



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Pedro António Igreja de Carvalho

Seguidor do Ponto de Máxima Potência
Multi-Convertor para Sistemas Solares
Fotovoltaicos



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Pedro António Igreja de Carvalho

Seguidor do Ponto de Máxima Potência
Multi-Convertor para Sistemas Solares
Fotovoltaicos

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

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Henrique Nuno Baptista Gonçalves

e coorientação do
Professor Doutor José Gabriel Oliveira Pinto

DECLARAÇÃO

Pedro António Igreja de Carvalho

Endereço eletrónico: a52681@alunos.uminho.pt Telefone: 916260219

Número do Bilhete de Identidade: 13564564

Título da Dissertação:

Seguidor do Ponto de Máxima Potência Multi-Convertor para Sistemas Solares Fotovoltaicos

Orientador:

Doutor Henrique Nuno Baptista Gonçalves

Coorientador:

Doutor José Gabriel Oliveira Pinto

Ano de conclusão: 2013

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

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

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____

À minha família e amigos.

Agradecimentos

O trabalho apresentado nesta Dissertação de Mestrado contou com o apoio de algumas pessoas, às quais transmito os meus mais sinceros agradecimentos.

Ao meu orientador Doutor Henrique Nuno Baptista Gonçalves pela paciência, dedicação, incentivo e conselhos dados no decorrer da realização deste trabalho.

Ao meu coorientador Doutor José Gabriel Oliveira Pinto pela disponibilidade, apoio e sugestões apresentadas ao longo da execução da Dissertação.

Aos investigadores e bolsiros do Grupo de Eletrónica de Potência e Energia (GEPE), Bruno Exposto, Delfim Pedrosa, Raúl Almeida, Rui Araújo, Rui Moreira e Vítor Monteiro pela prontidão na ajuda sempre que solicitada.

A todos os colegas que realizaram a Dissertação no GEPE pela entajuda e bom ambiente proporcionado.

Aos técnicos das oficinas do Departamento de Eletrónica Industrial, Ângela Macedo, Carlos Torres e Joel Almeida pela disponibilidade, apoio técnico e simpatia.

Não poderia deixar de agradecer à D^a Paula, secretária da reitoria no campus de Azurém, pela disponibilidade, paciência e simpatia demonstradas sempre que foi necessário ter acesso aos painéis solares fotovoltaicos.

Aos meus amigos e colegas de curso, Ângelo Araújo, Carlos Teixeira, Daniel Dourado, Daniel Ferreira, Hélder Barbosa, Henrique Costa, João Beiramar, José Silva, Ricardo Silva e Vítor Veiga pela amizade e os momentos de diversão e descontração proporcionados ao longo destes anos.

Por fim, um agradecimento muito especial à minha família, em particular aos meus pais e à minha irmã, pelo apoio incondicional nos bons e maus momentos.

Resumo

Com o decorrer dos anos o panorama energético mundial tem vindo a modificar-se, numa tentativa contínua de proporcionar o desenvolvimento económico da sociedade moderna, de forma sustentável e com o mínimo de consequências para o meio ambiente.

A produção de energia já não depende exclusivamente da queima de combustíveis fósseis. Atualmente realizam-se esforços no sentido de desenvolver tecnologia que possibilite aumentar a eficiência e reduzir os custos, na obtenção de energia a partir de fontes não poluentes e renováveis. Em virtude disso e pela elevada disponibilidade da sua fonte de energia, o sol, os sistemas solares fotovoltaicos têm-se afirmado como uma das melhores apostas na área das energias renováveis.

A potência instantânea extraída de um sistema solar fotovoltaico está constantemente a alterar-se, devido a variações nas condições ambientais a que está submetido, em especial a radiação. Numa instalação solar com os painéis conectados em serie, basta um ficar sujeito a sombra para que os restantes sejam afetados de modo igual (efeito sombra). A este fator estão associadas perdas de rendimento consideráveis.

Esta Dissertação descreve o estudo, implementação e teste de um Seguidor do Ponto de Máxima Potência Multi-Convertor para Sistemas Solares Fotovoltaicos, capaz de otimizar a produção de energia e compensar o efeito sombra sobre um, ou mais, painéis de uma instalação solar. A solução desenvolvida é constituída por um conversor CC-CC do tipo *Boost*, cujo controlo é baseado no algoritmo MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) designado Perturbação e Observação. Esta técnica permite acompanhar de forma dinâmica as flutuações de potência de um painel ao longo do dia, fazendo com que este opere sempre no seu ponto de máxima potência. Para compensar o efeito sombra recorreu-se à topologia *Module Integrated Converter* (MIC), que consiste na utilização de um conversor de potência dedicado para cada painel da instalação solar. Por isso, para que esta solução se torne viável, é fundamental que o protótipo implementado seja autónomo, de dimensões reduzidas, eficiente e de baixo custo.

Neste documento são apresentados os resultados de simulação, o *hardware* de potência, de controlo e de alimentação selecionado, e por fim são relatados os resultados experimentais obtidos em ambiente laboratorial e em ambiente real que comprovam o funcionamento do sistema implementado.

Palavras-Chave: Efeito Sombra, MIC, MPPT, Conversor CC-CC *Boost*, Sistema Solar Fotovoltaico, Energias Renováveis.

Abstract

Throughout the years, there is a growing interest in modifying the global energy landscape for supporting the economical growth of modern society while minimizing its environmental impact.

Energy production is not exclusively dependent on fuel fossil burning. Nowadays efforts are carried out in developing technology which increases the efficiency and reduces the costs of energy production from non-pollutants and renewable sources. Such efforts and the sun's high availability have driven photovoltaic solar systems as one of the best options among of the existing renewable energies.

The instantaneous power extracted from a photovoltaic solar system is constantly changing due to variations of the ambient conditions to which it is subjected, namely the solar radiation. In an installation with the solar panels connected in series, if a single one is brought with a shadow, all the others are equally affected (shadow effect), leading to considerable efficiency loss.

This Dissertation describes the analysis, implementation and experimental tests of a Multi-Converter Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Solar Systems, capable of optimizing energy production and compensating the shadow effect of one or more panels in a solar installation. The developed solution is composed by a Boost DC-DC converter, whose control is based in a Maximum Power Point Tracker (MPPT) algorithm, designated Perturbation and Observation. This technique enables a dynamic following of a panel's power variations during the day, making it to work continuously at its maximum power point. In order to compensate the shadow effect, it was used the Module Integrated Converter (MIC) topology, which consists in using of a power converter dedicated for each panel in the solar installation. For this solution to be viable, it is fundamental the constructed prototype to be autonomous, of small dimensions, efficient and of low cost.

In this document, the simulation results and the selected hardware, of both power and control systems, are presented. This Dissertation ends with the experimental results, performed in both laboratory and real environments validating the implemented system's correct operation.

Keywords: Shadow Effect, MIC, MPPT, Boost DC-DC Converter, Photovoltaic Solar System, Renewable Energies.

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas.....	xvii
Lista de Siglas e Acrónimos	xix
CAPÍTULO 1 Introdução	1
1.1. Energia Solar Fotovoltaica	1
1.2. Enquadramento	3
1.3. Motivações	4
1.4. Objetivos	5
1.5. Organização da Dissertação	6
CAPÍTULO 2 Sistemas Solares Fotovoltaicos	7
2.1. Introdução	7
2.2. Classificação dos Sistemas Solares Fotovoltaicos.....	7
2.2.1. Sistemas Solares Fotovoltaicos Ligados à Rede Elétrica.....	8
2.2.2. Sistemas Solares Fotovoltaicos Autónomos	9
2.3. Células Solares Fotovoltaicas.....	9
2.3.1. Tipos de Células Solares Fotovoltaicas	10
2.3.2. Circuito Elétrico Equivalente e Modelo Matemático da Célula Fotovoltaica.....	12
2.4. Painéis Solares Fotovoltaicos.....	14
2.4.1. Características Elétricas dos Painéis Solares Fotovoltaicos	15
2.4.2. Curvas Características	16
2.4.3. Fatores que Influenciam o Desempenho dos Painéis Solares Fotovoltaicos.....	17
2.4.4. Efeito Sombra	18
2.5. Algoritmos de Controlo MPPT	21
2.5.1. Perturbação e Observação.....	22
2.5.2. Condutância Incremental	24
2.6. Conversor CC-CC <i>Boost</i>	27
2.6.1. Princípio de Funcionamento	27
2.6.2. Modo de Condução Contínua	28
2.6.3. Limite entre o Modo de Condução Contínua e Condução Descontínua	33
2.6.4. Modo de Condução Descontínua	35
2.6.5. Técnica de Controlo do Conversor CC-CC <i>Boost</i>	37
2.7. Conclusões	37
CAPÍTULO 3 Dimensionamentos e Simulações Computacionais.....	39

3.1.	Introdução.....	39
3.2.	Dimensionamentos	39
3.2.1.	Painel Solar Fotovoltaico	40
3.2.2.	Conversor CC-CC <i>Boost</i>	41
3.3.	Simulações Computacionais.....	42
3.3.1.	Sistema Implementado em Simulação	43
3.3.2.	Painel Solar Fotovoltaico	44
3.3.3.	Controlo do Conversor CC-CC <i>Boost</i>	45
3.4.	Resultados de Simulação	47
3.4.1.	Validação do Funcionamento do Conversor CC-CC <i>Boost</i>	47
3.4.2.	Validação do Algoritmo de Controlo MPPT	49
3.4.3.	Validação da Topologia <i>Module Integrated Converter</i>	51
3.5.	Conclusões.....	53
CAPÍTULO 4 Implementação		55
4.1.	Introdução.....	55
4.2.	Circuito de Potência	56
4.3.	Circuito de Controlo	60
4.3.1.	Microcontrolador	61
4.3.2.	Sensores e Condicionamento de Sinal	63
4.4.	Circuito de Alimentação	65
4.5.	<i>Design</i> da Placa de Circuito Impresso do Protótipo	68
4.6.	Protótipo Desenvolvido	69
4.7.	Conclusões.....	70
CAPÍTULO 5 Resultados Experimentais		73
5.1.	Introdução.....	73
5.2.	Teste em Malha Aberta e em Regime Permanente para a Potência Nominal	73
5.3.	Teste em Malha Fechada em Regime Transitório.....	76
5.4.	Validação do Algoritmo de Controlo MPPT.....	79
5.5.	Teste da Topologia <i>Module Integrated Converter</i>	83
5.6.	Teste em Ambiente Real de Aplicação	91
5.7.	Aspeto Final do Protótipo Desenvolvido.....	97
5.8.	Conclusões.....	98
CAPÍTULO 6 Conclusão e Trabalho Futuro.....		101
6.1.	Conclusão	101
6.2.	Trabalho Futuro	104
Bibliografia		105

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Evolução da capacidade acumulada mundialmente em instalações fotovoltaicas (MW) [1]. . 2	
Figura 1.2 – Evolução da capacidade total instalada em Portugal continental para a produção de energia a partir de sistemas solares fotovoltaicos (MW) [3]..... 3	
Figura 2.1 – Sistema solar fotovoltaico ligado à rede elétrica. 8	
Figura 2.2 – Sistema solar fotovoltaico híbrido. 9	
Figura 2.3 – Efeito fotovoltaico numa célula de silício cristalino..... 10	
Figura 2.4 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica. 13	
Figura 2.5 – Evolução desde a célula até à formação de um <i>array</i> solar fotovoltaico. 14	
Figura 2.6 – Curvas características de um painel solar fotovoltaico (adaptada de [16]). 17	
Figura 2.7 – Curvas I-V de um painel fotovoltaico para diferentes radiações e temperatura constante de 25 °C (adaptada de [5]). 18	
Figura 2.8 – Curvas I-V de um painel fotovoltaico para diferentes temperaturas e radiação constante de 1000 W/m ² (adaptada de [5]). 18	
Figura 2.9 – Radiação solar distribuída de forma uniforme. (a) Instalação solar fotovoltaica com os painéis ligados em série. (b) Curva de potência da instalação (adaptada de [20]). 19	
Figura 2.10 – Radiação solar distribuída de forma não uniforme. (a) Instalação solar fotovoltaica com os painéis ligados em série. (b) Curva de potência da instalação (adaptada de [20]). 20	
Figura 2.11 – Conceito <i>Module Integrated Converter</i> (MIC). 21	
Figura 2.12 – Fluxograma da técnica de Perturbação e Observação. 23	
Figura 2.13 – Divergência do MPP na técnica de Perturbação e Observação [23]. 24	
Figura 2.14 – Curva de potência típica de um painel solar (adaptada de [26]). 24	
Figura 2.15 – Fluxograma da técnica de Condutância Incremental. 26	
Figura 2.16 – Circuito elétrico do conversor <i>Boost</i> 27	
Figura 2.17 – Conversor <i>Boost</i> com o interruptor ligado. 28	
Figura 2.18 – Conversor <i>Boost</i> com o interruptor desligado. 28	
Figura 2.19 – Principais formas de onda do conversor <i>Boost</i> no modo de condução contínua. 29	
Figura 2.20 – Formas de onda da tensão e da corrente no limite da condução contínua 33	
Figura 2.21 – Formas de onda típicas do modo de condução descontinuo. 35	
Figura 2.22 – Técnica de comutação por largura de impulso (PWM). 37	
Figura 3.1 – Vista geral do modelo de simulação implementado em PSIM. 43	
Figura 3.2 – Ambiente gráfico da funcionalidade “ <i>Solar Module (physical model)</i> ” do PSIM. 44	
Figura 3.3 – Representação do painel fotovoltaico em ambiente de simulação. 45	
Figura 3.4 – “Bloco C” responsável pelo controlo do conversor CC-CC <i>Boost</i> 46	
Figura 3.5 – Estratégia de controlo do conversor CC-CC <i>Boost</i> 46	
Figura 3.6 – Formas de onda do painel fotovoltaico com o conversor acoplado. (a) Corrente de saída do painel solar. (b) Tensão de saída do painel solar. 48	
Figura 3.7 – Potência de saída do painel fotovoltaico. 48	
Figura 3.8 – Tensão de saída do conversor <i>Boost</i> 49	
Figura 3.9 – Pormenor da corrente e da tensão do conversor <i>Boost</i> . (a) <i>Ripple</i> da corrente. (b) <i>Ripple</i> da tensão de saída. 49	

Figura 3.10 – Variação do valor da radiação solar incidente ao longo do tempo.	50
Figura 3.11 – Potência de saída do conversor para diferentes condições de radiação.....	50
Figura 3.12 – Radiação solar incidente nos painéis do modelo de simulação.....	51
Figura 3.13 – Formas de onda para a topologia MIC em análise. (a) Corrente de saída dos painéis 1 e 2. (b) Corrente de saída dos painéis 3 e 4. (c) Corrente de saída do sistema. (d) Tensão de saída dos conversores de potência dos painéis 1 e 2.	52
Figura 3.14 – Formas de onda da potência do sistema. (a) Potência dos painéis com radiação uniforme. (b) Potência dos painéis afetados por sombra. (c) Potência total do sistema.	53
Figura 4.1 – MOSFET STP20NF20 [30]. (a) Representação elétrica; (b) Encapsulamento TO-220.....	57
Figura 4.2 – Circuito de proteção do MOSFET.	57
Figura 4.3 – Circuito de <i>drive</i> UCC27424. (a) Esquema elétrico [31]. (b) Encapsulamento PDIP-8.	58
Figura 4.4 – Dimensões da bobina do conversor <i>Boost</i> [34].....	59
Figura 4.5 – Dimensões do condensador de saída do conversor <i>Boost</i> [35].	60
Figura 4.6 – Diagrama de blocos do sistema de controlo.....	60
Figura 4.7 – Microcontrolador MSP430G2553 da <i>Texas Instruments</i>	61
Figura 4.8 – Placa de desenvolvimento <i>Launch Pad MSP-EXP430G2</i>	62
Figura 4.9 – Circuito elétrico do isolador USB apresentado no <i>application note</i> [37] da <i>Analogue Devices</i>	63
Figura 4.10 – Isolador USB impelmentado em PCB. (a) Vista superior. (b) Vista inferior.	63
Figura 4.11 – Sensor de Corrente. (a) Circuito de leitura [38]. (b) Encapsulamento SOIC-8.....	64
Figura 4.12 – Regulador de tensão LM2674-12. (a) Esquema elétrico [39]. (b) Encapsulamento PDIP-8.	66
Figura 4.13 – Regulador de tensão LM1117-3,3/5 [40]. (a) Circuito elétrico. (b) Encapsulamento TO-252	67
Figura 4.14 – Diagrama de blocos representativo do circuito de alimentação.	67
Figura 4.15 – Placa de circuito impresso do protótipo. (a) Vista superior. (b) Vista inferior.	69
Figura 5.1 – Bancada de teste para a potência nominal de funcionamento.	74
Figura 5.2 – Principais formas de onda do conversor <i>Boost</i> . Canal 1 - tensão de entrada, Canal 2 - tensão de saída, Canal 3 - <i>duty-cycle</i> aplicado à <i>gate</i> do MOSFET.....	75
Figura 5.3 – Pormenor do <i>ripple</i> da tensão de saída do conversor <i>Boost</i>	75
Figura 5.4 – Imagem termográfica do protótipo para a potência nominal.	76
Figura 5.5 – Resposta do sistema em regime transitório.	77
Figura 5.6 – Tempo de resposta do sistema para uma diminuição da referência de saída de 70 V para 40 V.	77
Figura 5.7 – Conversor <i>Boost</i> a operar em regime permanente para uma referência de saída fixa de 50 V e uma tensão de entrada de 30 V.	78
Figura 5.8 – Conversor <i>Boost</i> a operar em regime permanente para uma referência de saída fixa de 50 V e uma tensão de entrada de 20 V.	79
Figura 5.9 – Representação elétrica do modelo equivalente de uma fonte de tensão não-ideal.	80
Figura 5.10 – Representação elétrica do modelo utilizado para validar o funcionamento do algoritmo de controlo MPPT.....	80

Figura 5.11 – Potência de entrada (wattímetro da esquerda) e tensão de saída (wattímetro da direita) do conversor <i>Boost</i> para a situação em que $R_l = 20 \Omega$	83
Figura 5.12 – Representação elétrica do modelo utilizado para validar a topologia MIC.	83
Figura 5.13 – Bancada de teste para a validação da topologia MIC.	84
Figura 5.14 – Resultados obtidos para o ensaio 1. (a) Potência de entrada do conversor 1 (wattímetro de baixo) e Potência total do sistema (wattímetro de cima), Tensão de saída do conversor 1 (multímetro da esquerda) e Tensão de saída do conversor 2 (multímetro da direita). (b) Formas de onda da tensão de entrada (canal 1 e 3) e de saída (canal 2 e 4) do conversor 1 e 2.	85
Figura 5.15 – Resultados obtidos para o ensaio 2. (a) Potência de entrada do conversor 1 (wattímetro de baixo) e Potência total do sistema (wattímetro de cima), Tensão de saída do conversor 1 (multímetro da esquerda) e Tensão de saída do conversor 2 (multímetro da direita). (b) Formas de onda da tensão de entrada (canal 1 e 3) e de saída (canal 2 e 4) do conversor 1 e 2.	86
Figura 5.16 – Resultados obtidos para o ensaio 3. (a) Potência de entrada do conversor 1 (wattímetro de baixo) e Potência total do sistema (wattímetro de cima), Tensão de saída do conversor 1 (multímetro da esquerda) e Tensão de saída do conversor 2 (multímetro da direita). (b) Formas de onda da tensão de entrada (canal 1 e 3) e de saída (canal 2 e 4) do conversor 1 e 2.	87
Figura 5.17 – Resultados obtidos para o ensaio 4. (a) Potência de entrada do conversor 1 (wattímetro de baixo) e Potência total do sistema (wattímetro de cima), Tensão de saída do conversor 1 (multímetro da esquerda) e Tensão de saída do conversor 2 (multímetro da direita). (b) Formas de onda da tensão de entrada (canal 1 e 3) e de saída (canal 2 e 4) do conversor 1 e 2.	88
Figura 5.18 – Resultados obtidos para o ensaio 5. (a) Potência de entrada do conversor 1 (wattímetro de baixo) e Potência total do sistema (wattímetro de cima), Tensão de saída do conversor 1 (multímetro da esquerda) e Tensão de saída do conversor 2 (multímetro da direita). (b) Formas de onda da tensão de entrada (canal 1 e 3) e de saída (canal 2 e 4) do conversor 1 e 2.	89
Figura 5.19 – Valores de <i>duty-cycle</i> determinados pelas unidades de controlo dos dois conversores para as mesmas condições de funcionamento.	90
Figura 5.20 – Valores de <i>duty-cycle</i> determinados pelas unidades de controlo dos dois conversores para condições de funcionamento diferentes.	90
Figura 5.21 – Painéis solares BP2150S usados nos ensaios em ambiente real.	91
Figura 5.22 – Montagem efetuada na parte de trás dos painéis fotovoltaicos para a realização dos testes práticos.	92
Figura 5.23 – Imagem térmica da parte de trás dos painéis solares.	93
Figura 5.24 – Potência obtida com dois painéis fotovoltaicos ligados em série com uma carga resistiva (Wattímetro da esquerda: Potência painel solar 1, Wattímetro da direita: Potência total da instalação).	93
Figura 5.25 – Potência obtida com dois painéis fotovoltaicos ligados em série através dos seus conversores de potência dedicados (Wattímetro da esquerda: Potência painel solar 1, Wattímetro da direita: Potência total da instalação, Multímetro da esquerda: Tensão de saída do conversor 2, Multímetro da direita: Tensão saída do conversor 1).	94
Figura 5.26 – Introdução de uma sombra no painel solar 2.	95

