



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Hélder José Magalhães Gomes

Carregador de Baterias com Correção do Fator de Potência para Utilização On-Board em Veículo Elétrico



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Hélder José Magalhães Gomes

Carregador de Baterias com Correção do
Fator de Potência para Utilização On-Board
em Veículo Elétrico

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de
Mestre em Engenharia Engenharia Eletrónica e de Computadores

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor Júlio Martins

DECLARAÇÃO

Hélder José Magalhães Gomes

Endereço eletrónico: a55603@alunos.uminho.pt Telefone: 927712336

Número do Bilhete de Identidade: 13555240

Título da Tese:

Carregador de Baterias com Correção do Fator de Potência para Utilização *On-Board* em Veículo Elétrico

Orientador:

Doutor Júlio Martins

Ano de conclusão: 2015

Tese submetida na Universidade do Minho para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica e de Computadores

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____

À minha família e amigos.

Agradecimentos

A realização do trabalho aqui apresentado não teria sido possível sem o apoio e a contribuição de algumas pessoas, às quais transmito os meus mais sinceros agradecimentos:

Ao meu orientador Doutor Júlio Martins, pelo apoio, incentivo e disponibilidade no decorrer desta dissertação.

Um agradecimento especial ao investigador Vítor Monteiro pelos conselhos, ajuda e disponibilidade ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

Ao Doutor Gabriel Pinto, ao Doutor João Luiz Afonso e aos investigadores Delfim Pedrosa e Bruno Exposto pela disponibilidade e ajuda ao longo do tempo em que estive no Laboratório de Eletrónica de Potência.

Aos funcionários Carlos Torres, Joel Almeida e Ângela Macedo que, na qualidade de técnicos das oficinas do Departamento de Eletrónica Industrial, pela disponibilidade e ajuda sempre que foi necessário.

A todos os meus colegas que, assim como eu, realizaram a dissertação de mestrado no Laboratório de Eletrónica de Potência, pelos momentos de aprendizagem partilhados pela amizade e pelo ambiente alegre proporcionado.

Ao Pedro Morais pelos conselhos, apoio e incentivo ao longo destes anos.

Aos meus familiares, em especial a minha mãe Beatriz Magalhães Gomes, pelo apoio ao longo destes anos, sem a qual nunca teria chegado aqui.

Resumo

O consumo desmedido dos combustíveis fósseis, o qual representa certamente um dos fatores que mais contribui para as ameaças ao meio ambiente, originou um aumento no desenvolvimento de produtos ecológicos. Na área da indústria automóvel, em particular, tem havido a preocupação de desenvolver veículos menos poluentes e energeticamente mais eficientes. Neste sentido, a solução mais proeminente encontra-se na mobilidade elétrica, nomeadamente os veículos elétricos (VEs) e veículos elétricos híbridos *plug-in* (VEHPs). No entanto, as baterias instaladas nestes veículos devem ser carregadas de acordo com as capacidades da rede elétrica e com consumo de corrente sinusoidal e fator de potência próximo da unidade, preservando assim a qualidade de energia elétrica.

Enquadrada na aposta na área de mobilidade elétrica, esta Dissertação de Mestrado tem como objetivo fazer a comparação entre cinco conversores CA-CC, que podem ser utilizados num sistema de carregamento *on-board* para VEs e VEHPs, em termos de THD_i da corrente consumida e do fator de potência.

Uma vez que um sistema de carregamento de baterias para VEs e VEHPs por norma é formado por dois conversores de eletrónica de potência, um conversor CA-CC seguido de um conversor CC-CC, foi também estudado um conversor CC-CC responsável por efetuar o carregamento das baterias de acordo com as suas especificações.

Ao longo da dissertação foi realizado um estudo sobre conversores CA-CC com correção do fator de potência e conversores CC-CC utilizados em sistemas de carregamento de baterias de VEs e VEHPs, tendo posteriormente sido realizadas simulações com o intuito de validar as topologias e o sistema de controlo escolhidos; por fim, com base num sistema de carregamento monofásico *on-board*, desenvolvido pelo Grupo de Eletrónica de Potência e Energias (GEPE), composto por um conversor CA-CC *full-bridge* totalmente controlado e um conversor CC-CC *buck-boost* bidirecional; o *hardware* deste sistema permitiu, utilizando diferentes estratégias de controlo, validar o funcionamento de diferentes topologias de conversor CA-CC, interessantes para sistemas de carregamento de baterias utilizados no contexto da mobilidade elétrica.

Palavras-Chave: VEs, VEHPs, Correção do Fator de Potência, Qualidade de Energia Elétrica, Conversores CA-CC, Conversores CC-CC, Sistema de Carregamento de Baterias.

Abstract

The excessive consumption of fossil fuels, which certainly is one of the factors that contributes to the threats to the environment, led to an increase in the development of environmentally friendly products. In the automotive industry, in particular, there has been a concern to develop cleaner and more fuel-efficient vehicles. The most prominent solution lies in electric mobility, in particular Electric Vehicles (EVs) and Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs). However, the batteries installed in these vehicles should be charged in accordance with the electrical power grid capabilities and with a consumption of sinusoidal current and power factor close to unity, preserving the electrical power quality.

As a part of a bet in the field of electric mobility, this dissertation aims to make the comparison between five AC-DC converters, which can be used in on-board charging system for EVs and PHEVs, in terms of THDi of the input current and power factor.

Since a battery charging system for EVs and PHEVs is normally composed of two power electronic converters, an AC-DC converter followed by a DC-DC converter, a DC-DC converter was also studied, which is responsible for charging the batteries according to the its specifications.

Along this dissertation, AC-DC converters with power factor correction and DC-DC converters used in battery charging systems for EVs and PHEVs were studied, having subsequently been conducted simulations in order to validate the topologies and the chosen control system; finally, based on an on-board single-phase charging system developed by the Group of Energy and Power Electronics (GEPE), composed of an AC-DC full-bridge totally controlled converter and a DC-DC buck-boost converter; the hardware of this system allowed, using different control strategies, the validation of the operation of different AC-DC topologies, interesting in the context of electrical mobility.

Keywords: EVs, PHEVs, Power Factor Correction, Power Quality, AC-DC Converters, DC-DC Converters, Battery Charging System.

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xix
Lista de Siglas e Acrónimos	xxi
Nomenclatura	xxiii
CAPÍTULO 1 Introdução	1
1.1. Identificação do Problema	1
1.1.1. Fator de Potência (PF - <i>Power Factor</i>).....	2
1.1.2. Qualidade da Energia Elétrica	3
1.1.3. Correção do Fator de Potência (PFC – <i>Power Factor Correction</i>).....	4
1.2. Motivações	4
1.3. Objetivos e Contribuições.....	5
1.4. Organização e Estrutura da Dissertação.....	6
CAPÍTULO 2 Baterias e Sistemas de Carregamento	7
2.1. Introdução	7
2.2. Tipos de Carregadores	7
2.2.1. Sistemas de Carregamento de Baterias <i>On-Board</i>	7
2.2.2. Sistemas de Carregamento de Baterias <i>Off-Board</i>	8
2.2.3. <i>MOBI.E</i>	9
2.2.4. Pontos de Carregamento Normal <i>MOBI.E</i>	10
2.2.5. Pontos de Carregamento Rápido <i>MOBI.E</i>	11
2.3. Baterias	12
2.3.1. Baterias de Chumbo-Ácido	12
2.3.2. Baterias de Níquel-Cádmio	14
2.3.3. Baterias de Hidreto Metálico de Níquel.....	15
2.3.4. Baterias de Iões de Lítio	17
2.3.5. Baterias de Polímero de Lítio	18
2.3.6. Baterias de Lítio de Fosfato de Ferro.....	18
2.3.7. Comparação entre as tecnologias de Baterias	19
2.4. Conclusões	21
CAPÍTULO 3 Conversores e Sistemas de Controlo	23
3.1. Introdução	23
3.2. Conversores para Correção do Fator de Potência	24
3.2.1. Conversor CA-CC <i>Boost</i>	24
3.2.2. Conversor CA-CC <i>Full-Bridge</i> Semicontrolado Simétrico	25
3.2.3. Conversor CA-CC <i>Full-Bridge</i> Semicontrolado Assimétrico.....	26
3.2.4. Conversor CA-CC <i>Full-Bridge</i> Totalmente Controlado.....	27
3.2.5. Conversor CC-CC <i>Buck</i>	29
3.2.6. Conversor CC-CC <i>Buck-Boost</i> Bidirecional.....	30
3.3. Técnicas de Controlo	32
3.3.1. Comando de Conversores Comutados por Modulação por Largura de Pulso.....	32
3.3.2. Sincronização com a Rede Elétrica Utilizando Técnicas <i>Phase Locked Loop</i>	33
3.3.3. Controlo de Corrente	34
3.3.4. Controlo Proporcional-Integral (PI).....	35
3.4. Controlo Aplicado aos Conversores.....	36
3.4.1. Controlo dos Conversores CA-CC	36
3.4.2. Controlo do Conversor CC-CC	38
3.5. Conclusões	39
CAPÍTULO 4 Simulação do Sistema de Carregamento de Baterias	41
4.1. Introdução	41
4.2. Simulação do Sistema de Controlo em <i>PSIM</i>	42
4.2.1. Implementação do Algoritmo de Controlo em <i>PSIM</i>	42

4.3.	Simulação do Banco de Baterias em <i>PSIM</i>	44
4.1.	Simulação do Algoritmo de PLL	44
4.2.	Simulação dos Conversores CA-CC em <i>PSIM</i>	45
4.2.1.	Simulação do Conversor CA-CC <i>Full-Bridge</i> Não Controlado	45
4.2.2.	Simulação do Conversor CA-CC <i>Boost</i>	46
4.2.3.	Simulação do Conversor CA-CC <i>Full-Bridge</i> Semicontrolado Simétrico	48
4.2.4.	Simulação do Conversor CA-CC <i>Full-Bridge</i> Semicontrolado Assimétrico	49
4.2.5.	Simulação do Conversor CA-CC <i>Full-Bridge</i> Totalmente Controlado	51
4.3.	Comparação dos Conversores CA-CC	52
4.4.	Simulação dos Conversor CC-CC em <i>PSIM</i>	53
4.5.	Simulação do Sistema Completo	55
4.6.	Conclusões	58
CAPÍTULO 5 Implementação do Sistema de Carregamento de Baterias		59
5.1.	Introdução	59
5.2.	Circuito de Potência	60
5.2.1.	IGBTs	61
5.2.2.	Dissipador Térmico	61
5.2.3.	Condensadores do Barramento CC	62
5.2.4.	Condensadores de Saída do Conversor CC-CC	63
5.2.5.	Indutância do conversor CA-CC	63
5.2.6.	Indutância do conversor CC-CC	64
5.2.7.	Pré-Carga e Proteções	64
5.3.	Sistema de Controlo	65
5.3.1.	<i>Digital Signal Controller</i>	66
5.3.2.	Sensores de Tensão de Efeito <i>Hall</i>	67
5.3.3.	Sensores de Corrente de Efeito <i>Hall</i>	68
5.3.4.	Placa de Condicionamento de Sinal e Placa de Comando	70
5.3.5.	Placa de <i>Drive</i>	71
5.3.6.	Placa de DAC	72
5.4.	Conclusões	73
CAPÍTULO 6 Resultados Experimentais		75
6.1.	Introdução	75
6.2.	Sincronização com a Rede Elétrica Utilizando uma PLL	76
6.3.	Pré-Carga e Regulação do Barramento CC	76
6.4.	Ensaio dos Conversores CA-CC	77
6.4.1.	Ensaio do Conversor CA-CC <i>Full-Bridge</i> Não Controlado	77
6.4.2.	Ensaio do Conversor CA-CC <i>Boost</i>	79
6.4.3.	Ensaio do Conversor CA-CC <i>Full-Bridge</i> Semicontrolado Simétrico	80
6.4.4.	Ensaio do Conversor CA-CC <i>Full-Bridge</i> Semicontrolado Assimétrico	81
6.4.5.	Ensaio do Conversor CA-CC <i>Full-Bridge</i> Totalmente Controlado	83
6.5.	Comparação dos Conversores CA-CC	84
6.6.	Ensaio do Conversor CC-CC	85
6.7.	Ensaio dos Conversores CA-CC em Conjunto com o Conversor CC-CC	87
6.7.1.	Ensaio do Conversor CA-CC <i>Full-Bridge</i> Não Controlado em Conjunto com o Conversor CC-CC <i>Buck</i>	87
6.7.2.	Ensaio do Conversor CA-CC <i>Boost</i> em Conjunto com o Conversor CC-CC <i>Buck</i>	88
6.7.3.	Ensaio do Conversor CA-CC <i>Full-Bridge</i> Semicontrolado Simétrico em Conjunto com o Conversor CC-CC <i>Buck</i>	90
6.7.4.	Ensaio do Conversor CA-CC <i>Full-Bridge</i> Semicontrolado Assimétrico em Conjunto com o Conversor CC-CC <i>Buck</i>	91
6.7.5.	Ensaio do Conversor CA-CC <i>Full-Bridge</i> Totalmente Controlado em Conjunto com o Conversor CC-CC <i>Buck</i>	92
6.8.	Comparação dos Conversores CA-CC a Funcionar em Conjunto com o Conversor CC-CC	93
6.9.	Conclusões	94
CAPÍTULO 7 Conclusão		97
7.1.	Conclusões	97
7.2.	Sugestões de Trabalho Futuro	99
Referências		101

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Triângulo de potências	2
Figura 2.1 - Carregador de Baterias <i>on-board</i> [18] (fonte: <i>Mitsubishi Motors</i>).	8
Figura 2.2 - Carregador de Baterias <i>off-board</i> [20] (fonte: <i>Mitsubishi Motors</i>).	8
Figura 2.3 - Mapa com a indicação dos concelhos aderentes à rede <i>MOBI.E</i> [23].	9
Figura 2.4 - Pontos de carregamento normal <i>MOBI.E</i> : (a) <i>MCC16</i> da <i>Magnum Cap</i> [26]; (b) <i>Public AC Charger</i> da <i>Efacec</i>	10
Figura 2.5 - Pontos de carregamento rápido <i>MOBI.E</i> : (a) <i>QC50</i> da <i>Efacec</i> [28]; (b) <i>MCQC Charger</i> da <i>Magnum Cap</i> [29].	11
Figura 2.6 - Estrutura interna de uma bateria de ácido-chumbo de arranque [33] (fonte: <i>DoIPoMS</i>).	13
Figura 2.7 - Diferentes tipos de baterias de ácido-chumbo: (a) Bateria de arranque; (b) Bateria de ciclo profundo [35] (fonte: <i>koldban</i>).	13
Figura 2.8 - <i>Pack</i> de baterias Ni-Cd [41] (fonte: <i>Electric Vehicles of Washington</i>)	15
Figura 2.9 - <i>Pack</i> de baterias NiMH usado em veículo híbrido <i>Toyota Prius</i> [51] (fonte: <i>Nikkei Technology</i>).	16
Figura 2.10 - <i>Pack</i> de baterias de íões de lítio do <i>Chevrolet Volt</i> [58] (fonte: <i>Car and Driver</i>).	17
Figura 2.11 - <i>Pack</i> de Baterias de polímeros de lítio de <i>Mercedes-Benz AMG SLS E-CELL</i> [61] (Fonte: <i>Gizmag</i>)	18
Figura 2.12 - <i>Pack</i> de baterias de lítio de fosfato de ferro [64] (fonte: <i>Tornado</i>).	19
Figura 3.1 - Conversor CA-CC <i>full-bridge</i> não controlado.	23
Figura 3.2 - Conversor CA-CC <i>boost</i>	24
Figura 3.3 - Modos de condução do conversor CA-CC <i>boost</i>	25
Figura 3.4 - Conversor CA-CC <i>full-bridge</i> semicontrolado simétrico.	25
Figura 3.5 - Conversor CA-CC <i>full-bridge</i> semicontrolado simétrico durante o semiciclo positivo da tensão na rede elétrica.	26
Figura 3.6 - Conversor CA-CC <i>full-bridge</i> semicontrolado simétrico durante o semiciclo negativo da tensão na rede elétrica.	26
Figura 3.7 - Conversor CA-CC <i>full-bridge</i> semicontrolado assimétrico.	26
Figura 3.8 - Conversor CA-CC <i>full-bridge</i> semicontrolado assimétrico durante o semiciclo positivo da tensão na rede elétrica.	27
Figura 3.9 - Conversor CA-CC <i>full-bridge</i> semicontrolado assimétrico durante o semiciclo negativo da tensão na rede elétrica.	27
Figura 3.10 - Conversor CA-CC <i>full-bridge</i> totalmente controlado.	28
Figura 3.11 - Conversor CA-CC <i>full-bridge</i> totalmente controlado durante o semiciclo positivo da tensão na rede elétrica, S1 e S4 ligados.	28
Figura 3.12 - Conversor CA-CC <i>full-bridge</i> totalmente controlado durante o semiciclo positivo da tensão na rede elétrica, S1 e S4 desligados.	28
Figura 3.13 - Conversor CA-CC <i>full-bridge</i> totalmente controlado durante o semiciclo negativo da tensão na rede elétrica, S2 e S3 ligados.	29
Figura 3.14 - Conversor CA-CC <i>full-bridge</i> totalmente controlado durante o semiciclo negativo da tensão na rede elétrica, S2 e S3 desligados.	29
Figura 3.15 - Conversor CC-CC <i>buck</i>	30
Figura 3.16 - Conversor CC-CC <i>buck</i> , no estado ligado/desligado do semicondutor controlado.	30

Figura 3.17 - Conversor CC-CC <i>buck-boost</i> bidirecional.	31
Figura 3.18 - Conversor CC-CC <i>buck-boost</i> durante o processo de carregamento das baterias.	31
Figura 3.19 - Conversor CC-CC <i>buck-boost</i> quando parte da energia armazenada nas baterias é devolvida para a rede elétrica.	31
Figura 3.20 - PWM obtido através da comparação da onda de referência com a onda triangular.	32
Figura 3.21 - PWM obtido através da comparação da onda de referência sinusoidal com a onda triangular.	33
Figura 3.22 - Diagrama de blocos do algoritmo de uma PLL.	34
Figura 3.23 - Conversor CA-CC <i>full-bridge</i> totalmente controlado.	34
Figura 3.24 - Diagrama de blocos do sistema de controlo de corrente utilizado nesta dissertação.	35
Figura 3.25 - Diagrama de blocos do de um controlador PI.	36
Figura 3.26 - Conversores CA-CC: (a) Topologia <i>boost</i> ; (b) Topologia <i>full-bridge</i> semicontrolada assimétrica; (c) Topologia <i>full-bridge</i> semicontrolada simétrica; (d) Topologia <i>full-bridge</i>	37
Figura 3.27 - Diagrama de blocos do sistema de controlo dos conversores CA-CC.	38
Figura 3.28 - Conversor CC-CC <i>buck</i>	38
Figura 3.29 - Diagrama de blocos do controlador do conversor CC-CC: (a) Estágio de corrente constante; (b) Estágio de tensão constante.	39
Figura 4.1 - Interface gráfico do ambiente de simulação <i>PSIM</i>	42
Figura 4.2 - Implementação do bloco <i>C</i> em <i>PSIM</i>	43
Figura 4.3 - Circuito para gerar PWM: (a) Bipolar; (b) Unipolar.	44
Figura 4.4 - Modelo simplificado da bateria.	44
Figura 4.5 - Simulação do algoritmo PLL no <i>PSIM</i>	45
Figura 4.6 - Implementação do conversor CA-CC <i>full-bridge</i> não controlado em <i>PSIM</i>	45
Figura 4.7 - Tensão da rede (v_R) e corrente da rede (i_R).	46
Figura 4.8 - Implementação do conversor CA-CC <i>boost</i> em <i>PSIM</i>	47
Figura 4.9 – Tensão da rede (v_R) e corrente da rede (i_R) à entrada do conversor.	47
Figura 4.10 – Regulação da tensão do barramento CC (V_{CC}).	48
Figura 4.11 - Implementação do conversor CA-CC <i>full-bridge</i> semicontrolado simétrico em <i>PSIM</i>	48
Figura 4.12 – Tensão da rede (v_R) e corrente da rede (i_R) à entrada do conversor.	49
Figura 4.13 – Regulação da tensão do barramento CC (V_{CC}).	49
Figura 4.14 - Implementação do conversor CA-CC <i>full-bridge</i> semicontrolado assimétrico em <i>PSIM</i>	50
Figura 4.15 – Tensão da rede (v_R) e corrente da rede (i_R) à entrada do conversor.	50
Figura 4.16 – Regulação da tensão do barramento CC (V_{CC}).	51
Figura 4.17 - Implementação do conversor CA-CC <i>full-bridge</i> totalmente controlado em <i>PSIM</i>	51
Figura 4.18 – Tensão da rede (v_R) e corrente da rede (i_R) à entrada do conversor.	52
Figura 4.19 – Regulação da tensão do barramento CC (V_{CC}).	52
Figura 4.20 - Implementação do conversor CC-CC <i>buck</i> em <i>PSIM</i>	54
Figura 4.21 - Corrente de referência (i_{ref_bat}) e corrente das baterias (i_{bat}).	54
Figura 4.22 - Tensão aos terminais das baterias (v_{bat}).	55
Figura 4.23 - Simulação carregador de baterias com correção do fator de potência para utilização <i>on-board</i> em veículo elétrico.	55

Figura 4.24 - Tensão da rede (v_R) e corrente da rede (i_R) à entrada do conversor e corrente de referência (i_{ref}).....	56
Figura 4.25 - Carregamento e regulação da tensão do barramento CC.....	56
Figura 4.26 - Corrente de referência (i_{ref_bat}) e corrente das baterias (i_{bat}).	57
Figura 4.27 - Tensão aos terminais das baterias (v_{bat}).....	57
Figura 5.1 - Esquemático do sistema de carregamento.....	60
Figura 5.2 - Circuito de potência: (a) Condensadores do barramento CC; (b) Sensores de tensão; (c) Sensores de corrente; (d) Indutância do conversor CC; (e) Condensadores de saída do conversor CC-CC.....	60
Figura 5.3 - (a) IGBT <i>FGA25N120ANTD</i> ; (b) Esquema interno.	61
Figura 5.4 - Dissipador de convecção natural.....	62
Figura 5.5 – (a) Disposição dos condensadores na placa; (b) Ligação dos condensadores em paralelo.	62
Figura 5.6 - Condensadores do barramento CC.....	63
Figura 5.7 - Condensadores de saída do conversor CC-CC.....	63
Figura 5.8 - Indutância do conversor CA-CC.....	64
Figura 5.9 - Indutância do conversor CC-CC.....	64
Figura 5.10 - Relés <i>RX314012C</i> da <i>Tyco</i>	65
Figura 5.11 – Acoplamento do conversor CA-CC à rede elétrica através do circuito de pré-carga.....	65
Figura 5.12 - DSC <i>TMS320F28335</i> inserido na USB <i>docking station TMDSDOCK28335</i>	66
Figura 5.13 - Ambiente de desenvolvimento integrado do <i>Code Composer Studio 5.5</i>	67
Figura 5.14 - Sensores de tensão de efeito <i>hall CYHVS025A</i> : (a) Sensor de tensão do barramento; (b) sensor de tensão de entrada; (c) Sensor de tensão de saída do conversor CC-CC.....	67
Figura 5.15 - Esquema de ligações do sensor de tensão de efeito <i>hall CYHVS025A</i>	68
Figura 5.16 - Sensores de corrente de efeito <i>hall LA 100-P</i> : (a) Sensor de corrente à entrada do conversor CA-CC; (b) Sensor à saída do conversor CC-CC.	69
Figura 5.17 - Esquemático de ligações do sensor de corrente de efeito <i>hall LA 55-P</i>	69
Figura 5.18 - Placa de condicionamento de sinal e placa de comando.....	71
Figura 5.19 - Esquemático do opto acoplador <i>HCPL-3120</i> [90].	72
Figura 5.20 - Placa de <i>drive</i>	72
Figura 5.21 - Placa de DAC.....	73
Figura 5.22 - Aspeto final do sistema de carregamento de baterias <i>on-board</i>	74
Figura 6.1 - Bancada de Trabalho.....	75
Figura 6.2 - Sinal da PLL em fase com a tensão da rede.	76
Figura 6.3 - Pré-carga e regulação da tensão do barramento CC.	77
Figura 6.4 - Conversor CA-CC <i>full-bridge</i> totalmente controlado.	77
Figura 6.5 - Conversor CA-CC <i>full-bridge</i> não controlado.	78
Figura 6.6 - Tensão da rede elétrica (v_R), corrente de entrada (i_i) e tensão no barramento CC (V_{CC}).	78
Figura 6.7 - Análise dos harmónicos e THD _i e do fator de potência: (a) Harmónicos e THD _i da corrente de entrada (i_i); (b) Fator de potência e ângulo de defasamento entre v_R e i_i	78
Figura 6.8 - Conversor CA-CC <i>boost</i>	79
Figura 6.9 - Tensão da rede elétrica (v_R), corrente de entrada (i_i) e tensão no barramento CC (V_{CC}).	79
Figura 6.10 - Análise dos harmónicos e THD _i e do fator de potência: (a) Harmónicos e THD _i da corrente de entrada (i_i); (b) Fator de potência e ângulo de defasamento entre v_R e i_i	80

Figura 6.11 - Conversor CA-CC <i>full-bridge</i> semicontrolado simétrico.....	80
Figura 6.12 - Tensão da rede elétrica (v_R), corrente de entrada (i_i) e tensão no barramento CC (V_{CC}).....	81
Figura 6.13 - Análise dos harmónicos e THD _i e do fator de potência: (a) Harmónicos e THD _i da corrente de entrada (i_i); (b) Fator de potência e ângulo de defasamento entre v_R e i_i	81
Figura 6.14 - Conversor CA-CC <i>full-bridge</i> semicontrolado assimétrico.....	82
Figura 6.15 - Tensão da rede elétrica (v_R), corrente de entrada (i_i) e tensão no barramento CC (V_{CC}).....	82
Figura 6.16 - Análise dos harmónicos e THD _i e do fator de potência: (a) Harmónicos e THD _i da corrente de entrada (i_i); (b) Fator de potência e ângulo de defasamento entre v_R e i_i	83
Figura 6.17 - Conversor CA-CC <i>full-bridge</i> totalmente controlado.	83
Figura 6.18 - Tensão da rede elétrica (v_R), corrente de entrada (i_i) e tensão no barramento CC (V_{CC}).....	84
Figura 6.19 - Análise dos harmónicos e THD _i e do fator de potência: (a) Harmónicos e THD _i da corrente de entrada (i_i); (b) Fator de potência e ângulo de defasamento entre v_R e i_i	84
Figura 6.20 - Conversor CC-CC <i>buck-boost</i>	85
Figura 6.21 - Conversor CC-CC <i>buck</i>	86
Figura 6.22 - Tensão no barramento CC (V_{CC}), tensão na carga (v_{carga}), corrente na carga (i_{carga}): (a) Para $V_{CC} = 40$ V; (b) Para $V_{CC} = 60$ V.....	86
Figura 6.23 - Tensão no barramento CC (V_{CC}), tensão na carga (v_{carga}), corrente na carga (i_{carga}): (a) Para $V_{CC} = 40$ V; (b) Para $V_{CC} = 60$ V.....	87
Figura 6.24 - Conversor CA-CC <i>full-bridge</i> não controlado em conjunto com o conversor CC-CC <i>buck</i>	87
Figura 6.25 - Tensão da rede elétrica (v_R) e corrente de entrada (i_i) do lado CA, tensão na carga (v_{carga}) e corrente na carga (i_{carga}).....	88
Figura 6.26 - Análise dos harmónicos e THD _i e do fator de potência: (a) Harmónicos e THD _i da corrente de entrada (i_i); (b) Fator de potência e ângulo de defasamento entre v_R e i_i	88
Figura 6.27 - Conversor CA-CC <i>boost</i> em conjunto com o conversor CC-CC <i>buck</i>	89
Figura 6.28 - Tensão da rede elétrica (v_R) e corrente de entrada (i_i) do lado CA, tensão na carga (v_{carga}) e corrente na carga (i_{carga}).....	89
Figura 6.29 - Análise dos harmónicos e THD _i e do fator de potência: (a) Harmónicos e THD _i da corrente de entrada (i_i); (b) Fator de potência e ângulo de defasamento entre v_R e i_i	89
Figura 6.30 - Conversor CA-CC <i>full-bridge</i> semicontrolado simétrico em conjunto com o conversor CC-CC <i>buck</i>	90
Figura 6.31 - Tensão da rede elétrica (v_R) e corrente de entrada (i_i) do lado CA, tensão na carga (v_{carga}) e corrente na carga (i_{carga}).....	90
Figura 6.32 - Análise dos harmónicos e THD _i e do fator de potência: (a) Harmónicos e THD _i da corrente de entrada (i_i); (b) Fator de potência e ângulo de defasamento entre v_R e i_i	91
Figura 6.33 - Conversor CA-CC <i>full-bridge</i> semicontrolado assimétrico em conjunto com o conversor CC-CC <i>buck</i>	91
Figura 6.34 - Tensão da rede elétrica (v_R) e corrente de entrada (i_i) do lado CA, tensão na carga (v_{carga}) e corrente na carga (i_{carga}).....	92
Figura 6.35 - Análise dos harmónicos e THD _i e do fator de potência: (a) Harmónicos e THD _i da corrente de entrada (i_i); (b) Fator de potência e ângulo de defasamento entre v_R e i_i	92
Figura 6.36 - Conversor CA-CC <i>full-bridge</i> totalmente controlado em conjunto com o conversor CC-CC <i>buck</i>	92
Figura 6.37 - Tensão da rede elétrica (v_R) e corrente de entrada (i_i) do lado CA, tensão na carga (v_{carga}) e corrente na carga (i_{carga}).....	93

Figura 6.38 - Análise dos harmónicos e THD_i e do fator de potência: (a) Harmónicos e THD_i da corrente de entrada (i_i); (b) Fator de potência e ângulo de desfasamento entre v_R e i_i 93

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Características técnicas dos pontos e carregamento normal da <i>MOBILE</i> [25][26].....	10
Tabela 2.2 - Características técnicas dos pontos e carregamento rápido da <i>MOBILE</i> [28][29].	11
Tabela 2.3 - Baterias usadas por algumas marcas em VE [31].	12
Tabela 2.4 - Objetivos impostos pela USABC para o desempenho das baterias para VEs, adaptado de [43][58][66].	20
Tabela 2.5 - Desempenho de alguns dos sistemas de armazenamento, adaptado de [57][66][67][68][69].	20
Tabela 4.1 - Características de simulação.	53
Tabela 4.2 - Valores de THD _i e FP obtidos nas simulações dos diferentes conversores.	53
Tabela 6.1 - Características dos ensaios.....	84
Tabela 6.2 - Valores de THD _i e FP obtidos nos ensaios dos diferentes conversores.	85
Tabela 6.3 - Características dos ensaios.....	94
Tabela 6.4 - Valores de THD _i e FP obtidos nos ensaios dos diferentes conversores.	94

Lista de Siglas e Acrónimos

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
BYD	<i>Build Your Dreams - Car Company</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i>
DSC	<i>Digital Signal Controller</i>
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i>
G2V	<i>Grid-to-vehicle</i>
GEPE	Grupo de Eletrônica de Potência e Energias
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
FP	Fator de Potência
PFC	<i>Power Factor Correction</i>
PI	Proporcional-Integral
PLL	<i>Phase-Locked Loop</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RFID	<i>Radio-Frequency Identification</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i>
SPWM	<i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i>
THD _i	<i>Total Harmonic Distortion of Current</i>
USABC	<i>United States Advanced Battery Consortium</i>
V2G	<i>Vehicle-to-grid</i>
VE	Veículo Elétrico
VEB	Veículo Elétrico a Bateria
VEH	Veículo Elétrico Híbrido
VEHP	Veículo Elétrico Híbrido <i>Plug-in</i>
ZOH	<i>Zero-Order-Hold</i>

Nomenclatura

Símbolo	Significado	Unidade
v_R	Tensão da rede elétrica – valor instantâneo da tensão medida no ponto de consumo (ponto mais a jusante do circuito em análise)	V
i_R	Corrente da rede elétrica – corrente medida no ponto de fornecimento de energia elétrica pela rede	A
v_L	Tensão na indutância – valor instantâneo da tensão medida no ponto de consumo (ponto mais a jusante do circuito em análise)	V
v_C	Tensão do conversor em análise	V
i_{bat}	Corrente fornecida às baterias	A
v_i	Tensão de entrada – valor instantâneo da tensão medida na entrada do conversor	V
i_i	Corrente de entrada – corrente medida na entrada do conversor	A
L	Indutância de linha	H
R_{carga}	Resistência de carga – Resistência de carga colocada à saída do conversor	Ω
v_{carga}	Tensão da carga – valor instantâneo da tensão medida na carga à saída do conversor	V
i_{carga}	Corrente da carga – corrente medida na carga colocada à saída do conversor	A
C	Condensador – Condensador do conversor	F
V_{CC}	Tensão no barramento CC	V
P	Potência ativa	W
Q	Potência reativa	VAr
S	Potência aparente	VA
T_s	Período de amostragem	s
THD	Distorção harmónica total.	V ou A
$THD\%$	Distorção harmónica total calculada em percentagem da amplitude da fundamental.	%

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1. Identificação do Problema

Devido à elevada preocupação com a emissão de gases de efeito de estufa, existe cada vez mais uma aposta forte no desenvolvimento de veículos sustentáveis ambientalmente. A solução sustentável mais proeminente para reduzir o consumo do petróleo e dos gases de efeito de estufa encontra-se nos veículos elétricos (VEs) e veículos elétricos híbridos (VEHs) [1]. Estes veículos usam a eletricidade como fonte de energia principal ou auxiliar. A energia é armazenada em baterias que se encontram instaladas nos VEs, e são carregadas a partir da rede de distribuição elétrica. No entanto, as baterias não podem ser ligadas diretamente à rede elétrica: é necessário converter a tensão alternada proveniente da rede elétrica em tensão contínua, a fim de carregar as baterias. Além disso, o sistema de carregamento deve ser controlado de acordo com as especificações apropriadas a fim de carregar as baterias de forma segura [2].

Hoje em dia, os conversores CA-CC são utilizados na conversão de potência para diversas aplicações, como por exemplo, fontes de alimentação para uma diversidade de sistemas eletrónicos. Todavia, os conversores CA-CC mais simples utilizam pontes retificadoras não controladas para retificar a tensão alternada, filtrando-a com condensadores. Este processo produz efeitos indesejáveis, tais como consumo de corrente não-sinusoidal com fator de potência reduzido no sistema de distribuição, causando problemas na rede elétrica e consequentemente diminuindo a qualidade de energia elétrica [3][4][5].

Com vista a melhorar a qualidade de energia elétrica foram criadas normas como IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-4 e IEEE 519-1992, que estabelecem limites de conteúdo harmónico que pode ser produzido pelos equipamentos eletrónicos. De forma a respeitar essas normas e aumentar a eficiência dos conversores CA-CC, foram surgindo algumas topologias de conversores CA-CC que permitem controlar a corrente no lado CA e consequentemente, obter um fator de potência próximo da unidade. Estes conversores estão identificados na literatura como *Power Factor Correction Converters* (PFC) [3][5].

1.1.1. Fator de Potência (PF - *Power Factor*)

A potência elétrica consumida por um sistema elétrico que opera em tensão e corrente alternada é composta por três parcelas distintas, potência ativa, potência reativa e potência aparente.

Considerando um consumo de tensão e corrente sinusoidais temos que:

- Potência ativa (P) medida em *Watt* (W): é a que realmente produz trabalho útil, podendo ser calculada através da equação (1.1).

$$P = S \cos \varphi \quad (1.1)$$

- Potência reativa (Q) medida em Volt Ampére reativo (VAr): não realiza trabalho útil, pode ser calculada através da equação (1.2).

$$Q = S \sin \varphi \quad (1.2)$$

- Potência aparente (S) medida em Volt Ampére (VA): é a soma vetorial da potência ativa e reativa, pode ser calculada através da equação (1.3).

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (1.3)$$

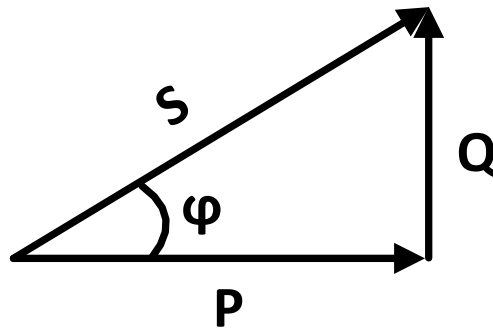


Figura 1.1 - Triângulo de potências.

O fator de potência de um sistema elétrico que opera com tensões e correntes sinusoidais é definido pela razão entre a potência ativa (P) e potência aparente (S), dada pela equação (1.4).

$$FP = \frac{P}{S} = \cos \varphi \quad (1.4)$$

Onde φ é o desfasamento entre o sinal da corrente e da tensão [6].

O fator de potência pode variar entre 0 e 1, em que o fator de potência ideal é a unidade [6].

Um valor inferior a 1 significa que a onda sinusoidal da tensão e da corrente não se encontram em fase. Isto acontece quando o sistema elétrico possui condensadores e/ou

indutâncias que armazenam energia que é mais tarde devolvida á rede sem realizar trabalho útil [6].

No caso em que apenas a tensão é sinusoidal e a corrente possui uma forma de onda distorcida, o fator de potência é dado pela equação (1.5).

$$FP = \frac{I_1}{I_{RMS}} \cos \varphi_1 \quad (1.5)$$

Onde I_1 é a primeira harmônica da corrente, I_{RMS} é a corrente total e φ_1 é o desfasamento entre a primeira harmônica da corrente e a tensão [7].

Por sua vez, o valor da corrente eficaz pode ser expresso em função das correntes harmônicas através da equação (1.6).

$$I_{RMS} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (1.6)$$

Definindo-se a Taxa de Distorção Harmônica (THD) como a relação entre o valor eficaz das componentes harmônicas da corrente e a fundamental através da equação (1.7).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (1.7)$$

Desta forma o fator de potência pode ser escrito através da equação (1.8).

$$F = \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (1.8)$$

1.1.2. Qualidade da Energia Elétrica

Os principais problemas de qualidade da energia associados à integração da mobilidade elétrica são: harmónicos de tensão e corrente, baixo fator de potência e ruído eletromagnético. Para resolver estes problemas são por vezes utilizados filtros ativos série (produzem tensões de compensação), filtros ativos paralelos (produzem correntes de compensação) e condicionadores unificados de qualidade de energia (usados para resolver problemas relacionado com a corrente e a tensão). No entanto, através da utilização de topologias de conversores para correção do fator de potência em sistemas de carregamento de baterias, juntamente com um sistema de controlo adequado, é possível obter um consumo de corrente sinusoidal com fator de potência elevado, não contribuindo assim para a degradação da qualidade de energia [8].

1.1.3. Correção do Fator de Potência (PFC – *Power Factor Correction*)

Correção do fator de potência é a técnica através da qual o fator de potência de um sistema elétrico que opera em tensão e corrente alternada pode ser melhorado [9].

A correção do fator de potência pode ser feita de forma passiva ou de forma ativa. De forma passiva são utilizados filtros passivos para fazer a correção do fator de potência. Desta forma o fator de potência não pode ser aumentado até o valor desejado e a tensão de saída não pode ser controlada [9][10]. De forma ativa são utilizados semicondutores controlados associados a elementos passivos, de maneira a obter uma corrente de entrada sinusoidal e uma tensão de saída controlada. Utilizando um método de controlo adequado pode aproximar o fator de potência à unidade [11].

A correção do fator de potência tem como alguns benefícios a redução do consumo de energia, redução das perdas de energia e baixo consumo de potência reativa [6].

1.2. Motivações

Apesar dos combustíveis fósseis continuarem a fornecer a maior parte da energia utilizada no mundo, dos quais o petróleo permanece como a maior fonte de energia, o consumo de petróleo tem sofrido várias alterações em todos os setores, exceto no setor dos transportes.

Desta forma, o desenvolvimento do setor dos transportes é um fator muito importante na melhoria da eficiência energética a nível mundial. Neste sentido, a principal alternativa ao atual paradigma passa pela aposta na mobilidade elétrica, apoiada principalmente pelos avanços tecnológicos em diferentes áreas, como sistemas de eletrónica de potência e de informação [12].

Já se encontram em desenvolvimento diferentes tipos de Veículos Elétricos (VEs) em alternativa aos veículos com motor de combustão interna, abrangendo os Veículos Elétricos Híbridos (VEHs), os Veículos Elétricos a Bateria (VEBs), os Veículos Elétricos Híbridos *Plug-in* (VEHPs) e os Veículos de Célula de Combustível [12] [13].

