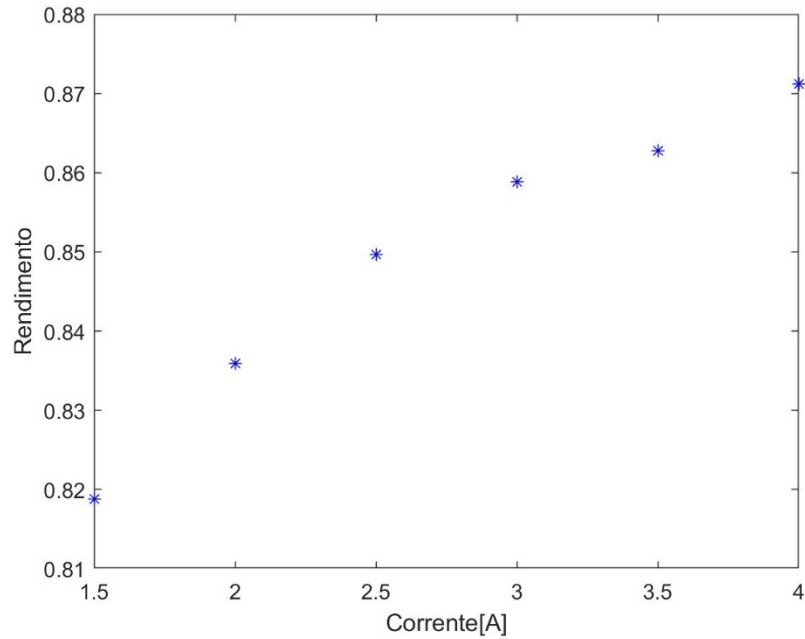


Figura 6.2 – Relação entre o rendimento do sistema e a corrente de referência.

Para comparação, será utilizada a Figura 5.2 apresentada no Capítulo 5. Na Figura 6.3 é observado o comportamento do conversor em modo de funcionamento *buck*, estabelecendo-se a confrontação entre dados de simulação e dados experimentais. Verifica-se que as curvas se sobrepõem e têm uma união/proximidade significativa, o que permite validar a modelo de simulação. Assim, tanto o modelo de simulação quanto o sistema experimental apresentam similaridades no que toca ao comportamento do conversor em modo de carregamento.

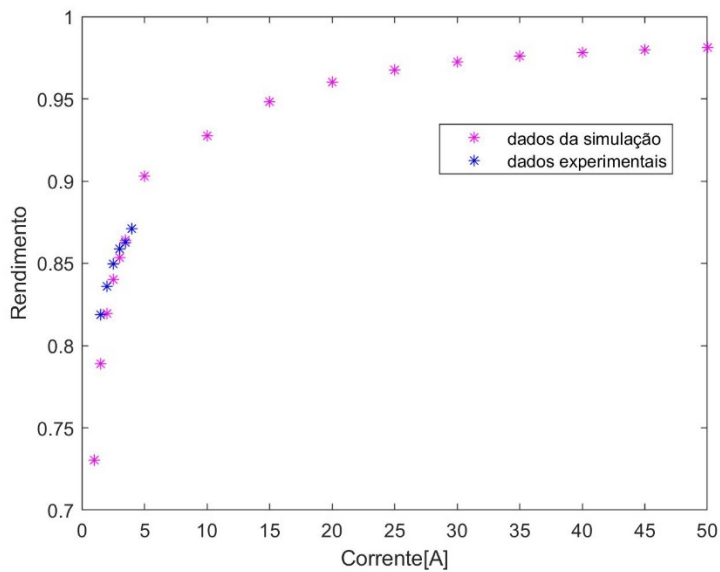


Figura 6.3 – Comparação das curvas obtidas a nível experimental (pontos a azul) e a nível de simulação (pontos a rosa).

A Figura 6.4 apresenta uma versão ampliada dos dados providenciados na Figura 6.3.