Figura 5.27 – Potência obtida com dois painéis fotovoltaicos ligados em série com uma carga resistiva quando é introduzida uma sombra no painel 2 (Wattímetro da esquerda: Potência painel solar 1, Wattímetro da direita: Potência total da instalação).....	95
Figura 5.28 – Potência obtida com dois painéis fotovoltaicos ligados em série através dos seus conversores de potência dedicados quando é introduzida uma sombra no painel 2 (Wattímetro da esquerda: Potência painel solar 1, Wattímetro da direita: Potência total da instalação, Multímetro da esquerda: Tensão de saída do conversor 2, Multímetro da direita: Tensão saída conversor 1).	96
Figura 5.29 – Imagem térmica do conversor <i>Boost</i> , em ambiente real, para uma potência de funcionamento de 88 W e uma temperatura ambiente de aproximadamente 30 °C.	97
Figura 5.30 – Aspeto final do protótipo desenvolvido.	98
Figura 5.31 – Aspeto do protótipo perante a necessidade de um dissipador.	98

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Rendimento das células solares fotovoltaicas [13].	12
Tabela 2.2 – Sumário do algoritmo de Perturbação e Observação.	22
Tabela 3.1 – Características do painel solar BP2150S [29].	40
Tabela 4.1 – Características elétricas e físicas da bobina do conversor <i>Boost</i> [34].	59
Tabela 4.2 – Principais características do microcontrolador MSP430G2553 [36].	62
Tabela 4.3 – Níveis de tensão do protótipo.	65
Tabela 5.1 – Sumário do ensaio ao protótipo para a potência nominal.	76
Tabela 5.2 – Resultados obtidos no ensaio ao algoritmo de controlo MPPT Perturbação e Observação.	82
Tabela 5.3 – Ensaio 1: Resposta dos dois conversores para as mesmas condições de funcionamento.	85
Tabela 5.4 – Ensaio 2: Diminuição do valor de potência no conversor 2.	86
Tabela 5.5 – Ensaio 3: Aumento do valor de potência no conversor 2.	87
Tabela 5.6 – Ensaio 4: Aumento do valor de potência no conversor 1.	88
Tabela 5.7 – Ensaio 5: Aumento do valor de potência no conversor 2.	89
Tabela 5.8 – Ensaio 1: Radiação solar distribuída de forma uniforme pela instalação solar.	94
Tabela 5.9 – Ensaio 2: Introdução de uma sombra no painel 2.	96

Lista de Siglas e Acrónimos

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
EPIA	<i>European Photovoltaic Industry Association</i>
GEPE	Grupo de Eletrónica de Potência e Energia
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
MIC	<i>Module Integrated Converter</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracker</i>
NOCT	<i>Nominal Operating Cell Temperature</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PWM	<i>Pulse With Modulation</i>
SDM	<i>Single Diode Model</i>
SMD	<i>Surface Mounted Device</i>
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
ZOH	<i>Zero-Order Holder</i>

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1. Energia Solar Fotovoltaica

A preocupação, a nível mundial, relativamente aos impactos ambientais causados pela produção de energia através da queima de combustíveis fósseis, como o petróleo e o carvão, tem vindo a massificar-se cada vez mais com o decorrer dos anos. Esta realidade, conjuntamente com o aumento exponencial do preço destes recursos, muito à custa da sua escassez e instabilidade política, cada vez maior nos países possuidores destas matérias-primas, potenciou a procura de novas formas de geração de energia a partir de fontes não poluentes e renováveis.

Desde cedo, os sistemas solares fotovoltaicos que se baseiam na produção de energia elétrica a partir da radiação solar, afirmaram-se como sendo uma das melhores apostas na área das energias renováveis. Isto deve-se em grande parte à elevada disponibilidade geográfica da sua fonte de energia, o sol, bem como ao facto de requererem pouca manutenção, possuírem um tempo de vida útil elevado, serem silenciosos e ainda por poderem ser facilmente integrados em edifícios ou outro tipo de construções. Adicionalmente é fundamental referir que o custo e o rendimento associado a estes sistemas, fatores que no passado eram os principais entraves no momento da sua escolha, atualmente não apresentam uma importância tão significativa, em virtude do decréscimo do preço dos painéis fotovoltaicos e da eletrónica de potência que permite otimizar o rendimento deste tipo de instalações.

Na última década a produção de energia a partir de sistemas solares fotovoltaicos cresceu a um ritmo notável, com especial destaque a partir de 2008, ano em que pela primeira vez se observou um aumento evidente na potência instalada ao nível global. Na Figura 1.1 é apresentado o gráfico que ilustra a evolução da capacidade acumulada, mundialmente, de acordo com a potência anual instalada. Os valores indicados resultam das estatísticas mais recentes da Associação Europeia da Indústria Fotovoltaica. Através do gráfico é possível constatar que os anos de 2011 e 2012, foram os que contribuíram maioritariamente para se alcançar a impressionante marca dos 102 GW de capacidade

total acumulada que se verificou no final de 2012. Nesse ano, a potência total instalada foi de aproximadamente 31,1 GW, sendo que 17,2 GW são provenientes exclusivamente da Europa, correspondendo a uma cota de mercado de 55%. A Alemanha foi o país líder no investimento em infraestruturas para a produção de energia com recurso à tecnologia fotovoltaica, tendo-se registado uma potência instalada de 7,6 GW. Em segundo lugar do *ranking* aparece a China com instalações estimadas em 5 GW e em terceiro lugar encontra-se os Estados Unidos da América com sensivelmente 3,3 GW [1].

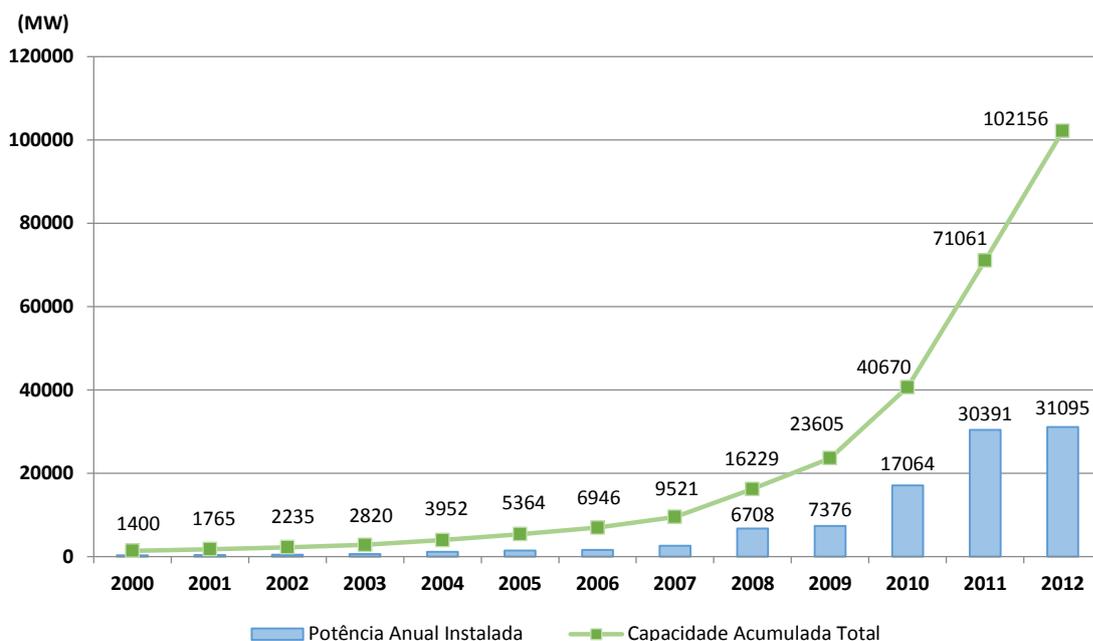


Figura 1.1 – Evolução da capacidade acumulada mundialmente em instalações fotovoltaicas (MW) [1].

Em virtude do crescimento demonstrado na Figura 1.1, a produção de energia com recurso a sistemas solares fotovoltaicos está a assumir um papel relevante no panorama energético mundial. Atualmente, a energia solar fotovoltaica é a terceira fonte renovável mais importante em termos de capacidade instalada globalmente, encontrando-se logo atrás da energia hidroelétrica e da energia eólica. Pelo segundo ano consecutivo (em 2012) a energia fotovoltaica foi a energia renovável número um instalada na Europa [1]. De acordo com cálculos efetuados pela EPIA (*European Photovoltaic Industry Association*), o consumo de eletricidade a nível europeu poderia ser satisfeito se apenas 0,34% do território terrestre desse continente (área equivalente à Holanda), estivesse coberto por painéis fotovoltaicos. Do mesmo modo, cálculos apresentados pela IEA (*International Energy Agency*), demonstram que se 4% das áreas de deserto presentes no planeta fossem utilizadas para alojar instalações fotovoltaicas, o consumo energético primário mundial poderia ser colmatado [2].

Em Portugal também se verificou um crescimento contínuo na aposta da tecnologia fotovoltaica como forma de produção de energia. Na Figura 1.2 é mostrado o gráfico que traduz a evolução histórica da potência total instalada, segundo os dados estatísticos da Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG).

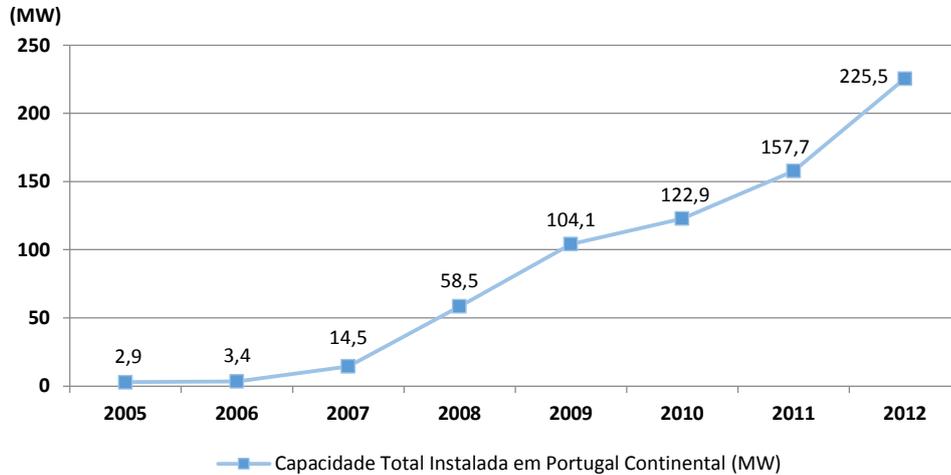


Figura 1.2 – Evolução da capacidade total instalada em Portugal continental para a produção de energia a partir de sistemas solares fotovoltaicos (MW) [3].

Pelo gráfico da Figura 1.2 pode-se constatar que Portugal acompanhou a tendência dos mercados mundiais, tendo-se observado de igual modo um aumento notório na capacidade acumulada a partir de 2008. Apesar da forte crise económica do país nos últimos anos, o interesse no investimento em instalações fotovoltaicas permaneceu, tendo-se atingido no final de 2012 uma potência instalada de 225,5 MW [3]. Esta aposta contínua na tecnologia fotovoltaica, deve-se em grande parte à excelente posição geográfica do país, uma vez que o número médio anual de horas de sol varia entre as 2200 e as 3000 horas (Portugal continental), proporcionando um investimento seguro e rentável. Este facto faz com que Portugal seja um dos países da Europa com melhores condições para o aproveitamento deste recurso, visto que por exemplo na Alemanha, país europeu com maior potência instalada, o número médio anual de horas de sol varia apenas entre as 1200 e as 1700 horas [4].

1.2. Enquadramento

A potência instantânea extraída de um sistema solar fotovoltaico está constantemente a alterar-se, devido a variações nas condições ambientais a que está submetido, sendo de destacar a radiação e a temperatura. De modo a otimizar o rendimento destes sistemas é costume recorrer-se a circuitos de potência, cujo controlo

é baseado num algoritmo MPPT (*Maximum Power Point Tracker*), que têm como função determinar as condições de funcionamento ótimas que permitem aos painéis fotovoltaicos operar no seu ponto de máxima potência.

As soluções clássicas passam pela utilização de apenas um conversor eletrónico de potência do tipo CC-CC, com uma única entrada que atua sobre o conjunto como um todo. Porém, com esta abordagem o rendimento da instalação fotovoltaica pode ser comprometido, pelo aparecimento de uma sombra em um, ou mais, painéis. Nesta situação, a corrente que circula no conjunto é definida pela corrente máxima que os painéis sujeitos a sombra são capazes de fornecer. Assim, os restantes elementos da instalação que não estão submetidos a sombra são afetados da mesma maneira, sendo obrigados a operar em condições que não possibilitam a extração da sua potência máxima, o que provoca perdas de rendimento significativas.

Por outro lado, têm surgido soluções inovadoras que defendem a utilização de um conversor de potência exclusivo por painel solar. Desta forma, consegue-se controlar individualmente a potência extraída de cada um dos painéis, tornando a produção de energia em cada um, independente dos restantes elementos da instalação fotovoltaica. Recorrendo a esta configuração, para além de ser possível otimizar o rendimento do sistema, os problemas relacionados com o efeito de uma sombra, verificados nas soluções padrão, são minimizados.

Esta Dissertação de Mestrado enquadra-se num contexto que visa o desenvolvimento de tecnologia atual na vertente solar fotovoltaica. Tendo como objetivo o estudo, implementação e teste de um Seguidor do Ponto de Máxima Potência Multi-Conversor para Sistemas Solares Fotovoltaicos, que permita otimizar o rendimento destas instalações e minimizar o efeito sombra sobre um, ou mais, painéis.

1.3. Motivações

A principal motivação que levou à escolha deste tema foi o facto de estar relacionado com uma fonte de energia renovável. A produção de energia a partir de recursos não poluentes e renováveis, em particular, a energia solar fotovoltaica está a adquirir uma posição de destaque no mercado energético global. O potencial de crescimento, apesar da evolução verificada nos últimos anos, ainda é bastante elevado em Portugal e no Mundo, contribuindo para isso a redução do preço dos painéis e da eletrónica de potência associada a estas instalações. Para além disso, o carácter versátil

alcançado através da produção de painéis flexíveis e com diversos formatos, possibilita uma vasta gama de aplicações ainda por explorar.

O problema integrante desta Dissertação de Mestrado também se revelou uma grande motivação, porque o desenvolvimento de uma solução capaz de minimizar os problemas inerentes ao efeito sombra, traduz-se num aumento significativo no rendimento das instalações solares fotovoltaicas. Este facto representa uma vantagem assinalável no ceio da indústria fotovoltaica, onde o principal foco de investigação tem sido o desenvolvimento de tecnologia que possibilite aumentar a eficiência destas instalações.

Outra das motivações foi o facto do laboratório do Grupo de Eletrónica de Potência e Energia (GEPE) onde a Dissertação foi realizada, proporcionar todas as condições necessárias para a execução de um bom trabalho. Particularmente, pelo facto de ter ao seu dispor um conjunto de painéis fotovoltaicos onde seria possível testar o protótipo implementado.

Por fim, a natureza multidisciplinar do tema que requer conhecimentos ao nível da eletrónica de potência, controlo digital, condicionamento de sinal e programação de microcontroladores, juntamente com a componente de desenvolvimento de *hardware* contribuíram para a decisão que resultou na escolha desta Dissertação.

1.4. Objetivos

Os principais objetivos desta Dissertação de Mestrado são o estudo, desenvolvimento e teste de um Seguidor do Ponto de Máxima Potência Multi-Convertor para Sistemas Solares Fotovoltaicos. O protótipo implementado tem de ser capaz de otimizar o rendimento de uma instalação solar fotovoltaica e compensar o efeito sombra sobre um, ou mais, painéis. Adicionalmente a solução desenvolvida tem de ser autónoma, compacta, eficiente, robusta e de custo reduzido. Para o cumprimento dos objetivos propostos é necessário executar um conjunto de tarefas intermédias. Passando a enumerar:

- Estudo bibliográfico com a caracterização do estado da arte, relativamente aos sistemas solares fotovoltaicos, técnicas de controlo MPPT e conversores de eletrónica de potência associados;
- Realização de simulações computacionais recorrendo ao PSIM dos painéis solares, conversores eletrónicos de potência, assim como do sistema de controlo;

- Dimensionamento e seleção do *hardware* de potência, de controlo e de alimentação;
- Implementação do *hardware* em placas de circuito impresso;
- Testes ao Seguidor do Ponto de Máxima Potência Multi-Convertor para Sistemas Solares Fotovoltaicos em bancada e em ambiente real de aplicação;
- Depois de validado o funcionamento do protótipo desenvolvido, o mesmo deve ser integrado numa caixa, conferindo-lhe um carácter mais robusto e próximo de uma solução comercial.

1.5. Organização da Dissertação

Esta Dissertação de Mestrado está dividida em seis capítulos que se encontram estruturados do seguinte modo:

No primeiro capítulo contextualiza-se de forma geral o leitor sobre o tema da Dissertação, introduzindo a área em que se insere e o problema que lhe está associado. Adicionalmente são apresentadas as motivações que contribuíram para a sua escolha e os objetivos a atingir com o seu desenvolvimento.

No segundo capítulo são abordados todos os fundamentos teóricos relevantes. É efetuada uma descrição sucinta sobre os sistemas solares fotovoltaicos e os elementos fundamentais que os constituem. O principal foco deste capítulo consiste em evidenciar as consequências do efeito sombra numa instalação solar e demonstrar de que forma podem ser minimizadas.

No terceiro capítulo são efetuados todos os cálculos preliminares, com base nos fundamentos teóricos do Capítulo 2, que servem de apoio para a elaboração do modelo de simulação que permite ajustar e validar a configuração apresentada, para mitigar os problemas relacionados com o efeito sombra numa instalação solar fotovoltaica.

O quarto capítulo centra-se na descrição pormenorizada do *hardware* de potência, de controlo e de alimentação selecionado para o protótipo desenvolvido.

No quinto capítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos em bancada e em ambiente real de aplicação, que permitem comprovar o funcionamento do sistema implementado.

Por fim, no sexto capítulo são apresentadas as conclusões referentes ao trabalho realizado e são efetuadas algumas sugestões com o intuito de o melhorar e valorizar no futuro.

CAPÍTULO 2

Sistemas Solares Fotovoltaicos

2.1. Introdução

Neste capítulo são abordadas as principais temáticas relacionadas com os sistemas solares fotovoltaicos. Inicialmente é feita uma exposição sucinta sobre as aplicações desta tecnologia, a partir das quais se pode classificar os diferentes tipos de instalação solar fotovoltaica. Em seguida são descritos os elementos fundamentais que constituem estes sistemas, começando pela unidade base, a célula fotovoltaica. Da associação em série e/ou paralelo de várias células formam-se os painéis solares. São apresentadas as principais características elétricas dos mesmos, assim como os fatores que prejudicam o seu desempenho, em particular, variações na radiação e na temperatura a que estão submetidos. Para além disso, é focado um problema específico que ocorre em instalações cujos painéis estão conectados em série, denominado efeito sombra. As consequências deste fenómeno são evidenciadas e é identificada a topologia *Module Integrated Converter* (MIC) como forma de as minimizar.

Posteriormente é realizada uma explicação sobre o princípio de funcionamento dos algoritmos de controlo *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) mais usuais, responsáveis por otimizar a potência extraída dos painéis solares. Por fim, é efetuada uma descrição pormenorizada do conversor de potência CC-CC do tipo *Boost*, que possibilita elevar a tensão de saída dos painéis solares e ainda, maximizar o seu rendimento através do algoritmo de controlo MPPT implementado.

2.2. Classificação dos Sistemas Solares Fotovoltaicos

Os sistemas solares fotovoltaicos, atualmente, são usados em inúmeras aplicações estando presentes em áreas urbanas, montados em telhados ou até mesmo integrados na fachada de edifícios, bem como, em ambientes remotos onde não existem infraestruturas disponíveis para a distribuição de energia elétrica [2].

Estas instalações são bastante versáteis, uma vez que podem ser complementadas por outras fontes de energia (renováveis ou não), por sistemas de armazenamento e ainda são capazes de operar conjuntamente com a rede local de distribuição de eletricidade. Mediante a configuração e os recursos utilizados, os sistemas solares fotovoltaicos podem ser classificados de duas formas: sistemas ligados à rede elétrica (*grid-connected systems*) ou sistemas isolados (*stand-alone systems*) [5]-[7].