A disponibilização de modelos de VEs por parte dos diversos fabricantes de automóveis demonstra que este tipo de veículos são cada vez mais populares no mercado automóvel [12].

Contudo, para que os VEs se tornem cada vez mais uma solução viável de transporte sustentável, é necessário vencer alguns desafios significativos relacionados com as baterias, como por exemplo, o elevado custo, ciclo de vida, tempo de carregamento, autonomia, peso e falta de infraestruturas de carregamento. Por estes

motivos os VEs ainda não obtiveram uma ampla aceitação [14][15]. A aposta massiva nos VEs vai então depender fortemente do desenvolvimento dos sistemas de armazenamento de energia e dos sistemas de carregamento das baterias, principalmente no que concerne ao seu custo e desempenho.

1.3. Objetivos e Contribuições

Nesta dissertação pretende-se dar continuidade a um estudo iniciado na área dos VEs por parte do Grupo de Eletrónica de Potência e Energias (GEPE) da Universidade do Minho. Com base num sistema de carregamento monofásico *on-board*, desenvolvido pelo GEPE, composto por um conversor CA-CC *full-bridge* totalmente controlado e um conversor CC-CC *buck-boost* bidirecional, pretende-se validar o funcionamento de diferentes topologias de conversores CA-CC através da utilização de diferentes estratégias de controlo aplicadas ao *hardware* deste sistema, com vista a realizar um estudo dessas topologias e estabelecer uma comparação em termos do THD_i da corrente consumida e fator de potência.

Assim este trabalho envolveu as seguintes tarefas:

- Pesquisa sobre o estado da arte dos sistemas para carregamento de baterias de VEs. Pesquisa sobre os conversores e elementos armazenadores (baterias). Pesquisa sobre topologias e técnicas de controlo para sistemas para carregamento de baterias de VEs.
- Estudos sobre os Conversores CA-CC e CC-CC utilizados em sistemas para carregamento de baterias de VEs.
- Estudo com recurso a simulações computacionais utilizando a ferramenta de simulação *PSIM* de estratégias de Controlo e Topologias aplicáveis ao sistema.
- Estudo da plataforma para desenvolvimento do sistema de controlo a ser implementado (DSC/microcontrolador *Texas Instruments TMS320F28335*).
- Teste do carregador *on-board* monofásico para uma potência máxima de (3.5 kW), tensão de entrada (230 V), corrente máxima de saída (10 A), tensão de saída (270 V a 360 V), corrente sinusoidal de entrada e fator de potência unitário.
- Desenvolvimento do sistema de controlo digital mais adequado para o sistema.

- Obtenção de diferentes topologias de conversores PFC monofásicos CA-CC por via da estratégia de controlo digital aplicada ao conversor monofásico CA-CC totalmente controlado já existente.
- Comparação das diferentes topologias.
- Carregamento das baterias.

1.4. Organização e Estrutura da Dissertação

A presente Dissertação de Mestrado encontra-se dividida em sete capítulos.

No Capítulo 1 é realizada uma introdução ao tema dos veículos elétricos, seus carregadores de baterias e problemas associados a estes.

No Capítulo 2 são abordados os sistemas de carregamentos de baterias para veículos elétricos, destacando-se a rede de carregamento inteligente *MOBI.E*, onde são mencionados os tipos de carregadores que esta disponibiliza assim como os seus fabricantes. Neste capítulo é abordado também o tema das baterias, onde são mencionados diferentes tipos de tecnologias de baterias, e onde é feita uma comparação entre elas.

No Capítulo 3 é abordado o tema dos conversores, onde são apresentadas diferentes topologias de conversores de potência que podem ser utilizados em sistemas de carregamento de baterias. Neste capítulo é também abordado o tema dos sistemas de controlo que podem ser utilizados nos conversores de potência.

No Capítulo 4 são apresentadas os modelos de simulação para os diferentes conversores de potência e os algoritmos de controlo a utilizar. São apresentados os resultados de simulação obtidos para as diferentes topologias e é feita uma comparação entre topologias no que diz respeito aos valores de THD_i e fator de potência.

No Capítulo 5 são apresentados os elementos constituintes do sistema de carregamento de baterias, este é dividido pelo circuito de potência e pelo sistema de controlo.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados dos ensaios experimentais efetuados ao sistema de carregamento de baterias e é feita uma comparação entre topologias no que diz respeito aos valores de THD_i e fator de potência.

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões do trabalho realizado. E são também apresentadas propostas de trabalho futuro com o objetivo de melhorar o trabalho realizado.

CAPÍTULO 2

Baterias e Sistemas de Carregamento

2.1. Introdução

Os sistemas de carregamento de baterias são equipamentos que permitem carregar uma ou mais baterias em simultâneo. Estes desempenham um papel muito importante no desenvolvimento dos VEs, uma vez que o tempo de carregamento e a vida útil das baterias estão ligados às características do sistema de carregamento [14]. O seu funcionamento é condicionado pela topologia e pelo sistema de controlo.

Os sistemas de carregamento de baterias deverão também ter em conta as especificações das baterias fornecidas pelo fabricante, e devem ser controlados para que o sistema consuma uma corrente com baixa distorção harmónica e com fator de potência próximo da unidade, respeitando assim as normas, IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-4 e IEEE 519-1992, que estabelecem os limites do conteúdo harmónico que pode ser produzido pelos equipamentos eletrónicos [3][14][8].

2.2. Tipos de Carregadores

Os sistemas de carregamento de baterias podem ser classificados como *on-board* ou *off-board*, podendo estes permitir carregamento unidirecional G2V (*Grid to Vehicle*) e/ou bidirecional G2V e V2G (*Vehicle to Grid*). Também podem ser classificados como sistemas de carregamento lento ou rápido dependendo da potência com que as baterias são carregadas. Existem também sistemas de carregamento que permitem implementar ambas as opções (lenta e rápida) [8][14].

2.2.1. Sistemas de Carregamento de Baterias *On-Board*

Os sistemas de carregamento de baterias *on-board* encontram-se instalados no interior do veículo e devem ser compactos, leves e robustos. São normalmente projetados para carregar baterias em modo lento [8][16]. Uma das principais vantagens deste tipo de carregadores de baterias é que permitem que o utilizador possa carregar as baterias do seu veículo onde quer que haja uma tomada de ligação á rede elétrica disponível [17]. Na

Figura 2.1 é apresentado um carregador de baterias *on-board* produzido pela *Mitsubishi Motors*.



Figura 2.1 - Carregador de Baterias *on-board* [18] (fonte: *Mitsubishi Motors*).

2.2.2. Sistemas de Carregamento de Baterias *Off-Board*

Os sistemas de carregamento de baterias *off-board* são instalados fora do veículo. São normalmente projetados para carregar baterias de modo normal e de modo rápido [8]. Uma vez que o carregador não se encontra instalado no VE o utilizador está limitado a carregar as baterias de acordo com o número de postos de carregamento distribuídos pelo país [19]. Na Figura 2.2 é apresentado um carregador de baterias *off-board* produzido pela *Mitsubishi Motors*.



Figura 2.2 - Carregador de Baterias *off-board* [20] (fonte: *Mitsubishi Motors*).

2.2.3. *MOBIE*

A *MOBIE* é uma rede de carregamento inteligente, que utiliza energia elétrica proveniente essencialmente de fontes renováveis para o abastecimento de VE [21]. A *MOBIE* faz parte do plano para a mobilidade elétrica em Portugal, lançado pelo Governo Português no início de 2008 [22].

A estrutura conta com 1300 pontos de carregamento normal implantados em 25 cidades do país (Figura 2.3) e 50 pontos de carregamento rápido instalados nas principais vias de comunicação, o que lhe garante cobertura nacional, facilitando assim a circulação de VE em todo o território nacional. É acessível a todos os utilizadores e compatível com todas as marcas de VE. Através de um cartão *MOBIE* o utilizador pode carregar o seu VE em qualquer ponto da rede nacional com o máximo de comodidade e segurança [21][22].

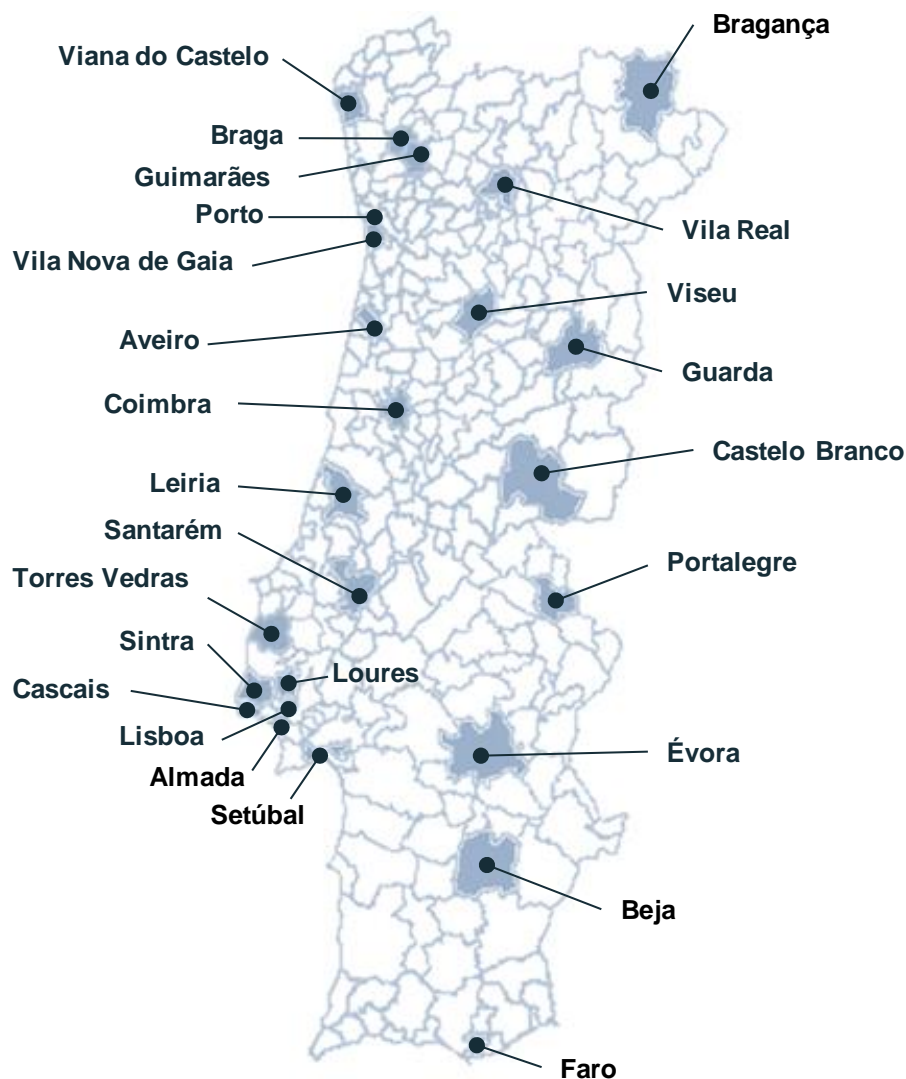


Figura 2.3 - Mapa com a indicação dos concelhos aderentes à rede *MOBIE* [23].

2.2.4. Pontos de Carregamento Normal *MOBI.E*

Os pontos de carregamentos *MOBI.E* foram desenvolvidos por duas empresas portuguesas, a *Efacec* e a *Magnum Cap* [24][25].

Na Figura 2.4 são apresentados dois pontos de carregamento normal: o ponto de carregamento *MCC16* da *Magnum Cap* (Figura 2.4 (a)) e o ponto de carregamento *Public AC Charger* da *Efacec* (Figura 2.4 (b)), ambos são compostos por um “quiosque” e uma “unidade satélite”. O quiosque é onde se encontra o interface com o utilizador, assim como o leitor do cartão RFID, o sistema de comunicação via internet e indicador de estado de carregamento. Os VEs nestes pontos de carregamento demoram entre 6 a 8 horas a carregar até 100% da sua capacidade [26][27].

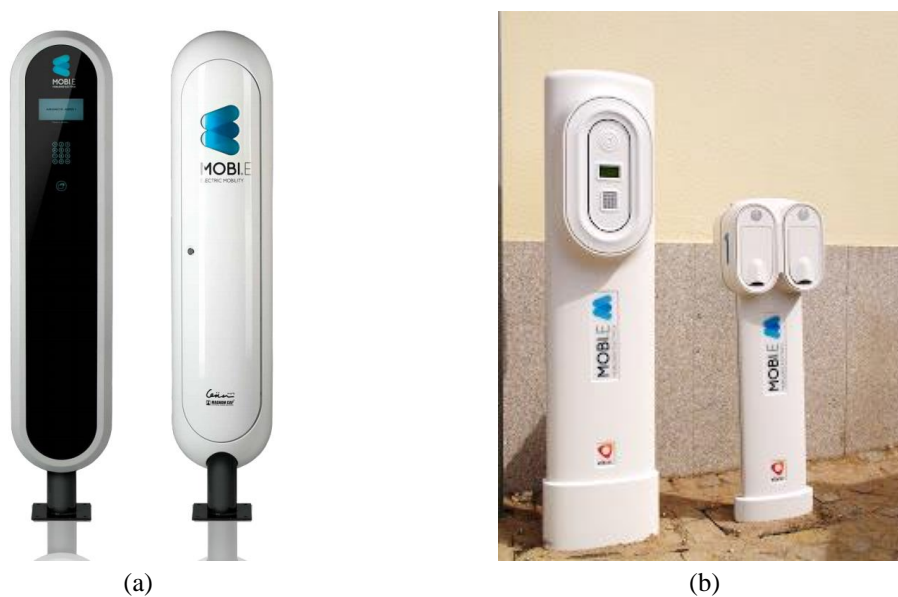


Figura 2.4 - Pontos de carregamento normal *MOBI.E*: (a) *MCC16* da *Magnum Cap* [26]; (b) *Public AC Charger* da *Efacec*.

Os pontos de carregamento normal da *MOBI.E*, independentemente da marca, têm as características técnicas apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Características técnicas dos pontos e carregamento normal da *MOBI.E* [26][27].

Equipamento	MCC16	<i>Public AC Charger</i>
	Valores nominais de entrada	
Fases	1 + N + T	
Tensão	(230± 10%) V (CA)	
Corrente	16 a 32 A	
Potência	3,7 a 7,4 kVA	
Frequência	50 Hz	

2.2.5. Pontos de Carregamento Rápido *MOBI.E*

Os pontos de carregamento rápido utilizam os modelos *QC50* da *Efacec*, ou o modelo *MCQC Charger* da *Magnum Cap*, Figura 2.5 [24][28][29].



Figura 2.5 - Pontos de carregamento rápido *MOBI.E*: (a) *QC50* da *Efacec* [28]; (b) *MCQC Charger* da *Magnum Cap* [29].

Os pontos de carregamento rápido da *MOBI.E*, têm as características técnicas apresentadas na Tabela 2.2:

Tabela 2.2 - Características técnicas dos pontos e carregamento rápido da *MOBI.E* [28][29].

Equipamento	QC50	MCQC
Valores nominais de entrada		
Fases	3 + N + T	3 + N + T
Tensão	(400 ± 10%) V (CA)	(400 ± 10%) V (CA)
Corrente	95 A	80 A
Eficiência	96%	>90%
Potência	65.5 kVA	58 kVA
Frequência	50 Hz	50 Hz
Fator de Potência	0.98	1
THD_i corrente	12.3	-
Valores de Saída (CC)		
Tensão	0 a 500 V	0 a 525 V
Corrente	0 a 125 A	0 a 125 A
Potência nominal	50 kW	50 kW

2.3. Baterias

Os sistemas de armazenamento de energia são também de grande importância no desenvolvimento dos VEs, uma vez que estes irão determinar diretamente a distância que o veículo pode percorrer sendo apenas alimentado pelo sistema de armazenamento [13]. Essa distância vai depender da capacidade de armazenamento de energia do sistema, assim como da sua massa.

Nos VE os sistemas de armazenamento de energia mais utilizados são as baterias de chumbo-ácido, as baterias de níquel-cádmio (Ni-Cd), as baterias de hidreto metálico de níquel (Ni-MH), as baterias de íões de lítio (Li-ion), as baterias de polímero de lítio (Li-pol) e as baterias de lítio de fosfato de ferro (LiFePO₄) [30]. Destes destacam-se as baterias de hidreto metálico de níquel e as baterias de íões de lítio como as tecnologias mais utilizadas, Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Baterias usadas por algumas marcas em VE [31].

Companhia	País	Modelo do VE	Tecnologia de Bateria
General Motors	EUA	<i>Chevy-Volt</i>	Li-ion
		<i>Saturn Vue Hybrid</i>	Ni-MH
Ford	EUA	<i>Escape, Fusion, MKZ HEV</i>	Ni-MH
		<i>Escape PHEV</i>	Li-ion
<i>Toyota</i>	Japão	<i>Prius, Lexus</i>	Ni-MH
<i>Honda</i>	Japão	<i>Civic, Insight</i>	Ni-MH
<i>Hyundai</i>	Coreia do Sul	<i>Sonata</i>	Li-pol
<i>Chrysler</i>	EUA	<i>Chrysler 200C EV</i>	Li-ion
BMW	Alemanha	<i>X6</i>	Ni-MH
		<i>Mini E (2012)</i>	Li-ion
<i>BYD</i>	China	<i>E6</i>	Li-ion
Daimler Benz	Alemanha	<i>ML450, S400</i>	Ni-MH
		<i>Smart EV (2010)</i>	Li-ion
<i>Mitsubishi</i>	Japão	<i>iMiEV (2010)</i>	Li-ion
Nissan	Japão	<i>Altima</i>	Ni-MH
		<i>Leaf EV (2010)</i>	Li-ion
<i>Tesla</i>	EUA	<i>Roadster (2009)</i>	Li-ion
<i>Think</i>	Noruega	<i>Think EV</i>	Li-ion

2.3.1. Baterias de Chumbo-Ácido

As primeiras baterias recarregáveis disponíveis foram as de chumbo-ácido, inventadas em 1859 por *Gaston Planté* [32].

Estas continuam a ser a tecnologia de escolha em carros convencionais e camiões para o acionamento do motor de arranque, ignição, iluminação entre outras funções elétricas por serem robustas e por causa de seu baixo custo [30].

As baterias de chumbo-ácido construídas para este tipo de aplicações são denominadas por baterias de arranque (Figura 2.6). São projetadas para fornecer uma corrente elevada num curto período de tempo. Este tipo de baterias não tolera ser profundamente descarregada.

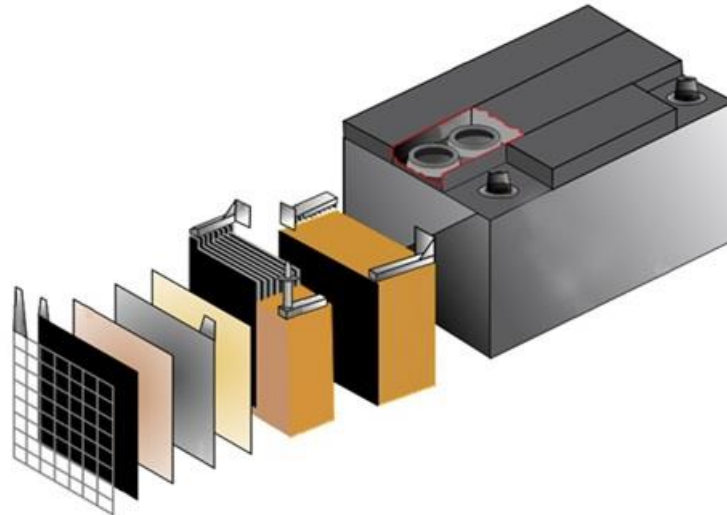


Figura 2.6 - Estrutura interna de uma bateria de ácido-chumbo de arranque [33] (fonte: *DoIPoMS*).

Ao contrário das baterias de arranque, as baterias de ciclo profundo são projetadas de forma a maximizar o número de ciclos de carregamento/descarregamento e a sua capacidade. São constituídas por placas de chumbo mais grosso que favorecem o armazenamento de energia e tornam as baterias mais tolerantes as descargas profundas [34], Figura 2.7 (b).

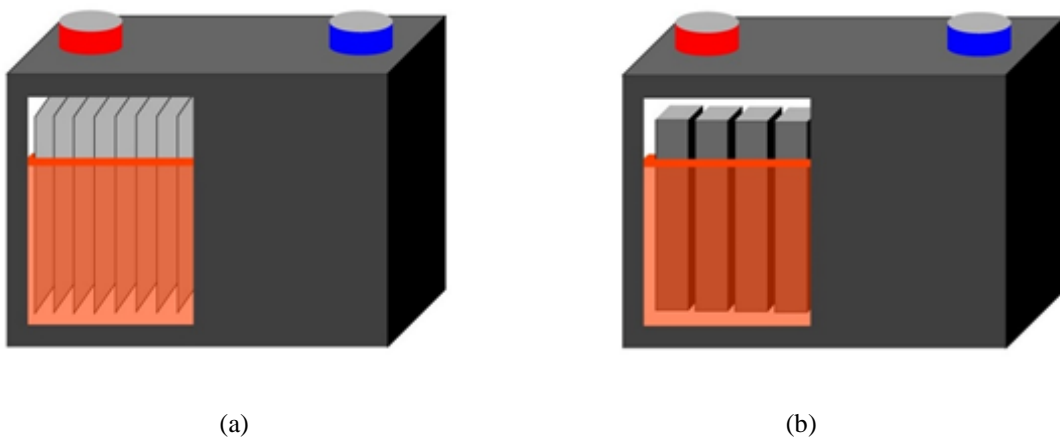


Figura 2.7 - Diferentes tipos de baterias de ácido-chumbo: (a) Bateria de arranque; (b) Bateria de ciclo profundo [35] (fonte: *koldban*).

As baterias de ciclo profundo em comparação com as baterias de arranque, são mais pesadas e mais caras, uma vez que são constituídas por uma quantidade maior de chumbo.

As baterias de ciclo profundo são utilizadas em diversos VE como, carros de golfe, cadeiras de rodas elétricas, empilhadoras e automóveis [36].

Deixar uma bateria de chumbo-ácido descarregada por muitos dias levará a uma deterioração da placa positiva e a uma perda permanente de capacidade.

As baterias de chumbo-ácido têm como principais vantagens as seguintes [37]:

- As baterias de chumbo-ácido têm sido testadas e aperfeiçoadas ao longo de mais de 140 anos;
- Vasta gama de tamanhos e capacidades disponíveis;
- Custo reduzido relativamente a outras baterias;
- Possuem um longo ciclo de vida,
- Tolerantes a sobrecargas;
- Podem ser recicladas.

2.3.2. Baterias de Níquel-Cádmio

As baterias de níquel-cádmio (Ni-Cd) foram inventadas por *Waldmar Jungner* em 1899. Ofereciam várias vantagens em relação às baterias de chumbo-ácido mas os materiais que as constituíam eram caros. Desde então a tecnologia foi melhorada, até se obter a bateria de níquel-cádmio em uso hoje em dia [38].

A bateria de níquel-cádmio é uma tecnologia de bateria recarregável muito bem conhecida, utilizada em vários equipamentos eletrónicos, como computadores portáteis, telemóveis, telefones sem fio, etc. É bastante conhecida pelo seu famoso “efeito memória”, o que faz com que este tipo de bateria perca a sua carga mais rapidamente quando está velha do que quando era nova. O “efeito memória” acontece quando a bateria “pensa” que está completamente carregada, mas na realidade não está. Por exemplo, esta pode estar carregada até 70% mas “pensa” que está a 100%. Nestas condições, quando esta for colocada em carregamento, irá parar a recarga antes de estar realmente carregada. Assim quando ela for colocada no equipamento eletrónico, ele irá funcionar durante menos tempo, uma vez que estará apenas carregada a 70% [39]. As baterias de Níquel-Cádmio, Figura 2.8, continuam a ser uma das baterias mais robustas, mas precisam de cuidados adequados para atingir uma longevidade razoável [38].

Estas baterias foram utilizadas em diversos VEs, como foi o caso do grupo PSA que produziu alguns modelos na década de 90 do século XX. O grupo fabricou versões

elétricas dos veículos *Peugeot 106*, *Citroen AX*, *Citroen Saxo*, *Citroen Berlingo* e *Citroen Partner* [24].

As baterias de níquel-cádmio têm como principais vantagens as seguintes [40]:

- Baixa resistência interna;
- Taxas altas de carga e descarga;
- Tolera descargas profundas;
- Carregamento rápido;
- Ciclo de vida típico é superior a 500 ciclos;
- Disponível em uma grande variedade de tamanhos e capacidades.



Figura 2.8 - Pack de baterias Ni-Cd [41] (fonte: *Electric Vehicles of Washington*)

2.3.3. Baterias de Hidreto Metálico de Níquel

As baterias de hidreto metálico de níquel recarregáveis (Ni-MH) são uma tecnologia relativamente nova, com características semelhantes às de níquel-cádmio [42]. Apareceram no mercado em 1989 e durante grande parte da década de 90 foi a bateria de eleição para alimentar dispositivos portáteis, substituindo as baterias de níquel-cádmio em muitas aplicações [43].

As baterias de hidreto metálico de níquel são uma fonte de energia disponível para aplicações eletrônicas, tais como computadores portáteis, telemóveis, máquinas de barbear e máquinas fotográficas e de filmar. As baterias de Ni-MH comercialmente disponíveis possuem características quase indistinguíveis de tensão, relativamente às baterias de níquel-cádmio, mas fornecem 25% a 40% mais energia, são mais pequenas,

mais leves e são livres de cádmio, que é ambientalmente indesejável. Oferecem também um ciclo de vida maior (mais de 2000 ciclos) [44][45].

Em resposta ao intenso desenvolvimento de VEHs em todo o mundo, impulsionado pela necessidade de melhorar a eficiência energética e as preocupações ambientais, a *Ovonic Battery Company* tem vindo a desenvolver baterias de alta potência adequadas para VE, como por exemplo uma bateria para VEH de 60 Ah com uma potência específica de 620 W/kg [46][47].

Recentemente, grandes baterias de hidreto metálico de níquel tornaram-se a tecnologia de escolha em VEHs (Figura 2.9), devido ao seu ciclo de vida e ampla faixa de temperatura de operação [48].

Estas baterias têm sido utilizadas com sucesso em VEs e são amplamente utilizados em VEHs [49].

As baterias de hidreto metálico de níquel têm como principais vantagens as seguintes [37][47][50]:

- Não contêm metais pesados tóxicos;
- Podem ser recicladas;
- Bom desempenho após longos períodos de armazenamento;
- Custo moderado;
- Elevada potência específica (W/kg);
- Baixa impedância interna;
- Ciclo de vida elevado.

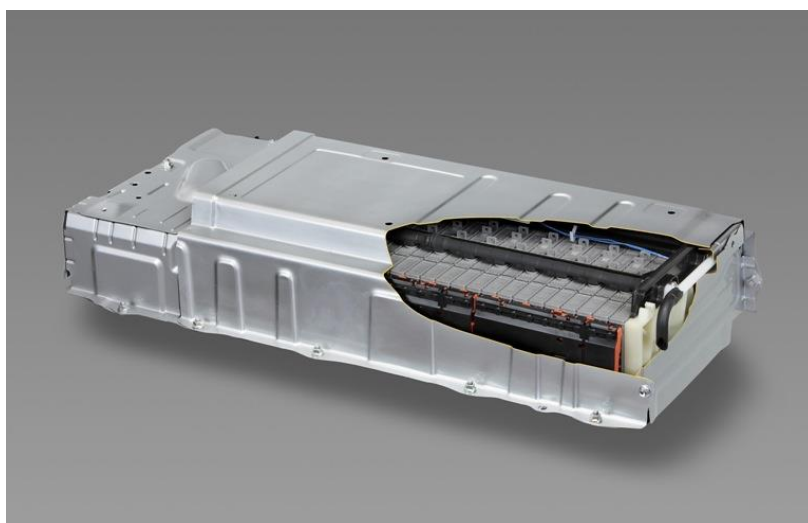


Figura 2.9 - Pack de baterias NiMH usado em veículo híbrido *Toyota Prius* [51]
(fonte: *Nikkei Technology*).

2.3.4. Baterias de Iões de Lítio

A primeira bateria comercial de íons de lítio (Li-ion) surgiu em 1991, produzida pela empresa japonesa *Sony* [52][53].

Este tipo de bateria possui um excelente desempenho em equipamentos eletrônicos de consumo como, computadores portáteis, telemóveis e dispositivos médicos [54]. Uma vez que não possuem “efeito de memória”, têm vida útil relativamente longa e alta densidade de energia, tornaram-se uma das baterias recarregáveis mais populares [55].

Entre as tecnologias de baterias existentes aplicáveis aos VE, as baterias Li-ion são atualmente consideradas como a escolha mais adequada para o desenvolvimento de novas gerações de VEs. Em comparação com outros tipos de baterias, como baterias de chumbo-ácido, baterias de níquel-cádmio e baterias de hidreto metálico de níquel, as baterias de íons de lítio são superiores em termos de eficiência energética e densidade de energia, o que lhes permite ser mais leves e mais pequenas para a mesma capacidade [56].

As baterias de íons de lítio (Figura 2.10), já estão a ser utilizadas por alguns construtores de automóveis, como a Nissan, a Tesla e a Chevrolet [57][30].

As baterias de íons de lítio têm principais vantagens as seguintes [54][52]:

- Densidade de energia elevada;
- Bom desempenho a altas temperaturas;
- É reciclável;
- É uma bateria de baixa manutenção;
- Não tem efeito memória;
- São leves, em comparação com outras baterias recarregáveis.



Figura 2.10 - Pack de baterias de íons de lítio do *Chevrolet Volt* [58] (fonte: *Car and Driver*).

2.3.5. Baterias de Polímero de Lítio

Baterias de polímero de lítio (Li-pol) são usadas em muitos dispositivos que vão dos telemóveis até aos VE, apresentando também grande potencial na área aeroespacial [59][60].

A bateria recarregável Li-pol é uma tecnologia baseada nas baterias recarregáveis de iões de lítio, só que usa um eletrólito de polímero. Desta maneira a forma das suas células pode ser alterada e moldada em conformidade com o espaço específico em que vai ser integrada, por exemplo, dentro de um VE [30]. Apresentam alta densidade de energia, possuem um ciclo de vida longo e são mais seguras, relativamente a outras tecnologias [60].

Um dos VEs que utiliza baterias de polímeros de lítio é o *SLS AMG E-CELL* da *Mercedes-Benz* (Figura 2.11). A capacidade das baterias é de 63 kWh permitindo uma autonomia de 250 km. O peso deste pack é de aproximadamente 500 kg, e a potência específica é de 126 W/kg [24][61].

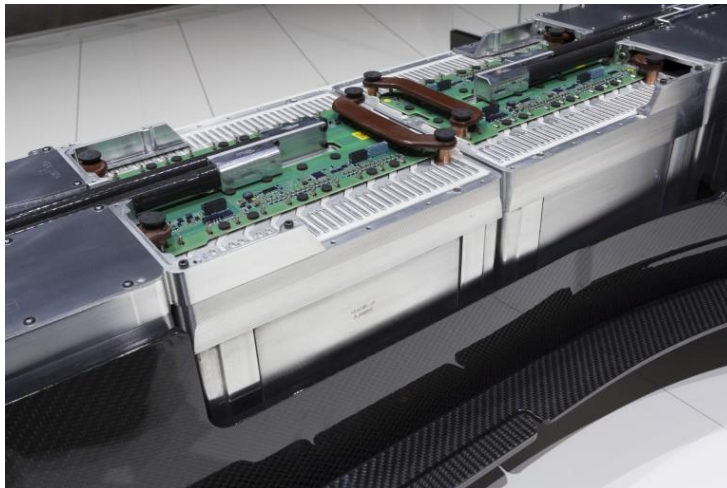


Figura 2.11 - Pack de Baterias de polímeros de lítio de *Mercedes-Benz AMG SLS E-CELL* [61]
(Fonte: *Gizmag*)

2.3.6. Baterias de Lítio de Fosfato de Ferro

As baterias de lítio de fosfato de ferro (LiFePO₄), Figura 2.12, são uma das variantes das baterias de iões de lítio, variantes estas que mudam de acordo com a química interna, especificamente o material utilizado no cátodo da bateria [30]. As baterias LiFePO₄ são as variantes mais seguras das baterias de iões de lítio. Uma bateria LiFePO₄ não precisa ser totalmente carregada e a duração não fica reduzida, mesmo em caso de carga parcial. Esta é uma grande vantagem destas baterias em comparação com baterias de chumbo-ácido [62].

Muitos VEs usam esta tecnologia como é o caso do fabricante chinês de baterias e veículos BYD, que em 2010 começou a fabricar veículos de serviço público utilizados atualmente em várias cidades chinesas e europeias. Este tipo de bateria é ainda utilizado em empilhadoras, barcos elétricos, motas elétricas e bicicletas elétricas [63].



Figura 2.12 - Pack de baterias de lítio de fosfato de ferro [64] (fonte: Tornado).

2.3.7. Comparação entre as tecnologias de Baterias

Os sistemas de armazenamento são o maior obstáculo para o desenvolvimento dos VEs. Estes devem possuir a capacidade de armazenar uma grande quantidade de energia no menor tempo possível, fornecer essa energia facilmente e na quantidade necessária, tudo isto com o menor peso e volume possível, com baixas perdas, pouca manutenção, grande longevidade, de forma segura, a um custo reduzido, com grande reciclabilidade e com danos ambientais reduzidos [42][57].

A bateria do VE assim como o tanque de combustível num veículo convencional tem como função armazenar a energia necessária para operar o veículo. Enquanto um tanque de combustível pode armazenar energia para o veículo se deslocar aproximadamente 400 a 800 quilómetros, antes de reabastecer, a atual geração de baterias só consegue armazenar energia suficiente para conduzir aproximadamente 80 a 200 quilómetros, entre recargas.

Assim como a quantidade de combustível pode ser aumentada através da instalação de um depósito de combustível maior, a quantidade de energia armazenada também pode ser aumentada através do aumento do número e / ou tamanho das baterias incorporadas no *pack* de baterias do veículo. No entanto, quantas mais baterias forem adicionadas, maior será o peso assim como o espaço ocupado [65].

A Tabela 2.4 apresenta as exigências técnicas impostas aos sistemas de armazenamento dos VEs de acordo com a *United States Advanced Battery Consortium* (USABC) [42][65].

Tabela 2.4 - Objetivos impostos pela USABC para o desempenho das baterias para VEs, adaptado de [42][57][65].

Parâmetros	Objetivos a médio prazo	Objetivos a longo prazo
Energia específica (Wh/kg)	80 - 100	200
Densidade de Energia (Wh/litro)	135	300
Potência específica (W/kg)	150 - 200	400
Densidade de potência (W/litro)	250	600
Ciclos de Vida	600	1000
Tempo de vida (anos)	5	10
Temperatura de operação (°C)	-30°C a 65°C	-40°C a 85°C

A USABC tem vindo a apoiar alguns sistemas de armazenamento de maneira a que estes consigam cumprir as metas de médio prazo, como é o caso das baterias de hidreto metálico de níquel. A USABC também está a apoiar sistemas de armazenamento para atender às metas de longo prazo. Os dois sistemas que estão a ser investigados são as baterias de polímero de lítio e as baterias de íões de lítio [65].

Na Tabela 2.5 apresenta-se o desempenho de alguns dos sistemas de armazenamento mencionados anteriormente.

Tabela 2.5 - Desempenho de alguns dos sistemas de armazenamento, adaptado de [56][65][66][67][68].

Parâmetros	Energia específica (Wh/kg)	Potência específica (W/kg)	Ciclos de Vida	Temperatura de operação (°C)
Chumbo-Ácido	30 – 50	180 - 300	400 – 600	-20°C a 60°C
Ni-Cd	40 – 80	150 -350	600 – 1200	-40°C a 60°C
Ni-MH	60 – 120	150 - 400	600 - 1500	-10°C a 45°C
Li-ion	90 – 160	230 -1000	500 – 1000	-25°C a 50°C
Li-poly	150 – 170	350 - 1800	>600	-20°C a 60°C
LiFePO4	90 – 120	2000 - 4500	1000 - 2000	-20°C a 60°C

Observando a Tabela 2.5, verifica-se que apenas as baterias de hidreto metálico de níquel e as baterias de íões de lítio e suas variantes, alcançam os objetivos a médio prazo impostos pela *United States Advanced Battery Consortium* (USABC).

As baterias de chumbo-ácido são mais utilizadas quando se pretende converter um veículo a motor de combustão interna em veículo elétrico. Nestes casos a autonomia não é o fator mais importante e para a mesma capacidade estas baterias são mais baratas,

podendo ser instaladas nos espaços anteriormente ocupados pelo tanque de combustível e / ou na mala [24].

Hoje em dia nenhum automóvel vem equipado de fábrica com baterias de níquel-cádmio e mesmo na eletrônica de consumo têm sido substituídas por outras tecnologias. A maior desvantagem deste tipo de baterias está na necessidade de serem descarregadas por completo, para que a sua capacidade não seja afetada pelo chamado “efeito de memória” [24].

2.4. Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas algumas soluções para o carregamento de baterias de VEs. Foram apresentados os dois tipos de sistemas de carregamento, os sistemas de carregamento *on-board* e os sistemas de carregamento *off-board*, podendo estes permitir carregamento unidirecional G2V e/ou bidirecional G2V e V2G. Foi apresentada também a rede portuguesa de pontos de carregamento *MOBI.E*, por ter sido um caso pioneiro relativo a redes públicas de pontos de carregamento em Portugal e por ter sido totalmente desenvolvida por empresas portuguesas.

Neste capítulo foram ainda apresentadas algumas tecnologias de baterias utilizadas em VEs. Hoje em dia, um VE ainda não consegue competir com um veículo de motor de combustão interna, quer em termos de autonomia quer em termos de tempo de recarga das baterias, que é muito superior ao tempo de abastecimento de combustível. No entanto, o desenvolvimento das diferentes tecnologias de baterias, nomeadamente as baterias de hidreto metálico de níquel e as baterias à base de lítio, permitiram que os VEs atingissem um estado de desenvolvimento capaz de convencer um elevado número de consumidores.

CAPÍTULO 3

Conversores e Sistemas de Controlo

3.1. Introdução

A integração de VEs e VEHPs na rede de energia elétrica tem de ser efetuada de forma a preservar a qualidade da energia elétrica. A principal exigência está relacionada com o consumo de corrente sinusoidal com fator de potência próximo da unidade. Por outro lado, para preservar a vida útil das baterias é extremamente importante respeitar os seus valores nominais de tensão, corrente e temperatura. Os carregadores de baterias são conversores de eletrónica de potência, que permitem conversão de CA-CC e CC-CC [69][70].

O conversor de potência CA-CC mais simples para carregar baterias, utiliza apenas componentes não controlados (Figura 3.1). Este tipo de conversor é mais fácil de implementar, é mais barato e é menos suscetível a falhas. No entanto, a tensão de saída e a corrente consumida não são controladas. Por conseguinte, neste tipo de conversor a forma de onda da corrente consumida é distorcida, contribuindo assim para a degradação da qualidade de energia da rede elétrica.

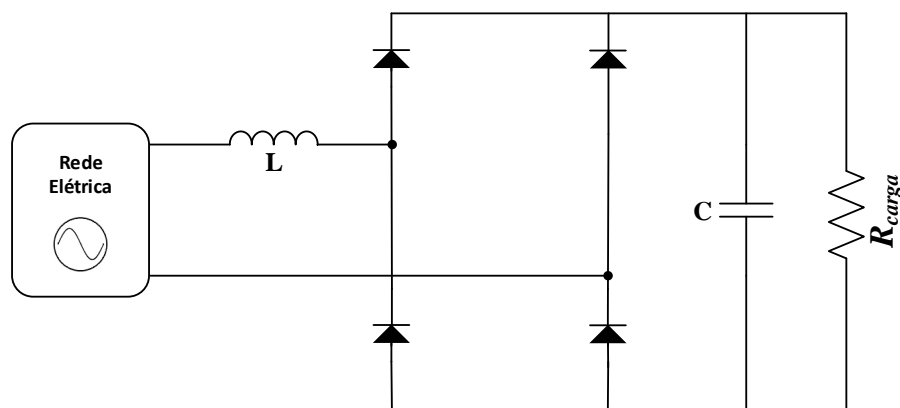


Figura 3.1 - Conversor CA-CC *full-bridge* não controlado.

Por outro lado, utilizando semicondutores de potência controlados e estratégias de controlo adequadas, é possível controlar a forma de onda da corrente CA consumida, assim como a tensão no barramento CC [69].