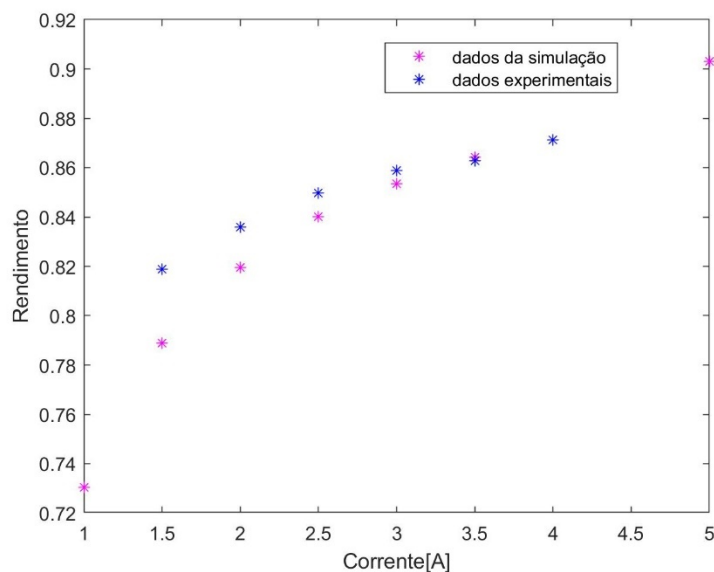


Figura 6.4 – Comparação das curvas obtidas a nível experimental (pontos a azul) e a nível de simulação (pontos a rosa).

Para o modo de funcionamento *boost* (descarregamento da bateria), os semicondutores S_1, S_3 e S_5 são comutados, enquanto os semicondutores S_2, S_4 e S_6 se encontram inativos. Conforme indicado anteriormente, assume-se que o comportamento observado em modo de descarregamento é análogo àquele do conversor em modo de carregamento.

Conversor DC-DC multinível bidirecional

De igual modo, o conversor multinível utilizado para obter os resultados experimentais também possui os dois modos de operação: o modo *buck* e o modo *boost*. A montagem experimental utilizada para testar o conversor multinível é em tudo idêntica à montagem considerada para o conversor entrelaçado. A bateria foi também substituída por uma carga resistiva. O conversor e componentes passivos são os mesmos. Durante os ensaios, foram também testadas as técnicas de controlo de corrente através dos algoritmos de controlo PI implementados em dSPACE. Com o intuito de visualizar as correntes e tensões presentes no circuito, foi utilizado o programa *Control Desk*. Ao longo destes testes, os dados da corrente e tensão na entrada do sistema, na saída do conversor e na carga foram recolhidos pelos sensores e enviados em tempo real para o computador.

É também através da plataforma dSPACE que é efetuada a gestão e envio dos sinais PWM enviados para os semicondutores S_2 e S_4 . Visto que o conversor foi implementado

com a topologia de três níveis, são utilizados dois sinais de PWM, de modo a ativar os semicondutores ativos no modo de carregamento.

São apresentados dados que relacionam o rendimento e a corrente de referência de carregamento. Os dados foram obtidos em condições idênticas às consideradas para o conversor entrelaçado. Assim, o sistema adota uma tensão de alimentação do barramento DC de 300 V e uma frequência de comutação de 1 kHz. Foram realizados testes considerando diversos níveis de tensão de saída – 100 V, 120 V, 140 V e 160 V. Por limitações físicas da montagem experimental, a aquisição de dados relativos às séries relativas às tensões de saída de 140 V e 160 V não contemplou toda a gama de correntes.

Seguindo o método adotado no caso do conversor entrelaçado, e com base nas conclusões retiradas através dos resultados de simulação, optou-se por realizar ensaios e aquisição de dados experimentais apenas para o modo de carregamento. O funcionamento e desempenho de ambos os sistemas de carregamento é deveras idêntico quer para o modo de carregamento, quer para o modo de descarregamento.