2.2.1. Sistemas Solares Fotovoltaicos Ligados à Rede Elétrica

As instalações solares fotovoltaicas ligadas à rede elétrica são projetadas para funcionar em conjunto com a rede de distribuição de energia, Figura 2.1. Possibilitam uma vasta gama de opções, na medida em que a energia que produzem pode ser utilizada diretamente para alimentar equipamentos elétricos no local onde se encontram. Todavia, se a instalação fotovoltaica não for capaz de suprir as necessidades desses equipamentos, durante a noite ou então em dias enublados, a rede elétrica assume essa tarefa [8]. É por esse motivo que estas instalações não precisam de sistemas de armazenamento de energia, uma vez que a rede elétrica desempenha essa função. Alternativamente, a totalidade da energia produzida pode ser injetada na rede elétrica pública, proporcionando benefícios monetários ao proprietário da instalação [6][9].

Como exemplo de instalações solares fotovoltaicas ligadas à rede elétrica, tem-se as centrais fotovoltaicas responsáveis pela produção centralizada de grandes quantidades de energia que, usualmente, são montadas em estruturas no solo. Por outro lado, a uma escala menor, tem-se os dois regimes de produção descentralizada de eletricidade, a miniprodução e a microprodução.

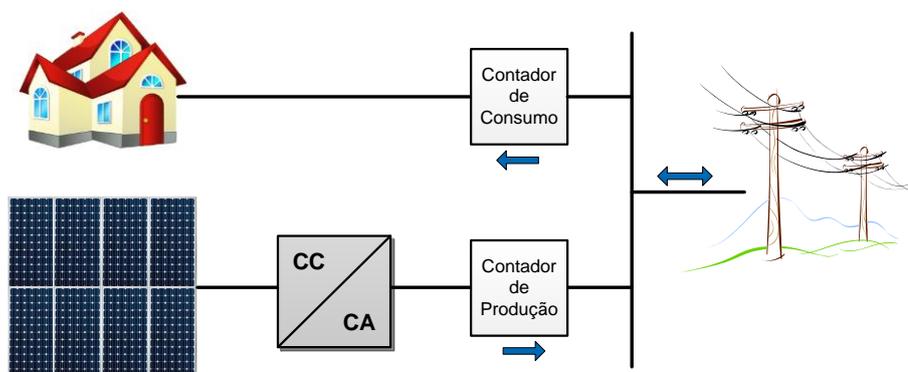


Figura 2.1 – Sistema solar fotovoltaico ligado à rede elétrica.

2.2.2. Sistemas Solares Fotovoltaicos Autónomos

Os sistemas solares fotovoltaicos autónomos, ou isolados, constituem uma opção viável para situações em que não é necessária a ligação à rede elétrica, ou quando a mesma não é possível. Este tipo de instalação é capaz de funcionar de forma autónoma, pois são munidas de sistemas de armazenamento e podem ser complementadas por outras fontes de energia renovável (por exemplo energia eólica) e/ou até mesmo por geradores a *diesel*. Assim, quando a estas instalações estão associadas outras fontes de energia são apelidadas de sistemas híbridos, Figura 2.2.

Para o armazenamento de energia, geralmente, são utilizados bancos de baterias, sendo desse modo necessário um controlador de carga e descarga para não as danificar e prolongar ao máximo o seu tempo de vida.

Estes sistemas são usados numa vasta área de aplicações, passando pela sua utilização em ambientes industriais, na eletrificação de áreas remotas, especialmente em países em desenvolvimento, podendo ainda ser aplicados em bens de consumo [2][6][9].

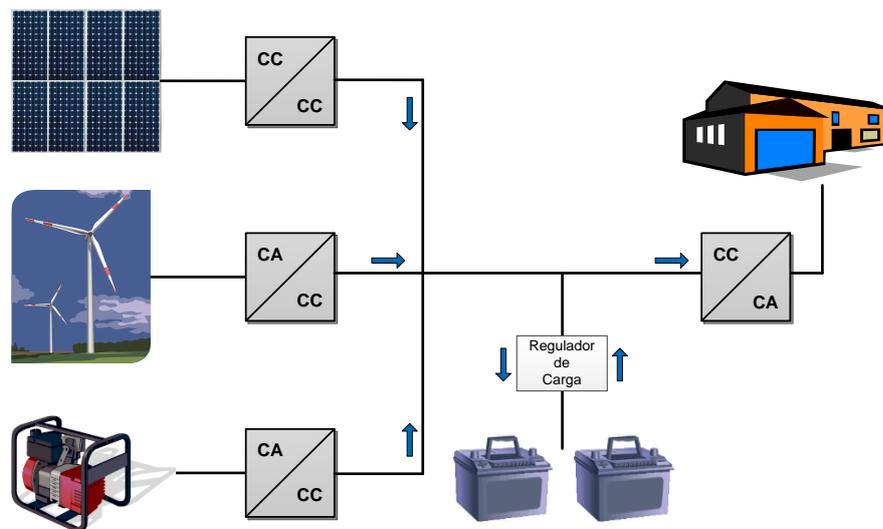


Figura 2.2 – Sistema solar fotovoltaico híbrido.

2.3. Células Solares Fotovoltaicas

A célula solar é o elemento principal de um sistema solar fotovoltaico, visto que é através deste elemento que ocorre a transformação da energia solar em energia elétrica. A este fenómeno dá-se o nome de efeito fotovoltaico, tendo sido descoberto em 1839 pelo físico francês Alexandre-Edmond Becquerel. O efeito fotovoltaico, de forma genérica, caracteriza-se pelo aparecimento de uma diferença de potencial nas extremidades de um material semiconductor quando este é exposto à radiação solar [9].

Na Figura 2.3 é ilustrado este acontecimento na estrutura de uma célula de silício cristalino.

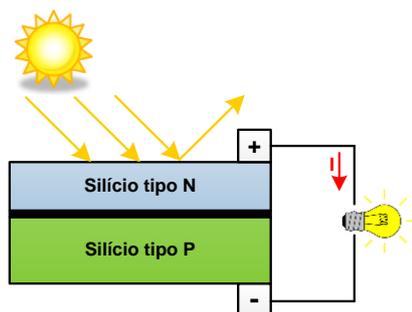


Figura 2.3 – Efeito fotovoltaico numa célula de silício cristalino.

2.3.1. Tipos de Células Solares Fotovoltaicas

A tecnologia das células fotovoltaicas tem evoluído de forma contínua ao longo do tempo, com o objetivo de se encontrar novos materiais e processos de fabrico que permitam baixar o custo de produção e aumentar o seu rendimento. As tecnologias de células fotovoltaicas existentes neste momento são classificadas como sendo de primeira, segunda e terceira geração. As células da primeira geração correspondem às células de silício cristalino, que englobam as células de silício mono e policristalino. A segunda geração baseia-se na tecnologia de filmes finos, onde é possível destacar as células de silício amorfo, telureto de cádmio e as CIGS. Finalmente, na terceira geração encontram-se as células orgânicas e outras tecnologias que ainda estão em fase de teste, não tendo sido comercializadas até agora [2][10].

Posto isto, de seguida é realizada uma breve descrição das células da primeira e segunda geração, visto que estas já se afirmaram no mercado e são vendidas em grande escala.

Silício Monocristalino (mc-Si):

As células de silício monocristalino foram as primeiras a ser fabricadas e comercializadas em grande escala. Nos dias que correm, são as que apresentam o rendimento mais elevado, porém também são as que possuem o preço mais alto. O preço deste tipo de células deve-se fundamentalmente às técnicas de fabrico que são caras e complexas, pois requerem a utilização de materiais com elevado grau de pureza e estrutura cristalina perfeita, o que implica despendir uma grande quantidade de energia. Outra das vantagens desta tecnologia é a sua longevidade e o facto de se degradarem muito lentamente [9]-[11].

Silício Policristalino (pc-Si):

A obtenção das células fotovoltaicas de silício policristalino é feita através de processos de fabrico semelhantes aos utilizados no caso anterior, contudo são menos rigorosos e por isso o grau de pureza dos materiais que constituem estas células é inferior. Desta forma, o custo de produção diminui, sendo este facto refletido no seu preço final. Comparativamente com as células de silício monocristalino, as células de silício policristalino são mais baratas, mas apresentam um rendimento menor. No que diz respeito ao tempo de vida e à degradação das células, apresentam características similares às verificadas para as células de silício monocristalino [11].

Células de Silício Amorfo (a-Si):

As principais vantagens deste tipo de células são a versatilidade e o baixo custo de produção. O carácter versátil deve-se ao facto de poderem ser produzidas em substratos flexíveis e leves [2][10]. Ao nível do custo de produção, as células de silício amorfo não dependem dos longos e complexos processos de obtenção de cristais de silício, pelo que desta forma a sua produção é feita mais rapidamente e com recurso a menos energia [11]. Apesar das vantagens mencionadas anteriormente, este tipo de células solares apresentam um rendimento relativamente baixo e demonstraram ser afetadas por um processo de degradação nos primeiros meses de funcionamento, causador de uma redução do rendimento durante o seu tempo de vida útil [9].

Telureto de Cádmio (CdTe):

Das células de segunda geração, baseadas na tecnologia de filmes finos, estas são as que apresentam um preço mais reduzido [2]. Isto acontece porque as células deste tipo possuem uma taxa de absorção elevada, necessitam de poucos materiais e o seu processo de produção é simples. Um dos problemas que tem atrasado a expansão destas células solares deve-se a questões relacionadas com a toxicidade do cádmio, bem como, o facto de o telúrio não ser uma matéria-prima abundante [6][10].

CIGS:

O acrónimo CIGS resulta da combinação dos principais materiais que constituem estas células solares, o cobre (Cu), o índio (In), o gálio (Ga) e o selênio (Se₂), cuja fórmula química é Cu(In,Ga)Se₂ [6].

Dentro da tecnologia de filmes finos, as CIGS oferecem o maior rendimento tendo-se atingido valores na ordem dos 20% em ambiente laboratorial. Os processos de

fabrico são mais complexos e menos padronizados do que para os outros tipos de células da mesma família. A longo prazo, não se verificam restrições na disponibilidade do gálio e do selênio, porém o índio está disponível em quantidades limitadas e hoje em dia é requisitado em grande escala por outras indústrias. Por isso, é de esperar que o preço do índio permaneça elevado nos próximos anos. Este facto, aliado às técnicas de fabrico complexas faz com que o custo de produção deste género de células seja relativamente elevado [2][10].

Para informações detalhadas sobre os processos de fabrico e os materiais que constituem as células solares supracitadas, recomenda-se a consulta das referências [6], [9], [10] e [12].

Na Tabela 2.1 é apresentado um resumo comparativo do rendimento dos tipos de células mencionadas, e respetivos painéis.

Tabela 2.1 – Rendimento das células solares fotovoltaicas [13].

Células Solares Fotovoltaicas				
Tecnologia		Rendimento Célula (Laboratório)	Rendimento Célula (Comercializada)	Rendimento Painel (Comercializado)
Silício Cristalino	mc-Si	24,7%	21,5%	16,9%
	pc-Si	20,3%	16,5%	14,2%
Filmes Finos	a-Si	13%	10,5%	7,5%
	CdTe	16,5%	10%	9%
	CIGS	19,5%	14%	11%

2.3.2. Circuito Elétrico Equivalente e Modelo Matemático da Célula Fotovoltaica

A análise do comportamento de uma célula solar fotovoltaica é fundamental para se perceber de que forma esta reage, quando exposta a diferentes condições climáticas. Por conseguinte, surgiu a necessidade da criação de representações elétricas capazes de descrever de forma rigorosa o seu desempenho. Na literatura encontram-se diversos circuitos equivalentes para o funcionamento destes elementos. O mais consensual é o modelo de díodo único (*Single Diode Model - SDM*), cujo esquema elétrico pode ser visto na Figura 2.4 [14][15].

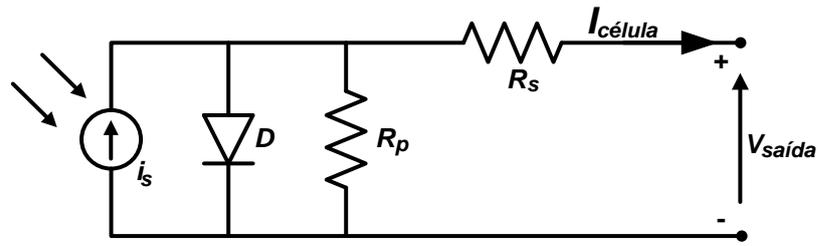


Figura 2.4 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.

O modelo SDM é constituído por quatro elementos: uma fonte de corrente, um diodo e duas resistências. A fonte de corrente representa a corrente que é gerada no processo de conversão de energia solar em energia elétrica. A corrente produzida é diretamente proporcional à intensidade da radiação solar. Por outro lado, dado que os materiais que constituem uma célula de silício cristalino apresentam propriedades elétricas semelhantes a um diodo de silício comum, o diodo em paralelo com a fonte de corrente é utilizado para simular as propriedades da célula fotovoltaica quando não está sujeita a radiação. Por fim, a resistência série cria a queda de tensão que se verifica entre o material semiconductor e os contactos metálicos da célula, enquanto que a resistência em paralelo cria a corrente de fugas do sistema [6][7].

Da análise do circuito elétrico anterior é possível obter a equação (2.1) [7][14] que caracteriza o comportamento da corrente e da tensão de uma célula solar fotovoltaica.

$$I_{célula} = i_s - I_0 \left[e^{\frac{q(V_{saída} + I_{célula}R_s)}{KTA}} - 1 \right] - \frac{V_{saída} + I_{célula}R_s}{R_p} \quad (2.1)$$

Em que:

- $I_{célula}$ é a corrente de saída da célula solar fotovoltaica (A);
- i_s é a corrente gerada pelo efeito fotovoltaico (A);
- I_0 é a corrente de saturação do diodo (A);
- q é carga do eletrão ($1,6 \times 10^{-19}$ C);
- K é a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K);
- T é a temperatura (K);
- A é o fator de idealidade do diodo;
- R_s e R_p são as resistências série e paralelo, respetivamente, inerentes da célula solar fotovoltaica (Ω);
- $V_{saída}$ é a tensão de saída da célula solar fotovoltaica (V).

2.4. Painéis Solares Fotovoltaicos

O elemento base de um sistema fotovoltaico é a célula solar, mas individualmente uma célula apenas é capaz de produzir um valor limitado de tensão e de corrente que, frequentemente, não são suficientes para aplicações práticas. Tipicamente, uma célula fotovoltaica de silício cristalino é capaz de gerar uma tensão de cerca de 0,6 V (tensão de circuito aberto) [6]. Quando é requerido um valor de tensão significativamente mais elevado é necessário efetuar associações em série destas células. De outro modo, quando se pretende valores de corrente maiores são feitas associações em paralelo. Estas associações de células dão origem ao que vulgarmente se designa por painel solar ou módulo fotovoltaico. Da agregação de vários painéis solares em série/paralelo resulta o que se costuma chamar de *array* solar, Figura 2.5.

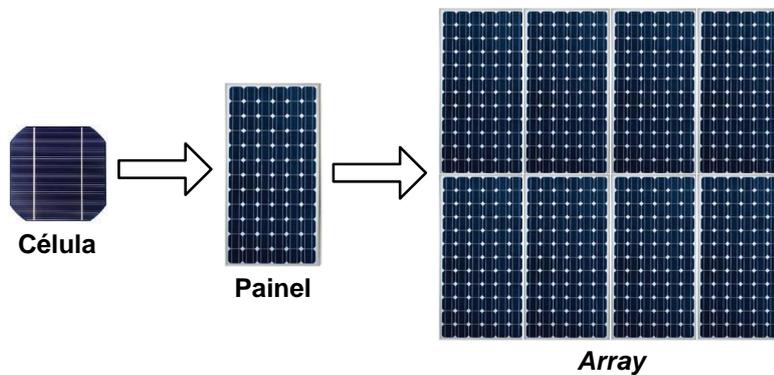


Figura 2.5 – Evolução desde a célula até à formação de um *array* solar fotovoltaico.

O comportamento da corrente e da tensão de um painel fotovoltaico pode ser determinado com recurso à equação característica da célula solar, estabelecida anteriormente, sendo unicamente necessário ter em consideração o número de células ligadas em série e em paralelo. Assim, um painel solar pode ser definido pela equação (2.2) [7][14][15].

$$I_{célula} = N_p \left(i_s - I_0 \left[e^{\frac{q \left(\frac{V_{saída}}{N_s} + \frac{I_{célula} R_s}{N_p} \right)}{KTA}} - 1 \right] - \frac{\left(\frac{V_{saída}}{N_s} + \frac{I_{célula} R_s}{N_p} \right)}{R_p} \right) \quad (2.2)$$

Em que N_s e N_p correspondem ao número de células ligadas em série e em paralelo, respetivamente.

2.4.1. Características Elétricas dos Painéis Solares Fotovoltaicos

Para que seja possível comparar os diferentes painéis fotovoltaicos existentes no mercado, tendo em conta as suas características elétricas, os fabricantes efetuam um conjunto de testes de acordo com condições de funcionamento padrão específicas, designadas por *Standard Test Conditions* (STC). Segundo os STC, os ensaios aos painéis solares devem ser realizados com uma radiação incidente uniforme de 1000 W/m^2 , a temperatura das células mantida nos 25°C e deve ser considerada uma massa de ar de $1,5 \text{ (AM } 1,5)^1$ [7][9].

Destes testes resultam um conjunto de características elétricas que são incluídas nos *datasheets* dos fabricantes, o que permite aferir a performance de um determinado painel fotovoltaico. De seguida são abordados de forma breve os principais parâmetros que definem as condições de funcionamento nominais de um painel solar, tendo em conta os STC.

Tensão de Circuito Aberto (V_{OC}):

A tensão de circuito aberto corresponde ao valor máximo de tensão que um painel fotovoltaico apresenta aos seus terminais, quando está sujeito a radiação, para uma corrente nula. Este valor pode variar em resposta a alterações na temperatura de funcionamento das células [9].

Corrente de Curto-Circuito (I_{SC}):

A corrente de curto-circuito indica o valor máximo de corrente que um painel solar sob radiação é capaz de fornecer para uma tensão nula. O valor da corrente de curto-circuito é diretamente proporcional ao valor da radiação solar incidente, sendo também influenciado ligeiramente pelo aumento da temperatura nas células de um painel [9].

Potência Máxima (P_{MAX}):

Este parâmetro pode ser considerado o mais relevante, uma vez que indica a potência máxima de funcionamento nominal do painel para um determinado valor de corrente (I_{MPP}) e de tensão (V_{MPP}) [6].

¹ Definição de Massa de Ar (AM – *Air Mass*): O valor de massa de ar refere-se à intensidade e distribuição espectral resultante da distância percorrida pela luz solar através da atmosfera. 1 AM indica que o sol se encontra diretamente sobre a superfície terrestre. 1,5 AM refere-se a uma posição do sol de tal forma que a distância percorrida pela luz solar é 1,5 vezes maior [9].

Tensão de Máxima Potência (V_{MPP}):

Corresponde ao valor da tensão do painel para o qual a potência disponibilizada é máxima. Este valor pode ser determinado a partir da tensão de circuito aberto V_{OC} utilizando a equação (2.3) [9]:

$$V_{MPP} \cong (0,75 \text{ a } 0,9)V_{OC} \quad (2.3)$$

Corrente de Máxima Potência (I_{MPP}):

Trata-se do valor da corrente do painel para o qual a potência fornecida é máxima. Este parâmetro pode ser definido pela corrente de curto-circuito I_{SC} através da equação (2.4) [9]:

$$I_{MPP} \cong (0,85 \text{ a } 0,95)I_{SC} \quad (2.4)$$

Os parâmetros descritos até aqui são representados graficamente pelas curvas características Corrente - Tensão (I-V) e Potência - Tensão (P-V) de um painel solar fotovoltaico.

2.4.2. Curvas Caraterísticas

Na Figura 2.6 são mostradas as curvas genéricas de um painel solar fotovoltaico, onde se pode verificar que a corrente máxima é a corrente de curto-circuito. O valor da potência nesse instante é nulo, tal como acontece para o valor máximo de tensão correspondente à tensão de circuito aberto. A multiplicação ponto a ponto da corrente pela tensão origina a curva P-V, a partir da qual se percebe que apenas existe um único ponto de operação onde a potência extraída é máxima. Esse ponto resulta da combinação de um valor específico de corrente e tensão, denominados em cima como I_{MPP} e V_{MPP} , respetivamente. Idealmente, um painel solar deve funcionar sempre nessas condições de forma a otimizar a produção de energia. Porém, o valor de corrente e de tensão no ponto de máxima potência sofrem alterações, em consequência de variações das condições ambientais a que o painel está sujeito. Assim sendo, é de extrema importância a implementação de um algoritmo de controlo *Maximum Power Point Tracker* (MPPT), cuja função é determinar o ponto ótimo de funcionamento do painel solar para diferentes condições de temperatura e de radiação.