Na escolha do carregador de baterias, é tão importante a escolha do sistema de controlo a implementar como a escolha da topologia e o dimensionamento dos diversos componentes do conversor.

3.2. Conversores para Correção do Fator de Potência

Por norma, o sistema de carregamento de baterias para VEs e VEHPs é formado por dois conversores de eletrónica de potência controlados, um conversor de CA-CC seguido de um conversor CC-CC [12][71]. Ambos os conversores podem ser de diferentes topologias e podem ser ligados em conjunto de formas diferentes, com e sem isolamento entre eles. O conversor CA-CC tem como função converter a tensão CA proveniente da rede elétrica numa tensão CC e, em conjunto com um sistema de controlo adequado, pode permitir a correção do fator de potência ao garantir que a corrente CA esteja em fase com a tensão. Além disso, permite controlar a corrente CA para que seja sinusoidal. O conversor CC-CC é usado para adaptar a tensão retificada pelo conversor CA-CC para um nível de tensão compatível com a tensão das baterias e por conseguinte para controlar o processo de carregamento destas [12][70].

3.2.1. Conversor CA-CC *Boost*

A topologia convencional para correção do fator de potência (Figura 3.2), consiste numa ponte retificadora a diodos na entrada, que converte a tensão de entrada CA em tensão CC, seguida de um conversor *boost*, que faz a correção de fator de potência [69][72]. Neste tipo de conversor a tensão obtida na saída é sempre superior à tensão na entrada. Segundo [3], esta topologia apresenta como vantagens, a sua simplicidade, baixo número de componentes, baixo custo e capacidade de adaptação a uma vasta gama de tensão CA de entrada. No entanto, esta topologia possui perdas de condução bastante significativas, quando comparada com outras topologias [5].

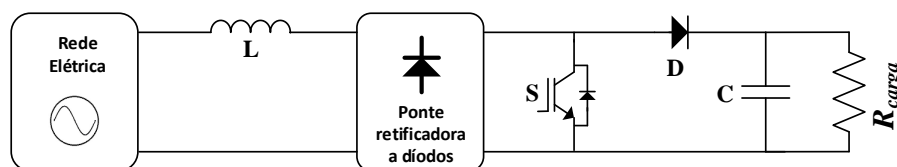


Figura 3.2 - Conversor CA-CC *boost*.

Na Figura 3.3, indica-se o caminho percorrido pela corrente em função do estado (fechado/aberto) do semiconductor controlado que é determinado por um sinal de PWM, proveniente do sistema de controlo, aplicado á *gate* do semiconductor.

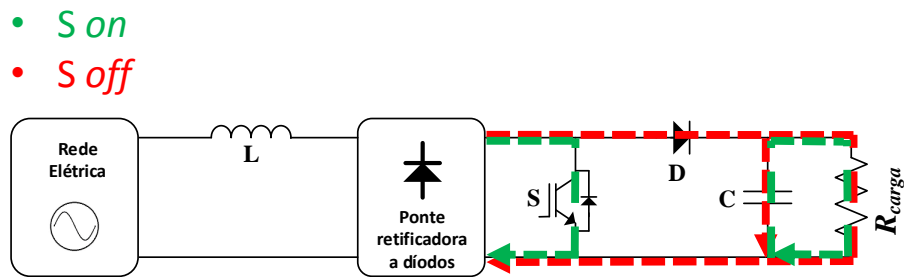


Figura 3.3 - Modos de condução do conversor CA-CC *boost*.

3.2.2. Conversor CA-CC *Full-Bridge* Semicontrolado Simétrico

Na topologia do conversor CA-CC *full-bridge* semicontrolado simétrico para correção do fator de potência (Figura 3.4), por comparação com a topologia anterior, um diodo *D* do conversor *boost* é eliminado do caminho da corrente, de modo que esta flui simultaneamente através de apenas dois semicondutores, como se mostra na Figura 3.5 e Figura 3.6, resultando numa redução de perdas de condução. Foi também removida a ponte retificadora e a indutância passou para o lado CA, que segundo [3] contribui para uma redução da interferência eletromagnética (EMI). No entanto esta topologia possui significativamente maior ruído, relativamente à topologia anterior, isto é, conversor *boost* PFC convencional [3][5][73].

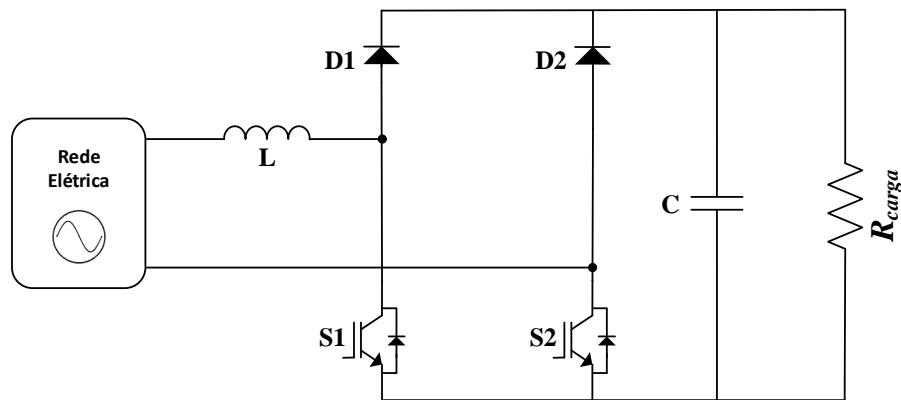


Figura 3.4 - Conversor CA-CC *full-bridge* semicontrolado simétrico.

Na Figura 3.5 e Figura 3.6 está ilustrado o caminho percorrido pela corrente em função do estado dos semicondutores controlados no semiciclo positivo e no semiciclo negativo da tensão de entrada, respetivamente.

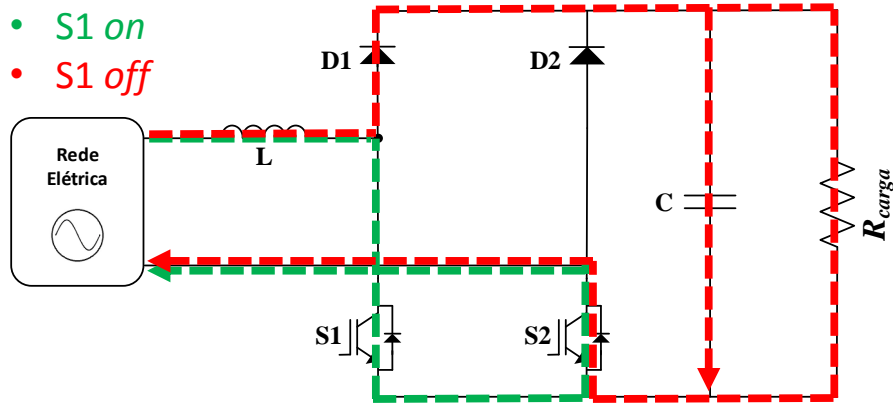


Figura 3.5 - Conversor CA-CC *full-bridge* semicontrolado simétrico durante o semiciclo positivo da tensão na rede elétrica.

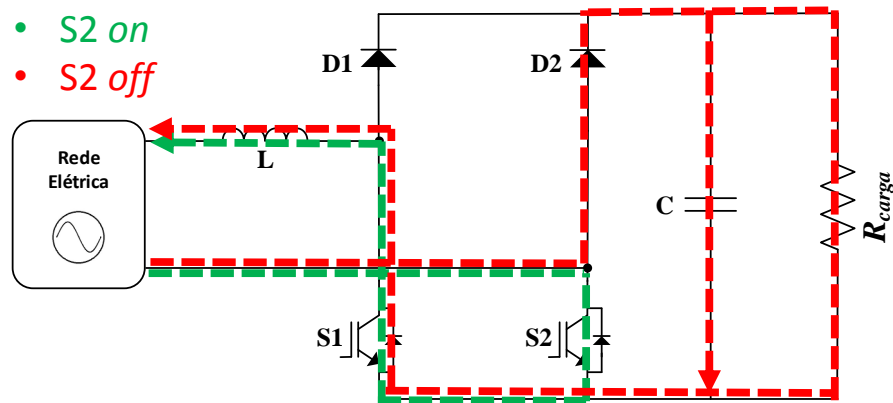


Figura 3.6 - Conversor CA-CC *full-bridge* semicontrolado simétrico durante o semiciclo negativo da tensão na rede elétrica.

3.2.3. Conversor CA-CC *Full-Bridge* Semicontrolado Assimétrico

A topologia do conversor CA-CC *full-bridge* semicontrolado assimétrico para correção do fator de potência (Figura 3.7), relativamente à anterior é obtida através da troca de posição do diodo *D1* com o interruptor *S2*.

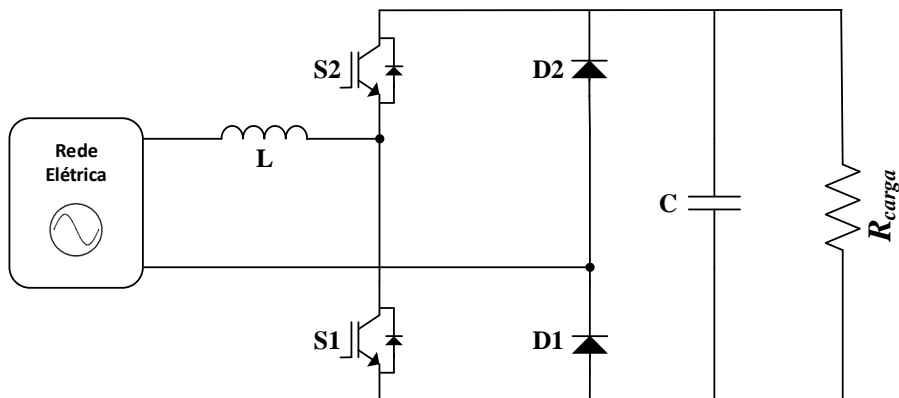


Figura 3.7 - Conversor CA-CC *full-bridge* semicontrolado assimétrico.

As Figura 3.8 e Figura 3.9, mostram qual é o caminho percorrido pela corrente em função do estado dos semicondutores controlados no semiciclo positivo e no semiciclo negativo da tensão de entrada, respetivamente.

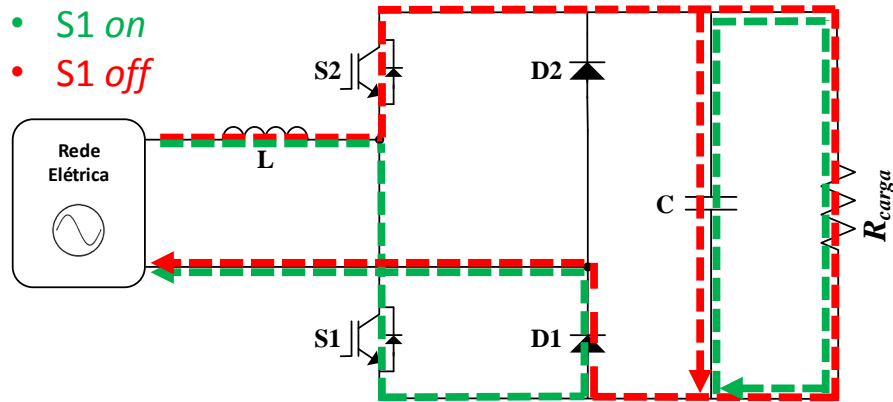


Figura 3.8 - Conversor CA-CC *full-bridge* semicontrolado assimétrico durante o semiciclo positivo da tensão na rede elétrica.

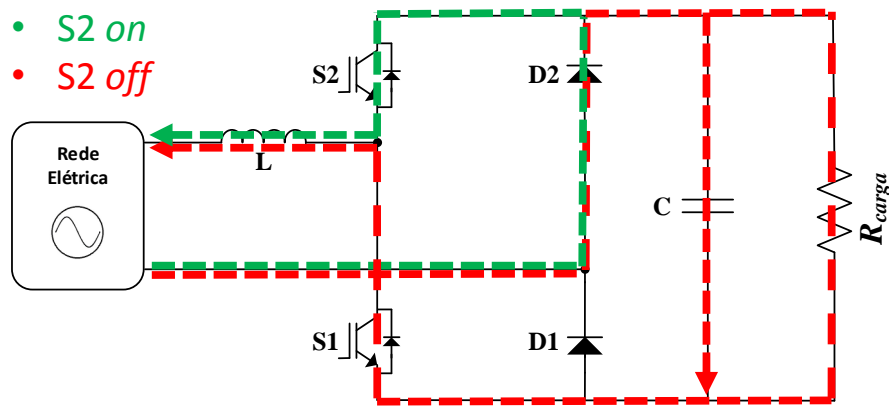


Figura 3.9 - Conversor CA-CC *full-bridge* semicontrolado assimétrico durante o semiciclo negativo da tensão na rede elétrica.

3.2.4. Conversor CA-CC *Full-Bridge* Totalmente Controlado

A topologia do conversor CA-CC *full-bridge* totalmente controlado para correção do fator de potência (Figura 3.10), é obtida a partir da anterior através da substituição dos díodos *D1* e *D2* pelos interruptores *S3* e *S4*. A sua grande vantagem é poder operar em modo bidirecional (G2V / V2G), possibilitando a devolução para a rede elétrica de uma parte da energia armazenada nas baterias. Neste conversor são utilizados quatro semicondutores controlados, o que aumenta a sua complexidade e custo [69].

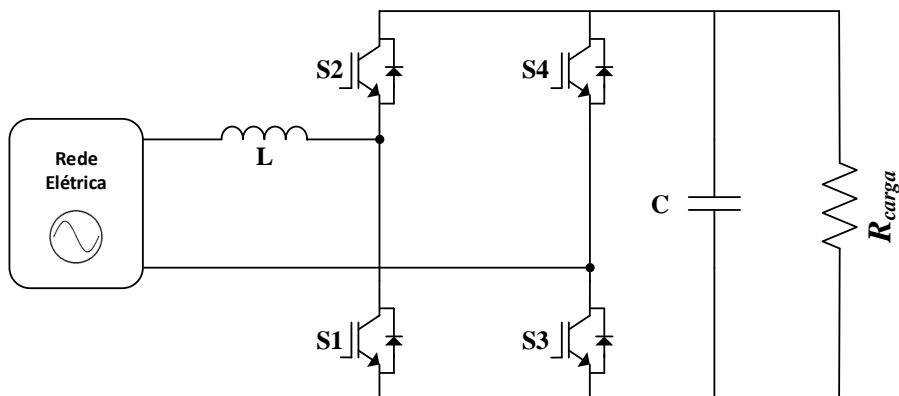


Figura 3.10 - Conversor CA-CC *full-bridge* totalmente controlado.

Nas figuras seguintes, indica-se o caminho percorrido pela corrente em função do estado dos semicondutores controlados no semiciclo positivo e no semiciclo negativo da tensão de entrada, respetivamente.

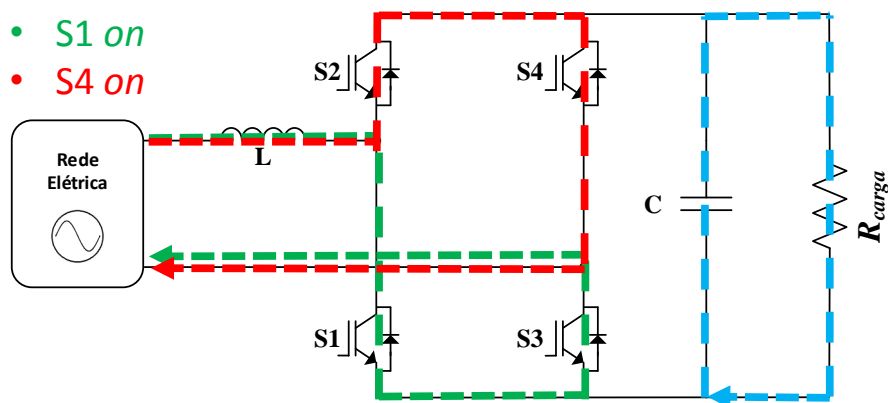


Figura 3.11 - Conversor CA-CC *full-bridge* totalmente controlado durante o semiciclo positivo da tensão na rede elétrica, S1 e S4 ligados.

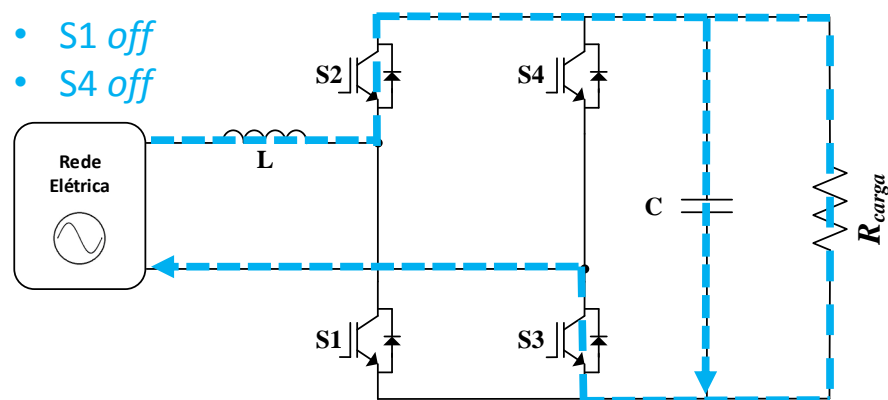


Figura 3.12 - Conversor CA-CC *full-bridge* totalmente controlado durante o semiciclo positivo da tensão na rede elétrica, S1 e S4 desligados.

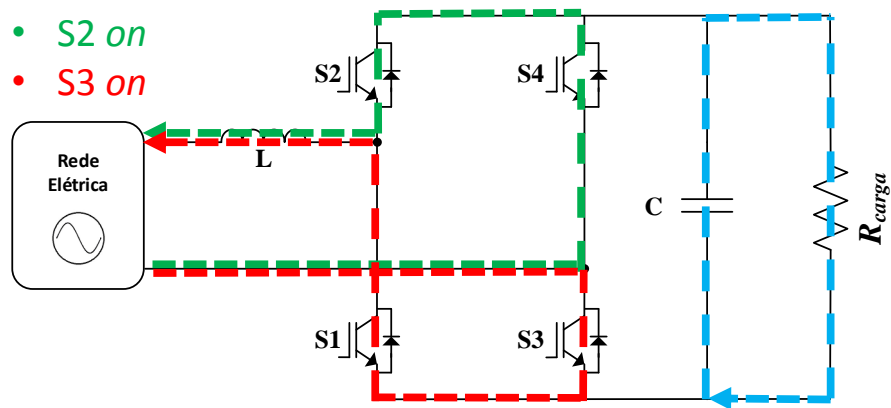


Figura 3.13 - Conversor CA-CC *full-bridge* totalmente controlado durante o semiciclo negativo da tensão na rede elétrica, S2 e S3 ligados.

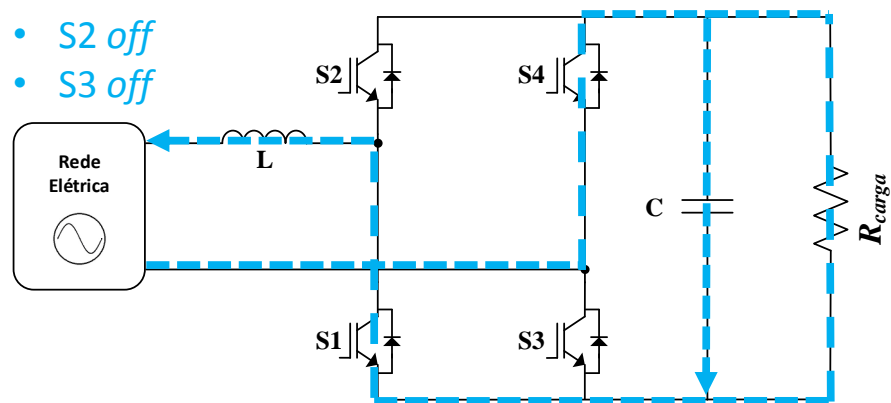


Figura 3.14 - Conversor CA-CC *full-bridge* totalmente controlado durante o semiciclo negativo da tensão na rede elétrica, S2 e S3 desligados.

3.2.5. Conversor CC-CC *Buck*

A topologia mais básica de conversores CC-CC utilizada em carregadores de baterias é o conversor CC-CC *buck* (Figura 3.15). Esta topologia não é isolada e apenas pode operar no modo unidirecional. A sua tensão de saída será sempre inferior à de entrada [12].

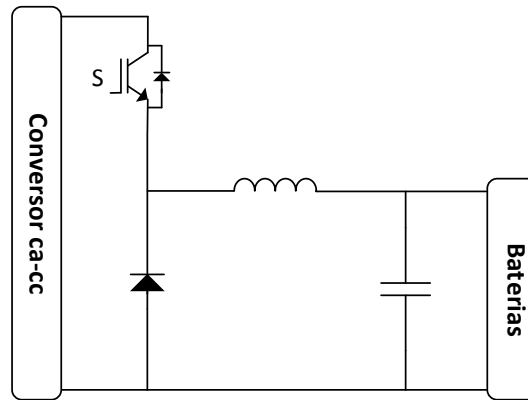


Figura 3.15 - Conversor CC-CC *buck*.

Na Figura 3.16 está ilustrado, para este conversor, o caminho percorrido pela corrente em função do estado (ligado/desligado) do semicondutor controlado.

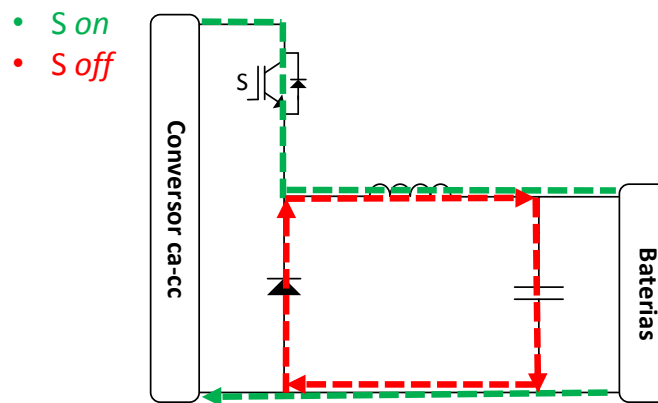


Figura 3.16 - Conversor CC-CC *buck*, no estado ligado/desligado do semicondutor controlado.

3.2.6. Conversor CC-CC *Buck-Boost* Bidirecional

A topologia do conversor CC-CC *buck-boost* surge da combinação da topologia CC-CC *buck* com a topologia CC-CC *boost*, com esta combinação obtém-se uma topologia que pode operar no modo bidirecional (Figura 3.17). Durante o processo de carregamento das baterias o conversor opera como um CC-CC *buck*, a energia flui da rede elétrica para as baterias (G2V). Quando parte da energia armazenada nas baterias flui destas para a rede elétrica (V2G) o conversor opera como um CC-CC *boost* [12].

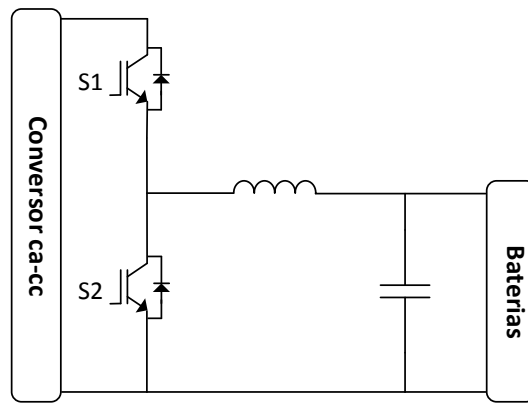


Figura 3.17 - Conversor CC-CC *buck-boost* bidirecional.

Nas Figura 3.18 e Figura 3.19 indica-se o caminho percorrido pela corrente durante o processo de carregamento das baterias e quando parte da energia armazenada nas baterias é devolvida para rede elétrica, respetivamente.

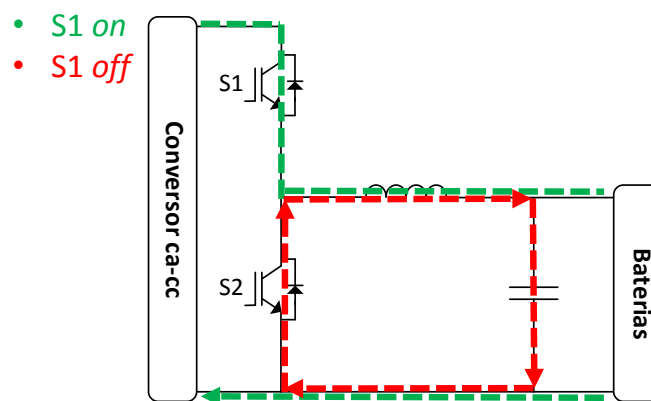


Figura 3.18 - Conversor CC-CC *buck-boost* durante o processo de carregamento das baterias.

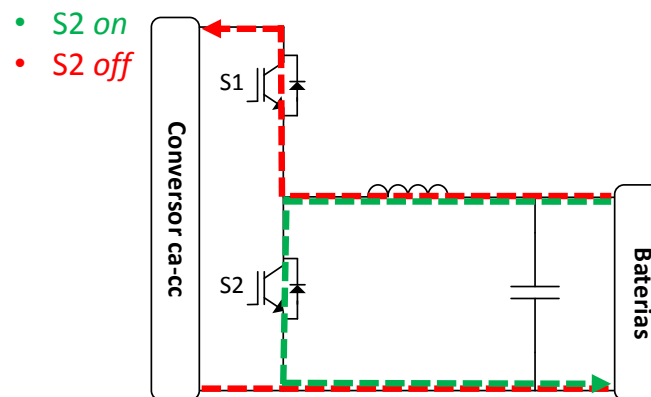


Figura 3.19 - Conversor CC-CC *buck-boost* quando parte da energia armazenada nas baterias é devolvida para a rede elétrica.

3.3. Técnicas de Controle

Num sistema de carregamento de baterias, é tão importante o sistema de controlo como a escolha da topologia de conversão e o dimensionamento dos seus diversos componentes. Para esta dissertação foram estudados os sistemas de controlo apresentados a seguir.

3.3.1. Comando de Conversores Comutados por Modulação por Largura de Pulso

Nos conversores comutados a tensão de saída é normalmente ajustada através de técnicas de modulação de largura de impulso (PWM), que determinam quais são os instantes de comutação dos semicondutores de potência.

O princípio básico desta técnica de modulação passa pela comparação de uma onda moduladora (referência) que determina a amplitude da saída, com uma onda portadora de frequência várias vezes superior. A portadora consiste normalmente numa onda triangular com uma frequência elevada, desejavelmente de frequência muito superior à da onda moduladora, que define a frequência de comutação dos semicondutores. O sinal de saída resulta da comparação da onda moduladora com a onda portadora: é igual “1” se o valor da onda de referência for superior ao valor da onda triangular e é igual a “0” quando o valor da onda de referência é inferior ao valor da onda triangular (Figura 3.20). Ajustando-se a relação entre as amplitudes da referência e da portadora varia-se *duty-cycle*, ou seja, a fração de tempo por período durante a qual os semicondutores estão ligados [74].

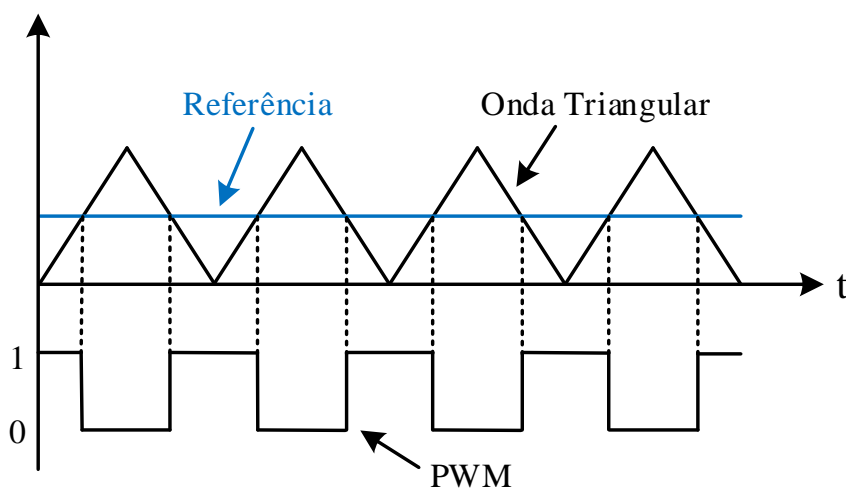


Figura 3.20 - PWM obtido através da comparação da onda de referência com a onda triangular.

Na Figura 3.21 pode observar-se a saída resultante da comparação de uma onda moduladora sinusoidal com uma portadora triangular. Esta técnica (ou variantes da mesma) é muito utilizada no comando de inversores comutados, designando-se por “modulação sinusoidal” (*Sinusoidal Pulse Width Modulation - SPWM*) [75]. Ajustando a frequência da referência é possível variar a frequência de saída do inversor; alterando a relação entre a amplitude relativa das duas ondas (referência e portadora), ajusta-se a amplitude da componente fundamental da saída do conversor.

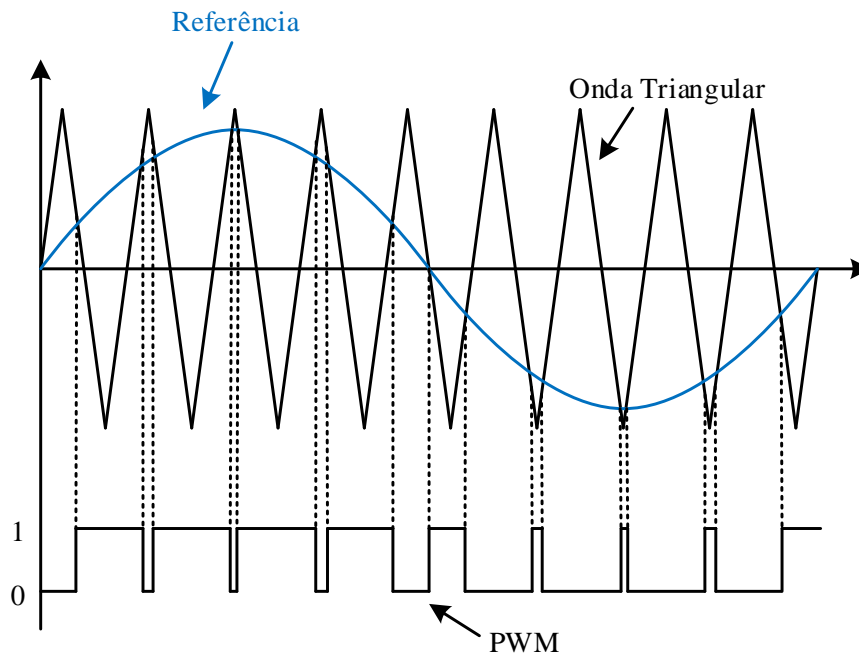


Figura 3.21 - PWM obtido através da comparação da onda de referência sinusoidal com a onda triangular.

3.3.2. Sincronização com a Rede Elétrica Utilizando Técnicas *Phase Locked Loop*

No caso presente, para que o sistema de controlo funcione corretamente é necessário que o sinal de referência se encontre sincronizado com a tensão da rede elétrica. Uma das soluções mais utilizadas para proporcionar essa sincronização consiste na utilização de um algoritmo *Phase Locked Loop* (PLL), Figura 3.22 [76][77].

Uma PLL é um sistema de controlo que capta a fase da componente principal, gerando um sinal sinusoidal que acompanha a fase do sinal de entrada.

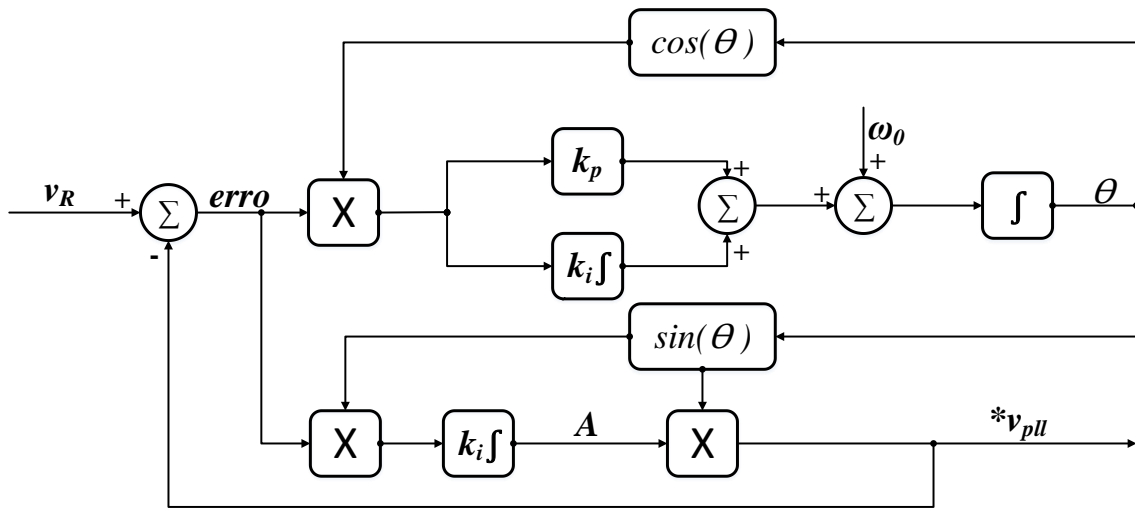


Figura 3.22 - Diagrama de blocos do algoritmo de uma PLL.

Este algoritmo de PLL para além de permitir detetar a fase, permite também detetar a amplitude da tensão, obtendo-se assim um sinal proporcional à componente fundamental da tensão da rede.

3.3.3. Controlo de Corrente

Existem diversas abordagens possíveis para tentar impor uma corrente sinusoidal à entrada de um conversor CA-CC. No caso presente utilizou-se a descrita em [76].

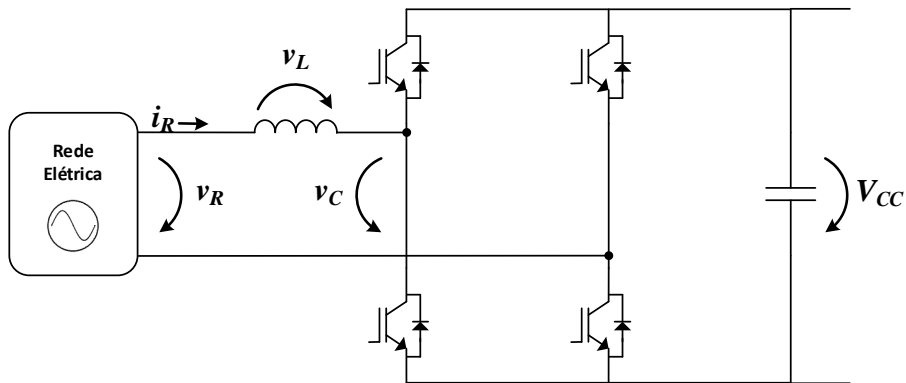


Figura 3.23 - Conversor CA-CC *full-bridge* totalmente controlado.

De forma a aplicar este tipo de controlo de corrente ao conversor CA-CC *full-bridge* [76], Figura 3.23, parte-se de:

$$v_R(t) = v_L(t) + v_C(t) \quad (3.1)$$

Tendo em atenção a relação entre a tensão e a corrente e a corrente na indutância, é possível obter:

$$v_R(t) = L \frac{di_R(t)}{dt} + v_C(t) \quad (3.2)$$

Sabendo a taxa de variação da corrente na indutância a uma frequência de amostragem alta pode ser aproximada da seguinte forma:

$$\frac{di_R(t)}{dt} \approx \frac{\Delta i_r}{\Delta t} = \frac{(i^*_R[k + 1] - i_R[k])}{T_S} \quad (3.3)$$

Onde i^*_R é a corrente de referência, i_R é a corrente da rede elétrica e T_S é o período de amostragem e k é o instante.

Substituindo em (3.2) a equação (3.3) obtemos:

$$v_R(t) = \frac{L}{T_S} (i^*_R[k + 1] - i_R[k]) + v_C(t) \quad (3.4)$$

Reescrevendo (3.4) em função da tensão produzida pelo conversor v_C , obtemos:

$$v_C(t) = v_R(t) - \frac{L}{T_S} (i^*_R[k + 1] - i_R[k]) \quad (3.5)$$

Onde v_C é a tensão de referência utilizada para controlar o conversor.

Na Figura 3.24, apresenta-se o diagrama de blocos do sistema de controlo de corrente utilizado nesta dissertação para o conversor CA-CC.

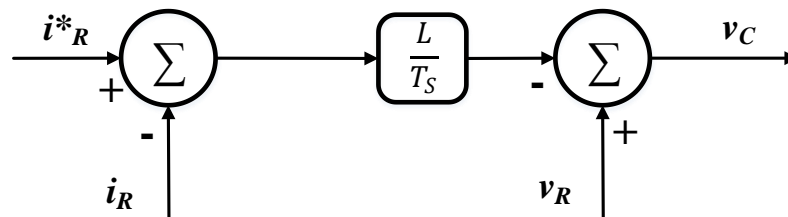


Figura 3.24 - Diagrama de blocos do sistema de controlo de corrente utilizado nesta dissertação.

3.3.4. Controlo Proporcional-Integral (PI)

Controladores do tipo proporcional-integral (PI) têm sido bastante utilizados em sistemas de controlo industriais há décadas, desde que *Ziegler e Nichols* propuseram este método de controlo na década de 1940. Apesar do desenvolvimento de vários algoritmos de controlo avançado na área industrial e académica nas últimas décadas, o controlo proporcional-integral continua a ser o mais popular e o mais utilizado em diversas aplicações de controlo, tais como, o controlo de processos, manipulação de robôs, acionamento de motores, etc. A razão tem a ver com o fato deste controlador ser de fácil implementação, ser versátil e produzir bons resultados em muitos casos [78][79].

Na Figura 3.25, apresenta-se o diagrama de blocos de um controlador PI, utilizado no âmbito da dissertação para fazer o controlo da tensão no barramento CC e para regular a tensão e corrente de saída do conversor CC-CC.

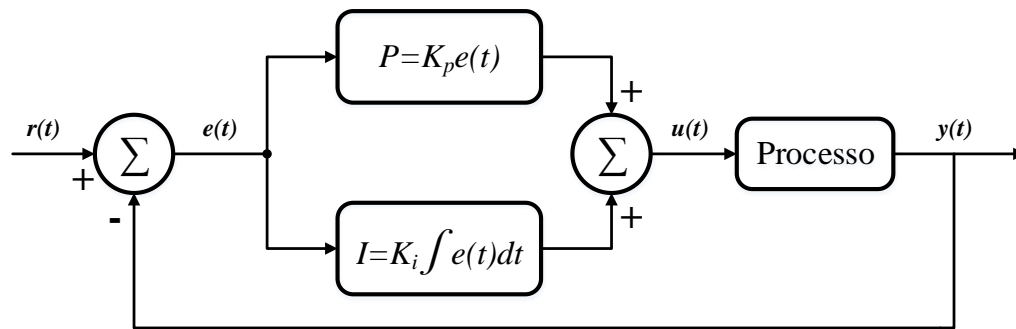


Figura 3.25 - Diagrama de blocos do de um controlador PI.

A variável $e(t)$ representa o erro, ou seja, é igual à diferença entre o valor desejado para a saída $r(t)$ e o valor real medido $y(t)$. O sinal de controlo $u(t)$ é obtido através da soma de duas componentes: uma proporcional ao erro e outra proporcional ao integral do erro. A constante K_p define o ganho proporcional e K_i permite ajustar o ganho integral [80].

O controlo PI é então dado pela equação (3.6).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (3.6)$$

3.4. Controlo Aplicado aos Conversores

O sistema de controlo de um conversor é essencial para o seu bom funcionamento, pois é este que vai determinar quais os semicondutores controlados que devem estar em comutação, em cada instante.

De modo a escolher o sistema de controlo que mais se adequa á topologia dos conversores a ser implementados, é necessário um estudo prévio dos mesmos.

3.4.1. Controlo dos Conversores CA-CC

Foram escolhidas quatro topologias para o conversor CA-CC, a topologia *boost*, a topologia *full-bridge* semicontrolada assimétrica, a topologia *full-bridge* semicontrolada simétrica e a topologia *full-bridge*, cujos circuitos de potência se encontram na Figura 3.26 (a), Figura 3.26 (b), Figura 3.26 (c), Figura 3.26 (d), respetivamente. No caso das topologias *full-bridge* e *full-bridge* semicontrolada assimétrica é necessário garantir que os semicondutores do mesmo braço estão sempre em estados complementares, por exemplo se $S1$ estiver a *on* $S2$ tem de estar a *off* e vice-versa de modo a evitar curto-circuito.

