

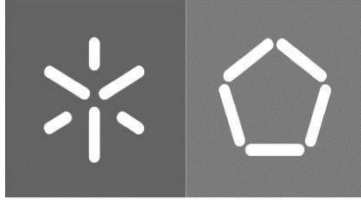


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

David do Vale Correia

**Desenvolvimento de um Conversor CC-CC
para Interface de Painéis Solares e
Sistemas de Armazenamento de Energia**

Janeiro de 2023



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

David do Vale Correia

**Desenvolvimento de um Conversor CC-CC
para Interface de Painéis Solares e
Sistemas de Armazenamento de Energia**

Dissertação de Mestrado Engenharia
Eletrónica Industrial e Computadores

Trabalho efetuado sob a
orientação do

**Professor Doutor Vítor Duarte
Fernandes Monteiro**

Janeiro de 2023

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



Atribuição-NãoComercial-Compartilhaigual
CC BY-NC-SA

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Agradecimentos

Esta dissertação de mestrado finaliza uma etapa bastante didática e cheia de desafios, que só foi possível ser finalizada graças às pessoas que me apoiaram durante este percurso.

Primeiramente, quero agradecer ao meu orientador, Dr. Vítor Monteiro, por todo o apoio, prontidão e conhecimento transmitido durante todo o processo de pesquisa, montagem e validação. A todos os elementos do GEPE, principalmente aos alunos de doutoramento Luís Barros e Carlos Martins, por toda a ajuda e conselhos prestados.

Quero agradecer aos meus amigos, principalmente, ao André Pereira, Francisco Rocha, João Costa, João Peixoto, Marcelo Amaral, Rafael Cachetas e Rui Esteves, por me acompanharem em todas as aventuras desta jornada académica. Ao André Pereira, que me acompanhou durante a realização desta dissertação, obrigado por todo o apoio, companheirismo e pelo bom ambiente de trabalho proporcionado.

Um agradecimento especial à Carolina Castro, por todo o amor, carinho e compreensão, nos bons e maus momentos que partilhámos. Obrigado pelo suporte e por teres contribuído, mesmo que indiretamente, para a finalização desta dissertação.

Por fim, o meu maior agradecimento, aos pilares da minha vida. Aos meus pais, Isabel Vale e José Correia, e à minha madrinha, Ana Vale, pelo amor, apoio e transmissão de valores. Ao meu irmão, Miguel Correia, por todo o incentivo e inspiração constante. Sem eles nada disto seria possível, obrigado por serem os principais responsáveis da minha felicidade.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração. Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

A exploração em larga escala de combustíveis fósseis durante vários anos trouxe consequências bastante negativas para o meio ambiente. O aquecimento global, a poluição do ar e a escassez das fontes de energia não renovável, levaram à procura de novas alternativas de produção de energia. Sendo assim, as energias renováveis têm ganho bastante popularidade nos últimos anos com o aumento da consciência sobre a necessidade de fontes de energia sustentável. Podem ser obtidas de diversas maneiras como sol, vento e água, entre outras, e têm a particularidade de serem inesgotáveis.

Por estas razões, a presente dissertação visa o desenvolvimento de um conversor CC-CC capaz de fazer a interface com painéis solares fotovoltaicos e sistemas de armazenamento de energia (baterias), de forma a ajudar a otimização da captação de energia proveniente do sol. O objetivo passa por fazer a extração de energia de painéis fotovoltaicos e efetuar o carregamento e o descarregamento de baterias. De maneira a aumentar a versatilidade e robustez do sistema, paralelamente ao desenvolvimento do conversor CC-CC, no âmbito de outra dissertação, outro aluno desenvolveu um conversor CA-CC, que permite a extração de energia da rede elétrica, como também a injeção de energia nesta, obtida através do painel fotovoltaico ou das baterias. A associação pelo lado CC de um conversor CA-CC trouxe várias vantagens, permitindo a realização de mais funções e o aumento da eficiência e flexibilidade do sistema.

Posto isto, durante a elaboração desta dissertação, foram abordadas todas as etapas que levaram à concessão do protótipo final. Numa primeira fase, foi feito o estudo das topologias de conversores CC-CC e algoritmos de controlo associados, a par da pesquisa relativa a sistemas fotovoltaicos e sistemas de armazenamento de energia. Foram também apresentadas as simulações computacionais realizadas na ferramenta de simulação *PSIM*, que constituem o carregamento das baterias, o descarregamento das baterias, a extração de energia dos painéis solares fotovoltaicos e o carregamento das baterias através da extração de energia dos painéis fotovoltaicos. Posteriormente, foi feita uma análise descritiva do material utilizado para conceber os circuitos de controlo e de potência e, por fim, foram apresentados os testes realizados ao conversor CC-CC, em parceria com o conversor CA-CC. Neste último, são efetuados os ensaios experimentais de modo a validar o correto funcionamento dos vários modos de operação do protótipo final.

Palavras-Chave: Conversor CC-CC, Conversor Unidirecional, Conversor Bidirecional, Energia Renovável, Painéis Fotovoltaicos, Armazenamento de Energia.

Abstract

The large-scale exploitation of fossil fuels for several years has had very negative consequences for the environment. Global warming, air pollution, and the scarcity of non-renewable energy sources have led to the search for new energy production alternatives. Therefore, renewable energies have gained quite a lot of popularity in recent years due to an increased awareness of the need for sustainable energy sources. They can be obtained in various ways such as solar, wind and water, among others, and have the particularity of being inexhaustible.

For these reasons, this dissertation aims to develop a DC-DC converter capable of interfacing with photovoltaic solar panels and energy storage systems (batteries), in order to help, the optimization of the capture of energy from the sun. The goal is to extract energy from photovoltaic panels and charge and discharge batteries. In order to increase the versatility and robustness of the system, within the scope of another dissertation, another student simultaneously developed an AC-DC converter, which allows the extraction of energy from the electric grid, as well as the injection of energy into it, obtained through the photovoltaic panel or batteries. The association of the AC-DC converter on the DC side brought several advantages, allowing more functions to be performed and increasing the efficiency and flexibility of the system.

Having said that, during the elaboration of this dissertation, all the steps that led to the granting of the final prototype were addressed. In the first phase, the study of the DC-DC converter topologies and associated control algorithms was carried out, along with research regarding photovoltaic systems and energy storage systems. The computational simulations performed in the PSIM simulation tool were also presented, which constitute charging the batteries, discharging the batteries, extracting energy from the photovoltaic solar panels and charging the batteries by extracting energy from the photovoltaic panels. Afterwards, a descriptive analysis of the material used to design the control and power circuits was made and, finally, the tests performed on the DC-DC converter, in partnership with the AC-DC converter, were presented. In the latter, the experimental tests are performed in order to validate the correct functioning of the various operating modes of the final prototype.

Key-words: Converter DC-DC, Unidirectional Converter, Bidirectional Converter, Renewable Energy, Photovoltaic Panels, Energy Storage.

Índice

| | |
|---|-------------|
| Lista de Figuras | xi |
| Lista de Tabelas | xii |
| Glossário | xiii |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Panorama Energético | 1 |
| 1.2 Enquadramento | 1 |
| 1.3 Motivação | 2 |
| 1.4 Objetivos | 3 |
| 1.5 Organização e Estrutura | 3 |
| 2 Sistemas Fotovoltaicos, Sistemas de Armazenamento de Energia e Conversores CC-CC | 4 |
| 2.1 Introdução | 4 |
| 2.2 Sistemas Fotovoltaicos | 4 |
| 2.2.1 Princípio de Funcionamento | 5 |
| 2.2.2 Tipos de Células Fotovoltaicas | 5 |
| 2.2.2.1 Células do Tipo Monocristalino | 5 |
| 2.2.2.2 Células do Tipo Policristalino | 6 |
| 2.2.2.3 Células de Silício Amorfo | 6 |
| 2.2.3 Características dos Painéis Solares Fotovoltaicos | 6 |
| 2.2.4 Tipos de Sistemas Solares Fotovoltaicos | 7 |
| 2.2.4.1 Sistemas Isolados | 7 |
| 2.2.4.2 Sistemas Ligados à Rede | 7 |
| 2.2.4.3 Sistemas Híbridos | 7 |
| 2.2.5 Vantagens e Desvantagens dos Sistemas Fotovoltaicos | 8 |
| 2.3 Sistemas de Armazenamento de Energia | 8 |
| 2.3.1 Tecnologias de Baterias | 8 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.3.1.1 | Baterias Ácido-Chumbo | 9 |
| 2.3.1.2 | Baterias Níquel-Cádmio | 9 |
| 2.3.1.3 | Baterias Níquel-Hidreto Metálico | 9 |
| 2.3.1.4 | Baterias Iões de Lítio | 9 |
| 2.3.2 | Características das Baterias | 10 |
| 2.4 | Conversores CC-CC | 10 |
| 2.4.1 | Conversor <i>Buck</i> | 11 |
| 2.4.2 | Conversor <i>Boost</i> | 11 |
| 2.4.3 | Conversor Três Níveis do Tipo <i>Boost</i> | 12 |
| 2.4.4 | Conversor <i>Buck-Boost</i> | 13 |
| 2.4.5 | Conversor <i>Buck-Boost Symmetrical</i> | 14 |
| 2.4.6 | Conversor <i>Buck-Boost Asymmetrical</i> | 15 |
| 2.4.7 | Conversor <i>Flyback</i> | 15 |
| 2.4.8 | Conversor <i>Forward</i> | 16 |
| 2.4.9 | Conversor <i>Full-Bridge</i> | 17 |
| 2.4.10 | Conversor <i>Half-Bridge</i> | 18 |
| 2.5 | Algoritmos de Carregamento de Baterias | 18 |
| 2.5.1 | Algoritmo de Corrente Constante | 19 |
| 2.5.2 | Algoritmo de Tensão Constante | 19 |
| 2.5.3 | Algoritmo de Corrente Constante Seguido de Tensão Constante | 20 |
| 2.6 | Algoritmo de Controlo MPPT | 21 |
| 2.6.1 | Perturbação e Observação (P&O) | 21 |
| 2.6.2 | Condutância Incremental (IC) | 23 |
| 2.6.3 | Tensão de Circuito Aberto Fracionada | 24 |
| 2.6.4 | Corrente de Curto-circuito Fracionada | 25 |
| 2.7 | Técnicas de Controlo de Corrente | 25 |
| 2.7.1 | Controlo de Corrente: Histerese | 25 |
| 2.7.2 | Controlo de Corrente: Proporcional Integral (PI) | 26 |
| 2.7.3 | Controlo de Corrente: Preditivo | 27 |
| 2.8 | Modulação PWM | 28 |
| 2.9 | Conclusão | 29 |
| 3 | Simulações Computacionais da Topologia Proposta | 31 |
| 3.1 | Introdução | 31 |
| 3.2 | Topologia do Conversor CC-CC | 31 |
| 3.3 | Algoritmo de Controlo | 34 |
| 3.4 | Simulações Computacionais dos Modos de Funcionamento | 35 |
| 3.4.1 | Carregamento das Baterias | 36 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.4.2 | Descarga das Baterias | 39 |
| 3.4.3 | Extração de Energia dos Painéis | 42 |
| 3.4.4 | Extração de Energia dos Painéis e Carregamento de Baterias | 45 |
| 3.5 | Conclusão | 48 |
| 4 | Desenvolvimento de Hardware e Sistema de Controle | 49 |
| 4.1 | Introdução | 49 |
| 4.2 | Sistema de Potência | 49 |
| 4.2.1 | Semicondutores de Potência | 50 |
| 4.2.2 | Barramento CC | 52 |
| 4.2.3 | Resistências de Pré-carga | 54 |
| 4.2.4 | Circuito de Proteção para Interface com Rede Elétrica, Painéis Fotovoltaicos e Baterias | 55 |
| 4.3 | Sistema de Controle | 57 |
| 4.3.1 | Sensores de Tensão | 58 |
| 4.3.2 | Sensores de Corrente | 60 |
| 4.3.3 | DSP | 61 |
| 4.3.4 | Placa de Comando | 63 |
| 4.3.5 | Placa de Condicionamento de Sinal | 63 |
| 4.3.6 | DAC | 64 |
| 4.3.7 | Placa de <i>Drive</i> dos IGBT | 64 |
| 4.3.8 | Fonte de Alimentação | 66 |
| 4.4 | Montagem do Protótipo Desenvolvido | 66 |
| 4.5 | Conclusões | 69 |
| 5 | Resultados Experimentais do Protótipo Desenvolvido | 71 |
| 5.1 | Introdução | 71 |
| 5.2 | Validação da PLL | 72 |
| 5.3 | Ensaio ao Conversor CC-CC | 73 |
| 5.4 | Regulação da Tensão do Barramento CC | 75 |
| 5.5 | Conversor CC-CC e Conversor CA-CC | 76 |
| 5.5.1 | Carregamento das Baterias | 77 |
| 5.5.2 | Descarga das Baterias | 80 |
| 5.5.3 | Extração dos Painéis Fotovoltaicos e Injeção na Rede Elétrica | 82 |
| 5.5.4 | Extração de Energia dos Painéis Fotovoltaicos e Carregamento das Baterias | 86 |
| 5.6 | Conclusões | 88 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 6 | Conclusões e Sugestões de Trabalho Futuro | 90 |
| 6.1 | Conclusões | 90 |
| 6.2 | Sugestões de Trabalho Futuro | 92 |
| | Referências | 94 |

Lista de Figuras

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Esquema do sistema desenvolvido. | 2 |
| 2.1 | Conversor <i>buck</i> | 11 |
| 2.2 | Conversor <i>boost</i> | 12 |
| 2.3 | Conversor três níveis do tipo <i>boost</i> | 13 |
| 2.4 | Conversor <i>buck-boost</i> | 13 |
| 2.5 | Conversor <i>buck-boost symmetrical</i> | 14 |
| 2.6 | Conversor <i>buck-boost asymmetrical</i> | 15 |
| 2.7 | Conversor <i>flyback</i> | 16 |
| 2.8 | Conversor <i>forward</i> | 17 |
| 2.9 | Conversor <i>full-bridge</i> | 18 |
| 2.10 | Conversor <i>half-bridge</i> | 18 |
| 2.11 | Formas de onda na bateria com carregamento por corrente constante. | 19 |
| 2.12 | Formas de onda na bateria com carregamento por tensão constante. | 20 |
| 2.13 | Formas de onda na bateria com carregamento por corrente constante seguido de tensão constante. (1) Estágio de corrente constante (2) Estágio de tensão constante | 21 |
| 2.14 | Estrutura do controlo P&O. | 22 |
| 2.15 | Fluxograma do algoritmo P&O. | 22 |
| 2.16 | Fluxograma do algoritmo condutância incremental. | 24 |
| 2.17 | Diagrama de blocos de controlo de corrente por histerese. | 26 |
| 2.18 | Diagrama de blocos de controlo de corrente proporcional integral. | 26 |
| 2.19 | Diagrama de blocos de controlo de corrente preditivo. | 27 |
| 3.1 | Conversor CC-CC. | 32 |
| 3.2 | Conversor CC-CC três níveis tipo <i>boost</i> | 32 |
| 3.3 | Conversor CC-CC <i>buck-boost asymmetrical</i> | 33 |
| 3.4 | Tensões e correntes da ligação do conversor CC-CC aos painéis fotovoltaicos. | 34 |
| 3.5 | Tensões e correntes da ligação do conversor CC-CC às baterias. | 35 |
| 3.6 | Circuito elétrico do carregamento das baterias em <i>PSIM</i> | 36 |
| 3.7 | I_{bat} para um I_{refbat} de (a)10 A; (b)20 A; (c)30 A. | 37 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.8 | Resultado de I_{bat} e do barramento CC para diferentes declives da rampa de referência. | 38 |
| 3.9 | Corrente e tensão na fase A para um $I_{refbat} = 20$ A. | 39 |
| 3.10 | Circuito elétrico da descarga das baterias em <i>PSIM</i> | 39 |
| 3.11 | I_{bat} para um I_{refbat} de (a)10 A; (b)20 A; (c)30 A. | 40 |
| 3.12 | Resultado de I_{bat} e do barramento CC para diferentes declives da rampa de referência. | 41 |
| 3.13 | Corrente e tensão na fase A para um $I_{refbat} = 20$ A. | 42 |
| 3.14 | Circuito elétrico da extração de energia dos painéis em <i>PSIM</i> | 42 |
| 3.15 | I_{pv} para um I_{refpv} de (a)10 A; (b)30 A; (c)60 A. | 43 |
| 3.16 | Resultado de I_{pv} e do barramento CC para diferentes declives da rampa de referência. | 44 |
| 3.17 | Corrente e tensão na fase A para um $I_{refpv} = 30$ A. | 45 |
| 3.18 | Circuito elétrico do carregamento das baterias combinado com o circuito de extração de energia dos painéis em <i>PSIM</i> | 45 |
| 3.19 | Resultado do barramento CC para referências de (a) $I_{pv}=20$ A e $I_{bat}=20$ A; (b) $I_{pv}=30$ A e $I_{bat}=10$ A; (c) $I_{pv}=10$ A e $I_{bat}=30$ A. | 46 |
| 3.20 | Corrente e tensão na fase A para referências de (a) $I_{pv}=10$ A e $I_{bat}=40$ A; (b) $I_{pv}=20$ A e $I_{bat}=20$ A; (c) $I_{pv}=40$ A e $I_{bat}=10$ A;. | 47 |
| 4.1 | Desenho do armário na ferramenta <i>Visio</i> | 50 |
| 4.2 | Esquema elétrico do módulo de IGBT. | 50 |
| 4.3 | Semicondutores anexados ao dissipador. | 52 |
| 4.4 | Esquema elétrico do barramento CC. | 53 |
| 4.5 | Condensador de 8200 μ F. | 54 |
| 4.6 | Resistências de pré-carga. | 55 |
| 4.7 | Desenho das proteções para interface do conversor CA-CC com a rede elétrica. | 55 |
| 4.8 | Desenho das proteções para interface do conversor CC-CC com os painéis e as baterias. | 56 |
| 4.9 | Bobinas de acoplamento aos painéis e às baterias. | 57 |
| 4.10 | <i>Rack</i> de controlo. | 58 |
| 4.11 | Sensor de tensão. | 59 |
| 4.12 | Sensores de tensão. | 59 |
| 4.13 | Sensores de tensão do barramento CC. | 60 |
| 4.14 | Sensor de corrente. | 61 |
| 4.15 | Sensores de corrente. | 61 |
| 4.16 | DSP e placa de adaptação. | 62 |
| 4.17 | DSP inserido na placa de adaptação. | 63 |
| 4.18 | Placa de DAC. | 64 |
| 4.19 | Placa de <i>drive</i> dos IGBT. | 65 |
| 4.20 | Placa de <i>drive</i> anexada ao dissipador. | 65 |
| 4.21 | Protótipo final. | 67 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.22 | Desenho da divisão dos cabos de controlo e de potência na ferramenta <i>Visio</i> | 68 |
| 4.23 | Barramento CC. | 69 |
| 4.24 | Resultado do posto de trabalho. | 70 |
| 5.1 | Bancada de trabalho. | 71 |
| 5.2 | Transformadores trifásicos. | 72 |
| 5.3 | PLL e tensão na fase A em regime permanente. | 73 |
| 5.4 | PLL da fase A | 73 |
| 5.5 | 3 grelhadores ligados em série ($R_{carga} = 78 \Omega$). | 74 |
| 5.6 | Barramento CC com o conversor no modo <i>boost</i> | 75 |
| 5.7 | Pré-carga do barramento CC. | 76 |
| 5.8 | Pré-carga e regulação do barramento CC. | 76 |
| 5.9 | Carregamento de baterias. | 77 |
| 5.10 | Carregamento das baterias manualmente. | 78 |
| 5.11 | Carregamento de baterias por rampa de referência: (a) 1 A/seg e (b) 0,4 A/seg | 79 |
| 5.12 | Tensão e corrente da fase A para um $I_{bat} = 3 A$ | 80 |
| 5.13 | Descarga de baterias. | 80 |
| 5.14 | Descarga das baterias por: (a) referência manual e (b) rampa de referência | 81 |
| 5.15 | Correntes em cada fase para uma corrente das baterias de: (a) $I_{bat} = 1,8 A$ e (b) $I_{bat} = 4,2 A$ | 82 |
| 5.16 | Tensão e corrente da fase A para um $I_{bat} = 1,8 A$ | 82 |
| 5.17 | Extração de energia dos painéis e injeção na rede elétrica. | 83 |
| 5.18 | Extração de energia dos painéis por: (a) referência manual e (b) rampa de referência | 84 |
| 5.19 | Correntes em cada fase para uma corrente de painéis de: (a) $I_{pv} = 1,8 A$ e (b) $I_{pv} = 4,2 A$ | 85 |
| 5.20 | Tensão e corrente da fase A para uma corrente nos painéis de: (a) $I_{pv} = 0 A$ e (b) $I_{pv} = 4 A$ | 85 |
| 5.21 | Extração de energia dos painéis e carregamento de baterias. | 86 |
| 5.22 | Extração de energia dos painéis e carregamento das baterias com: $I_{bat} = 3 A$ e $I_{pv} = 3 A$ | 87 |
| 5.23 | Extração de energia dos painéis e carregamento das baterias com: $I_{bat} = 1 A$ e $I_{pv} = 5,5 A$ | 87 |
| 5.24 | Tensão e corrente da fase A para diferentes valores de I_{bat} e I_{pv} | 88 |

Lista de Tabelas

- 3.1 Extração de energia dos painéis fotovoltaicos. 32
- 3.2 Carregamento das baterias. 33
- 3.3 Descarga das baterias. 33

Glossário

| | |
|-------------|--|
| ADC | <i>Analog to Digital Converter</i> |
| CA | Corrente Alternada |
| CC | Corrente Contínua |
| DAC | <i>Digital to Analog Converter</i> |
| DSP | <i>Digital Signal Processor</i> |
| IGBT | <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> |
| MPPT | <i>Maximum Power Point Tracking</i> |
| PCB | <i>Printed Circuit Board</i> |
| PI | Proporcional Integral |
| PLL | <i>Phase-Locked Loop</i> |
| PO | Perturbação e Observação |
| PWM | <i>Pulse-Width Modulation</i> |
| RMS | <i>Root Mean Square</i> |
| SPI | <i>Serial Peripheral Interface</i> |

1. Introdução

1.1 Panorama Energético

A exploração excessiva de energias não renováveis, mais propriamente dos combustíveis fósseis e a poluição que o seu aproveitamento acarreta, fez com que vários países adotassem novas medidas e optassem por novas formas de produção que não criassem tanto impacto ambiental e, ao mesmo tempo, fossem economicamente viáveis [1].

Hoje em dia, as energias renováveis desempenham um papel fundamental na produção de energia elétrica a nível mundial e trata-se de um tema em crescente evolução, sendo que apresentam diversas vantagens para a humanidade, tanto a nível económico e ambiental, como pessoal. Das várias vertentes existentes (eólica, solar, hidráulica, geotérmica, etc.) este documento foca-se apenas na energia proveniente do sol e em desenvolver um circuito capaz de melhorar e otimizar a sua produção.

Em Portugal, este tipo de energia reúne todos os recursos necessários para aumentar significativamente a sua produção, visto que, tem em média entre 2200 e 3000 horas de sol por ano no continente. Em comparação com outros países da Europa, a Alemanha por exemplo, apenas pode usufruir de 1200 a 1700 horas [2]. Apesar de possuir uma vantagem em relação a muitos países, este recurso não é aproveitado da melhor forma, e as principais razões remetem ao facto de serem necessárias infraestruturas complexas e dispendiosas para a captação de energia em grande escala. De toda a energia produzida no país, 68.2% derivam de energias renováveis, no entanto, os números tornam-se um pouco preocupantes quando apenas 3.9% desses 68% provém de energia solar [3].

1.2 Enquadramento

No âmbito do projeto nacional MEGASOLAR levado a cabo pela Universidade do Minho, a EFACEC e o ITECONS, o desenvolvimento desta dissertação de mestrado visa desenvolver um conversor CC-CC para interface de energias renováveis e dar continuidade à investigação realizada pelo Grupo de Eletrónica de Potência e Energia (GEPE) da Universidade do Minho. Este projeto procura uma nova gama de soluções de conversão para centrais fotovoltaicas de grande potência (mais de 50MW), incorporando numa única plataforma de conversão, as diversas vertentes do circuito de conversão de potência e interligação com a rede com vista à maximização potencial dos mesmos [4].

O projeto onde esta dissertação se encontra, consiste no desenvolvimento de um conversor CA-CC (desenvolvido por outro aluno) com ligação a um conversor CC-CC que realiza a interface entre painéis solares fotovoltaicos e sistemas de armazenamento de energia. Sendo assim, o conversor CA-CC é responsável pela interface com a rede elétrica garantindo correntes sinusoidais equilibradas. O conversor CC-CC tem por objetivo extrair energia dos painéis fotovoltaicos e carregar ou descarregar as baterias. O esquema elétrico deste projeto pode ser observado na figura 1.1.

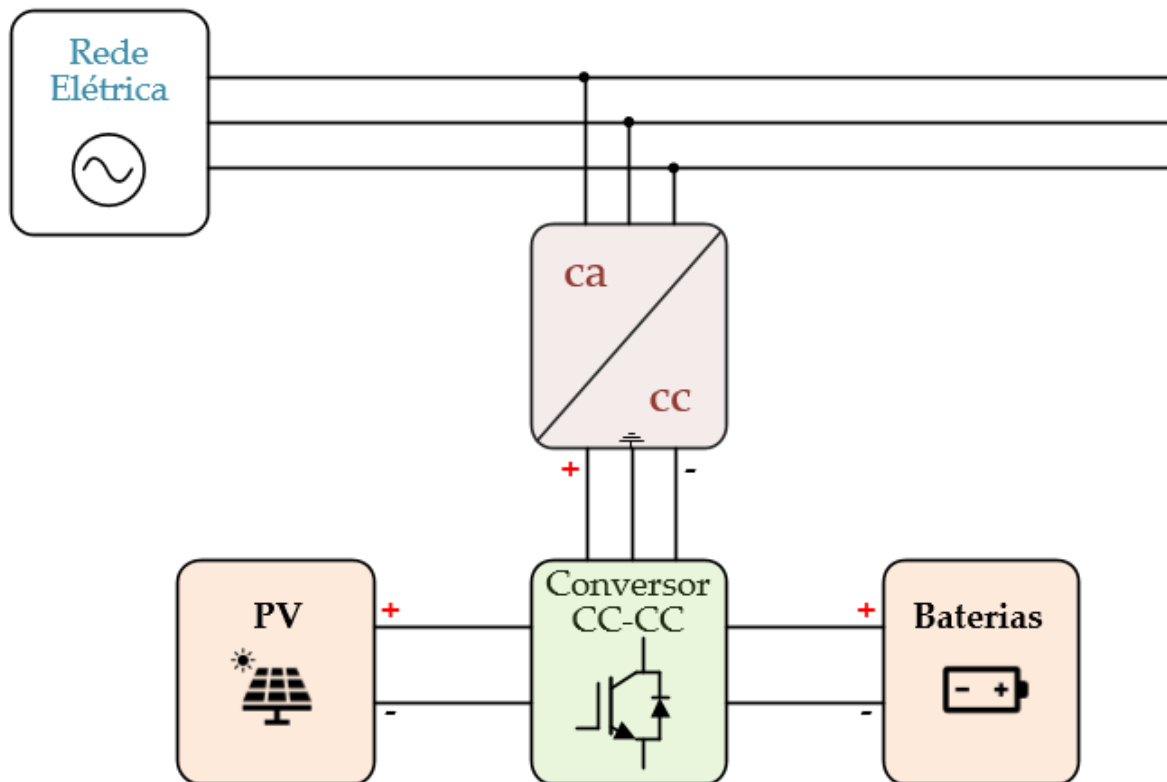


Figure 1.1: Esquema do sistema desenvolvido.

Assim, o principal objetivo desta dissertação é dar continuidade ao trabalho desenvolvido pelo GEPE e contribuir, nos possíveis, para o desenvolvimento de um conversor CC-CC mais eficiente, de modo a otimizar a captação de energia solar.

1.3 Motivação

A principal motivação na escolha desta dissertação deve-se ao facto de ser uma área em crescente evolução, que tem a particularidade de produzir eletricidade a partir da energia mãe na Terra, o sol. Graças à radiação solar o processo de fotossíntese da clorofila permite a sobrevivência dos seres vivos que habitam no planeta [5]. Sendo assim, juntando a necessidade de evoluir a par de um recurso ilimitado e indispensável, qualquer investigação realizada sobre este assunto acaba por ser relevante para a sociedade, e isso torna esta pesquisa ainda mais motivante. Por fim, para além dos motivos

referidos anteriormente, o facto de ser um tema que requer implementação de *hardware* e *software*, e posteriormente, validação experimental, foram outros contributos para facilitar a decisão deste tema.

1.4 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação passa por implementar um conversor CC-CC para interface com energias renováveis e sistemas de armazenamento de energia, neste caso, painéis fotovoltaicos, baterias e a rede elétrica. Para a realização desta dissertação, foram definidas algumas etapas, entre elas o desenvolvimento de *hardware* e *software*. Os objetivos são os seguintes:

- Estudo de sistemas solares fotovoltaicos, dos vários tipos de baterias e das várias topologias de conversores CC-CC;
- Realização de simulações computacionais;
- Dimensionamento e seleção dos circuitos a utilizar;
- Implementação do *hardware* em placas de circuito impresso;
- Validação experimental de cada circuito.

1.5 Organização e Estrutura

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos, separados em conformidade com o tema que cada um aborda.

No capítulo 1, denominado Introdução, são esclarecidos o tema e as motivações para a sua escolha, e também as principais etapas que serviram de alicerce para a realização do conversor.

No capítulo 2 é realizada uma análise mais aprofundada dos principais tipos de sistemas fotovoltaicos, dos tipos e características de baterias e um estudo acerca das várias topologias de conversores CC-CC.

No capítulo 3 são efetuadas todas as simulações computacionais para a implementação do conversor proposto e as devidas análises dos resultados. Posteriormente é feita a escolha e dimensionamento do material a ser utilizado neste projeto.

No capítulo 4 é descrita toda a implementação de *hardware* e *software* desenvolvida para os circuitos de potência e controlo.

No capítulo 5 são apresentados todos os resultados experimentais obtidos após a implementação do sistema. É então validado o correto funcionamento do conversor proposto.

Por último, no capítulo 6, são apontadas as conclusões que se podem reter com a realização desta dissertação, assim como as sugestões de trabalho futuro de forma a melhorar o protótipo desenvolvido.

2. Sistemas Fotovoltaicos, Sistemas de Armazenamento de Energia e Conversores CC-CC

2.1 Introdução

No decorrer deste capítulo, é feita uma revisão bibliográfica dos vários temas associados ao desenvolvimento de um conversor CC-CC para interface com painéis solares e sistemas de armazenamento de energia. Primeiro, são apresentados alguns conceitos fundamentais de maneira a introduzir uma ideia clara e concisa acerca de sistemas fotovoltaicos. O modo como é produzida a energia e os tipos de sistemas que cada indivíduo pode optar para uma futura instalação na sua habitação são abordados neste capítulo. Também é esclarecida, de uma forma sucinta, a temática dos sistemas de armazenamento de energia e a sua importância na anexação a sistemas fotovoltaicos. Depois, são abordadas as várias topologias de conversores CC-CC, essenciais na implementação de sistemas que utilizam a energia solar para a produção de energia elétrica. Como a utilização deste tipo de conversores implica a associação de alguns algoritmos de controlo, são abordadas teorias de controlo de carregamento das baterias, de MPPT e de controlo de corrente.

2.2 Sistemas Fotovoltaicos

O uso excessivo de combustíveis fósseis causou grandes danos ao ambiente e uma grande crise energética devido ao facto destes recursos serem cada vez mais escassos. De modo a solucionar este problema surgiram as fontes de energia renováveis, entre estas, os sistemas fotovoltaicos [6]. De acordo com [7], a quantidade de energia fornecida pelo sol à terra num dia é suficiente para cobrir a energia utilizada num ano.

Um sistema solar fotovoltaico baseia-se na produção de energia elétrica a partir da radiação solar incidente nos painéis, o processo é denominado efeito fotovoltaico, e só é possível graças às suas células fotovoltaicas, pois possuem materiais semicondutores. Um sistema fotovoltaico é constituído por uma

série de componentes que tem por base um painel fotovoltaico que dependendo do tipo de sistema a instalar, é acoplado a uma série de circuitos eletrônicos (conversores, inversores, ...).

2.2.1 Princípio de Funcionamento

O principal componente de uma célula solar é o silício, um elemento químico da família do carbono com estrutura cristalina. Quando a radiação solar incide nas células, os fótons criam uma tensão elétrica ao transferirem a sua energia para os elétrons presentes nos átomos de silício, forçando a sua deslocação (“efeito fotovoltaico”). No entanto, uma dispersão arbitrária de elétrons não é suficiente para gerar uma corrente elétrica, já que é essencial que o movimento seja contínuo e com o mesmo sentido. Mas graças às propriedades do silício a correta circulação dos elétrons é garantida. Posto isto, na fabricação das células fotovoltaicas são usados dois tipos de silício diferentes: de um lado, uma estrutura de silício com elétrons a mais; do outro, uma estrutura de silício com elétrons a menos. Quando os fótons embatem na primeira, os elétrons deslocam-se para a segunda. Gera-se assim uma corrente elétrica que posteriormente pode ser usada para diversos fins [8].

2.2.2 Tipos de Células Fotovoltaicas

A utilização de células fotovoltaicas para geração de energia solar tem sido o método mais popular nas últimas décadas. Posto isto, é necessário fazer uma seleção apropriada do tipo de célula a utilizar na implementação do sistema fotovoltaico. É importante referir que, as células fotovoltaicas, utilizadas de forma individual, não conseguem produzir valores significativos de energia, pelo que são associadas em série ou em paralelo de maneira a serem obtidas elevadas quantidades de tensão ou corrente. Do mesmo modo, a implementação de painéis solares, é realizada em série ou em paralelo, dependendo das necessidades do utilizador, mais tensão ou mais corrente. Assim sendo, é feita uma pequena descrição do tipo de células fotovoltaicas mais populares na aplicação de sistemas fotovoltaicos [9].

2.2.2.1 Células do Tipo Monocristalino

As células do tipo monocristalino utilizam silício monocristalino como material básico para a conversão de luz solar em energia elétrica. São produzidas a partir de um único cristal de silício, que é cortado em pequenas secções para ser usado na fabricação das células. As células monocristalinas são conhecidas pelo seu alto desempenho e eficiência, em comparação com outro tipo de células solares, chegando a obter um rendimento máximo de 20-25% em laboratório, o que significa que são capazes de converter uma boa parte de luz solar em energia elétrica. No entanto, a principal desvantagem deste tipo de células remete para o seu elevado custo, devido ao processo de produção mais complexo e ao uso de silício monocristalino de alta qualidade [10].

2.2.2.2 Células do Tipo Policristalino

As células do tipo policristalino utilizam silício policristalino como material básico para a conversão de luz solar em energia elétrica. Ao contrário das células monocristalinas, que são produzidas a partir de um único cristal de silício, as células policristalinas são feitas a partir de uma mistura de vários cristais de silício. A produção deste tipo de células é geralmente mais barata, pois o processo é menos complexo e requer menos silício de alta qualidade. Por outro lado, o rendimento não é tão elevado em comparação com as células monocristalinas, apresentando valores máximos que rondam os 18-20% em laboratório. Apesar de serem menos eficientes, as células policristalinas ainda são uma opção popular para a produção de energia solar, especialmente em sistemas de pequena e média escala, devido ao seu baixo custo e à sua facilidade de produção [9] [11].

2.2.2.3 Células de Silício Amorfo

As células solares de silício amorfo são uma forma alternativa de células solares que utilizam um tipo diferente de silício para converter a luz solar em energia elétrica. Em vez de usar silício cristalino, como nas células monocristalinas e policristalinas, as células de silício amorfo são feitas a partir de uma camada muito fina de silício amorfo depositada sobre um substrato de vidro ou metal. São produzidas através de um processo de deposição a vapor, o que as torna mais fáceis e mais baratas de produzir. Contudo, o rendimento destas células é normalmente mais baixo, com um rendimento máximo de 12% em laboratório. Apesar de serem menos eficientes do que outros tipos de células solares, as células de silício amorfo ainda são uma opção atraente para a geração de energia solar, especialmente para aplicações onde a flexibilidade e a forma são importantes, como em painéis solares que alimentam as baterias em veículos elétricos ou em painéis solares portáteis [9] [11].

2.2.3 Características dos Painéis Solares Fotovoltaicos

Para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, é necessário ter em conta as grandezas características das células fotovoltaicas. Normalmente, os fabricantes de painéis fornecem toda a informação nos seus *datasheets*, o que é importante para o cliente realizar os cálculos necessários e ter uma ideia da potência que vai instalar. As características técnicas são:

- **Corrente de curto-circuito:** valor de corrente máxima que atravessa a carga;
- **Tensão de circuito aberto:** valor de tensão máxima aos terminais do painel solar quando este se encontra em circuito aberto;
- **Potência máxima:** valor de potência máximo que o painel consegue fornecer;
- **Corrente nominal:** valor de corrente no qual a potência é máxima;

- **Tensão nominal:** valor de tensão no qual a potência é máxima.

A estas características ainda se pode adicionar o fator forma, definido por:

$$FF = \frac{P_{\text{mpp}}}{I_{\text{cc}}U_{\text{ca}}} \quad (2.1)$$

Que mede a relação entre a potência máxima que um painel pode produzir e a quantidade máxima de corrente e tensão que ele pode fornecer. Quanto maior for o fator forma, mais eficiente é o painel.

2.2.4 Tipos de Sistemas Solares Fotovoltaicos

Existem três grandes tipos de sistemas solares fotovoltaicos: sistemas isolados, sistemas híbridos e sistemas ligados à rede elétrica.

2.2.4.1 Sistemas Isolados

Este tipo de sistemas é dividido em dois: sistemas isolados com ligação direta e sistemas isolados com baterias. De forma sucinta, os sistemas isolados com ligação direta produzem energia e alimentam a aplicação em simultâneo, no entanto, só funcionam quando existe radiação solar para a alimentar. Um bom exemplo deste tipo de aplicação são as calculadoras de bolso [12].

No que toca aos sistemas isolados com baterias, o funcionamento em si é bastante semelhante ao referido anteriormente, mas com a grande diferença de integrar um elemento acumulador de energia. O objetivo é armazenar a energia produzida durante o dia em baterias, para o caso de existir consumo da mesma durante a noite [12].