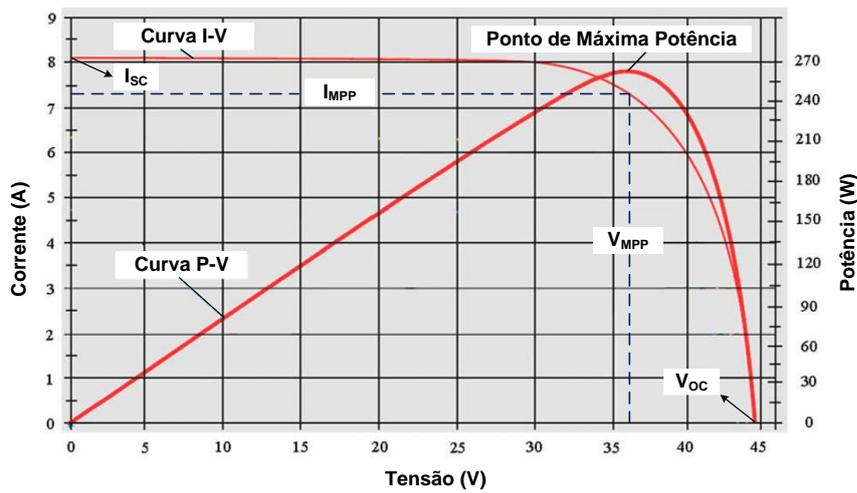


Figura 2.6 – Curvas características de um painel solar fotovoltaico (adaptada de [16]).

Pela análise da imagem anterior, pode-se concluir que à esquerda do ponto de máxima potência o comportamento do painel fotovoltaico é comparável a uma fonte de corrente. Do lado oposto, o seu desempenho aproxima-se ao de uma fonte de tensão [15].

2.4.3. Fatores que Influenciam o Desempenho dos Painéis Solares Fotovoltaicos

Os sistemas solares fotovoltaicos estão suscetíveis às condições ambientais do local onde se encontram, em particular, da radiação e da temperatura. Alterações nestes parâmetros refletem-se diretamente na potência que um painel é capaz de produzir. Mais especificamente, à medida que a intensidade da radiação solar diminui a potência disponibilizada é menor, de outra forma quando a temperatura aumenta a quantidade de energia produzida também diminui [14].

O nível de radiação a que um painel solar está exposto depende de fatores como a localização geográfica, a hora do dia, a temperatura, a humidade, o ângulo do painel e a presença de elementos que façam sombra. Alterações no valor da radiação incidente tem repercussões consideráveis na corrente gerada pelas suas células através do efeito fotovoltaico e consequentemente na corrente de curto-circuito. Pela visualização da Figura 2.7 é possível constatar que à medida que a radiação solar diminui, a corrente de curto-circuito do painel diminui de forma proporcional e que a tensão de circuito aberto permanece praticamente inalterada [6][7][14].

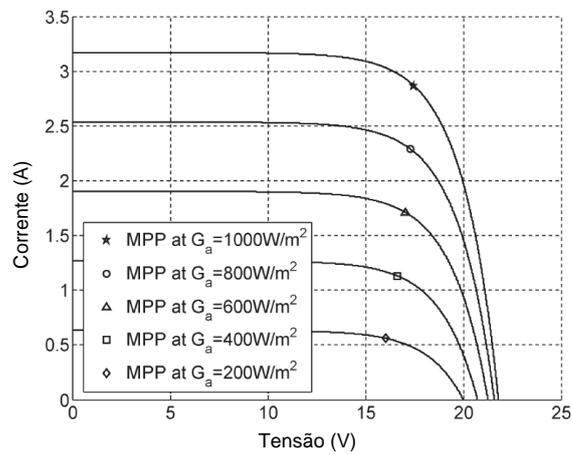


Figura 2.7 – Curvas I-V de um painel fotovoltaico para diferentes radiações e temperatura constante de 25 °C (adaptada de [5]).

Relativamente aos efeitos da temperatura nas células de um painel fotovoltaico, as alterações mais visíveis são na tensão de circuito aberto. Quando ocorre um aumento da temperatura a tensão de circuito aberto diminui, enquanto que a corrente de curto-circuito aumenta ligeiramente (aumento desprezável) [6][7][14]. Na Figura 2.8 está representado o comportamento das curvas I-V de um painel fotovoltaico para diferentes temperaturas de funcionamento e radiação constante.

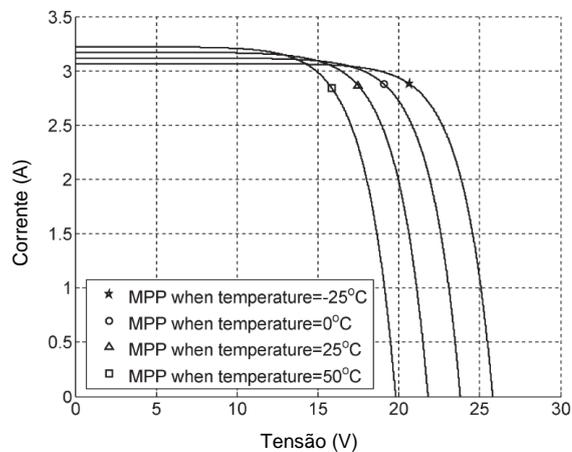


Figura 2.8 – Curvas I-V de um painel fotovoltaico para diferentes temperaturas e radiação constante de 1000 W/m² (adaptada de [5]).

2.4.4. Efeito Sombra

Em aplicações práticas, uma instalação fotovoltaica consiste num conjunto de painéis interligados em série e/ou em paralelo, de forma a satisfazer os requisitos de tensão e de corrente do sistema a implementar. Quando se pretende uma tensão de saída elevada, como acontece para o caso das instalações solares ligadas à rede elétrica, efetuam-se diversas associações em série. Nesta situação, quando a radiação solar é

distribuída uniformemente e os painéis apresentam características elétricas iguais, todos os painéis operam com a mesma corrente e o valor da tensão de saída resulta do somatório das tensões individuais disponibilizadas pelos diferentes painéis [17]-[19]. A Figura 2.9 ilustra esse cenário sendo possível visualizar a curva característica da potência da instalação.

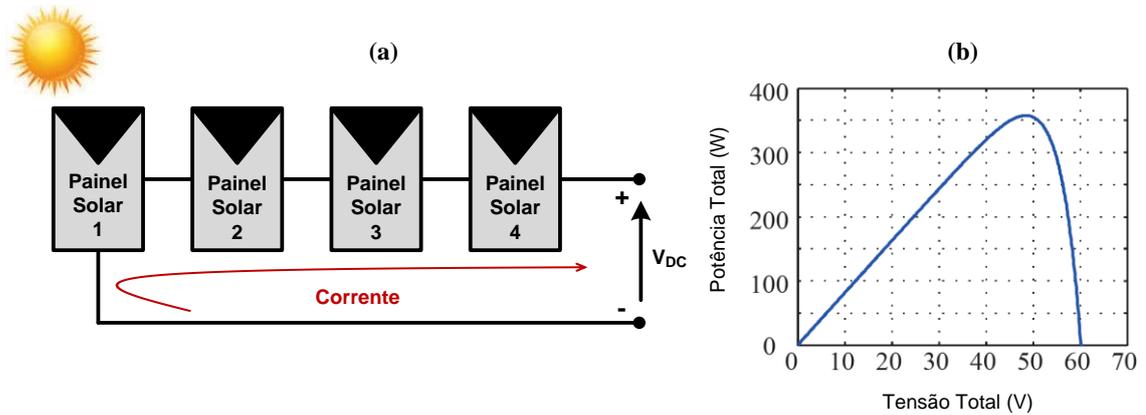


Figura 2.9 – Radiação solar distribuída de forma uniforme. (a) Instalação solar fotovoltaica com os painéis ligados em série. (b) Curva de potência da instalação (adaptada de [20]).

Pela visualização da figura anterior pode-se constatar que apenas existe um único ponto onde a potência é máxima. Desta forma, é relativamente simples localiza-lo com recurso a um conversor CC-CC ou a um inversor CC-CA com um algoritmo de MPPT incorporado. Todavia, se a radiação incidente não for uniforme por toda a instalação e alguns dos painéis ficarem sujeitos a sombra, a potência do sistema diminui de forma considerável, causando um forte impacto negativo no rendimento total.

O efeito sombra trata-se de um fenómeno natural que pode ser causado por uma nuvem, por um prédio vizinho ou até mesmo por uma árvore. Basicamente pode ser provocado por qualquer elemento que impeça a passagem direta da luz solar. Neste caso, a corrente que circula no conjunto dos painéis é definida pela corrente máxima que os painéis sujeitos a sombra são capazes de fornecer. Deste modo, os restantes elementos são obrigados a operar em condições que não as ideais, ou seja, não é possível extrair a sua potência máxima. Além disso, os painéis afetados por sombra originam diversos pontos de máxima potência (*Maximum Power Points* - MPPs) na curva característica da potência da instalação, traduzindo-se em mais um fator que contribui para a perda de rendimento. Isto porque, os algoritmos de MPPT foram concebidos para determinar o ponto de máxima potência sob condições de radiação uniforme, onde a curva de potência apenas exhibe um MPP. Destarte, numa situação como a que está a ser analisada o algoritmo de controlo MPPT pode não conseguir

localizar o MPP global do sistema e definir como ponto de máxima potência um MPP local. Um MPP local representa um falso ponto de máxima potência [17]-[22]. Comparando a Figura 2.10 apresentada em baixo, com a Figura 2.9 citada previamente pode-se constatar que a potência total do sistema sofreu uma queda significativa e que a curva de potência apresenta mais do que um MPP.

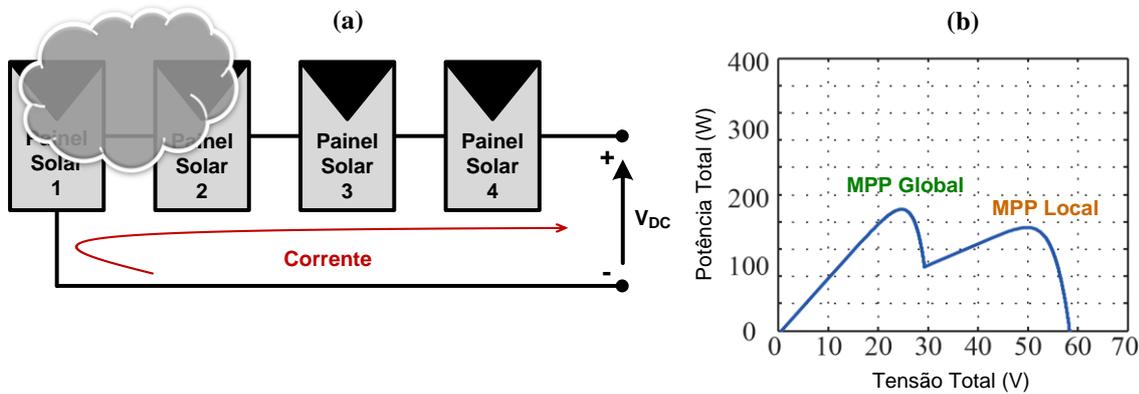


Figura 2.10 – Radiação solar distribuída de forma não uniforme. (a) Instalação solar fotovoltaica com os painéis ligados em série. (b) Curva de potência da instalação (adaptada de [20]).

Na literatura encontram-se diversas propostas para melhorar a performance dos sistemas solares que operam sob condições de radiação variável, sendo de salientar a topologia que se baseia na utilização de um conversor de potência dedicado para cada painel fotovoltaico. Entre a comunidade científica, esta configuração é designada por *Module Integrated Converter* (MIC) [18][20][21]. Através desta topologia os painéis solares deixam de estar ligados entre si, passando a estar conectados através do respetivo conversor, o que permite que cada painel tenha a sua própria corrente e tensão. O conversor é controlado de forma independente determinando o ponto de máxima potência do painel a que está associado. Assim, as perdas provocadas por um dos painéis sujeito a sombra ficam limitadas unicamente a esse elemento, os restantes painéis cuja radiação se distribui de forma uniforme não são afetados. Portanto, recorrendo a esta topologia a potência total obtida numa instalação fotovoltaica resulta do somatório das potências máximas disponíveis em cada um dos painéis, independentemente das condições de radiação solar a que estes estão sujeitos [17]-[22].

Para que esta solução se torne viável é fulcral que o conversor de eletrónica de potência associado seja de dimensões reduzidas, altamente eficiente e de baixo custo. Não obstante, também é importante serem robustos, com um tempo médio de vida na mesma ordem de grandeza dos painéis solares, ou seja, cerca de 20 a 25 anos [13].

Na Figura 2.11 está ilustrado o conceito MIC, facultando uma melhor perceção da forma como se encontram interligados os painéis, bem como, o modo como os diferentes conversores de potência interagem.

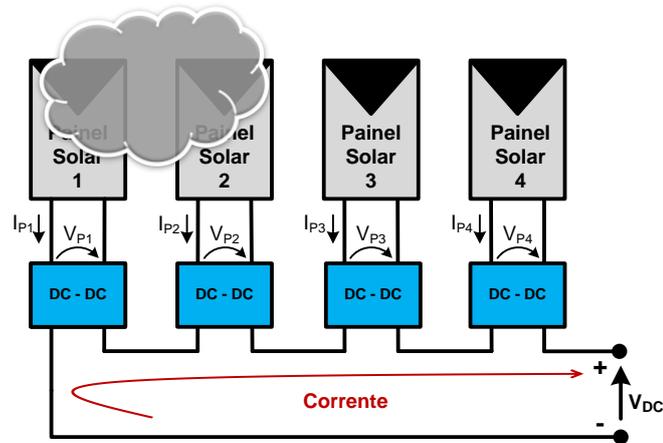


Figura 2.11 – Conceito *Module Integrated Converter* (MIC).

No que diz respeito ao conversor de potência a utilizar, na literatura são apresentadas várias opções sendo de destacar o conversor elevador de tensão *Boost*, devido à sua simplicidade, baixo custo e rendimento [19]. Além disso, como proporciona uma tensão de saída superior ao valor da entrada, o número de painéis necessários para atingir o valor de tensão requerida pelo inversor nos sistemas fotovoltaicos ligados à rede elétrica é menor [19][22]. Ao implementar-se a topologia MIC recorrendo a conversores *Boost*, quando um dos painéis do conjunto se encontrar sob sombra, a corrente de saída dos conversores de potência dos restantes elementos vai diminuir até atingirem a corrente de MPP do painel sujeito a sombra. Contudo, o valor da tensão de saída dos conversores aumenta, assegurando que as suas potências ótimas de funcionamento não são afetadas [20].

2.5. Algoritmos de Controlo MPPT

Os algoritmos de controlo *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) desempenham um papel crucial nos sistemas solares fotovoltaicos, na medida em que permitem otimizar o seu rendimento para diferentes condições de operação, tal como foi mencionado anteriormente. Recorrendo a estas técnicas de controlo, é possível determinar de forma dinâmica o valor de tensão e de corrente a que um painel solar deve operar para que a potência disponibilizada seja máxima. Daí, a designação “*Maximum Power Point Tracker*”, ou seja, seguidor do ponto de máxima potência.

Atualmente existem inúmeras técnicas desenvolvidas e testadas. Dada a elevada possibilidade de escolha, no momento da seleção de uma técnica é importante ter em consideração os seguintes aspetos: tipo de controlo (analógico ou digital), o grau de complexidade que apresentam, a velocidade de convergência, os sensores que necessitam, o rendimento, a dificuldade de implementação em *hardware* e finalmente o custo de implementação [23][24].

Da análise dos algoritmos de controlo MPPT destacaram-se as técnicas de Perturbação e Observação e de Condutância Incremental, pelo facto de serem as mais utilizadas e as que reúnem maior consenso no que diz respeito ao seu desempenho. Deste modo, de seguida é realizada uma descrição detalhada do princípio de funcionamento desses dois algoritmos MPPT.

2.5.1. Perturbação e Observação

O método de Perturbação e Observação, também conhecido por *Hill-Climbing*, é dotado de um princípio de funcionamento bastante simples e intuitivo, sendo uma das técnicas mais amplamente utilizadas. Baseia-se na alteração da variável de referência (Perturbação) e conseqüente comparação do valor da potência disponibilizada à saída do painel fotovoltaico, antes e depois da introdução dessa alteração (Observação), determinando assim o sentido da próxima perturbação. Isto significa que periodicamente tem-se de perturbar (aumentar ou diminuir) o valor de saída da tensão ou da corrente do painel fotovoltaico e observar o comportamento da potência de saída em função da perturbação aplicada. Se ocorreu um incremento na potência de saída a próxima perturbação será no mesmo sentido que a anterior. Caso contrário, a perturbação a aplicar tem de ser no sentido contrário [23][25]. Este processo é repetido até que seja encontrado o MPP (*Maximum Power Point*) do painel solar. Na Tabela 2.2 é efetuado o sumário da relação entre a perturbação aplicada, a alteração correspondente na potência e o sentido da perturbação seguinte.

Tabela 2.2 – Sumário do algoritmo de Perturbação e Observação.

Perturbação	Alteração na Potência	Próxima Perturbação
Positiva	Positiva	Positiva
Positiva	Negativa	Negativa
Negativa	Positiva	Negativa
Negativa	Negativa	Positiva

Na Figura 2.12 é apresentado o fluxograma que descreve as etapas de funcionamento deste algoritmo.

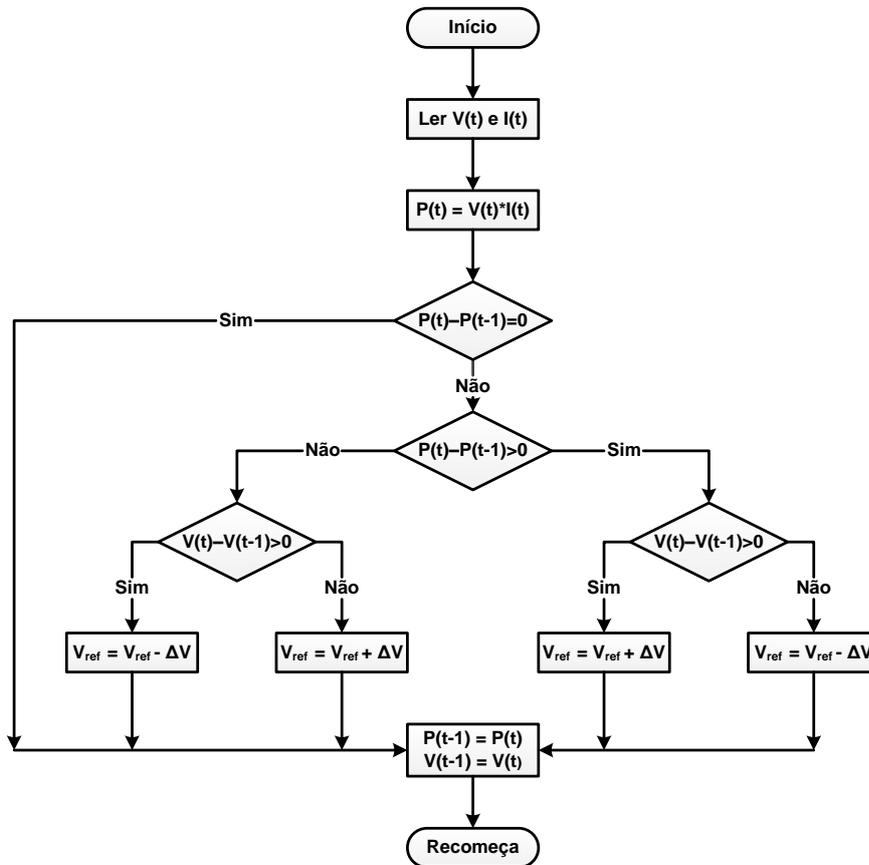


Figura 2.12 – Fluxograma da técnica de Perturbação e Observação.

Esta técnica de controlo é de fácil implementação e exige pouco processamento de dados, contudo apresenta algumas restrições. Quando é encontrado o ponto de máxima potência, em regime permanente, o sistema vai oscilar em torno desse ponto, diminuindo a eficácia deste método. Pelo que não se tira partido da totalidade de energia disponibilizada. Esta limitação é causada porque é necessário aplicar ininterruptamente uma perturbação na tensão ou na corrente de saída. Portanto, torna-se impossível fixar o MPP do sistema num ponto específico. A oscilação em torno do MPP pode ser minimizada reduzindo o tamanho da perturbação a aplicar, só que perturbações pequenas tornam esta técnica lenta, sendo necessário mais tempo para encontrar o MPP do sistema [23][25].

Por outro lado, este método também se mostra falível quando ocorrem mudanças bruscas nas condições climáticas, como é ilustrado na Figura 2.13. Começando a partir do ponto A, se as condições atmosféricas se mantiverem relativamente constantes é introduzida uma perturbação na tensão de saída do painel solar. Esta move o ponto de

operação para B e a próxima perturbação será no sentido inverso, dado que se verificou uma diminuição da potência de saída. No entanto, se a radiação solar aumentar nesse momento e deslocar a curva da potência, de P1 para P2, o ponto de operação é alterado de A para C. Representando um aumento da potência e dessa forma a perturbação é mantida no mesmo sentido. Consequentemente, o ponto de operação diverge do MPP e essa divergência é mantida se a radiação solar continuar a aumentar [23].