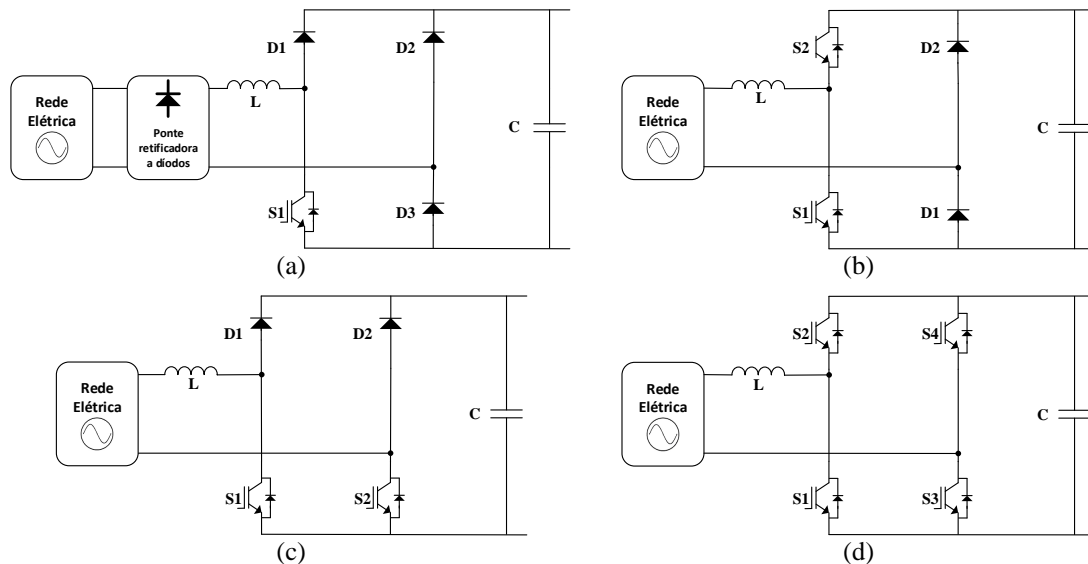


Figura 3.26 - Conversores CA-CC: (a) Topologia *boost*; (b) Topologia *full-bridge* semicontrolada assimétrica; (c) Topologia *full-bridge* semicontrolada simétrica; (d) Topologia *full-bridge*.

O controlo dos conversores CA-CC tem como função regular a tensão do barramento CC e a corrente de entrada dos conversores. De maneira a que seja possível regular essas variáveis através do mesmo sinal de comando, são utilizadas duas malhas de controlo, uma para cada variável. A malha de tensão é responsável por calcular a amplitude do sinal sinusoidal da corrente de referência utilizada na malha de corrente, de maneira a regular V_{CC} à tensão desejada. A malha de corrente tem a função de regular a corrente $i_R(t)$ de forma a que esta possua um sinal sinusoidal e em fase com a tensão da rede $v_R(t)$, obtendo-se assim o fator de potência próximo da unidade e um THD_i reduzido. A um sistema com duas ou mais malhas de controlo em série, dá-se o nome de sistema de controlo em cascata.

Na Figura 3.27 está ilustrado o diagrama de blocos do sistema de controlo aplicado aos conversores CA-CC, onde são demonstradas as malhas de tensão e corrente. Através deste é possível verificar que para o correto funcionamento do sistema de controlo do conversor CA-CC é necessário efetuar a leitura dos valor instantâneos da tensão de entrada $v_R(t)$, da tensão de saída V_{CC} e da corrente de entrada $i_R(t)$. A malha de tensão foi implementada utilizando um algoritmo de controlo PI e a malha de corrente foi implementada utilizando um algoritmo de controlo de corrente preditivo.

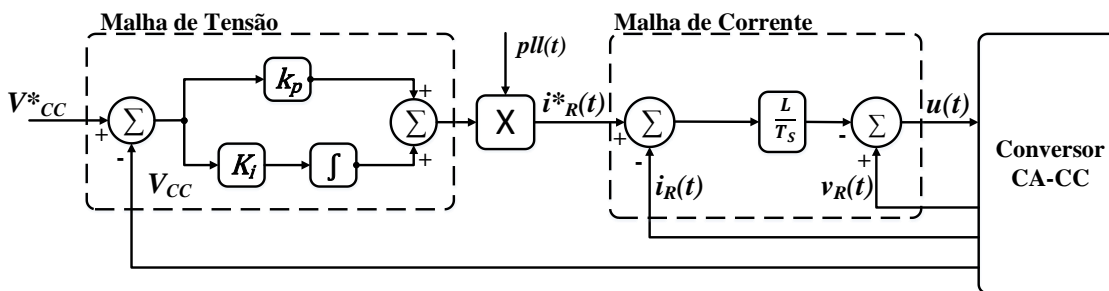


Figura 3.27 - Diagrama de blocos do sistema de controlo dos conversores CA-CC.

De forma a obter uma corrente de referência com um sinal sinusoidal perfeito em fase com a tensão de entrada $v_R(t)$, foi utilizado um algoritmo de PLL mencionado no tópico 3.3.2.

3.4.2. Controlo do Conversor CC-CC

Para o conversor CC-CC foi escolhida uma topologia *buck*, Figura 3.28, responsável por efetuar o carregamento das baterias. O controlo do conversor CC-CC *buck* é responsável por regular a tensão de saída e a corrente de saída do conversor, de acordo com as características das baterias.

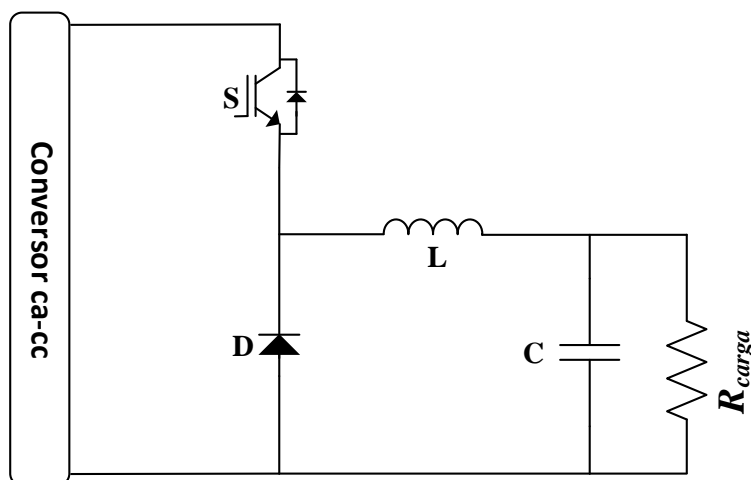


Figura 3.28 - Conversor CC-CC *buck*.

Grande parte dos fabricantes de baterias para VEs recomenda dois estágios de carregamento. O primeiro estágio consiste em carregar as baterias com uma corrente constante até que estas atinjam a tensão máxima recomendada, o segundo estágio consiste em manter a tensão constante até que a corrente consumida pelas baterias caia para um valor residual [76].

Na Figura 3.29 encontram-se os diagramas de blocos do controlador para o estágio de corrente constante e para o estágio de tensão constante.

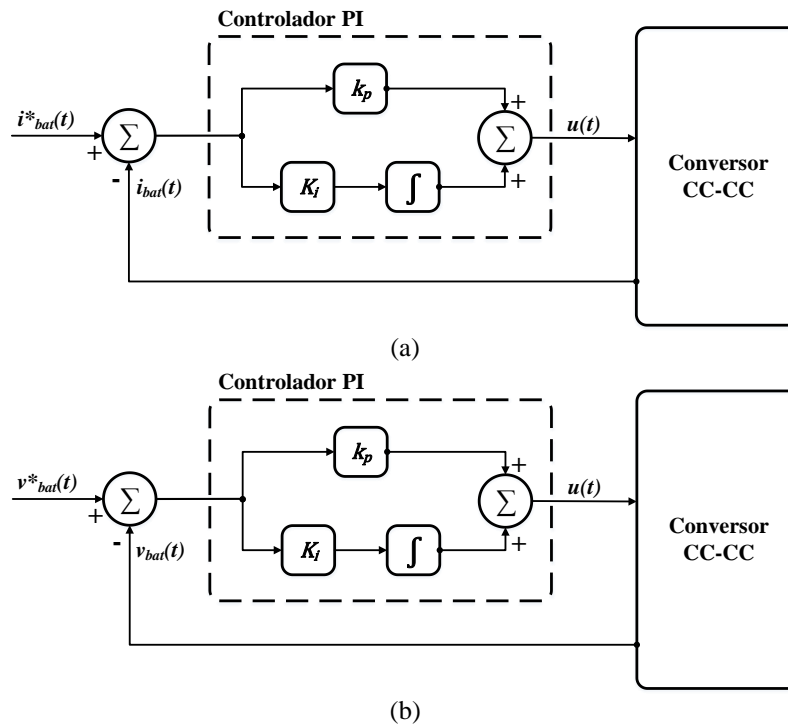


Figura 3.29 - Diagrama de blocos do controlador do conversor CC-CC: (a) Estágio de corrente constante; (b) Estágio de tensão constante.

3.5. Conclusões

A área de eletrônica de potência tem vindo a evoluir ao longo dos anos, permitindo maiores potências e maiores frequências de comutação. No que diz respeito ao carregamento de baterias, esta evolução permite desenvolver sistemas mais compactos, leves, eficientes e económicos.

Neste capítulo foram apresentadas algumas topologias de conversores capazes de garantir os objetivos de um carregador de baterias para correção de fator de potência e corrente CA sinusoidal.

Além da escolha do conversor que melhor se adapta aos objetivos do sistema de carregamento, é também importante escolher o controlo a ser aplicado a este. Neste capítulo foram ainda apresentadas técnicas de controlo de conversores de potência.

CAPÍTULO 4

Simulação do Sistema de Carregamento de Baterias

4.1. Introdução

Nos dias de hoje é essencial a utilização de ferramentas de simulação computacional no campo de desenvolvimento de soluções de eletrónica de potência. Estas permitem fazer o estudo prévio do comportamento do sistema em ambiente seguro, permitindo testar diferentes topologias, componentes e algoritmos de controlo. Desta forma é possível testar todo o sistema, otimiza-lo e prevenir eventuais erros que possam surgir. Como tal é possível prevenir um mau funcionamento do sistema a ser implementado.

Na presente Dissertação, foi utilizada a ferramenta de simulação computacional *PSIM* 9.1 desenvolvido pela *Powersim Inc.* Este *software* foi desenvolvido para aplicações de eletrónica de potência e possui diversas características como:

- Contém uma vasta biblioteca de componentes, os quais podem ser moldados de acordo com as características desejadas pelo utilizador;
- Permite a utilização de vários sistemas de controlo, possibilitando ainda a utilização de algoritmos em linguagem C.
- Permite a visualização da evolução das diferentes variáveis e respetivas formas de onda ao longo do tempo por meio da ferramenta *SIMVIEW*. Sendo possível através desta calcular o valor médio, valor eficaz, potência real e aparente, fator de potência entre dois sinais e distorção harmónica.

Na Figura 4.1 é apresentado o ambiente de simulação do *PSIM* onde foram efetuadas as simulações para a presente dissertação.

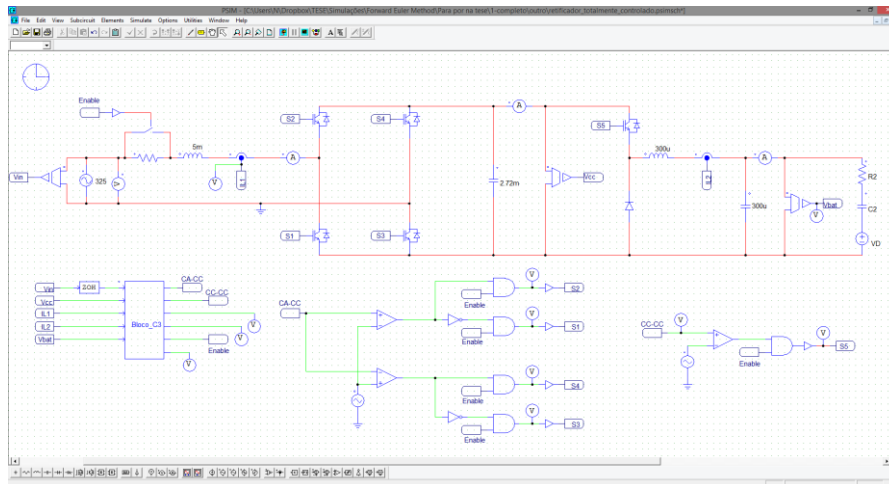


Figura 4.1 - Interface gráfico do ambiente de simulação *PSIM*.

Uma vez que o sistema de carregamento de baterias é composto por dois conversores, um conversor CA-CC e um conversor CC-CC, neste presente capítulo estão apresentadas as simulações realizadas em ambiente de simulação *PSIM* das diferentes topologias possíveis para o conversor CA-CC e a topologia utilizada para o conversor CC-CC. Estão também apresentados os sistemas de controlo aplicados a esses conversores.

4.2. Simulação do Sistema de Controlo em *PSIM*

O algoritmo de controlo foi implementado em *PSIM*, de forma a poder validar o sistema de controlo escolhido.

Uma vez que se trata de um controlo digital é essencial escolher uma frequência de amostragem. Para este sistema de controlo, foi escolhida uma frequência de amostragem de 40 kHz para os diferentes sinais de tensão e corrente. Esta frequência de amostragem foi utilizada tanto nas simulações como na implementação.

4.2.1. Implementação do Algoritmo de Controlo em *PSIM*

Para implementar o algoritmo de controlo foi utilizado um bloco *C* (*C block*) do *PSIM*. Este bloco permite escrever o algoritmo do código em linguagem C, aproximando desta forma o controlo do modelo de simulação à implementação que será feita no DSC (*Digital Signal Controller*).

Na Figura 4.2 é apresentada a implementação do controlo utilizando um bloco *C*. Nas entradas deste bloco foram ligados 5 sinais provenientes dos sensores de corrente e de tensão e na saída encontram-se 2 sinais das variáveis de comando, um para o conversor CA-CC e outro para o conversor CC-CC, que serão utilizados para gerar os sinais de

PWM. Nesta figura é possível também observar a simulação da frequência de amostragem para os 5 sinais de entrada recorrendo a um bloco retentor de ordem zero (*ZOH*), a utilização de um bloco *ZOH* ligado a um sinal de entrada garante uma frequência de amostragem de 40 kHz para este sinal e para os restantes sinais de entrada.

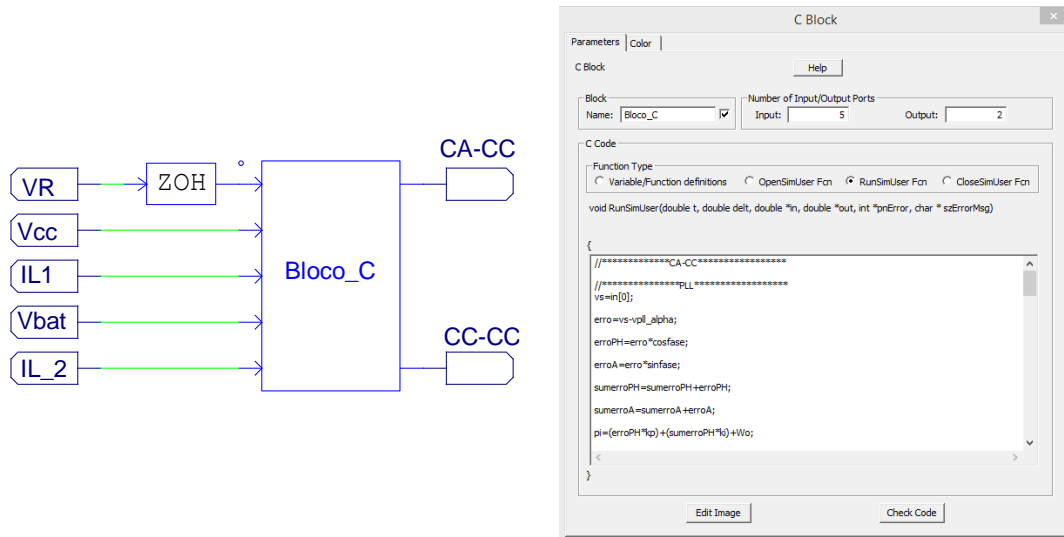


Figura 4.2 - Implementação do bloco *C* em PSIM.

A modulação por largura de pulso (PWM) é uma técnica de modelação muito utilizada em eletrónica, onde através da variação do valor do *duty-cycle* de uma onda quadrada é possível alterar o valor da variável que se pretende controlar.

Esta modulação pode ser feita de duas maneiras, por modulação bipolar ou por modulação unipolar. Na modulação bipolar, Figura 4.3 (a), considerando a topologia *full-bridge* totalmente controlada e os seus dois pares de semicondutores controlados, o par (*S1* e *S4*) e o par (*S2* e *S3*), em que os semicondutores de cada par encontram-se no mesmo estado, a *on* ou a *off*, sendo que se um par estiver a *on* o outro tem de estar a *off*. O par (*S2* e *S3*) encontra-se em condução quando o valor do sinal de comando é superior ao valor da portadora triangular, por sua vez o par (*S1* e *S4*) encontra-se em condução quando o valor do sinal de comando é inferior ao valor da portadora triangular. Para o mesmo caso, na modelação unipolar, Figura 4.3 (b), o valor da portadora triangular é comparado com o valor do sinal de comando e com o valor simétrico do sinal de comando (o simétrico do sinal de comando encontra-se desfasado 180° do sinal de comando) de forma a determinar os sinais de PWM para cada um dos braços do conversor.

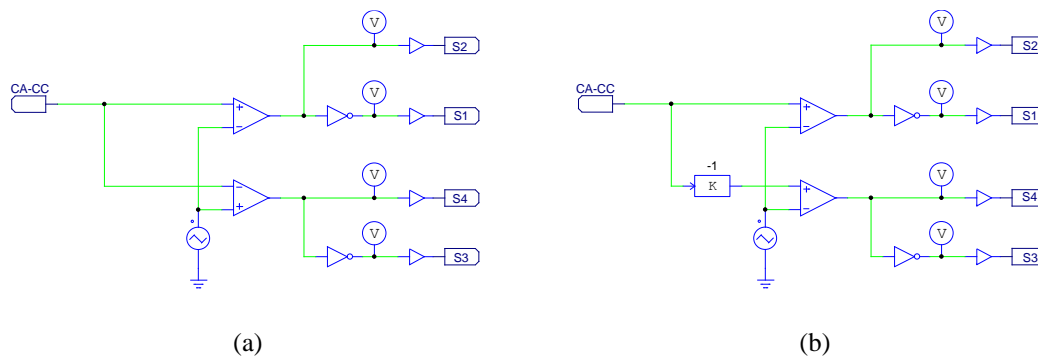


Figura 4.3 - Circuito para gerar PWM: (a) Bipolar; (b) Unipolar.

4.3. Simulação do Banco de Baterias em PSIM

Apesar de possuir uma biblioteca bastante completa, a versão do *PSIM* utilizada, não possui nenhum modelo de bateria. Para simular o carregador de baterias e verificar o comportamento destas, foi necessário implementar um modelo equivalente simplificado da bateria. Na Figura 4.4, encontra-se o modelo simplificado de uma bateria de chumbo-ácido, esta é composta por um condensador C que representa a capacidade de armazenamento de energia da bateria, uma resistência R que representa a resistência interna da bateria e uma fonte de tensão contínua V_D que representa a bateria quando está descarregada.

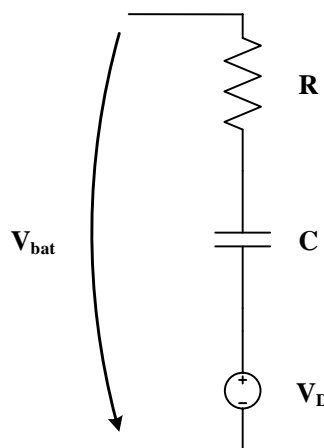


Figura 4.4 - Modelo simplificado da bateria.

4.4. Simulação do Algoritmo de PLL

Na Figura 4.5 encontram-se os resultados obtidos na simulação efetuada em *PSIM* do algoritmo de PLL mencionado em 3.3.2., para uma tensão eficaz de 230 V e uma frequência de 50 Hz. Como é possível verificar o sinal de PLL gerado sincroniza com a fase da tensão da rede elétrica e a sua amplitude vai aumentando até que seja atingida a amplitude da tensão da rede elétrica.

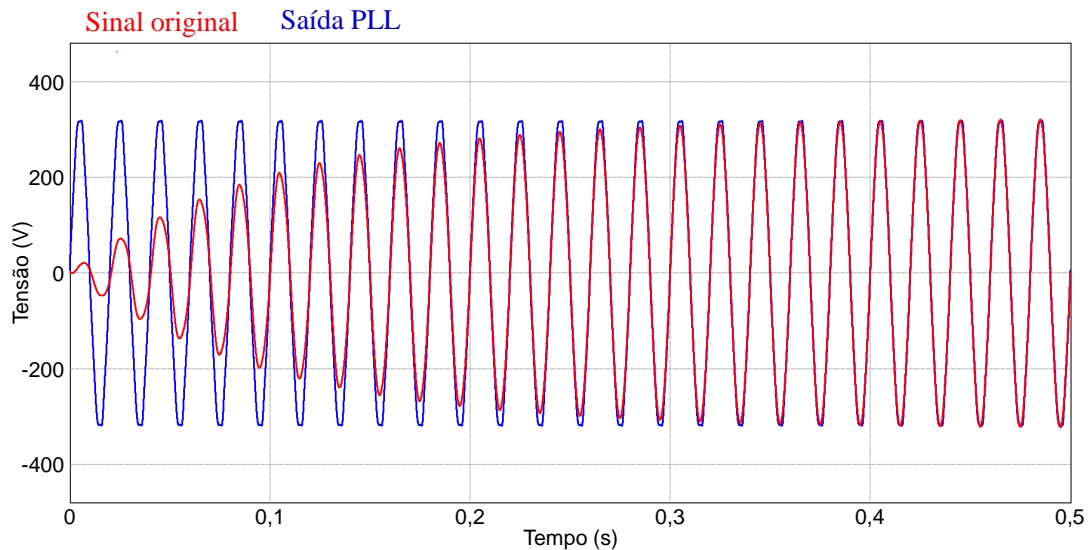


Figura 4.5 - Simulação do algoritmo PLL no *PSIM*.

4.5. Simulação dos Conversores CA-CC em *PSIM*

Tal como já foi dito, os conversores CA-CC tem como função regular a tensão do barramento e a corrente de entrada dos conversores, com a exceção do conversor CA-CC *full-bridge* não controlado. De maneira a se realizar um estudo prévio do comportamento dos diferentes conversores CA-CC, estes foram modelados em *PSIM* de maneira a serem retratados o mais próximo possível das condições reais.

4.5.1. Simulação do Conversor CA-CC *Full-Bridge* Não Controlado

Na Figura 4.6 encontra-se o modelo da simulação em *PSIM* do conversor CA-CC *full-bridge* não controlado. O conversor foi dimensionado para uma potência de 3,5 kW, pelo que foi utilizada uma resistência de carga de 48 Ω .

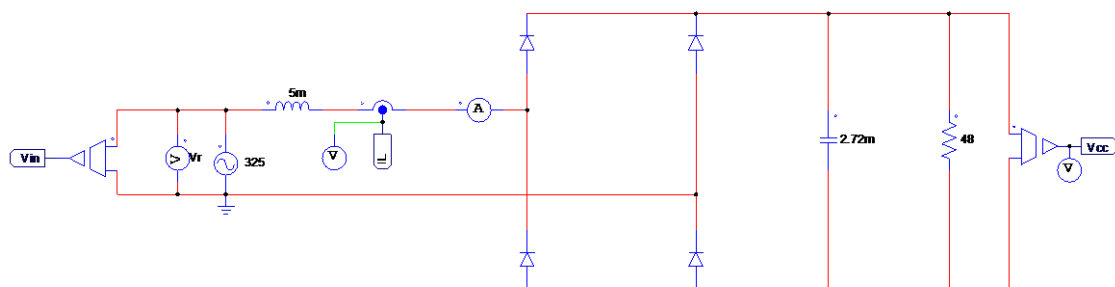


Figura 4.6 - Implementação do conversor CA-CC *full-bridge* não controlado em *PSIM*.

Na Figura 4.7 encontra-se as formas de onda da tensão da rede (v_R) e da corrente da rede (i_R). Como é possível observar, a corrente de entrada do conversor não se encontra em fase com a tensão da rede. A ferramenta de visualização de gráficos do *PSIM* (*SIMVIEW*), indica que entre v_R e i_R o $FP = 0,74$ e que i_R possui uma distorção harmónica $THD_i = 70,66\%$. O valor eficaz de i_R é de 15 A, pelo que a potência consumida pelo conversor é de 3,5 kW.

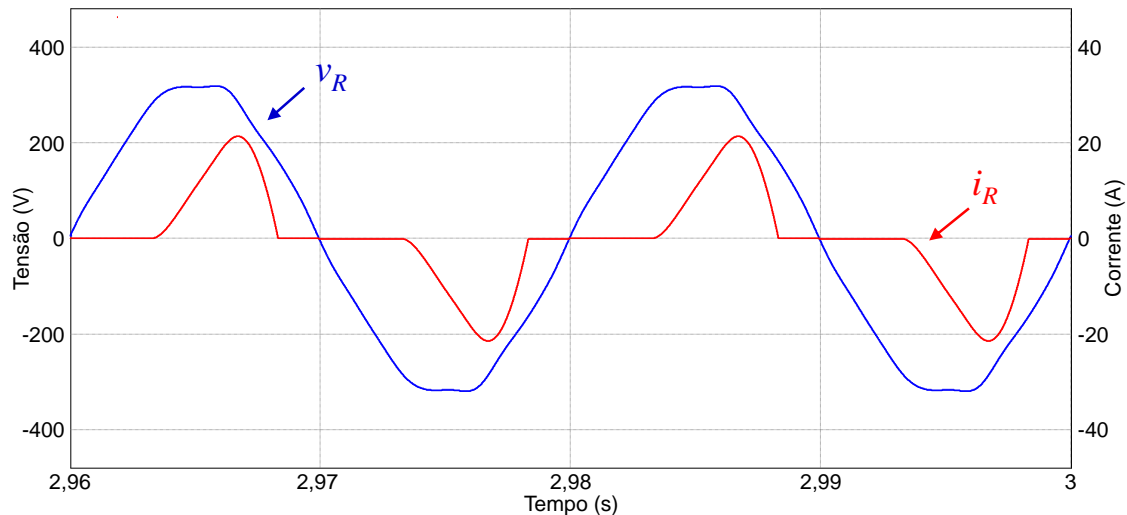


Figura 4.7 - Tensão da rede (v_R) e corrente da rede (i_R).

4.5.2. Simulação do Conversor CA-CC *Boost*

Na Figura 4.8 encontra-se a simulação em *PSIM* do conversor CA-CC *boost*.

O conversor foi dimensionado para uma potência de 3,5 kW, pelo que foi utilizada uma resistência de carga de 48 Ω . Pretende-se que a corrente consumida pelo conversor tenha um sinal sinusoidal em fase com a tensão, e que a tensão do barramento CC (V_{CC}) seja de 400 V.

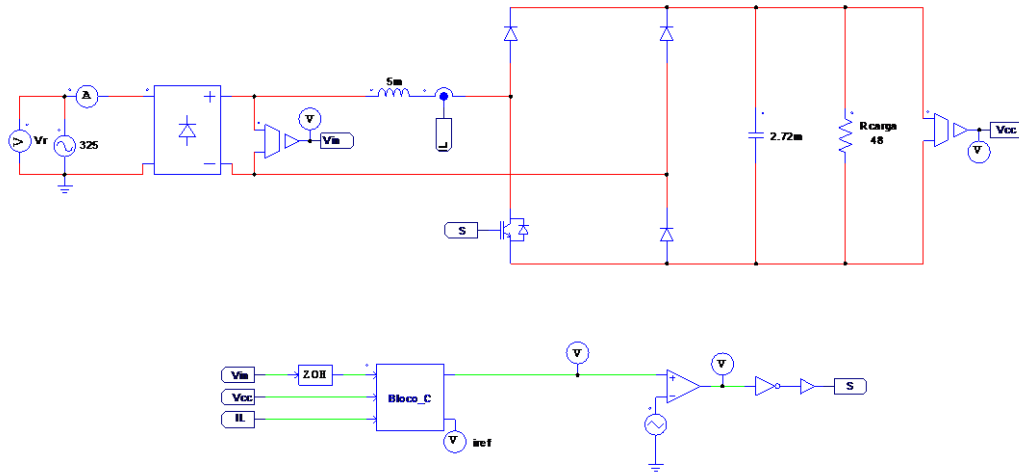


Figura 4.8 - Implementação do conversor CA-CC *boost* em *PSIM*.

Na Figura 4.9 encontra-se as formas de onda da tensão da rede (v_R) e da corrente da rede (i_R). Como é possível observar, a corrente de entrada do conversor encontra-se em fase com a tensão da rede. A ferramenta de visualização de gráficos do *PSIM* (*SIMVIEW*), indica que entre v_R e i_R o $FP = 0,99$ e que i_R possui uma distorção harmónica $THD_i = 3,62\%$. O valor eficaz de i_R é de 15 A, pelo que a potência consumida pelo conversor é de 3,5 kW.

Na Figura 4.10 é apresentada a tensão no barramento CC (V_{CC}). O valor de V_{CC} é iniciado a 400 V e quando é feita a regulação da tensão do barramento CC, esta possui um *ripple* de 5 V pico-a-pico.

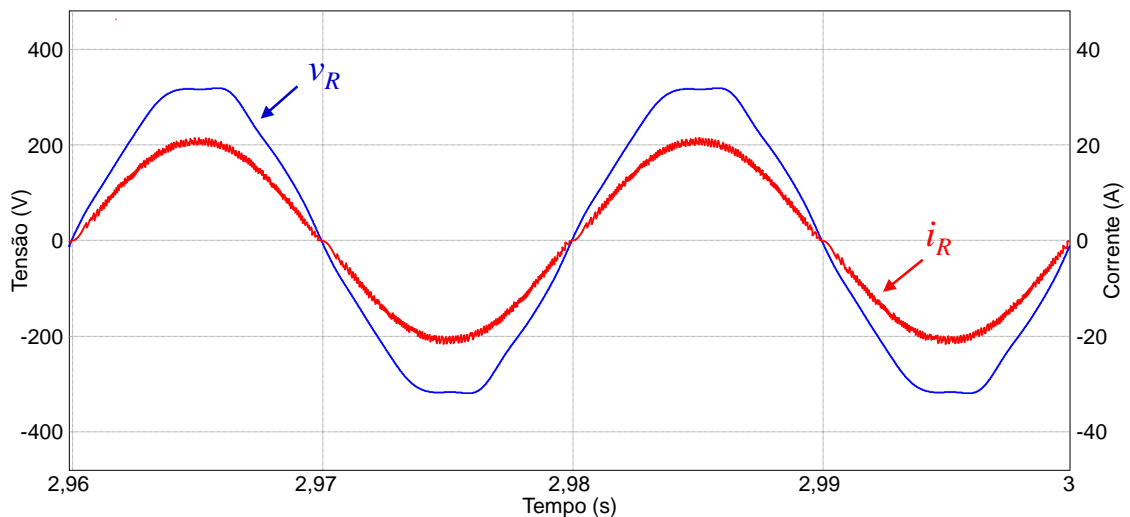


Figura 4.9 – Tensão da rede (v_R) e corrente da rede (i_R) à entrada do conversor.

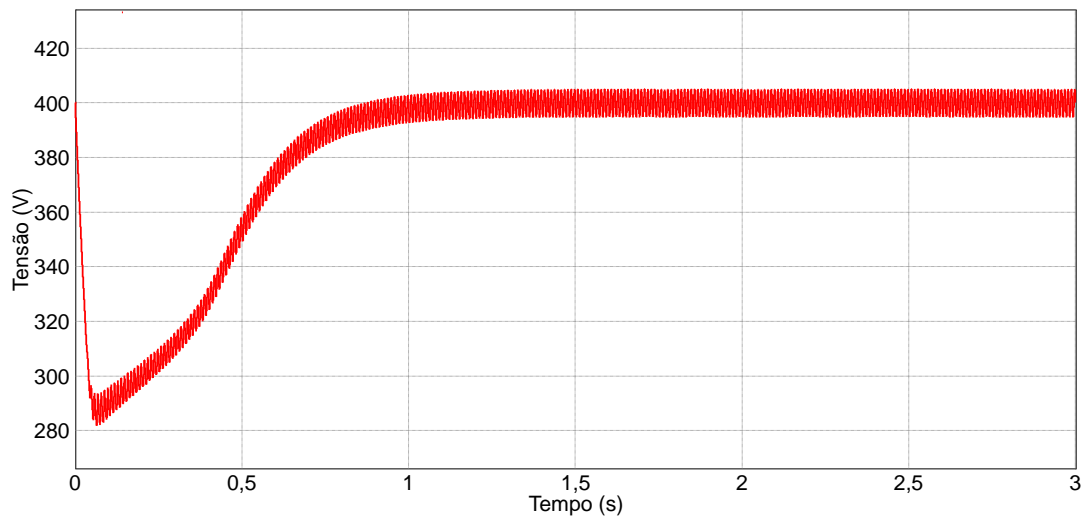


Figura 4.10 – Regulação da tensão do barramento CC (V_{CC}).

4.5.3. Simulação do Conversor CA-CC *Full-Bridge* Semicontrolado Simétrico

Na Figura 4.11 encontra-se a simulação em *PSIM* do conversor CA-CC *full-bridge* semicontrolado simétrico. Este conversor foi dimensionado para uma potência de 3,5 kW, pelo que foi utilizada uma resistência de carga de 48 Ω . Pretende-se que a corrente consumida pelo conversor tenha um sinal sinusoidal em fase com a tensão, e que a tensão do barramento CC (V_{CC}) seja de 400 V.

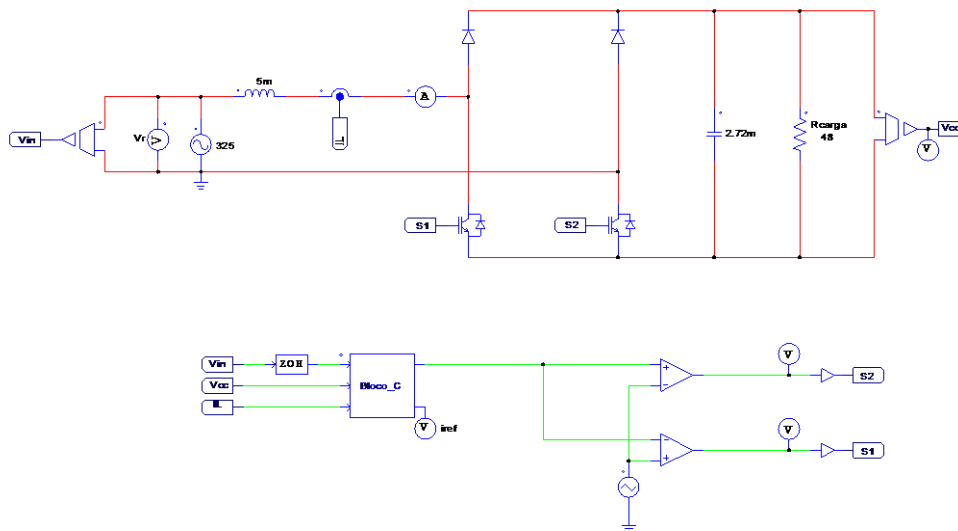


Figura 4.11 - Implementação do conversor CA-CC *full-bridge* semicontrolado simétrico em *PSIM*.

Na Figura 4.12 encontra-se as formas de onda da tensão da rede (v_R) e da corrente da rede (i_R). Como é possível observar, a corrente de entrada do conversor encontra-se em fase com a tensão da rede. A ferramenta de visualização de gráficos do *PSIM* (*SIMVIEW*), indica que entre v_R e i_R o $FP = 0,99$ e que i_R possui uma distorção harmónica

$THD_i = 3,86\%$. O valor eficaz de i_R é de 15 A, pelo que a potência consumida pelo conversor é de 3,5 kW.

Na Figura 4.13 é apresentada a tensão no barramento CC (V_{CC}). O seu valor é de 400 V com um *ripple* de 5 V pico-a-pico.

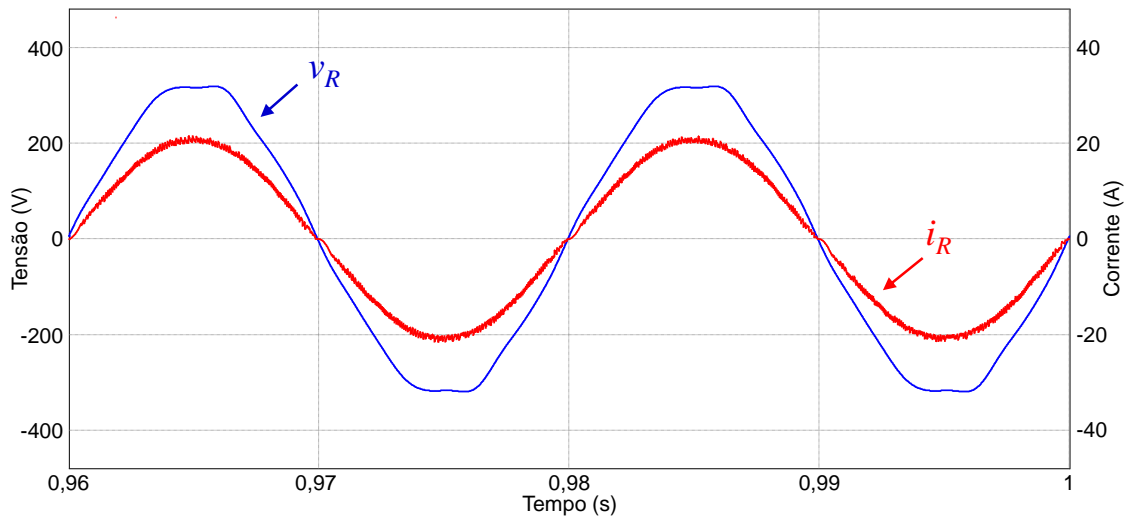


Figura 4.12 – Tensão da rede (v_R) e corrente da rede (i_R) à entrada do conversor.

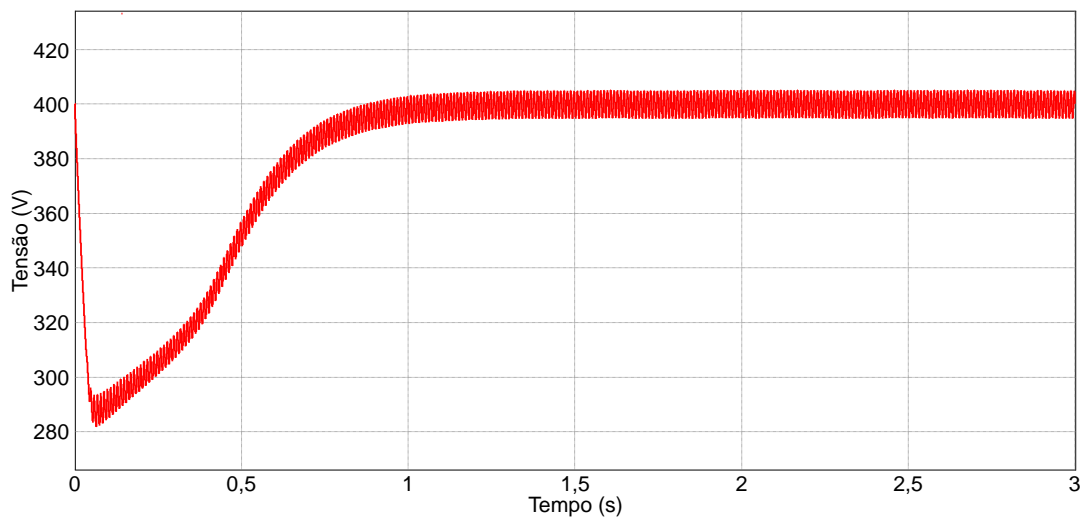


Figura 4.13 – Regulação da tensão do barramento CC (V_{CC}).

4.5.4. Simulação do Conversor CA-CC *Full-Bridge* Semicontrolado Assimétrico

Na Figura 4.14 encontra-se a simulação em *PSIM* do conversor CA-CC *full-bridge* semicontrolado assimétrico. Este conversor foi dimensionado para uma potência de 3,5 kW, pelo que foi utilizada uma resistência de carga de 48 Ω . Pretende-se que a

corrente consumida pelo conversor tenha um sinal sinusoidal em fase com a tensão, e que a tensão do barramento CC (V_{CC}) seja de 400 V.