Funcionamento em modo *buck*

A Figura 6.5 apresenta resultados referentes ao modo de funcionamento *buck* do conversor multinível em estudo. Os valores de rendimento aferidos em condições de carregamento em potência reduzida apresentam um comportamento algo irregular. Com o aumento da potência de carregamento, observa-se estabilização e aumento gradual do rendimento. O rendimento apresenta valores entre 96.5 % e 99 %.

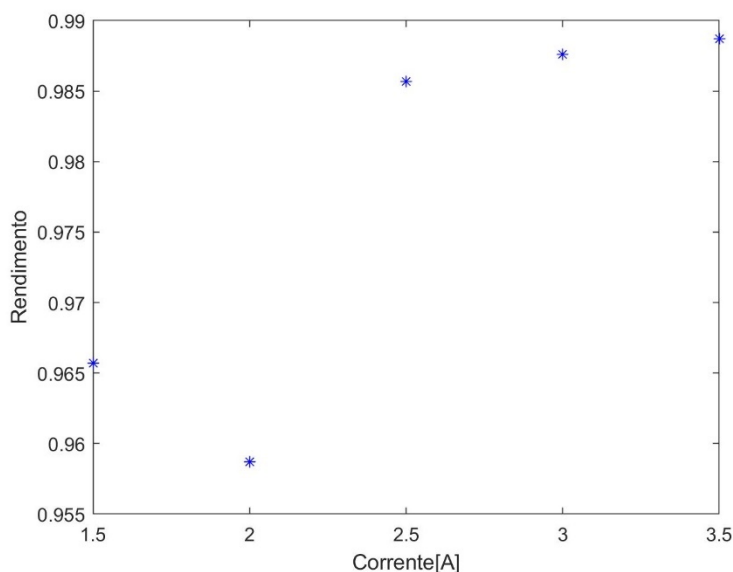


Figura 6.5 – Relação entre o rendimento do sistema e a corrente de referência.

A curva da Figura 6.5 é utilizada para comparação com curva obtida a nível de simulação.

Para comparação dos resultados experimentais obtidos com os respectivos resultados de simulação, será utilizada a Figura 5.6 apresentada anteriormente no Capítulo 5. Na Figura 6.6 pode ser observada a relação entre o rendimento e a corrente de referência, considerando tanto os dados experimentais, como os de simulação. Apesar do ligeiro desvio entre os dados de simulação e os dados experimentais, constata-se que a tendência seguida por ambas as séries de dados é idêntica em ambas as situações. Desta forma, observa-se uma maior alternância de valores de rendimento no início da série de dados. Com o aumento da corrente, observa-se uma estabilização dos níveis de rendimento com o aumento da corrente, tanto em simulação como a nível experimental. Para além disso, constata-se uma diminuição da diferença entre os resultados de simulação e os resultados experimentais, para níveis de corrente superiores. Concluindo, o modelo experimental apresenta uma resposta idêntica àquela determinada pelo modelo de simulação.

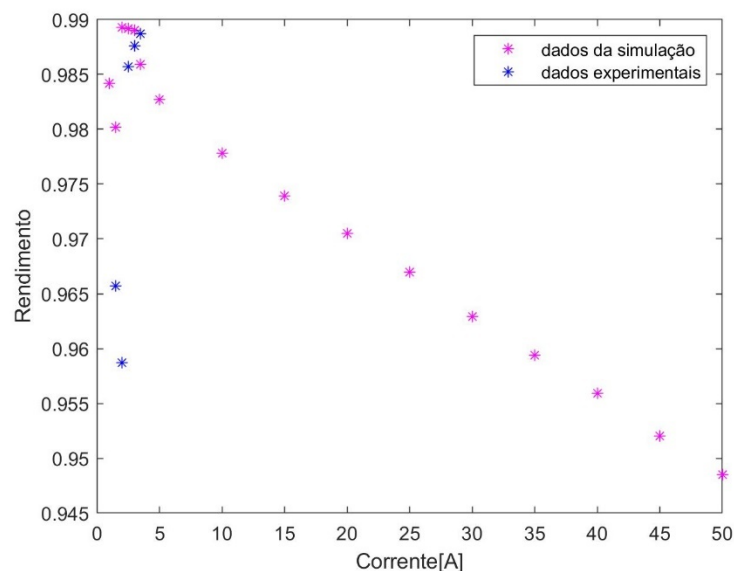


Figura 6.6 – Comparação das curvas obtidas a nível experimental (pontos a azul) e a nível de simulação (pontos a rosa).