2.2.4.2 Sistemas Ligados à Rede

Os sistemas ligados à rede elétrica não fornecem energia diretamente a um recetor nem a acumula em baterias, por sua vez são ligados diretamente à rede elétrica. A principal vantagem deste tipo de sistemas é que existem duas possibilidades para a entidade que produz a energia: ou a potência é vendida e todo o consumo é feito pela rede elétrica; ou apenas a energia produzida em excesso é vendida à companhia de eletricidade responsável [13].

Em qualquer um dos casos, já não são necessárias baterias nem controladores de carga como nos sistemas isolados, mas passa a ser preciso um conversor CA-CC capaz de converter a corrente contínua em alternada para ser injetada na rede.

2.2.4.3 Sistemas Híbridos

Por último, os sistemas híbridos combinam duas formas distintas de produzir energia. A produção de energia elétrica não provém apenas de painéis solares fotovoltaicos mas também de outra fonte de

energia como, por exemplo, um motor a *diesel* ou uma turbina eólica. O foco principal é produzir energia menos dependente do sol, dado que a segunda fonte de energia complementa os painéis solares [12].

2.2.5 Vantagens e Desvantagens dos Sistemas Fotovoltaicos

Posto isto, é de fácil percepção que com sistemas solares fotovoltaicos é possível produzir energia limpa e renovável. No entanto, quando o assunto remete para a instalação de painéis solares numa habitação, há alguns aspetos a serem considerados.

As vantagens de instalar painéis solares para autoconsumo passam por amortizar a necessidade de uso da energia da rede, que por sua vez ajuda numa poupança significativa na conta de eletricidade. Além disso, trata-se de uma energia limpa e renovável, que tem como consequência a redução imediata da pegada ecológica, isto porque não há emissões de carbono nem gases poluentes para a atmosfera.

Por outro lado, a instalação de painéis também possui algumas desvantagens, sendo uma das principais o custo elevado que a mesma acarreta. É importante salientar que a produção de energia depende bastante das condições meteorológicas, sendo que em dias nublados ou de chuva há uma redução da produção. É ainda possível referir que nem todos os telhados são aptos para realizar a instalação de um painel fotovoltaico, pois existem mais dois fatores relevantes: a orientação e inclinação dos mesmos, o que leva a problemas de otimização e rendimento do sistema [14] [15] [16].

2.3 Sistemas de Armazenamento de Energia

As tecnologias de armazenamento de energia têm um papel essencial em parceria com as fontes de energia renovável nos sistemas modernos de energia elétrica. Proporcionam uma maior estabilidade e flexibilidade aos sistemas de energia, permitindo a utilização de energias renováveis, por exemplo, em *smart grids*. A principal vantagem dos sistemas de armazenamento de energia é a capacidade de preservar energia produzida num determinado instante para utilização futura. No caso dos painéis fotovoltaicos torna-se um benefício a associação de um sistema de armazenamento de energia, de maneira a compensar a sua ausência em períodos que os sistemas fotovoltaicos não são capazes de gerar eletricidade (durante a noite) [17].

Dos vários tipos de sistemas de armazenamento de energia, alguns deles são: as baterias eletroquímicas, ultracondensadores, *Flywheels* e armazenamento de energia por ar comprimido. As baterias acabam por ser o método mais popular para armazenar energia, não só por apresentarem grande viabilidade em pequenas aplicações, mas também pela simplicidade da sua utilização [18].

2.3.1 Tecnologias de Baterias

Os quatro principais tipos de baterias são as de ácido-chumbo, níquel-cádmio, níquel-hidreto metálico e íões lítio. Algumas das principais vantagens e desvantagens da sua utilização são apresentadas nos

próximos tópicos.

2.3.1.1 Baterias Ácido-Chumbo

As baterias de ácido-chumbo têm sido bastante utilizadas durante os últimos cem anos. Oferecem uma solução económica e comprovada em aplicações fotovoltaicas e microeólicas. Por outro lado, a sua utilização em sistemas de energia renováveis urbanos é limitada devido à baixa densidade de energia, ao ciclo de vida relativamente curto e por não ser uma solução amiga do ambiente (são bastante poluentes caso não sejam eliminadas devidamente ou recicladas). No entanto, continua a ser uma opção bastante competitiva principalmente pelos baixos requisitos de manutenção e taxas de auto descarga relativamente baixas [18] [19].

2.3.1.2 Baterias Níquel-Cádmio

As baterias de níquel-cádmio possuem uma densidade de energia mais elevada, baixos requisitos de manutenção e maior ciclo de vida. Contudo, são bastante mais poluentes e com taxas de auto descarga mais elevadas que as baterias de ácido-chumbo, para além do facto de custarem até 10 vezes mais, o que a torna numa alternativa muito cara [18] [19].

2.3.1.3 Baterias Níquel-Hidreto Metálico

As baterias de níquel-hidreto metálico são consideradas uma melhoria das baterias de níquel-cádmio. São frequentemente utilizadas em veículos elétricos híbridos e nas telecomunicações, podendo substituir facilmente as baterias de níquel-cádmio no mercado das comunicações e da eletrónica portátil. Comparativamente, possuem o mesmo ciclo de vida, são amigas do ambiente e têm uma gama de capacidade adicional que vai dos 25 aos 40% [18] [19].

2.3.1.4 Baterias Iões de Lítio

As baterias de iões lítio possuem a maior densidade de energia entre todos os tipos de baterias referidos até agora. Atualmente, dominam o mercado da eletrónica portátil como computadores, telemóveis, etc. Em relação às baterias mencionadas estas possuem bastantes características a seu favor tais como: baixa taxa de auto descarga, alto rendimento, amiga do ambiente (não possui materiais tóxicos) e boa condutividade elétrica. O grande inconveniente do uso deste tipo de baterias passa pelos seus elevados custos, o facto de serem sensíveis a temperaturas elevadas e a sua intolerância a descargas profundas [17] [18] [19].

2.3.2 Características das Baterias

Para realizar o dimensionamento de um sistema que utiliza baterias é necessário ter em conta as suas características de modo a satisfazer as condições de funcionamento do sistema [20]. Em seguida, são apresentadas as principais características de uma bateria:

- **Capacidade:** é expressa em ampère-hora (Ah) e representa o valor teórico da corrente que a bateria é capaz de fornecer durante uma hora de funcionamento;
- **Tensão:** tensão nominal disponível nos terminais da bateria;
- **Tempo de descarga:** tempo que corresponde à duração do processo de descarga da bateria;
- **Densidade energética:** quantidade de energia que uma bateria é capaz de fornecer por unidade de volume, para uma dada taxa de descarga;
- **Energia específica:** quantidade total de energia que uma bateria pode fornecer por unidade de massa para uma dada taxa de descarga. É expressa em Wh/ kg;
- **Vida-útil:** representa o número de vezes que uma bateria pode ser carregada e descarregada sem sofrer danos;
- **Taxa de auto descarga:** quantidade de carga perdida pela bateria, expressa em percentagem, mesmo quando esta não se encontra em funcionamento.

2.4 Conversores CC-CC

Os conversores CC-CC são circuitos de eletrônica de potência responsáveis por converter uma tensão ou corrente contínua com uma certa amplitude, numa nova tensão ou corrente contínua com uma amplitude desejada. A sua tensão de saída pode ter um valor acima, abaixo ou igual ao valor da tensão de entrada e o principal foco é manter esse valor independentemente das variações que ocorrem na entrada. Trata-se de conversores bastante utilizados em ambiente industrial como em dispositivos de baixa potência presentes no dia a dia de cada pessoa [21].

Inclusive, podem ser classificados como unidirecionais ou bidirecionais e também como sendo isolados ou não isolados, caso possuam ou não isolamento galvânico entre o sinal de entrada e o de saída.

Existem várias topologias de conversores CC-CC, quando se trata de conversores não isolados, que são normalmente utilizados em circuitos de baixa potência, as principais topologias são: o *buck*, o *boost* e o *buck-boost*. Quando é necessário isolar a entrada da saída, as topologias mais utilizadas são o *flyback* e o *forward* para baixas potências, e os conversores *push-pull*, em meia ponte ou ponte completa para circuitos de elevada potência [21].

2.4.1 Conversor Buck

No conversor *buck*, ou *step-down*, a tensão de entrada é diminuída conforme as comutações do IGBT, o que permite produzir uma tensão inferior à saída. Trata-se de um conversor bastante usado em sistemas de carregamento de baterias e controlo de velocidade de motores CC. O circuito é simples e os seus principais componentes são: um IGBT, um diodo, uma bobina e um condensador. A tensão de saída é constante visto que o condensador realiza um processo de filtragem e então a corrente medida na resistência tem um valor contínuo. Esta tensão é controlada pelas comutações a *ON* e *OFF* do semiconductor a uma taxa fixa, mas com um *duty-cycle* variável [22].

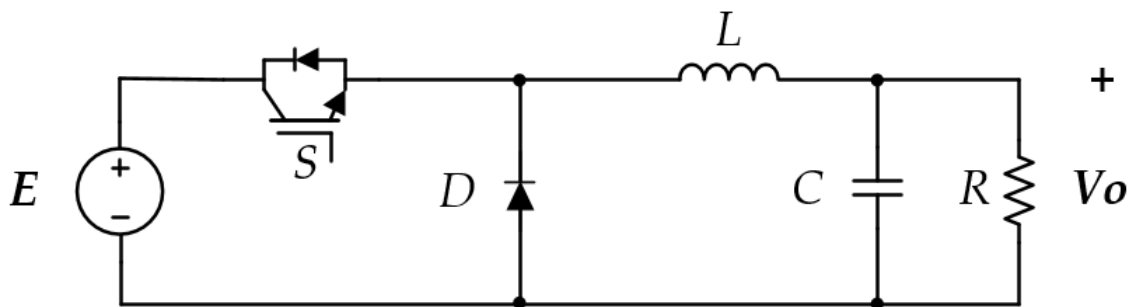


Figure 2.1: Conversor buck.

Caso S se encontre em condução, a energia é transferida para a bobina e para o condensador, o diodo fica inversamente polarizado. Assim que S desliga, o diodo entra em condução, o que faz com que continue a haver corrente na bobina, fazendo com que esta forneça energia ao condensador e à carga [23].

Variando então o *duty-cycle* a tensão de saída do conversor (V_o) varia como uma fração da tensão de entrada (E).

2.4.2 Conversor Boost

Tal como no conversor *buck*, o conversor *boost*, ou *step-up*, utiliza os mesmos componentes, no entanto, posicionados de maneira diferente de modo a elevar a tensão de saída em relação à tensão de entrada. É aplicado na interface de painéis fotovoltaicos e na regulação de fontes de alimentação CC.

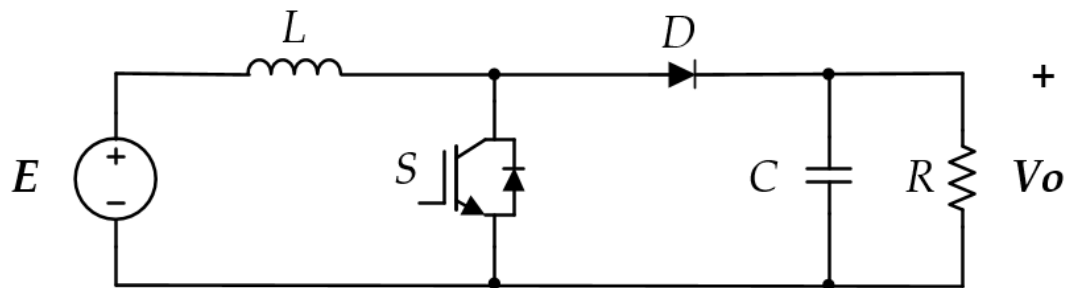


Figure 2.2: Conversor *boost*.

Quando S está ativo, a tensão de entrada é aplicada à bobina e o diodo fica inversamente polarizado, acumulando energia em L. Posteriormente esta energia é fornecida ao condensador e à carga assim que S se desliga, uma vez que o diodo entra em condução. Como a corrente flui pela fonte, pela bobina, pelo diodo e pela carga e recarrega o condensador, faz com que a tensão de saída seja superior à tensão de entrada [22] [23].

2.4.3 Conversor Três Níveis do Tipo Boost

O conversor de três níveis do tipo *boost* é composto por dois IGBT, dois diodos, dois condensadores e uma bobina. Embora o ganho estático deste conversor seja igual ao referido anteriormente, a tensão em cada semicondutor é metade da tensão total de saída, o que traz algumas vantagens associadas. As perdas por comutação são reduzidas e os níveis de interferência magnética são minimizados [24].

Relativamente ao seu funcionamento, existem quatro modos de operação. No primeiro, S1 e S2 estão ativos e ambos os diodos inversamente polarizados, pelo que a tensão na saída do conversor é zero ($x_o = 0\text{ V}$ e $y_o = 0\text{ V}$). No segundo modo, S1 está ativo e D2 diretamente polarizado, estando S2 inativo e D1 inversamente polarizado. O resultado à saída é $V_{dc}/2$ ($x_o = 0\text{ V}$ e $y_o = V_{dc}/2\text{ V}$). No terceiro modo, S2 está ativo e D1 diretamente polarizado, enquanto S1 está inativo e D2 inversamente polarizado. A tensão entre os pontos x_o e y_o é $V_{dc}/2$ ($x_o = V_{dc}/2\text{ V}$ e $y_o = 0\text{ V}$). Por fim, no quarto modo ambos os IGBT estão inativos e os diodos diretamente polarizados, o que resulta numa diferença de potencial de $V_{dc}/2$ em x_o e $V_{dc}/2$ em y_o .

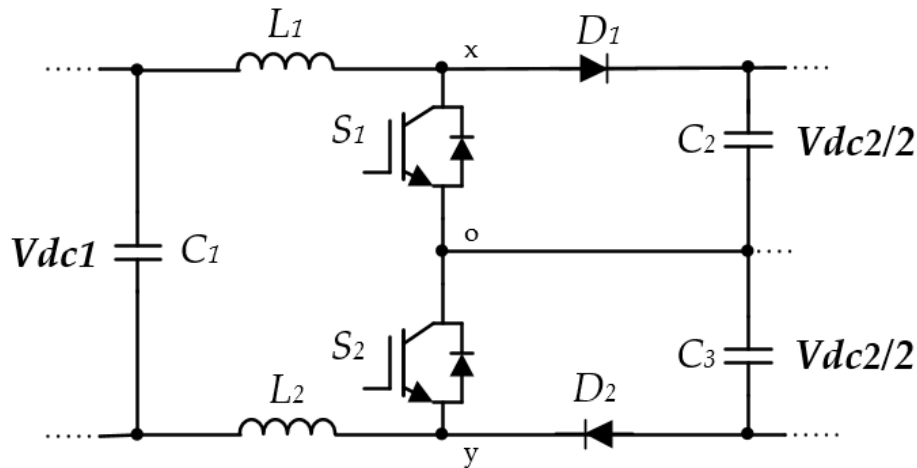


Figure 2.3: Conversor três níveis do tipo boost.

2.4.4 Conversor Buck-Boost

Esta topologia *buck-boost*, ou *step-up-down*, resulta duma combinação dos conversores *buck* e *boost*, posto isto os componentes voltam a ser os mesmos, mas agrupados de maneira diferente. A função deste conversor é baixar ou elevar a tensão de saída em relação à tensão de entrada através da variação do *duty-cycle*. É importante referir que nesta topologia a tensão de saída tem polaridade inversa à tensão de entrada [22].

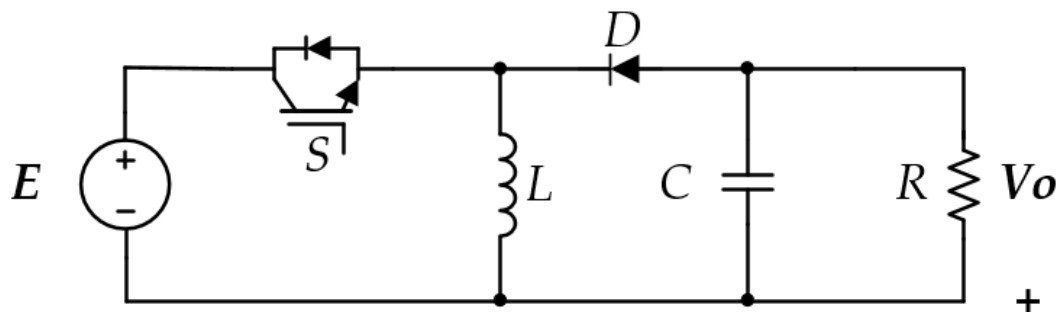


Figure 2.4: Conversor buck-boost.

Quando S está em condução o diodo está inversamente polarizado e a energia da fonte é transferida para a bobina, ao mesmo tempo o condensador vai alimentando a carga. Assim que S deixa de estar em condução a energia armazenada em L é fornecida ao condensador e à carga [23].

Este conversor funciona como *step-down* caso o *duty-cycle* aplicado seja inferior a 50%, e como *step-up* se superior a 50%. No entanto, é de notar que a tensão de saída é invertida em relação à tensão de entrada.

2.4.5 Conversor Buck-Boost Symmetrical

Este tipo de conversor é designado *buck-boost symmetrical*, pois consiste numa simetria superior e inferior que tem por referência o ponto médio do barramento CC. É constituído por quatro IGBT, duas bobinas e três condensadores. Uma característica bônus desta topologia é permitir o fluxo bidirecional, particularidade esta que é muito utilizada em sistemas de armazenamento de energia. Por exemplo, tem a capacidade de efetuar o carregamento de baterias (num determinado sentido), assim como permite utilizar essa energia armazenada para alimentar uma carga ou injetá-la na rede elétrica (no sentido oposto). Seguindo a nomenclatura da figura abaixo, este tipo de circuito opera como *buck* caso seja conectada uma fonte de alimentação em V_{dc1} e uma carga em V_{dc2} e, conseqüentemente, como *boost* caso seja ligada uma fonte de alimentação em V_{dc2} e uma carga em V_{dc1} .

Durante o funcionamento em modo *buck*, os IGBT S1 e S4 entram em funcionamento e S2 e S3 permanecem inativos, sendo somente utilizado o diodo reverso de cada. Se S1 está ativo a tensão em x_o é $V_{dc}/2$ e zero em o_y , por outro lado, se apenas S4 está ativo x_o é 0 V e o_y é $V_{dc}/2$. Quando ambos se encontram em condução, a tensão entre os pontos x_o e o_y é $V_{dc}/2$ em cada um deles, no entanto, caso estejam inativos a tensão passa a ser 0 V em x_o e o_y .

Alternando para o funcionamento em modo *boost*, é a vez de S2 e S3 comutarem e S1 e S4 ficam inativos. Quando S2 está ativo e S3 desligado a tensão entre os pontos x_o é 0 V e o_y é $V_{dc}/2$. Do mesmo modo, se S3 está ativo e S2 não, a tensão nos pontos x_o é $V_{dc}/2$ e nos pontos o_y é 0 V. Contrariamente ao funcionamento em modo *buck*, quando ambos se encontram ativos a tensão é 0 V nos pontos x_o e o_y . Caso estejam inativos, a tensão entre os pontos x_o é $V_{dc}/2$ e entre os pontos o_y é igualmente $V_{dc}/2$ [25].

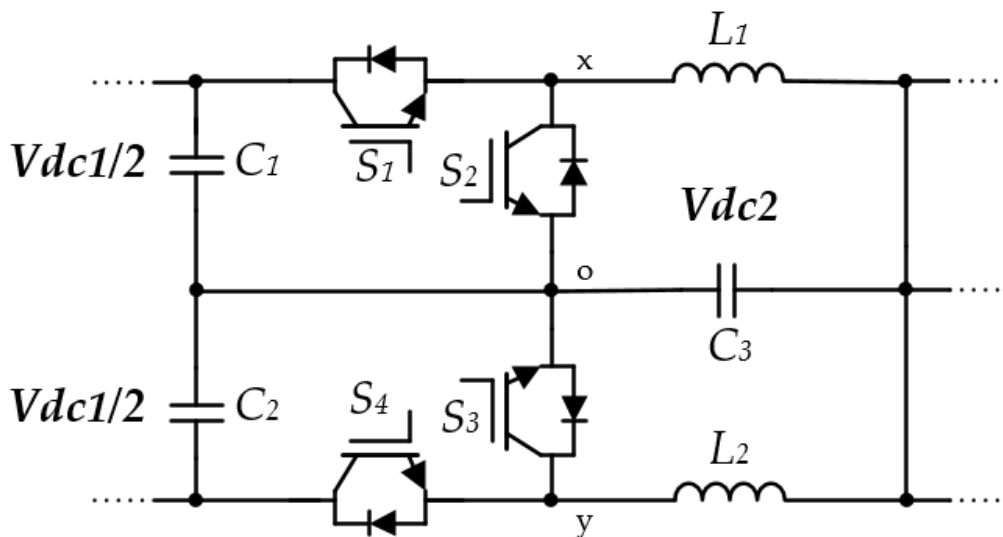


Figure 2.5: Conversor *buck-boost symmetrical*.

2.4.6 Conversor Buck-Boost Asymmetrical

O conversor *buck-boost asymmetrical* é designado desta forma pois apresenta uma assimetria superior e inferior em relação ao ponto médio do barramento CC. Tal como a topologia referida anteriormente esta também funciona em modo bidirecional, pode operar como *buck* num sentido e como *boost* no sentido oposto.

Para o funcionamento em modo *buck*, são usados os IGBT S1 e S4 e os diodos reversos dos IGBT S2 e S3. Quando S1 está ligado a tensão em *xo* é $V_{dc}/2$ V e quando está desligado a tensão passa a ser 0 V. Da mesma forma, quando S4 está a *ON* a tensão em *oy* é $V_{dc}/2$ V e quando está a *OFF* é 0 V. Quando ambos estão ligados a tensão *xo* é $V_{dc}/2$ V e a tensão *oy* também é $V_{dc}/2$ V, assim que os dois deixam de comutar a tensão nestes pontos passa a ser 0 V.

Durante a operação em modo *boost* os IGBT S1 e S4 estão sempre *OFF*, utilizando apenas os diodos reversos. Quando o IGBT S2 está ativo a tensão *xo* é 0 V e quando está inativo a tensão é $V_{dc}/2$ V. De igual modo, se S3 estiver ligado a tensão *oy* é 0 V e passa a ser $V_{dc}/2$ V assim que se desliga. Quando os IGBT S2 e S3 estão *ON* a tensão em *xo* é 0 V e em *oy* também é 0 V, caso ambos fiquem inativos a tensão nestes pontos é $V_{dc}/2$ V [25].

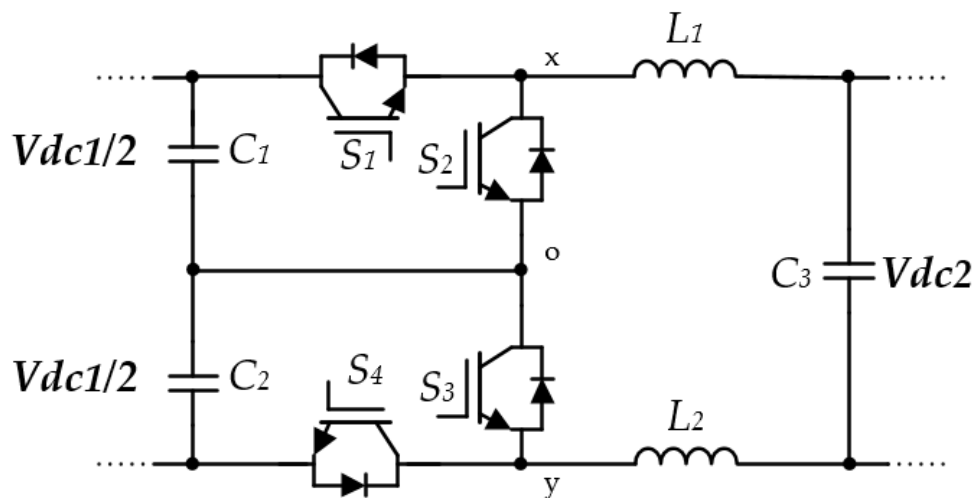


Figure 2.6: Conversor *buck-boost asymmetrical*.

2.4.7 Conversor Flyback

O conversor *Flyback* é um conversor do tipo isolado e também deriva da topologia *Buck-boost*. Os seus componentes são: um transformador de alta frequência, um IGBT em série com o enrolamento primário do transformador, e do lado secundário, um diodo e um condensador onde é eventualmente associada uma carga.

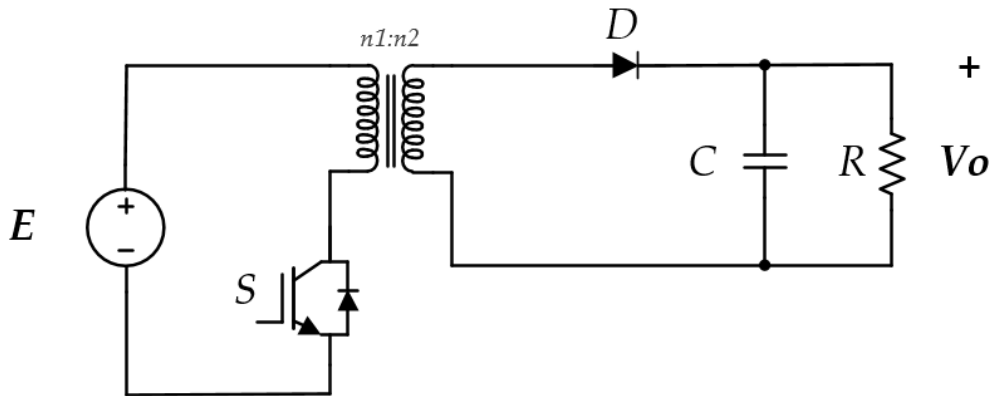


Figure 2.7: Conversor *flyback*.

Quanto ao seu funcionamento quando S está ligado a energia é armazenada no enrolamento primário, assim que se dá a comutação para *OFF*, há uma perturbação no fluxo. O diodo passa a estar diretamente polarizado e a energia armazenada é transferida para o condensador através do enrolamento secundário. Posto isto, quando o IGBT voltar a comutar e ficar ativo, a energia que anteriormente tinha sido armazenada no condensador é fornecida a uma eventual carga que possa existir.

A razão entre a tensão de saída e a tensão de entrada não é totalmente dependente da razão do transformador, mas também da quantidade de energia acumulada em $L1$, do tempo que S está a *ON*, etc [27].

2.4.8 Conversor Forward

Semelhante ao conversor *flyback*, o conversor *forward* usa um transformador para subir e baixar a tensão de saída (dependendo da razão de transformação) e fornece isolamento à carga.

Ao contrário do *flyback*, este conversor não armazena energia durante o tempo de condução, ao invés disso a energia é passada diretamente para a saída, por ação do transformador, durante a fase de comutação de S .

Enquanto a tensão de saída do *flyback* é teoricamente infinita, a tensão máxima deste conversor é restringida pela razão do transformador [27].

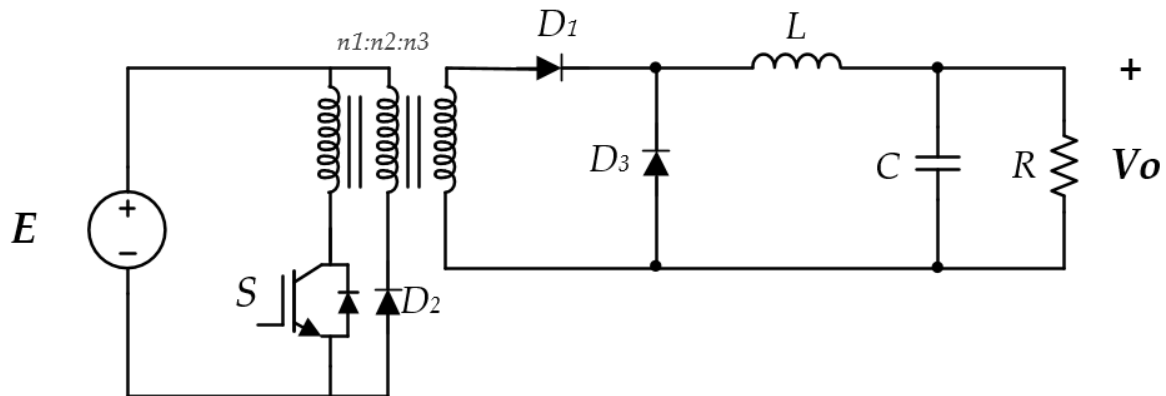


Figure 2.8: Conversor forward.

2.4.9 Conversor Full-Bridge

O conversor *full-bridge* isolado é um dos conversores isolados mais utilizados na atualidade [28] [29] [30]. O controle de fluxo neste tipo de conversores pode ser efetuado de duas formas distintas, uma através da variação do *duty-cycle* da tensão de entrada no enrolamento primário do transformador, e outra fixando o *duty-cycle* em 50% e variar apenas o ângulo de fase entre a tensão aplicada ao enrolamento primário e a tensão aplicada ao enrolamento secundário do transformador, a qual se designa de *phase-shift*.

O controle por variação do *duty-cycle* consiste em controlar ambos os conversores individualmente, é utilizado um deles para transferir energia do primário para o secundário, e outro para transferir energia no sentido oposto, isto é, do secundário para o primário. De modo a transferir energia do lado primário para o secundário são utilizados os IGBT do primeiro conversor e os diodos reversos do segundo conversor para retificar a tensão à saída do transformador de alta frequência.

Na técnica de controlo *phase-shift* o objetivo é controlar os dois conversores simultaneamente. Esta teoria consiste em fixar o *duty-cycle* dos conversores e de modo a transferir energia do lado primário para o secundário, a tensão aplicada ao secundário tem de estar atrasada em relação à tensão aplicada ao primário. No sentido oposto, caso o objetivo seja transferir energia do lado secundário para o primário, a tensão aplicada ao enrolamento secundário tem de estar adiantada em relação à tensão aplicada no primário [25].

Por último, é importante realçar que este conversor opera em modo bidirecional, mas também permite operar em modo unidirecional. Para isso, apenas a técnica de variação do *duty-cycle* é válida, visto que é necessário substituir os IGBT de um dos conversores por diodos.

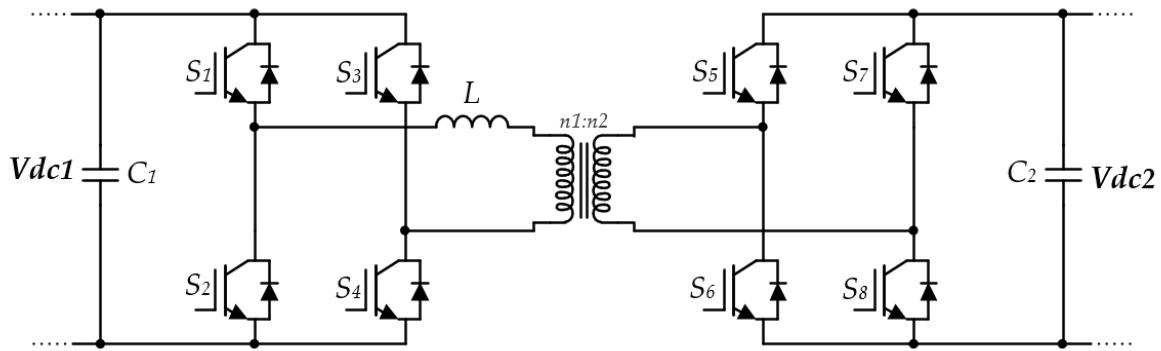


Figure 2.9: Conversor full-bridge.

2.4.10 Conversor Half-Bridge

O conversor *half-bridge* isolado também é uma topologia bastante utilizada e tem a vantagem de não necessitar de tanto hardware para ser implementado, a principal diferença em relação ao conversor CC-CC *full-bridge* consiste na tensão aplicada aos enrolamentos do transformador, que passa a ser $+V_{dc}/2$ (a tensão nos IGBT é a mesma $+V_{dc}$). Para o controlo de fluxo de energia esta topologia também permite a utilização das duas técnicas referidas anteriormente, *duty-cycle* e *phase-shift*. Tal como o conversor *full-bridge*, esta topologia pode ser facilmente convertida de maneira a operar em modo unidirecional.

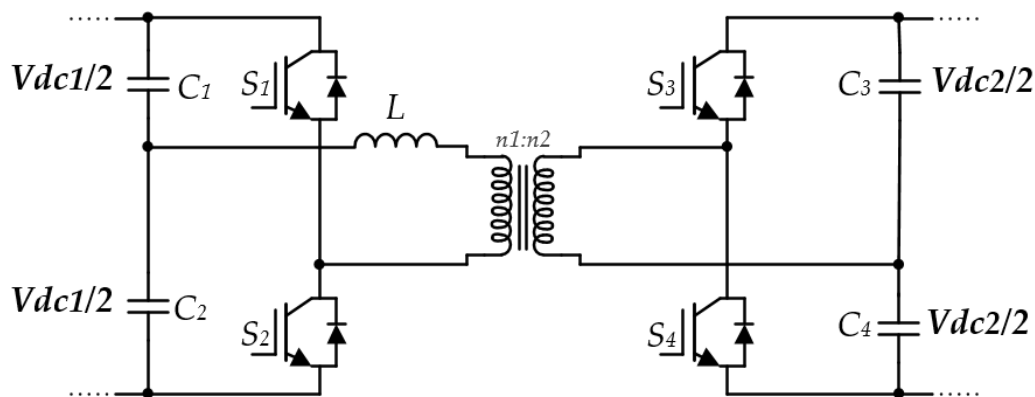


Figure 2.10: Conversor half-bridge.

2.5 Algoritmos de Carregamento de Baterias

Os algoritmos de carregamento são utilizados com o objetivo de preservar a vida útil de uma bateria e variam quanto ao seu princípio de funcionamento, à simplicidade de implementação e à sua eficácia. A seleção de qual algoritmo utilizar para o carregamento de uma bateria depende da natureza do tipo de bateria a ser utilizada, pois nem todas podem ser carregadas com o mesmo método, nem com as mesmas tensões ou correntes. Abaixo são apresentados os três algoritmos mais utilizados:

2.5.1 Algoritmo de Corrente Constante

Este algoritmo consiste na aplicação de uma corrente constante à bateria, num único estágio, pelo que o carregador funciona como uma fonte de corrente constante. Assim que a tensão nominal da bateria é atingida, o processo de carregamento fica concluído. Variando a intensidade da corrente é possível aumentar ou diminuir o tempo de carregamento de uma bateria. No entanto, caso a corrente seja muito elevada causa um aumento da temperatura da bateria e, ainda, a probabilidade de sobrecarga também aumenta. Este algoritmo de carregamento é normalmente utilizado para baterias de Níquel-cádmio [31].

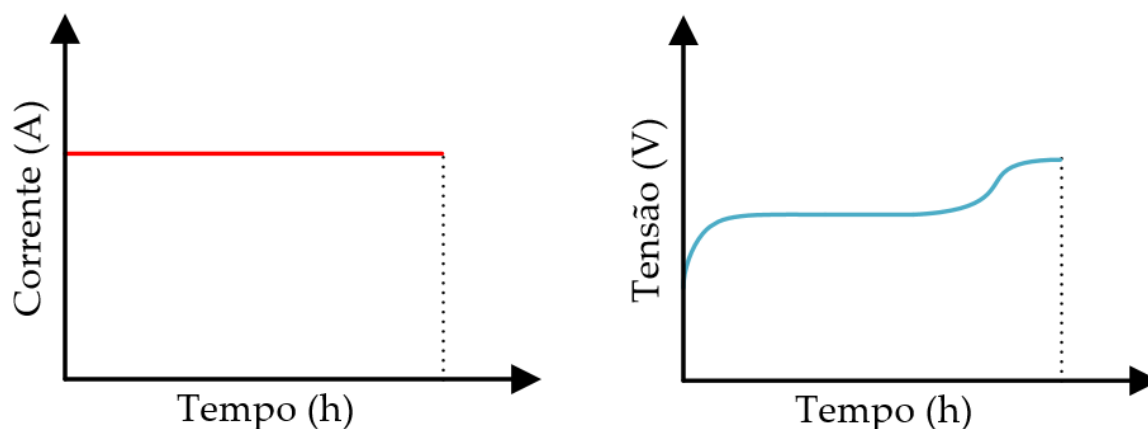


Figure 2.11: Formas de onda na bateria com carregamento por corrente constante.

2.5.2 Algoritmo de Tensão Constante

Este tipo de método de carregamento consiste em aplicar uma tensão constante à bateria enquanto a corrente varia ao longo do tempo, pelo que o carregador funciona como uma fonte de tensão constante. É composto por um único estágio, sendo o seu controlo de fácil implementação. À medida que a tensão da bateria se aproxima da sua tensão nominal, a corrente vai diminuindo. O fim do carregamento é ditado pela corrente e acontece quando esta se aproxima de zero. Na figura 2.12 é possível ver o comportamento da tensão e da corrente ao longo do tempo.

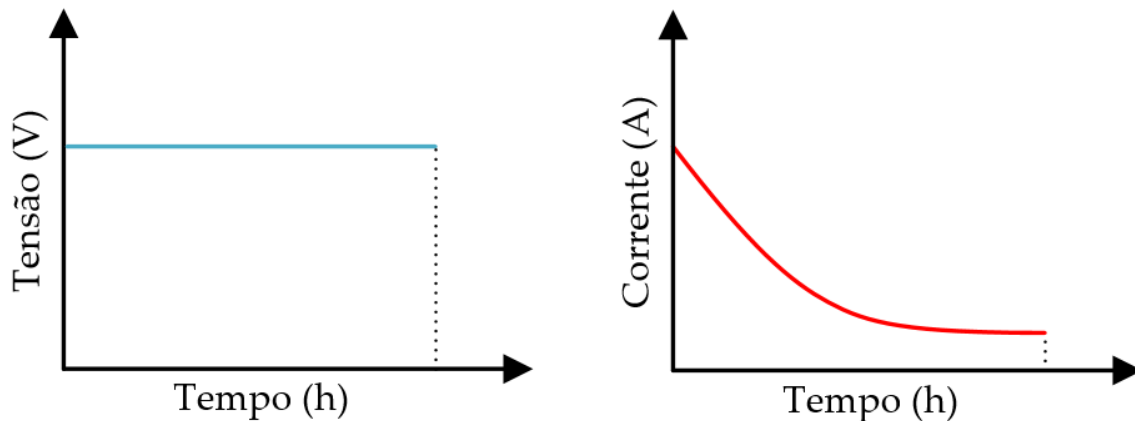


Figure 2.12: Formas de onda na bateria com carregamento por tensão constante.

É necessário optar por um valor de tensão de carga apropriado à bateria que está a ser utilizada, de modo a evitar sobrecargas e consequentemente a destruição da bateria. Este algoritmo de carregamento é muitas vezes aplicado às baterias que apresentem chumbo na sua constituição [31] [32].