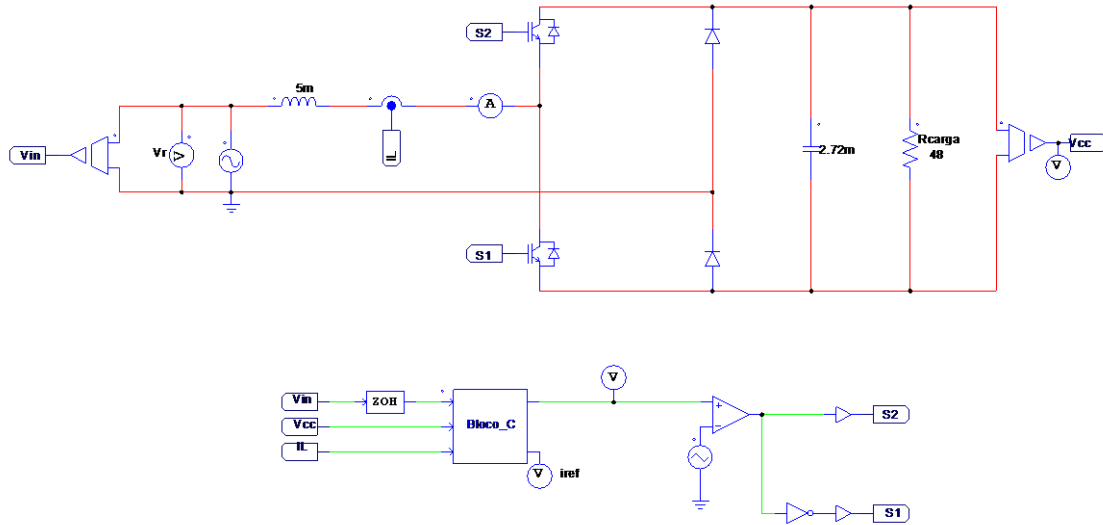


Figura 4.14 - Implementação do conversor CA-CC *full-bridge* semicontrolado assimétrico em *PSIM*.

Na Figura 4.15 encontra-se as formas de onda da tensão da rede (v_R) e da corrente da rede (i_R). Como é possível observar, a corrente de entrada do conversor encontra-se em fase com a tensão da rede. A ferramenta de visualização de gráficos do *PSIM* (*SIMVIEW*), indica que entre v_R e i_R o $FP = 0,99$ e que i_R possui uma distorção harmónica $THD_i = 3,79\%$. O valor eficaz de i_R é de 15 A, pelo que a potência consumida pelo conversor é de 3,5 kW.

Na Figura 4.16 é apresentada a tensão no barramento CC (V_{CC}). O seu valor é de 400 V com um *ripple* de 5 V pico-a-pico.

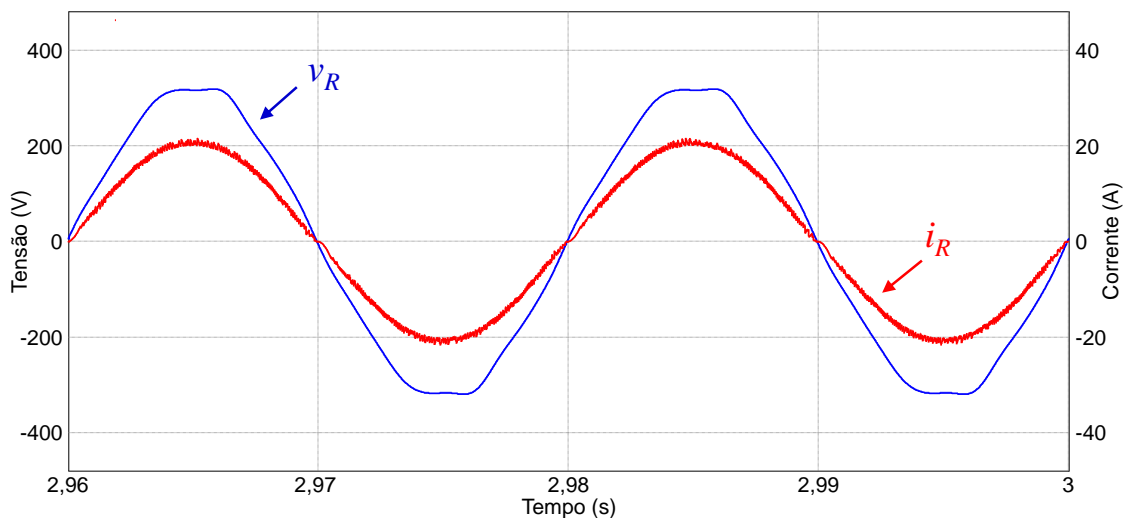


Figura 4.15 – Tensão da rede (v_R) e corrente da rede (i_R) à entrada do conversor.

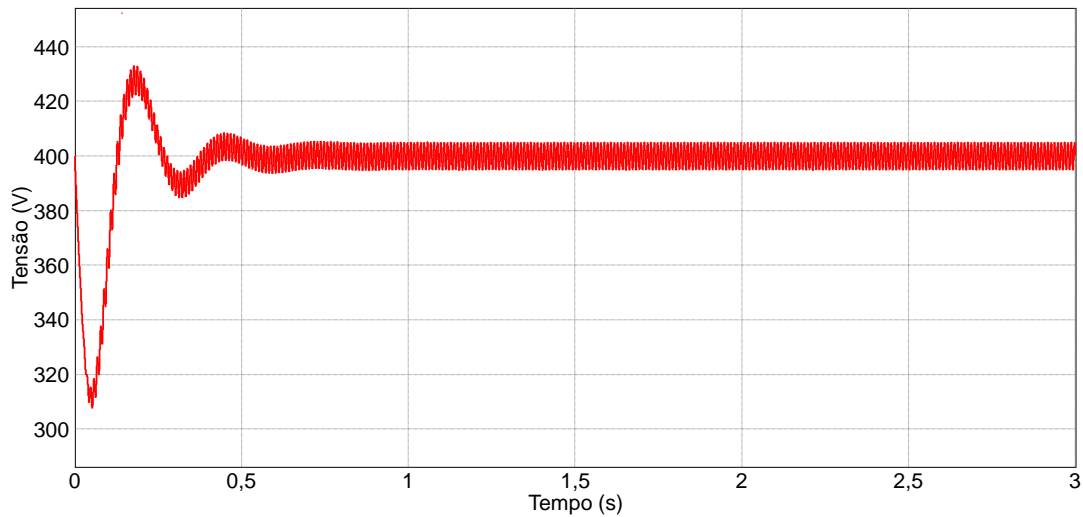


Figura 4.16 – Regulação da tensão do barramento CC (V_{CC}).

4.5.5. Simulação do Conversor CA-CC *Full-Bridge* Totalmente Controlado

Na Figura 4.17 encontra-se a simulação em *PSIM* do conversor CA-CC *full-bridge* totalmente controlado. Este conversor foi dimensionado para uma potência de 3,5 kW, pelo que foi utilizada uma resistência de carga de 48 Ω . Pretende-se que a corrente consumida pelo conversor tenha um sinal sinusoidal em fase com a tensão, e que a tensão do barramento CC (V_{CC}) seja de 400 V.

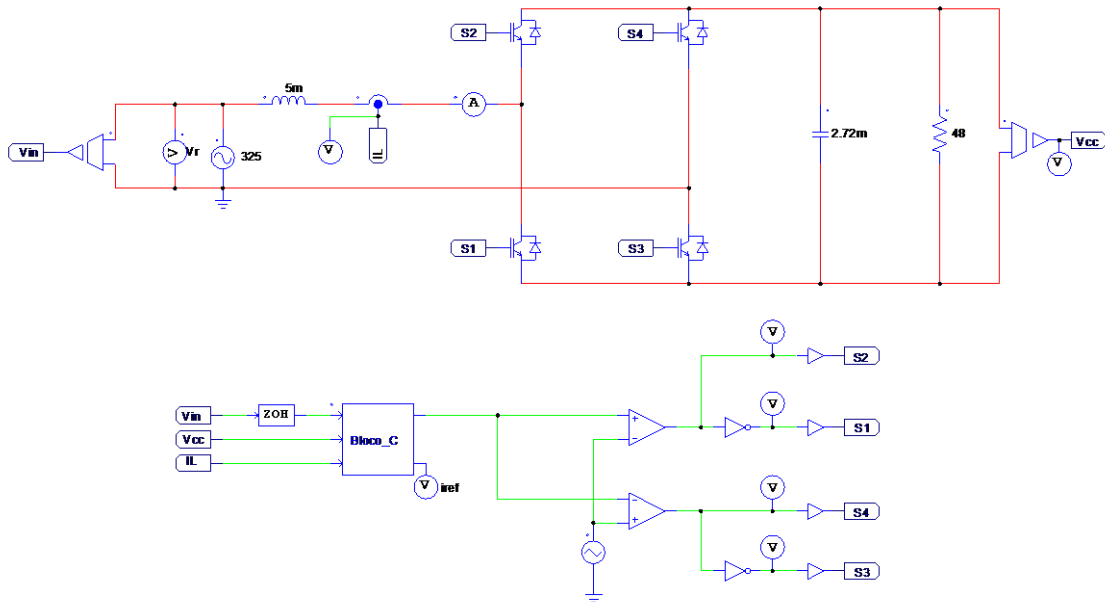


Figura 4.17 - Implementação do conversor CA-CC *full-bridge* totalmente controlado em *PSIM*.

Na Figura 4.18 encontra-se as formas de onda da tensão da rede (v_R) e da corrente da rede (i_R). Como é possível observar, a corrente de entrada do conversor encontra-se em fase com a tensão da rede. A ferramenta de visualização de gráficos do *PSIM*

(*SIMVIEW*), indica que entre v_R e i_R o $FP = 0,99$ e que i_R possui uma distorção harmónica $THD_i = 2,81\%$. O valor eficaz de i_R é de 15 A, pelo que a potência consumida pelo conversor é de 3,5 kW.

Na Figura 4.19 é apresentada a tensão no barramento CC (V_{CC}). O seu valor é de 400 V com um *ripple* de 5 V pico-a-pico.

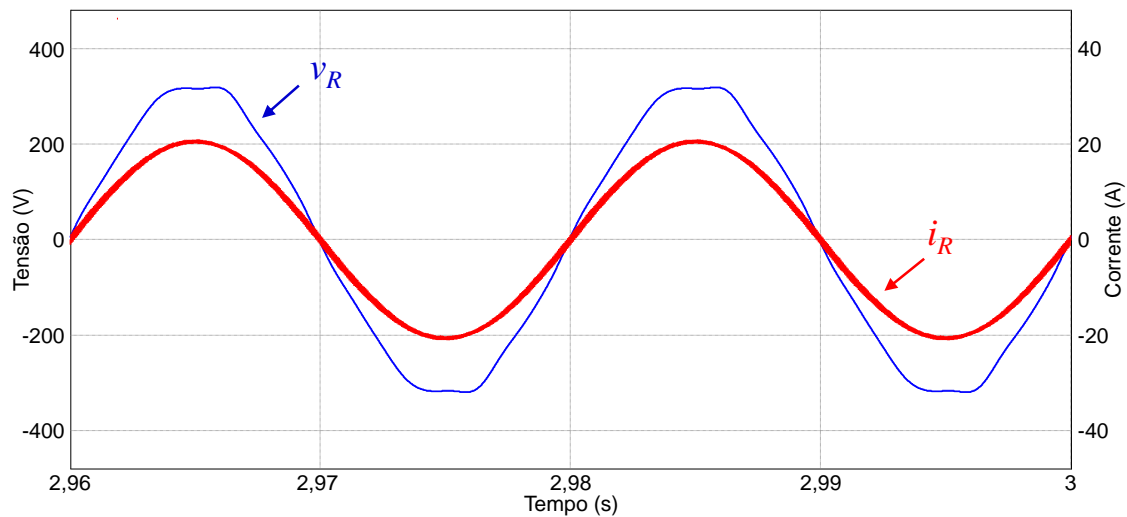


Figura 4.18 – Tensão da rede (v_R) e corrente da rede (i_R) à entrada do conversor.

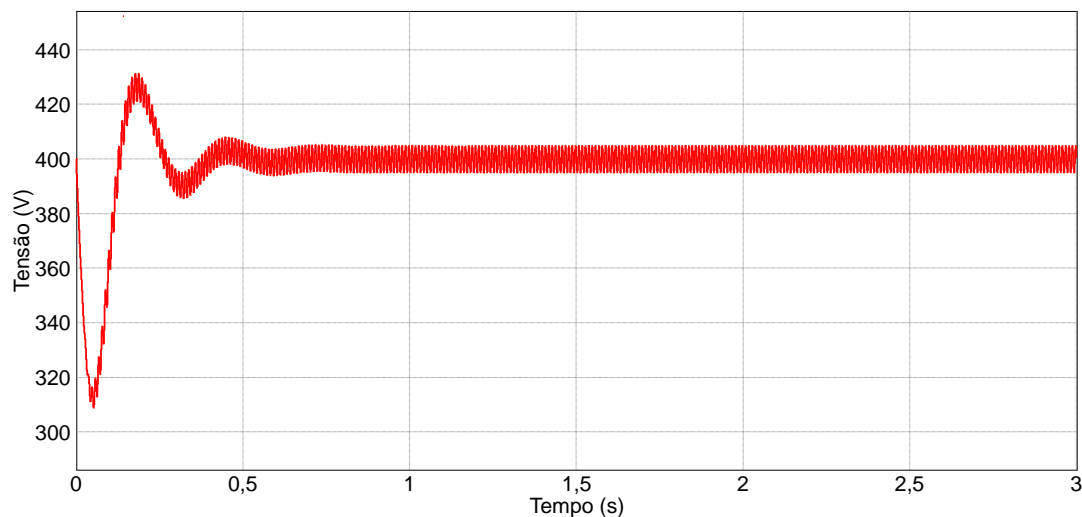


Figura 4.19 – Regulação da tensão do barramento CC (V_{CC}).

4.6. Comparação dos Conversores CA-CC

Todas as simulações realizadas anteriormente para os diferentes conversores, foram realizadas com as características apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características de simulação.

Característica	Valor	Unidade
<i>Time step</i>	1	μs
Frequência comutação	20	kHz
Frequência amostragem	40	kHz
Tensão da rede	230	V
Corrente de entrada	15	A
Tensão do Barramento CC	400	V

Na Tabela 4.2 estão apresentados os valores de THD_i e o fator de potência (FP) obtidos nas simulações dos conversores.

Tabela 4.2 - Valores de THD_i e FP obtidos nas simulações dos diferentes conversores.

Conversor CA-CC	THD _i %	FP
<i>Full-bridge não controlado</i>	70,66 %	0,74
<i>Boost</i>	3,62 %	0,99
<i>Full-bridge semicontrolado simétrico</i>	3,86 %	0,99
<i>Full-bridge semicontrolado assimétrico</i>	3,79 %	0,99
<i>Full-bridge</i>	2,81 %	0,99

Pelas simulações realizadas em 4.5 verifica-se que todos os conversores CA-CC estudados produzem bons resultados, com a exceção da topologia *full-bridge* não controlado. Observando a Tabela 4.2, com a exceção do conversor CA-CC *full-bridge* não controlado, todos os conversores possuem um fator de potência próximo da unidade, diferenciando-se pelo seu valor de THD_i.

4.7. Simulação dos Conversor CC-CC em PSIM

Como já mencionado, o conversor CC-CC *buck* é responsável por efetuar o carregamento das baterias. De forma a se realizar um estudo prévio do comportamento do conversor, este foi simulado em PSIM.

Na Figura 4.20 encontra-se a simulação em PSIM do conversor CC-CC *buck*. Pretende-se que este conversor forneça às baterias uma corrente constante ou uma tensão constante, consoante o seu estágio de carga. A fonte de tensão V_{CC} de 400 V simula o conversor CA-CC.

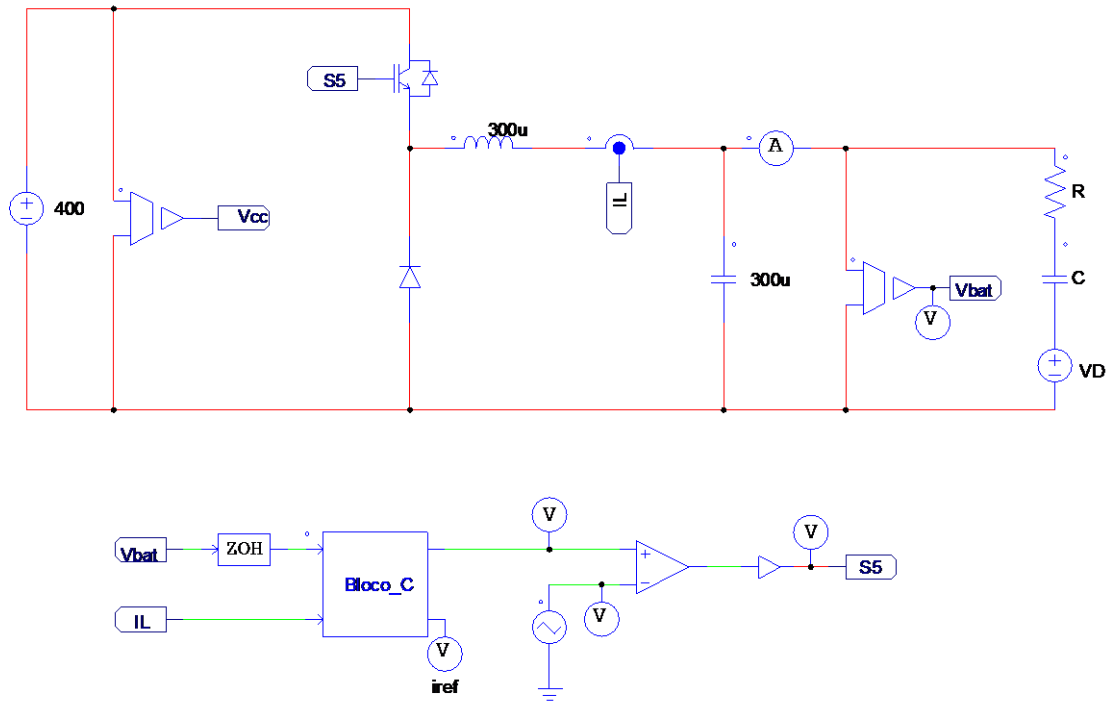


Figura 4.20 - Implementação do conversor CC-CC buck em PSIM.

Na Figura 4.21 e na Figura 4.22 é possível observar os resultados da simulação do circuito Figura 4.20 com um controlo de corrente constante. A tensão inicial das baterias é de 300 V e a referência da corrente é de 10 A. Observando o gráfico da Figura 4.21 verifica-se que a corrente fornecida às baterias (i_{bat}) segue a referência (i_{ref_bat}), no gráfico da Figura 4.22 é possível observar a evolução da tensão aos terminais das baterias (v_{bat}).

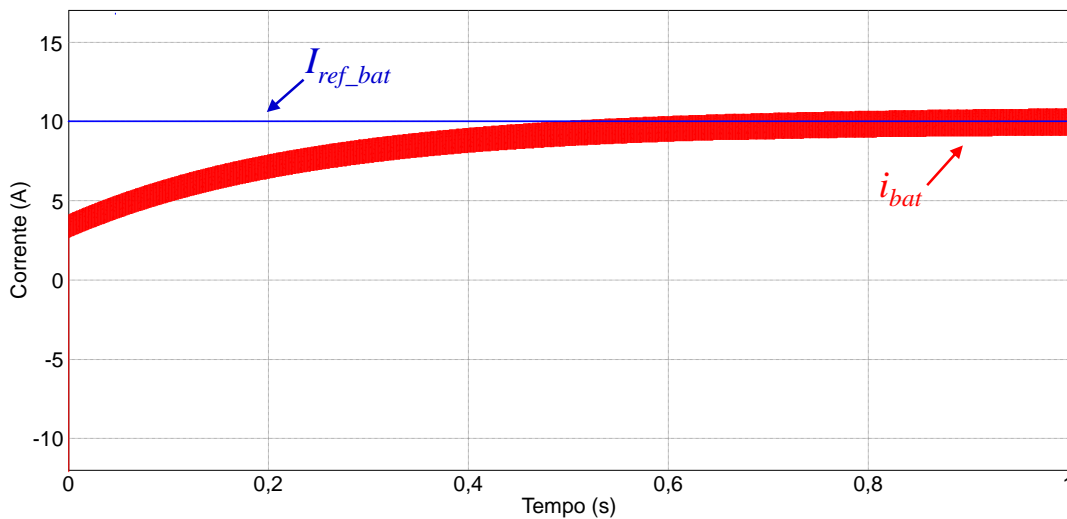


Figura 4.21 - Corrente de referência (i_{ref_bat}) e corrente das baterias (i_{bat}).

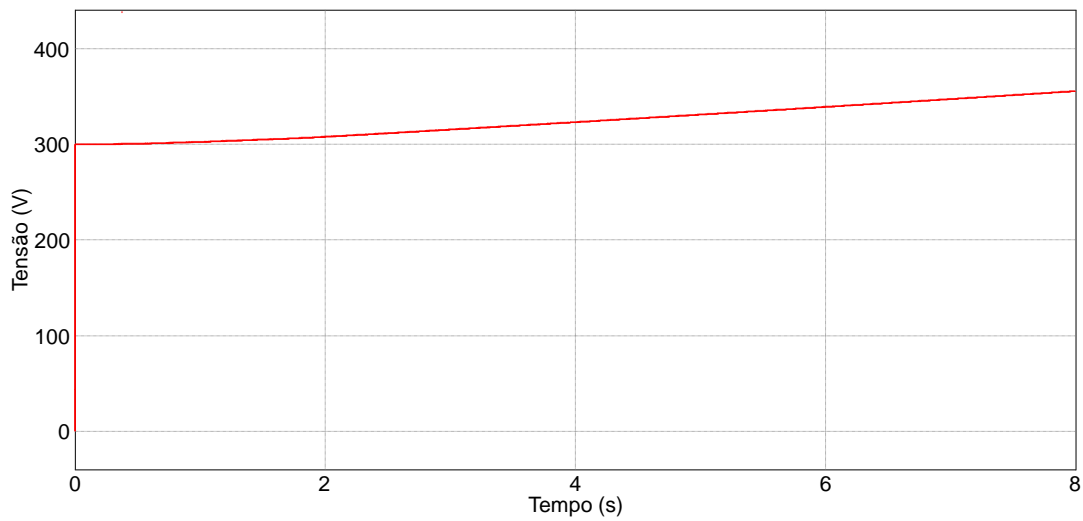


Figura 4.22 - Tensão aos terminais das baterias (v_{bat}).

4.8. Simulação do Sistema Completo

Na Figura 4.23 encontra-se a simulação em *PSIM* do Carregador de Baterias com Correção do Fator de Potência para Utilização *On-Board* em Veículo Elétrico. Para esta simulação foi escolhida a topologia *full-bridge* totalmente controlada para o conversor CA-CC por ser a topologia com menor valor de THD_i de corrente.

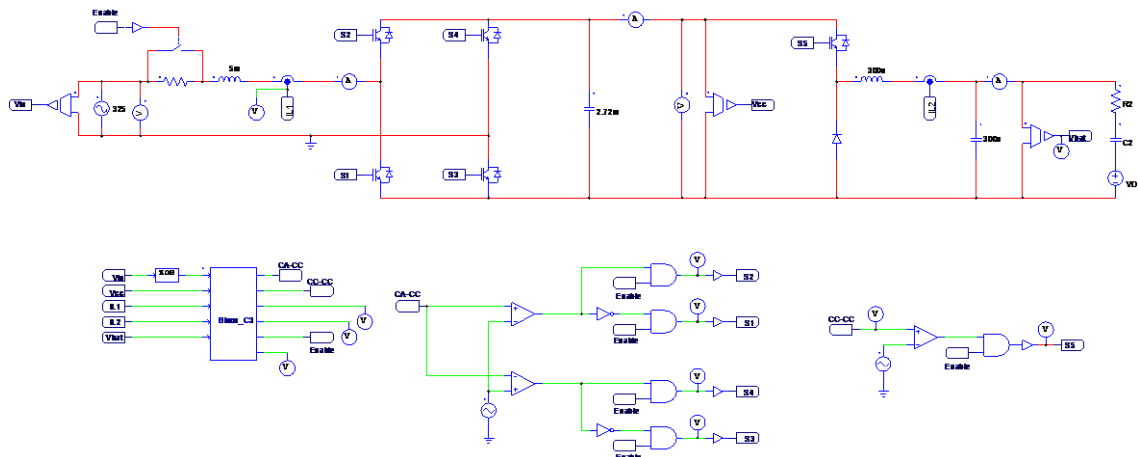


Figura 4.23 - Simulação carregador de baterias com correção do fator de potência para utilização *on-board* em veículo elétrico.

Na Figura 4.24 encontram-se as formas de onda da tensão da rede (v_R) e da corrente da rede (i_R) à entrada do conversor CA-CC e a corrente de referência (i_{ref}). Como esperado a corrente de entrada do conversor acompanha a corrente de referência e encontra-se em fase com a tensão da rede.

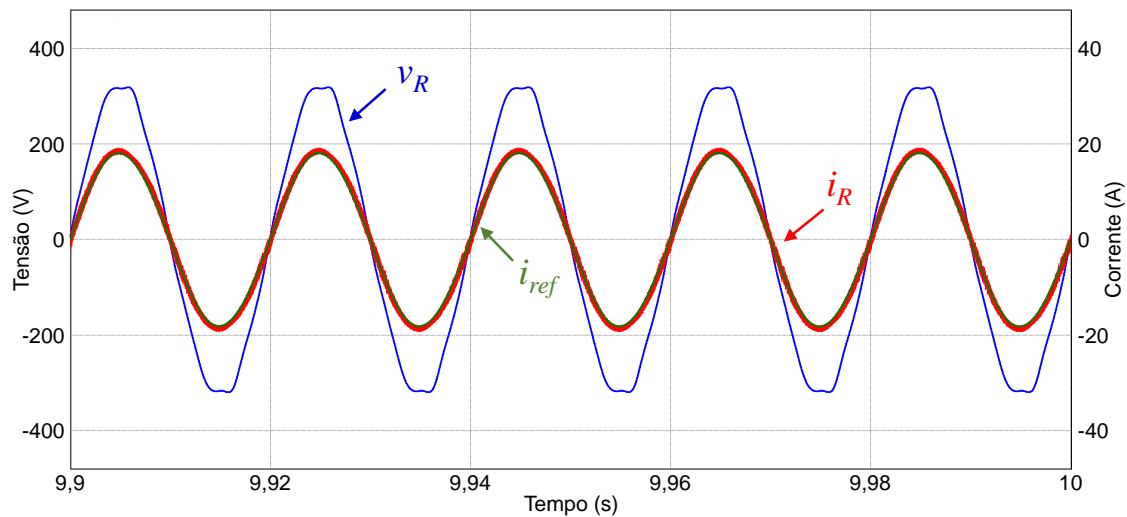


Figura 4.24 - Tensão da rede (v_R) e corrente da rede (i_R) à entrada do conversor e corrente de referência (i_{ref}).

Na Figura 4.25 é apresentado o carregamento e regulação do barramento CC do conversor CA-CC. Para tal, foi utilizada uma resistência de pré-carga à entrada do conversor de forma a amortecer o pico de corrente inicial criado pelo banco de condensadores, estes são carregados sem que seja aplicado qualquer controlo, através dos díodos em antiparalelo dos IGBTs. Quando a tensão do barramento CC é de 320 V é feito o *bypass* à resistência de pré-carga e entra em funcionamento o controlo para efetuar a regulação da tensão nos condensadores do barramento CC e o controlo para o carregamento das baterias.

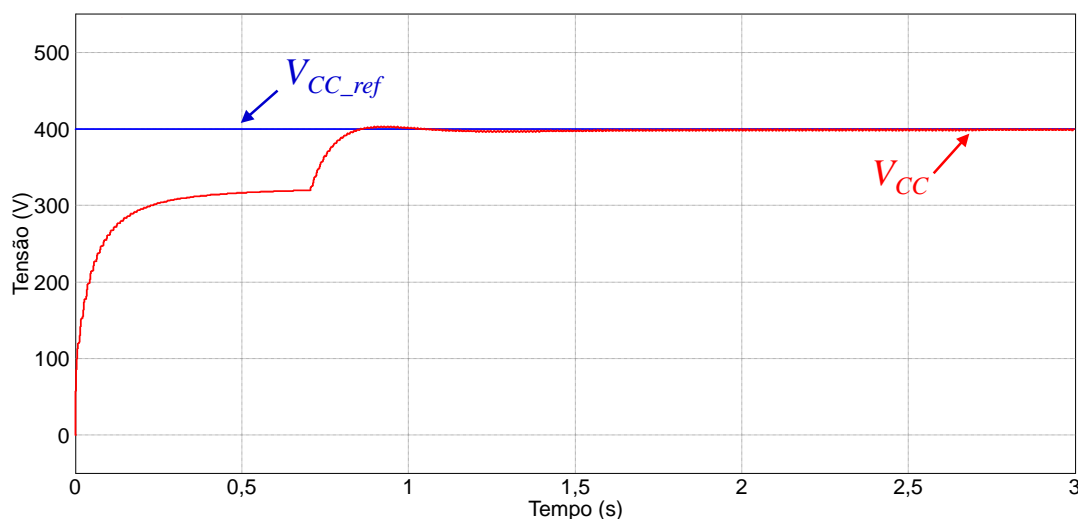


Figura 4.25 - Carregamento e regulação da tensão do barramento CC.

Na Figura 4.26 e na Figura 4.27 é possível observar os resultados de simulação para o carregamento das baterias com um controlo de corrente constante. A tensão inicial das baterias é de 300 V e a referência da corrente é de 10 A. Observando o gráfico da Figura 4.26 verifica-se que a corrente fornecida às baterias (i_{bat}) segue a referência (i_{ref_bat}), e no gráfico da Figura 4.27 é possível observar a evolução da tensão aos terminais das baterias (v_{bat}).

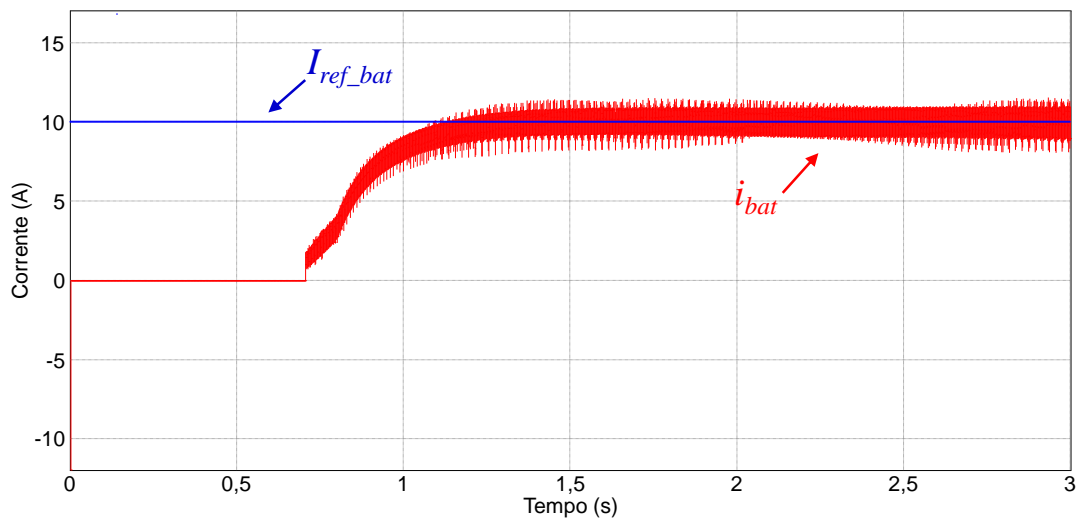


Figura 4.26 - Corrente de referência (i_{ref_bat}) e corrente das baterias (i_{bat}).

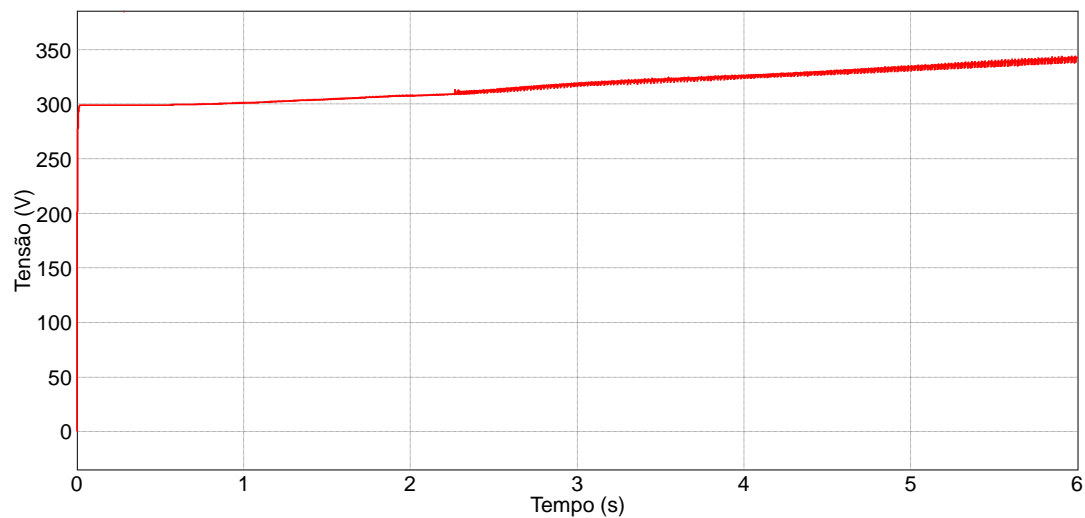


Figura 4.27 - Tensão aos terminais das baterias (v_{bat}).

4.9. Conclusões

No início deste capítulo procedeu-se á apresentação da ferramenta de simulação computacional *PSIM* 9.1, dedicada para aplicações de eletrónica de potência.

De seguida foram apresentados os circuitos implementados em ambiente de simulação *PSIM* que permitiram simular o comportamento do algoritmo de controlo, das baterias e dos conversores.

As simulações dos diferentes conversores apresentadas neste capítulo tiveram como propósito validar as topologias e o sistema de controlo escolhidos. Para os conversores CA-CC, os resultados obtidos das simulações validam as topologias escolhidas assim como o sistema de controlo aplicado. A tensão no barramento CC mantém-se nos 400 V, com um *ripple* muito baixo, enquanto a corrente de entrada é sinusoidal e em fase com a tensão da rede eléctrica com um valor de THD_i reduzido.

Para o conversor CC-CC *buck*, utilizando um modelo equivalente de uma bateria, os resultados obtidos validam a topologia e o sistema de controlo aplicado.

Foi também realizada uma comparação dos diferentes conversores CA-CC no que diz respeito ao fator de potência e ao seu valor de THD_i . Por fim foi realizada a simulação do sistema de carregamento completo com o propósito de validar todo o sistema.

CAPÍTULO 5

Implementação do Sistema de Carregamento de Baterias

5.1. Introdução

O sistema de carregamento de baterias *on-board* bidirecional que aqui se descreve foi desenvolvido pelo Grupo de Eletrónica de Potência e Energias (GEPE). O *hardware* do sistema permite testar diferentes topologias, dependendo da estratégia de controlo utilizada, sendo esse o principal objetivo desta dissertação.

O sistema pode ser dividido em duas partes, o circuito de potência e o sistema de controlo. Para o circuito de potência são apresentadas as topologias dos conversores de potência (conversor CA-CC e conversor CC-CC) utilizadas assim como os componentes que as constituem: semicondutores de potência, condensadores, indutâncias, dissipador e proteções. Quanto ao *hardware* necessário para o sistema de controlo, serão apresentados os sensores utilizados, a placa de condicionamento de sinal, a placa de *drive* para os IGBTs, a placa de DAC e o DSC.

Na Figura 5.1, é apresentado um esquemático do sistema de carregamento de baterias, com o respetivo circuito de potência e sistema de controlo para uma melhor compreensão do mesmo.

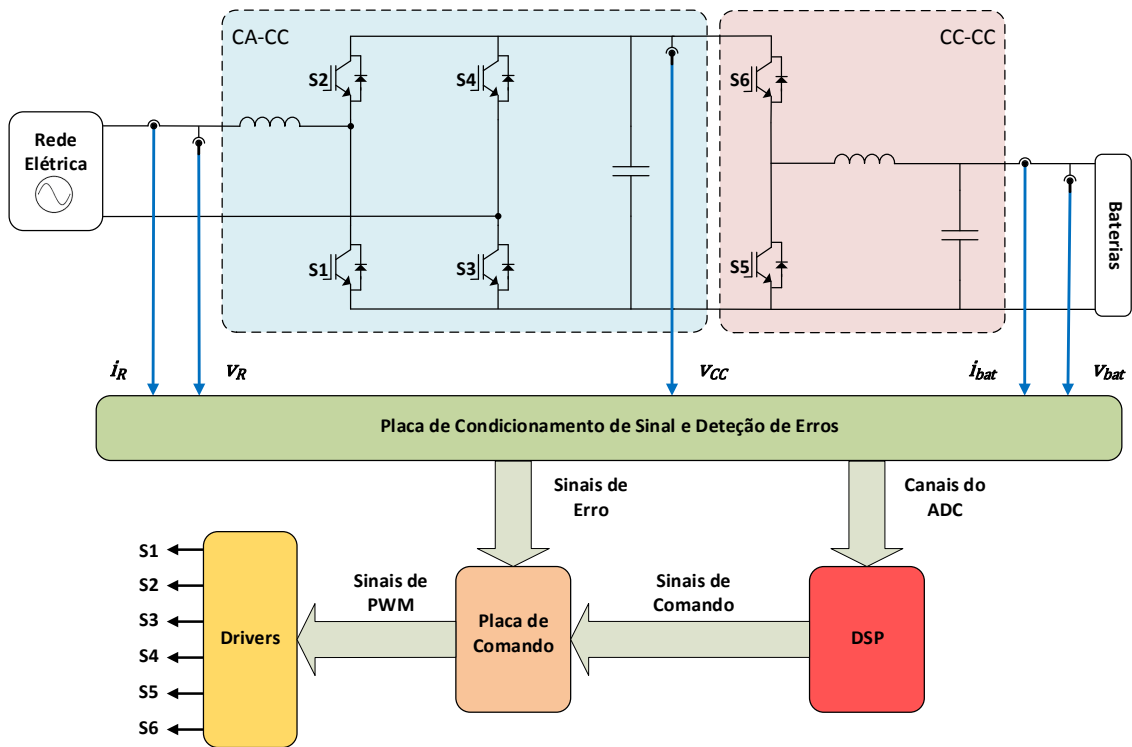


Figura 5.1 - Esquemático do sistema de carregamento.

5.2. Circuito de Potência

Como já foi mencionado, o circuito de potência é composto por dois conversores, um conversor CA-CC e um conversor CC-CC. Foi escolhida uma topologia *full-bridge* totalmente controlada para o conversor CA-CC e uma topologia *buck-boost* bidirecional para o conversor CC-CC. Na Figura 5.2 é apresentado o circuito de potência utilizado.

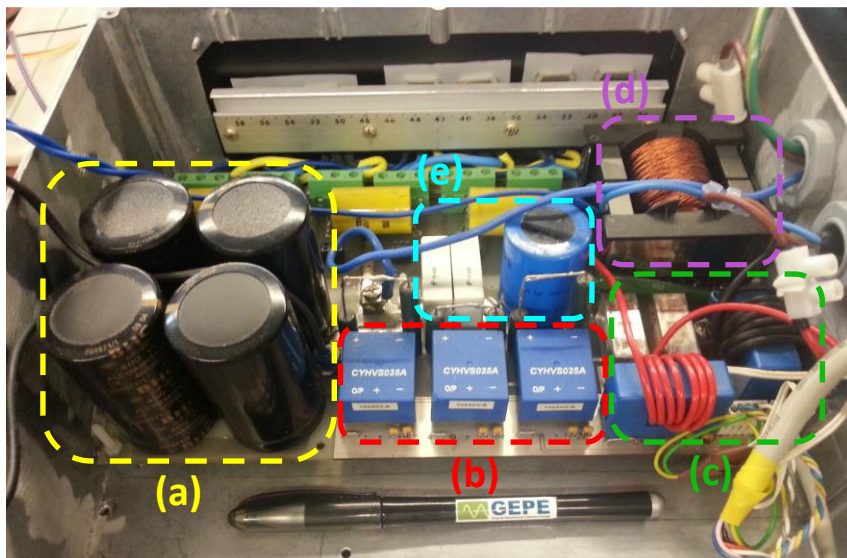


Figura 5.2 - Circuito de potência: (a) Condensadores do barramento CC; (b) Sensores de tensão; (c) Sensores de corrente; (d) Indutância do conversor CC; (e) Condensadores de saída do conversor CC-CC.