A Figura 6.7 apresenta uma versão ampliada dos dados providenciados na Figura 6.6. Como verificado anteriormente, o rendimento tende a aumentar para valores reduzidos de corrente, e reduz com o aumento da corrente fornecida.

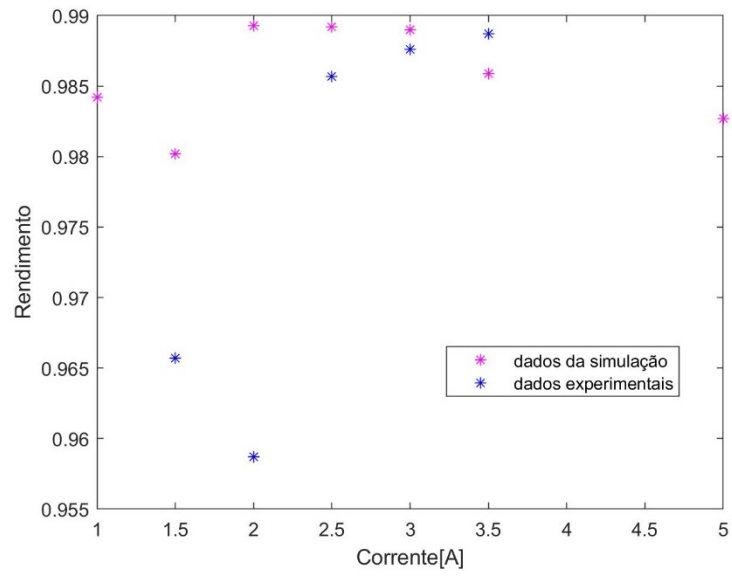


Figura 6.7 – Comparação das curvas obtidas a nível experimental (pontos a azul) e a nível de simulação (pontos a rosa).

Capítulo 7

Conclusão e sugestões para trabalhos futuros

Conclusão

As preocupações com as mudanças climáticas, associadas ao aquecimento global, conjugada com fatores associados à redução das reservas de petróleo, juntamente com a rápida adoção de veículos mais eficientes em termos de uso de combustíveis, são indicadores claros sobre a preferência do novo consumidor e a mudança de direção da indústria automóvel. Os VEs apresentam diversos benefícios em relação aos veículos de combustão interna, como a redução significativa da poluição atmosférica, uma vez que não emitem gases nocivos para o ambiente quando referidos ao seu modo de funcionamento. É nesse contexto que a utilização de VEs ganha, a cada dia que passa, mais destaque. Aliada ao crescente interesse em VEs, a adoção de sistemas de carregamento puramente baseados em conversores DC-DC vem emprestar aos sistemas de carregamento/descarregamento de veículos uma mais-valia para o sucesso do novo paradigma na deslocação de pessoas.

Posto isto, surge o interesse no presente trabalho, que tem como objetivo fazer a análise comparativa entre duas topologias de conversores DC-DC aplicados ao carregamento de um VE. Ao longo do trabalho, foram apresentadas e analisadas as topologias de conversor DC-DC convencionais, bem com as topologias aplicados no carregador utilizado para o estudo. Como se pretende efetuar a carregamento/descarregamento de uma bateria, é necessário que o conversor seja bidirecional, ou seja, funcione em ambos os sentidos. Para tal, foram abordadas diversas topologias de conversores DC-DC, sendo que as escolhidas para o estudo são os conversores DC-DC entrelaçado e multinível. Estas utilizam o dobro dos componentes em relação às topologias convencionais. Por outro lado, estes conversores limitam o stress imposto aos seus componentes, sendo por isso mais leves e de custo reduzidos.