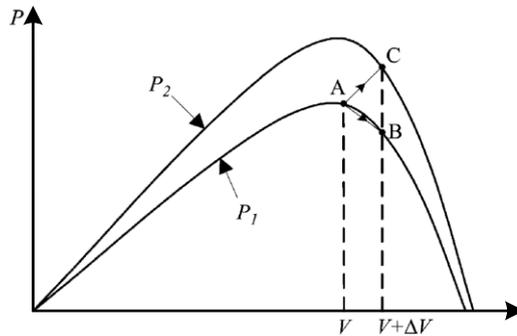


Figura 2.13 – Divergência do MPP na técnica de Perturbação e Observação [23].

2.5.2. Condutância Incremental

A técnica de Condutância Incremental recorre à curva característica da potência em função da tensão (curva P-V) do painel fotovoltaico como forma de determinação do ponto de máxima potência. Fundamentando-se no facto de que a derivada da curva P-V é zero no instante em que se atinge o MPP, positiva no lado esquerdo do mesmo e negativa do lado direito [23]-[25].

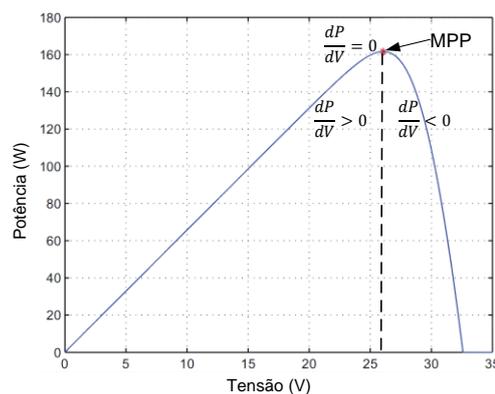


Figura 2.14 – Curva de potência típica de um painel solar (adaptada de [26]).

A partir da Figura 2.14 pode-se estabelecer as seguintes condições:

$$\frac{dP}{dV} = 0; \quad \text{No ponto de máxima potência}$$

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dV} > 0; & \quad \text{À esquerda do ponto de máxima potência} \\ \frac{dP}{dV} < 0; & \quad \text{À direita do ponto de máxima potência} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Logo, facilmente se percebe que o ponto de máxima potência de um painel fotovoltaico com o controlo baseado no método de Condutância Incremental é determinado pela equação (2.6) [23]:

$$\frac{dP}{dV} = 0; \quad (2.6)$$

Rearranjando (2.6) obtém-se a equação (2.7) [23][25]:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (2.7)$$

Desta forma, (2.5) pode ser reescrita dando origem a (2.8) [23][25]:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}; & \quad \text{No ponto de máxima potência} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}; & \quad \text{À esquerda do ponto de máxima potência} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}; & \quad \text{À direita do ponto de máxima potência} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Recorrendo a esta técnica o MPP é encontrado mediante a comparação da condutância instantânea (I/V) com a condutância incremental ($\Delta I/\Delta V$), como se pode verificar consultando o fluxograma apresentado na Figura 2.15 que descreve este algoritmo. A tensão de funcionamento do painel fotovoltaico é estabelecida pela variável de referência, V_{ref} . No momento em que é localizado o MPP, a tensão de referência é igualada ao valor de tensão que está na origem do MPP ($V_{ref} = V_{MPP}$). Uma vez encontrado o ponto de máxima potência, o painel passa a operar nessa posição até que se verifique uma mudança na corrente, indicando uma alteração nas condições atmosféricas e consequentemente do MPP do sistema. O valor de V_{ref} é incrementado ou decrementado para que seja possível estabelecer o novo MPP. O tamanho do incremento estabelece a rapidez com que o MPP é encontrado. Um valor de incremento

considerável permite estabelecer rapidamente o MPP, mas o sistema pode não operar exatamente nesse ponto, oscilando apenas em torno dele [23].

Comparativamente ao algoritmo de Perturbação e Observação, o de Condutância Incremental demonstra ser mais fiável quando ocorrem alterações rápidas nas condições climatéricas. Na medida em que consegue determinar de forma precisa em que sentido se deve atuar na variável de referência, para além do facto de teoricamente ser possível calcular se se atingiu exatamente o ponto de máxima potência. A nível prático, esta última particularidade nunca se corrobora devido a erros de leitura nas grandezas envolvidas, bem como, devido à precisão dos cálculos efetuados. Apesar das vantagens citadas anteriormente, esta técnica de controlo apresenta uma estrutura mais complexa e por isso é mais exigente para o microcontrolador utilizado na implementação, onde a capacidade e velocidade de processamento dos dados é fundamental [24].

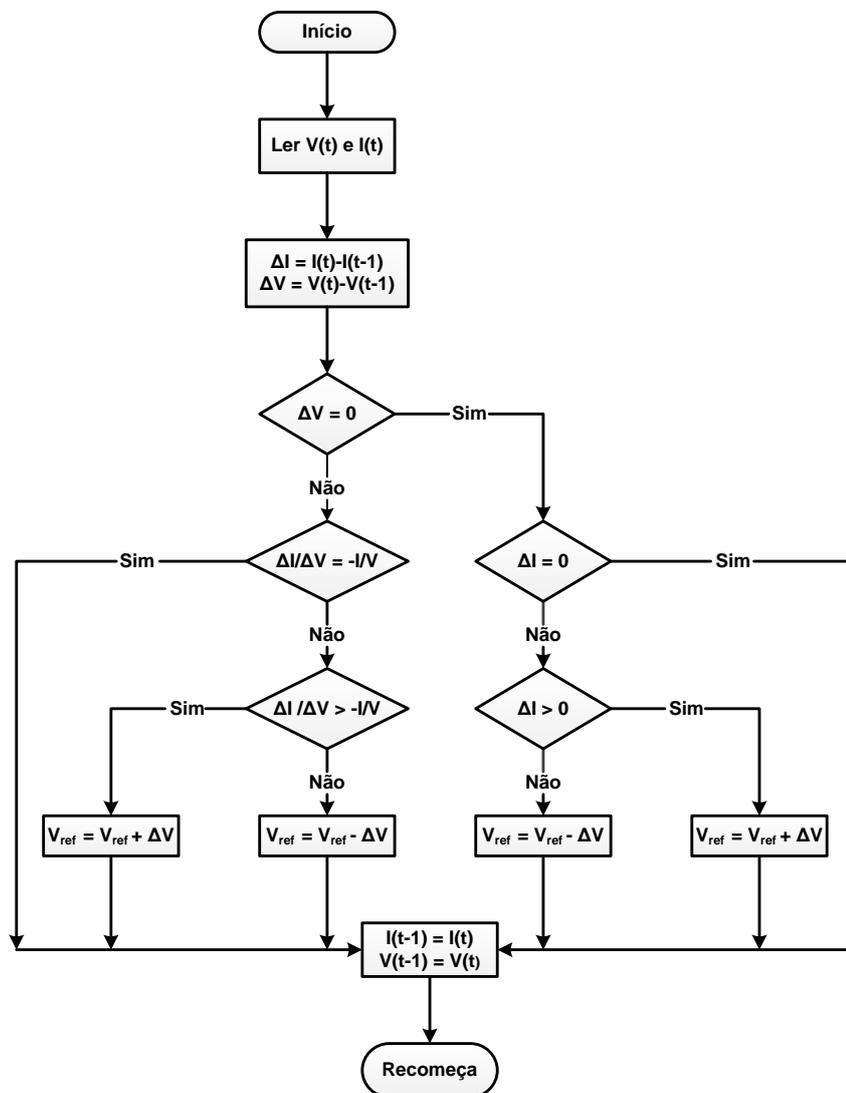


Figura 2.15 – Fluxograma da técnica de Condutância Incremental.

2.6. Conversor CC-CC *Boost*

Na sequência do que foi exposto na subsecção 2.4.4, na presente secção é efetuada uma explicação pormenorizada sobre o funcionamento do conversor de tensão *Boost*.

O conversor elevador de tensão trata-se de um circuito de eletrónica de potência do tipo CC-CC, que recebe na sua entrada uma tensão contínua com uma determinada amplitude, gerando na saída outra tensão contínua, mas de amplitude superior. No contexto dos sistemas solares fotovoltaicos o conversor *Boost* tem como função estabelecer o interface entre o painel solar e a carga. Permitindo ajustar o valor de tensão a fornecer e simultaneamente maximizando o rendimento do painel solar, fazendo com que este funcione sempre no seu ponto de máxima potência, para diferentes condições de operação através do algoritmo de controlo MPPT implementado. De seguida é descrito o princípio de funcionamento deste circuito.

2.6.1. Princípio de Funcionamento

O conversor de tensão *Boost* designado também por *Step-Up*, tal como o próprio nome indica, trata-se de um circuito de potência elevador de tensão. O valor de tensão obtido na sua saída é sempre igual ou superior à tensão de entrada. Na Figura 2.16 é apresentado o circuito elétrico deste tipo de conversor.

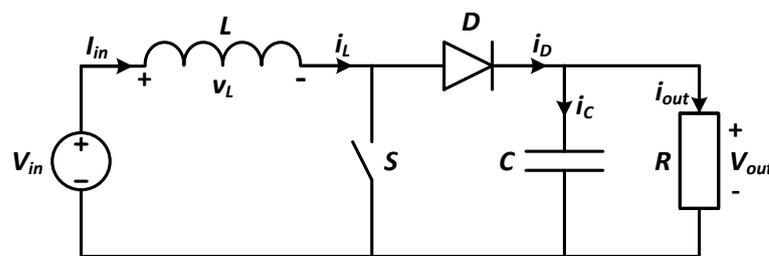


Figura 2.16 – Circuito elétrico do conversor *Boost*.

Visualizando a Figura 2.16 pode-se constatar que o circuito é constituído por quatro elementos fundamentais, designadamente, uma bobina, um semiconductor controlado que é representado por um interruptor ideal, um diodo e finalmente por um condensador. Por conseguinte, facilmente se percebe que o princípio de funcionamento do conversor, de uma forma genérica, baseia-se na abertura e no fecho do interruptor. Dependendo do seu estado, ligado ou desligado, a resposta apresentada pelo circuito é diferente.

Quando o interruptor entra em condução, Figura 2.17, o díodo fica inversamente polarizado impedindo a passagem de corrente. Dessa forma, a bobina encontra-se isolada do restante circuito ficando unicamente em paralelo com a fonte de entrada, o que proporciona um aumento da corrente na bobina e consequentemente armazenamento de energia na mesma.

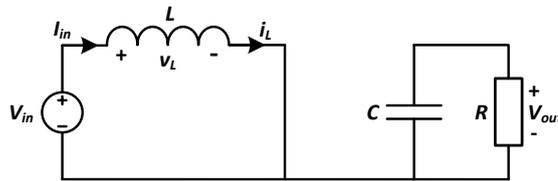


Figura 2.17 – Conversor *Boost* com o interruptor ligado.

Por outro lado, quando o interruptor está aberto, Figura 2.18, o díodo entra em condução estabelecendo o caminho que permite a transferência de energia da fonte de entrada, assim como da bobina, para o condensador de saída e para a carga.

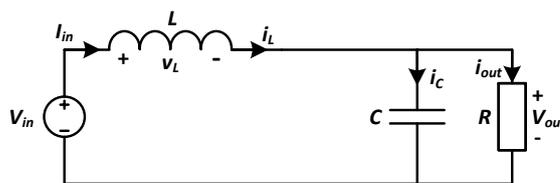


Figura 2.18 – Conversor *Boost* com o interruptor desligado.

O valor da corrente no elemento indutivo do circuito aquando da condução do díodo é de grande importância, visto que permite determinar o modo de operação do conversor. Se a corrente na bobina não for a zero quando o interruptor está ao corte, está-se perante o modo de condução contínua, caso contrário está-se a operar no modo de condução descontínua [27][28]. De seguida são descritos em detalhe os modos de operação característicos do funcionamento do conversor *Boost*.

2.6.2. Modo de Condução Contínua

A particularidade que permite identificar este modo de operação prende-se com o facto da corrente na bobina fluir de forma contínua, o que significa que em nenhum momento o seu valor é zero, ou seja, a bobina nunca se descarrega na totalidade.

Neste modo de funcionamento um período de comutação (T_s) é constituído por dois estados, equação (2.9), que correspondem ao tempo em que o interruptor

está em condução (t_{on}), juntamente com o tempo em que esse elemento está ao corte (t_{off}).

$$T_s = t_{on} + t_{off} \quad (2.9)$$

Na Figura 2.19 são apresentadas as principais formas de onda da tensão e da corrente, em regime permanente, para os estados que representam o modo de operação em análise.

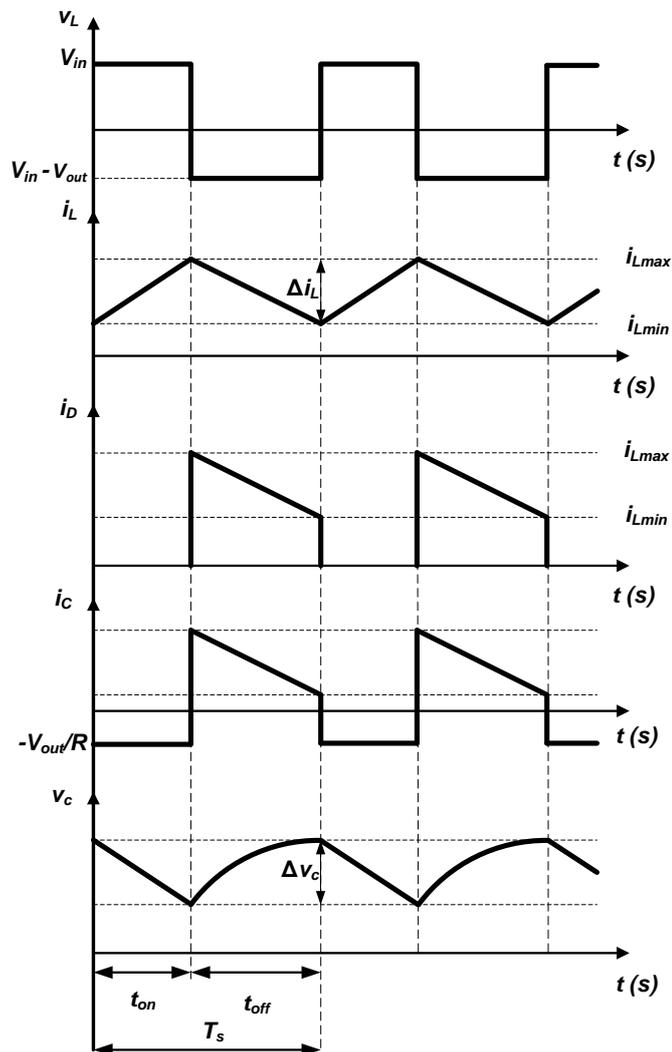


Figura 2.19 – Principais formas de onda do conversor *Boost* no modo de condução contínua.

Para o cálculo do valor da tensão de saída do conversor recorre-se à forma de onda da tensão na bobina. Sabendo que em regime permanente o integral da tensão no elemento indutivo durante um período deve ser zero [27], tem-se:

$$\int_0^{T_s} v_L dt = \int_0^{t_{on}} v_L dt + \int_0^{t_{off}} v_L dt = 0 \quad (2.10)$$

Rearranjando a equação anterior tendo em conta o valor da tensão na bobina durante t_{on} e t_{off} obtém-se:

$$\int_0^{t_{on}} V_{in} dt + \int_0^{t_{off}} (V_{in} - V_{out}) dt = 0 \quad (2.11)$$

Os tempos que determinam a duração dos estados de funcionamento do conversor estão diretamente ligados com o valor do *duty-cycle*, que por sua vez tem repercussões no valor da tensão de saída. A equação (2.12) [27] relaciona o valor do *duty-cycle* com a duração dos estados a *on* e a *off*:

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (2.12)$$

Usando a expressão (2.12) juntamente com a equação (2.9) é possível obter a duração dos tempos a *on* e a *off*, relativamente ao valor do *duty-cycle*:

$$t_{on} = T_s D \quad (2.13)$$

$$t_{off} = T_s (1 - D) \quad (2.14)$$

Portanto, reescrevendo a equação (2.11) consegue-se:

$$\int_0^{T_s D} V_{in} dt + \int_0^{T_s (1-D)} (V_{in} - V_{out}) dt = 0 \quad (2.15)$$

Resolvendo o integral anterior obtém-se:

$$(V_{in} T_s D) + ((V_{in} - V_{out})(T_s - T_s D)) = 0 \quad (2.16)$$

Simplificando a equação anterior é alcançado o resultado:

$$V_{in} - V_{out}(1 - D) = 0 \quad (2.17)$$

Recorrendo à equação (2.17) é possível estabelecer a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada do conversor *Boost*, no modo de condução contínua:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{(1 - D)} \quad (2.18)$$

Analisando o conversor numa perspetiva ideal, assumindo que não ocorrem perdas, pode-se considerar que a potência disponibilizada na entrada do circuito vai ser transferida totalmente para a sua saída. Sendo assim, tem-se:

$$P_{in} = P_{out} \Leftrightarrow V_{in} I_{in} = V_{out} I_{out} \quad (2.19)$$

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad (2.20)$$

Combinando a equação anterior com a equação (2.18) estabelece-se a relação entre a corrente de saída (I_{out}) e a corrente de entrada (I_{in}) do conversor:

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = (1 - D) \quad (2.21)$$

Sabendo que a corrente na bobina é igual à corrente da fonte de entrada ($i_L = I_{in}$) e que a corrente de saída pode ser expressa através da equação:

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R} \quad (2.22)$$

É possível recorrendo às equações (2.21) e (2.22) obter a expressão (2.23) que permite determinar o valor médio da corrente na bobina:

$$i_L = \frac{V_{out}}{(1 - D)R} \quad (2.23)$$

Após esta análise preliminar do funcionamento do circuito de potência, estão reunidas todas as condições necessárias para se definir as equações que permitem

calcular o valor da bobina e do condensador para o conversor *Boost*. Sabendo que a tensão na bobina pode ser expressa da seguinte forma:

$$v_L(t) = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.24)$$

Reescrevendo a equação (2.24) em ordem à derivada de i_L obtém-se:

$$\Delta i_L = \frac{1}{L} \int_0^{t_{on}} v_L dt \Leftrightarrow \frac{1}{L} \int_0^{DT_s} V_{in} dt \quad (2.25)$$

Resolvendo o integral da equação anterior em ordem a L tem-se:

$$L = \frac{V_{in}}{\Delta i_L} DT_s \Leftrightarrow L = \frac{V_{in} D}{\Delta i_L f_s} \quad (2.26)$$

As equações estabelecidas até agora foram deduzidas pressupondo que o condensador de saída apresenta uma capacidade infinita, o que se traduz numa tensão de saída constante. No entanto, na prática, tendo o filtro de saída do conversor uma capacidade fixa verifica-se uma flutuação da tensão de saída, também designada por *ripple* [28]. O valor pico-a-pico da tensão de saída pode ser calculado a partir da forma de onda da corrente do condensador visível na Figura 2.19.

Considerando que a corrente no condensador é dada por:

$$i_c(t) = C \frac{dv_c}{dt} \quad (2.27)$$

Escrevendo a equação anterior em ordem a v_c consegue-se:

$$\Delta v_c = \frac{1}{C} \int_0^{t_{on}} i_c dt \quad (2.28)$$

Visto que durante a condução do interruptor a corrente no condensador pode ser expressa da seguinte forma:

$$i_c = \frac{V_{out}}{R} \quad (2.29)$$

E tendo em conta a equação de i_c para t_{on} a equação (2.28) pode ser reescrita:

$$\Delta v_c = \frac{1}{C} \int_0^{DT_s} \frac{V_{out}}{R} dt \quad (2.30)$$

Do cálculo do integral anterior resulta a equação (2.31):

$$\Delta v_c = \frac{DT_s}{C} \frac{V_{out}}{R} \quad (2.31)$$

Finalmente, organizando a equação anterior em ordem a C é possível determinar a capacidade do condensador de saída, de acordo com o valor de *ripple* pretendido ($\Delta v_c = \Delta V_{out}$):

$$C \geq \frac{DT_s}{\Delta V_{out}} \frac{V_{out}}{R} \Leftrightarrow C \geq \frac{D}{\Delta V_{out} f_s} \frac{V_{out}}{R} \quad (2.32)$$

2.6.3. Limite entre o Modo de Condução Contínua e Condução Descontínua

O limite que define a barreira responsável pela distinção entre o modo de condução contínua e descontínua é atingido quando a corrente no elemento indutivo do conversor (i_L) vai a zero no final do tempo em que o interruptor está ao corte (t_{off}). Na Figura 2.20 estão ilustradas a tensão e a corrente na bobina, no momento em que se está perante esse limite.