Apresentam-se de seguida os componentes que compõem estes dois conversores. Tanto o conversor CA-CC como o conversor CC-CC possuem na sua constituição IGBTs para os semicondutores controlados.

5.2.1. IGBTs

Os IGBTs utilizados em ambos os conversores são o modelo *FGA25N120ANTD* da *Fairchild*, Figura 5.3. São IGBTs com díodos em antiparalelo com uma corrente nominal de 25 A, operando à temperatura de 100 °C. Estes suportam tensões coletor-emissor até 1200 V [81].

Neste circuito de potência foram utilizados seis IGBTs, quatro para o conversor CA-CC e dois para o conversor CC-CC.



5.2.2. Dissipador Térmico

Muitas vezes em aplicações de eletrônica de potência é necessário a utilização de dissipadores térmicos para um bom funcionamento do sistema. Isto deve-se às perdas por efeito de Joule que existem nos semicondutores de potência controlados (IGBTs neste caso) durante o seu funcionamento. Para que os semicondutores de potência controlados não se estraguem ou tenham as suas características de funcionamento alteradas, o que levaria a um mau funcionamento do semicondutor de potência controlado, são utilizados dissipadores de calor de maneira a facilitar a transferência de calor entre o encapsulamento e o ambiente. A dissipação de calor pode ser obtida de duas formas, por convecção natural do ar ou por convecção artificial, onde são utilizados ventiladores ou líquidos de refrigeração. Neste caso foi usado um dissipador de convecção natural, Figura 5.4.



Figura 5.4 - Dissipador de convecção natural.

5.2.3. Condensadores do Barramento CC

O barramento CC implementado possui 4 condensadores eletrolíticos de $680 \mu\text{F} / 400 \text{ V}$. Estes condensadores estão ligados em paralelo de modo a obter um valor de capacidade de $2,72 \text{ mF}$.

Na Figura 5.5, é demonstrada a disposição dos condensadores, assim como a sua ligação em paralelo. Na Figura 5.6, são apresentados os condensadores na placa.

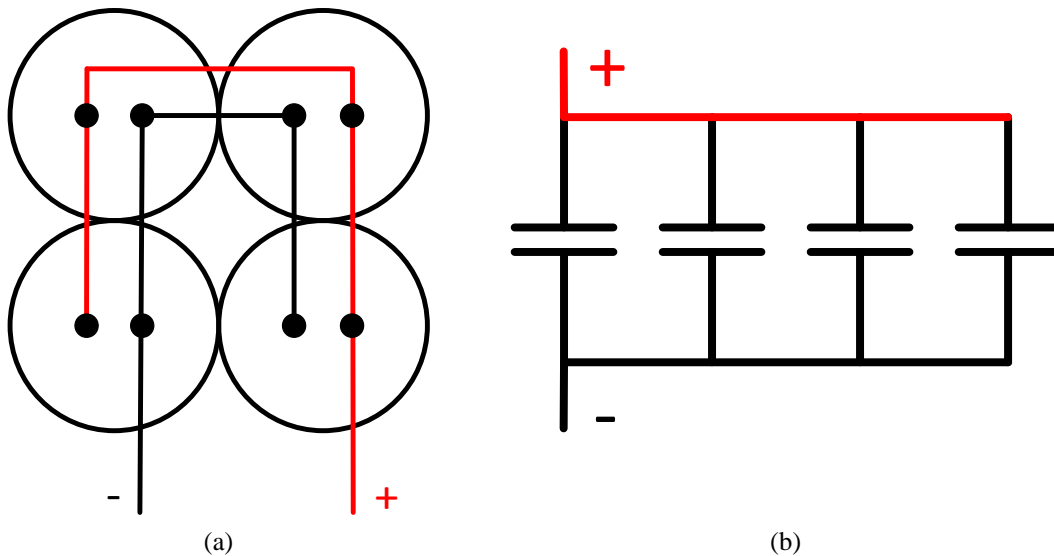


Figura 5.5 – (a) Disposição dos condensadores na placa; (b) Ligação dos condensadores em paralelo.



Figura 5.6 - Condensadores do barramento CC.

5.2.4. Condensadores de Saída do Conversor CC-CC

Para o conversor CC-CC foram selecionados um condensador eletrolítico de $220 \mu\text{F}$ e dois condensadores de polipropileno de 400 nF cada. Estes foram ligados em paralelo de forma a obter um valor de capacidade de $300 \mu\text{F}$, Figura 5.7.



Figura 5.7 - Condensadores de saída do conversor CC-CC.

5.2.5. Indutância do conversor CA-CC

A indutância utilizada para o conversor CA-CC é uma indutância de 5 mH . Neste conversor foi utilizada uma indutância que já se encontrava no GEPE, Figura 5.8. Esta indutância possui 1 mH entre os terminais 1 e 2, 3 mH entre os terminais 1 e 3 e 5 mH entre os terminais 1 e 4.



Figura 5.8 - Indutância do conversor CA-CC.

5.2.6. Indutância do conversor CC-CC

Para o conversor CC-CC, foi utilizada uma indutância de $300 \mu\text{H}$ com núcleo de ferrite, Figura 5.9.

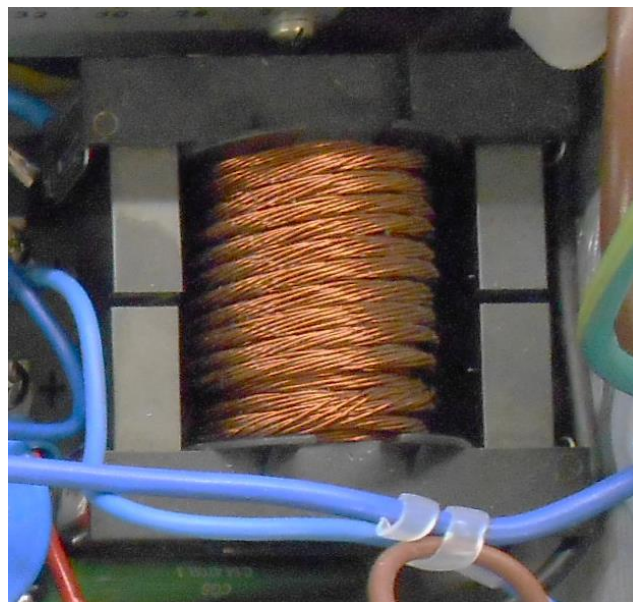


Figura 5.9 - Indutância do conversor CC-CC

5.2.7. Pré-Carga e Proteções

O acoplamento do conversor CA-CC à rede elétrica é feito através do circuito de pré-carga composto por um relé em série com uma resistência, e outro relé em paralelo

com esta à entrada do conversor. O primeiro relé liga a resistência à entrada do conversor, de forma a amortecer o pico de corrente inicial até os condensadores se encontrarem carregados. Uma vez que os condensadores estão carregados o segundo relé faz um *bypass* á resistência, e o caminho da corrente passa a ser feito por este. Ambos os relés utilizados foram o *RX314012C* Figura 5.10, na Figura 5.11 é possível observar o esquemático da pré-carga.



Figura 5.10 - Relés *RX314012C* da *Tyco*.

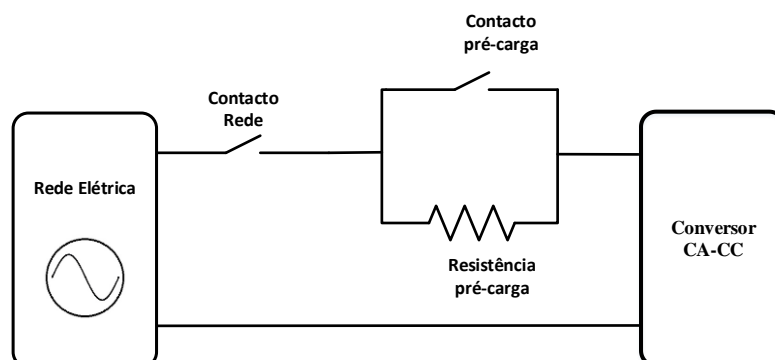


Figura 5.11 – Acoplamento do conversor CA-CC à rede elétrica através do circuito de pré-carga.

5.3. Sistema de Controlo

O sistema de controlo é parte fundamental para o correto funcionamento dos conversores de potência. Para que seja possível aplicar um controlo aos diferentes conversores, é necessário monitorizar variáveis necessárias a este, como a tensão e a corrente. Para isso são utilizados sensores para fazer aquisição dessas variáveis, estas por sua vez são convertidas de sinais contínuos no tempo em sinais discretos através do ADC interno do *Digital Signal Controller* (DSC) e através deste é possível aplicar o controlo aos conversores.

5.3.1. Digital Signal Controller

Para implementar os algoritmos de controlo foi utilizado um *Digital Signal Controller* (DSC) *TMS320F28335* da *Texas Instruments* [82]. Este DSC possui as seguintes características:

- CPU de 32-bit com uma frequência de relógio máxima de 150 MHz;
- Memória *on-chip flash* 16-bit com 256K;
- SRAM 16-bit com 34K;
- 18 saídas de PWM;
- 3 *timers* de 32-bit;
- 16 canais ADC de 12-bit, 80 ns de conversão.

O DSC está incluído na *USB docking station TMDSDOCK28335* [83], esta placa para além de conceber a alimentação do DSC e a ligação deste a um computador através de uma porta USB, para que seja possível implementar o algoritmo de controlo ao DSC, possui ainda:

- 100 pinos DIMM para interface;
- *Jumpers* para configuração do *boot*;
- Fornecimento de 3.3 e 5 V;
- Conector para alimentação externa +5 V.

Na Figura 5.12 é apresentado o DSC *TMS320F28335* inserido na *USB docking station TMDSDOCK28335*.



Figura 5.12 - DSC *TMS320F28335* inserido na *USB docking station TMDSDOCK28335*.

Para programar o DSC foi utilizado o ambiente de desenvolvimento integrado *Code Composer Studio 5.5* disponibilizado pela *Texas*. Através deste programa é possível escrever o algoritmo de controlo em linguagem C, este disponibiliza diversas bibliotecas

para o DSC utilizado. Na Figura 5.13 é possível ver o ambiente de desenvolvimento integrado do *Code Composer Studio 5.5*.

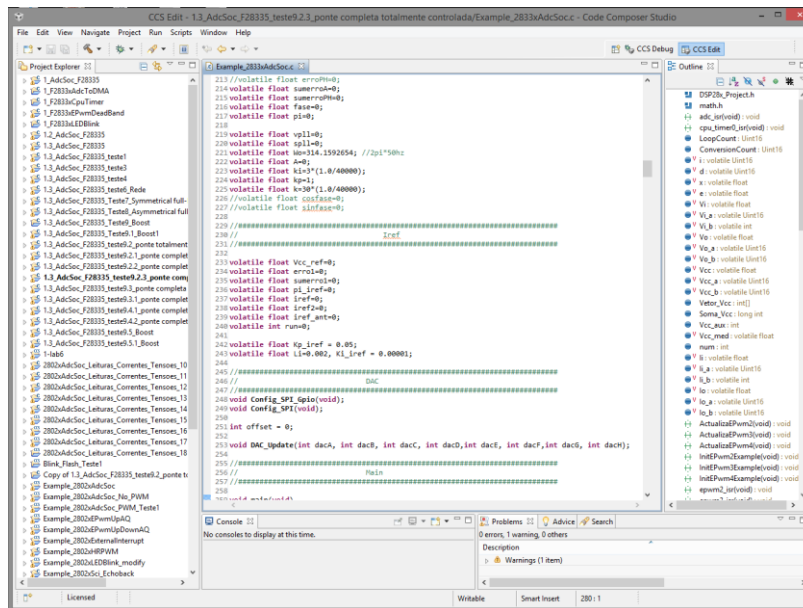


Figura 5.13 - Ambiente de desenvolvimento integrado do *Code Composer Studio 5.5*.

5.3.2. Sensores de Tensão de Efeito Hall

Para que o sistema de controle funcione corretamente, este necessita de saber quais os valores instantâneos da tensão da rede, da tensão do barramento CC e da tensão de saída do conversor CC-CC. Para tal, é necessário utilizar sensores de tensão. Neste sistema de carregamento de baterias foram utilizados três sensores de efeito *hall* *CYHV025A* para fazer a medição dos valores de tensão mencionados anteriormente, Figura 5.14.

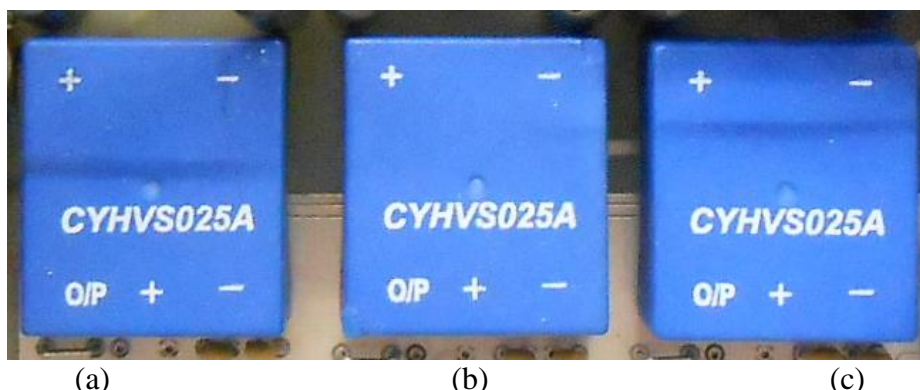


Figura 5.14 - Sensores de tensão de efeito *hall* *CYHV025A*: (a) Sensor de tensão do barramento; (b) sensor de tensão de entrada; (c) Sensor de tensão de saída do conversor CC-CC.

Para este sistema de carregamento de baterias foram utilizados dois sensores de corrente de efeito *hall LA 100-P*, Figura 5.16, para fazer a medição dos valores de corrente à entrada do conversor CA-CC e na saída do conversor CC-CC. Estes podem medir corrente nominal até 100 A [85].

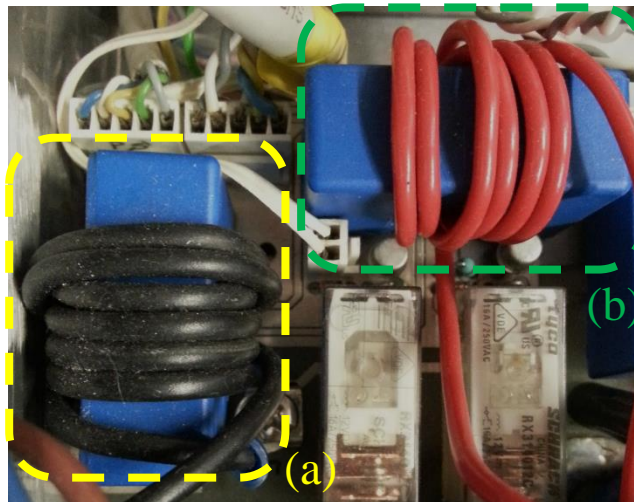


Figura 5.16 - Sensores de corrente de efeito *hall LA 100-P*: (a) Sensor de corrente à entrada do conversor CA-CC; (b) Sensor à saída do conversor CC-CC.

Na Figura 5.17 é apresentado o esquema de ligações do sensor de corrente, em que R_m é a resistência de medida, esta deve ser calculada entre a gama de valores indicada no *datasheet* do sensor e de modo a que o valor da tensão de saída V_m não seja superior ao valor de tensão máxima suportado pelo ADC interno do DSC, I_s é a corrente eficaz no secundário. Os condensadores de desacoplamento têm como função filtrar eventuais ruídos que possam surgir na alimentação do sensor.

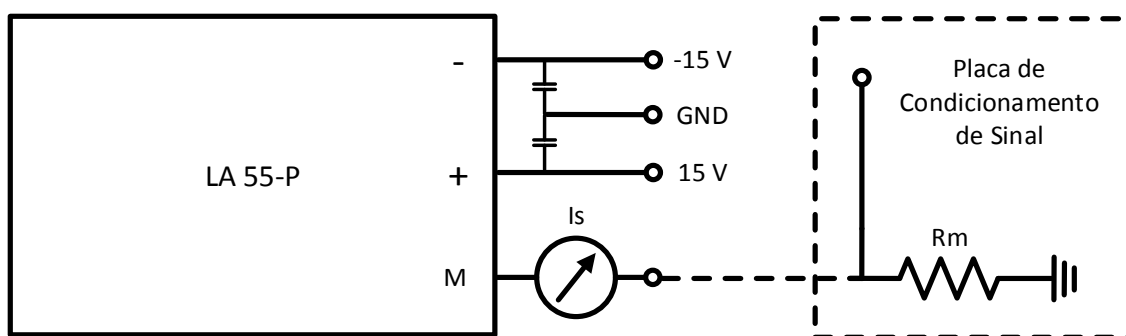


Figura 5.17 - Esquemático de ligações do sensor de corrente de efeito *hall LA 55-P*.

Através das equações (5.4) e (5.5) é possível dimensionar a resistência de medida R_m .

$$I_s = \frac{I_p}{1000} \tag{5.4}$$

$$V_m = I_s R_m \quad (5.5)$$

5.3.4. Placa de Condicionamento de Sinal e Placa de Comando

Como já referido, os sensores permitem medir os valores instantâneos das correntes e das tensões necessárias para efetuar o controlo do sistema de carregamento. A placa de condicionamento de sinal contém as resistências de medida dos sensores de tensão e corrente anteriormente mencionadas. Uma vez que a saída dos sensores comporta-se como uma fonte de corrente, de maneira a evitar ruídos externos ao conversor, os sinais são convertidos em tensão na placa de condicionamento de sinal e de seguida são convertidos em valores digitais pelos ADCs internos do DSC.

Esta placa contém ainda uma montagem amplificadora inversora por canal, caso a tensão de saída do amplificador ultrapasse um determinado valor entre ± 15 V, é enviado um sinal através do opto acoplador que permite desligar o sistema (erro). Para que esse estado desligado seja memorizado, é utilizado um NE555 que apesar de ser um timer, é aqui utilizado para memorizar esse estado até que seja efetuado o *reset*. As montagens amplificadoras inversoras utilizam comparadores LM358 [86][87][88]. O valor de comparação é dado por um divisor de tensão. O LM339 contém quatro comparadores e o LM358 contém dois amplificadores operacionais no seu interior.

A placa de comando contém o circuito que eleva a tensão do PWM à saída do DSC para os valores necessários ao correto funcionamento dos *drivers*. Nesta placa está também implementada uma proteção que permite ativar e desativar o envio dos sinais de PWM para a placa de *drive*. Para isso são utilizadas portas lógicas AND CD4081B, que têm nas suas entradas o sinal de *enable/disable* e o sinal de PWM [89]. Caso o sinal esteja *disable* (zero), vamos ter zero na saída da porta lógica AND, caso o sinal esteja *enable* (um), vamos ter o valor do sinal de PWM na saída da porta lógica AND.

Tanto a placa de condicionamento de sinal como a placa de comando encontram-se implementadas no mesmo circuito impresso, Figura 5.18.

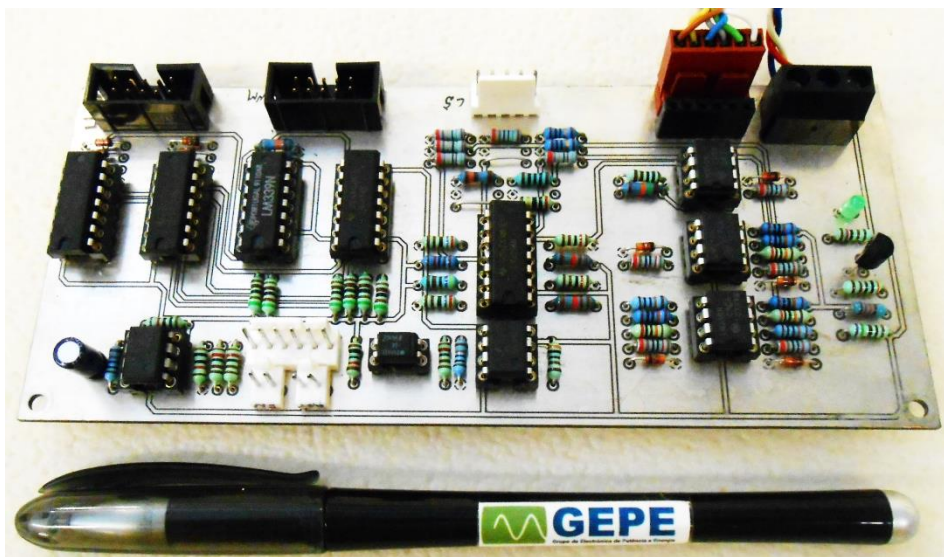


Figura 5.18 - Placa de condicionamento de sinal e placa de comando

5.3.5. Placa de *Drive*

A placa de *drive* tem como função fazer o isolamento entre o circuito de potência e o sistema de controle. Esta é composta por seis circuitos isolados de *driver*, um para cada semicondutor de potência. Cada circuito isolado utiliza um *optocoupler HCPL-3120* fabricado pela *Avago Technologies* os quais permitem um isolamento ótico de $630 V_{\text{pico}}$ entre o primário e o secundário. Para acionar o semicondutor de potência no secundário, o *optocoupler* necessita de uma corrente nominal de 10 a 16 mA no primário [90]. O secundário é alimentado por uma fonte comutada isolada, que por sua vez é alimentada através da tensão de entrada da placa de *drive*. A fonte comutada isolada alimenta o secundário do *optocoupler* de forma isolada da tensão de entrada da placa de *drive*. As fontes utilizadas para alimentar cada *optocoupler* têm a referência *NMV1215SA* fabricadas pela *C&D Technologies*, esta possuem um isolamento de 3000 V entre o primário e o secundário [91].

Na Figura 5.19 está apresentado o esquemático do *optocoupler HCPL-3120* e na Figura 5.20 está apresentada a placa de *drive*.

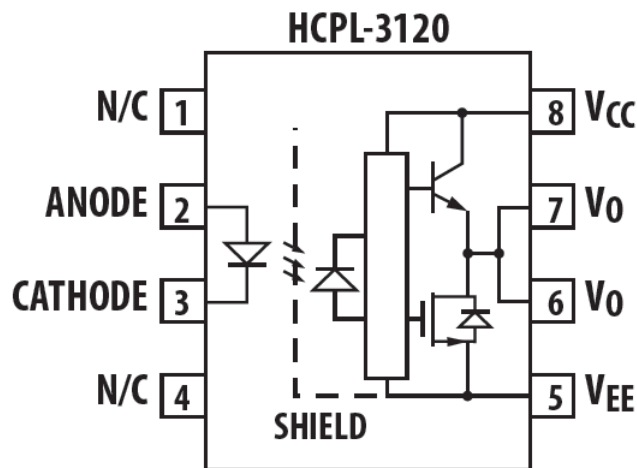


Figura 5.19 - Esquemático do opto acoplador *HCPL-3120* [90].

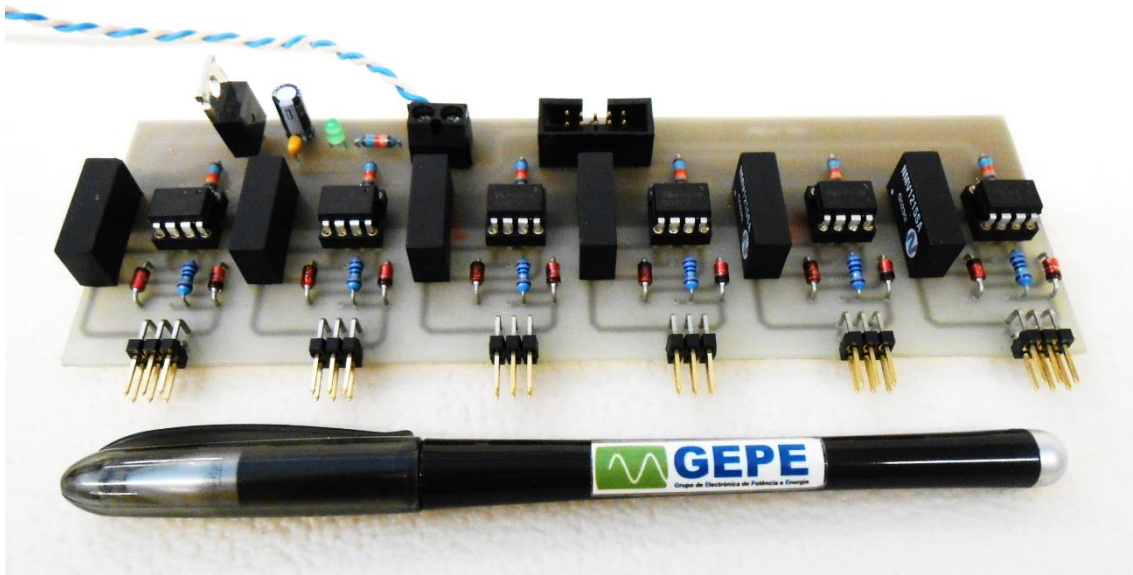


Figura 5.20 - Placa de *drive*.

5.3.6. Placa de DAC

Durante o desenvolvimento do sistema de controlo é importante visualizar a evolução de algumas variáveis internas do DSC. Para tal foi utilizado um conversor digital-analógico (DAC) que faz o interface entre o DSC e um osciloscópio.

Na Figura 5.21 é apresentada uma placa DAC desenvolvida pelo GEPE, esta possui 8 canais de saída com 12 bit de resolução, ou seja, é possível observar em simultâneo até 8 variáveis com esta placa, esta é compatível com o módulo SPI dos DSC da família *TMS320*.

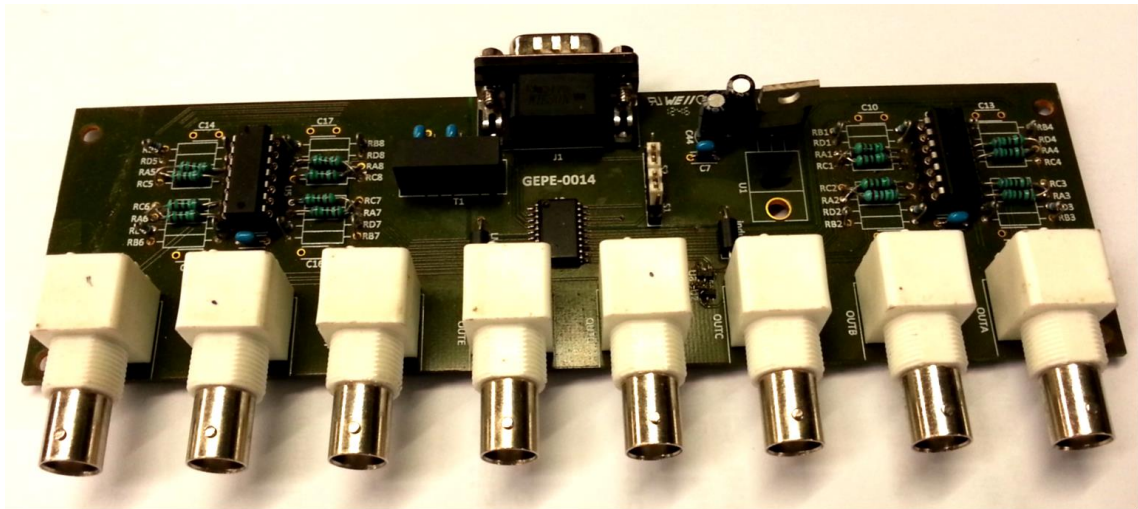


Figura 5.21 - Placa de DAC.

5.4. Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os diferentes componentes constituintes do Carregador de Baterias com Correção do Fator de Potência para Utilização *On-Board* de Veículo Elétrico.

Começou-se por apresentar os componentes constituintes do circuito de potência, os IGBTs, o dissipador térmico, os condensadores do barramento CC, os condensadores de saída do conversor CC-CC, a indutância do conversor CA-CC, a indutância do conversor CC-CC e os relés de pré-carga. Depois são apresentados os elementos constituintes do sistema de controlo, o DSC, os sensores de tensão e de corrente, a placa de condicionamento de sinal e a placa de comando, a placa de *drive* e a placa de DAC.

Na Figura 5.22 é apresentado o aspeto final do sistema de carregamento com todos os elementos do circuito de potência e sistema de controlo.

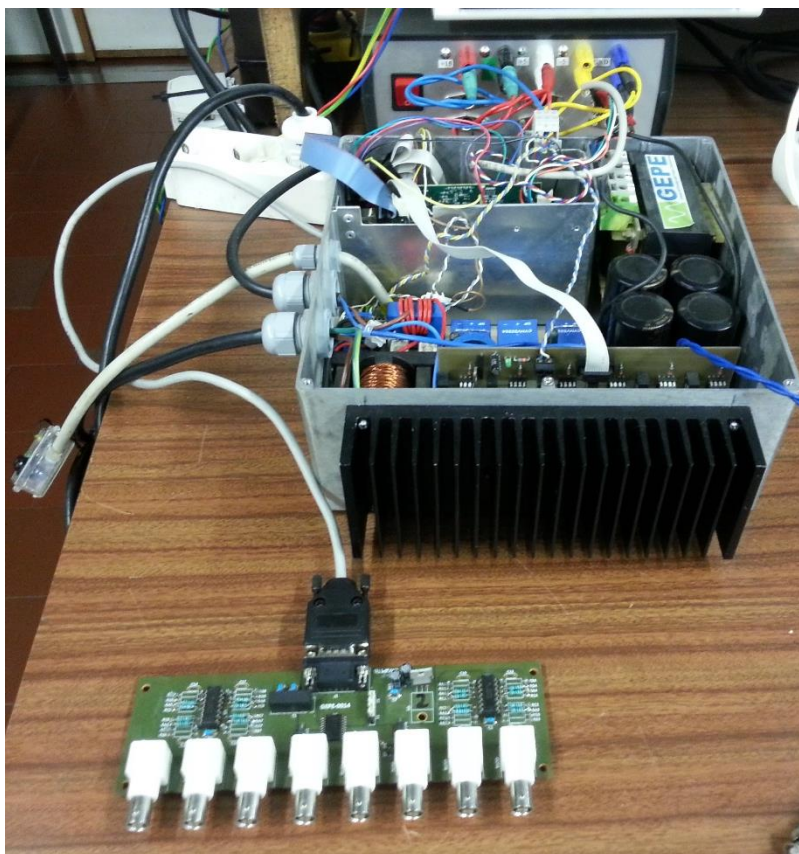


Figura 5.22 - Aspeto final do sistema de carregamento de baterias *on-board*.

CAPÍTULO 6

Resultados Experimentais

6.1. Introdução

Neste capítulo estão apresentados os resultados experimentais obtidos durante os testes realizados ao Carregador de Baterias com Correção do Fator de Potência para Utilização *On-Board* em Veículo Elétrico.

Os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos utilizando um osciloscópio digital *TPS 2024* da *Tektronix*.

Para realizar os testes às diferentes topologias do conversor CA-CC foi utilizado um *variatic* de forma a se poder obter uma tensão sinusoidal com uma amplitude inferior à da rede elétrica. Na Figura 6.1 encontra-se uma foto da bancada de trabalho onde os testes foram realizados.

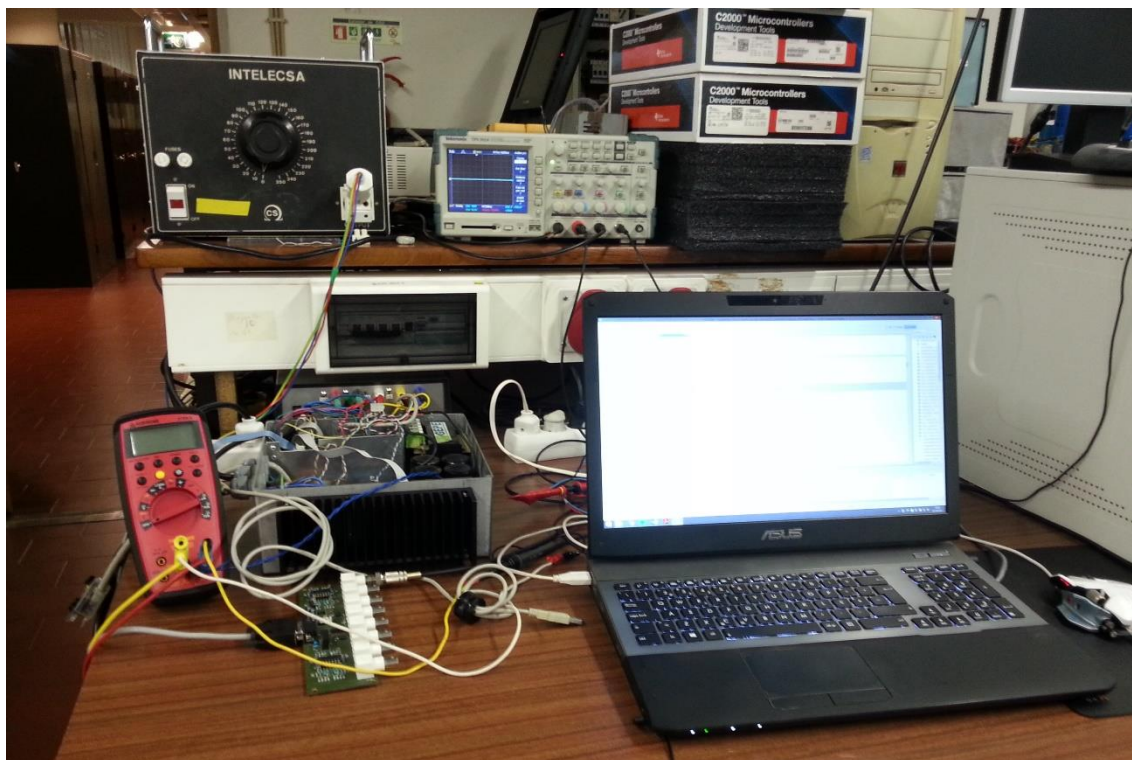


Figura 6.1 - Bancada de Trabalho.

6.2. Sincronização com a Rede Elétrica Utilizando uma PLL

Na Figura 6.2 são apresentados os resultados da PLL implementada de acordo com o código utilizado nas simulações. Através da utilização da placa DAC é possível observar que o sinal sinusoidal gerado pelo algoritmo da PLL está sincronizado com a fase do sinal da tensão da rede elétrica.

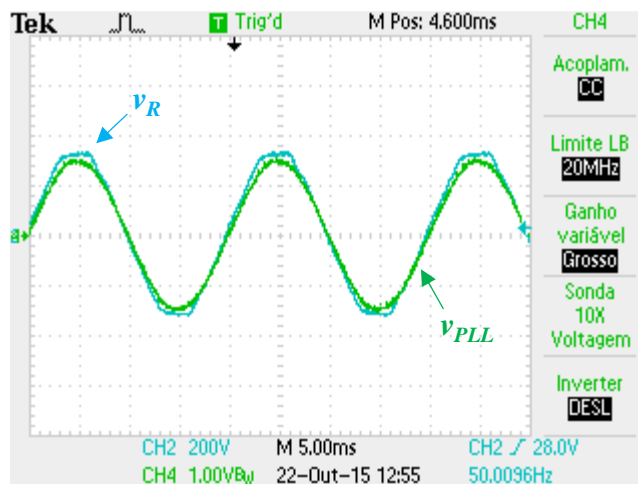


Figura 6.2 - Sinal da PLL em fase com a tensão da rede.

6.3. Pré-Carga e Regulação do Barramento CC

Na Figura 6.3 é apresentada a tensão no barramento CC, inicialmente é fechado o contacto de ligação à rede, o barramento CC começa a ser carregado devido à resistência de pré-carga colocada à entrada do conversor de forma a amortecer o pico de corrente inicial criado pelo banco de condensadores. Uma vez que a tensão no barramento CC estabiliza é ligado o contacto de pré-carga que faz um *bypass* à resistência de pré-carga, o caminho da corrente passa a ser feito por este. Por fim, é iniciada a regulação do barramento CC através do interruptor *enable* da placa de comando, que habilita as comutações permitindo que o controlo seja aplicado ao conversor.

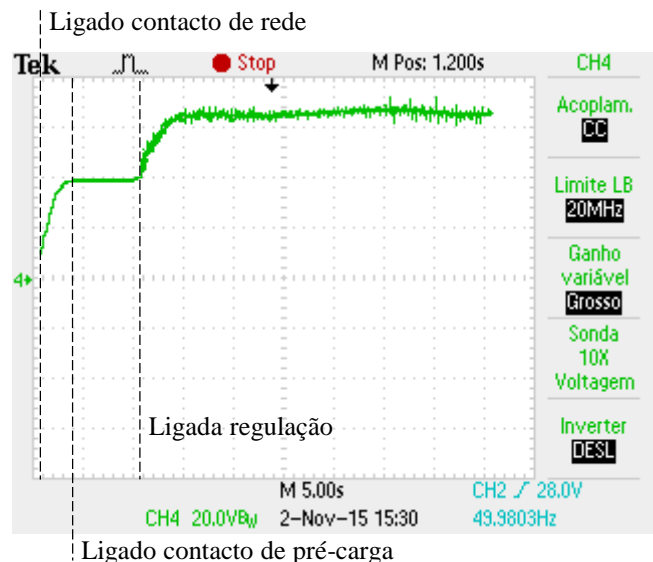


Figura 6.3 - Pré-carga e regulação da tensão do barramento CC.

6.4. Ensaio dos Conversores CA-CC

Como já mencionado, o sistema de carregamento monofásico *on-board* utilizado nesta dissertação é composto por um conversor CA-CC *full-bridge* totalmente controlado, Figura 6.4. Através do controlo digital aplicado a este conversor, foi possível obter outras topologias de conversores CA-CC. Para realizar estes ensaios foi colocada uma carga de 52Ω à saída do barramento CC.

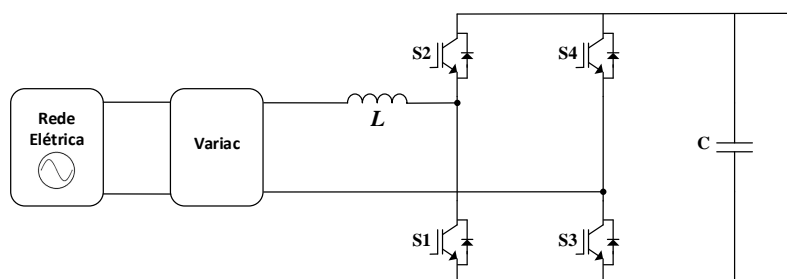


Figura 6.4 - Conversor CA-CC *full-bridge* totalmente controlado.

6.4.1. Ensaio do Conversor CA-CC *Full-Bridge* Não Controlado

Quando os IGBTs não se encontram a comutar, ou seja, quando não é aplicado o controlo digital ao conversor da Figura 6.4, a corrente flui apenas pelos díodos em antiparalelo dos IGBTs obtendo-se assim um conversor CA-CC *full-bridge* não controlado representado na Figura 6.5.

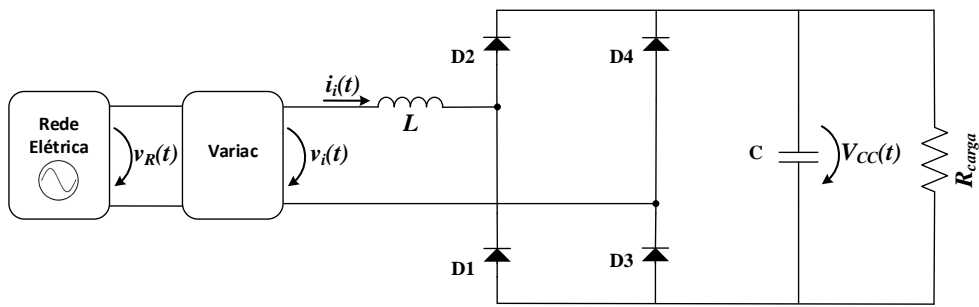


Figura 6.5 - Conversor CA-CC full-bridge não controlado.

Na Figura 6.6 é possível observar a tensão da rede elétrica (v_R), a corrente de entrada (i_i) e a tensão no barramento CC (V_{CC}). A tensão V_{CC} tem um valor médio de 100 V, a tensão de saída do *variac* (v_i) é de aproximadamente 50 V eficaz e a corrente i_i é de 2,9 A eficaz. Tal como esperado, a corrente i_i não é sinusoidal.