2.5.3 Algoritmo de Corrente Constante Seguido de Tensão Constante

O algoritmo de corrente constante seguido de tensão constante incorpora os dois métodos referidos anteriormente. Numa primeira fase, o carregamento é feito pelo método de corrente constante provocando um aumento da tensão. Assim que a tensão atingir um valor pré-definido, ditado pelo fabricante, dá-se a comutação para o carregamento pelo método de tensão constante. Normalmente, esta comutação acontece quando a bateria se encontra entre os 60 – 80% do seu estado de carga. O carregamento é finalizado quando a corrente da bateria for inferior ao valor de corrente estipulado pelo fabricante. Geralmente, este algoritmo de carregamento é utilizado em todos os tipos de baterias referidos anteriormente, e o seu comportamento evolutivo pode ser observado na figura 2.13 [31].

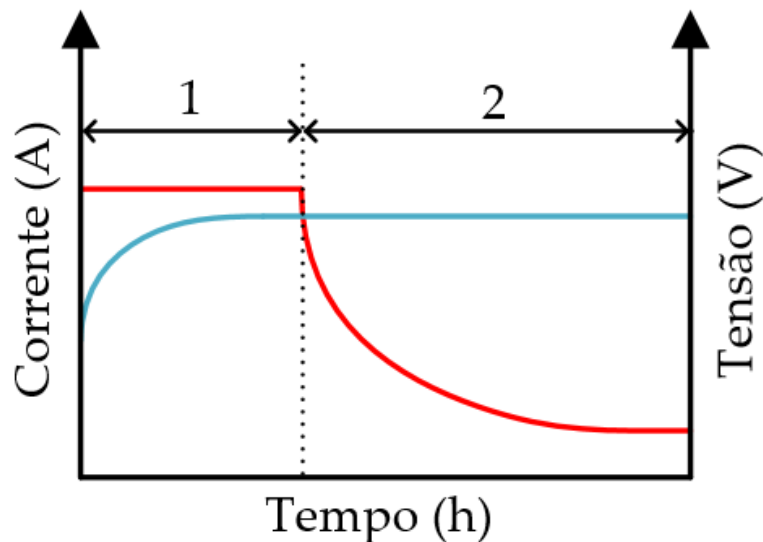


Figure 2.13: Formas de onda na bateria com carregamento por corrente constante seguido de tensão constante. (1) Estágio de corrente constante (2) Estágio de tensão constante

2.6 Algoritmo de Controle MPPT

O algoritmo de controlo *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) é bastante utilizado em sistemas de produção de energia fotovoltaica com o objetivo de retirar a máxima potência do sistema.

Infelizmente, a produção de energia solar é volátil uma vez que depende única e exclusivamente das circunstâncias ambientais. Com isto, é bastante difícil extrair a potência máxima de um painel fotovoltaico porque este valor é bastante variável. De modo a tirar partido do máximo aproveitamento de painéis solares, o algoritmo MPPT é implementado para encontrar o ponto da curva tensão vs corrente que gera o valor máximo de potência. Estando este ponto constantemente a ser alterado, o algoritmo MPPT tem a missão de o encontrar e assim permitir que o conversor consiga fazer continuamente a extração máxima de potência [33] [34] [35].

Em seguida, serão apresentados alguns dos diversos algoritmos MPPT existentes, bem como o seu princípio de funcionamento e vantagens e desvantagens da sua implementação.

2.6.1 Perturbação e Observação (P&O)

O algoritmo de Perturbação e Observação (P&O) é um dos mais utilizados em sistemas fotovoltaicos para extrair a máxima potência de um painel graças à sua simplicidade e facilidade de implementação. São apenas necessários dois sensores, um para corrente e outro para a tensão, para medir as variáveis de saída do painel. A potência é calculada pelo resultado do produto desses dois parâmetros e é feita a sua leitura periódica antes e após uma perturbação na variável de referência. Posto isto, é analisado o valor de potência gerado no instante anterior à perturbação e comparado posteriormente com o valor

de potência gerado naquele instante, o resultado vai determinar o sentido da próxima perturbação. Caso a potência aumente, a perturbação continua no mesmo sentido, por outro lado, caso a potência diminua relativamente à medida anteriormente, a perturbação é feita no sentido oposto. Nas figuras abaixo encontram-se o fluxograma deste algoritmo MPPT e a estrutura típica de controlo P&O [36] [37].

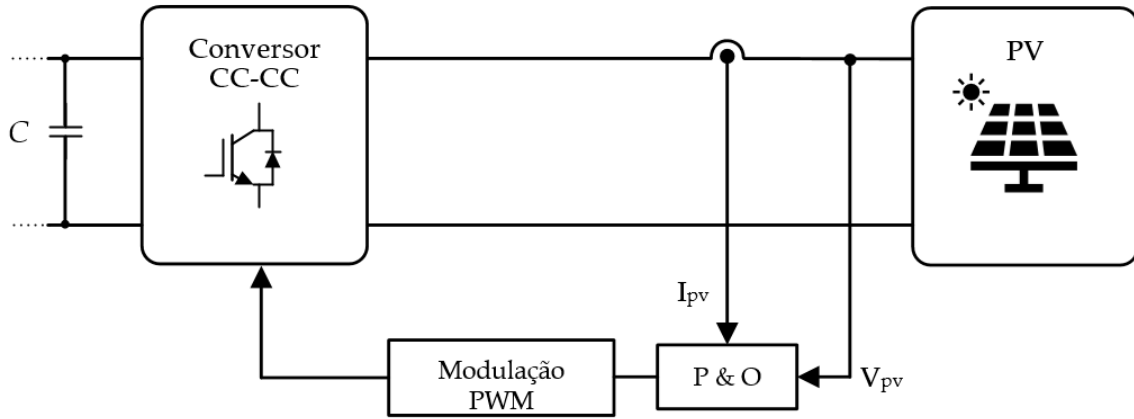


Figure 2.14: Estrutura do controlo P&O.

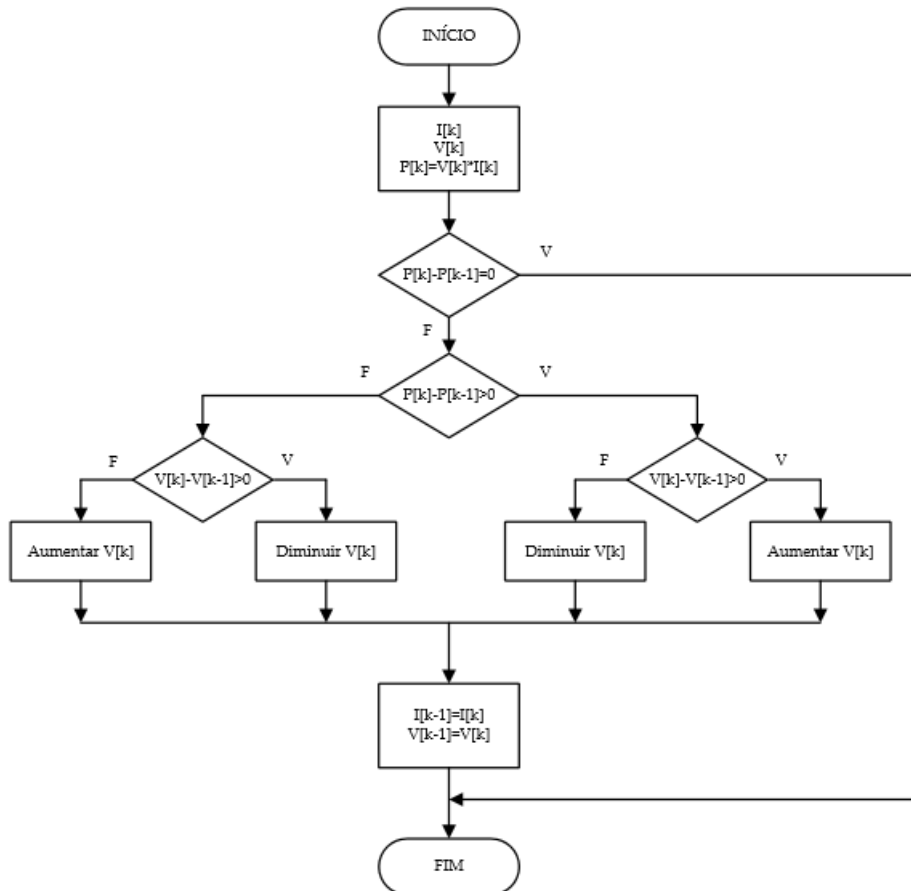


Figure 2.15: Fluxograma do algoritmo P&O.

2.6.2 Condutância Incremental (IC)

O algoritmo de Condutância Incremental tem por base que a derivada da potência em relação à tensão tem de ser zero de maneira a poder ser extraída a potência máxima do sistema como indica a seguinte equação.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Leftrightarrow \frac{d(IV)}{dV} = 0 \Leftrightarrow I + V \frac{dI}{dV} = 0 \Leftrightarrow I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} = 0 \Leftrightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \quad (2.2)$$

A partir desta equação é possível verificar se o sistema está a operar à direita ou à esquerda do ponto de potência máxima ou se já se encontra no local pretendido:

- $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$, ponto de máxima potência;
- $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$, à esquerda do ponto de máxima potência;
- $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$, à direita do ponto de máxima potência.

Posto isto, quando a derivada é 0, o sistema está a operar no ponto de potência máxima, se a derivada for positiva significa que o ponto de operação está à esquerda do ponto de potência máxima e se for negativa, o ponto de operação está à direita do ponto de potência máxima. Semelhante ao método P&O, o algoritmo de condutância incremental faz uma perturbação na variável de referência e escolhe o seu sentido dependendo do ponto de operação que o sistema se encontra. Este procedimento é repetido até ser achado o ponto de potência máxima [36] [37].

Na seguinte figura é possível observar o fluxograma deste algoritmo MPPT.

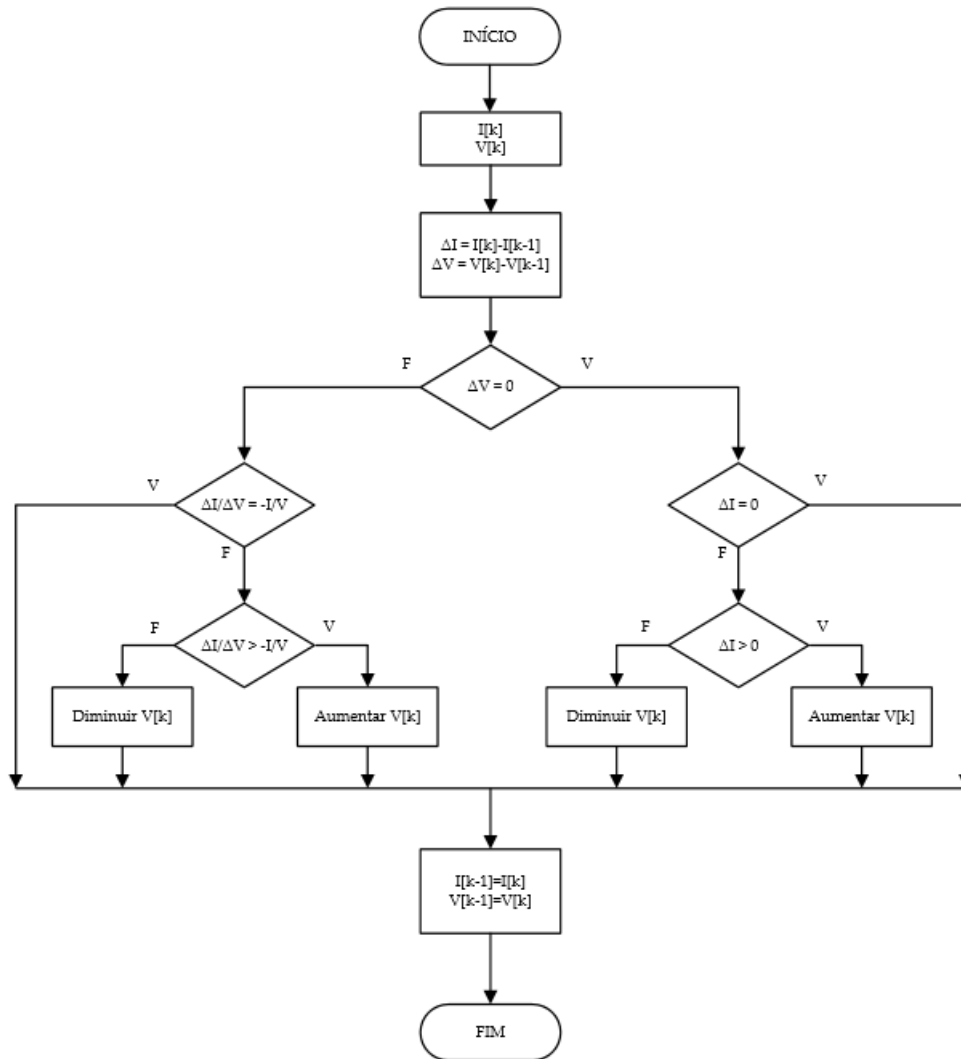


Figure 2.16: Fluxograma do algoritmo condutância incremental.

2.6.3 Tensão de Circuito Aberto Fracionada

O método de tensão de circuito aberto fracionada também é um dos mais comuns no que diz respeito a localizar o ponto de potência máxima. Trata-se de um método simples de fácil implementação e não necessita de muitos parâmetros de entrada. O principal conceito desta técnica baseia-se na ideia que o sistema opera no ponto de potência máxima quando a tensão dos painéis está compreendida entre os 72% e os 78% da tensão de circuito aberto [35] [37].

$$V_{mpp} = K_v V_{oc} \quad (2.3)$$

Nesta equação, V_{oc} corresponde à tensão de circuito aberto e K_v à constante de proporcionalidade que normalmente varia entre 0,7 e 0,8. V_{mpp} é a tensão para o ponto de potência máxima.

2.6.4 Corrente de Curto-circuito Fracionada

O algoritmo de corrente de curto-circuito fracionada é parecida com a técnica referida anteriormente, no entanto, neste método em vez de uma tensão constante, é utilizada uma corrente constante. De igual modo, o princípio de funcionamento baseia-se na ideia que o sistema opera no seu ponto de máxima tensão quando a corrente dos painéis possui um valor entre 78% e 92% da corrente de curto-circuito [35] [37]. De modo a manter o sistema o mais próximo possível do ponto de máxima potência, a corrente de funcionamento deve ser definida pela seguinte equação.

$$I_{\text{ref}} = K_i I_{\text{sc}} \quad (2.4)$$

Na equação, K_i assume valores entre 0,78 e 0,92. Obtendo então o valor da corrente de curto-circuito é determinada a corrente de máxima potência através da equação.

2.7 Técnicas de Controlo de Corrente

As técnicas de controlo de corrente são fundamentais para a implementação de um conversor CC-CC pois produzem a tensão necessária de maneira a este gerar uma corrente desejada na sua saída. O principal objetivo das técnicas de controlo de corrente é fazer com que a corrente gerada à saída do conversor se aproxime ao máximo da corrente de referência ditada pelo utilizador, por isso, quanto mais idêntico estiverem estes dois valores, melhor a qualidade da forma de onda da corrente à saída do conversor [38].

Existem dois tipos distintos de técnicas de controlo: as lineares e as não lineares. Dentro do grupo de teorias de controlo não lineares estão presentes o controlo por Histerese, modulação Delta (DM), etc. Ao contrário das técnicas lineares, estas realizam a modulação da tensão de referência diretamente pelo erro da corrente. Por outro lado, as teorias de controlo linear fazem-no de forma distinta, separando o controlo da corrente da modulação da tensão de referência. Algumas das técnicas adjacentes a esta teoria de controlo são o controlo PI e o preditivo.

Nos tópicos seguintes serão descritas as teorias de controlo lineares e não lineares mais populares no que toca à aplicação de conversores CC-CC [39] [40].

2.7.1 Controlo de Corrente: Histerese

A técnica de controlo de corrente por histerese está inserida no grupo das técnicas não lineares. É considerada uma técnica simples e robusta uma vez que a tensão produzida está unicamente dependente de uma corrente de referência. O seu funcionamento baseia-se na comparação da corrente sintetizada à saída do conversor com a corrente de referência e pode ser traduzido pela equação que se segue.

$$I_{\text{ref}} - H < I_{\text{saída}} < I_{\text{ref}} + H \quad (2.5)$$

A seleção dos semicondutores que comutam é baseada na comparação do erro entre a corrente sintetizada e a corrente de referência com uma banda de histerese ($\pm H$) de valor fixo. Quanto menor for a banda de histerese definida, melhor serão os resultados obtidos na forma de onda de saída, no entanto, isso obriga a uma frequência de comutação mais elevada o que faz com que haja mais perdas.

Relativamente a outras técnicas esta possui a vantagem de ser de fácil implementação e rápido processamento. Porém, não é possível durante o seu modo de operação fixar a frequência de comutação, o que gera produção de harmónicos em várias frequências pois o conversor tanto opera em baixas como em altas frequências. Na figura 2.17 é possível observar o diagrama de blocos da implementação desta técnica de controlo [40] [41].

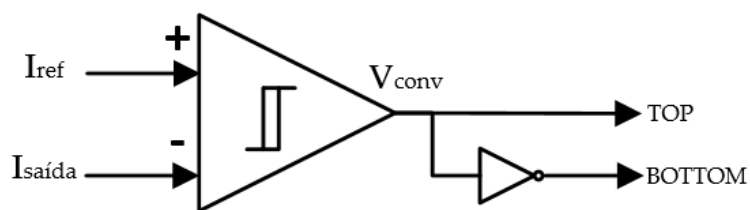


Figure 2.17: Diagrama de blocos de controlo de corrente por histerese.

2.7.2 Controlo de Corrente: Proporcional Integral (PI)

O controlo de corrente PI utiliza um ganho proporcional e um ganho integral de maneira a controlar a corrente à saída do conversor. A diferença entre a corrente sintetizada à saída e a corrente de referência gera um valor de erro que é utilizado como parâmetro de entrada neste tipo de controlador. A este valor são multiplicados os ganhos proporcional e integral, e o sinal resultante da soma de ambos é comparado a uma onda triangular. Esta comparação origina um PWM responsável por produzir uma tensão que gera a corrente desejada. Na figura abaixo está representado o diagrama de blocos de modo a tornar mais simples o decorrer deste processo.

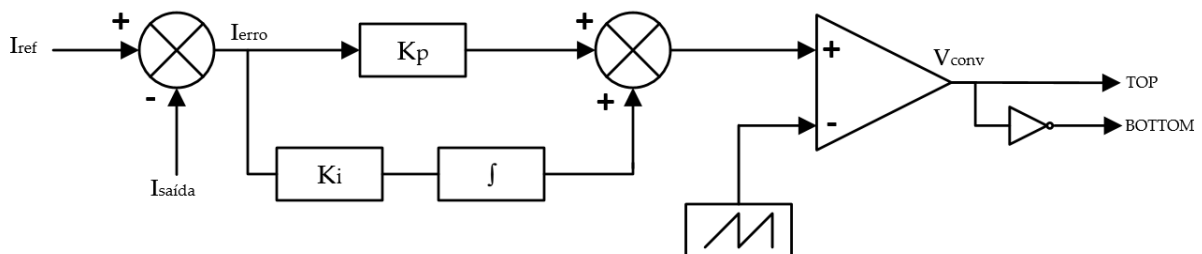


Figure 2.18: Diagrama de blocos de controlo de corrente proporcional integral.

Quanto maior for o ganho proporcional (P) mais rápido o sistema reage a variações na variável a ser medida. Por outro lado, caso este ganho seja bastante elevado, pode levar a oscilações instáveis no

processo. O ganho integral (I) é usado para “integrar” o erro ao longo do tempo que ajuda na eliminação do erro residual. No entanto, caso o seu valor seja demasiado grande, provoca atrasos na resposta do processo e oscilações instáveis.

Em contraste com a técnica anterior, esta permite realizar a comutação a uma frequência fixa, uma vez que gera um PWM, o que possibilita a eliminação de ruído. Por outro lado, trata-se de uma técnica mais complexa de implementar onde é necessário voltar a ajustar os ganhos proporcional e integral caso seja alterada, por exemplo, uma carga no sistema [39] [42].

2.7.3 Controlo de Corrente: Preditivo

A técnica de controlo preditivo baseia-se no modelo elétrico do sistema onde o conversor está integrado. É uma técnica que consiste em calcular a tensão de referência a ser produzida pelo conversor para que a corrente gerada à saída seja igual à corrente de referência após um certo número de período de amostragem. Tem por objetivo melhorar o desempenho do processo ao longo do tempo, mantendo a corrente de saída num valor desejado ou minimizando a sua variabilidade.

É uma técnica que permite a operação com uma frequência de comutação fixa, no caso da técnica *deadbeat control*, ou variável, como o *model predictive control with finite control set*.

Na figura abaixo está representado o diagrama de blocos de um exemplo desta técnica na aplicação a um conversor CC-CC no modo *buck*.

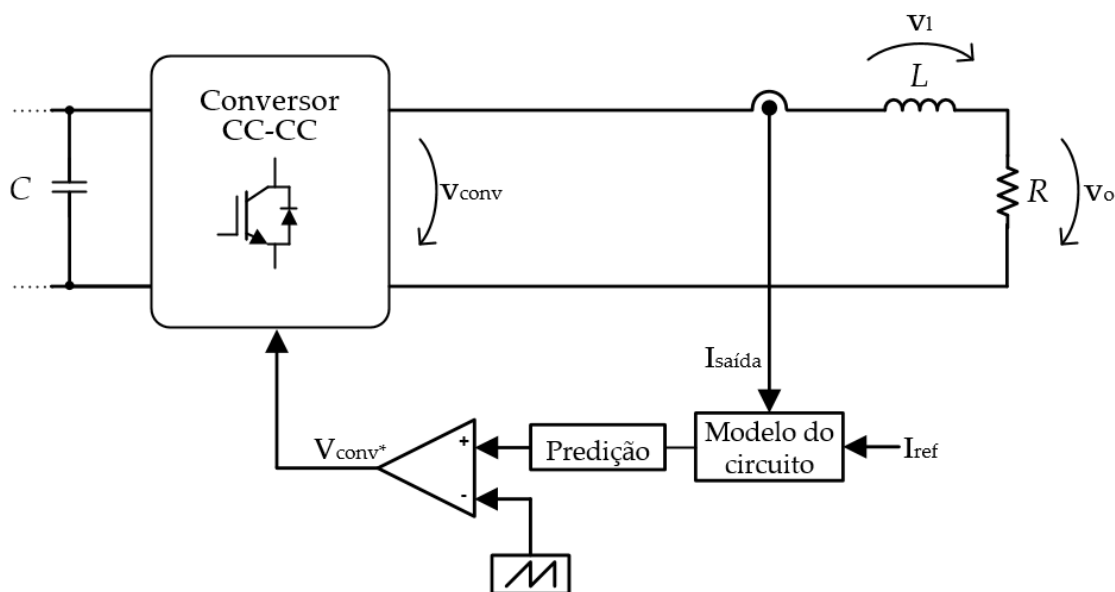


Figure 2.19: Diagrama de blocos de controlo de corrente preditivo.

A partir da análise da imagem e aplicando a lei das malhas é possível retirar a seguinte equação:

$$V_{conv} = V_L + V_o \quad (2.6)$$

Simplificando,

$$V_{\text{conv}} = L \frac{di_1}{dt} + V_o \quad (2.7)$$

Usando o método da implementação da derivada discreta, pode-se obter a seguinte equação:

$$V_{\text{conv}^*} = \frac{L}{T_s} (i_1[k+1] - i_1[k]) + V_o[k] \quad (2.8)$$

A partir desta equação é possível calcular a tensão necessária de modo a produzir um valor de corrente o mais aproximado possível do valor da corrente de referência. Em 2.8 $i_1[k+1]$ corresponde à corrente de referência e $i_1[k]$ ao valor lido naquele instante.

Em relação à técnica de controle PI, difere no modo de atuação uma vez que usa modelos matemáticos para prever como a variável vai evoluir no futuro e ajusta a saída do controle com base nessas previsões. Possui como vantagem uma resposta mais rápida a mudanças da variável controlada e melhora a sua estabilidade ao longo do tempo. Por outro lado, necessita de mais informações e cálculos que os métodos mencionados anteriormente, pois os parâmetros do modelo precisam de ser ajustados adequadamente para que as previsões sejam precisas [43].

2.8 Modulação PWM

A modulação PWM tem um papel fundamental no controle das comutações dos IGBT controlando o tempo em que estes estão a *ON* ou *OFF*. A variação da largura de um pulso, conhecido por *duty-cycle*, controla o tempo em que um pulso permanece num nível lógico alto e por sua vez o tempo que os semicondutores se encontram em condução ou não. Na equação 2.9 é possível observar fórmula do *duty-cycle*:

$$\delta = \frac{t_{ON}}{T} \quad (2.9)$$

A modulação PWM consiste na comparação de uma onda moduladora, a referência, e uma onda portadora, normalmente trata-se de um sinal triangular ou dente-de-serra com uma frequência bastante superior em relação à onda moduladora. O sinal resultante desta comparação possui uma comutação fixa e varia entre o estado lógico alto (IGBT a *ON*) ou baixo (IGBT a *OFF*), sempre que a onda moduladora for maior ou menor que a onda portadora, respetivamente. A frequência da onda portadora dita a frequência de comutação dos IGBT pelo que deve ser bastante elevada de maneira que o sinal obtido apresente uma elevada resolução [44].

2.9 Conclusão

Neste capítulo foram abordados temas mais teóricos e necessários para concepção de um conversor CC-CC.

Inicialmente, foi feita uma pequena introdução ao que são e em que consistem os sistemas fotovoltaicos, desde o seu princípio de funcionamento, os tipos de células fotovoltaicas existentes, os parâmetros principais de um painel fotovoltaico e os tipos de sistemas que existem atualmente. Foram abordados os sistemas isolados, os sistemas ligados à rede e os sistemas híbridos. De seguida, foi feito um levantamento das vantagens e desvantagens em relação à utilização de sistemas fotovoltaicos bem como à sua implementação.

Depois, foi feita uma pequena introdução relativamente a sistemas de armazenamento de energia a par da importância da sua incorporação nos sistemas fotovoltaicos. Foi dada uma maior importância às baterias, visto que é o tipo de sistema de armazenamento que melhor se encaixa na concessão deste projeto. Consequentemente, foram indicadas as características de uma bateria, bem como os modelos mais populares no mercado, sendo que as baterias de chumbo-ácido são as mais usadas em sistemas fotovoltaicos, pois são as mais acessíveis economicamente e as mais robustas. No entanto, as baterias de lítio têm ganho bastante popularidade neste setor nos últimos anos.

Posteriormente, foram apresentadas as principais topologias de conversores CC-CC que podem integrar este projeto. Desde topologias isoladas e não isoladas, às topologias que se adequam melhor para uma interface entre painéis fotovoltaicos e sistemas de armazenamento de energia, foram abordados os conversores com maior popularidade atualmente. Toda esta análise facilitou consequentemente a seleção da topologia a integrar esta dissertação.

Relativamente ao carregamento das baterias, foram apresentados e explicados três algoritmos de carregamento dos quais fazem parte o algoritmo de corrente constante, de tensão constante e corrente constante seguido de tensão constante. Desta análise percebeu-se que o mais utilizado em baterias de ácido-chumbo e de íões de lítio é o algoritmo de corrente constante seguido de tensão constante.

Também foram abordados alguns algoritmos MPPT que são bastante utilizados em sistemas fotovoltaicos com o objetivo de maximizarem a extração de potência e assim aumentarem o rendimento de um painel fotovoltaico. Os algoritmos de condutância incremental e perturbação e observação, são os mais utilizados neste tipo de sistemas. Em particular, o algoritmo de perturbação e observação, devido à sua simplicidade de implementação e aos resultados satisfatórios, acaba por se tornar a solução mais popular.

Por fim, foram indicadas três técnicas de controlo de corrente para aplicação em conversores CC-CC. Estas são extremamente importantes na sintetização de correntes responsáveis por gerar sinais de comando nos semicondutores pois produzem a tensão necessária de maneira ao conversor gerar a corrente desejada na sua saída. Conclui-se que as técnicas de corrente que têm uma frequência de comutação fixa têm melhor desempenho, visto que produzem correntes à saída do conversor com menor distorção

harmónica. No final, foi efetuado um pequeno resumo de como funciona a modulação PWM responsável pela comutação dos semicondutores de potência.

3. Simulações Computacionais da Topologia Proposta

3.1 Introdução

Neste capítulo é descrito o princípio de funcionamento da topologia selecionada para o desenvolvimento do protótipo bem como todas as simulações que foram necessárias realizar para prever e decidir o comportamento do sistema.

Numa primeira fase, são apresentados o princípio de funcionamento da topologia junto com o algoritmo de controlo aplicado ao conversor CC-CC. Posteriormente, são abordadas as simulações referentes aos diferentes modos do funcionamento do protótipo das quais fazem parte: carregamento de baterias, descarga de baterias, extração de energia dos painéis solares e carregamento de baterias a partir da extração de energia dos painéis. De referir, que todas as simulações apresentadas durante este capítulo foram desenvolvidas na ferramenta de simulação *PSIM* versão 9.1.1 da empresa *Powersim Inc.*

Posto isto, é essencial salientar que recorrer a simulações computacionais é fundamental para o desenvolvimento de sistemas de eletrónica de potência. Por um lado, é uma forma barata e segura de realizar testes e, por outro lado, não é necessário montar o circuito para ser necessária a sua validação.

3.2 Topologia do Conversor CC-CC

Como mencionado anteriormente, para ser possível realizar a interface entre a rede elétrica e um módulo de painéis solares fotovoltaicos e sistemas de armazenamento de energia, são necessários no mínimo dois conversores: um conversor CC-CC, analisado ao detalhe ao longo deste capítulo, e um conversor CA-CC, projetado por outro aluno. Sendo assim, a validação deste conversor depende do correto funcionamento do conversor CA-CC e vice-versa. Devido a estes motivos, as simulações e testes referidos ao longo do capítulo necessitam da junção destes dois conversores para serem validados com sucesso os diferentes modos de funcionamento do sistema. O conversor desenvolvido nesta dissertação trata-se de um conversor multinível, composto por dois conversores CC-CC: um para a interface com painéis solares fotovoltaicos e outro para interface com baterias. Posto isto, foi necessário definir duas

topologias distintas de maneira a respeitar os requisitos dos dois módulos e ser possível obter o máximo rendimento de ambos.

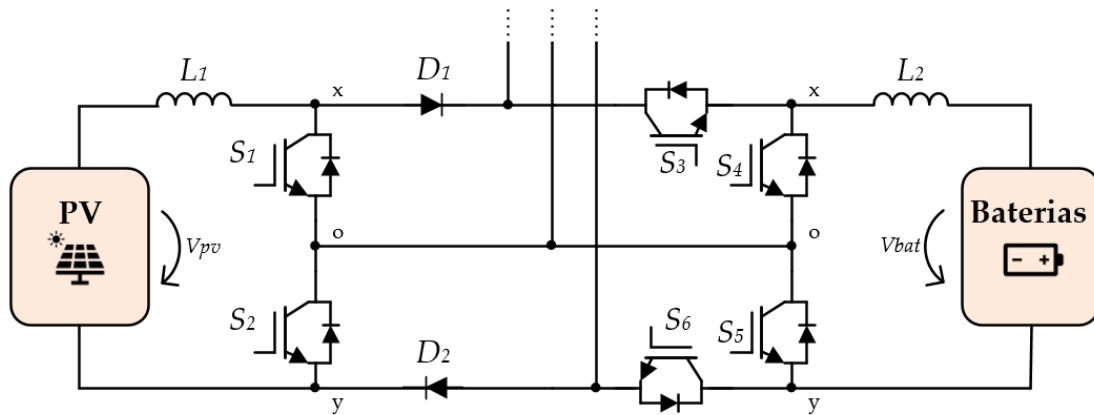


Figure 3.1: Conversor CC-CC.

Para a interface com os painéis solares, optou-se por utilizar a topologia de três níveis tipo *boost*. Como referido anteriormente, esta topologia é composta por dois IGBT e dois díodos, de maneira que o fluxo de energia ocorra só num sentido (dos painéis solares para a rede elétrica ou baterias) e não no sentido oposto. Trata-se de uma topologia unidirecional. Esta topologia implica quatro modos de funcionamento distintos:

Table 3.1: Extração de energia dos painéis fotovoltaicos.

| MODO | S1 | S2 | Vdc1 (V) | Vdc2 (V) |
|------|----|----|----------|----------|
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 0 | +Vdc/2 |
| 3 | 0 | 1 | +Vdc/2 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | +Vdc/2 | +Vdc/2 |

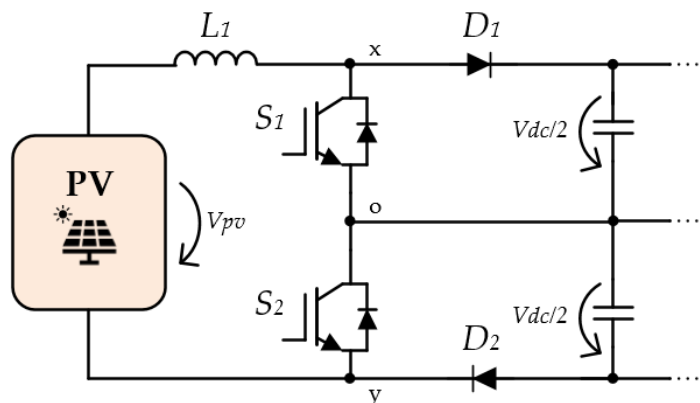


Figure 3.2: Conversor CC-CC três níveis tipo *boost*.

Para interface com as baterias, a topologia escolhida foi a *buck-boost asymmetrical*. Esta topologia é composta por quatro IGBT e permite um fluxo de energia bidirecional, modo *buck* para efetuar o carregamento das baterias e modo *boost*, para injetar energia na rede elétrica a partir das baterias (descarga). Esta topologia permite até oito modos de funcionamento diferentes, quatro para carregamento de baterias e outros quatro para descarga das baterias. Os modos de funcionamento deste conversor podem ser observados na figura abaixo.

Table 3.2: Carregamento das baterias.

| MODO | S3 | S4 | S5 | S6 | Vdc1 (V) | Vdc2 (V) |
|------|----|----|----|----|----------|----------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | +Vdc/2 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | +Vdc/2 |
| 4 | 1 | 0 | 0 | 1 | +Vdc/2 | +Vdc/2 |

Table 3.3: Descarga das baterias.

| MODO | S3 | S4 | S5 | S6 | Vdc1 (V) | Vdc2 (V) |
|------|----|----|----|----|----------|----------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | +Vdc/2 | +Vdc/2 |
| 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | +Vdc/2 |
| 3 | 0 | 0 | 1 | 0 | +Vdc/2 | 0 |
| 4 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |

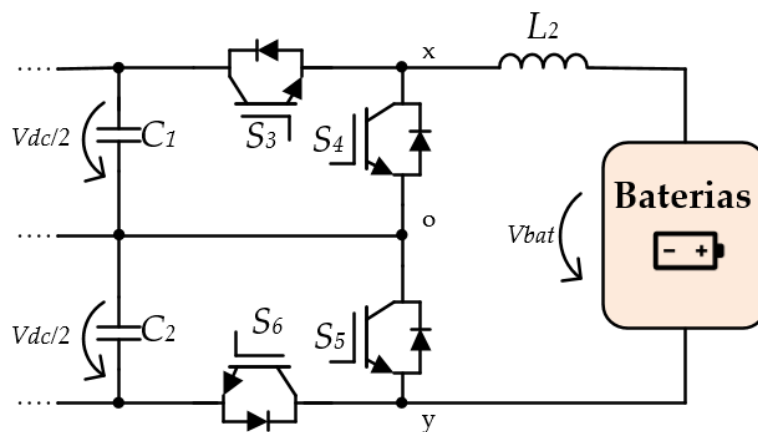


Figure 3.3: Conversor CC-CC *buck-boost asymmetrical*.

3.3 Algoritmo de Controlo

Existem várias estratégias de controlo de corrente, como foi mencionado anteriormente. Para o desenvolvimento deste projeto, foi definido por *software* uma referência de corrente para os painéis (I_{pv}) e outra para as baterias (I_{bat}) e, para controlar a corrente do conversor em função da corrente de referência, foi usado o algoritmo de controlo preditivo de frequência de comutação fixa. A partir da imagem 3.4 é possível observar a interface do conversor CC-CC com os painéis fotovoltaicos.

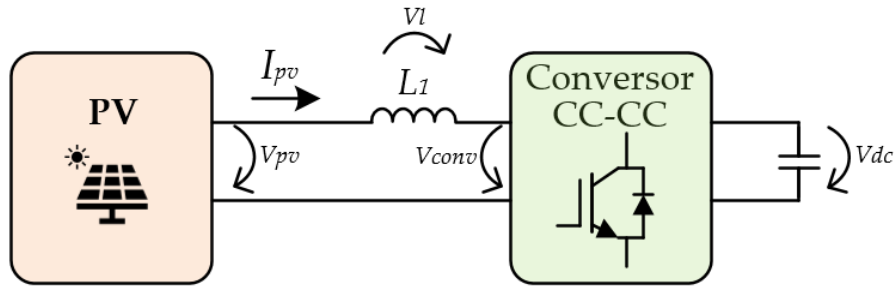


Figure 3.4: Tensões e correntes da ligação do conversor CC-CC aos painéis fotovoltaicos.

A partir da análise da imagem e utilizando a lei das malhas tem-se:

$$\begin{aligned} V_{conv_pv} &= V_{pv} - V_L \\ V_{conv_pv} &= V_{pv} - L \frac{dI_{pv}}{dt} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Com a aplicação da derivada discreta, é possível estabelecer que:

$$\begin{aligned} V_{conv_pv}[k] &= V_{pv} - \frac{L}{T_s} (I_{pv}[k+1] - I_{pv}[k]) \\ V_{conv_pv}[k] &= V_{pv} - Lf (I_{pv}[k+1] - I_{pv}[k]) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Relativamente a $I_{pv}[k+1]$ corresponde à corrente que se pretende sintetizar, pelo que representa a corrente de referência definida via *software*. No caso da descarga das baterias, o método é o mesmo, no entanto as variáveis V_{pv} , I_{pv} e V_{conv_pv} são substituídas por V_{bat} , I_{bat} e V_{conv_bat} , respetivamente.

Para o carregamento de baterias, o processo é semelhante, e a representação das tensões e correntes do circuito podem ser observadas na figura 3.5.

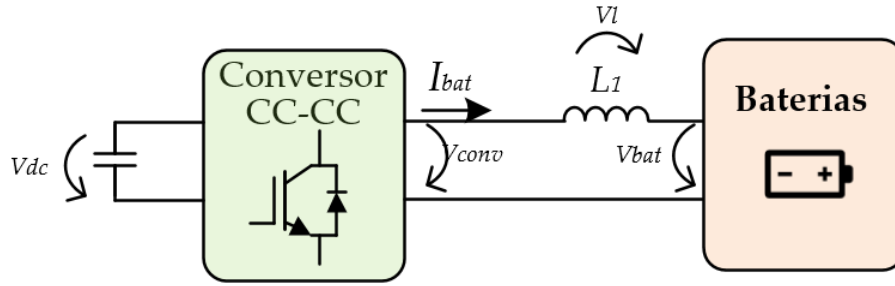


Figure 3.5: Tensões e correntes da ligação do conversor CC-CC às baterias.