Os parâmetros do desempenho de cada conversor foram analisados com o auxílio de uma ferramenta de simulação computacional, o Matlab|Simulink, para a realização de testes a nível de simulação. Com base nas simulações efetuadas, foi possível realizar os testes referentes ao funcionamento dos conversores. Os resultados de simulação obtidos permitiram retirar importantes conclusões relativamente ao desempenho esperado. Foram também realizados testes a nível experimental. Estes resultados foram utilizados para a comparação entre os resultados obtidos no modelo de simulação.

A análise do rendimento de ambas as topologias de conversores DC-DC revela que ambas apresentam qualidades importantes, o que os tornam candidatos para o desenvolvimento de soluções de conversão de energia para aplicações de carregamento de VE. O conversor DC-DC entrelaçado bidirecional pode ser aplicado para sistemas em correntes mais elevadas, pois apresenta um rendimento mais alto, em torno de 98 %. Já o conversor DC-DC multinível bidirecional é mais adequado em situações em que a sua aplicação seja feita a níveis de potência de carregamento mais baixos, pois apresentam um rendimento mais elevado, próximo dos 99.9 %.

Sugestão para trabalhos futuros

O trabalho apresentado na presente dissertação permitiu a validação de um sistema, para o carregamento e o descarregamento de um VE, baseado em conversores DC-DC bidireccionais das topologias entrelaçado e multinível. No entanto, podem ser propostas algumas sugestões para trabalhos futuros, com o intuito de aumentar o desempenho do sistema. Apresentam-se as seguintes propostas:

- Estudar o desempenho dos conversores DC-DC considerados em situações de utilização de sistemas de armazenamento híbridos, baseados em múltiplas tecnologias de armazenamento;
- Considerar outras topologias de conversores DC-DC na análise comparativa, nomeadamente conversores com isolamento galvânico;
- Melhorar o desempenho do sistema de controlo aplicado ao conversor DC-DC multinível, considerando, por exemplo, técnicas de controlo preditivo.

Referências Bibliográficas

- [1] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay, and A. Emadi, *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: Fundamentals, theory, and design*, 3 edition., vol. 3, no. 2. United States of America: Power Electronics and Applications Series, 2004.
- [2] J. P. M. L. Fidalgo, “Controlo e Gestão do Carregamento de Sistemas de Armazenamento de Energia em Veículos Elétricos, Efetuado com Recurso a Conversores DC-DC,” Universidade da Beira Interior, 2017.
- [3] E. P. Agency, “Greenhouse Gas Emissions,” 2021. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions#main-content>. [Accessed: 06-Jan-2020].
- [4] EUROPEAN COMMISSION, “A European Strategy for low-emission mobility,” p. 13, 2016.
- [5] C. C. Chan and K. T. Chau, “An overview of power electronics in electric vehicles,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 44, no. 1, pp. 3–13, 1997.
- [6] B. H. R. de Castro and T. T. Ferreira, “Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades,” *BNDES Setorial* 32, pp. 267–310, 2010.
- [7] L. M. M. Gomes, “O Veículo Elétrico e a sua Integração no Sistema Elétrico,” Universidade Técnica de Lisboa, 2010.
- [8] D. F. C. Moniz, “Conversor dc-dc bidirecional isolado ressonante aplicado a veículos elétricos,” Universidade de Coimbra, 2015.
- [9] S. Lixin, “Electric vehicle development: The past, present & future,” *Int. Conf. Power Electron. Syst. Appl.*, pp. 1–3, 2009.
- [10] “Uma história breve dos veículos elétricos,” *Climainfo*, 25-Sep-2017. [Online]. Available: <https://climainfo.org.br/2017/09/25/uma-breve-historia-dos-veiculos-eletricos/>.
- [11] M. C. Falvo, D. Sbordone, I. S. Bayram, and M. Devetsikiotis, “EV charging stations and modes: International standards,” *Res. Gate*, no. June, pp. 1134–1139, 2014.
- [12] A. J. C. Madeiras, “Utilização de uma flywheel como sistema de armazenamento de energia para veículos elétricos / híbridos,” Universidade da Beira Interior, 2015.
- [13] Society of Automotive Engineers of Japan, “Hybrid Vehicles, Electric Vehicles, Fuel Cell Electric Vehicles, Traction Motors,” 2017.
- [14] M. Â. da S. Maia, “Mobilidade Elétrica: Planeamento de Postos de Carregamento para Veículos Elétricos no concelho de Lisboa,” Universidade de Lisboa, 2018.
- [15] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Mohamed, and A. Ayob, “Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, no. November 2016, pp. 771–789, 2017.