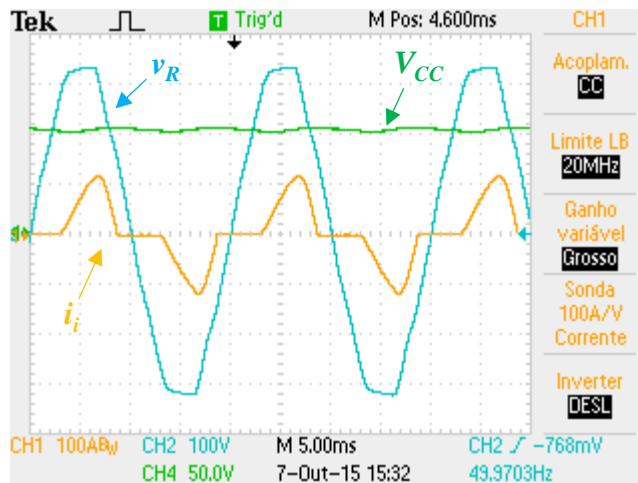


Figura 6.6 - Tensão da rede elétrica (v_R), corrente de entrada (i_i) e tensão no barramento CC (V_{CC}).

Na Figura 6.7 (a) verifica-se que o THD_i é de 56,5% para o qual contribuem os elevados valores dos harmónicos de 3^a, 5^a e 7^a ordem. Na Figura 6.7 (b) observa-se que para um desfasamento de 34,62° o fator de potência é de 0,82.

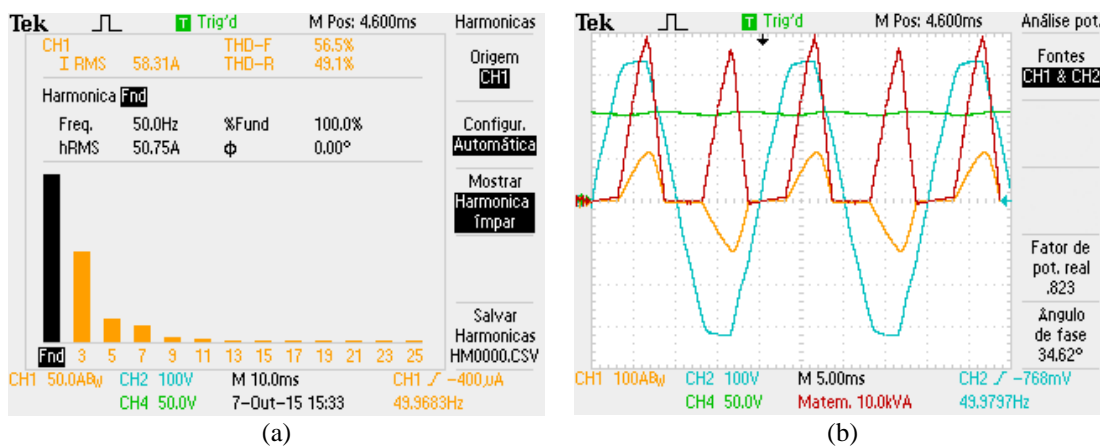


Figura 6.7 - Análise dos harmónicos e THD_i e do fator de potência: (a) Harmónicos e THD_i da corrente de entrada (i_i); (b) Fator de potência e ângulo de desfasamento entre v_R e i_i .

6.4.2. Ensaio do Conversor CA-CC Boost

De maneira a que fosse possível obter um conversor CA-CC *boost*, foi colocada uma ponte retificadora não controlada entre o *variac* e o conversor da Figura 6.4. De seguida foi aplicado o controlo digital para que apenas o IGBT *S1* entrasse em comutação, Figura 6.8.

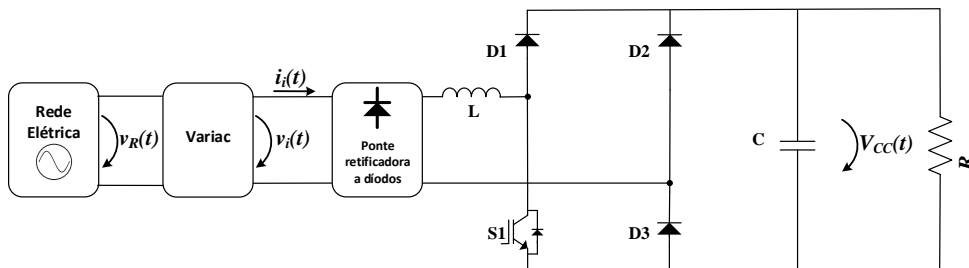


Figura 6.8 - Conversor CA-CC *boost*.

Na Figura 6.9 é possível observar a tensão da rede elétrica (v_R), a corrente de entrada (i_i) e a tensão no barramento CC (V_{CC}). A tensão V_{CC} tem um valor médio de 100 V, a tensão de saída do *variac* (v_i) é de aproximadamente 50 V eficaz e a corrente i_i é de 4,16 A eficaz. Observa-se que a corrente i_i é sinusoidal e em fase com v_R , como pretendido.

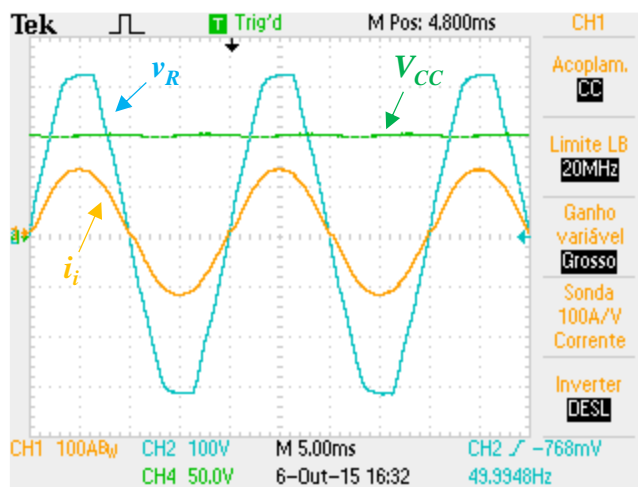


Figura 6.9 - Tensão da rede elétrica (v_R), corrente de entrada (i_i) e tensão no barramento CC (V_{CC}).

Na Figura 6.10 (a) verifica-se que o THD_i é de 3,25% existindo apenas harmónicos de 3ª e 5ª ordem com uma magnitude residual. Na Figura 6.10 (b) observa-se que para um desfasamento de 2,91° o fator de potência é de 0,99.

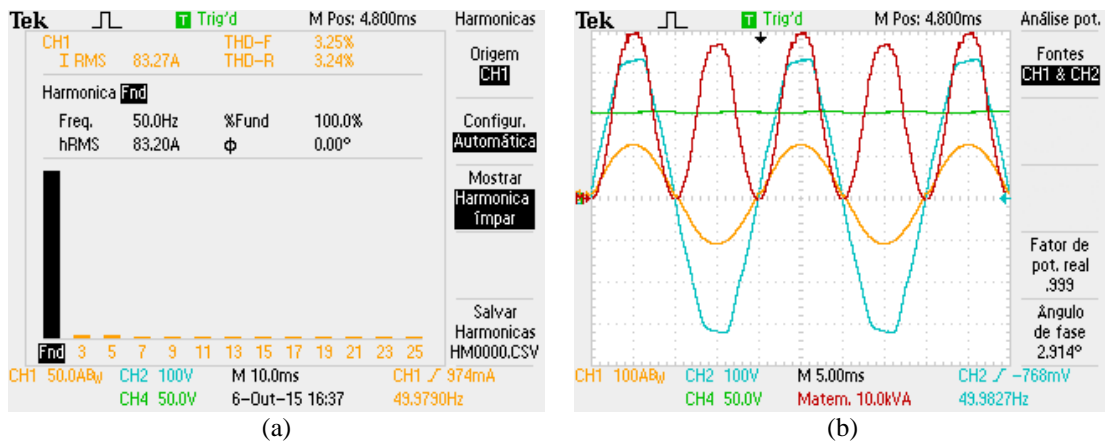


Figura 6.10 - Análise dos harmónicos e THD_i e do fator de potência: (a) Harmónicos e THD_i da corrente de entrada (i_i); (b) Fator de potência e ângulo de desfasamento entre v_R e i_i .

6.4.3. Ensaio do Conversor CA-CC *Full-Bridge* Semicontrolado Simétrico

De forma obter um conversor CA-CC *full-bridge* semicontrolado simétrico do conversor da Figura 6.4, foi aplicado o controlo digital para que apenas os IGBTs $S1$ e $S3$ entrassem em comutação, Figura 6.11.

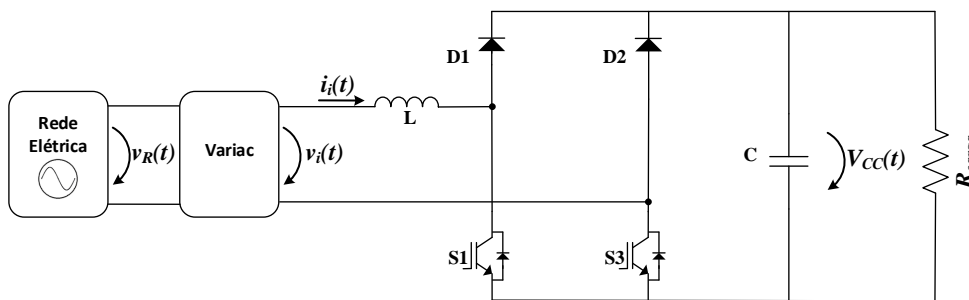


Figura 6.11 - Conversor CA-CC *full-bridge* semicontrolado simétrico.

Na Figura 6.12 é possível observar a tensão da rede elétrica (v_R), a corrente de entrada (i_i) e a tensão no barramento CC (V_{CC}). A tensão V_{CC} tem um valor médio de 100 V, a tensão de saída do *variac* (v_i) é de aproximadamente 50 V eficaz e a corrente i_i é de 4,34 A eficaz. Observa-se que a corrente i_i é sinusoidal e em fase com v_R , como pretendido.

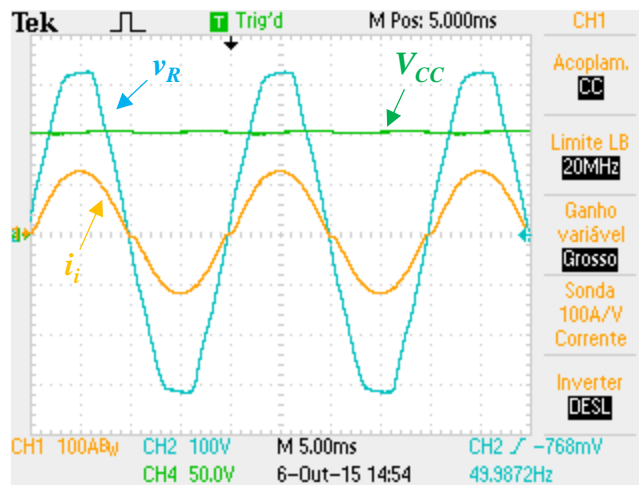


Figura 6.12 - Tensão da rede elétrica (v_R), corrente de entrada (i_i) e tensão no barramento CC (V_{CC}).

Na Figura 6.13 (a) verifica-se que o THD_i é de 5,88% existindo apenas harmónicos de 3ª e 5ª ordem com uma magnitude residual. Na Figura 6.13 (b) observa-se que para um desfasamento de $4,98^\circ$ o fator de potência é de 0.99.

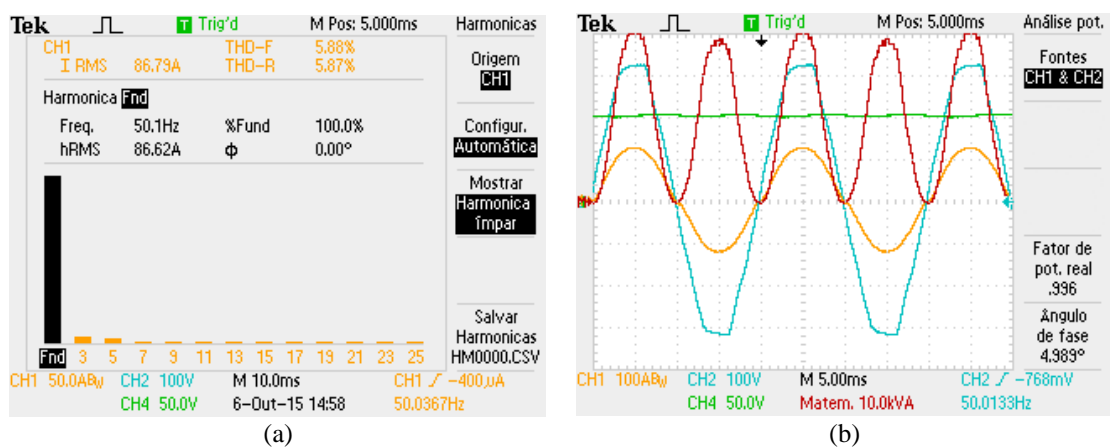


Figura 6.13 - Análise dos harmónicos e THD_i e do fator de potência: (a) Harmónicos e THD_i da corrente de entrada (i_i); (b) Fator de potência e ângulo de desfasamento entre v_R e i_i .

6.4.4. Ensaio do Conversor CA-CC Full-Bridge Semicontrolado Assimétrico

De forma obter um conversor CA-CC *full-bridge* semicontrolado assimétrico do conversor da Figura 6.4, foi aplicado o controlo digital para que apenas os IGBTs $S1$ e $S2$ entrassem em comutação, Figura 6.14.

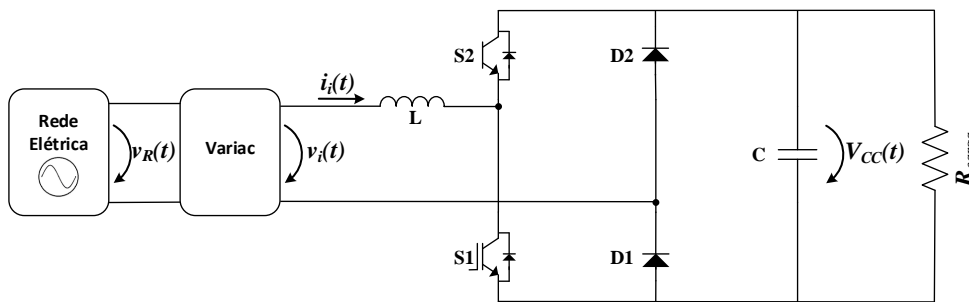


Figura 6.14 - Conversor CA-CC *full-bridge* semicontrolado assimétrico.

Na Figura 6.15 é possível observar a tensão da rede elétrica (v_R), a corrente de entrada (i_i) e a tensão no barramento CC (V_{CC}). A tensão V_{CC} tem um valor médio de 100 V, a tensão de saída do *variatic* (v_i) é de aproximadamente 50 V eficaz e a corrente i_i é de 4,40 A eficaz. Observa-se que a corrente i_i é sinusoidal e em fase com v_R , como pretendido.

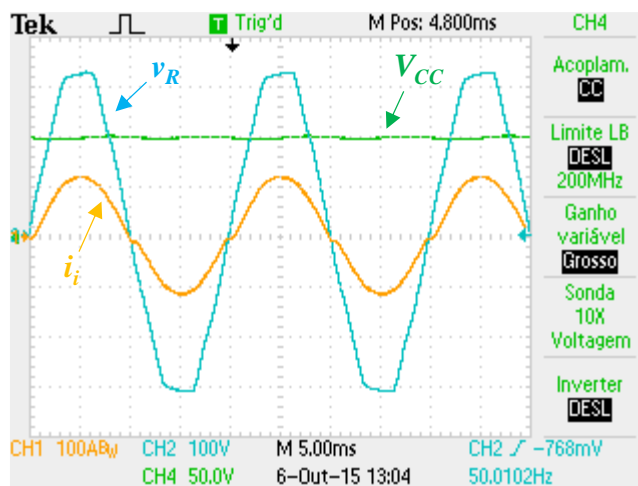


Figura 6.15 - Tensão da rede elétrica (v_R), corrente de entrada (i_i) e tensão no barramento CC (V_{CC}).

Na Figura 6.16 (a) verifica-se que o THD_i é de 5,98% existindo apenas harmónicos de 3ª e 5ª ordem com uma magnitude residual. Na Figura 6.16 (b) observa-se que para um desfasamento de 5,18° o fator de potência é de 0.99.

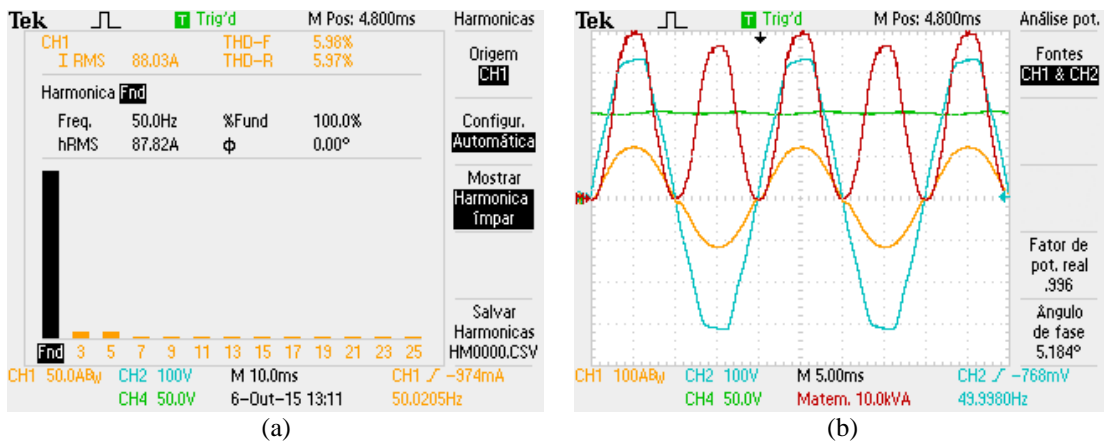


Figura 6.16 - Análise dos harmônicos e THD_i e do fator de potência: (a) Harmônicos e THD_i da corrente de entrada (i_i); (b) Fator de potência e ângulo de desfasamento entre v_R e i_i .

6.4.5. Ensaio do Conversor CA-CC *Full-Bridge* Totalmente Controlado

Por fim, foi realizado o ensaio ao próprio conversor CA-CC *full-bridge* totalmente controlado, Figura 6.17.

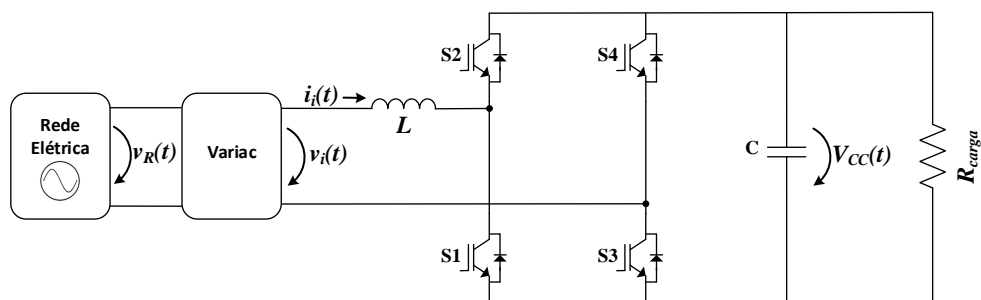


Figura 6.17 - Conversor CA-CC *full-bridge* totalmente controlado.

Na Figura 6.18 é possível observar a tensão da rede elétrica (v_R), a corrente de entrada (i_i) e a tensão no barramento CC (V_{CC}). A tensão V_{CC} tem um valor médio de 100 V, a tensão de saída do *variac* (v_i) é de aproximadamente 50 V eficaz e a corrente i_i é de 4,58 A eficaz. Observa-se que a corrente i_i é sinusoidal e em fase com v_R , como pretendido.

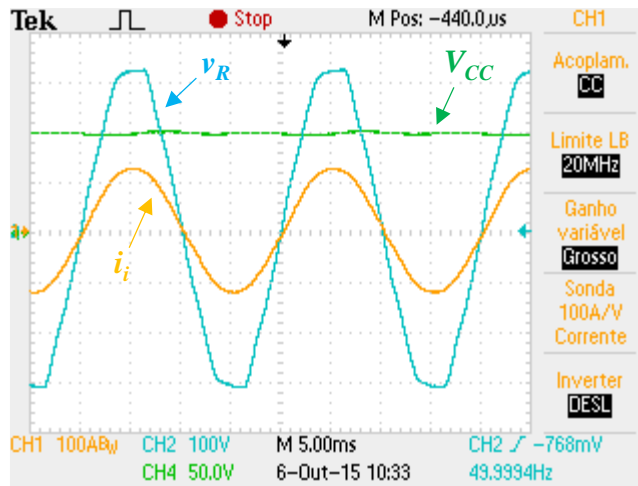


Figura 6.18 - Tensão da rede elétrica (v_R), corrente de entrada (i_i) e tensão no barramento CC (V_{CC}).

Na Figura 6.19 (a) verifica-se que o THD_i é de 2,13%. Na Figura 6.19 (b) observa-se que para um desfasamento de $2,91^\circ$ o fator de potência é de 0.99.

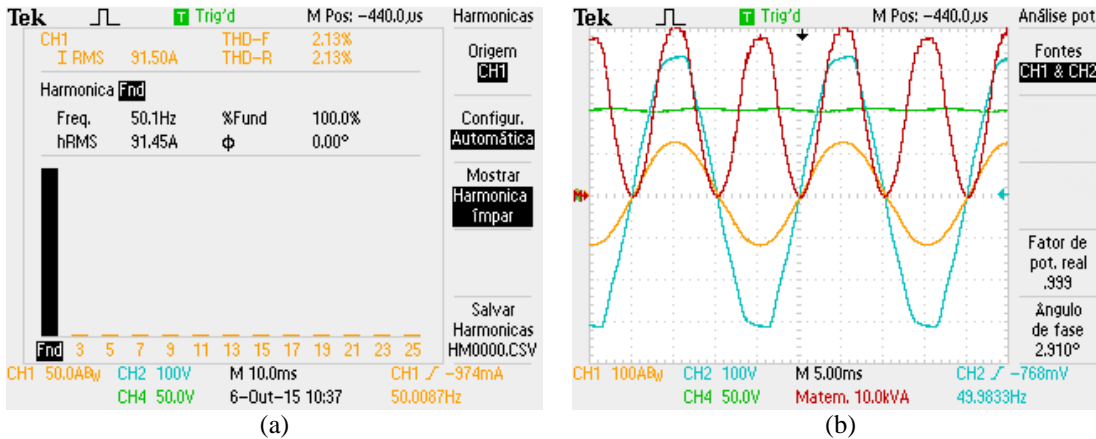


Figura 6.19 - Análise dos harmónicos e THD_i e do fator de potência: (a) Harmónicos e THD_i da corrente de entrada (i_i); (b) Fator de potência e ângulo de desfasamento entre v_R e i_i .

6.5. Comparação dos Conversores CA-CC

Uma vez realizados os ensaios aos diferentes conversores, foi feita uma comparação dos seus valores de THD_i e fator de potência.

Os ensaios dos conversores foram realizados de acordo com as características apresentadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Características dos ensaios.

Característica	Valor	Unidade
Frequência comutação	20	kHz
Frequência amostragem	40	kHz
Tensão de entrada	50	V
Tensão do Barramento CC	100	V

Na Tabela 6.2 é possível observar os valores de THD_i e fator de potência obtidos nos ensaios dos conversores. Também se verifica que os resultados obtidos não diferem muito do esperado.

Tabela 6.2 - Valores de THD_i e FP obtidos nos ensaios dos diferentes conversores.

Conversor CA-CC	$THD_i\%$	FP
<i>Boost</i>	3,25 %	0,99
<i>Full-bridge</i> semicontrolado simétrico	5,88 %	0,99
<i>Full-bridge</i> semicontrolado assimétrico	5,98 %	0,99
<i>Full-bridge</i>	2,13 %	0,99

6.6. Ensaio do Conversor CC-CC

Como já mencionado, o sistema de carregamento monofásico *on-board* utilizado nesta dissertação é composto por um conversor CC-CC *buck-boost* bidirecional, Figura 6.20, que permite operar no modo bidirecional.

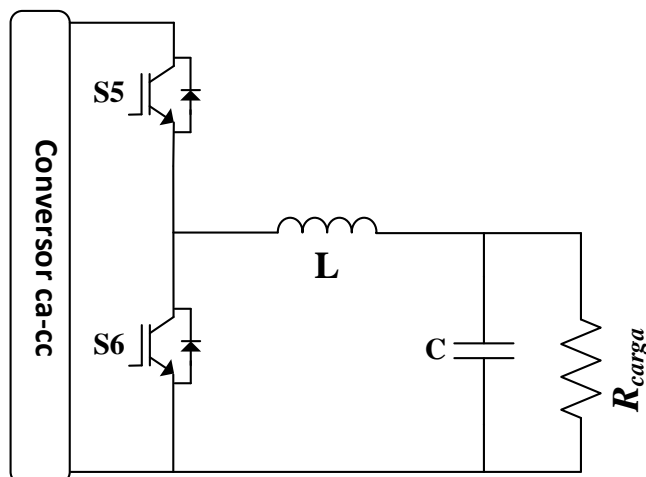


Figura 6.20 - Conversor CC-CC *buck-boost*.

Uma vez que apenas se pretende operar no modo unidirecional, foi aplicado o controlo digital para que apenas o IGBT *S5* entrasse em comutação, obtendo-se assim um conversor CC-CC *buck*, Figura 6.21.

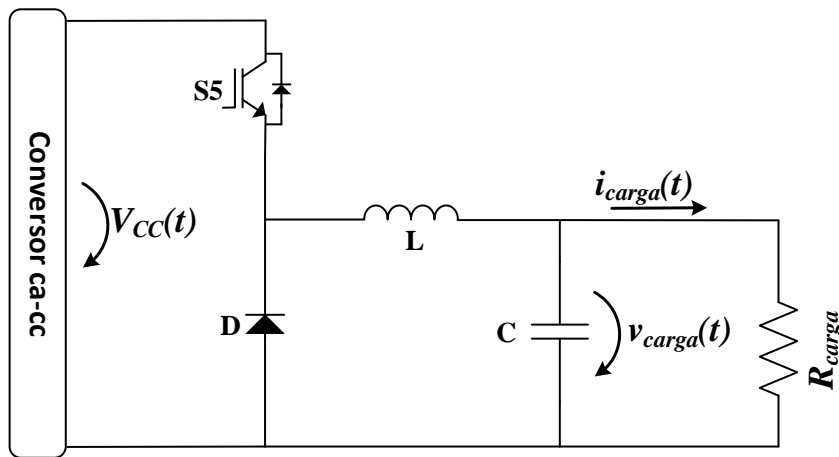


Figura 6.21 - Conversor CC-CC buck.

Na Figura 6.22 (a) é possível observar a tensão no barramento CC (V_{CC}), a tensão na carga (v_{carga}) e a corrente na carga (i_{carga}) dos ensaios realizados para uma corrente de referência de 2 A e com uma resistência de 5,2 Ω na saída do conversor CC-CC. Na Figura 6.22 (a) são apresentados os resultados onde V_{CC} tem um valor médio de 40 V, v_{carga} é aproximadamente 12,5 V e i_{carga} tem o valor de 2 A. Na Figura 6.22 (b) é possível verificar que para um V_{CC} com um valor médio de 60 V, o valor de v_{carga} e i_{carga} mantém-se. Comprovando o correto funcionamento do controlo de corrente constante aplicado a este conversor.

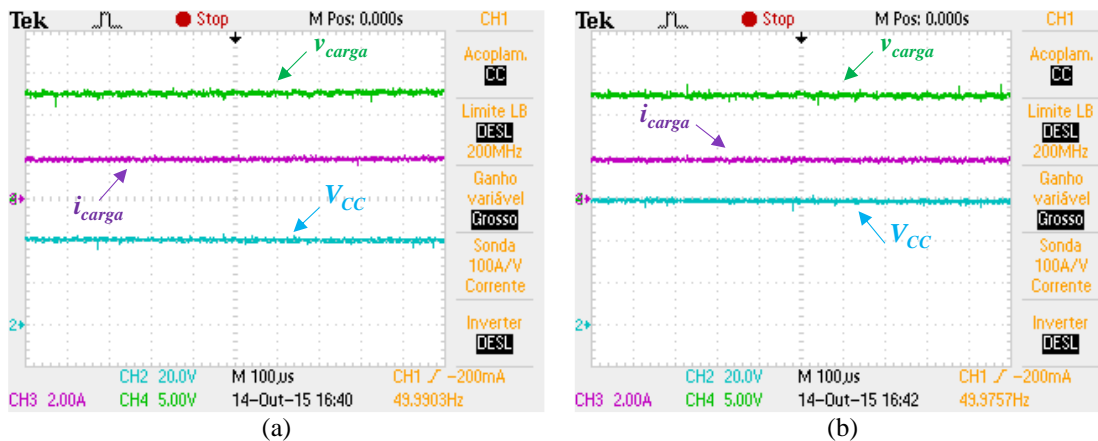


Figura 6.22 - Tensão no barramento CC (V_{CC}), tensão na carga (v_{carga}), corrente na carga (i_{carga}): (a) Para $V_{CC} = 40$ V; (b) Para $V_{CC} = 60$ V.

Na Figura 6.23 (a) é possível observar a tensão no barramento CC (V_{CC}), a tensão na carga (v_{carga}) e a corrente na carga (i_{carga}) dos ensaios realizados para uma corrente de referência de 4 A e com uma resistência de 5,2 Ω na saída do conversor CC-CC. Na Figura 6.23 (a) são apresentados os resultados onde V_{CC} tem um valor médio de 40 V, v_{carga} é aproximadamente 20.7 V e i_{carga} tem o valor de 4 A. Na Figura 6.23 (b), para um valor médio de V_{CC} de 60 V verifica-se que o valor de v_{carga} e i_{carga} mantém-se. Comprovando

uma vez mais o correto funcionamento do controlo de corrente constante aplicado a este conversor.

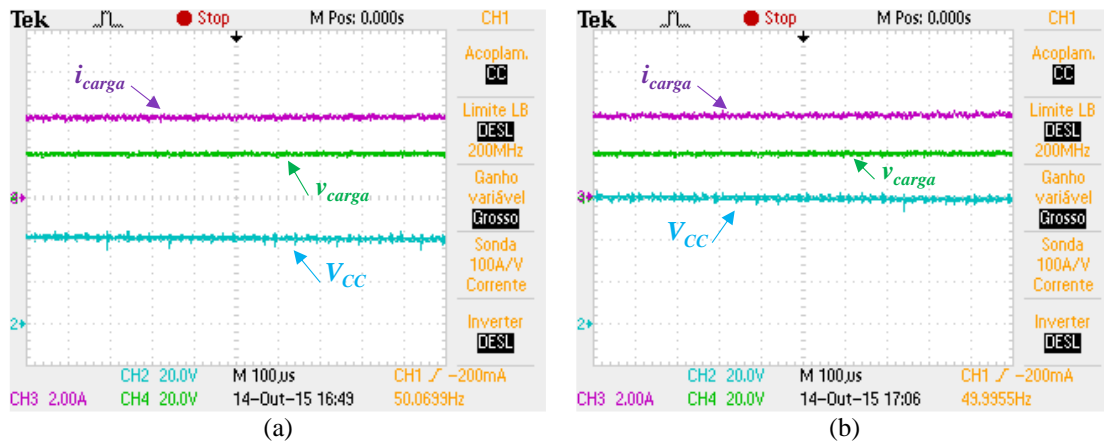


Figura 6.23 - Tensão no barramento CC (V_{CC}), tensão na carga (v_{carga}), corrente na carga (i_{carga}): (a) Para $V_{CC} = 40$ V; (b) Para $V_{CC} = 60$ V.

6.7. Ensaio dos Conversores CA-CC em Conjunto com o Conversor CC-CC

De seguida foram testados os conversores CA-CC em conjunto com o conversor CC-CC. Para estes testes foi utilizado o sistema de controlo de duas malhas dos conversores CA-CC e o sistema de controlo de corrente constante do conversor CC-CC, com a exceção do teste do conversor CA-CC *full-bridge* não controlado em conjunto com o conversor CC-CC buck onde apenas o controlo de corrente constante do conversor CC-CC é aplicado. A referência de corrente para a carga é de 4 A. Na saída do conversor CC-CC foi utilizada uma resistência de carga de 5,2 Ω .

6.7.1. Ensaio do Conversor CA-CC *Full-Bridge* Não Controlado em Conjunto com o Conversor CC-CC *Buck*

Para testar o funcionamento do conversor CA-CC *full-bridge* não controlado em conjunto com o conversor CC-CC *buck* foi utilizado o circuito da Figura 6.24.

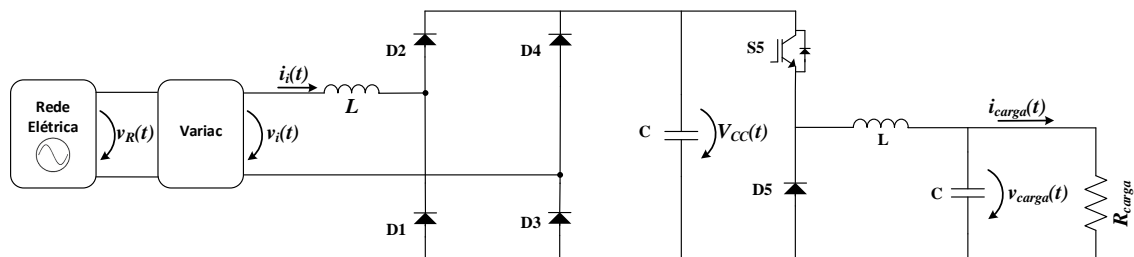


Figura 6.24 - Conversor CA-CC *full-bridge* não controlado em conjunto com o conversor CC-CC *buck*.

Na Figura 6.25 encontra-se os resultados do ensaio efetuado. Como se observa a corrente i_i não é sinusoidal. A corrente na carga i_{carga} segue o valor de referência de 4 A.

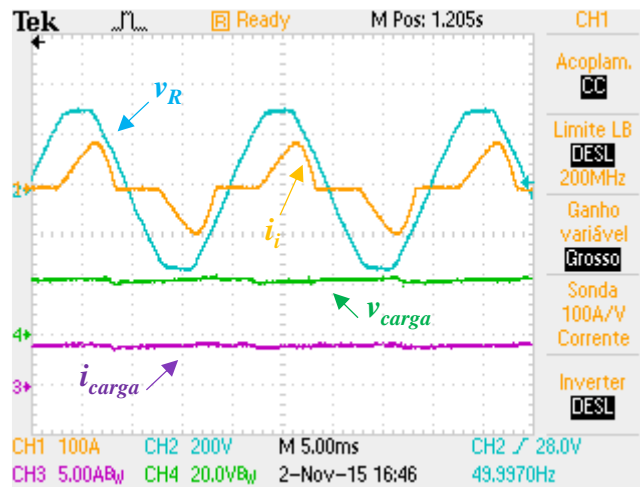


Figura 6.25 - Tensão da rede elétrica (v_R) e corrente de entrada (i_i) do lado CA, tensão na carga (v_{carga}) e corrente na carga (i_{carga}).

Na Figura 6.26 (a) verifica-se que o THD_i é de 38,2%. Na Figura 6.26 (b) observa-se que para um desfaseamento de $35,10^\circ$ o fator de potência é de 0,82.

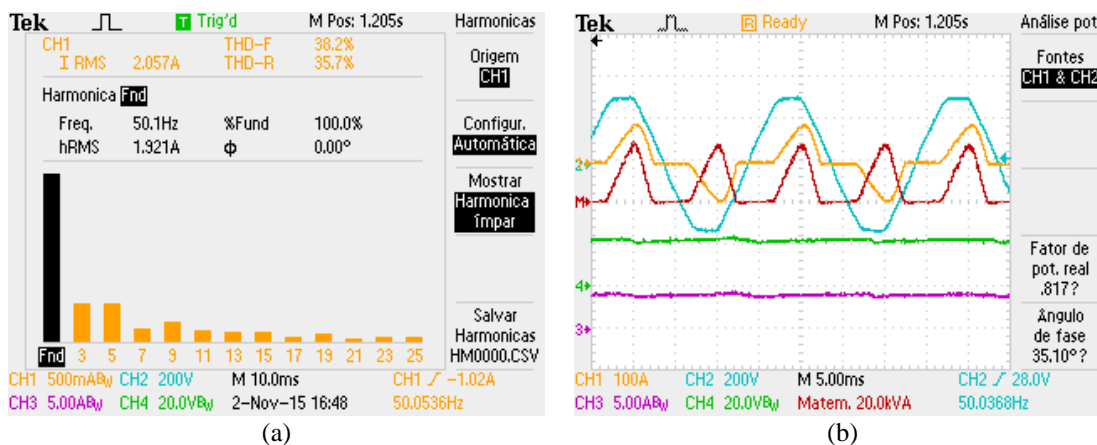


Figura 6.26 - Análise dos harmónicos e THD_i e do fator de potência: (a) Harmónicos e THD_i da corrente de entrada (i_i); (b) Fator de potência e ângulo de desfaseamento entre v_R e i_i .

6.7.2. Ensaio do Conversor CA-CC *Boost* em Conjunto com o Conversor CC-CC *Buck*

Para testar o funcionamento do conversor CA-CC *boost* em conjunto com o conversor CC-CC *buck* foi utilizado o circuito da Figura 6.27.

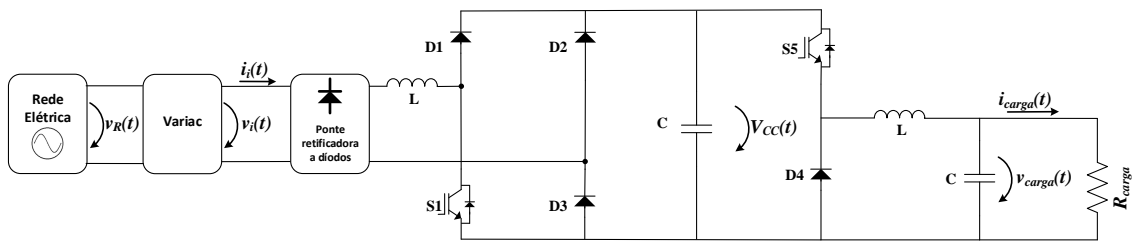


Figura 6.27 - Conversor CA-CC *boost* em conjunto com o conversor CC-CC *buck*.

Na Figura 6.28 encontra-se os resultados do ensaio efetuado. Como se observa a corrente i_i é sinusoidal e em fase com v_R e a corrente na carga i_{carga} segue o valor de referência.

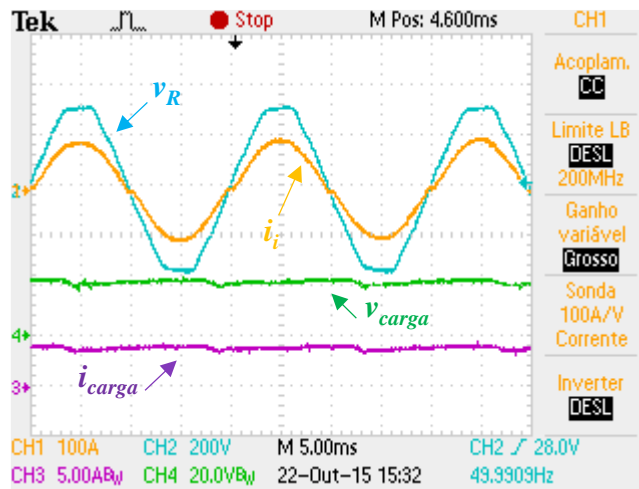


Figura 6.28 - Tensão da rede elétrica (v_R) e corrente de entrada (i_i) do lado CA, tensão na carga (v_{carga}) e corrente na carga (i_{carga}).

Na Figura 6.29 (a) verifica-se que o THD_i é de 4,08% existindo apenas harmónicos de 3ª e 5ª ordem com uma magnitude residual. Na Figura 6.29 (b) observa-se que para um desfasamento de $4,55^\circ$ o fator de potência é de 0,99.