Novamente, a partir da lei das malhas tem-se:

$$\begin{aligned} V_{\text{conv_bat}} &= V_{\text{bat}} + V_L \\ V_{\text{conv_bat}} &= V_{\text{bat}} + L \frac{dI_{\text{bat}}}{dt} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Com a aplicação da derivada discreta, é possível estabelecer que:

$$\begin{aligned} V_{\text{conv_bat}}[k] &= V_{\text{bat}} + \frac{L}{T_s} (I_{\text{bat}}[k+1] - I_{\text{bat}}[k]) \\ V_{\text{conv_bat}}[k] &= V_{\text{bat}} + Lf (I_{\text{bat}}[k+1] - I_{\text{bat}}[k]) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Mais uma vez, o parâmetro $I_{\text{bat}}[k+1]$, corresponde ao valor de corrente que se pretende sintetizar que, traduzindo, é a corrente de referência. O parâmetro $I_{\text{bat}}[k]$ corresponde ao valor de corrente das baterias lido naquele momento.

3.4 Simulações Computacionais dos Modos de Funcionamento

Nos tópicos abaixo serão discutidas as simulações realizadas na ferramenta de simulação *PSIM* versão 9.1.1 da empresa *PowerSim Inc*. De modo a simplificar, uma vez que o principal objetivo passou por validar o controlo do conversor, durante os testes foi utilizada uma resistência de 26Ω para simular as baterias e uma fonte de 100 V para simular um painel solar fotovoltaico e assim obter resultados semelhantes num cenário em que os painéis, por exemplo, se encontram no seu ponto de máxima potência.

3.4.1 Carregamento das Baterias

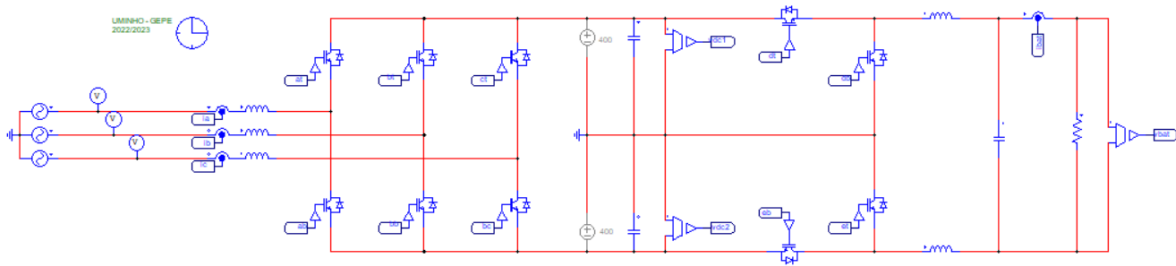
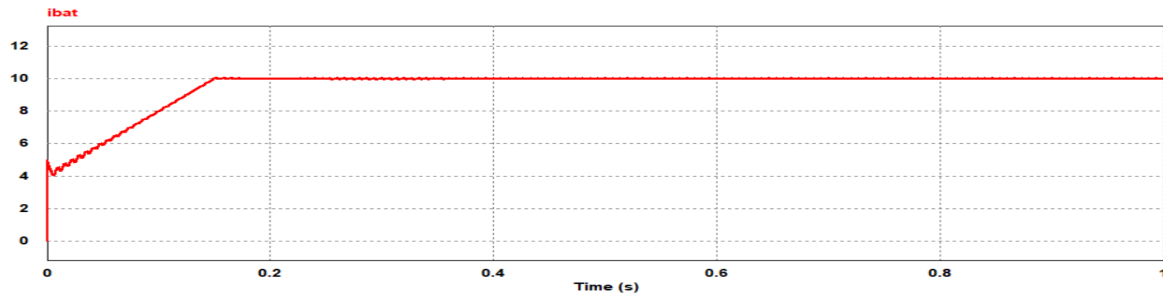
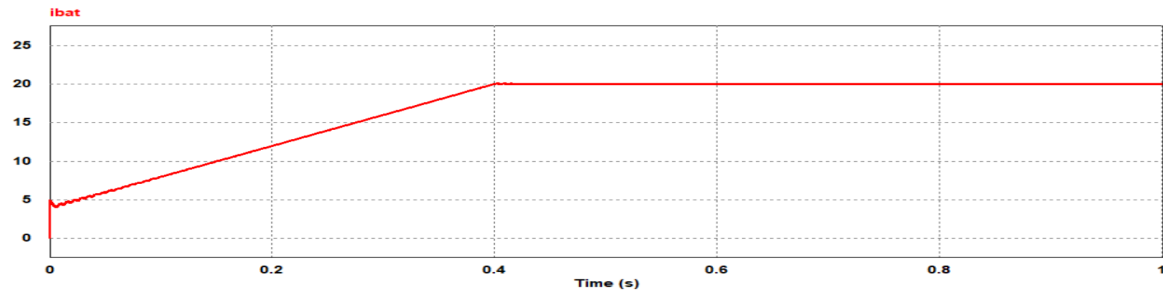


Figure 3.6: Circuito elétrico do carregamento das baterias em PSIM.

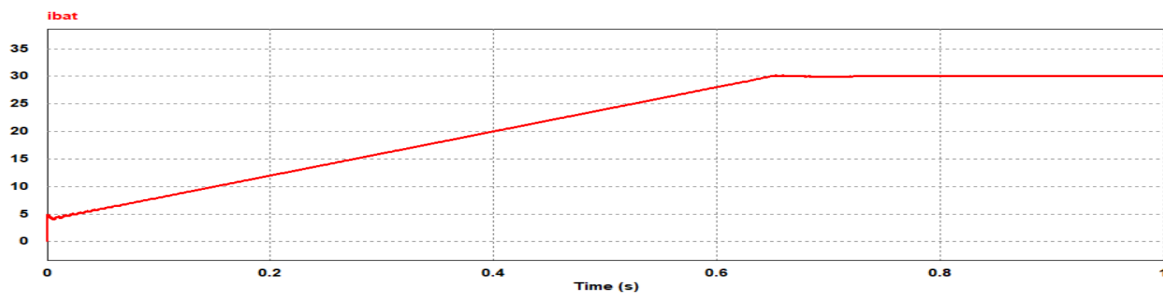
Na figura 3.6 é possível observar o circuito utilizado para realizar o carregamento das baterias. À esquerda, o conversor CA-CC, e à direita, o conversor CC-CC *buck-boost asymmetrical* que efetua a interface com as baterias. Para a ligação dos dois conversores, no meio, está o barramento CC que através do controlo PI, mantém uma tensão de 800 V (400 V em cada braço). Como o objetivo é testar o controlo de corrente, foi programada uma rampa de referência para a corrente nas baterias (I_{bat}), sendo que em regime permanente foram atribuídas diferentes referências de forma a observar a resposta do sistema para cada uma delas. Os valores atribuídos foram 10 A, 20 A e 40 A, e os resultados podem ser observados nas figuras seguintes.



(a)



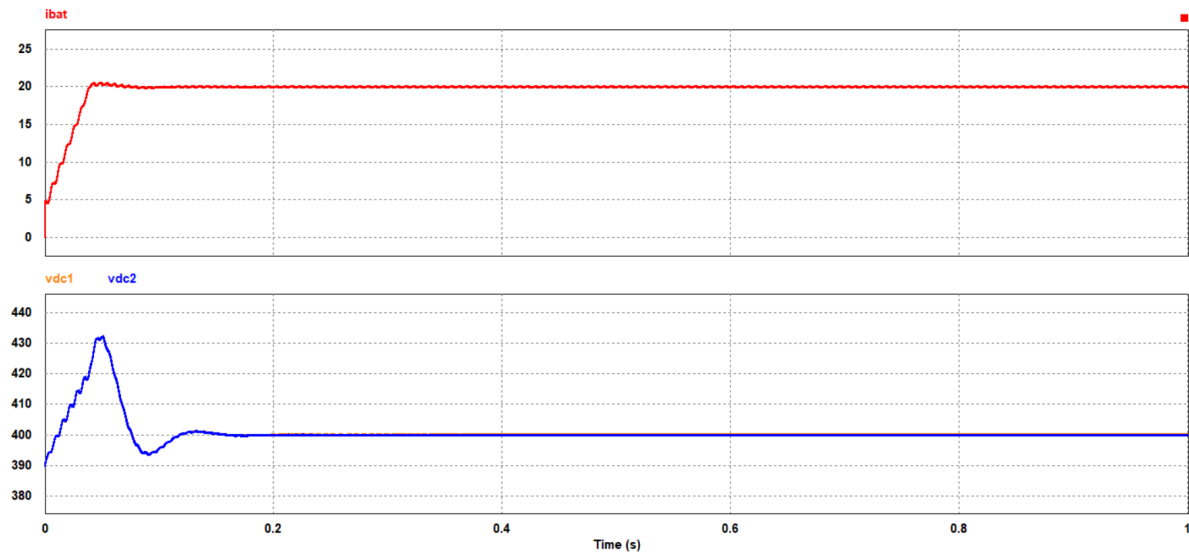
(b)



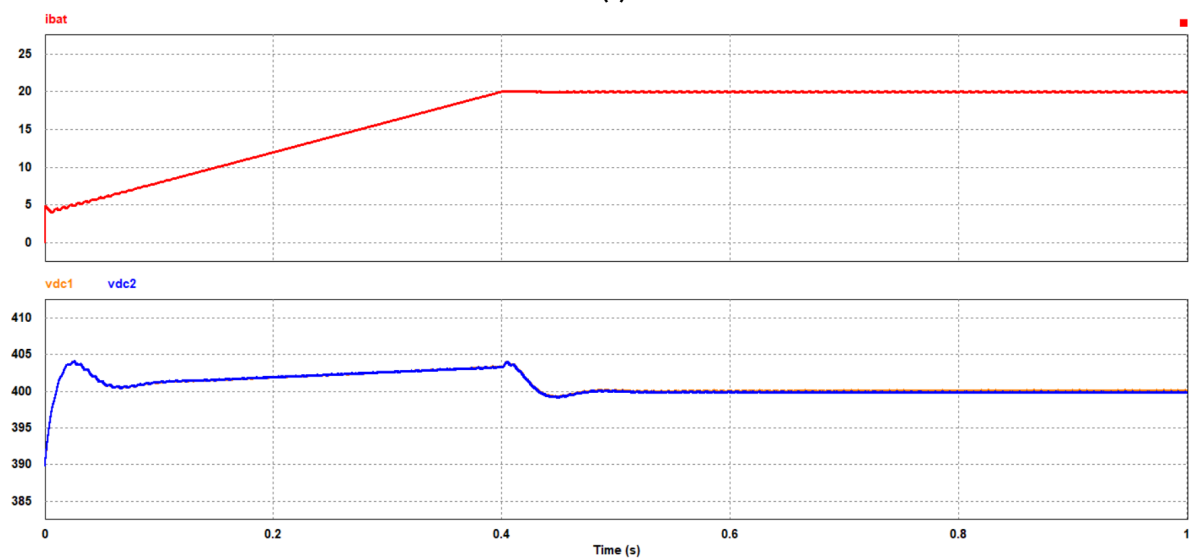
(c)

Figure 3.7: i_{bat} para um i_{refbat} de (a) 10 A; (b) 20 A; (c) 30 A.

Verifica-se assim que o algoritmo de corrente preditivo funciona corretamente, uma vez que o sistema dá uma resposta positiva à variação da corrente de referência. Depois, foi testado o comportamento do barramento CC alterando o declive da corrente de referência. A partir de 3.8, é possível comprovar que a partir do momento que a corrente nas baterias estabiliza, o controle PI obriga a uma resposta imediata no barramento e estabiliza de novo a tensão. Também se comprova que para um declive mais acentuado, o efeito no barramento também é maior, no entanto, acaba por ser menos prolongado visto que a corrente também estabiliza mais rapidamente.



(a)



(b)

Figure 3.8: Resultado de i_{bat} e do barramento CC para diferentes declives da rampa de referência.

Posteriormente, analisou-se o comportamento da corrente da fase A e da tensão na fase A. A partir da imagem abaixo consegue-se provar que a rede elétrica fornece energia ao barramento e às baterias, visto que a corrente I_a se encontra em fase com a tensão V_a , o que também prova que toda a potência absorvida pelas baterias é potência ativa.

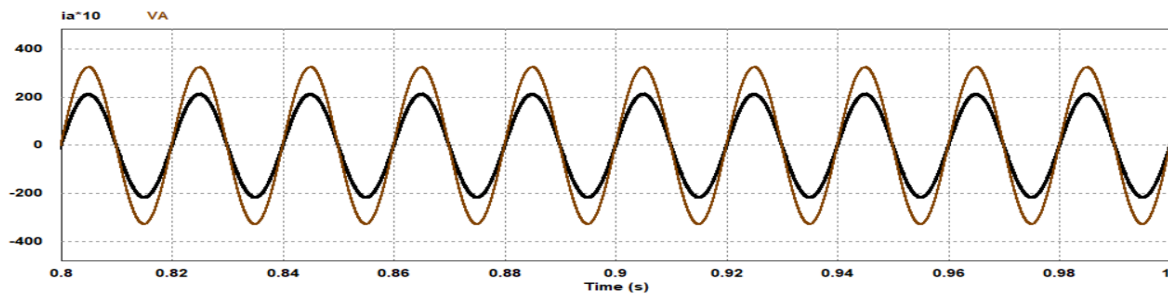


Figure 3.9: Corrente e tensão na fase A para um $I_{\text{refbat}} = 20$ A.

3.4.2 Descarga das Baterias

Para os testes de descarga de baterias, a resistência utilizada anteriormente foi substituída por uma fonte de tensão de 100 V que fornece corrente à rede elétrica.

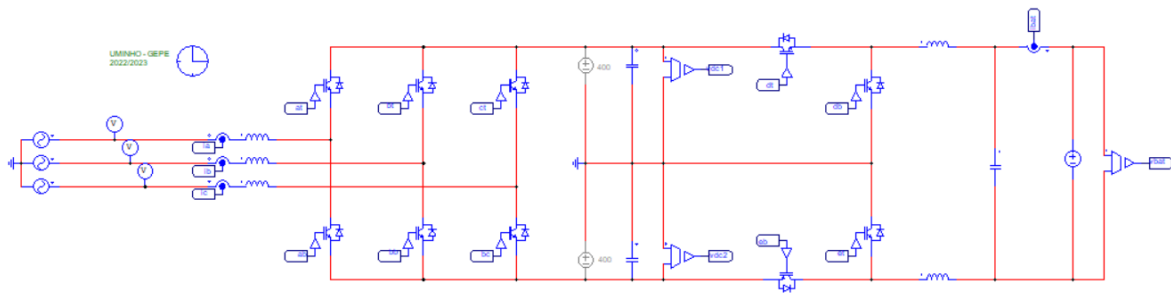
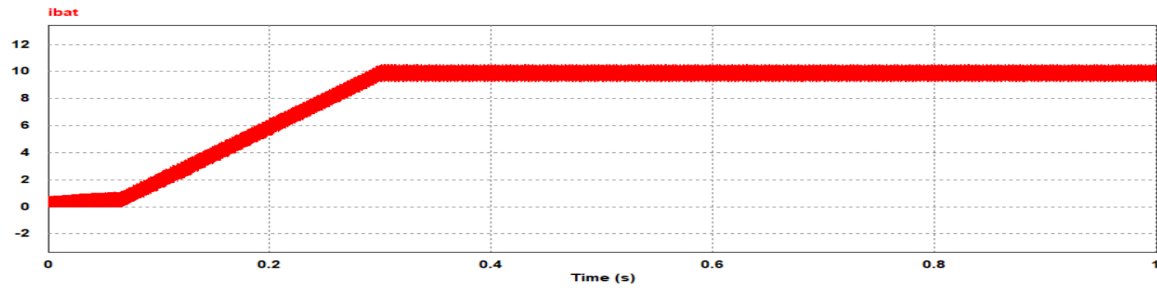
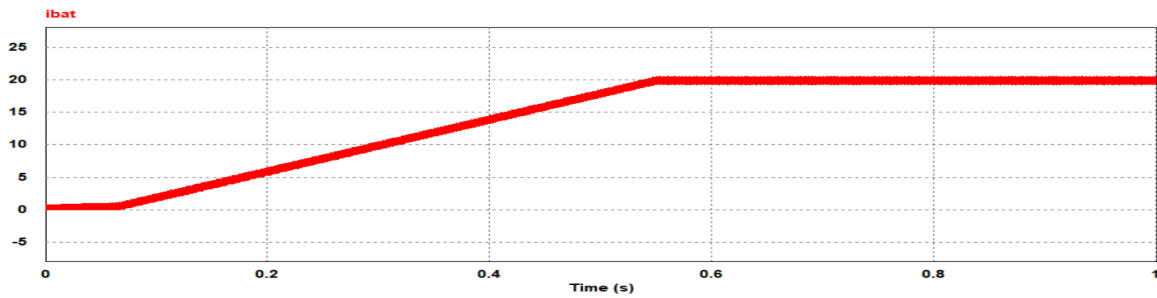


Figure 3.10: Circuito elétrico da descarga das baterias em PSIM.

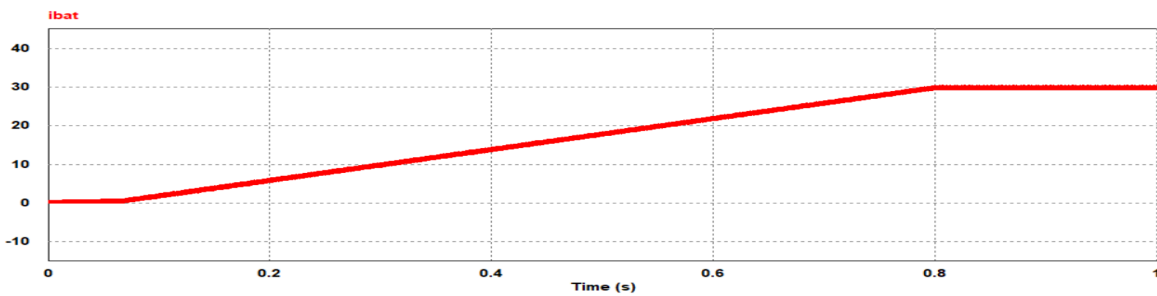
Como no teste anterior, foram definidas várias referências de corrente para as baterias. Os resultados podem ser observados nas seguintes imagens.



(a)



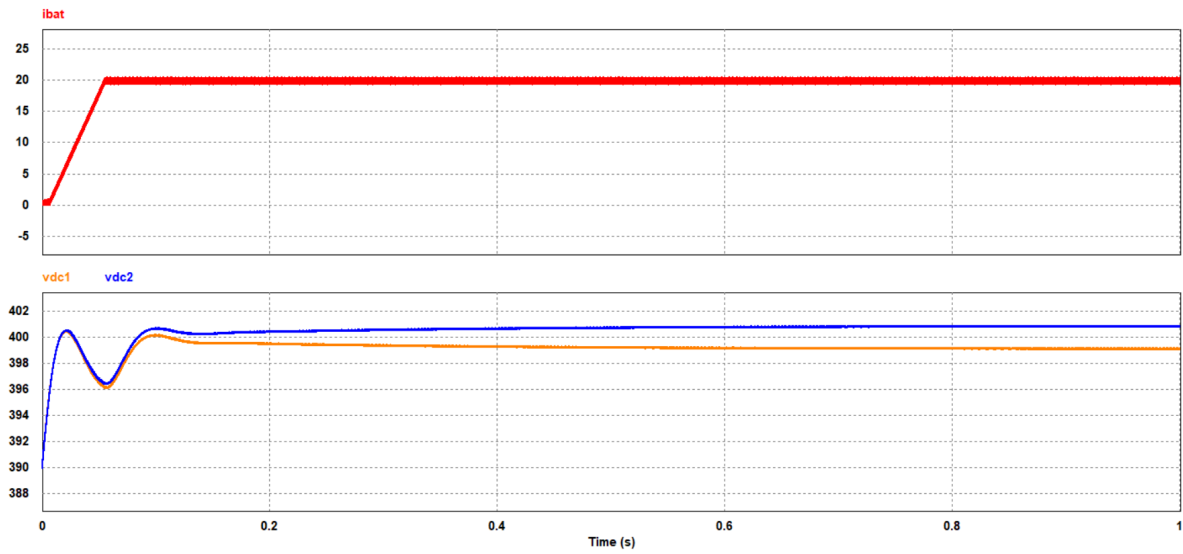
(b)



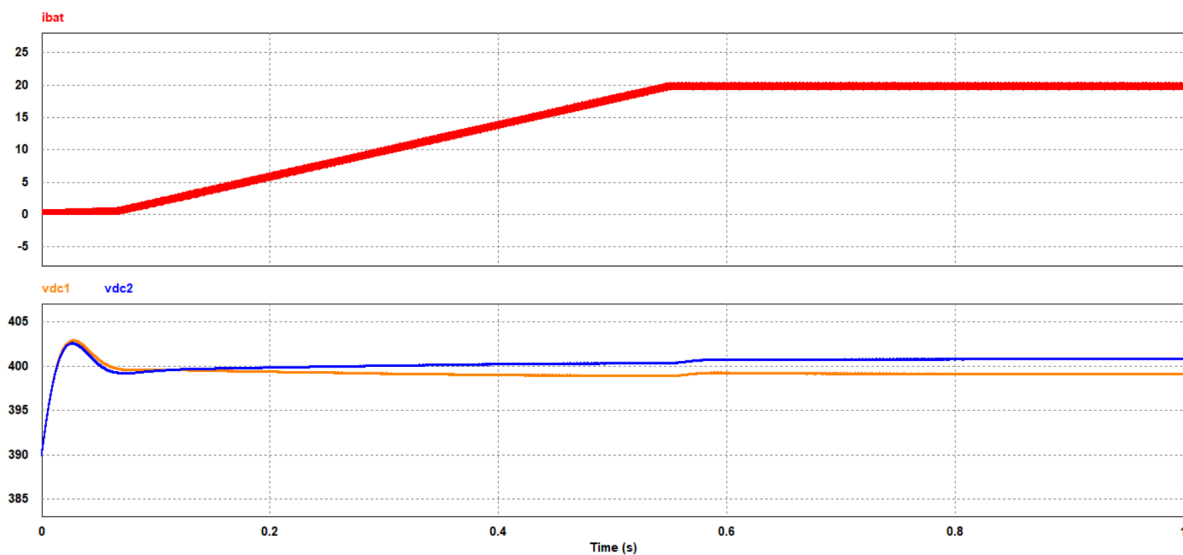
(c)

Figure 3.11: i_{bat} para um i_{refbat} de (a) 10 A; (b) 20 A; (c) 30 A.

Comprovou-se assim o bom funcionamento do controlo preditivo, visto que a corrente nas baterias atingiu os valores pretendidos, embora com um pouco de *ripple* associado devido às comutações dos IGBT. Posteriormente, para um valor de referência de 20 A, foi validada a regulação do barramento CC, apesar de existir uma pequena discrepância de cerca de 2 V entre a tensão no Vdc1 (399 V) e a tensão no Vdc2 (401 V), não é um valor significativo e o sistema funciona corretamente.



(a)



(b)

Figure 3.12: Resultado de i_{bat} e do barramento CC para diferentes declives da rampa de referência.

Por fim, voltou-se a analisar o comportamento das formas de onda na fase A e confirmou-se a injeção de energia na rede elétrica, estando as curvas da corrente (I_a) e da tensão (V_a) em oposição de fase.

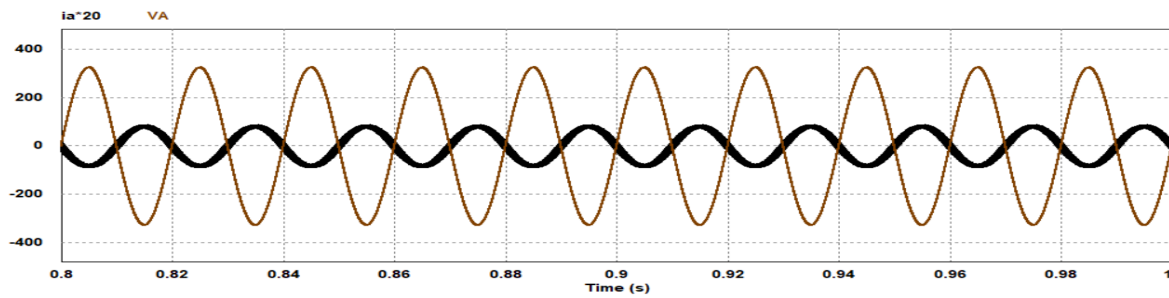


Figure 3.13: Corrente e tensão na fase A para um $I_{\text{refbat}} = 20$ A.

3.4.3 Extração de Energia dos Painéis

Quanto à extração de energia dos painéis solares fotovoltaicos, o circuito seguinte pretende simular a interface entre a rede elétrica e um módulo de painéis solares fotovoltaicos que, neste caso, foi substituído por uma fonte de tensão de 100 V apenas para validar o controlo numa fase inicial. Desta vez, foi utilizada a topologia três níveis tipo *boost* no lado do conversor CC-CC.

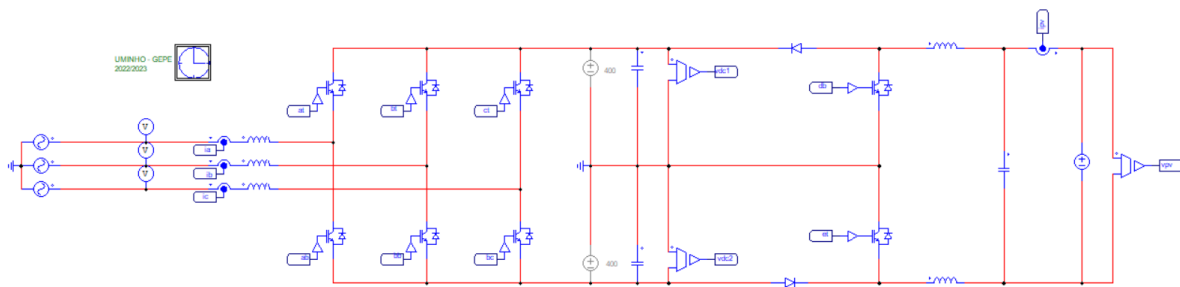
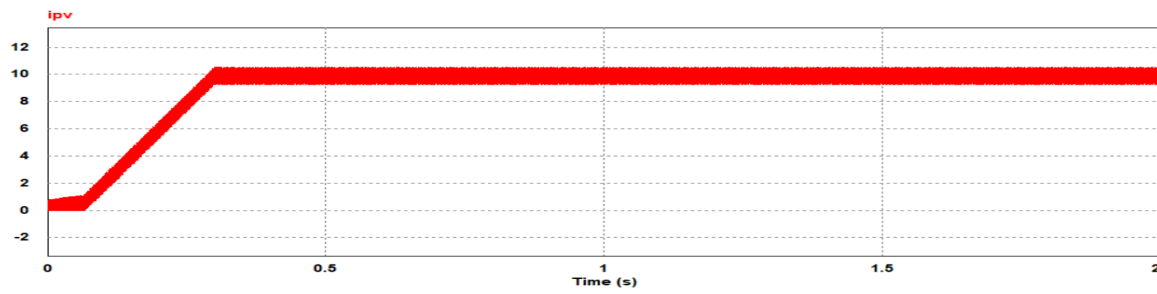
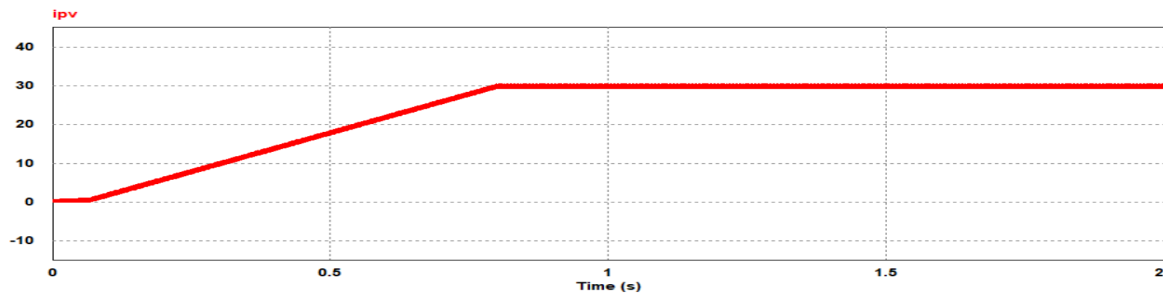


Figure 3.14: Circuito elétrico da extração de energia dos painéis em PSIM.

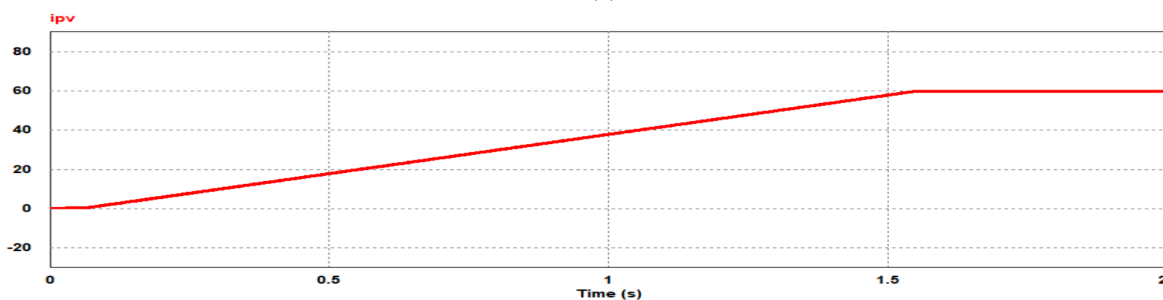
Novamente, os passos de validação das simulações são semelhantes aos realizados no processo de carregamento e descarga de baterias. Numa primeira fase foi implementada uma rampa de referência para as diversas referências de corrente e assim validar o controlo preditivo.



(a)



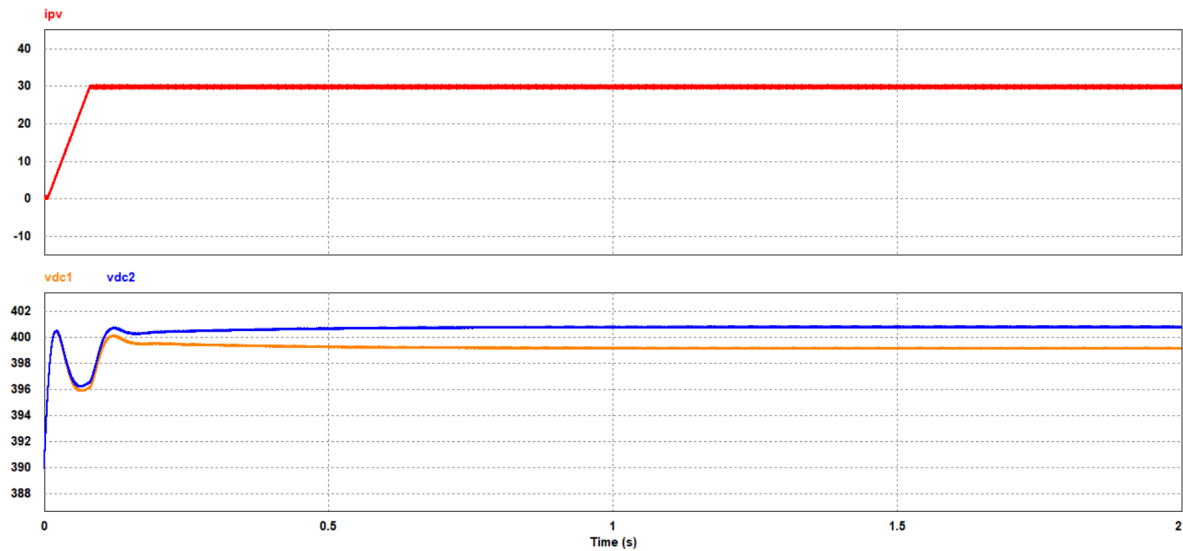
(b)



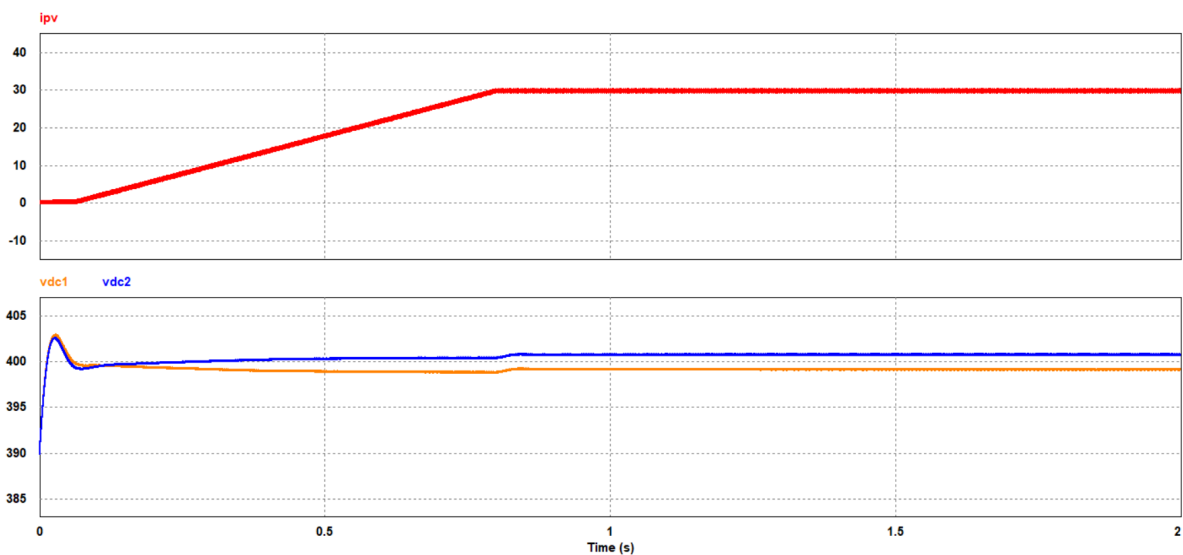
(c)

Figure 3.15: i_{pv} para um i_{refpv} de (a) 10 A; (b) 30 A; (c) 60 A.

Numa segunda etapa de testes, foi analisado o barramento CC, averiguando a sua resposta a diferentes declives da rampa de referência da corrente. Mais uma vez, comprovou-se que o controle PI realiza a regulação do barramento CC estando este compreendido entre os 401 V (Vdc2) e os 399 V (Vdc1). Em simultâneo, confirmou-se que quanto maior for o declive da rampa de referência, mais acentuada é a deformação nas formas de onda do barramento. Por outro lado, um declive menos acentuado, provoca uma deformação mais suave, mas também torna o processo de alcançar o valor de tensão pretendido mais demorado.



(a)



(b)

Figure 3.16: Resultado de I_{pv} e do barramento CC para diferentes declives da rampa de referência.

Por fim, foram analisadas as formas de onda da tensão e da corrente na fase A. A forma de onda da corrente encontra-se em oposição de fase com a forma de onda da tensão, confirmando a injeção de potência ativa na rede elétrica e a validação do modo de funcionamento de extração de energia dos painéis fotovoltaicos.

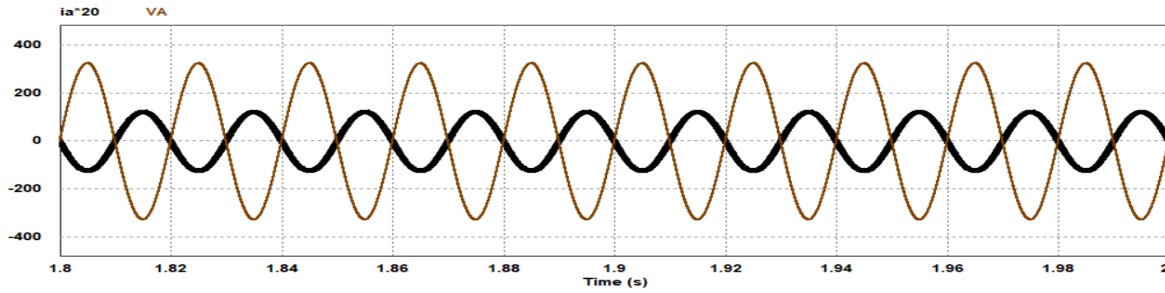


Figure 3.17: Corrente e tensão na fase A para um $I_{refpv} = 30$ A.

3.4.4 Extração de Energia dos Painéis e Carregamento de Baterias

Por fim, foram simulados os modos de funcionamento de carregamento de baterias e a extração de energia dos painéis em simultâneo. O circuito resultante dessa junção pode ser observado na figura seguinte.