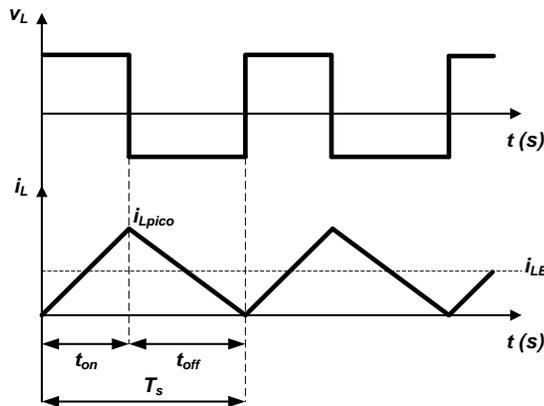


Figura 2.20 – Formas de onda da tensão e da corrente no limite da condução contínua

O valor médio da corrente na bobina neste limite é dado pela equação (2.33) [27]:

$$i_{LB} = \frac{1}{2} i_{Lpico} \quad (2.33)$$

Tendo em atenção que para a situação em estudo $\Delta i_L = i_{Lmax}$. Considerando a equação (2.25) i_{LB} pode ser reescrito do seguinte modo:

$$i_{LB} = \frac{1}{2L} \int_0^{t_{on}} V_{in} dt \quad (2.34)$$

Resolvendo o integral consegue-se:

$$i_{LB} = \frac{1}{2} \frac{V_{in}}{L} t_{on} \quad (2.35)$$

Combinando a equação anterior com a equação (2.18) obtém-se:

$$i_{LB} = \frac{T_s V_{out}}{2L} D(1 - D) \quad (2.36)$$

Dado que num conversor *Boost* a corrente da bobina e a corrente de entrada são a mesma ($I_{in} = i_L$), usando a equação anterior juntamente com a equação (2.21), o valor médio da corrente de saída no limite da condução contínua pode ser expresso pela equação (2.37) [27]:

$$I_{outB} = \frac{T_s V_{out}}{2L} D(1 - D)^2 \quad (2.37)$$

Considerando que:

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R} \quad (2.38)$$

$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (2.39)$$

Reorganizando a equação (2.37) em ordem a L é possível obter o valor mínimo da indutância da bobina [28] que permite que o conversor funcione no limite da condução contínua:

$$L_{min} = \frac{D(1 - D)^2 R}{2f_s} \quad (2.40)$$

Posto isto, se se pretende operar no modo de condução contínua, o valor de L tem de ser maior que o valor calculado através da equação anterior.

2.6.4. Modo de Condução Descontínua

O modo de condução descontínua caracteriza-se pelo facto da corrente da bobina atingir um valor nulo instantes antes do final de um período de comutação. Na Figura 2.21 encontram-se ilustradas as principais formas de onda que representam o modo de funcionamento em análise, sendo possível identificar três estados de operação distintos.

Inicialmente, quando o interruptor está em condução verifica-se um aumento da corrente na bobina, provocando armazenamento de energia na mesma. Por sua vez, no segundo estado de funcionamento, quando o interruptor se encontra ao corte a energia armazenada anteriormente pelo elemento indutivo começa a ser transferida para a saída. Assim, ocorre a descida da corrente até ao momento em que atinge um valor nulo, sendo impedida pelo diódo de se tornar negativa. Por fim, no terceiro e último estado, com o interruptor aberto e o diódo inversamente polarizado a corrente na bobina permanece em zero até que se inicie um novo ciclo de funcionamento [28].

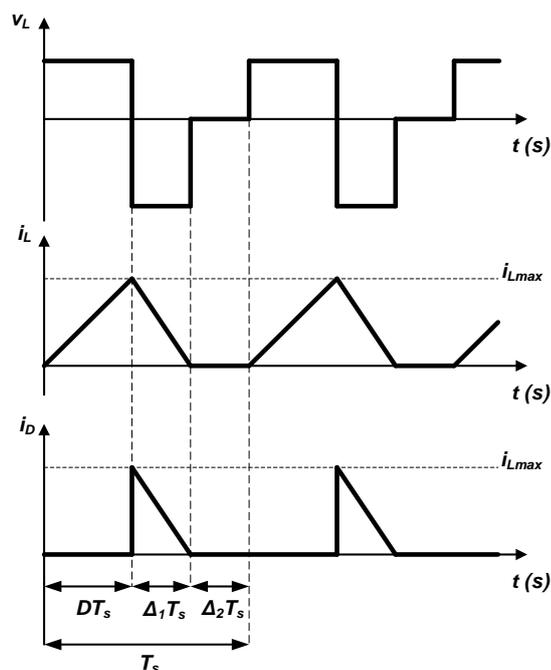


Figura 2.21 – Formas de onda típicas do modo de condução descontínuo.

Neste modo de operação a equação que permite relacionar a tensão de saída com a tensão disponibilizada na entrada do conversor é diferente da utilizada para o modo de condução contínua. Porém, o procedimento para a obtenção dessa equação é semelhante, uma vez que também para este caso se considera que o integral da tensão na bobina durante um período é zero [27][28]. Assim sendo, pela observação da Figura 2.21 tem-se:

$$V_{in}DT_s + (V_{in} - V_{out})\Delta_1T_s = 0 \quad (2.41)$$

Reescrevendo a equação anterior estabelece-se a relação entre V_{out} e V_{in} :

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{(\Delta_1 + D)}{\Delta_1} \quad (2.42)$$

Desprezando as perdas, ou seja, admitindo que a potência fornecida pela fonte de entrada é a mesma que a carga absorve, é possível estabelecer a relação entre a corrente de entrada e a corrente de saída através da equação (2.43):

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + D} \quad (2.43)$$

De acordo com a Figura 2.21 o valor médio da corrente de entrada, que é igual à corrente da bobina, pode ser expresso segundo a equação (2.44) [27]:

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{2L}DT_s(D + \Delta_1) \quad (2.44)$$

Escrevendo a equação (2.43) em ordem a I_{out} tendo em conta I_{in} definido em (2.44) obtém-se:

$$I_{out} = \left(\frac{T_s V_{in}}{2L} \right) D \Delta_1 \quad (2.45)$$

2.6.5. Técnica de Controlo do Conversor CC-CC *Boost*

Os conversores do tipo CC-CC permitem manter o valor médio da tensão de saída constante, apesar da existência de flutuações na tensão de entrada ou na carga. Uma das técnicas utilizadas para controlar a tensão de saída denomina-se modelação por largura de impulso, vulgarmente chamada PWM (*Pulse With Modulation*). O princípio de funcionamento desta técnica é bastante simples, uma vez que opera a uma frequência fixa o período de comutação é constante. Sendo assim, controlando a duração do tempo em que o interruptor está em condução é possível controlar o valor médio da tensão de saída [27].

A implementação desta técnica consiste na comparação de um sinal de controlo, determinado previamente por um controlador (tipicamente PI), com uma onda em forma de dente-de-serra designada onda portadora. Esta onda é gerada ininterruptamente, apresentando uma amplitude e frequência constantes. A frequência da onda portadora define a frequência de comutação do conversor. Da comparação do sinal de controlo com a onda portadora resulta o sinal que especifica os tempos em que o interruptor deve estar ligado e desligado de forma a manter a tensão de saída constante [27].

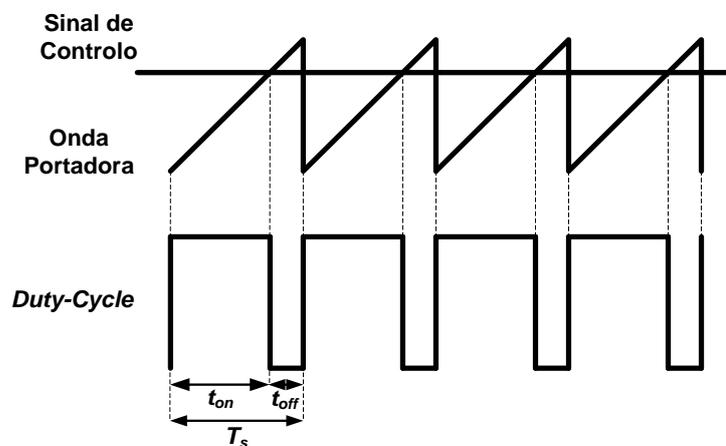


Figura 2.22 – Técnica de comutação por largura de impulso (PWM).

2.7. Conclusões

O propósito deste capítulo, em primeiro lugar, passou pela descrição dos sistemas solares fotovoltaicos, sendo efetuada a distinção que os permite classificar como: ligados à rede elétrica ou autónomos. Foi apresentado o efeito fotovoltaico que se trata do fenómeno através do qual a célula solar é capaz de converter a energia proveniente do sol em energia elétrica. As principais células fotovoltaicas existentes no mercado

foram identificadas e classificadas tendo-se verificado que apesar de serem as mais antigas, as células de silício monocristalino são as utilizadas em maior escala e as que oferecem o melhor rendimento. Da agregação de várias células formam-se os painéis solares fotovoltaicos, tendo sido analisadas as suas características elétricas predominantes e reveladas as principais causas responsáveis pela diminuição da produção de energia nesses elementos, nomeadamente, flutuações na radiação e na temperatura.

Numa segunda fase foi abordado um problema específico comum nas instalações fotovoltaicas em que os painéis se encontram conectados em série, designado efeito sombra. As consequências deste fenómeno evidenciam-se na diminuição substancial da potência total disponibilizada pela instalação. De forma a ultrapassar esta contrariedade foi identificada com base na pesquisa bibliográfica efetuada, uma topologia denominada *Module Integrated Converter* (MIC) que consiste na implementação de um conversor eletrónico de potência dedicado para cada painel solar. Com esta técnica o rendimento das instalações solares pode ser melhorado, na medida em que deste modo a produção de energia é individualizada e independente nos diferentes painéis fotovoltaicos constituintes da instalação.

Numa terceira fase foram referidos os algoritmos de controlo MPPT de Perturbação e Observação e de Condutância Incremental, onde se constatou que a primeira técnica é de fácil implementação e requer poucos recursos, porém é falível quando ocorrem alterações rápidas nas condições atmosféricas. Por outro lado, a técnica de Condutância Incremental apresenta uma estrutura mais complexa e exige mais recursos, contudo demonstrou ser mais fiável e eficiente.

Por fim, foi efetuada uma descrição detalhada do conversor elevador de tensão *Boost*, por ser este o circuito de potência que melhor se adequa à configuração MIC para a minimização dos efeitos do fenómeno de sombra.

Em suma, após a identificação do problema os capítulos posteriores centram-se na validação ao nível de simulação do conceito MIC e na implementação prática de um protótipo completamente funcional, capaz de mitigar os problemas associados ao efeito sombra.

CAPÍTULO 3

Dimensionamentos e Simulações Computacionais

3.1. Introdução

O corrente capítulo relata o dimensionamento teórico efetuado para o conversor elevador de tensão *Boost* e o processo de simulação que permitiu comprovar e ajustar o conceito apresentado no Capítulo 2, para minimizar os problemas relacionados com o efeito sombra.

As ferramentas de simulação computacional são uma mais-valia na área da eletrónica de potência, porque permitem analisar o comportamento dos vários elementos de um circuito elétrico em diferentes condições de operação. Possibilitam ajustes no dimensionamento teórico preliminar do sistema a implementar e dão uma melhor perceção das condições nominais de funcionamento, o que é importante no momento da escolha dos diversos componentes. Por isso, é fundamental que o modelo de simulação se aproxime o mais possível da realidade, para que a transição para a etapa de implementação ocorra sem alterações significativas.

Assim, tendo em atenção as considerações anteriores, o *software* de simulação computacional que melhor se adapta às necessidades desta Dissertação é o PSIM da empresa *Powersim Inc.* A escolha recaiu sobre este programa porque apresenta uma vertente de energias renováveis que permite replicar de forma precisa a performance de um determinado painel fotovoltaico, de acordo com as suas características elétricas. Além de possibilitar a implementação de código em linguagem de programação *C*, que numa fase subsequente pode ser exportado quase integralmente para um microcontrolador.

3.2. Dimensionamentos

Nesta secção é demonstrado o dimensionamento prévio dos diferentes elementos constituintes do sistema. Para tal, em primeiro lugar são descritas as características do painel fotovoltaico que vai ser utilizado na fase experimental e mediante as mesmas,

numa secção posterior, recorrendo a uma funcionalidade do PSIM é caracterizado o seu comportamento o mais fielmente possível. Em seguida, ainda nesta secção, são definidas as especificações de funcionamento do conversor elevador de tensão e através das equações da secção 2.6.2 é calculado o valor de indutância e de capacidade, da bobina e do condensador, respetivamente. Para o diodo e o MOSFET não são efetuados cálculos, visto que ao nível desta simulação esses elementos são considerados ideais. Porém, com o auxílio do modelo de simulação foi possível verificar quais são os seus valores nominais de operação.

3.2.1. Painel Solar Fotovoltaico

O Grupo de Eletrónica de Potência e Energia (GEPE) da Universidade do Minho, onde a presente Dissertação foi realizada, tem ao seu dispor um conjunto de 8 painéis fotovoltaicos do fabricante BP Solar com a referência BP2150S. Por este motivo foram esses os painéis solares considerados durante a simulação do sistema a implementar.

Estes painéis solares, de acordo com o fabricante, podem ser utilizados tanto em instalações fotovoltaicas ligadas à rede, como em sistemas autónomos. Apresentam uma estrutura robusta e facilidade na montagem da instalação. São constituídos por 72 células de silício monocristalino conectadas em série, o que perfaz uma potência nominal máxima de 150 W [29]. Na Tabela 3.1 encontram-se as principais características deste painel, e que serviram de base para replicar o seu comportamento.

Tabela 3.1 – Características do painel solar BP2150S [29].

Caraterísticas do Painel Solar BP2150S da Empresa BP Solar	
Potência Máxima (P_{MAX})	150 W
Tensão no Ponto de Máxima Potência (V_{MPP})	34 V
Corrente no Ponto de Máxima Potência (I_{MPP})	4,45 A
Potência Máxima Mínima Garantida	140 W
Corrente de Curto-Circuito (I_{SC})	4,75 A
Tensão de Circuito Aberto (V_{OC})	42,8 V
Coefficiente de Temperatura (I_{SC})	(0,065±0,015)%/°C
Coefficiente de Temperatura (V_{OC})	-(160±20) mV/°C
Coefficiente de Temperatura da Potência	-(0,5±0,05)%/°C
NOCT (<i>Nominal Operating Cell Temperature</i>)	47±2 °C

3.2.2. Conversor CC-CC *Boost*

De acordo com a topologia descrita no Capítulo 2, o conversor de tensão CC-CC *Boost* é responsável por maximizar a extração de potência do painel solar a que está associado, através de um algoritmo MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) que tem incorporado, para além do facto de disponibilizar na sua saída um valor de tensão controlado, superior ao da entrada.

Durante a fase de dimensionamento do conversor é importante estabelecer os seus valores nominais de operação. Assim, para o circuito elevador de tensão foram definidas as seguintes especificações:

- Potência nominal de funcionamento de 150 W;
- Tensão nominal de entrada de 34 V;
- Corrente nominal de entrada de 4,45 A;
- Tensão nominal de saída de 70 V;
- *Ripple* da corrente na ordem dos 10%;
- *Ripple* da tensão de saída na ordem dos 5%;
- Frequência de comutação de 31,25 kHz.

Os três primeiros pontos correspondem aos valores nominais de funcionamento do painel fotovoltaico, quando este opera à potência nominal máxima (para condições STC – *Standard Test Conditions*). Tendo em atenção as condições impostas anteriormente e recorrendo às equações da secção 2.6.2 para o modo de condução contínua é possível obter:

Valor de *Duty-Cycle*:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{(1-D)} \Leftrightarrow \frac{70}{34} = \frac{1}{(1-D)} \Leftrightarrow D = 0,514 \Leftrightarrow D(\%) = 51,4$$

Valor de Indutância da Bobina:

$$\Delta i_L = 0,10 I_{in} = 0,445 \text{ A}$$

$$L = \frac{V_{in} D}{\Delta i_L f_s} \Leftrightarrow L = \frac{34 \cdot 0,514}{0,445 \cdot 31250} \Leftrightarrow L = 1,26 \text{ mH}$$

Valor de Capacidade do Condensador de Saída:

$$\Delta V_{out} = 0,05V_{out} = 3,5 \text{ V}$$

$$C \geq \frac{D}{\Delta V_{out} f_s} \frac{V_{out}}{R} \Leftrightarrow C \geq \frac{D}{\Delta V_{out} f_s} I_{out} \Leftrightarrow C \geq \frac{D}{\Delta V_{out} f_s} \frac{P_{out}}{V_{out}}$$

$$C \geq \frac{0,514}{3,5 * 31250} \frac{150}{70} \Leftrightarrow C \geq 10 \mu\text{F}$$

Uma vez determinado o valor dos componentes constituintes do conversor de potência, estão reunidas todas as condições necessárias para se proceder à elaboração do modelo de simulação.

3.3. Simulações Computacionais

Para validar a configuração que permite maximizar a eficiência energética de uma instalação solar fotovoltaica sujeita a diferentes condições de radiação, foi implementado um modelo de simulação constituído por quatro painéis fotovoltaicos conectados em série, através dos respetivos conversores elevadores de tensão *Boost*.

Este modelo foi projetado de forma gradual. Em primeiro lugar modelou-se o comportamento do painel fotovoltaico BP2150S, criando um modelo equivalente com recurso à ferramenta de simulação PSIM. Concluído o modelo equivalente efetuou-se a ligação entre o painel solar e o conversor de potência *Boost*, tendo-se verificado a sua capacidade de elevar a tensão de saída, dentro das especificações propostas (*ripple* de corrente e de tensão). Finalizada esta etapa foi implementado o algoritmo de controlo MPPT de Condutância Incremental, com o objetivo de extrair a potência máxima do painel solar para diferentes valores de radiação.

Posto isto, terminou-se o modelo de simulação com a introdução de mais três painéis fotovoltaicos com os seus conversores de potência associados ligados em série. Sendo efetuados vários testes que comprovam a eficácia da topologia apresentada no Capítulo 2, designada por *Module Integrated Converter* (MIC).

Optou-se por apenas mostrar o resultado final do modelo de simulação e não passo a passo, de forma a não aborrecer o leitor com demasiados detalhes, uma vez que é possível apresentar todos os resultados de simulação relevantes através do modelo

final. De referir ainda, que os restantes circuitos intermédios como o *drive* de acionamento do MOSFET, ou os circuitos de alimentação que vão ser usados na fase experimental, apenas são mencionados na parte da implementação do *hardware* porque ao nível da simulação o seu comportamento pode ser assumido como ideal.

3.3.1. Sistema Implementado em Simulação

Na Figura 3.1 é apresentado o modelo de simulação implementado em PSIM. Pela imagem percebe-se que o sistema é composto por quatro painéis fotovoltaicos dispostos em série através da saída dos seus conversores CC-CC *Boost* dedicados. Cada conversor é controlado de forma independente pelo respetivo “bloco C”. Cada “bloco C” apresenta três entradas, correspondendo as duas primeiras aos valores de tensão e de corrente do painel a que está associado e a terceira ao valor de tensão de saída do respetivo conversor. Dentro do “bloco C” é executado o algoritmo MPPT, bem como, o controlo necessário para manter a tensão de saída regulada.

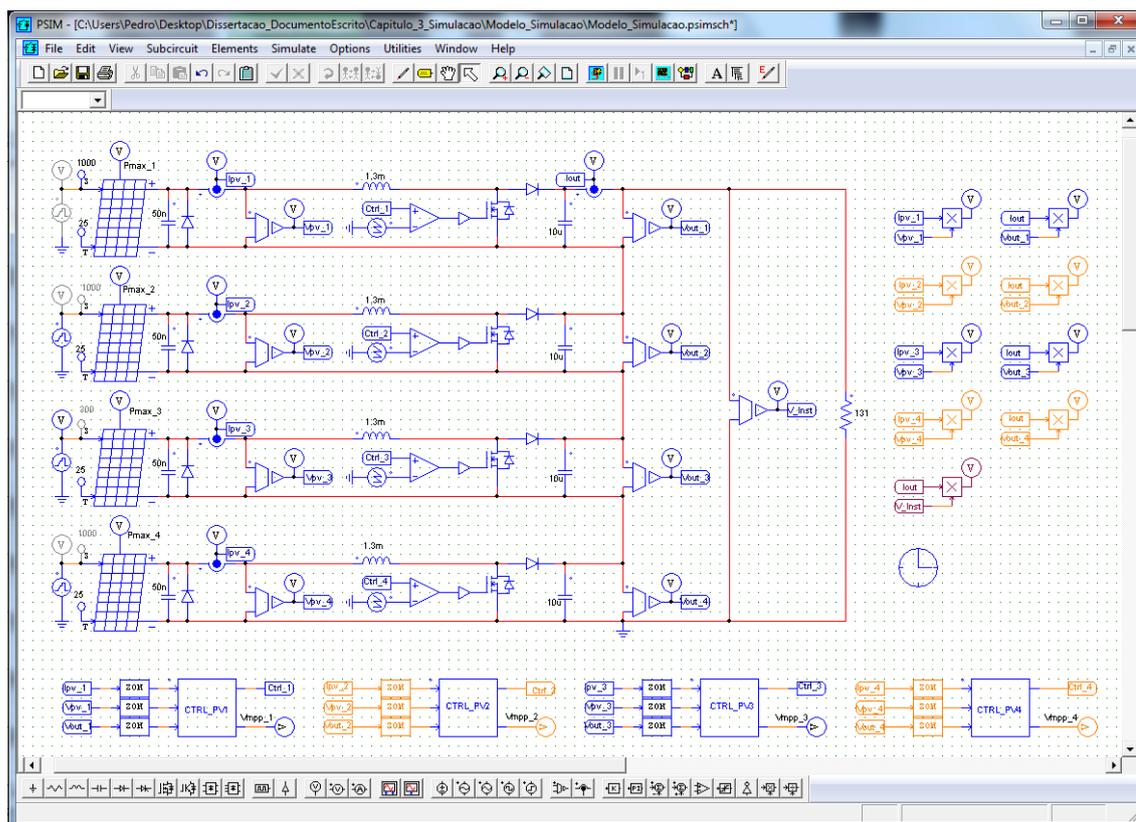


Figura 3.1 – Vista geral do modelo de simulação implementado em PSIM.