- [16] H. F. Jamahori and H. A. Rahman, "Hybrid energy storage system for life cycle improvement," *IEEE Conf. Energy Conversion*, vol. 2018-Janua, pp. 196–200, 2017.
- [17] E. Notes, "Lithium Ion Battery Advantages & Disadvantages." [Online]. Available: https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/battery-technology/li-ion-lithium-ion-advantages-disadvantages.php. [Accessed: 15-Sep-2020].
- [18] M. Aslani, "Electrochemical Double Layer Capacitors (Supercapacitors)," California, 2012.
- [19] J. Larminie and J. Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained: Second Edition*, Second edi. England: John Willey and Sons, Ltd, 2003.
- [20] Á. M. F. de Lelis, "Sistema de Armazenamento Híbrido para Veículos Elétricos," Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.
- [21] T. Nabais, "Sistemas de carregamentos de veículos elétricos wireless," p. 85, 2017.
- [22] N. Sujitha and S. Krithiga, "RES based EV battery charging system: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 75, no. February 2016, pp. 978–988, 2017.
- [23] D. M. da F. Marinho, "Sistema de Conversão para Aplicações G2V e V2G," Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2018.
- [24] M. Yilmaz and P. T. Krein, "Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 5, pp. 2151–2169, 2013.
- [25] M. Yilmaz and P. T. Krein, "Review of integrated charging methods for plug-in electric and hybrid vehicles," *2012 IEEE Int. Conf. Veh. Electron. Safety, ICVES 2012*, pp. 346–351, 2012.
- [26] D. Fonseca, "Eletrónica Industrial - Conversores DC / DC," Covilhã.
- [27] J. M. A. Aniceto, "Conversor DC-DC com busca de ponto de potência máxima (MPPT) para painéis solares," Universidade Nova de Lisboa, 2010.
- [28] R. Crews, "AN-1820 LM5032 Interleaved Boost Converter," 2013.
- [29] A. Thiagarajan, S. G. Praveen Kumar, and A. Nandini, "Analysis and comparison of conventional and interleaved DC/DC boost converter," *2nd Int. Conf. Curr. Trends Eng. Technol. ICCTET 2014*, pp. 198–205, 2014.
- [30] G. H. F. Fuzato, "Análise de um Conversor Boost Interleaved com Multiplicador de Tensão para Sistemas de Geração Distribuída que Utilizam Células a Combustível como Fonte Primária," Universidade de São Paulo, 2015.
- [31] T. de C. Rego, "Conversor DC/DC Boost Interleaved," Bagé, 2015.
- [32] P. M. S. B. e Serôdio, "Desenvolvimento de um Conversor CC-CC Bidirecional Interleaved para Testes de Baterias de Lítio Ferro Fosfato (LiFePO₄)," Universidade do Minho, 2018.

- [33] J. L. H. de M. Jordão, “Conversor Multinível Modular para Transmissão Bidirecional HVDC,” Técnico de Lisboa, 2015.
- [34] J. Rodríguez, L. G. Franquelo, S. Kouro, and M. A. Pérez, “Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications,” *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 11, pp. 1786–1817, 2009.
- [35] F. Bento and A. J. Marques Cardoso, “Performance Assessment of Two Alternative DC-DC Converter Topologies for EV Charging Applications,” *2020 15th Int. Conf. Ecol. Veh. Renew. Energies, EVER 2020*, pp. 1–6, 2020.