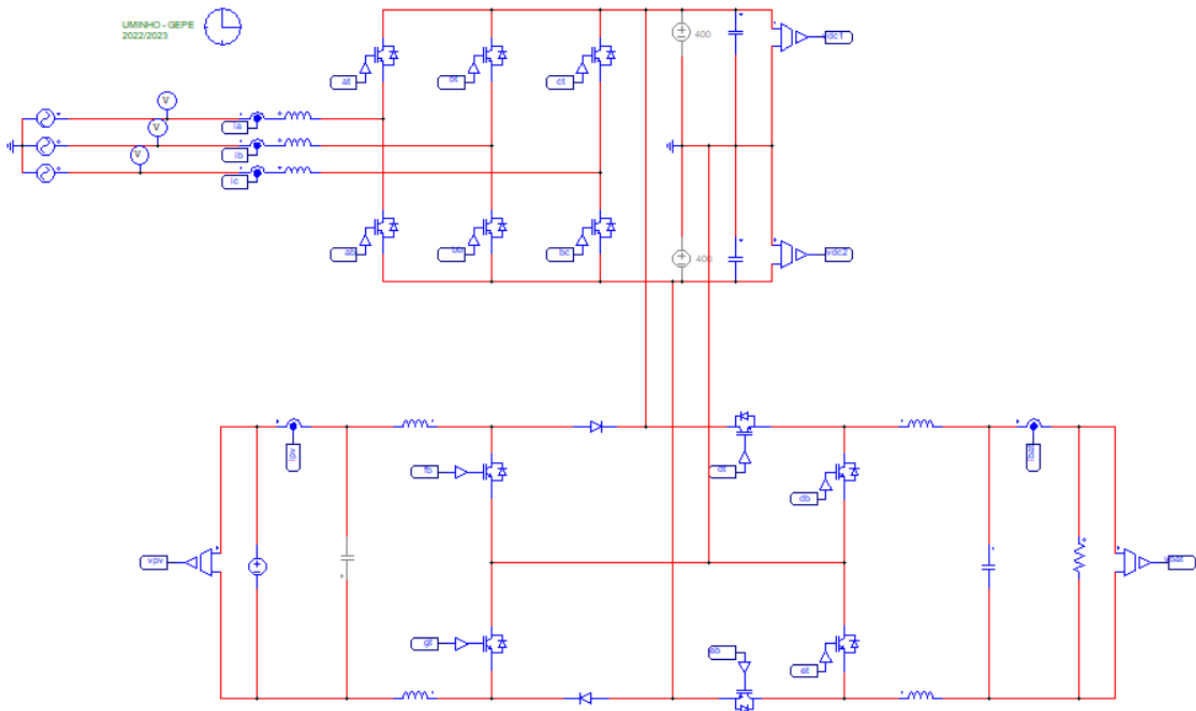
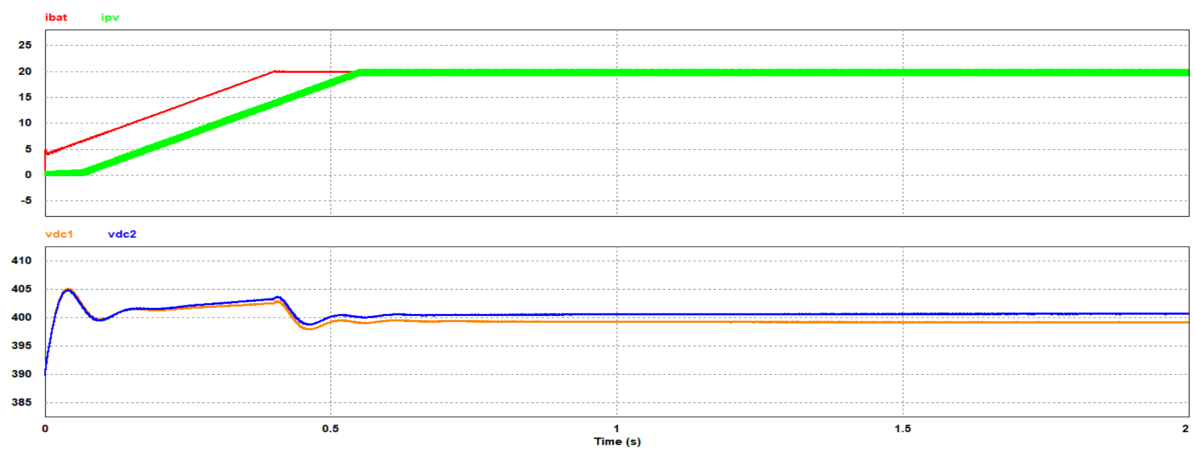


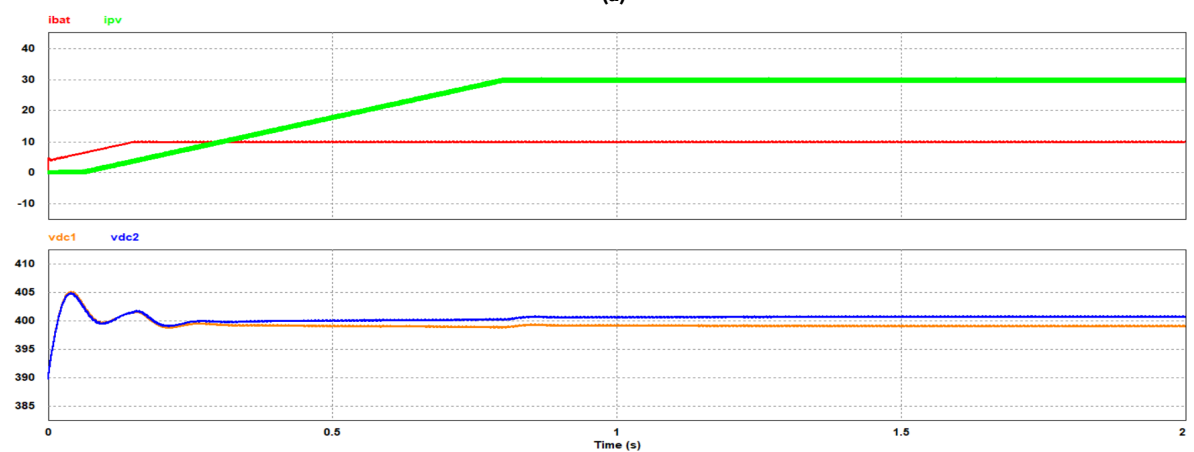
Figure 3.18: Circuito elétrico do carregamento das baterias combinado com o circuito de extração de energia dos painéis em *PSIM*.

O objetivo desta simulação passa por extrair energia dos painéis solares e realizar em simultâneo a injeção de energia na rede elétrica e o carregamento das baterias. Posto isto, variando as correntes de referência em cada um dos módulos, o sistema responde de maneira distinta. Mais uma vez, numa primeira fase foram estipuladas as rampas de referência para as correntes (I_{bat} e I_{pv}). Tendo em conta que se trata de uma combinação de dois modos de funcionamento devidamente validados, não foi necessário validar o controlo de corrente preditivo e optou-se por analisar as variações do barramento em relação

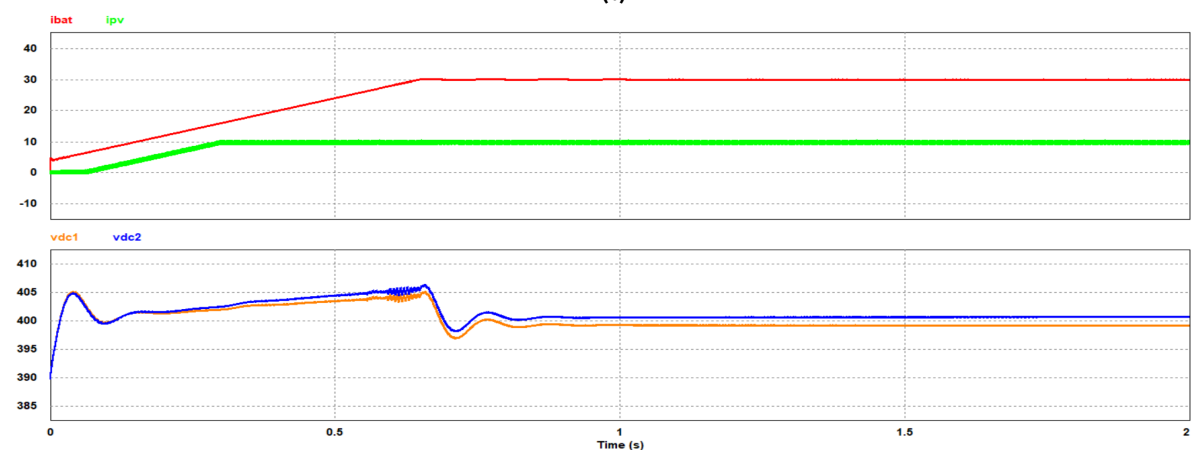
às mudanças da corrente sintetizada pelos conversores. Nas figuras seguintes é possível observar as alterações do barramento CC para distintas referências de corrente.



(a)



(b)



(c)

Figure 3.19: Resultado do barramento CC para referências de (a) $i_{pv}=20$ A e $i_{bat}=20$ A; (b) $i_{pv}=30$ A e $i_{bat}=10$ A; (c) $i_{pv}=10$ A e $i_{bat}=30$ A.

De seguida, foram analisadas as formas de onda na fase A de modo a comprovar a injeção ou extração

de energia da rede elétrica consoante a variação das correntes de referência. Os resultados podem ser observados nas figuras seguintes.

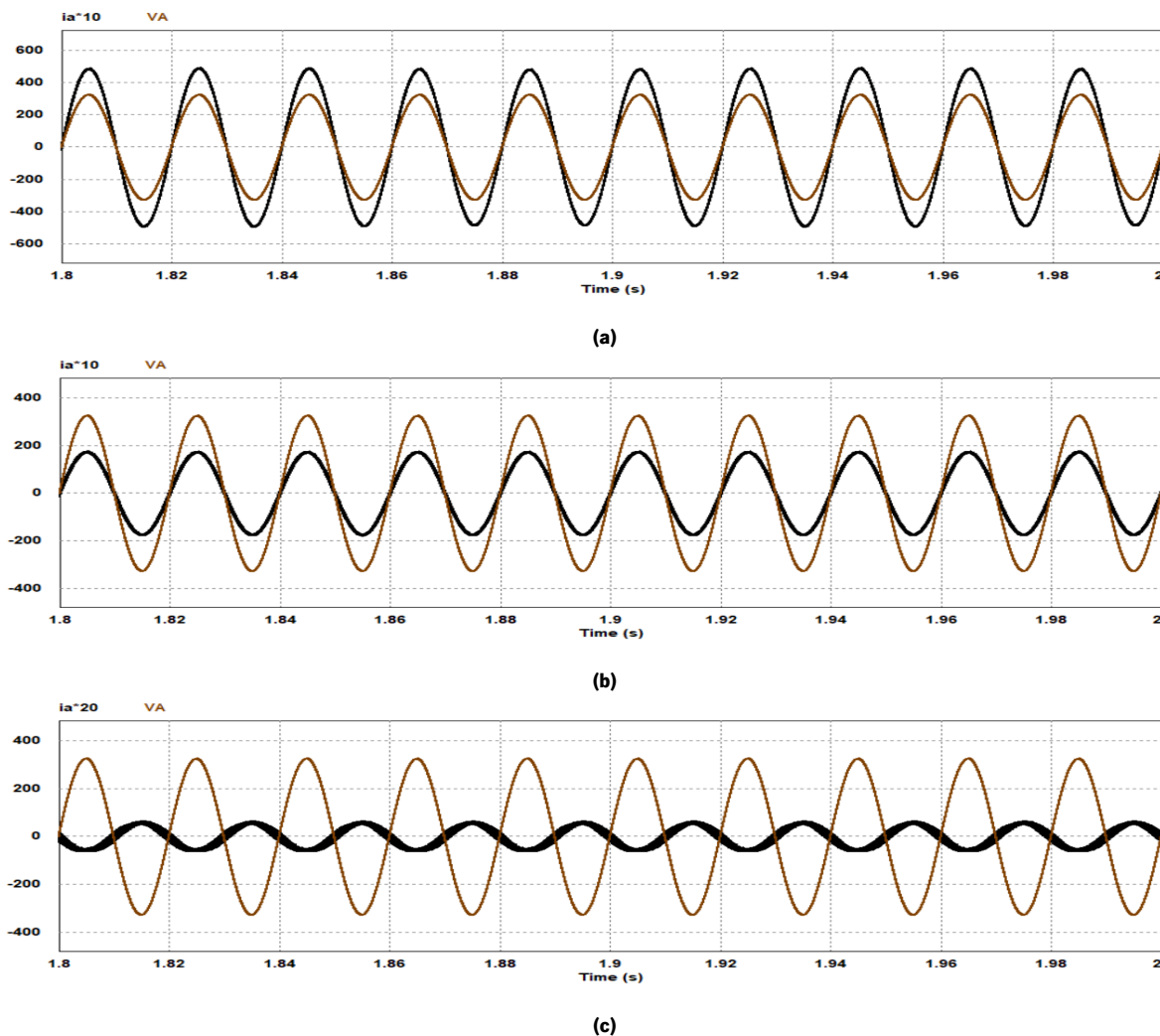


Figure 3.20: Corrente e tensão na fase A para referências de (a) $I_{pv}=10$ A e $I_{bat}=40$ A; (b) $I_{pv}=20$ A e $I_{bat}=20$ A; (c) $I_{pv}=40$ A e $I_{bat}=10$ A;.

Assim sendo, é possível validar o correto funcionamento dos dois modos acima referidos: carregamento de baterias em simultaneidade com extração de energia dos painéis fotovoltaicos. No primeiro caso, quando a corrente nas baterias é maior que a corrente nos painéis, o sistema é obrigado a extrair energia da rede elétrica não só para colmatar a insuficiência de corrente dos painéis que carrega as baterias, mas também para auxiliar o carregamento do barramento CC. No segundo caso, quando a quantidade de corrente é a mesma, a situação é semelhante, embora não seja necessária tanta energia da rede elétrica para resolver os problemas referidos anteriormente. Por fim, quando a corrente proveniente dos painéis é superior à das baterias, numa fase inicial, o sistema não responde como era expectável, pois volta a lidar com o carregamento das baterias e do barramento CC. No entanto, assim que esse processo termina, a corrente de sobra produzida pelos painéis solares é injetada na rede elétrica, validando o correto funcionamento deste modo de funcionamento. De notar que, para a mesma proporção

de corrente, a quantidade de potência injetada ou fornecida varia consoante o modo de operação em que se encontra. Isto é, quando a corrente do lado dos painéis é 4 vezes maior que no lado das baterias, a potência injetada é menor que aquela que é fornecida quando a corrente das baterias é 4 vezes maior que a corrente dos painéis. Isto acontece, principalmente, porque a potência do lado das baterias e do lado dos painéis é diferente.

3.5 Conclusão

Durante a realização deste capítulo, no início foram apresentadas as topologias do conversor CC-CC que foram selecionadas para integrar o sistema. Foi feita uma análise detalhada do conversor tipo *boost* de três níveis, para a interface com os painéis solares, que permite um fluxo de energia unidirecional. Também foi abordado o conversor do tipo *buck-boost asymmetrical*, responsável pela interface com os sistemas de armazenamento de energia, neste caso as baterias, que possibilita um fluxo de energia bidirecional. Depois, foi esclarecido o algoritmo de controlo de corrente preditivo, cuja função é fornecer a tensão adequada aos IGBT de maneira que a corrente do conversor seja a mais próxima da corrente de referência. Optou-se por este algoritmo de corrente uma vez que não necessita do ajuste de ganhos, pois utiliza o modelo do circuito elétrico para sintetizar os sinais de comando do conversor.

A seguir, foram esclarecidas as simulações computacionais realizadas no *PSIM*, onde foram desenhadas as topologias anteriormente mencionadas, em paralelo com o código C, desenvolvido no *C Block*, para implementação das equações do algoritmo de controlo de corrente indicado. Inicialmente, abordou-se o método de carregamento e descarregamento das baterias, validando o aumento de corrente na rede conforme o fluxo de energia do sistema. Depois, a extração de energia dos painéis solares ao comprovar-se a injeção de potência ativa na rede elétrica. Por fim, foram agrupados o método de carregamento de baterias e o de extração de energia dos painéis, com o intuito de validar a combinação destes dois modos de operação.

Em suma, as simulações citadas anteriormente contribuíram para a validação dos diferentes modos de operação do sistema, sendo que a próxima etapa passa pela elaboração física do protótipo.

4. Desenvolvimento de Hardware e Sistema de Controlo

4.1 Introdução

Este capítulo baseia-se na apresentação de todo o *hardware* e sistema de controlo utilizados no desenvolvimento do protótipo proposto. Inicialmente é apresentado o desenho 2D de todo o sistema, assim como o esquemático da interface com a rede elétrica, com os painéis fotovoltaicos e com as baterias. A seguir são descritos todos os materiais utilizados para o desenvolvimento do circuito de potência, do qual fazem parte os semicondutores, o barramento CC, as resistências de pré-carga e as proteções utilizadas nas ligações com a rede elétrica, os painéis e as baterias. Posteriormente são exibidas todas as placas de circuito impresso (PCBs) fornecidas pelo GEPE para a realização do sistema de controlo. Para este projeto foram utilizadas uma placa de condicionamento de sinal, uma placa de comando, uma placa *digital-to-analogic converter* (DAC) e uma DSP e o seu respetivo adaptador.

4.2 Sistema de Potência

Para desenvolver o circuito de potência, foi necessário realizar uma análise prévia de todos os materiais a ser utilizados para a projeção das duas topologias de conversores CC-CC. Como referido no capítulo anterior, optou-se por uma topologia *boost* de três níveis com fluxo unidirecional para o conversor que faz a extração de energia dos painéis solares, enquanto que para o conversor que faz o carregamento e extração de energia das baterias a topologia selecionada foi do tipo *buck-boost asymmetrical*, a qual permite um fluxo bidirecional.

Posto isto, foi necessário averiguar quais os materiais disponíveis no laboratório do GEPE e, com a ajuda da ferramenta *Visio*, fazer um desenho 2D da disposição dos mesmos de modo a otimizar não só o espaço, como também o material usado (ex.: cabos, calhas, etc.). O protótipo foi montado dentro de um armário e é constituído por dois conversores CC-CC, para a interface com painéis solares e baterias, e um conversor CA-CC, para a ligação com a rede elétrica. De modo a fazer estas conexões foi necessário implementar dois circuitos de proteção, por meio de disjuntores, fusíveis, contactores e resistências de pré-carga.

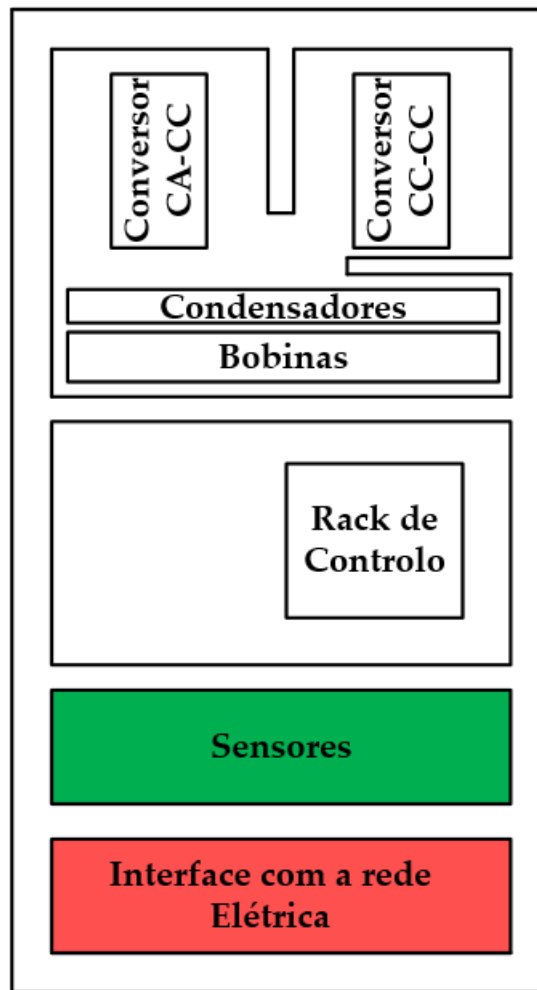


Figure 4.1: Desenho do armário na ferramenta *Visio*.

4.2.1 Semicondutores de Potência

O modelo dos semicondutores de potência usados neste projeto foi o SKM50GB063D da *Semikron* [45]. Estes semicondutores possuem uma série de características que vão de encontro às especificações que este projeto necessitava. Suportam uma corrente nominal de 50/70 A e tensões máximas entre o emissor e coletor de 600V. O seu modelo elétrico pode ser observado na figura abaixo.

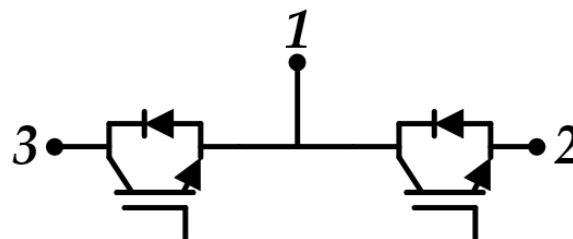


Figure 4.2: Esquema elétrico do módulo de IGBT.

Como é possível observar a partir da imagem, este modelo é constituído por dois IGBT com díodos em antiparalelo. Para a concessão deste conversor foram utilizados 4 semicondutores deste tipo, onde dois se destinavam à interface com os painéis solares e outros dois à interface com as baterias. No caso da ligação aos painéis solares, só um dos IGBT de cada módulo é usado, sendo que o restante atua simplesmente como um diodo. É importante salientar que de modo a realizar a proteção da *gate* de cada IGBT foi utilizado um pequeno circuito de proteção que consiste em dois díodos de *zener* numa configuração em ânodo comum. O objetivo é não sobrecarregar as *gates* dos IGBT com sinais que possam conter valores de tensão demasiado elevados e que ponham em causa o correto funcionamento dos semicondutores.

Novamente, com o intuito de proteger os semicondutores, foram adicionados condensadores de *snubber* aos terminais de cada um deles. Assim são evitados picos de tensão que possam levar à destruição do módulo, pois estes condensadores comportam-se como um filtro passa-baixo. São condensadores produzidos pela EPCOS da família B32686-S1104-K503 que possuem uma capacidade de 0,1 μF e suportam tensões até aos 1600 V.

Por fim, de maneira a reduzir o aumento da temperatura causado pelas comutações dos IGBT e mitigar as perdas por efeito de Joule, todos os componentes referidos anteriormente foram anexados a um dissipador da *Semikron*, que para além das vantagens já referidas também ajuda a otimizar o espaço dentro do armário utilizado neste projeto. Na figura 4.3 é possível observar o resultado dessa junção.

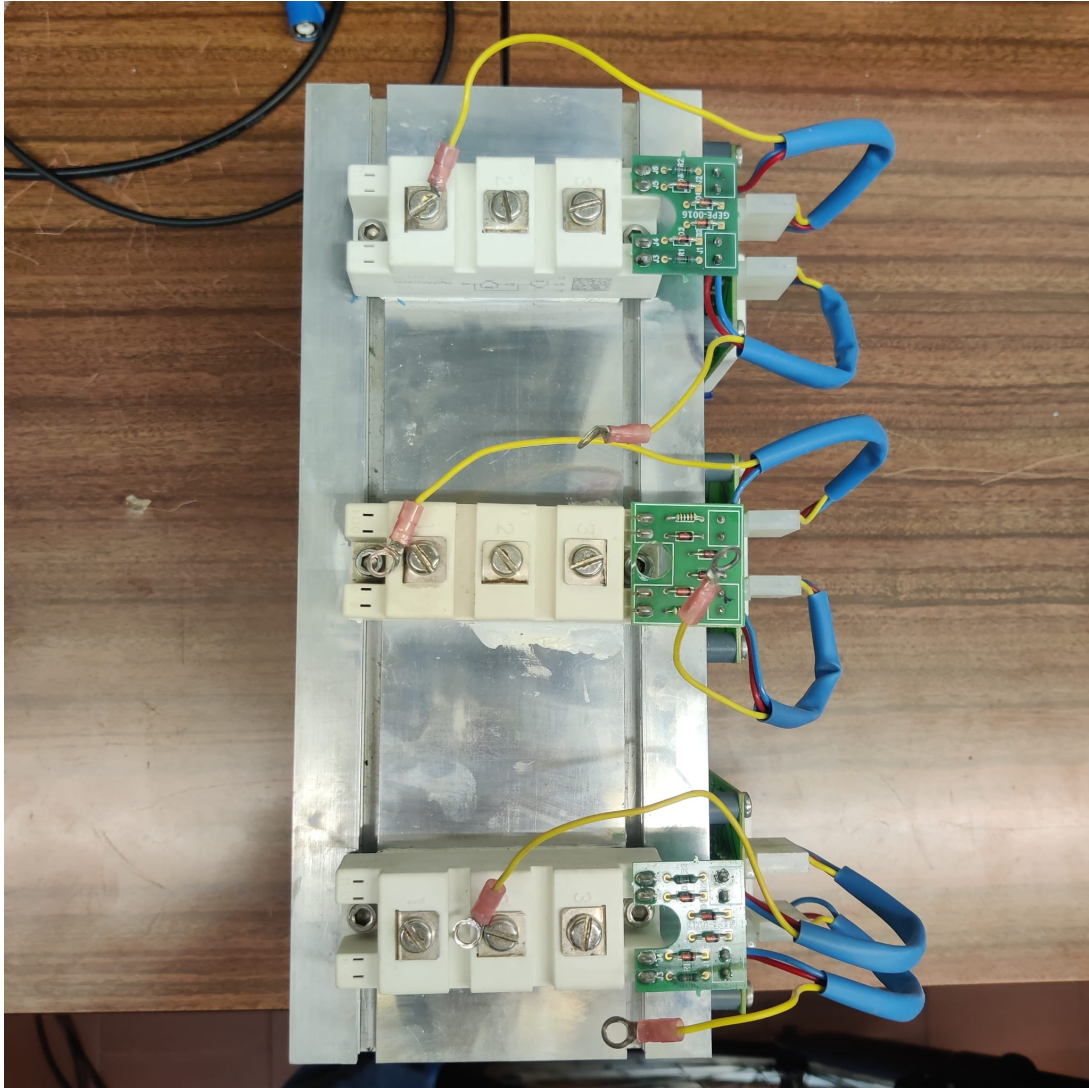


Figure 4.3: Semicondutores anexados ao dissipador.

4.2.2 Barramento CC

Para um bom funcionamento, tanto do conversor CC-CC como do conversor CA-CC, é importante garantir que o barramento armazene uma quantidade considerável de energia. Sendo assim, de modo que as necessidades do barramento fossem cumpridas, foram utilizados condensadores e um controle PI para regular a tensão e garantir uma tensão estável no barramento em regime permanente. Para isso, os condensadores eletrolíticos selecionados foram os B43456 A4828 M do fabricante EPCOS [46] que possuem uma capacidade de 8200 μF e suportam uma tensão de 350 V. Foram utilizados 8 condensadores, formando um paralelo de dois condensadores em série em cada braço do barramento como ilustra a seguinte figura.

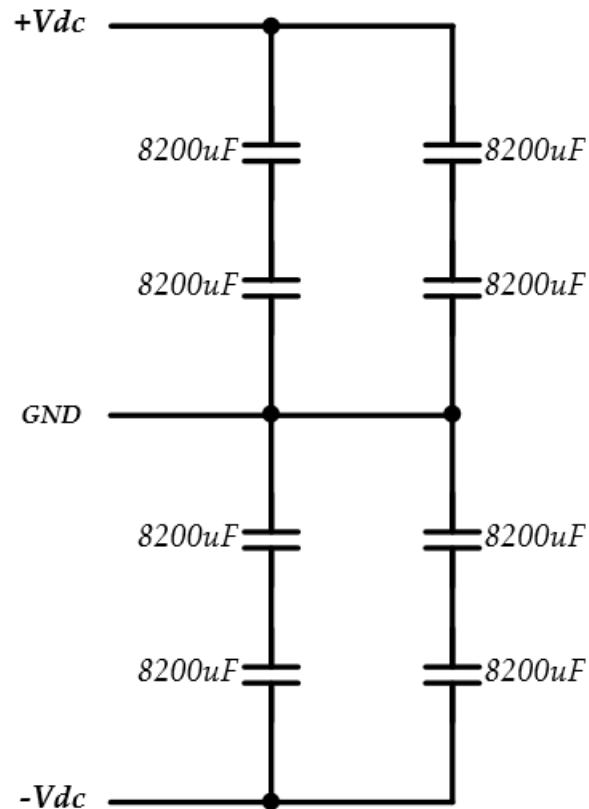


Figure 4.4: Esquema elétrico do barramento CC.

Assim, cada braço tem uma capacidade de $8200 \mu\text{F}$ e suporta tensões até 700 V , o que no total se traduz numa capacitância de $4100 \mu\text{F}$ e uma tensão máxima de 1400 V .

Estes condensadores são conectados uns aos outros através de barras de cobre, isto porque o objetivo é suportarem elevadas potências. Na figura seguinte é possível observar os condensadores utilizados no projeto.



Figure 4.5: Condensador de 8200 μF .

4.2.3 Resistências de Pré-carga

Foram usadas três resistências de pré-carga para prevenir picos de corrente indesejados quando o sistema é conectado à rede elétrica. Normalmente, sempre que o protótipo é conectado à rede elétrica, os condensadores encontram-se descarregados, pelo que é necessário ter em conta medidas de proteção que evitem o consumo de corrente exagerado no processo de carregamento. Sendo assim, numa fase inicial, é necessário realizar o carregamento do barramento CC através das resistências de pré-carga de maneira a prevenir a possível ativação dos componentes de proteção do sistema. Posteriormente, quando o barramento atinge os valores de tensão desejados pelo utilizador, é efetuado um *shunt* às resistências e o sistema é ligado diretamente à rede elétrica. Este processo é designado por *by-pass* das resistências de pré-carga e ocorre quando a tensão no barramento atinge o valor definido pelo utilizador no *software*, um contactor entra em condução e provoca um *shunt* nas resistências de pré-carga. De referir que os contactores são atracados ou desatracados através de uma placa de relés que quando recebe o sinal da DSP, permite a passagem ou o corte de corrente que determina a ação dos contactores. Na figura abaixo é possível verificar as resistências de pré-carga, cada uma de 100 Ohm, que integram este protótipo.

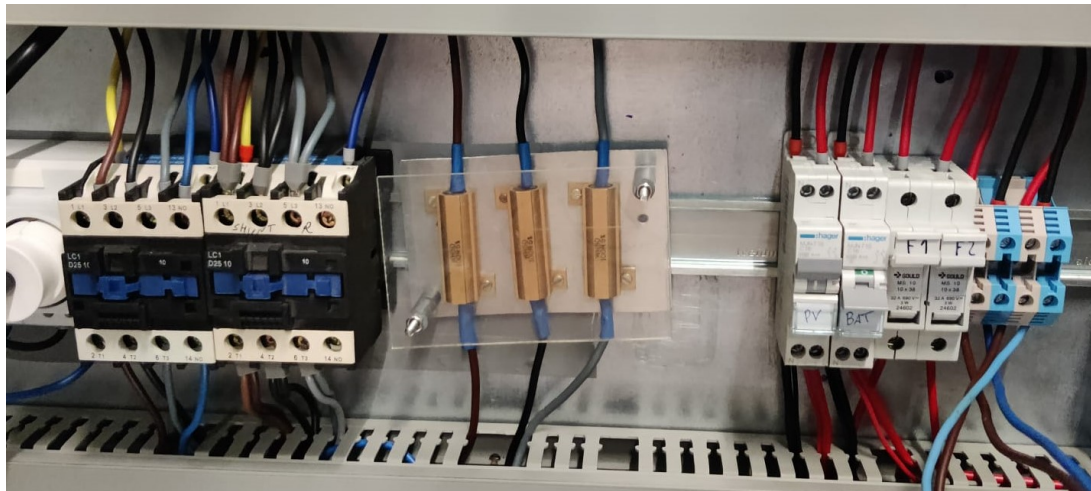


Figure 4.6: Resistências de pré-carga.

4.2.4 Circuito de Proteção para Interface com Rede Elétrica, Painéis Fotovoltaicos e Baterias

Para a interface do sistema com a rede elétrica, os painéis solares e as baterias, recorreu-se novamente à ferramenta de desenho *Visio* de maneira a simplificar as ligações entre os componentes. Na figura abaixo é possível observar o esquema utilizado durante a montagem deste protótipo.

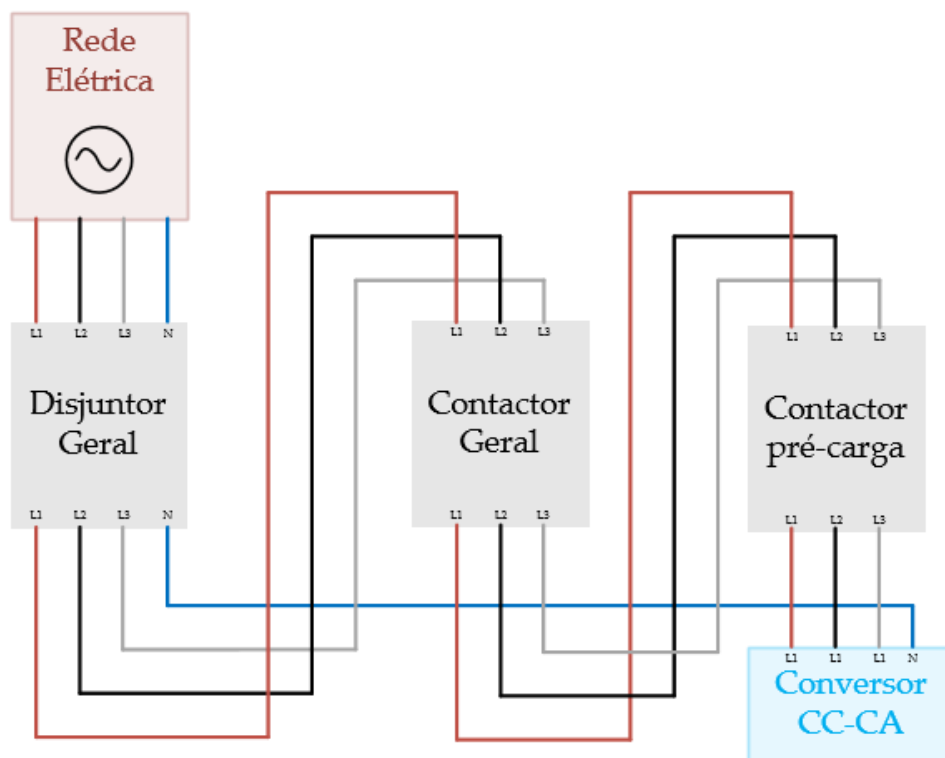


Figure 4.7: Desenho das proteções para interface do conversor CA-CC com a rede elétrica.

Seguindo a figura, a primeira proteção a ser implementada foi o disjuntor trifásico na ligação entre o conversor CA-CC e a rede elétrica. Este aparelho evita picos de corrente que danifiquem o sistema, pois dispara, ou seja, desatraca automaticamente, assim que são detetados valores de corrente nominais que ultrapassem os 16 A. Em série com o disjuntor são colocados dois contactores controlados por software que têm como função comutar quando certos valores de tensão são atingidos ou ultrapassados. Uma vez que sempre que se efetua a ligação à rede os condensadores do barramento CC estão descarregados é necessário integrar neste circuito três resistências de pré-carga (com o valor de 100 Ohm) em paralelo com o contactor, como referido anteriormente.

No caso da ligação do conversor CC-CC às baterias e aos painéis solares, o circuito de proteção é bem mais simples como é possível reparar na figura 4.8. Desta vez foram utilizados dois disjuntores monofásicos AC, apenas para teste laboratorial, em série com dois fusíveis evitando, de igual forma, picos de corrente indesejados.

Por último, para fazer o acoplamento do conversor CC-CC aos painéis fotovoltaicos e às baterias, foram utilizadas duas bobinas com uma indutância de 5mH que foram colocadas por baixo do barramento CC como mostra a figura 4.9.

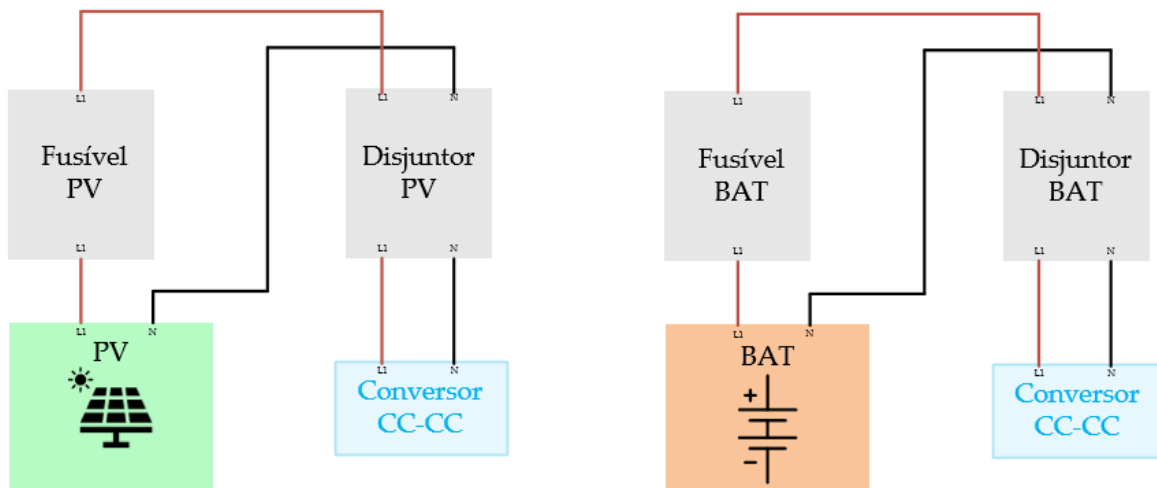


Figure 4.8: Desenho das proteções para interface do conversor CC-CC com os painéis e as baterias.

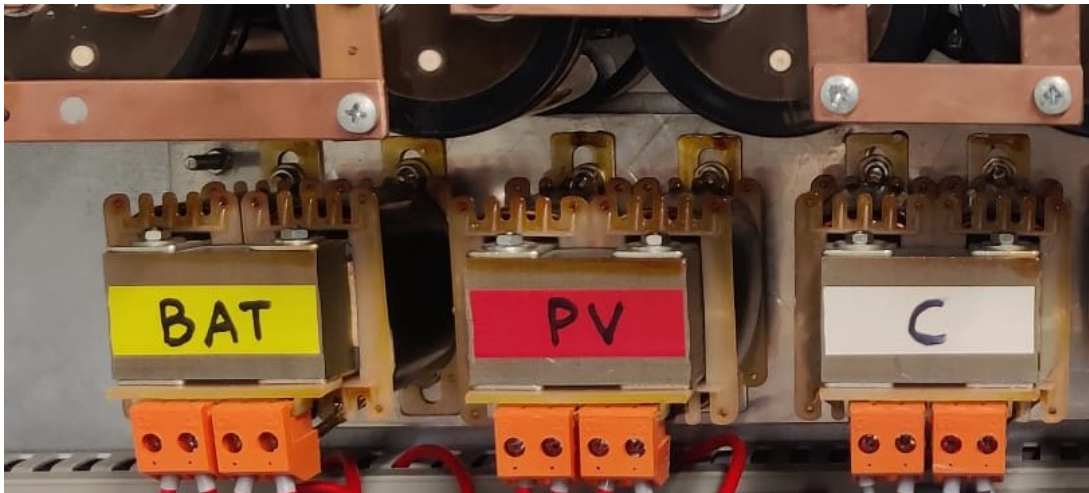


Figure 4.9: Bobinas de acoplamento aos painéis e às baterias.

4.3 Sistema de Controlo

O sistema de controlo acaba por se tornar o cérebro deste projeto onde todos os dados são lidos e processados. Do grupo mencionado fazem parte os sensores de corrente e de tensão, a placa de condicionamento de sinal, a placa de comando, a placa *digital-to-analogic converter* (DAC) e a DSP. Nesta segunda parte do capítulo será justificada a utilidade destes componentes a partir de uma análise aprofundada das funções que cada um possui. Importante também referir que estas placas de circuito impresso partilham a mesma responsabilidade para um correto funcionamento do sistema, pelo que à mínima falha ou anomalia o desempenho do projeto fica comprometido.