De seguida é descrito em detalhe como foi emulado o comportamento do painel solar e é explicada a estratégia de controlo aplicada de forma singular a cada conversor CC-CC *Boost*.

3.3.2. Painel Solar Fotovoltaico

Tal como foi referido anteriormente, o painel fotovoltaico que vai ser utilizado na fase experimental do projeto é o BP2150S. De modo a tornar o modelo de simulação o mais próximo possível da realidade é de extrema importância conseguir emular de forma rigorosa o seu comportamento. Para isso, foi utilizada uma funcionalidade que integra a componente de energias renováveis da ferramenta computacional de simulação PSIM, denominada “*Solar Module (physical model)*”, Figura 3.2. Com esta funcionalidade é possível criar o modelo equivalente de qualquer painel solar através da introdução das características elétricas que estão presentes no manual do fabricante. Após a introdução desses parâmetros é criada uma representação gráfica das curvas I-V e P-V, onde é possível verificar se o ponto de máxima potência é o mesmo que o do painel real. Caso seja necessário o utilizador tem liberdade para alterar alguns dos parâmetros até conseguir obter a melhor caracterização possível do painel que pretende simular.

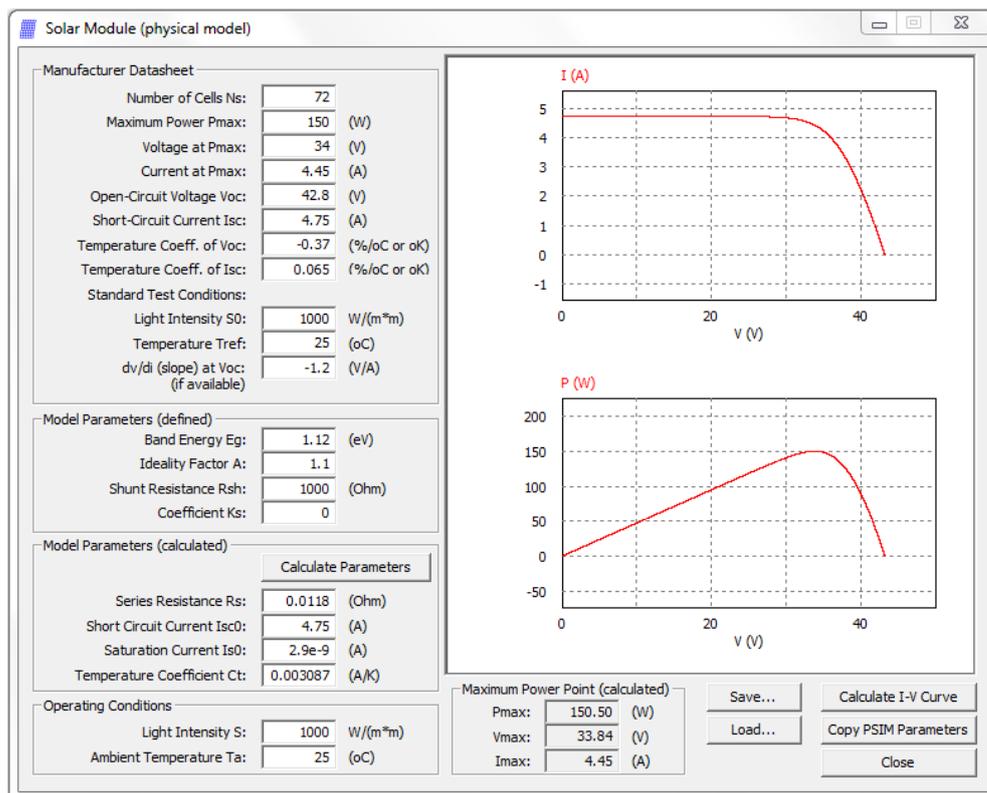


Figura 3.2 – Ambiente gráfico da funcionalidade “*Solar Module (physical model)*” do PSIM.

A Figura 3.2 ilustra o ambiente gráfico desta funcionalidade com os parâmetros específicos para o painel BP2150S, sendo possível constatar que a potência máxima de funcionamento, assim como, os valores da corrente e da tensão para esse ponto são bastante próximos dos indicados na Tabela 3.1.

Depois de concluído o modelo equivalente do painel, o mesmo é exportado para o ambiente de simulação segundo a representação indicada na Figura 3.3. Este modelo é bastante completo na medida em que permite ao utilizador testar o comportamento do painel para diferentes valores de radiação e de temperatura, pela alteração dos parâmetros S e T , respetivamente. Adicionalmente, o modelo consegue ainda indicar o valor teórico de potência máxima que é possível extrair para as condições de radiação e de temperatura estabelecidas. Deste modo, consegue-se replicar de forma concreta as condições ambientais a que estas estruturas estão sujeitas, sendo possível analisar o seu comportamento para diferentes situações.

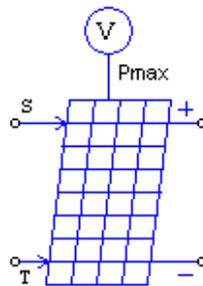


Figura 3.3 – Representação do painel fotovoltaico em ambiente de simulação.

3.3.3. Controlo do Conversor CC-CC *Boost*

O controlo de cada painel solar é feito individualmente e de forma independente dos restantes elementos da instalação, por intermédio do conversor de potência que lhe está associado. Sabendo que a potência disponibilizada varia de acordo com as alterações das condições ambientais, torna-se necessária a implementação de um algoritmo de controlo MPPT capaz de acompanhar de forma dinâmica as variações da curva de potência do painel solar. A técnica de controlo MPPT utilizada em simulação foi a de Condutância Incremental por apresentar uma maior fiabilidade e eficácia. Para além da extração da potência máxima também é importante manter a tensão de saída do conversor regulada, tendo sido utilizado para esse fim um controlador do tipo Proporcional-Integral (PI). Assim, quando ocorre um aumento ou uma diminuição no valor da corrente total de saída do sistema, a potência de cada conversor é mantida constante através da regulação do valor da tensão de saída.

O algoritmo MPPT e o controlador PI foram implementados usando a linguagem de programação C através do “bloco C ” disponibilizado pelo PSIM. Este facto é uma vantagem assinalável, porque deste modo a transição do modelo de simulação para a implementação prática é mais simples, na medida em que o código desenvolvido para o

“bloco C” pode ser transposto praticamente de forma integral para o microcontrolador.

O “bloco C” representativo do controlo do conversor de potência em ambiente de simulação pode ser visto na Figura 3.4. Apresenta três entradas, correspondendo as duas primeiras às grandezas de medida do painel solar, nomeadamente, a corrente e a tensão, e a terceira entrada é referente ao valor da tensão de saída do conversor CC-CC *Boost*. A saída representa o sinal de comando a ser usado para a geração dos impulsos a aplicar à *gate* do MOSFET. De salientar, que o bloco com a designação ZOH funciona como um *sample and hold* fazendo com que o código do “bloco C” seja executado com uma frequência específica.

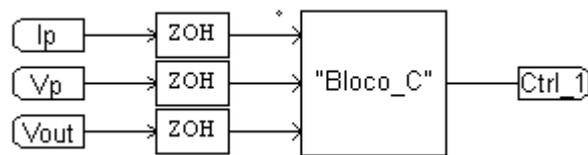


Figura 3.4 – “Bloco C” responsável pelo controlo do conversor CC-CC *Boost*.

Na Figura 3.5 é demonstrada a estrutura do controlo que é aplicado de forma individual a cada conversor de potência.

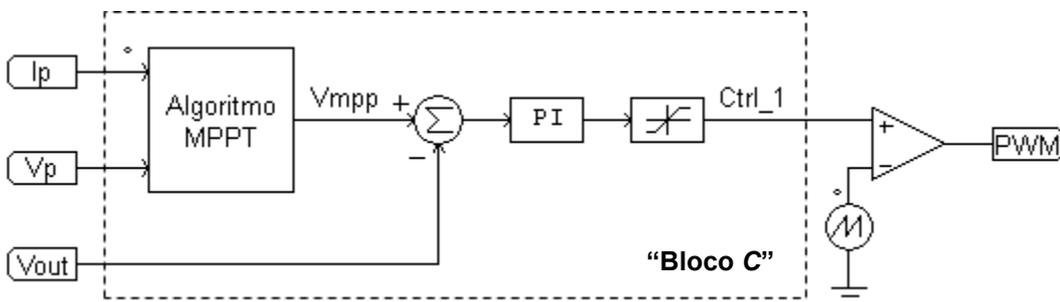


Figura 3.5 – Estratégia de controlo do conversor CC-CC *Boost*.

A tensão de referência do conversor *Boost* é determinada pelo algoritmo MPPT (V_{mpp}), tendo em atenção a potência máxima que o painel fotovoltaico é capaz de fornecer. Para que seja possível manter a tensão de saída do conversor regulada, de modo a que a carga não influencie as condições de operação do painel solar, à referência é subtraído o valor da tensão de saída do conversor, gerando-se um erro que é usado pelo controlador Proporcional-Integral, o qual é responsável pela determinação do sinal de comando. Desta forma, garante-se que a carga nunca solicita ao painel solar um valor de potência superior ao que o mesmo consegue disponibilizar, de acordo com as condições de radiação e de temperatura a que está submetido.

Antes de se efetuar a modelação por largura de impulso, o sinal proveniente do controlador passa por um limitador. Este passo é fundamental nos conversores CC-CC do tipo *Boost*, visto que para valores de *duty-cycle* a partir dos 70% a tensão de saída aumenta exponencialmente. Finalizada a etapa anterior, o sinal de saída do “bloco C” é comparado com uma onda em forma de dente-de-serra. Dessa comparação resulta o sinal de PWM com um determinado *duty-cycle*, cujo valor vai sendo alterado ao longo do tempo até se atingir a tensão de referência desejada.

3.4. Resultados de Simulação

Nesta secção são apresentados e analisados os resultados de simulação que possibilitam provar de forma inequívoca que a topologia *Module Integrated Converter* consegue minimizar os problemas inerentes ao efeito sombra numa instalação solar fotovoltaica. Para isso, os resultados de simulação são demonstrados de forma progressiva, começando pela confirmação do correto funcionamento do conversor de potência, passando para a validação da estratégia de controlo implementada e terminando com a exposição dos resultados que comprovam que o conceito de um conversor de potência por painel fotovoltaico é funcional e eficaz.

3.4.1. Validação do Funcionamento do Conversor CC-CC *Boost*

Após a implementação do modelo de simulação foram efetuados vários testes para comprovar o funcionamento das diferentes partes que constituem a topologia adotada. Em primeiro lugar procedeu-se à validação do funcionamento do conversor CC-CC *Boost* em função dos dimensionamentos efetuados, com o objetivo de examinar a sua capacidade de elevar a tensão de saída, de acordo com os valores de *ripple* especificados.

O painel fotovoltaico a que o conversor CC-CC está associado, funciona em condições ideais, ou seja, com uma radiação constante de 1000 W/m^2 e uma temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Nesta situação, para além de elevar a tensão o conversor é responsável por otimizar a potência extraída do painel. Desta forma, também foi estudado o comportamento do painel solar BP2150S, no sentido de averiguar se as suas condições nominais de funcionamento foram replicadas com rigor para o modelo de simulação. A Figura 3.6 mostra a evolução da corrente e da tensão, para um painel fotovoltaico com o conversor acoplado, até ao momento em que entram em regime permanente.

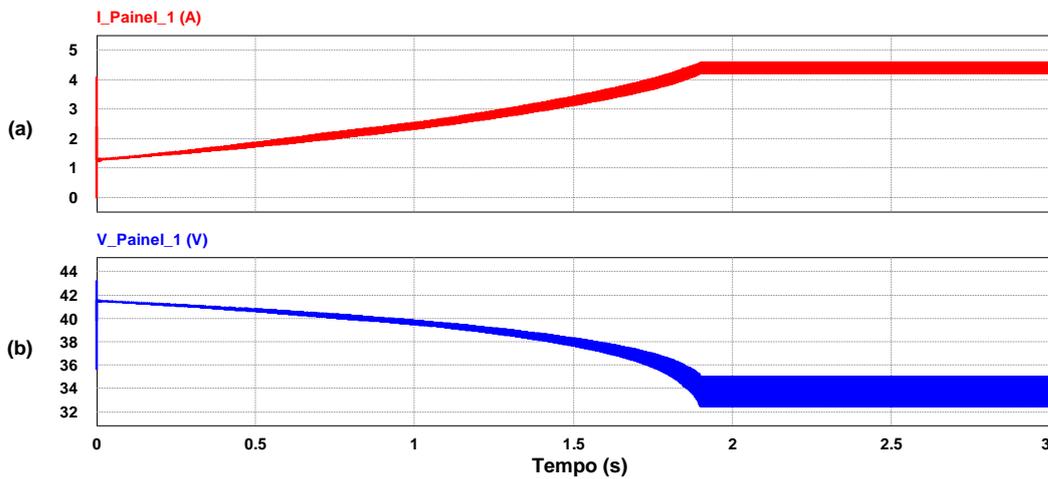


Figura 3.6 – Formas de onda do painel fotovoltaico com o conversor acoplado. (a) Corrente de saída do painel solar. (b) Tensão de saída do painel solar.

Pela observação da Figura 3.6 a conclusão primária óbvia é que o sistema exibe uma dinâmica lenta, visto que demora perto de 1,9 segundos a estabilizar. Assim que as formas de onda entram em regime permanente, é possível constatar que o valor médio da corrente é muito próximo de 4,45 A e que o valor médio da tensão é praticamente 34 V, correspondendo aos valores de corrente e de tensão de máxima potência indicados no *datasheet* do fabricante dos painéis. Do produto da tensão pela corrente resulta a potência do sistema, que se traduz graficamente pela Figura 3.7. A linha a azul indica a potência máxima teórica que o painel é capaz de conceder, enquanto que a forma de onda a vermelho exibe a evolução da potência ao longo do tempo, podendo-se observar que a potência teórica de 150 W é igualmente atingida ao fim de quase 1,9 segundos.

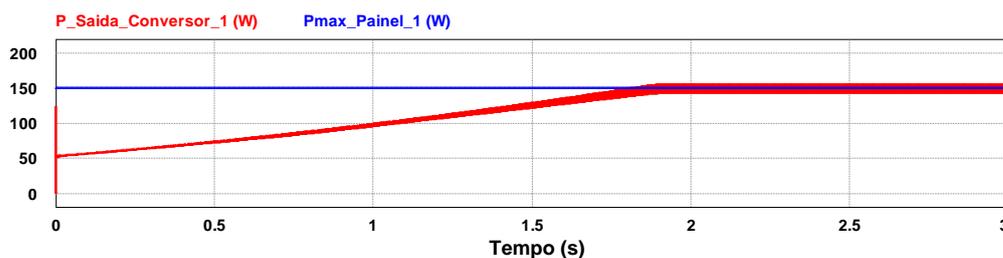
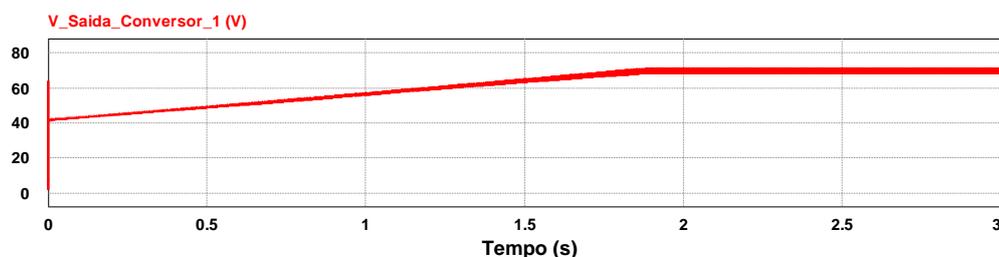
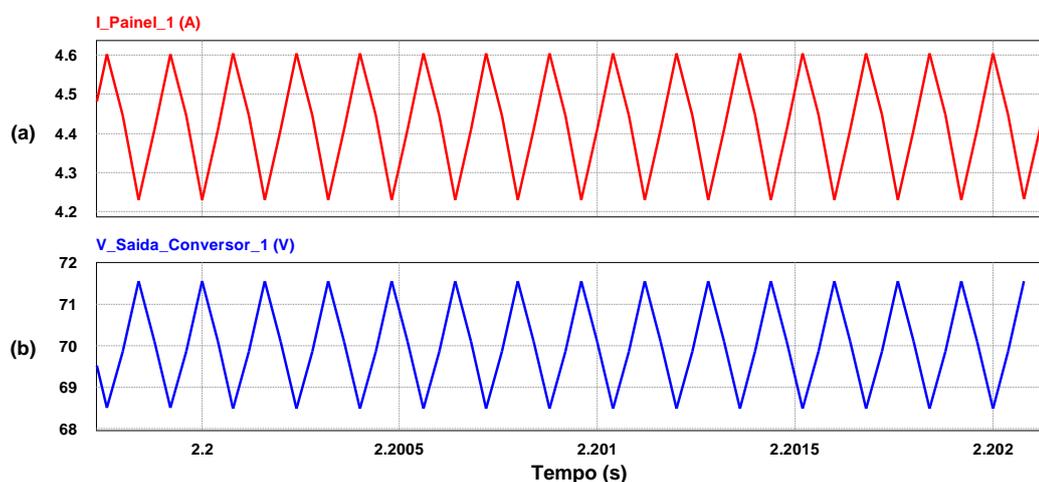


Figura 3.7 – Potência de saída do painel fotovoltaico.

Depois de analisado o comportamento do painel fotovoltaico, nas condições STC, verificou-se a competência do conversor *Boost* elevar a tensão do painel fotovoltaico a que está conectado. Para uma tensão de entrada na ordem dos 34 V a tensão de saída obtida foi de 70 V (valor médio), correspondendo a uma relação de transformação superior a dois, tal como se pode verificar pela Figura 3.8, o que confirma os cálculos efetuados anteriormente.


 Figura 3.8 – Tensão de saída do conversor *Boost*.

Para caracterizar em detalhe o desempenho do conversor *Boost*, na Figura 3.9 é possível visualizar em pormenor o valor do *ripple* de corrente e de tensão. Ao nível do *ripple* da corrente na bobina o valor alcançado é inferior aos 0,445 A estabelecidos, assim como, o valor do *ripple* da tensão de saída que se encontra na ordem dos 3,1 V, também esse valor menor que o estipulado na fase de dimensionamentos.


 Figura 3.9 – Pormenor da corrente e da tensão do conversor *Boost*. (a) *Ripple* da corrente. (b) *Ripple* da tensão de saída.

Posto isto, os primeiros resultados de simulação obtidos podem ser considerados satisfatórios, dado que o comportamento do painel fotovoltaico foi replicado conforme as características descritas pelo fabricante, e a performance do conversor CC-CC *Boost* foi consistente com os cálculos realizados.

3.4.2. Validação do Algoritmo de Controlo MPPT

Para validar o funcionamento do algoritmo de controlo MPPT de Condutância Incremental a estratégia utilizada consistiu na alteração do valor de radiação, uma vez que este é o parâmetro que tem um maior impacto negativo na produção de energia nos sistemas solares fotovoltaicos. A simulação efetuada baseou-se em inicialmente colocar todos os painéis solares sujeitos a uma radiação uniforme de 1000 W/m^2 , depois a partir

dos dois segundos foi introduzida uma queda no valor da radiação incidente até aos 500 W/m^2 , em dois segundos. Durante um segundo manteve-se esse valor constante e por fim voltou-se a aumentar a radiação solar para o valor inicial. A Figura 3.10 ilustra a evolução da radiação no domínio do tempo para este teste.