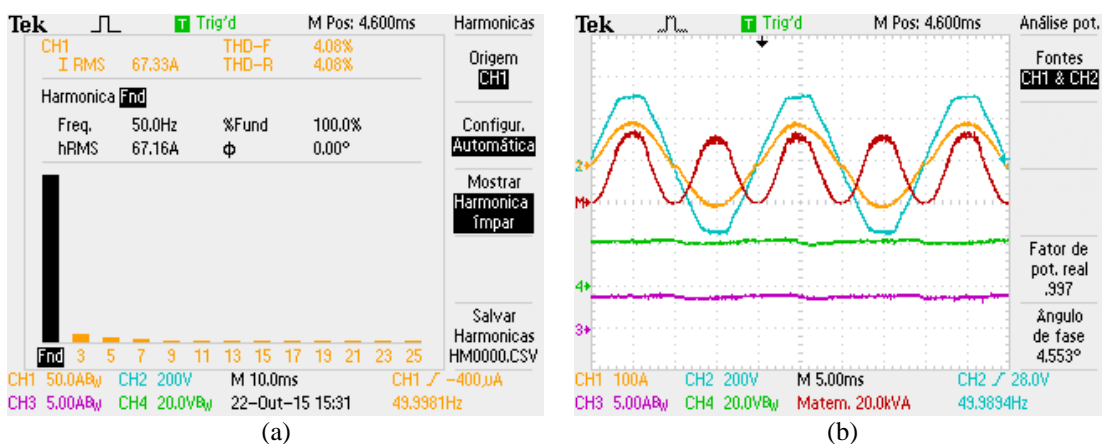


Figura 6.29 - Análise dos harmónicos e THD_i e do fator de potência: (a) Harmónicos e THD_i da corrente de entrada (i_i); (b) Fator de potência e ângulo de desfasamento entre v_R e i_i .

6.7.3. Ensaio do Conversor CA-CC *Full-Bridge* Semicontrolado Simétrico em Conjunto com o Conversor CC-CC *Buck*

Para testar o funcionamento do conversor CA-CC *full-bridge* semicontrolado simétrico em conjunto com o conversor CC-CC *buck* foi utilizado o circuito da Figura 6.30.

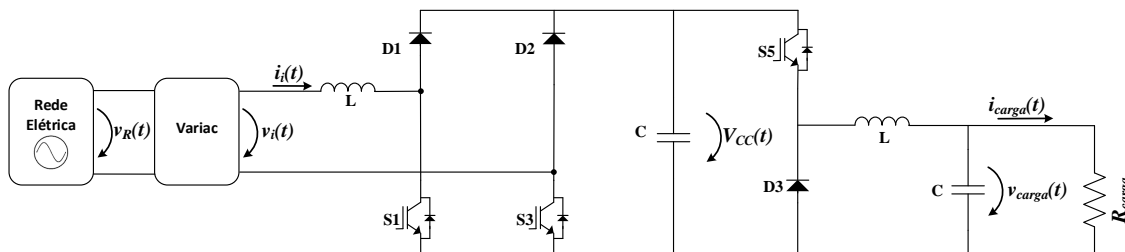


Figura 6.30 - Conversor CA-CC *full-bridge* semicontrolado simétrico em conjunto com o conversor CC-CC *buck*.

Na Figura 6.31 encontra-se os resultados do ensaio efetuado. Como se observa a corrente i_i é sinusoidal e em fase com v_R e a corrente na carga i_{carga} segue o valor de referência.

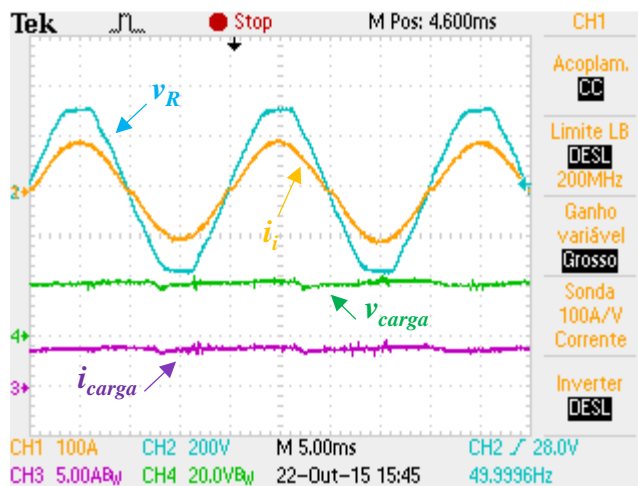


Figura 6.31 - Tensão da rede elétrica (v_R) e corrente de entrada (i_i) do lado CA, tensão na carga (v_{carga}) e corrente na carga (i_{carga}).

Na Figura 6.32 (a) verifica-se que o THD_i é de 5,78% existindo apenas harmônicos de 3ª e 5ª ordem com uma magnitude residual. Na Figura 6.32 (b) observa-se que para um desfasamento de $5,04^\circ$ o fator de potência é de 0,99.

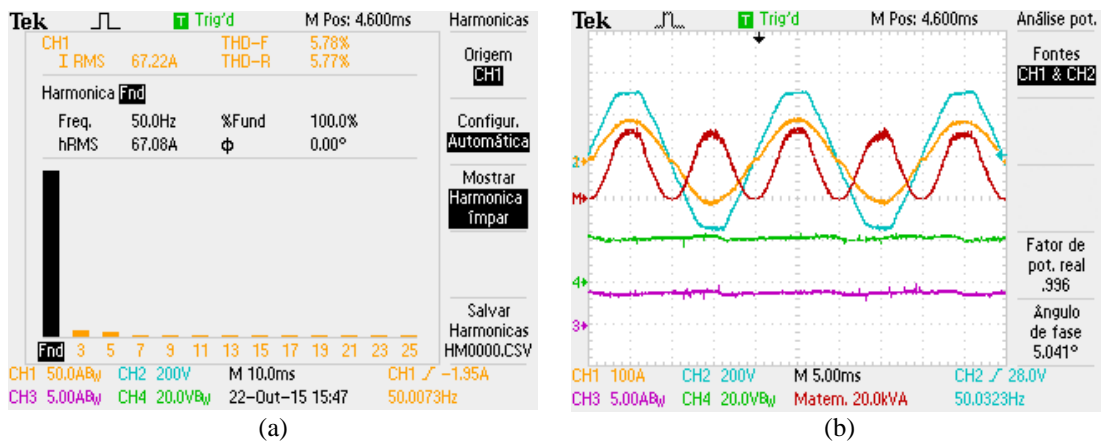


Figura 6.32 - Análise dos harmônicos e THD_i e do fator de potência: (a) Harmônicos e THD_i da corrente de entrada (i_i); (b) Fator de potência e ângulo de desfasamento entre v_R e i_i .

6.7.4. Ensaio do Conversor CA-CC *Full-Bridge* Semicontrolado Assimétrico em Conjunto com o Conversor CC-CC *Buck*

Para testar o funcionamento do conversor CA-CC *full-bridge* semicontrolado assimétrico em conjunto com o conversor CC-CC *buck* foi utilizado o circuito da Figura 6.33.

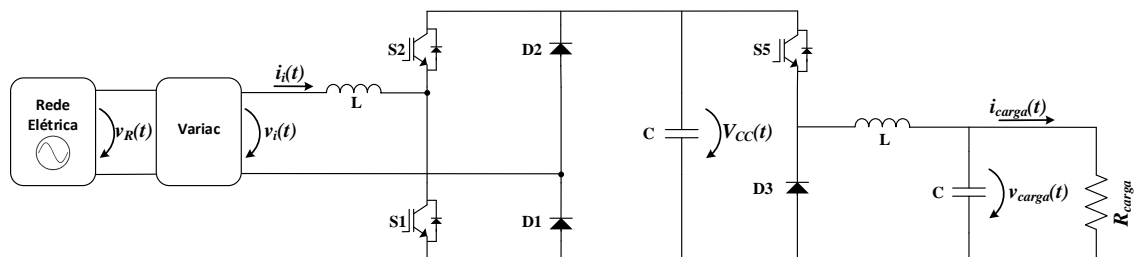


Figura 6.33 - Conversor CA-CC *full-bridge* semicontrolado assimétrico em conjunto com o conversor CC-CC *buck*.

Na Figura 6.34 encontra-se os resultados do ensaio efetuado. Como se observa a corrente i_i é sinusoidal e em fase com v_R e a corrente na carga i_{carga} segue o valor de referência.

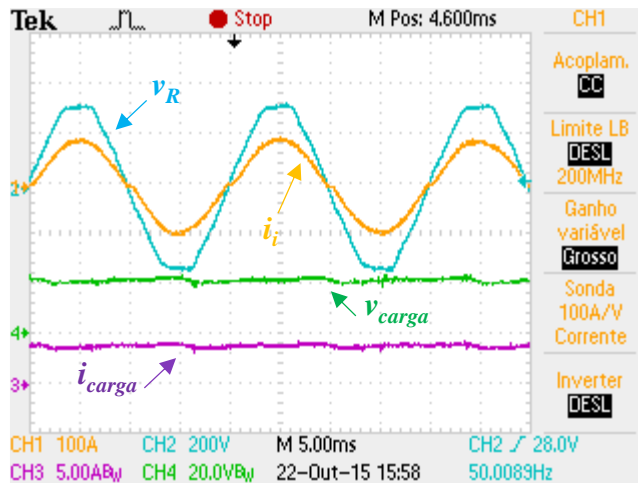


Figura 6.34 - Tensão da rede elétrica (v_R) e corrente de entrada (i_i) do lado CA, tensão na carga (v_{carga}) e corrente na carga (i_{carga}).

Na Figura 6.35 (a) verifica-se que o THD_i é de 6,07% existindo apenas harmónicos de 3ª e 5ª ordem com uma magnitude residual. Na Figura 6.35 (b) observa-se que para um desfasamento de $4,96^\circ$ o fator de potência é de 0,99.

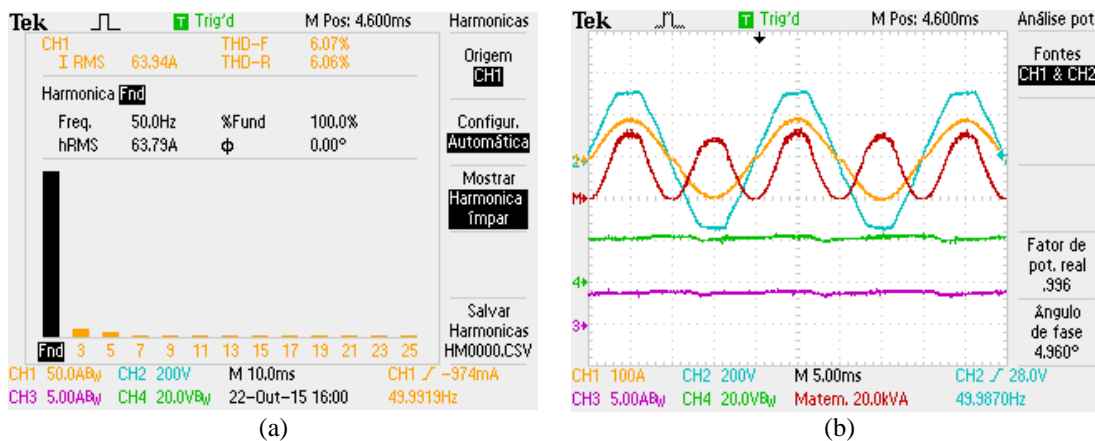


Figura 6.35 - Análise dos harmónicos e THD_i e do fator de potência: (a) Harmónicos e THD_i da corrente de entrada (i_i); (b) Fator de potência e ângulo de desfasamento entre v_R e i_i .

6.7.5. Ensaio do Conversor CA-CC *Full-Bridge* Totalmente Controlado em Conjunto com o Conversor CC-CC *Buck*

Para testar o funcionamento do conversor CA-CC *full-bridge* totalmente controlado em conjunto com o conversor CC-CC *buck* foi utilizado o circuito da Figura 6.36.

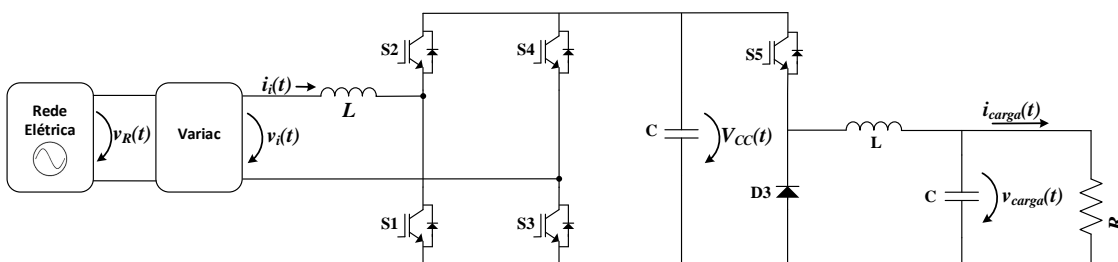


Figura 6.36 - Conversor CA-CC *full-bridge* totalmente controlado em conjunto com o conversor CC-CC *buck*.

Na Figura 6.37 encontra-se os resultados do ensaio efetuado. Como se observa a corrente i_i é sinusoidal e em fase com v_R e a corrente na carga i_{carga} segue o valor de referência.

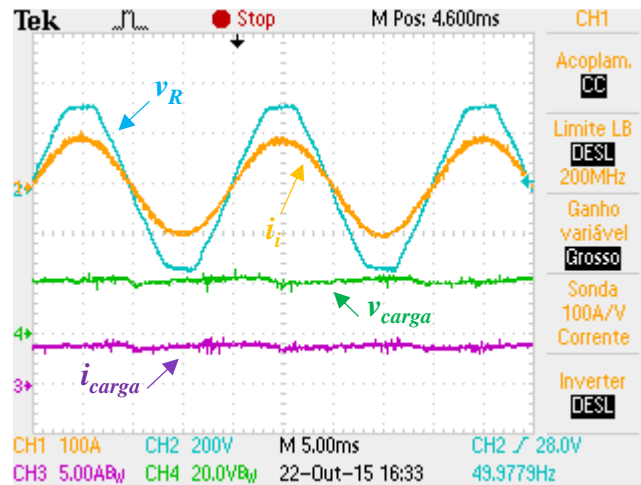


Figura 6.37 - Tensão da rede elétrica (v_R) e corrente de entrada (i_i) do lado CA, tensão na carga (v_{carga}) e corrente na carga (i_{carga}).

Na Figura 6.38 (a) verifica-se que o THD_i é de 2,27% existindo apenas harmónicos de 3ª e 5ª ordem com uma magnitude residual. Na Figura 6.38 (b) observa-se que para um desfasamento de 4,23° o fator de potência é de 0,99.

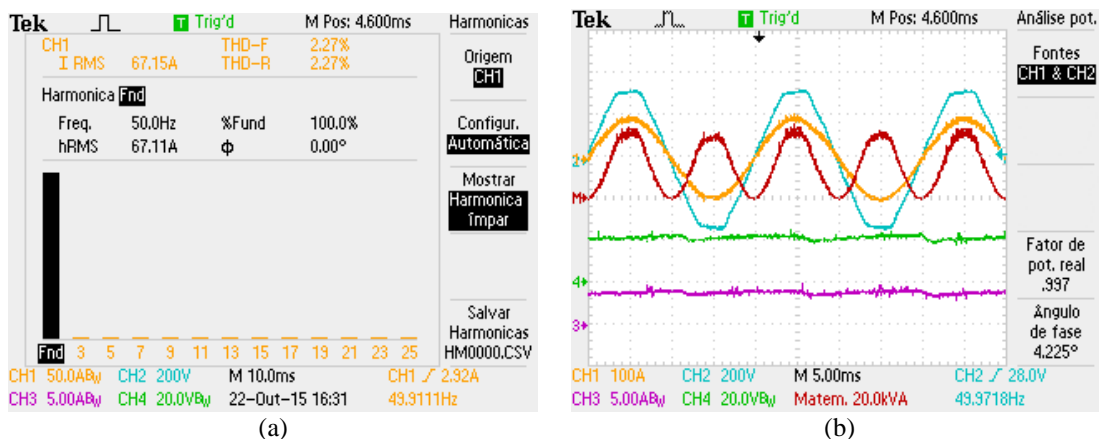


Figura 6.38 - Análise dos harmónicos e THD_i e do fator de potência: (a) Harmónicos e THD_i da corrente de entrada (i_i); (b) Fator de potência e ângulo de desfasamento entre v_R e i_i .

6.8. Comparação dos Conversores CA-CC a Funcionar em Conjunto com o Conversor CC-CC

Uma vez realizados os ensaios aos diferentes conversores CA-CC a funcionar em conjunto com o conversor CC-CC, foi feita uma comparação dos seus valores de THD_i e fator de potência.

Os ensaios dos conversores foram realizados de acordo com as características apresentadas na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Características dos ensaios.

Característica	Valor	Unidade
Frequência comutação	20	KHz
Frequência amostragem	40	KHz
Tensão de entrada	40	V
Tensão do Barramento CC	65	V

Na Tabela 6.4 é possível observar os valores de THD_i e fator de potência obtidos nos ensaios dos conversores. Também se verifica que os resultados obtidos não diferem muito do esperado.

Tabela 6.4 - Valores de THD_i e FP obtidos nos ensaios dos diferentes conversores.

Conversor CA-CC	THD _i %	FP
<i>Boost</i>	4,08 %	0,99
<i>Full-bridge</i> semicontrolado simétrico	5,78 %	0,99
<i>Full-bridge</i> semicontrolado assimétrico	6,07 %	0,99
<i>Full-bridge</i>	2,27 %	0,99

6.9. Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os resultados experimentais efetuados ao Carregador de Baterias com Correção do Fator de Potência para Utilização *On-Board* em Veículo Elétrico.

Numa primeira fase procedeu-se aos ensaios das diferentes topologias para o conversor CA-CC. Através dos resultados obtidos foi possível verificar que tanto as diferentes topologias para o conversor CA-CC como o controlo aplicado a estas funcionam como pretendido e em conformidade com os resultados obtidos nas simulações. De seguida de acordo com os resultados obtidos foi realizada uma comparação das diferentes topologias para o conversor CA-CC, no que diz respeito aos valores de THD_i e ao fator de potência.

Uma vez realizados os ensaios às diferentes topologias escolhidas para o conversor CA-CC, procedeu-se aos ensaios do conversor CC-CC. Através dos resultados obtidos verificou-se que tanto a topologia escolhida para o conversor CC-CC como o controlo aplicado funcionam como era pretendido e em conformidade com os resultados obtidos nas simulações.

Por fim foram realizados os ensaios das diferentes topologias escolhidas para o conversor CA-CC a funcionar em conjunto com o conversor CC-CC. Validando-se desta forma o funcionamento do sistema de carregamento para as diferentes topologias.

CAPÍTULO 7

Conclusão

7.1. Conclusões

Nesta Dissertação de Mestrado foi feita uma comparação entre diferentes topologias suscetíveis de ser utilizadas num carregador de baterias com correção do fator de potência para utilização *On-Board* em veículos elétricos.

Inicialmente procedeu-se à pesquisa descrita no Capítulo 2, onde foram apresentadas algumas soluções para o carregamento de baterias de VEs, com destaque para dois tipos de sistemas de carregamento básicos: os sistemas de carregamento *on-board* e os sistemas de carregamento *off-board*, podendo ambos permitir carregamento unidirecional G2V e/ou bidirecional G2V e V2G.

Ainda no Capítulo 2, foi apresentada a rede portuguesa de pontos de carregamento *MOBI.E*, por ter sido um caso pioneiro no que diz respeito a redes públicas de pontos de carregamento em Portugal e por ter sido totalmente desenvolvida por empresas portuguesas.

Foi também feita uma revisão das tecnologias de baterias mais utilizadas em VEs, tendo-se concluído que, no estado de desenvolvimento atual, um VE ainda não pode competir com um veículo de motor de combustão interna, não só no que diz respeito à sua autonomia, mas também em termos de tempo de recarga das baterias, que é muito superior ao tempo de abastecimento de combustível. Contudo, o desenvolvimento das diferentes tecnologias de baterias, sobretudo as baterias de hidreto metálico de níquel e as baterias à base de lítio, permitiu que os VEs atingissem um estado de desenvolvimento capaz de convencer um número cada vez mais elevado de consumidores.

Para além das baterias, também a área de eletrónica de potência tem vindo a evoluir ao longo dos anos, permitindo o controlo de maiores potências com conversores cada vez mais eficientes. No que diz respeito ao carregamento de baterias, estes avanços permitem desenvolver sistemas de carregamento mais compactos, leves, eficientes e económicos.

No Capítulo 3 foram apresentadas algumas topologias de conversores capazes de permitir a implementação de carregadores de baterias com correção de fator de potência

e corrente CA sinusoidal, bem como algumas das estratégias de controlo mais adequadas neste contexto.

No início do Capítulo 4 apresenta-se a ferramenta de simulação computacional *PSIM* 9.1, desenvolvida para aplicações de eletrónica de potência e utilizada no âmbito da dissertação. Segue-se uma descrição das topologias CA-CC e CC-CC, seus sistemas de controlo e os esquemas implementados em ambiente *PSIM* para simulação de todas as partes e do sistema no seu conjunto.

As diferentes simulações efetuadas tiveram o propósito de validar o funcionamento das topologias utilizadas e dos sistemas de controlo escolhidos. Para os conversores CA-CC verificou-se que a tensão no barramento CC mantém-se nos 400 V, com um *ripple* muito baixo, enquanto a corrente de entrada é sinusoidal e em fase com a tensão da rede elétrica com um valor de THD_i reduzido. Em relação ao conversor CC-CC *buck*, verificou-se que permite a carga da bateria de forma adequada.

Foi também simulados e apresentados neste capítulo os resultados da comparação entre alguns dos diferentes conversores CA-CC estudados, no que diz respeito ao fator de potência e ao valor de THD_i da corrente de entrada. Por fim, com vista a validar todo o sistema, foi realizada a simulação do sistema de carregamento a funcionar com um conversor CA-CC *full-bridge* totalmente controlado em conjunto com um conversor CC-CC *buck*.

O Capítulo 5 tem a ver com a implementação do sistema de carregamento testado, descrevendo-se todos os elementos que o constituem, desde os componentes utilizados no andar de potência dos conversores CA-CC e CC-CC, até aos componentes utilizados no sistema de controlo.

Por fim, no Capítulo 6, apresentam-se os resultados experimentais dos testes efetuados ao Carregador de Baterias com Correção do Fator de Potência para Utilização *On-Board* em Veículo Elétrico.

Em primeiro lugar procedeu-se aos ensaios de várias topologias de conversor CA-CC. Foi possível verificar através dos resultados obtidos que as topologias escolhidas para o conversor CA-CC, associadas às estratégias de controlo utilizadas, permitiram alcançar os objetivos estabelecidos, confirmando os resultados obtidos nas simulações. A partir dos resultados obtidos foi feita uma comparação das diferentes topologias para o conversor CA-CC, no que diz respeito aos valores de THD_i e ao fator de potência.

De seguida foram realizados os ensaios do conversor CC-CC. Através dos resultados obtidos verificou-se que tanto a topologia escolhida para o conversor CC-CC

como o controlo aplicado funcionam como era pretendido, à semelhança dos resultados obtidos nas simulações.

Por fim foram realizados os ensaios das diferentes topologias escolhidas para o conversor CA-CC a funcionar em conjunto com o conversor CC-CC, validando-se assim o funcionamento do sistema de carregamento no seu conjunto.

De um modo geral, conclui-se que diferentes topologias para o conversor CA-CC e a topologia para o conversor CC-CC associadas às estratégias de controlo escolhidas apresentam bons resultados. Apesar de não ter sido feito o estudo sobre o rendimento e preço do sistema de carregamento, a topologia *boost* apresenta bons resultados utilizando um menor número de semicondutores controlados, o que vai se refletir no preço e no rendimento do sistema de carregamento. É então uma boa opção para o conversor CA-CC do Carregador de Baterias com Correção do Fator de Potência para Utilização *On-Board* em Veículo Elétrico.

7.2. Sugestões de Trabalho Futuro

Os resultados obtidos ao longo desta Dissertação de Mestrado provam a viabilidade das diferentes topologias escolhidas assim como os algoritmos de controlo escolhidos para o sistema de carregamento. Contudo o seu desenvolvimento não está concluído, em primeiro lugar é necessário proceder aos ensaios que validem um ciclo completo de carga das baterias, de forma a verificar se os dois estágios de carregamento são cumpridos.

Os ensaios podem ser novamente realizados, de maneira a aumentar gradualmente os valores de tensão e corrente até atingir os valores nominais para os quais o sistema de carregamento foi dimensionado, podendo verificar-se assim o seu comportamento.

Seria interessante realizar um estudo sobre o rendimento e preço do sistema de carregamento de acordo com as diferentes topologias de conversores estudadas.

Seria também interessante criar um interface com o utilizador que lhe indique o estado de carga das baterias.

Referências

- [1] H. Wang, A. Hasanzadeh, and A. Khaligh, “Transportation Electrification: Conductive Charging of Electrified Vehicles,” *IEEE Electrif. Mag.*, vol. 1, no. 2, pp. 46–58, 2013.
- [2] K. Kim, S. Park, S. Lee, and T. Lee, “Battery charging system for PHEV and EV using single phase AC / DC PWM buck converter,” *Control*, vol. 7, no. 5, pp. 736–744, 2010.
- [3] F. Beltrame, L. Roggia, L. Schuch, and J. R. Pinheiro, “A comparison of high power single-phase power factor correction pre-regulators,” *Ind. Technol. (ICIT), 2010 IEEE Int. Conf.*, 2010.
- [4] F. C. Melo, L. Carlos, G. De Freitas, and M. Buiatti, “Estudo do conversor Boost para correção do fator de potência em fontes chaveadas,” pp. 1–14, 2010.
- [5] Luciano S.C Silva, Falcondes J. M. de Seixas, and Guilherme A.Melo, “Conversor ca-cc com elevado fator de potência, sem ponte de diodos, utilizando o conversor boost entrelaçado,” no. Mcd, pp. 3106–3113, 2010.
- [6] J. Ware, “Power Factor,” *IEE Wiring Matters*, pp. 22–24, 2006.
- [7] V. Mateus, “Fator de Potência,” 2001.
- [8] V. Monteiro, J. G. Pinto, B. Exposto, H. Gonçalves, J. C. Ferreira, C. Couto, and J. L. Afonso, “Assessment of a Battery Charger for Electric Vehicles with Reactive Power Control,” pp. 5124–5129, 2012.
- [9] S. Maulik, P. Pradip, K. Saha, P. Goutam, and K. Panda, “Power Factor Correction and THD Minimization by Interleaved Boost Converter in Continuous Conduction Mode,” vol. 4, no. 2, pp. 704–708, 2014.
- [10] C. Fărcaș, D. Petreuş, E. Simion, N. Palaghiță, and Z. Juhos, “A novel topology based on forward converter with passive power factor correction,” *ISSE 2006 - 29th Int. Spring Semin. Electron. Technol. Nano Technol. Electron. Packag. Conf. Proc.*, pp. 268–272, 2006.
- [11] B. Zhou, D. J. Nelson, and B. Zhou, “CCM Totem-Pole Bridgeless PFC with Ultra-Fast IGBT CCM Totem-Pole Bridgeless PFC with Ultra-Fast IGBT,” 2014.
- [12] V. Monteiro, H. Gonçalves, J. C. Ferreira, and J. L. Afonso, “Batteries Charging Systems for Electric and Plug-In Hybrid Electric Vehicles,” *New Adv. Veh. Technol. Automot. Eng.*, pp. 149–168, 2012.
- [13] F. Nemry, G. Leduc, and A. Muñoz, “Plug-in Hybrid and Battery-Electric Vehicles: State of the research and development and comparative analysis of energy and cost efficiency,” *JRC Tech. Notes*, p. 52, 2009.
- [14] 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.
- [15] J. Trovão, P. Pereirinha, and H. Jorge, “Design Methodology of Energy Storage Systems for a Small Electric Vehicle,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 3, pp. 1–12, 2009.

- [16] O. Hegazy, J. Van Mierlo, R. Barrero, P. Lataire, N. Omar, and T. Coosemans, “A Comparative Study of Different Control Strategies of On-Board Battery Chargers for Battery Electric Vehicles,” 2013.
- [17] N. Sakr, D. Sadarnac, A. Gascher, C. Plateau, and G. Yvette, “A Review Of On-board Integrated Chargers For Electric Vehicles Keywords.”
- [18] “Mitsubishi Motors,” 2015. [Online]. Available: <http://www.mitsubishi-cars.co.uk/imiev/tecnology.aspx>. [Accessed: 22-Jun-2015].
- [19] G. Glanzer, T. Sivaraman, J. I. Buffalo, M. Kohl, and H. Berger, “Cost-efficient integration of electric vehicles with the power grid by means of smart charging strategies and integrated on-board chargers,” *2011 10th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. IEEEIC.EU 2011 - Conf. Proc.*, vol. 100205, no. 100205, pp. 0–3, 2011.
- [20] “Avinc.” [Online]. Available: https://www.avinc.com/glossary/electrical_vehicle_ev_charging. [Accessed: 22-Jun-2015].
- [21] “inteli.” [Online]. Available: <http://www.inteli.pt/pt/go/mobie>. [Accessed: 09-Jul-2015].
- [22] “MOBI.E.” [Online]. Available: <http://www.mobie.pt/mobie>. [Accessed: 10-Jul-2015].
- [23] M. Pinto, “MOBI.E: Programa da Mobilidade Elétrica,” 2010.
- [24] H. M. G. Barbosa, “Desenvolvimento de um Sistema de Carregamento Externo de Baterias de Veículos Elétricos com Interface a Fontes de Energia Renovável,” Universidade do Minho, 2013.
- [25] “MOBI.E: Parceiros,” 2015. [Online]. Available: <http://www.mobie.pt/parceiros>. [Accessed: 09-Jul-2015].
- [26] N. C. Features, “Magnum Cap: Electric Vehicle Charging for Cities and Businesses.”
- [27] Efacec Portfolio of Products, “Public Ac Charger.” [Online]. Available: [http://www.efacec.pt/PresentationLayer/ResourcesUser/Catalogos/2012/Mobilidade Electrica/SA77I1111B1_Publiccharger_EN.pdf](http://www.efacec.pt/PresentationLayer/ResourcesUser/Catalogos/2012/Mobilidade%20Electrica/SA77I1111B1_Publiccharger_EN.pdf). [Accessed: 10-Jul-2015].
- [28] Efacec Portfolio of Products, “QC50 - Quick Charger.” [Online]. Available: [http://www.efacec.pt/PresentationLayer/ResourcesUser/Catalogos/2012/Mobilidade Electrica/SA68I1102B1_QC50_EN.pdf](http://www.efacec.pt/PresentationLayer/ResourcesUser/Catalogos/2012/Mobilidade%20Electrica/SA68I1102B1_QC50_EN.pdf). [Accessed: 10-Jul-2015].
- [29] “Magnum Cap_MCQC,” 2015. [Online]. Available: <http://www.magnumcap.com/index.php/component/content/article?id=27>. [Accessed: 15-Jul-2015].
- [30] “Electric Vehicles: What You Need to Know,” 2015. [Online]. Available: <http://electricvehicles.caa.ca/types-of-electric-vehicles/battery-types/>. [Accessed: 25-Jun-2015].
- [31] K. Young, C. Wang, L. Y. Wang, and K. Strunz, *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*. 2013.
- [32] “Lead Acid Batteries.” [Online]. Available: <http://www.mpoweruk.com/leadacid.htm>. [Accessed: 16-Dec-2015].

- [33] “Lead-acid batteries,” 2015. [Online]. Available: http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/batteries/batteries_lead_acid.php. [Accessed: 03-Jul-2015].
- [34] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook Devices, Circuits, and Applications*. .
- [35] “Koldban,” 2015. [Online]. Available: http://www.koldban.com/Kapower_White_Paper_s/30.htm. [Accessed: 03-Jul-2015].
- [36] “Batteryuniversity,” 2015. [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/advancements_in_lead_acid. [Accessed: 03-Jul-2015].
- [37] “BatteryCouncil [Online]. Disponível em: http://batteryCouncil.org/?page=lead_acid_batteries [Acedido em 3 Julho 2015],” p. 2015, 2015.
- [38] “Battery University : Nickel-based Batteries,” 2015. [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/nickel_based_batteries. [Accessed: 03-Jul-2015].
- [39] “The Truth About NiCd Batteries,” 2015. [Online]. Available: <http://www.hardwaresecrets.com/the-truth-about-nicd-batteries/>. [Accessed: 03-Jul-2015].
- [40] “Electropaedia : Nickel Cadmium Batteries,” 2015. [Online]. Available: <http://www.mpoweruk.com/nicad.htm>. [Accessed: 04-Jul-2015].
- [41] “Electric Vehicles of Washington,” 2015. [Online]. Available: http://shop.electricvehicleswa.com/index.php?main_page=product_info&cPath=9_11&products_id=80. [Accessed: 04-Jul-2015].
- [42] David Linden and Thomas B. Reddy, *Handbook of Batteries*. 2002.
- [43] “The economist: In search of the perfect battery,” 2015. [Online]. Available: <http://www.economist.com/node/10789409>. [Accessed: 03-Jul-2015].
- [44] Dr. H. Frank Gibbard, “Nickel Metal Hydride Battery Technology,” *Duracell Worldw. Technol. Cent.*, 1993.
- [45] H. Frank Gibbard, “Nickel Metal Hydride Battery Applications,” *Duracell Worldw. Technol. Cent.*, p. 1994, 1994.
- [46] E. Hansen, L. Wilhelm, N. Karditsas, I. Menjak, D. Corrigan, S. Dhar, and S. Ovshinsky, “Full system nickel-metal hydride battery packs for hybrid electric vehicle applications,” *Seventeenth Annu. Batter. Conf. Appl. Adv. Proc. Conf. (Cat. No.02TH8576)*, pp. 253–260, 2002.
- [47] I. Menjak, P. H. Gow, D. a. Corrigan, S. Venkatesan, S. K. Dhar, R. C. Stempel, and S. R. Ovshinsky, “Advanced Ovonic high-power nickel-metal hydride batteries for hybrid electric vehicle applications,” *Thirteen. Annu. Batter. Conf. Appl. Adv. Proc. Conf.*, no. 248, 1998.
- [48] Mumu Murugesu Moorthi, “Batteries large Nickel Metal Hydride in stationary applications,” 2006.
- [49] “Alternative Fuels Data Center: Batteries for Hybrid and Plug-In Electric Vehicles,” 2015. [Online]. Available:

- http://www.afdc.energy.gov/vehicles/electric_batteries.html. [Accessed: 03-Jul-2015].
- [50] “Electropaedia : Nickel Metal Hydride Batteries,” 2015. [Online]. Available: <http://www.mpoweruk.com/nimh.htm>. [Accessed: 03-Jul-2015].
- [51] “Nikkei Technology: Tech & Industry Analysis from Japan/Asia,” 2015. [Online]. Available: http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20120218/205031/?SS=imgview_e&FD=48575398. [Accessed: 03-Jul-2015].
- [52] “Battery University: Is Lithium-ion the Ideal Battery?,” 2015. [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/is_lithium_ion_the_ideal_battery. [Accessed: 05-Jul-2015].
- [53] Ralph J. Brodd, “Comments on the History of Lithium-Ion Batteries,” *Electrochem. Soc.*, p. 89074, 2013.
- [54] Alireza Khaligh, “Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 6, pp. 2806–2814, 2010.
- [55] Guochun Wan Guizhu Yin, “A bidirectional equalization method of Lithium ion Batteries,” pp. 575–577, 2014.
- [56] A. K. Xiaopeng Chen, Weixiang Shen, Thanh Tu Vo, Zhenwei Cao, “An overview of lithium-ion batteries for electric vehicles,” *2012 10th Int. Power Energy Conf.*, pp. 230–235, 2012.
- [57] Daniel Filipe Pereira Magalhães, “Modelo de Baterias com aplicação em sistemas de gestão de baterias (BMS) de Veículos Elétricos (EVs),” 2013.
- [58] “Car and Driver, 2016 Chevrolet Volt Drivetrain Details: Quicker, New Engine, Increased Range and Battery Capacity,” 2016. [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/is_lithium_ion_the_ideal_battery. [Accessed: 05-Jul-2015].
- [59] Jason Harris and Dimitrie C. Popescu, “Discharge Characteristics of Lithium-Polymer Batteries,” pp. 5–6.
- [60] H.V.Venkatasetty, “L m M - Polymer Electrolyte Rechargeable Batteries,” 2000.
- [61] “Gizmag: Inside the Mercedes-Benz SLS AMG E-Cell Supercar.” [Online]. Available: <http://www.gizmag.com/mercedes-sls-amg-e-cell/21778/>. [Accessed: 06-Jul-2015].
- [62] “Datasheet-12 , 8 Volt lithium iron phosphate batteries Why lithium-iron phosphate ?, Victron Energy.” .
- [63] “Solar Energy Storage,” 2015. [Online]. Available: <http://www.solarenergystorage.org/en/lithium-eisenphosphat-mit-welcher-lebensdauer-konnen-kunden-rechnen/>. [Accessed: 06-Jul-2015].
- [64] “Tornado,” 2015. [Online]. Available: http://www.tnd-battery.com/html_products/Lithium-Ion-Phosphate-Battery-Pack-48V-250Ah-316.html. [Accessed: 06-Jul-2015].
- [65] G. Gutmann and E. Neckar, “Electric Vehicle : Batteries,” 2009.

- [66] I. Husain, “Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals, Second Edition,” *Amazon*, p. 523, 2010.
- [67] EuroBat, “A Review of Battery technologies for automotive applications.”
- [68] “BatteryUniversity: Types of Lithium ion,” 2015. [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion. [Accessed: 09-Jul-2015].
- [69] V. Monteiro, J. C. Ferreira, J. G. Pinto, B. Exposto, D. Pedrosa, and J. L. Afonso, “Comparison of Charging Systems for Electric Vehicles and Their Impact on Electrical Grid,” pp. 440–445, 2012.
- [70] A. Khaligh and S. Dusmez, “Comprehensive topological analysis of conductive and inductive charging solutions for plug-in electric vehicles,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 8, pp. 3475–3489, 2012.
- [71] F. Musavi, W. Eberle, and W. G. Dunford, “A phase shifted semi-bridgeless boost power factor corrected converter for plug in hybrid electric vehicle battery chargers,” *Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC*, pp. 821–828, 2011.
- [72] S. C. Rajappan, K. Sarabose, and N. John, “An Efficient AC / DC Bridgeless PFC Boost Converter,” no. 2, pp. 18–23, 2013.
- [73] L. Huber, Y. Jang, and M. M. Jovanović, “Performance evaluation of bridgeless PFC boost rectifiers,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 3, pp. 1381–1390, 2008.
- [74] J. Zhang, “Advanced Pulse Width Modulation Controller ICs for Buck DC-DC Converters,” *Thesis*, 2006.
- [75] M. S. Aspalli and a Wamanrao, “Sinusoidal pulse width modulation (SPWM) with variable carrier synchronization for multilevel inverter controllers,” *2009 Int. Conf. Control. Autom. Commun. Energy Conserv.*, no. Cm, pp. 1–6, 2009.
- [76] J. G. Pinto, V. Monteiro, H. Gonçalves, and J. L. Afonso, “Onboard reconfigurable battery charger for electric vehicles with traction-to-auxiliary mode,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 3, pp. 1104–1116, 2014.
- [77] L. G. B. Rolim, D. R. Da Costa, and M. Aredes, “Analysis and software implementation of a robust synchronizing PLL circuit based on the pq theory,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 6, pp. 1919–1926, 2006.
- [78] C. Knospe, “PID control,” *Control Syst. IEEE*, vol. 26, no. 1, pp. 216–251, 2006.
- [79] P. R. Ouyang, V. Pano, and T. Dam, “PID position domain control for contour tracking,” pp. 1297–1302, 2013.
- [80] “Control Tutorials for MATLAB and Simulink - Introduction: PID,” 2015. [Online]. Available: <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction§ion=ControlPID>. [Accessed: 20-Aug-2015].
- [81] “FGA25N120ANTD Package Marking and Ordering Information,” no. May, pp. 1–10, 2006.
- [82] “Digital Signal Controllers (DSCs),” *Interface*, no. March, 2010.
- [83] “TMS320C2000™ Experimenter Kit Overview,” no. June 2008, pp. 1–5, 2011.

- [84] Chen Yang Technologies, “Catalogue Hall Effect Voltage Sensors,” vol. 49, no. 0, 2012.
- [85] “Current Transducer LA 100-P datasheet,” pp. 1–3, 1997.
- [86] “Texas Instruments LM339 datasheet,” *October*, no. October 1979, 2010.
- [87] “FAIRCHILD SEMICONDUCTOR Lm358 datasheet,” vol. 2, pp. 1–12, 2010.
- [88] “High Density Mounting Phototransistor Optically Coupled Isolators,” *Computer (Long. Beach. Calif.)*, no. 214, pp. 3–6.
- [89] “Texas Instruments CD4081B,” no. September, 2003.
- [90] “Avago Technologies HCPL-3120 Datasheet.” pp. 1–24, 2013.
- [91] “C&D Technologies Power Solutions NMV 5V , 12V & 15V Series.” pp. 3–8, 2001.