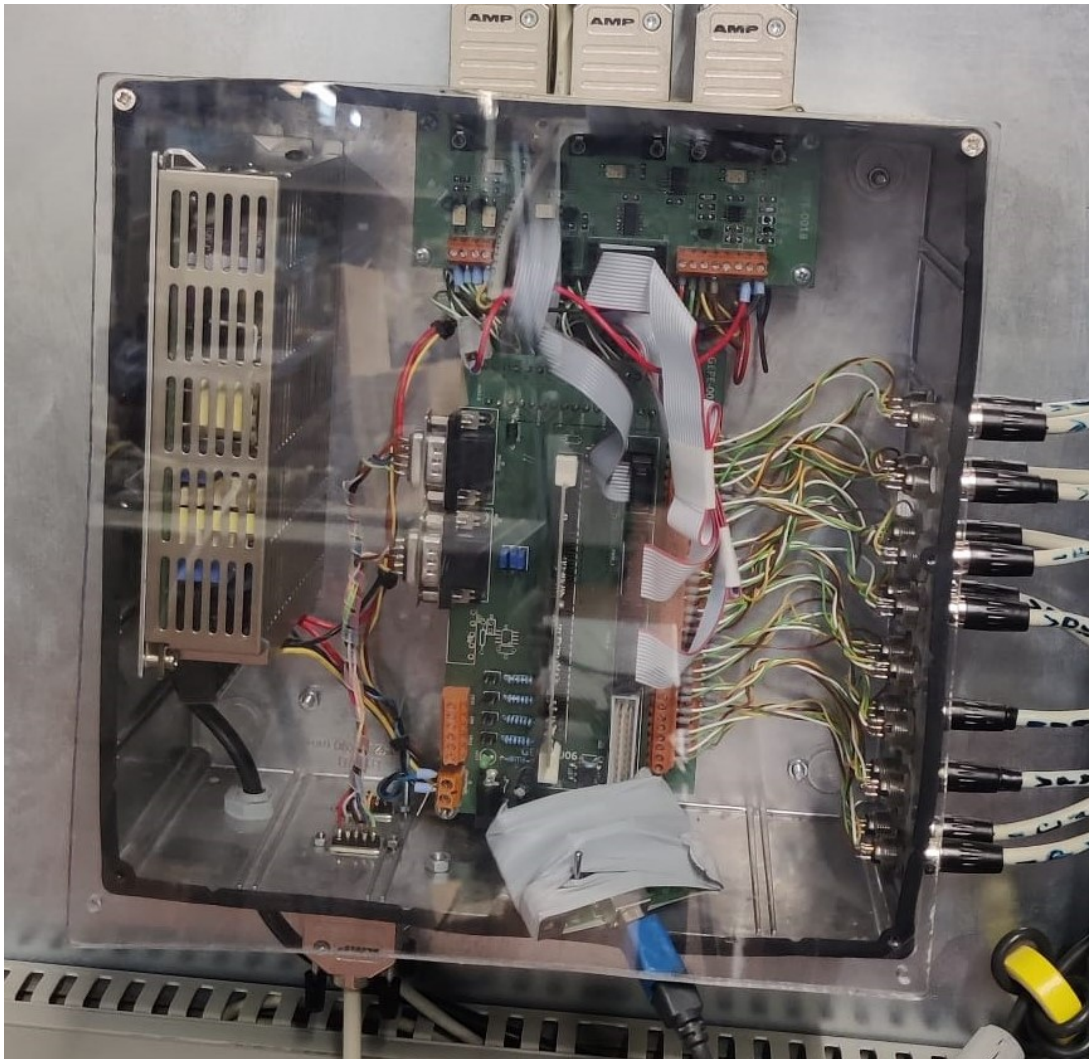


Figure 4.10: Rack de controlo.

4.3.1 Sensores de Tensão

De maneira a monitorizar o comportamento do sistema é imprescindível a utilização de sensores. Neste projeto foram usados sensores de corrente e sensores de tensão que, tal como o nome indica, fazem a medição em tempo real da intensidade (A) e da diferença de potencial (V) no local onde são colocados. Os sensores de tensão utilizados para este efeito estavam disponíveis no GEPE, foram fabricados pela ChenYang e o seu modelo é o CYHVS5-25A [47].

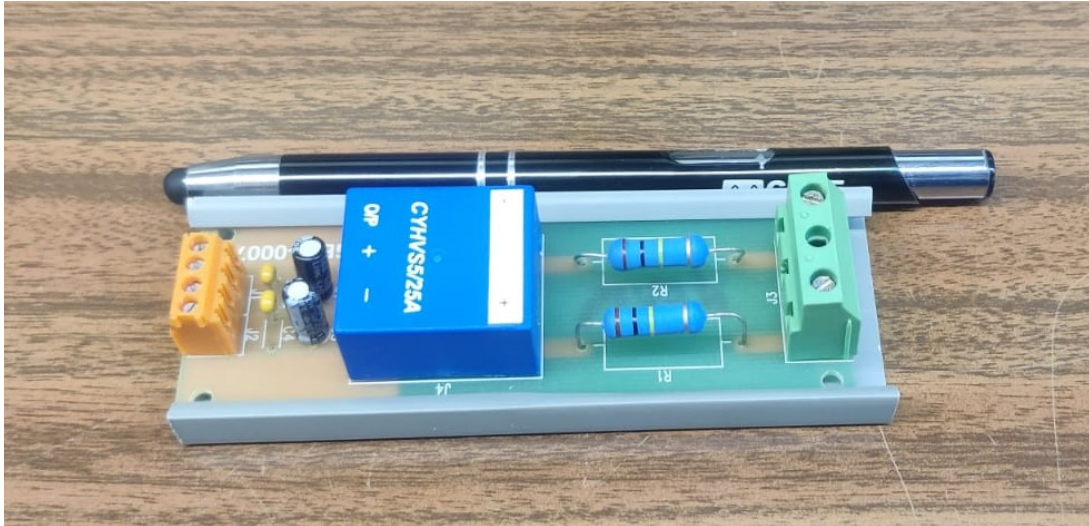


Figure 4.11: Sensor de tensão.

Outra razão que levou ao uso de sensores foi a necessidade de traduzir elevadas grandezas em valores capazes de ser lidos pelo ADC e posteriormente processados pela DSP. Posto isto, os sensores de tensão designados para este projeto conseguem ler valores de tensão até aos 2000 V RMS e têm a particularidade de medir sinais de tensão contínuos ou alternados, o que acaba por ser uma mais valia. No entanto, a saída destes sensores é um sinal de corrente, pelo que foi necessário, recorrendo ao datasheet do fabricante, dimensionar resistências de maneira a obter um sinal de tensão apropriado para leitura no ADC.

Neste projeto foram utilizados 7 sensores de tensão para monitorizar a tensão em vários pontos específicos do sistema: 2 no barramento CC, 3 para as fases da rede elétrica, 1 para as baterias e 1 para os painéis fotovoltaicos. Adicionalmente, foi colocado 1 sensor como reserva para eventuais medições futuras.



Figure 4.12: Sensores de tensão.



Figure 4.13: Sensores de tensão do barramento CC.

4.3.2 Sensores de Corrente

Como referido anteriormente, também é necessário monitorizar em tempo real os valores de corrente presentes no sistema. Os sensores de corrente escolhidos para integrar este projeto foram os LA-55P fabricados pela LEM [48] e têm a capacidade de medir corrente, alternada ou contínua, até aos 50 A RMS nominais. Para fazer a medição nos vários pontos de interesse foram utilizados 5 sensores deste tipo: 3 para cada fase da rede elétrica, 1 para as baterias e 1 para os painéis fotovoltaicos.

Importante referir que para melhorar a leitura dos valores tornando o sensor mais sensível, é passado o fio condutor pelo orifício de medição. No entanto, à medida que são efetuadas voltas do cabo pelo orifício em questão, a gama do sensor diminui na razão do número de espiras feitas e o valor medido também aumenta proporcionalmente. Por exemplo, se o valor real de corrente que atravessa o cabo numa determinada altura for 5 A e o sensor possuir 3 espiras, o valor lido corresponde ao equivalente de 15 A, pelo que é necessário proceder ao devido ajuste via software. Neste caso foi feita uma espira nos

sensores de cada fase da rede e das baterias, e 3 espiras no sensor que mede a corrente proveniente dos painéis solares, aumentando assim a precisão de leitura.

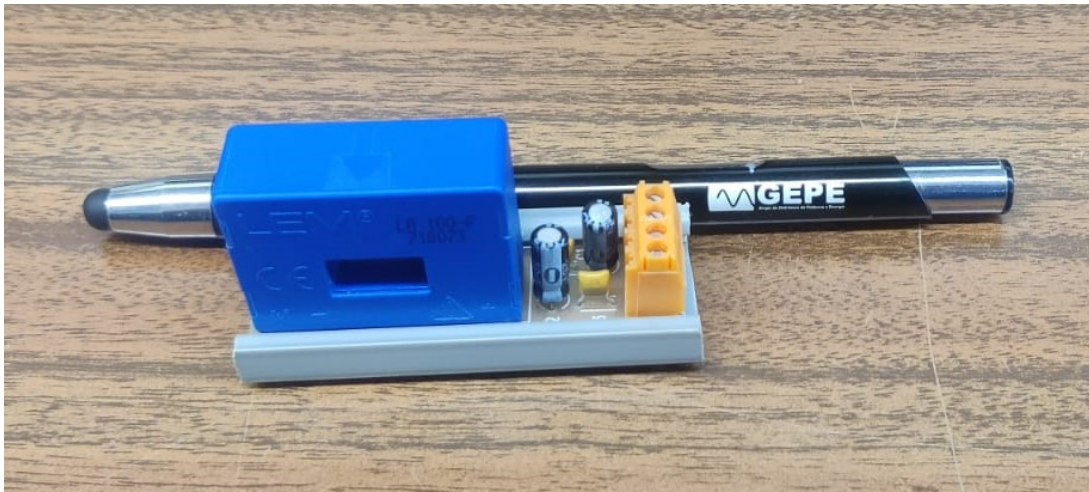


Figure 4.14: Sensor de corrente.

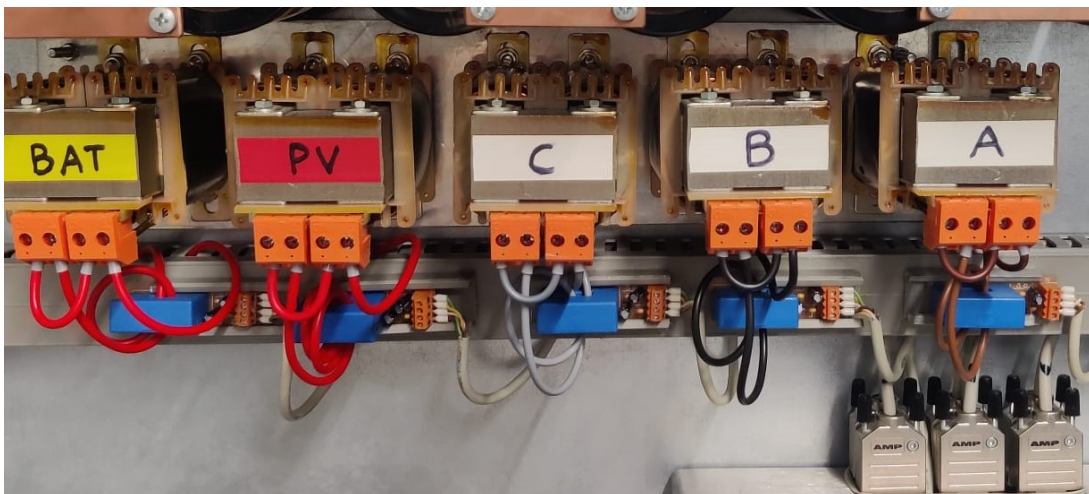


Figure 4.15: Sensores de corrente.

4.3.3 DSP

O DSP é onde se processam os dados, nomeadamente as leituras dos sensores, e onde todos os algoritmos de controlo, que foram mencionados no capítulo das simulações computacionais, estão implementados. Trata-se do microcontrolador TMS320F28335 da Texas Instruments [49] e o IDE utilizado para a sua programação foi o *Code Composer* também da Texas Instruments. Recorrendo ao datasheet do DSP os principais recursos fornecidos por esta são:

- Clock de 150MHz (6.67ns);
- 1 módulo de SPI;

- 3 Temporizadores de 32-bits;
- 18 saídas de PWM;
- 16 canais de ADC de 12-bits;
- 88 pinos de uso geral;
- *Debug* em tempo real.

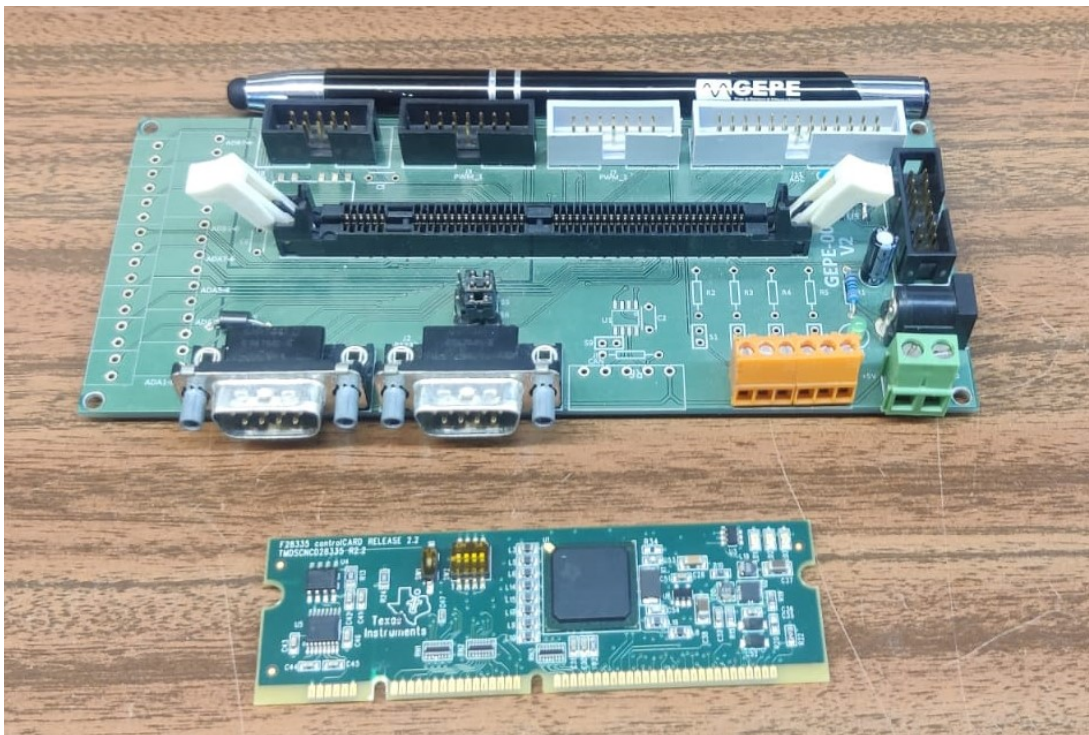


Figure 4.16: DSP e placa de adaptação.

Também foi utilizada uma placa de adaptação do DSP desenvolvida pelo GEPE para fazer a ligação entre o DSP e as restantes placas do *rack* de controlo. Disponibiliza uma interface simplificada e desenhada visando tirar o máximo proveito das características do DSP anteriormente mencionadas.

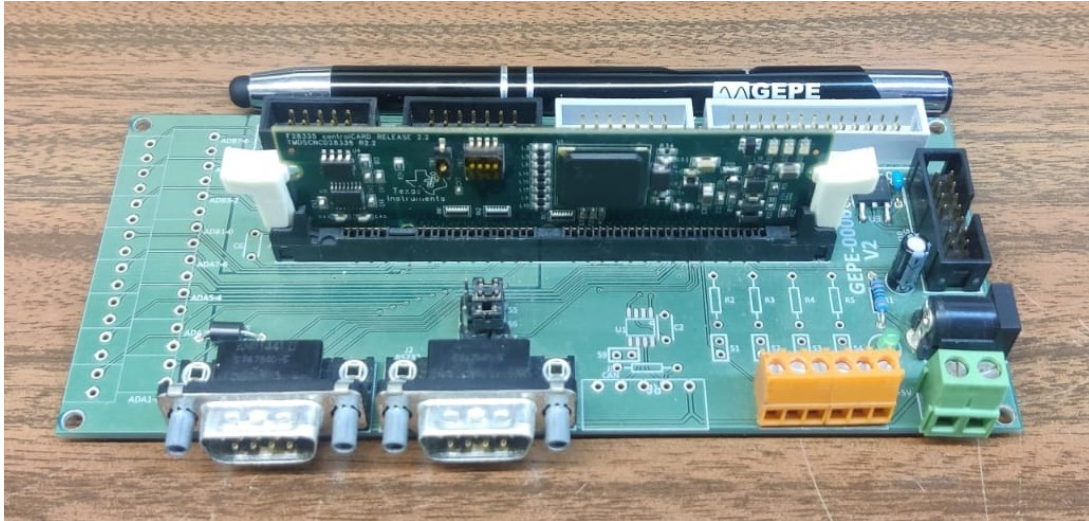


Figure 4.17: DSP inserido na placa de adaptação.

4.3.4 Placa de Comando

A placa de comando tem a capacidade de receber 6 sinais de PWM (2 por cada ficha DB9 nela existente) e elevar a amplitude dos mesmos. É responsável pela conexão entre o DSP, que gera sinais de PWM de +3,3 V, e a placa de *drive* dos IGBT, que opera com sinais a +15 V. Como os PWMs provenientes do DSP não podem ser aplicados diretamente aos IGBT é necessário recorrer a uma placa de comando. Em simultâneo, este circuito impresso incorpora um NE555 da Texas Instruments que, até que seja feito um reset, memoriza os erros que vêm por defeito sempre que a placa é ligada. No entanto, os PWMs só são enviados para as respetivas *drives* quando é feito um enable por parte do utilizador via software, que no caso deste projeto para efeitos de teste, foi escolhido o carácter 'X' para ser enviado pela porta série de modo a ativar ou desativar as comutações dos IGBT. Outra particularidade desta placa de comando é o facto de acender Leds verdes e vermelhos que traduzem o correto funcionamento ou a existência de erros no sistema, respetivamente.

4.3.5 Placa de Condicionamento de Sinal

Para que o sistema de controlo atue corretamente e implemente os algoritmos de controlo concebidos pelo utilizador é fulcral o recurso a uma placa de condicionamento de sinal. Esta placa tem a tarefa de enviar todos os dados lidos pelos sensores para o DSP e atuar caso sejam detetadas anomalias nas leituras. Os ADCs internos do DSP não possuem a mesma gama de valores que os sensores fornecem, portanto, é necessário utilizar uma placa de condicionamento de sinal para realizar esse ajuste e assim fazer a interface entre os sensores e o microcontrolador. Esta placa foi concebida e fornecida pelo GEPE e está equipada para realizar o condicionamento de sinal de 16 canais de ADC.

Simultaneamente, está preparada com um mecanismo de deteção de erros caso os valores dos sensores detetem uma sobrecorrente ou uma sobretensão. Um sinal é enviado diretamente para a placa de

comando que imediatamente suspende o envio de PWMs para os IGBT assegurando assim um sistema de proteção ainda mais robusto.

4.3.6 DAC

A placa de DAC, *digital-analog-converter*, permite ao utilizador a visualização de 8 variáveis do sistema e ajudar na monitorização das mesmas. Foi concebida para ser conectada a um osciloscópio e facilitar a comparação entre variáveis analógicas e variáveis digitais. É conectada ao DSP por uma ficha DB9 responsável pela comunicação SPI entre as duas placas e pela alimentação do DAC. Na figura abaixo é possível visualizar os 8 canais de saída constituídos por fichas BNC fêmeas de maneira a permitir a ligação ao osciloscópio.

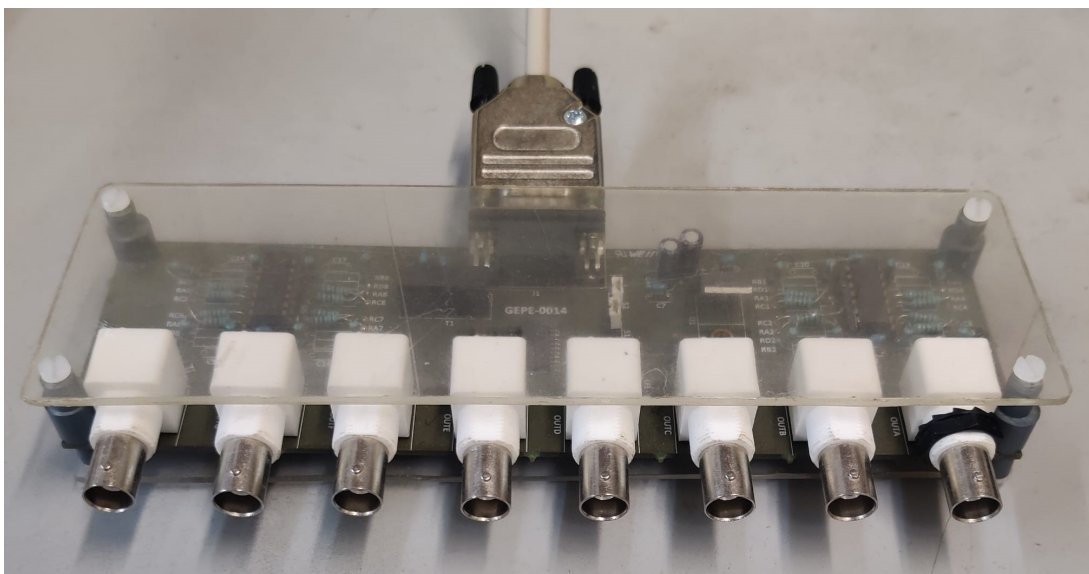


Figure 4.18: Placa de DAC.

4.3.7 Placa de Drive dos IGBT

As placas de *drive* foram afixadas a cada um dos IGBT e têm como função dividir a parte de potência da parte de controlo. No circuito de controlo a quantidade de tensão e de corrente é relativamente baixa em comparação com o circuito de potência, implicando um isolamento de ambas as partes. Isto garante não só o bom funcionamento destas duas componentes, como também contribui para um aumento da segurança do sistema. O modelo da *driver* utilizada para integrar este projeto é o SKHI22A do fabricante *Semikron* [50] e pode ser observado na figura abaixo.

4.3.8 Fonte de Alimentação

O *rack* de controle é constituído por várias placas e, por isso, é necessário efetuar a alimentação de maneira que estas realizem as suas funções. Foi então utilizada uma fonte comutada capaz de fornecer a tensão de alimentação necessária a cada placa, visto que possuem tensões de alimentação diferentes, e que fosse possível ser conectada a uma das fases da rede elétrica (230 V). Optou-se então pelo modelo TXL 060-0533TI do fabricante *TRACO Power* [51]. Esta fonte possui três saídas diferentes onde a primeira dispõe de +5 V e 7 A, a segunda +15 V e 3 A e a terceira -15 V e 1 A. Além disso, fornece uma potência máxima em cada saída de 60 W e sintetiza as correntes a uma frequência de 50 Hz.

4.4 Montagem do Protótipo Desenvolvido

Assim que foi dada por terminada a fase de seleção dos componentes mais adequados para integrar este projeto, partiu-se para a fase de montagem. O GEPE forneceu ao grupo uma *platine* para o desenvolvimento dos dois conversores, pelo que, tendo em conta as medidas da estrutura e dos componentes que iam ser utilizados, foi necessário recorrer à ferramenta de desenho *Visio* como anteriormente mencionado. Na figura 4.21 é possível visualizar o resultado da construção do protótipo.

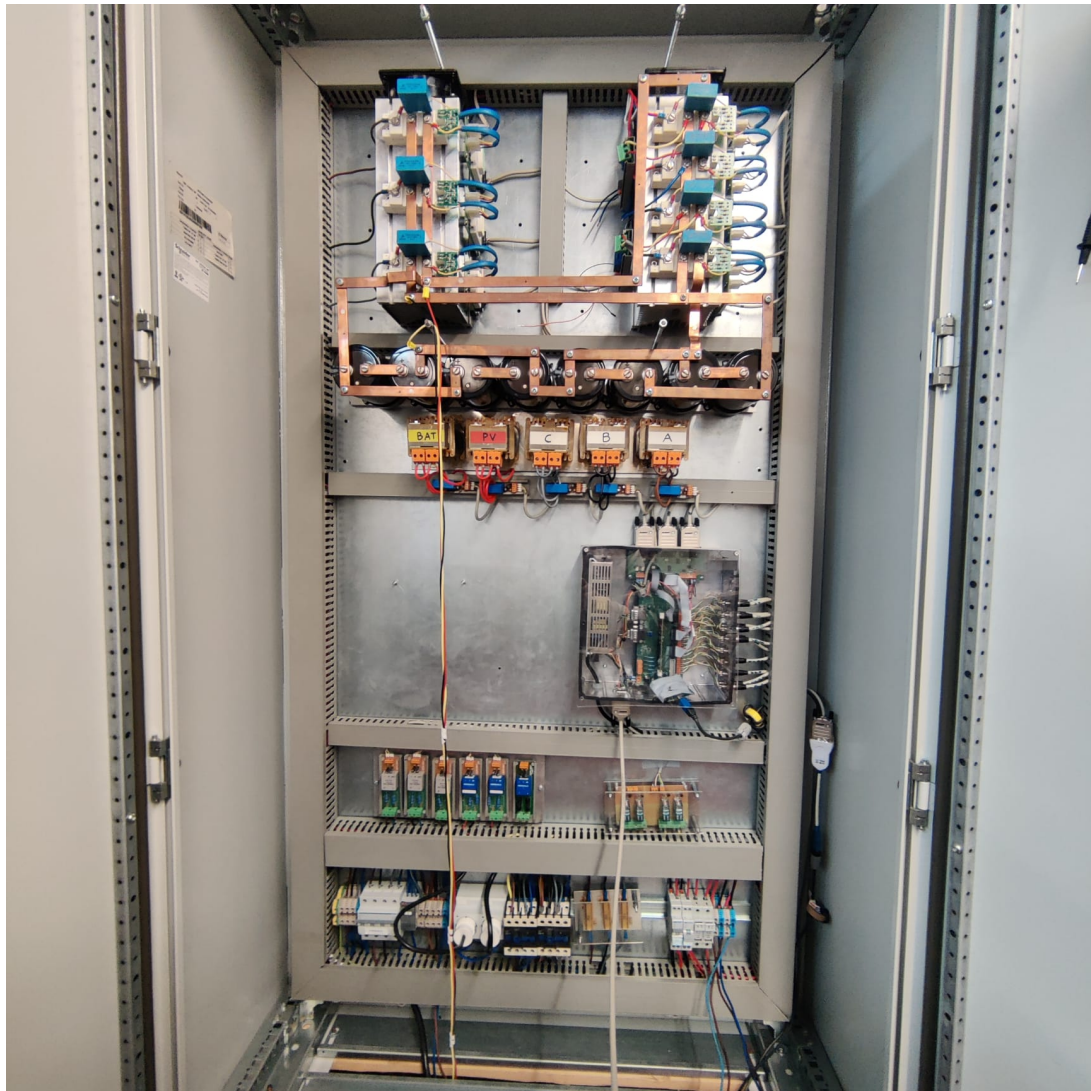


Figure 4.21: Protótipo final.

Inicialmente, foram colocados na *platine* os dois dissipadores que continham os módulos de IGBT (4 para o conversor CC-CC e 3 para o conversor CA-CC), cada um já com a sua respetiva placa de *drive* associada, o que agilizou bastante a montagem. Posteriormente, e seguindo o desenho efetuado no *Visio*, foram afixados à *platine* o banco de condensadores, as bobinas, o *rack* de controlo (caixa de metal que contém todas as placas de controlo), os sensores de tensão, a placa de relés e por fim, todos os elementos de proteção (disjuntores, contactores e fusíveis) em conjunto com duas tomadas. Uma das tomadas é destinada à fonte de alimentação que fornece energia ao *rack* de controlo e a outra é responsável pelo funcionamento de duas ventoinhas instaladas por cima dos dissipadores de maneira a aspirar o calor proveniente das comutações dos IGBT.

Após serem colocados todos os componentes na *platine*, realizou-se a ligação dos cabos entre estes, assim como a ligação à rede elétrica por meio de uma tomada trifásica. Contudo, um aspeto bastante importante a ter em conta trata-se da divisão dos cabos referentes ao circuito de controlo dos cabos do circuito de potência, de modo a evitar assim possíveis interferências que pudessem afetar o funcionamento

do sistema. Para isso, mais uma vez, utilizou-se a ferramenta de desenho *Visio* de onde resultou o esquema que foi seguido na realização das ligações, como se pode observar na figura abaixo.

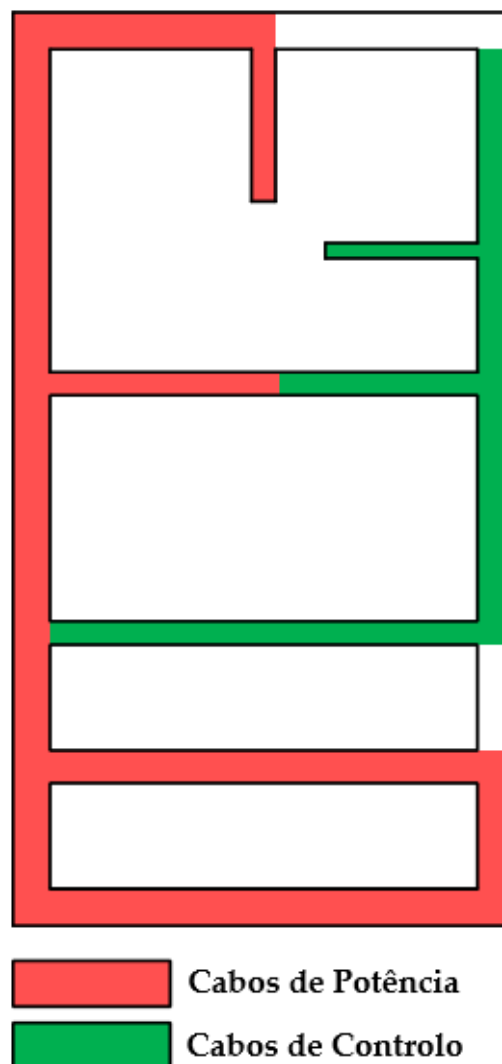


Figure 4.22: Desenho da divisão dos cabos de controle e de potência na ferramenta *Visio*.

Por fim, foram utilizadas barras de cobre com a finalidade de resistirem a valores elevados de corrente e tensão para criar o Barramento CC. No *Visio* foi projetada a melhor trajetória para cada uma das barras e o resultado pode ser verificado na figura 4.23.

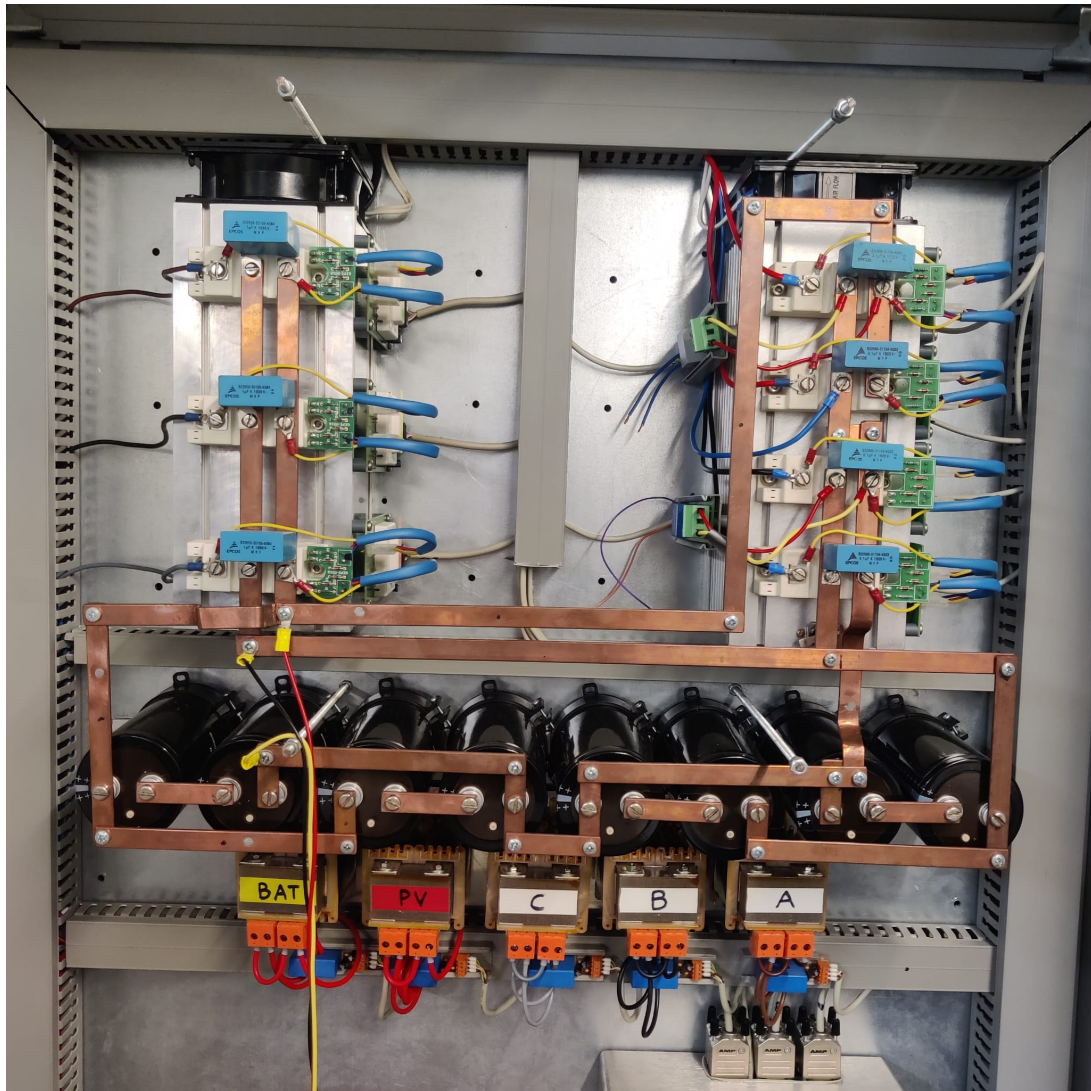


Figure 4.23: Barramento CC.

4.5 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados e descritos todos os elementos constituintes do circuito de potência, do circuito de controlo e todos os passos da sua implementação. Inicialmente, o foco foi direccionado para o circuito de potência, onde se começou por descrever quais os módulos de IGBT escolhidos para realizar as comutações dos conversores. De seguida, foi abordado o barramento CC, que necessita de armazenar uma significativa quantidade de energia para o bom funcionamento dos conversores e consequentemente de todo o sistema. Para isso foram apresentados os condensadores utilizados pelo grupo, a par da sua disposição, de modo a cumprir todas as necessidades do barramento. Também foram abordadas as resistências de pré-carga e o propósito que elas têm no correto funcionamento do sistema e os circuitos de proteção para interface com a rede elétrica, os painéis solares e as baterias.

Posteriormente, foram apresentadas todas as placas de circuito impresso escolhidas para integrar o *rack* de controlo acompanhado dos respetivos motivos para tal seleção. Numa primeira fase foram descritos os elementos destinados a fazer a leitura das grandezas elétricas (corrente e tensão) e o microcontrolador utilizado para implementar todos os algoritmos desenvolvidos pelo grupo. De seguida, foram apresentadas as características e as funções da placa de comando, da placa de condicionamento de sinal, da placa de DAC e da placa de *drive* de cada IGBT. Também foi referida a fonte responsável por alimentar todas as placas do *rack* de controlo mencionadas anteriormente.

Por fim, foi feito um breve resumo das etapas de montagem de todos os elementos anteriormente referenciados e a exposição dos desenhos que serviram de referência durante todo esse processo.

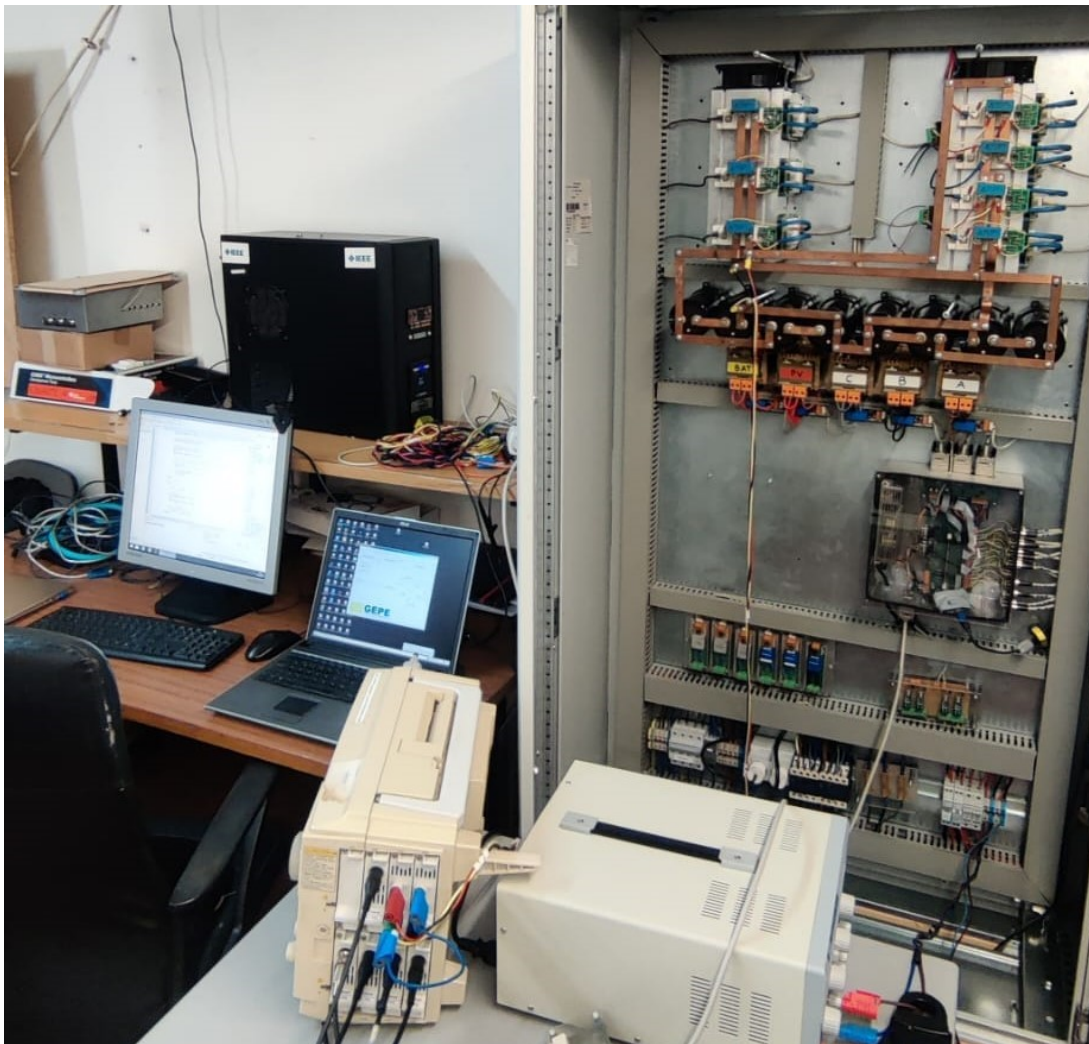


Figure 4.24: Resultado do posto de trabalho.

5. Resultados Experimentais do Protótipo Desenvolvido



Figure 5.1: Bancada de trabalho.

5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados e descritos todos os resultados obtidos a partir dos testes feitos ao sistema implementado. Destes ensaios fazem parte a regulação e carregamento do barramento CC, o sincronismo com a rede elétrica, a extração de energia dos painéis fotovoltaicos e injeção na rede, carregamento das baterias com energia proveniente da rede, descarga das baterias e injeção de energia na rede e carregamento de baterias a partir dos painéis fotovoltaicos. Todos os resultados mostrados ao longo deste capítulo foram recolhidos pelo osciloscópio de 8 canais da *Yokogawa*, modelo DL708E. Para medição de correntes, foram utilizadas 3 pinças de corrente alternada para medir a intensidade em cada fase da rede elétrica (com uma gama 10 mV/A cada) e duas pinças de corrente contínua com o objetivo de medir a corrente das baterias e dos painéis fotovoltaicos (com uma gama de 100 mV/A). A placa de DAC também ajudou na obtenção de resultados e monitorização de certas variáveis de controlo. Foi utilizado

um multímetro para fazer algumas medições e um aparelho desenvolvido pelo GEPE para descarregar os condensadores do barramento, o que agilizou e acelerou bastante o processo de testes. Tendo em conta o sistema estar conectado à rede elétrica, foi necessário usar três transformadores, ligados em estrela do lado primário e secundário, com uma razão de transformação de 230 V/25 V, de modo a fazer o isolamento galvânico e, simultaneamente, garantir maior segurança durante o manuseamento e realização de todos os ensaios ao protótipo.



Figure 5.2: Transformadores trifásicos.

5.2 Validação da PLL

A primeira vaga de testes realizadas ao protótipo foi a validação da função PLL devido à sua relevância para o sucesso dos restantes modos de funcionamento, uma vez que esta está presente em todas as funções do sistema. Esta função é responsável por garantir o sincronismo do conversor CA-CC com a rede elétrica ao gerar sinais sinusoidais de amplitude unitária em fase com a rede, independentemente da distorção do sinal original. Sendo assim, foi implementado o código inicialmente testado no bloco C do *PSIM* no DSP, uma vez que possuem a mesma linguagem de programação, e adicionado um temporizador a uma frequência de 40 KHz para a leitura dos sensores de corrente e de tensão.

A partir da figura 5.3 é possível analisar que a saída da PLL e a tensão da fase A ficam em fase. Embora haja uma pequena distorção no sinal de saída da PLL este não é suficientemente significativo para comprometer o funcionamento do sistema pelo que foi ignorado.

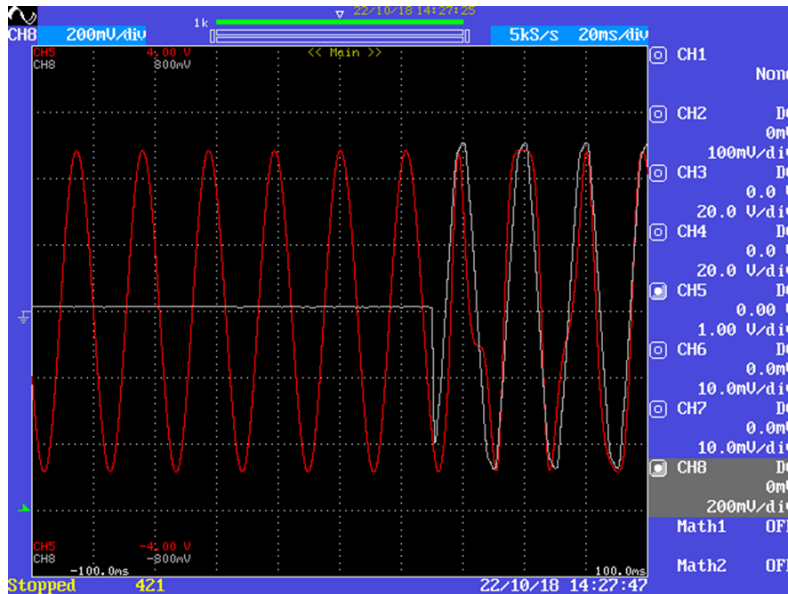


Figure 5.3: PLL e tensão na fase A em regime permanente.

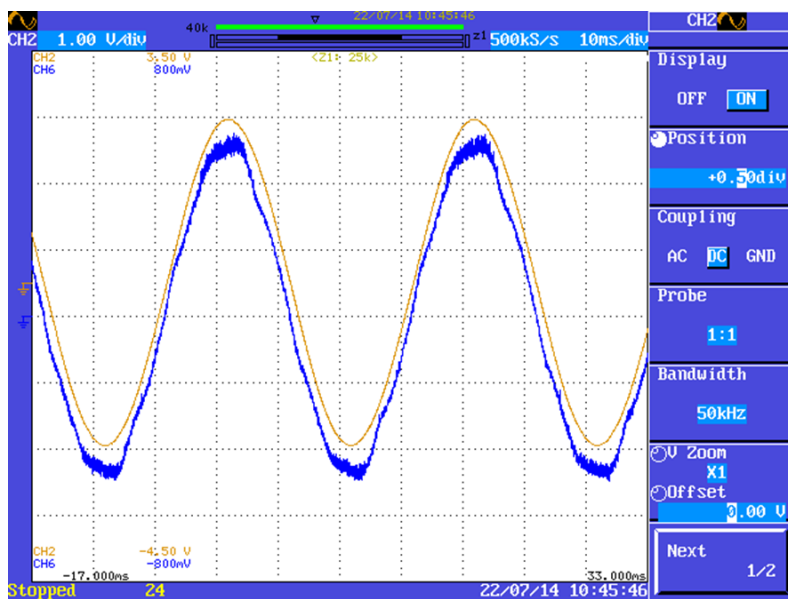


Figure 5.4: PLL da fase A

Através da placa DAC foram retiradas as formas de onda da tensão da fase A da rede elétrica, pelo que se comprova que o sincronismo foi realizado com sucesso. Mais uma vez, é possível notar uma pequena distorção e ruído, mas sem nenhum efeito para o funcionamento do protótipo.

5.3 Ensaio ao Conversor CC-CC

Terminada a validação da PLL a segunda vaga de ensaios direccionou-se para o conversor CC-CC. De maneira a tornar o conversor funcional, o primeiro objetivo passou pela certificação das comutações

dos IGBT. Para isso, e com o circuito aberto, foram gerados PWMs via *software* e enviados aos quatro semicondutores de potência destinados ao conversor CC-CC.

Após todos serem devidamente validados foram feitas duas ligações ao conversor CC-CC. De um lado foi ligada uma fonte de alimentação de 30 V com uma corrente máxima de 5 A, e do lado do barramento, foi ligada uma carga de 78Ω (3 grelhadores em série).



Figure 5.5: 3 grelhadores ligados em série ($R_{\text{carga}} = 78 \Omega$).

Foi definido que a tensão do barramento tinha de ser superior à tensão do lado da fonte e, por isso, o conversor CC-CC foi testado no modo *boost*. Para tal, a corrente proveniente da fonte foi incrementada aos poucos através de um carácter do teclado e, ao mesmo tempo, o comportamento do barramento, isto é, nas resistências de carga, também aumentava em sintonia. O resultado pode ser observado na figura 5.6.



Figure 5.6: Barramento CC com o conversor no modo *boost*.

A partir da análise do resultado é possível verificar o correto funcionamento do conversor no modo *boost*. Do lado da fonte, estão sempre presentes 30 V constantes, quando a corrente é alterada, a resposta acontece no barramento CC, e este aumenta quase até aos 60 V.

5.4 Regulação da Tensão do Barramento CC

De maneira a possibilitar um bom funcionamento dos dois conversores, a tensão no barramento CC tem de estar bem regulada, pois não pode possuir valores indesejados durante a sua atividade. Posto isto, foi necessário garantir uma tensão maior que o valor de pico proveniente da rede. Uma vez que a tensão à saída de cada transformador era de 25 V foi estipulado o valor de 70 V para cada andar, o que leva a um total de 140 V no barramento CC. Importante referir que as tensões de cada divisão do barramento têm de ser idênticas para não comprometer a sintetização das correntes.

Na figura abaixo é apresentado o processo de carregamento do barramento bem como o seu estado permanente, é de notar que esta regulação é dividida em várias etapas. Inicialmente, visto que à saída dos transformadores estão disponíveis 25 V RMS, foi feito o carregamento dos condensadores pelas resistências de pré-carga até ao valor de pico, o que equivale a 35 V. Assim que este valor é atingido o contactor entra em condução e provoca um *shunt* nas resistências de pré-carga, efetuando assim o *bypass* das resistências. Numa fase inicial optou-se por regular o barramento para 37 V em cada divisão, perfazendo um total de 74 V no barramento.

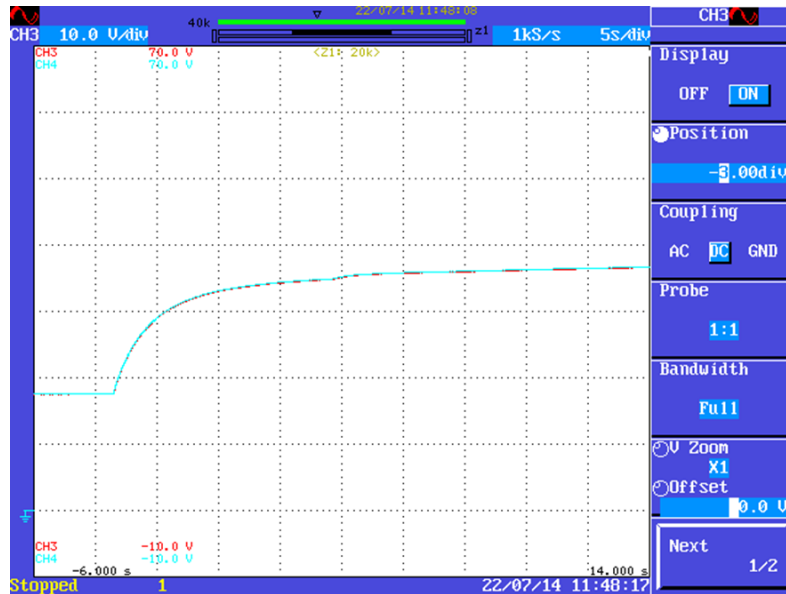


Figure 5.7: Pré-carga do barramento CC.

Posteriormente, após a validação do *bypass* das resistências e para efeitos de teste, foi definido o valor de 120 V para cada divisão do barramento em regime permanente como mostra a figura 5.8. De maneira a prevenir uma subida brusca da tensão foi programada uma rampa de referência para a mesma como é possível observar na figura abaixo.



Figure 5.8: Pré-carga e regulação do barramento CC.

5.5 Conversor CC-CC e Conversor CA-CC

Como referido anteriormente o protótipo possui diferentes modos de operação. Durante esta secção serão descritos os modos que foram implementados bem como os ensaios que foram realizados para a

validação de cada um deles.

5.5.1 Carregamento das Baterias

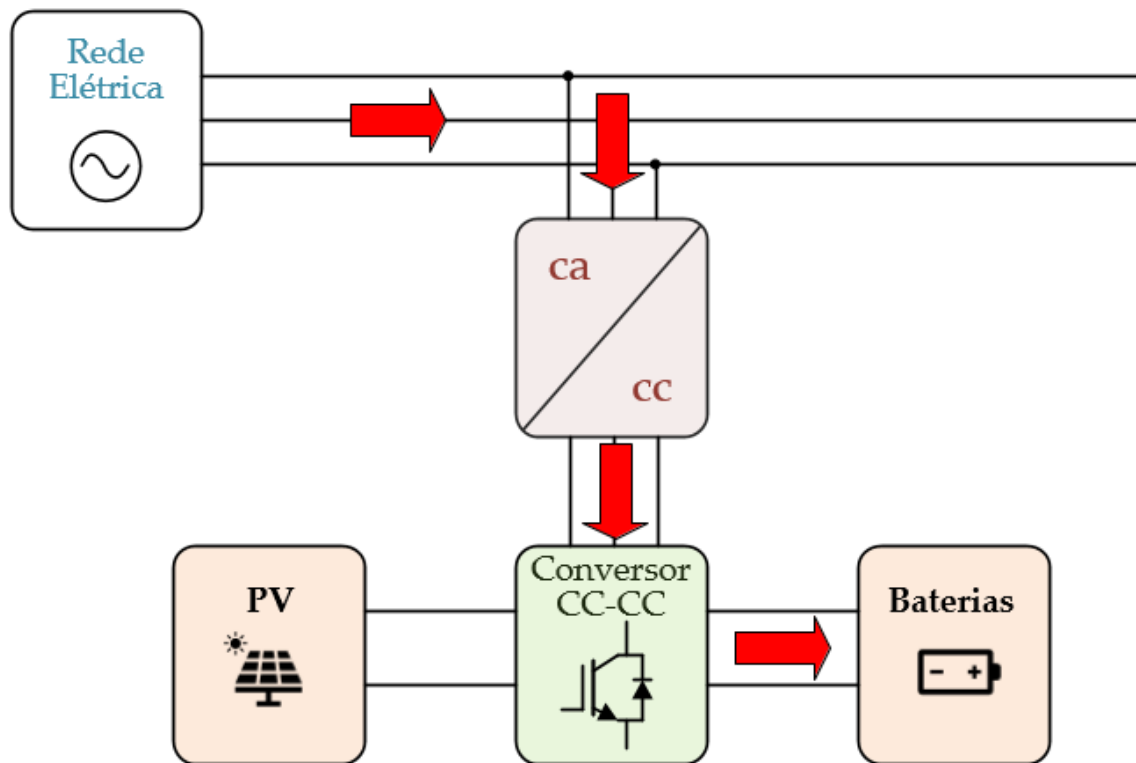


Figure 5.9: Carregamento de baterias.

Assim que o barramento foi regulado e a PLL foi validada, a etapa que se seguiu foi o carregamento das baterias a partir da rede elétrica. Este carregamento acontece quando o conversor CC-CC atua no modo *buck*, extraíndo energia da rede elétrica e fornecendo-a às baterias. De maneira a evitar possíveis acidentes e elevados custos durante a fase de testes, foi utilizado um grelhador com uma resistência de 26Ω capaz de suportar até 2 kW de potência em vez de baterias. Durante a realização dos testes foi usada uma pinça de corrente contínua para medir a evolução da corrente no grelhador (I_{bat}) ao mesmo tempo que se analisava o comportamento do barramento CC. Nas figuras que se seguem é possível ver os resultados obtidos desse ensaio e retirar algumas conclusões.

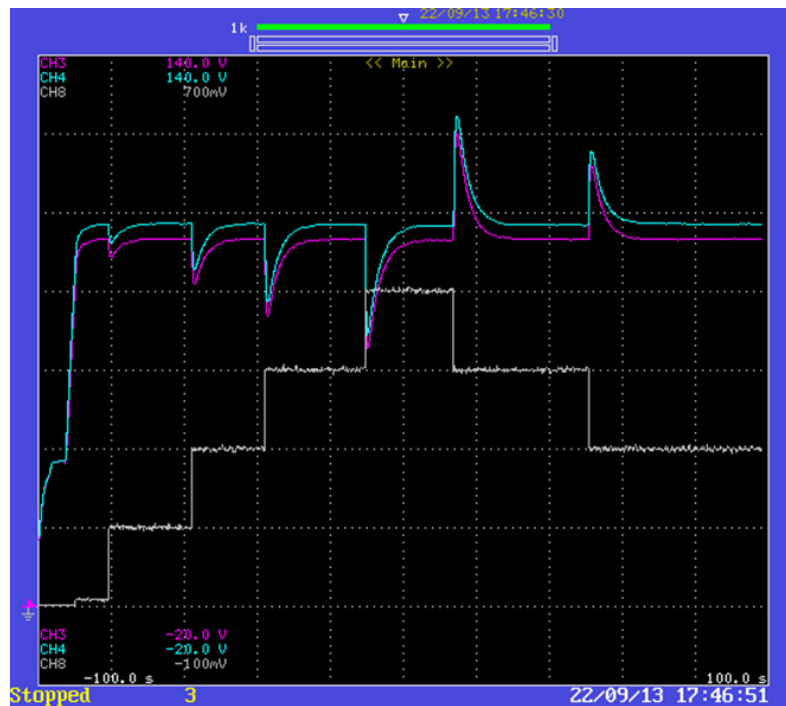


Figure 5.10: Carregamento das baterias manualmente.

Inicialmente, foi testado o controlo de corrente manualmente, aumentando e diminuindo a referência controlando assim a intensidade desejada que percorre o sistema desde a rede elétrica às baterias. Como se pode observar na figura 5.10 esse incremento causa algumas perturbações na regulação do barramento CC que acaba por estabilizar rapidamente graças ao controlo PI, não influenciando o funcionamento do protótipo. Posteriormente, com o objetivo de mitigar as distorções no barramento e ao mesmo tempo evitar alterações bruscas de corrente foi delineada uma rampa para o aumento gradual de I_{bat} . Numa primeira instância foi implementada uma rampa de corrente com um declive de 1 A por segundo até serem atingidos os 3 A definidos como limite máximo. No entanto, e após vários ensaios efetuados, notou-se que uma rampa de declive de 0.4 A por segundo não provocava alterações tão acentuadas no comportamento do barramento CC como se comprova na figura 5.11.

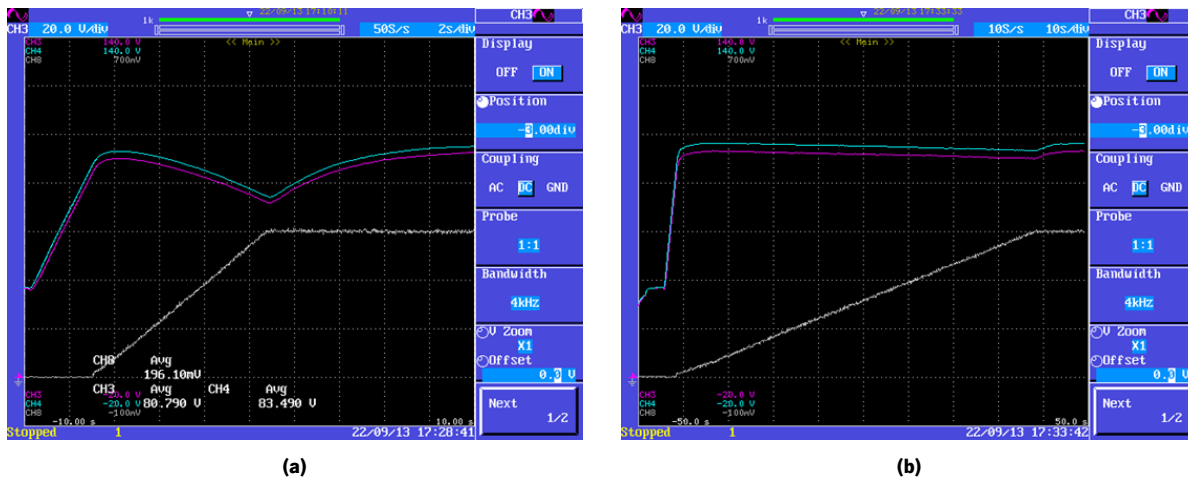


Figure 5.11: Carregamento de baterias por rampa de referência:
 (a) 1 A/seg e (b) 0,4 A/seg

Assim é possível verificar que o barramento possui um comportamento mais suave quando a corrente é incrementada lentamente e acaba por atingir o seu valor de referência mais rapidamente. Importante salientar que estas alterações de valores de tensão ocorrem uma vez que o aumento de potência nas baterias provoca uma diminuição de potência no barramento CC. Por sua vez, quando a corrente de referência é diminuída, a potência das baterias também diminui o que desencadeia um aumento de potência no barramento. Como acima mencionado, estas variações são atenuadas pelo controlo PI que não dá uma resposta imediata, mas dependendo da potência existente no barramento aquando da sua leitura, fornece mais ou menos corrente proveniente da rede elétrica para estabilizar o seu comportamento.

Posteriormente, analisou-se o comportamento das formas de onda da corrente e tensão na fase A para um valor de corrente das baterias igual a 3 A. Como é possível verificar na figura 5.12, quando a referência de corrente das baterias é 3 A, é notável o aumento de corrente da fase A. Além disso, é possível comprovar que tanto a tensão como a corrente se encontram praticamente em fase, o que evidencia que toda a potência absorvida pelo protótipo é potência ativa. Com esta análise o conversor CA-CC também fica validado e a extração de energia da rede é efetuada com sucesso.

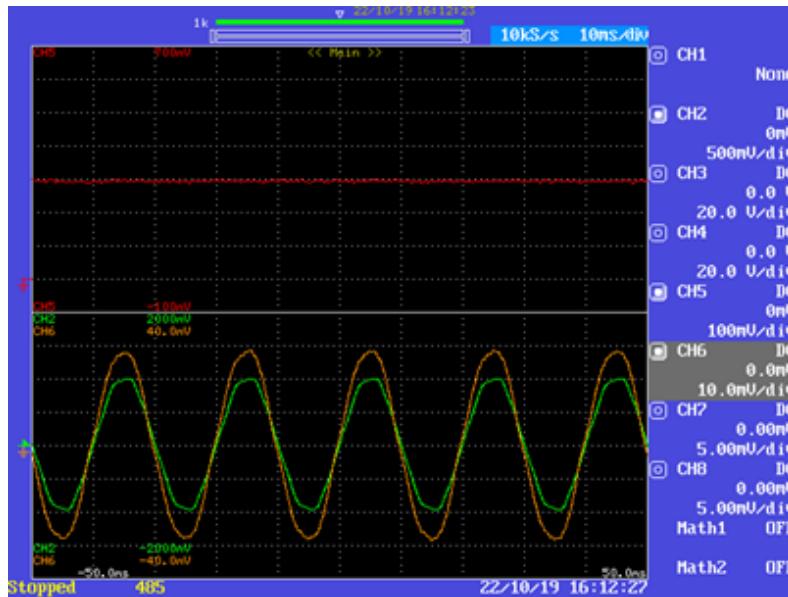


Figure 5.12: Tensão e corrente da fase A para um $I_{bat} = 3$ A

5.5.2 Descarga das Baterias

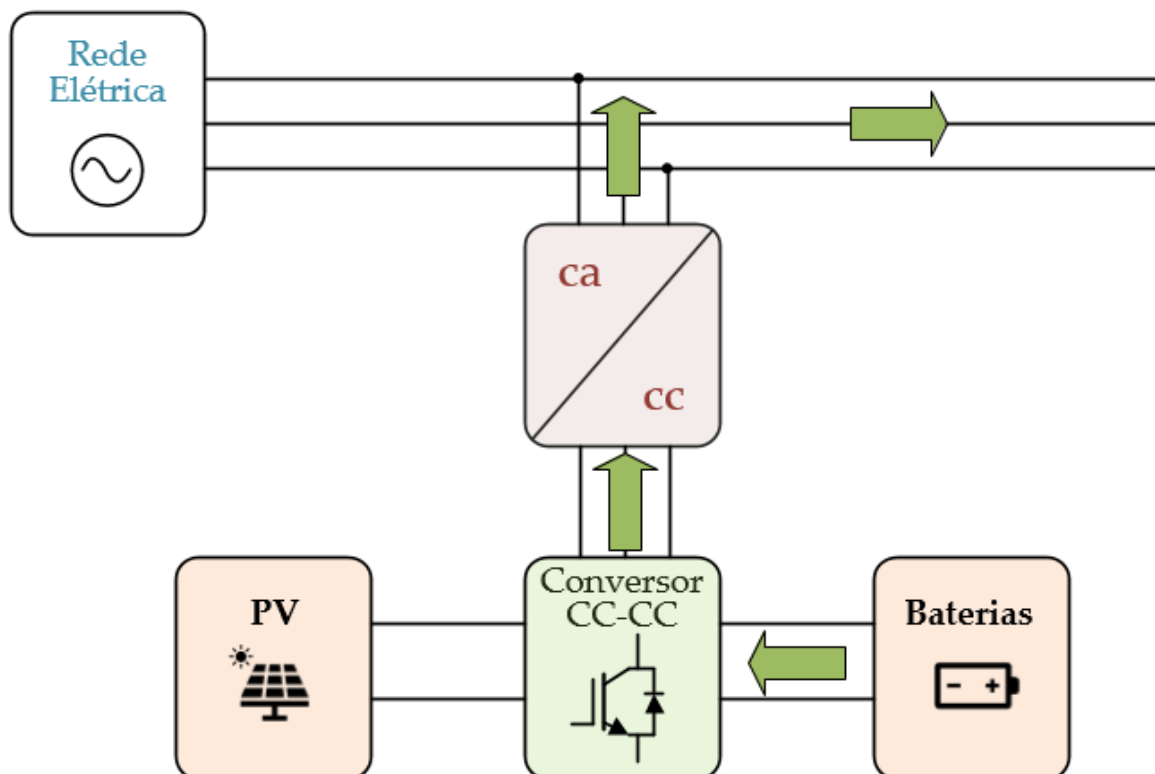


Figure 5.13: Descarga de baterias.

Dado por terminado o processo de carregamento das baterias, a próxima etapa foi fazer o descarregamento das mesmas. Para isso, o conversor CC-CC precisa de operar no modo *boost*, extraindo energia das baterias e fornecendo-a ao barramento CC. De maneira a simular as baterias, foi colocada uma fonte de alimentação de 30 V que fornece um máximo de 5 A.

O objetivo passa por fazer a descarga das baterias de modo que estas efetuem o carregamento do barramento CC e assim que este esteja terminado, a injeção de energia na rede elétrica. Tal como foi feito no processo de carregamento das baterias, numa fase inicial foi testado o controlo de corrente manualmente, aumentando e diminuindo a corrente de referência (I_{bat}) através de dois caracteres do teclado. A seguir, de modo a diminuir as variações de tensão no barramento sempre que a variável de referência era alterada, foi delineada uma rampa de referência para a corrente das baterias. Consequentemente, é possível concluir que o barramento possui um comportamento muito mais suave, não sofrendo tantas perturbações. Nas figuras seguintes é possível verificar as diferenças entre os dois modos mencionados acima.

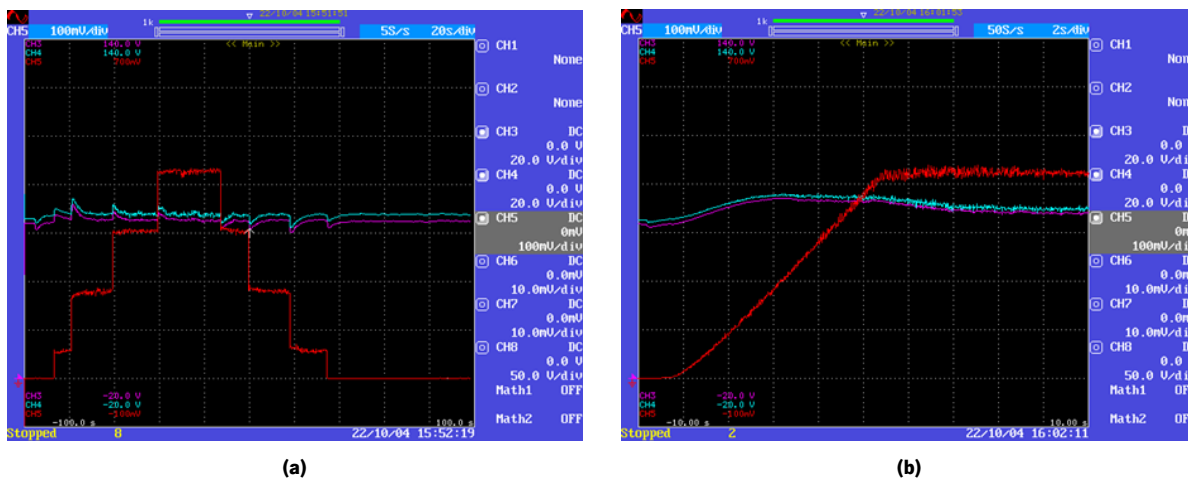


Figure 5.14: Descarga das baterias por:
(a) referência manual e (b) rampa de referência

Analisando as imagens acima, é possível comprovar que tanto num caso como no outro, é feita a regulação do barramento através do controlo PI. Por outro lado, no segundo caso o barramento tem um comportamento mais estável como referido anteriormente.

Após ser validado o aumento e diminuição da corrente fornecida pelas baterias, em sintonia com a regulação da tensão do barramento, os próximos testes visaram analisar a injeção de energia na rede. Posto isto, foi analisado o comportamento das correntes nas três fases em conjunto com a corrente das baterias. Os resultados podem ser observados na imagem 5.15.

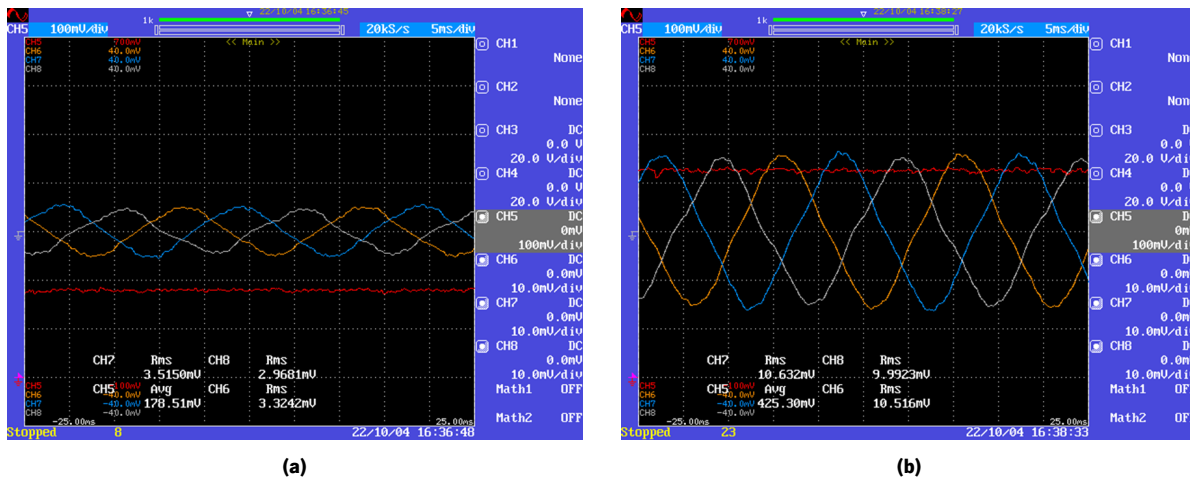


Figure 5.15: Correntes em cada fase para uma corrente das baterias de:
 (a) $I_{bat} = 1,8 \text{ A}$ e (b) $I_{bat} = 4,2 \text{ A}$

É possível verificar que quando a corrente fornecida pelas baterias é 1,8 A, a corrente nas fases é mínima. Assim que a corrente extraída das baterias aumenta para os 4,2 A, a corrente nas fases aumenta em sintonia, o que indica que ocorre a injeção de energia na rede elétrica. De maneira a comprovar esse efeito, foram também analisadas as formas de onda da tensão e corrente na fase A. Quando I_{bat} é 1,8 A, a tensão e a corrente na fase A entram em oposição de fase, o que prova que a energia é injetada na rede elétrica e que o modo de funcionamento em questão está corretamente validado.

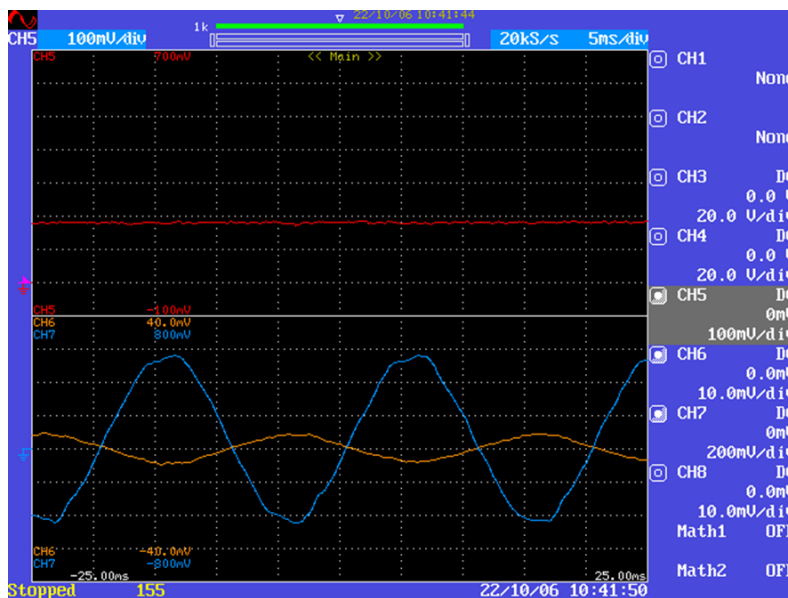


Figure 5.16: Tensão e corrente da fase A para um $I_{bat} = 1,8 \text{ A}$

5.5.3 Extração dos Painéis Fotovoltaicos e Injeção na Rede Elétrica

Com a descarga das baterias e injeção de energia na rede, a próxima etapa passou por validar a extração de energia dos painéis fotovoltaicos para injeção na rede. Para a realização destes testes foi

utilizada uma fonte de alimentação de 30 V com um máximo de 5 A disponíveis de modo a simular um painel solar.

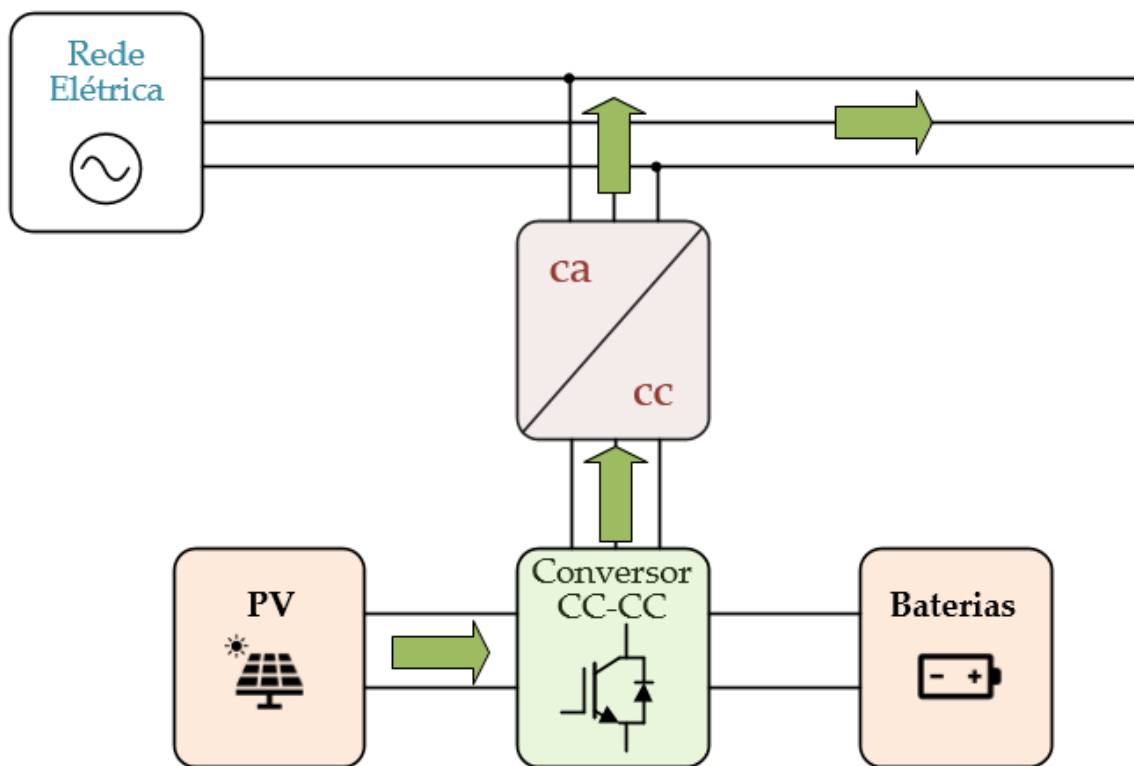


Figure 5.17: Extração de energia dos painéis e injeção na rede elétrica.

Inicialmente, o painel fornece energia através do conversor CC-CC para carregar o barramento CC fazendo com que a energia proveniente da rede para realizar este processo diminua gradualmente. Assim que o carregamento é finalizado, a energia produzida pelos painéis é injetada na rede elétrica.

Tal como foi feito no carregamento e descarga das baterias, as etapas para a validação deste modo de funcionamento foram bastante semelhantes. Numa primeira fase foi testado o controlo de corrente manualmente, isto é, foi incrementado através de um carácter o valor de referência de I_{pv} que é extraído dos painéis, neste caso da fonte de alimentação. Como já era de esperar, o aumento e diminuição desta variável provoca alterações no comportamento das tensões do barramento CC que, a par do caso referido anteriormente, não traz nenhuma problemática para o bom funcionamento do sistema uma vez que o controlo PI se encarrega da estabilização desses valores. Após a validação do controlo manual de corrente, foi programada uma rampa de referência para esta seguir e não provocar tanta variação na tensão do barramento CC. O resultado destes dois ensaios pode ser verificado nas imagens que se seguem.

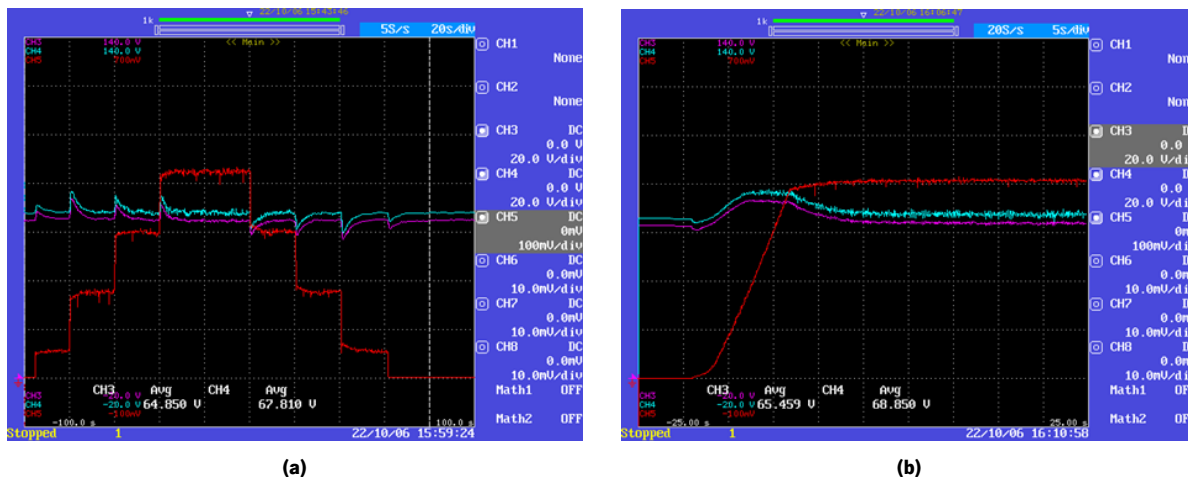


Figure 5.18: Extração de energia dos painéis por:
 (a) referência manual e (b) rampa de referência

A partir da análise da primeira imagem são evidentes as alterações da tensão do barramento. Este efeito acontece sempre que a potência no lado dos painéis é aumentada, provocando, simultaneamente, um aumento da tensão no barramento. Da mesma maneira, acontece o inverso sempre que a potência dos painéis diminui, pelo que a tensão do barramento desce até que seja regulada novamente. Na imagem da direita, estas alterações não são tão significativas, uma vez que foi projetada uma rampa de referência que a corrente dos painéis deve seguir. Foi definida uma rampa com declive de 0,5 A por segundo até um máximo de 4 A e como mostra a figura, o barramento possui um comportamento bem mais suave em relação ao caso anterior.

Em seguida, foram analisadas as formas de onda da corrente em cada uma das fases da rede elétrica, dependendo do valor de corrente extraído dos painéis. Na figura 5.19 é possível avaliar o comportamento das correntes para quando a corrente extraída dos painéis é 1,8 A e para quando é 4,2 A. De salientar que é possível notar uma pequena deformação na corrente da fase C uma vez que é esta que faz a alimentação do *rack* de controlo. Por outro lado, este desequilíbrio só é evidente quando a corrente é mínima e é progressivamente extinto à medida que I_{pv} aumenta.

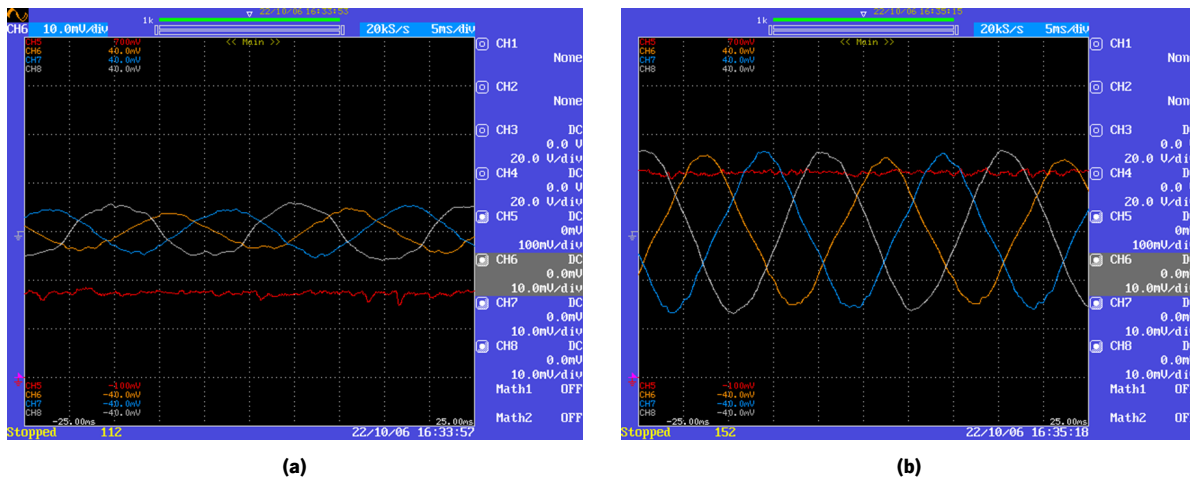


Figure 5.19: Correntes em cada fase para uma corrente de painéis de:
 (a) $I_{pv} = 1,8 \text{ A}$ e (b) $I_{pv} = 4,2 \text{ A}$

Por fim, foram estudadas as formas de onda da tensão e corrente na fase A, mais uma vez, conforme a variação da corrente extraída dos painéis fotovoltaicos. No primeiro teste deste tipo, quando a corrente proveniente dos painéis é nula, é possível averiguar que toda a corrente é extraída da rede elétrica, uma vez que está em fase com a tensão, e serve apenas para regular a tensão do barramento CC. Assim que esta passa a ter o valor de 4 A a função do sistema muda de carácter e torna-se de fácil percepção que existe uma injeção de potência na rede. A corrente na fase A aumenta significativamente e é notável a oposição de fase em relação à tensão da mesma fase. Isto comprova a injeção de potência ativa na rede e o correto funcionamento do sistema em geral.

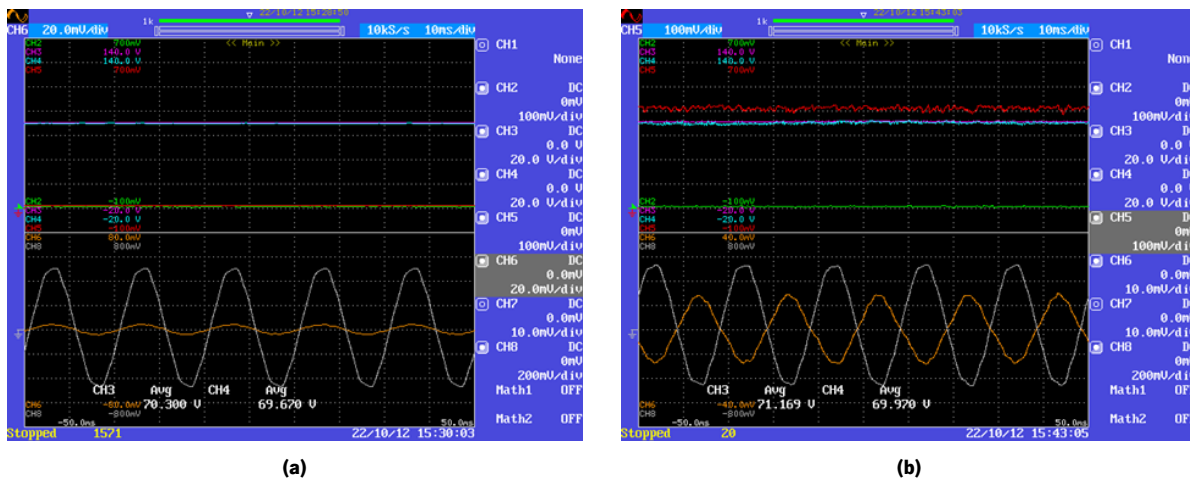


Figure 5.20: Tensão e corrente da fase A para uma corrente nos painéis de:
 (a) $I_{pv} = 0 \text{ A}$ e (b) $I_{pv} = 4 \text{ A}$

5.5.4 Extração de Energia dos Painéis Fotovoltaicos e Carregamento das Baterias

Outro modo de funcionamento deste protótipo é o carregamento das baterias através da extração de energia dos painéis fotovoltaicos. Trata-se de uma junção dos dois modos de funcionamento referenciados anteriormente e é realizado com uma resistência de 26Ω , para substituir as baterias, e uma fonte de alimentação a 30 V e um máximo de 5 A, para substituir o painel solar. Neste modo de funcionamento o conversor CC-CC atua como *step-up*, durante a extração de energia do painel, e como *step-down*, no fornecimento de energia às baterias. A figura abaixo retrata o fluxo de energia que este modo de funcionamento implementa.

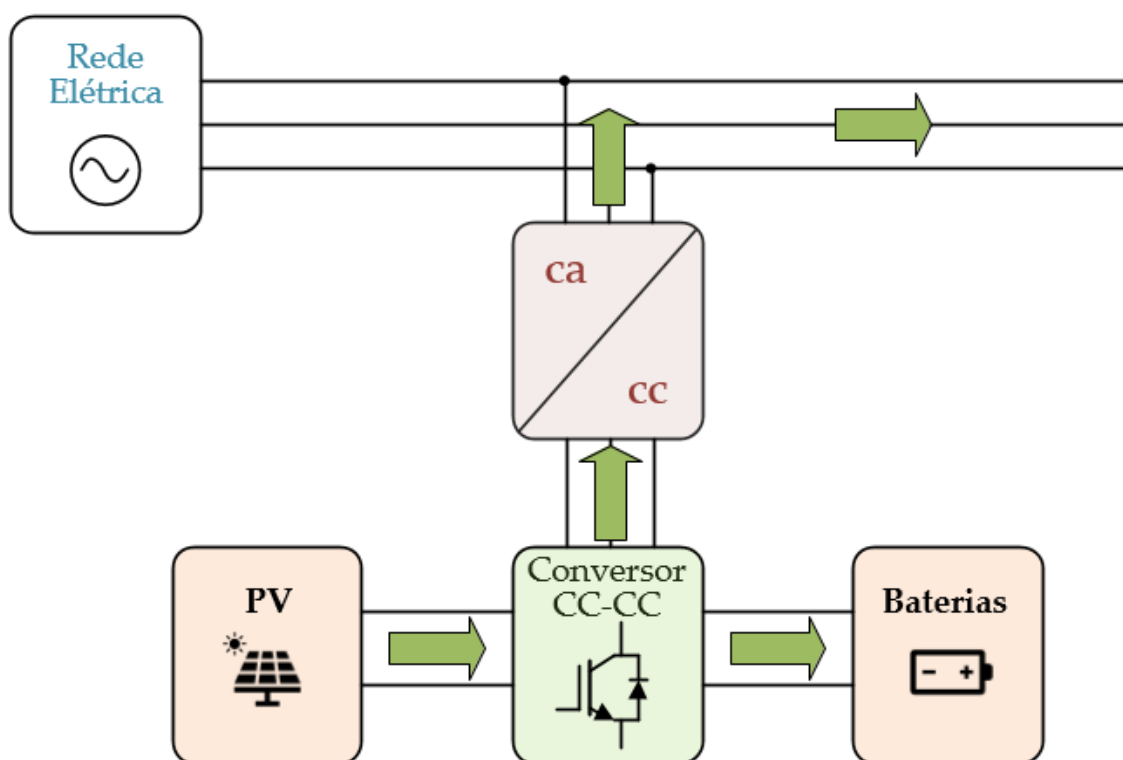


Figure 5.21: Extração de energia dos painéis e carregamento de baterias.

Neste modo, tanto é possível retirar energia da rede como por sua vez injetar, tudo depende da quantidade de corrente necessária para realizar o carregamento das baterias e a regulação da tensão do barramento CC. No primeiro teste realizado, foi definido um valor de 3 A tanto para a corrente que carrega as baterias como para a corrente extraída do painel. O resultado desse ensaio pode ser observado na figura abaixo.

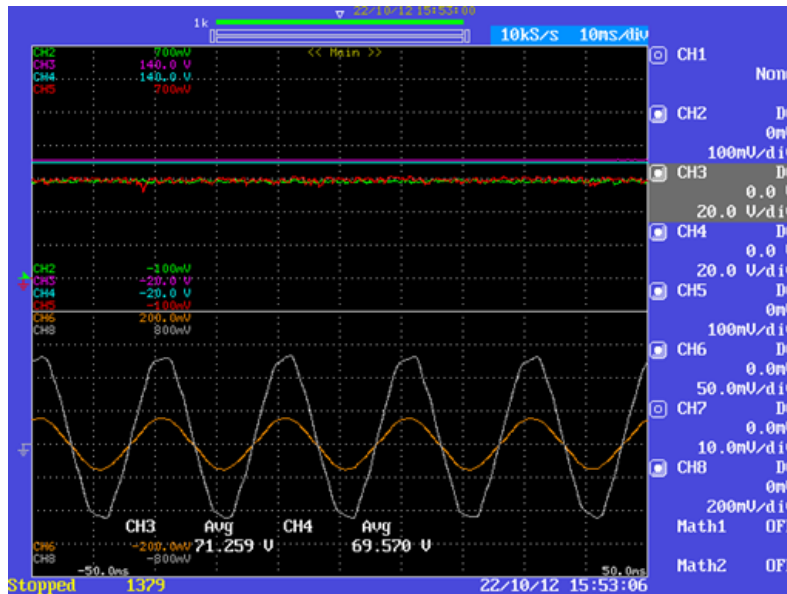


Figure 5.22: Extração de energia dos painéis e carregamento das baterias com:
 $I_{bat} = 3 \text{ A}$ e $I_{pv} = 3 \text{ A}$

Com a análise dos resultados compreendeu-se que a energia proveniente do painel era suficiente para carregar as baterias, no entanto, e devido às perdas por comutação dos IGBT e à regulação do barramento, ainda existia potência a ser extraída da rede elétrica (a tensão e a corrente na fase A encontram-se em fase). Posto isto, foi definida uma corrente de referência para as baterias de 1 A e um valor de referência de 5,5 A para I_{pv} . Os resultados deste ensaio comprovaram o correto funcionamento de todos os modos implementados e, por sua vez, do protótipo em questão.

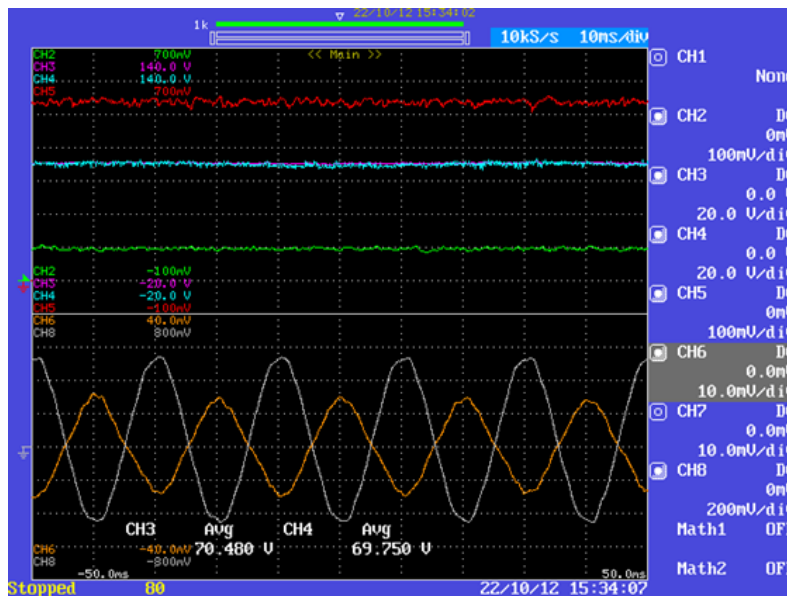
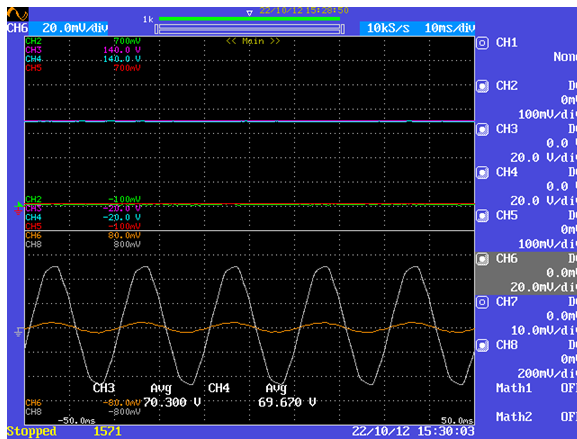
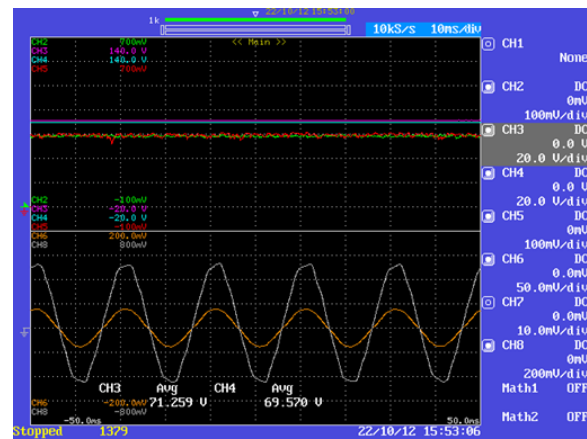


Figure 5.23: Extração de energia dos painéis e carregamento das baterias com:
 $I_{bat} = 1 \text{ A}$ e $I_{pv} = 5,5 \text{ A}$

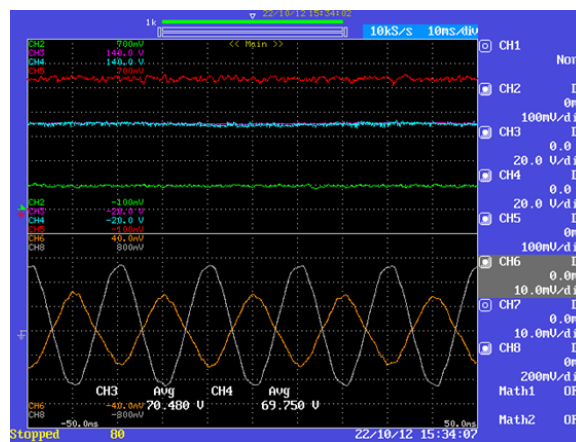
A partir da análise da imagem é possível verificar que a energia extraída do painel é suficiente para carregar as baterias, fazer a regulação do barramento CC e ainda injetar potência ativa na rede (a tensão e a corrente na fase A encontram-se em oposição de fase). Para além disso, o valor do barramento é constante e possui o valor da sua referência que se situava nos 70 V. Em suma, nas figuras abaixo estão representados vários casos que demonstram a resposta do sistema (tensão do barramento e tensão e corrente na fase A) quando são alterados os valores de referência de I_{bat} (a verde) e de I_{pv} (a vermelho).



(a) $I_{bat} = 0$ A e $I_{pv} = 0$ A



(b) $I_{bat} = 3$ A e $I_{pv} = 3$ A



(c) $I_{bat} = 1$ A e $I_{pv} = 5,5$ A

Figure 5.24: Tensão e corrente da fase A para diferentes valores de I_{bat} e I_{pv}

5.6 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados todos os testes realizados ao protótipo de modo a validar a implementação de todas as funcionalidades previamente estabelecidas. Inicialmente foi testado o sincronismo com a rede elétrica na capacidade do conversor CA-CC aplicar o algoritmo da PLL. A seguir, validou-se o funcionamento do conversor CC-CC a par do carregamento e da regulação do barramento CC para permitir a sintetização das correntes do sistema.

Foi feita a junção dos dois conversores através do barramento, sendo feitos testes relativamente aos modos de funcionamento do sistema. Inicialmente, testou-se o carregamento das baterias a partir da rede elétrica, de seguida realizou-se o descarregamento das baterias e depois foram feitos ensaios para injetar energia na rede a partir do painel solar. Por fim, foram testados ambos os modos referidos em simultâneo, isto é, carregamento de baterias através de energia proveniente de painéis solares e extração ou fornecimento de energia à rede, dependendo do valor de corrente das baterias e dos painéis. Com estas validações, ao variar o valor de referência da corrente que atravessa cada um dos módulos, ou alternar o modo de operação do sistema, foi possível comprovar um comportamento dinâmico no que remete para a transferência de energia. Como consequência, estes testes comprovam a injeção ou extração de potência ativa da rede elétrica.

Em suma, o conversor CC-CC foi implementado com sucesso, funcionando como interface entre os painéis solares e as baterias com o barramento CC. Tem a função de fazer a transferência de energia necessária conforme o modo de funcionamento que o protótipo se encontra.

6. Conclusões e Sugestões de Trabalho Futuro

6.1 Conclusões

Na realização desta dissertação foram abordados os temas e etapas referentes ao desenvolvimento de um conversor CC-CC para integrar um sistema de produção de energia fotovoltaica. O objetivo passou por desenvolver um conversor CC-CC capaz de realizar a interface com painéis solares fotovoltaicos e sistemas de armazenamento de energia.

No capítulo 1, foi feito um pequeno resumo do panorama energético, bem como o enquadramento do tema da tese. Também foram mencionados os objetivos e motivações inerentes à escolha desta dissertação.

No segundo capítulo, foi feita uma revisão bibliográfica de vários temas relacionados com o desenvolvimento do conversor em questão. Foram apresentados os tipos e os princípios de funcionamento de sistemas fotovoltaicos, bem como as vantagens e desvantagens da sua implementação. Com isto, pretendeu-se realçar a importância e a maneira como atuam os diferentes sistemas fotovoltaicos que existem. Depois, foram explicados em que é que consistem os sistemas de armazenamento de energia, direcionando mais o foco para as baterias. Foram descritas várias tecnologias de baterias e as características das mesmas. Desta análise, foi perceptível que as baterias eletroquímicas são as mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos, pelo que foi feita uma abordagem mais profunda às mais populares no que remete a este tipo de aplicação. Posteriormente, foram apresentadas algumas topologias de conversores CC-CC e os algoritmos de controlo associados, onde se conclui que topologias não isoladas são uma melhor opção para este projeto. Foram discutidas algumas técnicas de carregamento de baterias, pelo que se conclui que o algoritmo de corrente constante seguido de tensão constante tem uma maior aplicabilidade no tipo de baterias mais popular para integrar sistemas fotovoltaicos, as de ácido-chumbo e as de iões de lítio. Foram mencionados alguns algoritmos de controlo MPPT a implementar de modo a otimizar a captação de energia dos painéis, conclui-se que o controlo por perturbação e observação é o mais adequado devido à sua simplicidade e resultados satisfatórios. Além disso, foram mencionadas técnicas de controlo de corrente, onde o controlo preditivo teve maior destaque, pelo facto de não depender do ajuste de ganhos e por utilizar o modelo do circuito onde é implementado para sintetizar as correntes. Por fim,

foi analisada a modulação PWM responsável por controlar o tempo em que os IGBT dos conversores se encontram a *ON* e a *OFF*.

No capítulo 3, foi feita a descrição do modo de funcionamento da topologia escolhida e o algoritmo de controlo utilizado para controlar o conversor CC-CC. Em seguida, foram apresentadas as simulações computacionais referentes aos diferentes modos de operação do sistema, do qual fazem parte: o carregamento de baterias, o descarregamento das baterias, a extração de energia dos painéis solares para a rede elétrica e o funcionamento de ambos em simultâneo, o carregamento de baterias a partir de energia extraída dos painéis solares. Inicialmente, foi simulado o circuito para carregamento de baterias, onde a partir do aumento da corrente de referência das baterias, foi validado o conversor *buck-boost asymmetrical* e averiguada extração de energia da rede elétrica, ao comparar a amplitude e fase da corrente na fase A, com a tensão da mesma. A seguir, utilizando a mesma topologia, foi validado o descarregamento das baterias, controlando a referência de corrente e comparando as formas de onda da fase A, onde se confirmou o aumento da potência injetada na rede elétrica. Depois, foi simulada a topologia de três níveis do tipo *boost*, para realizar a interface com os painéis fotovoltaicos que permite apenas um sentido de fluxo de energia. Do mesmo modo, foi aumentada a referência de corrente dos painéis e procedeu-se à comparação da corrente e tensão na fase A, como estas se encontravam em oposição de fase, a injeção de energia na rede foi validada com sucesso. Por fim, e com os modos de funcionamento mais importantes validados, foram feitos testes para permitir o carregamento das baterias com energia proveniente da rede. Com esta junção, foram validadas as duas topologias em simultâneo, no entanto, comprovou-se que para o mesmo valor de corrente em ambos os módulos, é necessário recorrer à extração de energia da rede elétrica. Isto acontece porque a potência fornecida pelos painéis fotovoltaicos, não é suficiente para efetuar o carregamento das baterias.

No quarto capítulo, foi realizada uma descrição pormenorizada de todo o material constituinte do sistema a par dos desenhos 2D realizados na ferramenta *Visio* que serviram de modelo para a implementação física do protótipo. Numa primeira fase, foram indicados os materiais disponibilizados pelo GEPE para a construção do circuito de potência. Deste fazem parte o módulo de semicondutores de potência, os condensadores que constituem o barramento CC e o circuito de proteção para a interface com a rede elétrica, os painéis solares e as baterias. Seguidamente foram mencionados os elementos integrantes do *rack* de controlo, o qual constitui os sensores de corrente e de tensão, a DSP, a placa de comando, a placa de condicionamento de sinal, a placa DAC e a placa de Drive dos IGBT. No fim, foi realizado um resumo das etapas de montagem do sistema.

No capítulo 5, foram apresentados os resultados de todos os testes realizados ao conversor CC-CC, em parceria com o conversor CA-CC. Numa primeira fase foi validada a PLL de maneira a ser possível o sincronismo com a rede elétrica. Depois, foi feito um pequeno ensaio ao conversor CC-CC de maneira a confirmar o funcionamento do conversor no modo *boost* e, posteriormente, foi efetuado o regulamento do barramento CC. Mais tarde, foram feitos ensaios aos diferentes modos de operação do sistema, referidos no capítulo 3. Iniciaram-se os testes pelo carregamento e descarga das baterias, seguido da extração de

energia dos painéis fotovoltaicos e injeção na rede elétrica. Em seguida, validou-se o carregamento das baterias a partir da extração de energia dos painéis fotovoltaicos. Por questões de segurança, não foram utilizadas as gamas de valores que foram apresentadas no capítulo das simulações computacionais, no entanto, os métodos de validação foram idênticos. Com o aumento ou diminuição da corrente via *software*, no respetivo modo de funcionamento, foi analisada a resposta do sistema, validando a extração ou injeção de energia na rede elétrica.

Resumidamente, face aos resultados obtidos, é possível afirmar que os objetivos foram alcançados e que os conceitos inerentes à produção de energia fotovoltaica foram consolidados. A vasta pesquisa bibliográfica referente a conversores CC-CC, sistemas de armazenamento de energia, técnicas de controlo de corrente e técnicas de modulação PWM ajudaram na aquisição de várias competências, o que facilitou posteriormente a implementação do protótipo. Além disso, o desenvolvimento desta dissertação permitiu um aumento de certas habilidades, não só a nível de conhecimentos teóricos, mas também da componente prática. A soldadura de certos componentes, a utilização de ferramentas manuais e o constante manuseamento de vários aparelhos de medida, como osciloscópios digitais, ajudaram bastante à consolidação e aperfeiçoamento das componentes práticas.

6.2 Sugestões de Trabalho Futuro

Apesar do conversor CC-CC e o protótipo final terem sido implementados com sucesso, existem vários pontos a ser melhorados como trabalho futuro para o tornar ainda mais completo. Como o sistema foi dimensionado para trabalhar com níveis de potência mais elevados, o projeto possui uma grande capacidade de evolução.

Uma das melhorias a ser feita, é a substituição das resistências e das fontes de alimentação por baterias e módulos de painéis fotovoltaicos reais, respetivamente. Com isso, seria possível validar o carregamento real de baterias e a extração de energia de painéis fotovoltaicos verdadeiros. Consequentemente, a implementação do algoritmo MPPT e de carregamento de baterias seriam bastante importantes para obter um produto final ainda mais robusto. Além disso, seria vantajoso experimentar várias técnicas, de maneira a averiguar qual delas se adequava melhor a integrar este projeto.

Da mesma forma, seria importante acrescentar outros modos de funcionamento, tais como a extração de energia dos painéis e baterias em simultâneo para injeção de energia na rede elétrica. Seria bastante benéfico aumentar a versatilidade do protótipo reforçando o sistema com outros modos de operação e dar a oportunidade ao utilizador de seleccionar aquele que pretender. Além disso, seria também importante desenvolver uma interface gráfica onde o usuário pudesse escolher o método de carregamento das baterias ou observar o valor de potência dos painéis, das baterias e os níveis de potência a ser injetados ou extraídos da rede elétrica.

Outro trabalho futuro a ser implementado inclui a ligação do protótipo à tensão da rede elétrica (230 V), em vez dos 25 V fornecidos pelos transformadores. O sistema foi desenvolvido para suportar potências

bastante elevadas, pelo que seria indispensável elevar os níveis de tensão no ponto de ligação com os transformadores. Além disso, de maneira a prevenir possíveis interferências com a subida da tensão, seria proveitoso efetuar uma melhoria da gestão dos cabos, separando corretamente os cabos de potência dos cabos de controlo, evitando ruídos indesejados na comunicação pela porta série.

Referências

- [1] Solangi, K. H., Islam, M. R., Saidur, R., Rahim, N. A., Fayaz, H. (2011). A review on global solar energy policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 2149–2163. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.01.007>
- [2] “O Guia Essencial para perceber a Energia Solar.” <http://noctula.pt/energia-solar/> (accessed Dec. 31, 2021).
- [3] “APREN - Produção.” <https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/producao> (accessed Dec. 31, 2021).
- [4] A. -Título, “PROJETO COFINANCIADO PELA UNIÃO EUROPEIA Duração Orçamento total (% Incentivo),” 2018.
- [5] “Energias renováveis: fontes e tipos de energia | Enel Green Power.” <https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/energias-renoveveis> (accessed Dec. 31, 2021).
- [6] Z. Gao, S. Li, X. Zhou and Y. Ma, “An overview of PV system,” 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Harbin, China, 2016, pp. 587-592, doi: 10.1109/ICMA.2016.7558629.
- [7] C. Darab and A. Turcu, “Internal model control for MPPT of a solar PV system,” *Proceedings - 2017 International Conference on Modern Power Systems, MPS 2017*, Jul. 2017, doi: 10.1109/MPS.2017.7974464.
- [8] “Como funciona um painel solar fotovoltaico? | EDP.” <https://www.edp.pt/particulares/content-hub/como-funciona-um-painel-fotovoltaico/> (accessed Dec. 31, 2021).
- [9] Sarah, Kenu. (2020). A Review of Solar Photovoltaic Technologies. *International Journal of Engineering Research and*. V9. 10.17577/IJERTV9IS070244.
- [10] Monocrystalline Solar Cell and its efficiency - SolarSena. (n.d.). Retrieved February 10, 2023, from <https://solarsena.com/monocrystalline-solar-cells-explained/>
- [11] Different Types of Solar Cells - PV Cells their Efficiencies - SolarSena. (n.d.). Retrieved February 10, 2023, from <https://solarsena.com/different-types-solar-cells-efficiencies/>
- [12] A. Labouret and M. Viloz, “Renewable Energy Series 9 Solar Photovoltaic Energy Solar Photovoltaic Energy”, Accessed: Dec. 31, 2021. [Online]. Available: www.theiet.org

- [13] “Diário da República, 1.a série PRESIDÊNCIA DO CONSELHO DE MINISTROS”.
- [14] S. White, “Solar photovoltaic basics: a study guide for the NABCEP Associate Exam”.
- [15] “The Advantages Disadvantages of Solar Energy - 7 Pros and Cons.” <https://www.empower-solar.com/blog/the-advantages-disadvantages-of-switching-to-solar-energy/> (accessed Dec. 31, 2021).
- [16] “Vantagens e desvantagens dos painéis solares fotovoltaicos.” <https://www.portal-energia.com/vantagens-desvantagens-paineis-solares-fotovoltaicos/> (accessed Dec. 31, 2021).
- [17] E. Ozdemir, S. Ozdemir, K. Erhan and A. Aktas, “Energy storage technologies opportunities and challenges in smart grids,” 2016 International Smart Grid Workshop and Certificate Program (ISGWCP), Istanbul, Turkey, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISGWCP.2016.7548263.
- [18] N. Garimella and N. -K. C. Nair, “Assessment of battery energy storage systems for small-scale renewable energy integration”, TENCON 2009 - 2009 IEEE Region 10 Conference, Singapore, 2009, pp. 1-6, doi: 10.1109/TENCON.2009.5395831.
- [19] Šimić, Zvonimir Topić, Danijel Knežević, Goran Pelin, Denis. (2021). Battery energy storage technologies overview. International journal of electrical and computer engineering systems. 12. 53-65. 10.32985/ijeces.12.1.6.
- [20] Garrido, E. L. (2010), “Concepção e certificação de nova geração de candeeiros de iluminação pública”, Feup.
- [21] C. E. M. Salgado (2018), “Desenvolvimento dos conversores de potência para o sistema de alimentação de uma microrrede isolada baseada em energias renováveis”, Universidade do Minho.
- [22] V. Singh and A. N. Tiwari, “Study and Comparison of various types of Converters used for Solar PV: A Review,” 2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control, PEEIC 2018, pp. 658–664, Mar. 2019, doi: 10.1109/PEEIC.2018.8665425.
- [23] “Fontes Chaveadas-Cap. 1”, Accessed: Jan. 01, 2022. [Online]. Available: <http://www.fee.unicamp.br/dse/antenor/it505-fontes-chaveadas>
- [24] F. Lessa Tofoli, D. de Castro Pereira, W. Josias de Paula, and D. de Sousa Oliveira Júnior, “Survey on non-isolated high-voltage step-up dc-dc topologies based on the boost converter”, doi: 10.1049/iet-pel.2014.0605.
- [25] Monteiro, Vítor. “Desenvolvimento de sistemas de carregamento bidirecionais para veículos elétricos com novos modos de operação para Smart Grids”, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, 2016.
- [26] v, Viswanatha Ramachandra, A. Reddy, R Venkata Siva. (2022). Bidirectional DC-DC converter circuits and smart control algorithms: a review. Journal of Electrical Systems and Information Technology. 9. 10.1186/s43067-022-00048-z.

- [27] "Fontes Chaveadas-Cap. 2", Accessed: Jan. 01, 2022. [Online]. Available: <http://www.fee.unicamp.br/dse/antenor/it505-fontes-chaveadas>
- [28] F. Krismer, J. Biela and J. W. Kolar, "A comparative evaluation of isolated bi-directional DC/DC converters with wide input and output voltage range," *Fortieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005.*, Hong Kong, China, 2005, pp. 599-606 Vol. 1, doi: 10.1109/IAS.2005.1518368.
- [29] B. Zhao, Q. Song and W. Liu, "Power Characterization of Isolated Bidirectional Dual-Active-Bridge DC-DC Converter With Dual-Phase-Shift Control," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 9, pp. 4172-4176, Sept. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2012.2189586.
- [30] A. R. Rodríguez Alonso, J. Sebastian, D. G. Lamar, M. M. Hernando and A. Vazquez, "An overall study of a Dual Active Bridge for bidirectional DC/DC conversion," *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2010*, pp. 1129-1135, doi: 10.1109/ECCE.2010.5617847.
- [31] Ribeiro Da Silva, B. J. "Desenvolvimento de um Posto de Carregamento Lento com BMS e Interface com o Cockpit para o CEPIUM", Tese de Mestrado, Universidade do Minho, 2013.
- [32] Filipe, D., Peixoto, A. "Desenvolvimento de um Conversor CC-CC para um UPQC Trifásico para Interface com Painéis Solares Fotovoltaicos e Sistemas de Armazenamento de Energia", Tese de Mestrado, Universidade do Minho, 2018.
- [33] A. Adouni, K. Elmellah, D. Chariag and L. Sbita, "DC-DC converter fault diagnostic in PV system," *2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS)*, Hammamet, Tunisia, 2017, pp. 1-7, doi: 10.1109/GECS.2017.8066136.
- [34] D. Singh and H. Singh, "Technical Survey and review on MPPT techniques to attain Maximum Power of Photovoltaic system," *2019 5th International Conference on Signal Processing, Computing and Control (ISPCC)*, Solan, India, 2019, pp. 265-268, doi: 10.1109/ISPCC48220.2019.8988382.
- [35] A. Kchaou, A. Naamane, Y. Koubaa and N. K. M'Sirdi, "Comparative study of different MPPT techniques for a stand-alone PV system," *2016 17th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, Sousse, Tunisia, 2016, pp. 629-634, doi: 10.1109/STA.2016.7952092.
- [36] R. B. Bollipo, S. Mikkili and P. K. Bonthagorla, "Hybrid, optimal, intelligent and classical PV MPPT techniques: A review," in *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 9-33, Jan. 2021, doi: 10.17775/CSEEJPES.2019.02720.
- [37] A. J. Alrubaie, A. Al-Khaykan, R. Q. Malik, S. H. Talib, M. I. Mousa and A. M. Kadhim, "Review on MPPT Techniques in Solar System," *2022 8th International Engineering Conference on Sustainable Technology and Development (IEC)*, Erbil, Iraq, 2022, pp. 123-128, doi: 10.1109/IEC54822.2022.9807500.
- [38] S. P. P. Almeida, "Desenvolvimento de um Conversor CC-CA para o Condicionador Ativo Paralelo de um UPQC Trifásico", Tese de Mestrado, Universidade do Minho, 2018.

- [39] M. P. Kazmierkowski and L. Malesani, "Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: a survey," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 45, no. 5, pp. 691-703, Oct. 1998, doi: 10.1109/41.720325.
- [40] D. Kalyanraj and S. L. Prakash, "Design and performance analysis of different current control strategies of voltage source inverter," 2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC), 2013, pp. 310-315, doi: 10.1109/ICPEC.2013.6527672.
- [41] F. Wu, F. Feng, L. Luo, J. Duan and L. Sun, "Sampling period online adjusting-based hysteresis current control without band with constant switching frequency," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 1, pp. 270-277, Jan. 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2326992.
- [42] Li, Xin-Lan Park, Jong-Gyu Shin, Hwi-Beom. (2011). Comparison and Evaluation of Anti-Windup PI Controllers. *Journal of Power Electronics*. 11. 10.6113/JPE.2011.11.1.045.
- [43] P. Cortes, M. P. Kazmierkowski, R. M. Kennel, D. E. Quevedo and J. Rodriguez, "Predictive Control in Power Electronics and Drives," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 12, pp. 4312-4324, Dec. 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.2007480.
- [44] Costa, Filipe. "Desenvolvimento de um Conversor CA-CC Unificado com Características de Filtro Ativo Paralelo", Tese de Mestrado, Universidade do Minho, 2017.
- [45] SEMIKRON, "SKM50GB063D."
- [46] EPCOS, "Aluminum electrolytic capacitors Capacitors with screw terminals," 2008.
- [47] ChenYang, "Hall Effect Voltage Sensor CYHVS5-25A." [Online]. Available: <http://www.cysensors.com>
- [48] LEM, "Current Transducer LA 55-P."
- [49] Texas Instruments, "TMS320F2833x, TMS320F2823x Real-Time Microcontrollers," 2022. [Online]. Available: www.ti.com
- [50] SEMIKRON, "SKHI 21A (R)."
- [51] TRACO Power. (2021). TXL 060/070 Series, 50-70 Watt. www.tracopower.com