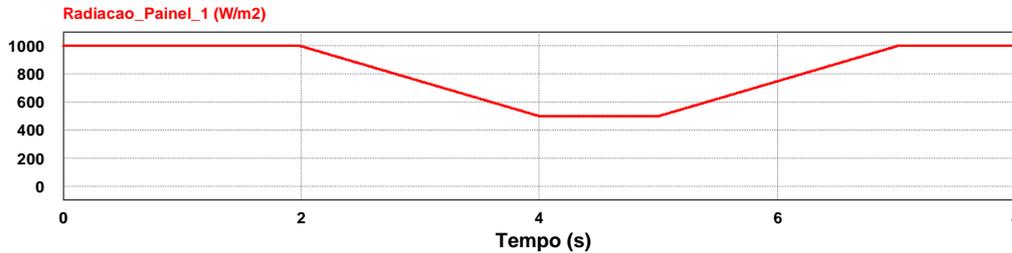


Figura 3.10 – Variação do valor da radiação solar incidente ao longo do tempo.

Com a alteração do valor de radiação a potência disponibilizada pelos painéis fotovoltaicos também se altera, assim a finalidade deste ensaio consiste em conferir se o algoritmo de controlo é capaz de determinar o ponto ótimo de operação dos painéis solares para diferentes condições de radiação. A Figura 3.11 demonstra a resposta do sistema a essas variações.

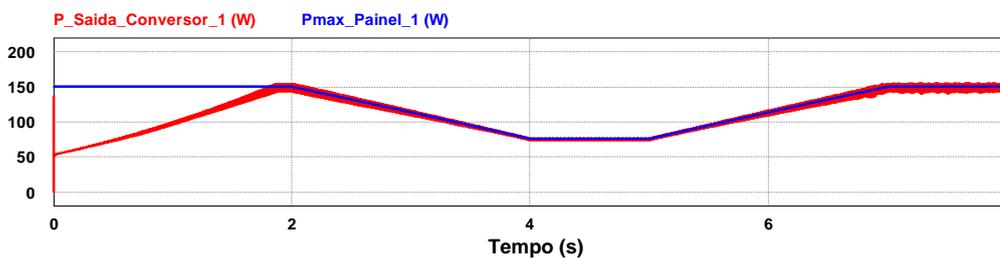


Figura 3.11 – Potência de saída do conversor para diferentes condições de radiação.

A linha a azul indica a potência máxima teórica que o painel é capaz de fornecer mediante as condições de radiação e de temperatura a que está submetido. De salientar, que para este ensaio apenas se alterou o valor de radiação, o valor de temperatura manteve-se constante nos $25 \text{ }^\circ\text{C}$. A linha a vermelho corresponde à potência extraída dos painéis fotovoltaicos pelo conversor *CC-CC Boost*. Da confrontação das duas formas de onda torna-se óbvio que o algoritmo de controlo implementado foi capaz de acompanhar dinamicamente a evolução da potência produzida, em resposta às alterações aplicadas, uma vez que a potência exigida pelo conversor em cada instante corresponde à potência teórica máxima que o painel consegue fornecer.

3.4.3. Validação da Topologia *Module Integrated Converter*

De forma a validar o conceito de um conversor de potência por painel fotovoltaico, simulou-se um cenário que consistiu em colocar metade da instalação sob condições de radiação uniforme, painel 1 e 2, enquanto que na outra metade foi emulada uma diminuição no valor de radiação, painel 3 e 4, simulando o aparecimento de uma sombra. Durante dois segundos todos os painéis ficam sujeitos a uma radiação de 1000 W/m^2 , ao fim desse tempo é introduzida uma diminuição no valor de radiação em dois dos painéis do sistema. Esta diminuição consiste em baixar a radiação de 1000 W/m^2 para 500 W/m^2 em dois segundos. O objetivo deste ensaio é provar que cada painel apresenta uma resposta única e exclusivamente em virtude das suas condições de operação, ou seja, é independente dos outros elementos da instalação. Na Figura 3.12 é demonstrado o valor de radiação a que cada painel está sujeito ao longo do tempo. De relembrar que o valor de radiação no painel 2 é o mesmo que no painel 1, e que a radiação incidente sobre o painel 4 é a mesma do painel 3.

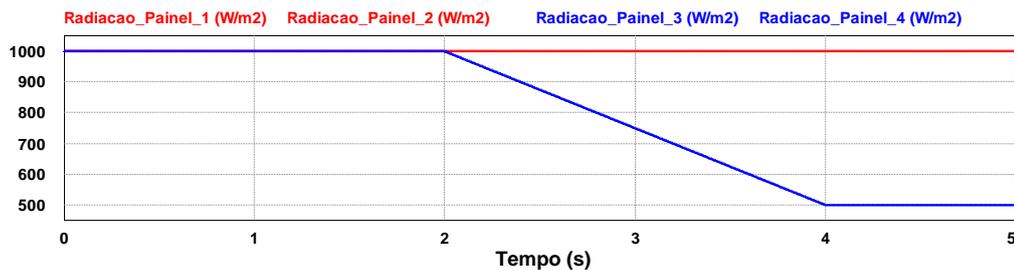


Figura 3.12 – Radiação solar incidente nos painéis do modelo de simulação.

Pela visualização das formas de onda (a) e (b) da Figura 3.13 é possível verificar que quando a radiação incidente sobre os painéis difere, a partir dos dois segundos, a corrente nos painéis 1 e 2 não demonstra qualquer alteração, de outro modo a corrente dos painéis 3 e 4 diminui em resposta à alteração introduzida. Por isso, a corrente total de saída (I_{Sistema}) que corresponde à corrente de saída dos conversores de potência, também decresce em consequência da diminuição da corrente de MPP (*Maximum Power Point*) dos painéis submetidos a sombra. As condições de operação dos painéis 1 e 2 são mantidas constantes, porque a diminuição da corrente do sistema é compensada pelo aumento da tensão de saída nos conversores desses elementos. Estes factos podem ser constatados através da visualização das formas de onda (c) e (d) representadas na Figura 3.13.

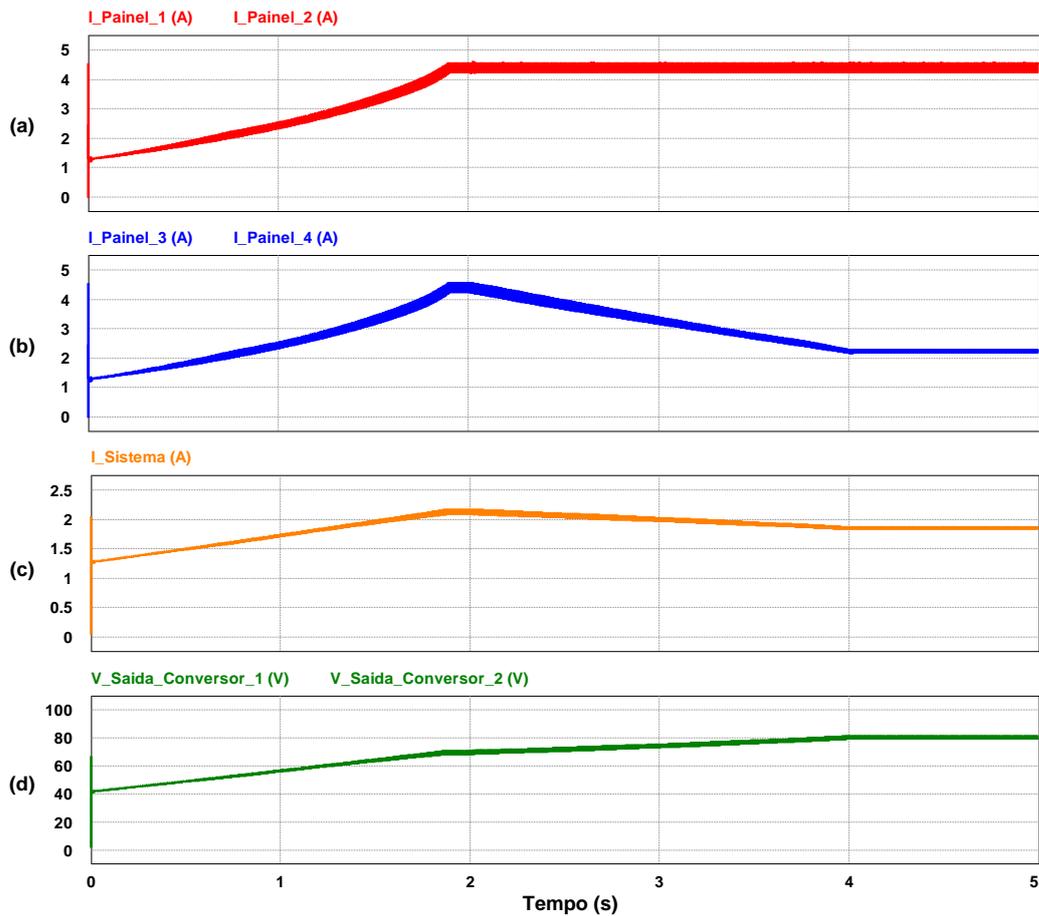


Figura 3.13 – Formas de onda para a topologia MIC em análise. (a) Corrente de saída dos painéis 1 e 2. (b) Corrente de saída dos painéis 3 e 4. (c) Corrente de saída do sistema. (d) Tensão de saída dos conversores de potência dos painéis 1 e 2.

Assim, a potência total do sistema resulta do somatório das potências máximas que cada painel solar tem a capacidade de fornecer, mediante as condições de radiação a que está submetido. Concluindo-se que o seu funcionamento é individualizado através do conversor de potência associado, cuja função é a de detetar mudanças nas condições de operação do sistema e as compensar para que o painel fotovoltaico a que está acoplado não seja influenciado pelas mesmas. Na Figura 3.14 (a) e (b) corrobora-se esta afirmação, uma vez que são apresentadas as formas de onda relativas à potência dos vários painéis da instalação solar fotovoltaica simulada. Podendo comprovar-se que em instalações em que parte dos painéis são afetados pelo efeito sombra, com a topologia MIC, não se verificam quaisquer consequências no rendimento dos restantes painéis. Isto porque, é visível que a potência dos painéis 1 e 2 não sofre qualquer tipo de mudança, apesar da potência dos painéis 3 e 4 diminuir. A potência total da instalação pode ser vista na Figura 3.14 (c). É importante mencionar que as condições de operação do conversor 2 são as mesmas que as do conversor 1, bem como, que as do conversor 4 são iguais às do conversor 3.

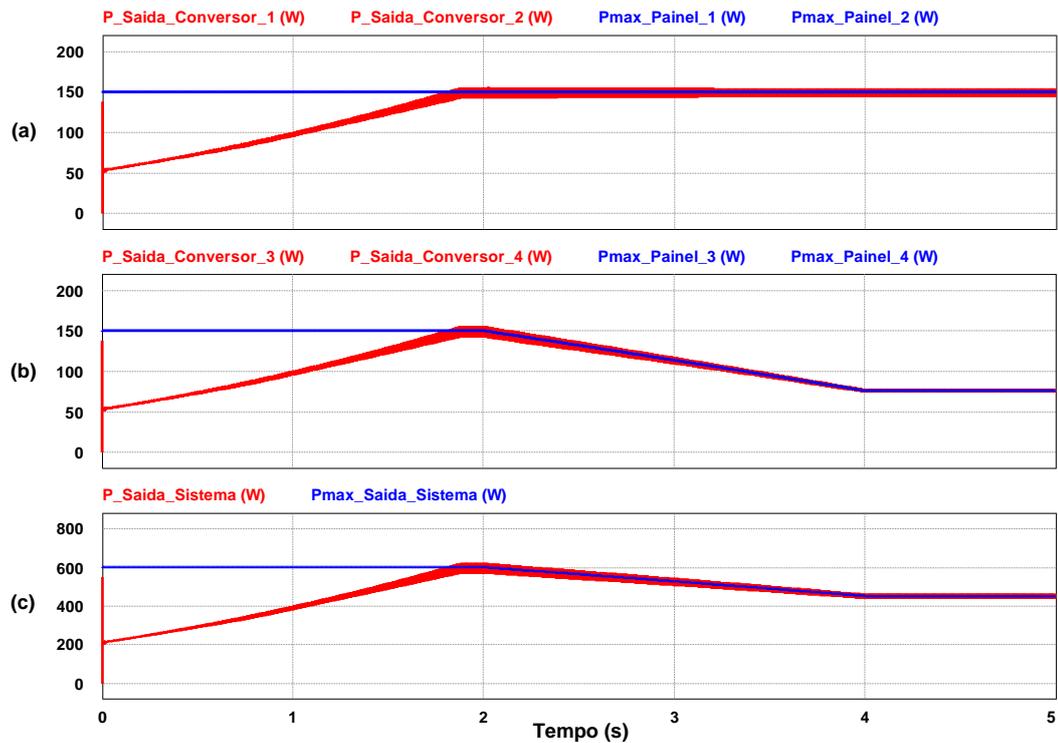


Figura 3.14 – Formas de onda da potência do sistema. (a) Potência dos painéis com radiação uniforme. (b) Potência dos painéis afetados por sombra. (c) Potência total do sistema.

Considerando os resultados apresentados anteriormente, pode-se dizer com segurança que a topologia MIC é viável e funcional para a aplicação em questão. Portanto, é possível passar para a próxima etapa que corresponde à implementação prática da mesma.

3.5. Conclusões

No presente capítulo foi elaborado o modelo de simulação que confirma a solução baseada em um conversor de potência dedicado por painel solar, para minimizar os problemas relacionados com o efeito sombra. Para tal, inicialmente foi apresentado o painel fotovoltaico BP2150S da empresa BP Solar, que vai ser usado futuramente em ambiente experimental. Tendo em consideração as suas especificações elétricas foram realizados os cálculos teóricos necessários para o dimensionamento do conversor *CC-CC Boost*.

Relativamente ao modelo de simulação começou-se por estabelecer o modelo equivalente do painel solar, recorrendo a uma funcionalidade do *software* de simulação PSIM, tendo-se conseguido alcançar uma resposta bastante similar à do painel real. Seguidamente foi descrita a estratégia de controlo aplicada de forma individualizada aos conversores de potência, que se fundamenta na determinação do valor de tensão de

referência através do algoritmo de controlo MPPT de Condutância Incremental. Esse valor é utilizado, de imediato, por um controlador do tipo PI que tem como função manter a tensão de saída regulada.

Por fim, foram apresentados de forma gradual os resultados de simulação do modelo implementado. Em primeiro lugar verificou-se que o conversor *Boost* é capaz de elevar a tensão de saída para os níveis desejados, de acordo com os pressupostos assumidos nos cálculos teóricos. Logo depois comprovou-se a eficácia do algoritmo MPPT de Condutância Incremental para diferentes valores de radiação, verificando-se que em cada instante a potência que os painéis eram capaz de produzir foi completamente aproveitada. Finalmente foram apresentados resultados concretos que possibilitam a validação do conceito MIC, numa instalação solar fotovoltaica constituída por quatro painéis conectados em série. Desses resultados, constatou-se que cada painel foi controlado sem interferências por parte dos restantes elementos, mesmo para diferentes condições de radiação solar incidente. A potência do sistema resultou do somatório das potências máximas que cada painel foi capaz de disponibilizar, mediante as condições a que estava submetido.

Posto isto, estão reunidas todas as condições para se proceder à implementação prática do Seguidor do Ponto de Máxima Potência Multi-Conversor para Sistemas Solares Fotovoltaicos, capaz de validar experimentalmente o que se apurou em ambiente de simulação.

CAPÍTULO 4

Implementação

4.1. Introdução

O Capítulo 3 apresenta os dimensionamentos e os resultados que permitem validar a topologia *Module Integrated Converter* (MIC) em ambiente de simulação, servindo como auxílio na implementação prática da mesma. Todavia, para o desenvolvimento de um protótipo completamente funcional em ambiente real, é necessário um conjunto de circuitos e componentes elétricos adicionais, cujo comportamento não se consegue analisar em ambiente de simulação. Por esse motivo, no presente capítulo é efetuada uma descrição pormenorizada de todos os componentes e circuitos elétricos selecionados para integrar a solução capaz de comprovar o sucesso da configuração MIC a nível prático.

A escolha dos elementos constituintes do Seguidor do Ponto de Máxima Potência Multi-Convertor para Sistemas Solares Fotovoltaicos foi realizada de forma cuidadosa, tendo sempre presente que a solução a desenvolver tem de ser de baixo custo, tamanho reduzido e eficiente. É fundamental referir ainda que o sistema implementado deve ser autónomo, o que significa que a única fonte de energia disponível para alimentar os diferentes circuitos é o painel fotovoltaico. Adicionalmente é importante mencionar que o protótipo tem de ser robusto, visto que será instalado na estrutura do painel fotovoltaico que se encontra ao ar livre. As características apresentadas anteriormente tornaram a seleção dos componentes bastante exigente, assim como a sua integração em apenas uma placa de circuito impresso (*Printed Circuit Board* - PCB).

Ao longo deste capítulo, os diferentes componentes são mencionados de acordo com a função que desempenham. Em primeiro lugar é descrito o circuito de potência, constituído pelo conversor CC-CC *Boost* e o circuito de *drive* que lhe está associado. Posteriormente são apresentados os elementos do sistema de controlo, que engloba o microcontrolador, os sensores e o circuito de condicionamento de sinal. Por fim, são apresentados os componentes que fazem parte do circuito de alimentação. Depois de concluída a descrição individual de cada elemento do protótipo, é efetuada uma

explicação sobre as precauções tomadas no desenvolvimento da PCB. No final do capítulo é demonstrado o protótipo implementado, com todos os componentes incorporados na placa de circuito impresso.

4.2. Circuito de Potência

O conversor CC-CC do tipo *Boost* é o elemento principal do protótipo, visto que é por intermédio dele que se processa toda a transferência de energia. Com este circuito é possível otimizar a potência extraída dos painéis fotovoltaicos para diferentes condições de operação e elevar a sua tensão de saída, tal como foi versado nos capítulos anteriores. Este conversor de tensão é formado por quatro elementos base, designadamente, um semiconductor totalmente controlado, um diodo retificador, uma bobina e um condensador. Adicionalmente também é necessário um circuito de *drive* responsável por estabelecer a ligação entre o microcontrolador e a *gate* do semiconductor.

De seguida é apresentada uma descrição sobre os componentes seleccionados para o conversor *Boost*. De salientar, que os componentes foram escolhidos tendo em consideração os valores nominais de funcionamento verificados em simulação e os requisitos impostos para o desenvolvimento do protótipo.

MOSFET:

O semiconductor totalmente controlado escolhido para o conversor CC-CC *Boost* foi o MOSFET. Esta decisão fundamentou-se principalmente pelo facto da frequência de comutação do conversor de potência ser elevada, e também porque os níveis de tensão são inferiores a 100 V e a corrente máxima não ultrapassa os 5 A. Por estes motivos a utilização do MOSFET é a opção mais indicada quando comparado com o IGBT.

O semiconductor de potência escolhido foi o MOSFET do tipo N de referência STP20NF20 do fabricante *STMicroelectronics*. Este componente suporta uma tensão máxima entre a *drain* e a *source* de 200 V, apresenta uma resistência inferior a 0,125 Ω quando está em condução e a corrente máxima que suporta é de 18 A. Estas especificações cumprem perfeitamente as exigências do circuito de potência, tendo presentes as condições nominais de funcionamento estabelecidas no Capítulo 3. No que diz respeito ao encapsulamento optou-se pelo TO-220, Figura 4.1 (b), que apesar de exibir um tamanho maior relativamente a outros tipos de encapsulamento, possibilita um melhor aproveitamento da área de dissipação de calor, que no caso deste

componente é de 110 W para uma temperatura ambiente de 25 °C [30]. Na Figura 4.1 pode-se ver a representação elétrica do MOSFET, assim como o seu encapsulamento.



Figura 4.1 – MOSFET STP20NF20 [30]. (a) Representação elétrica; (b) Encapsulamento TO-220.

Para assegurar o bom funcionamento do MOSFET foram colocados díodos de *zener* entre a *gate* e a *source*, de forma a garantir que a tensão de *gate* máxima positiva e negativa não são ultrapassadas. Além disso, ainda se colocou uma resistência de proteção de valor elevado, cujo objetivo é evitar a entrada em condução do MOSFET caso a *gate* se encontre em aberto. Na Figura 4.2 é apresentado o circuito elétrico com os componentes de proteção da *gate* do MOSFET.

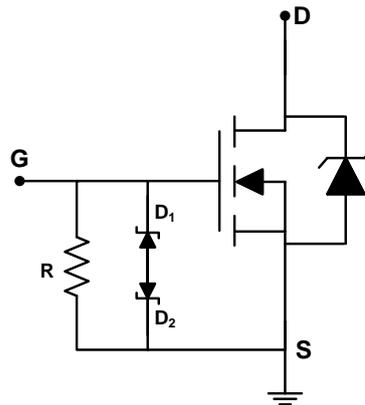


Figura 4.2 – Circuito de proteção do MOSFET.

Circuito de *Drive* do MOSFET:

Para estabelecer o interface entre os sinais de PWM (*Pulse With Modulation*) provenientes do microcontrolador e a *gate* do MOSFET utilizou-se o circuito de *drive* com a referência UCC27424 do fabricante *Texas Instruments*. A escolha deste componente deve-se primordialmente pela sua rapidez e pela capacidade de disponibilizar picos de corrente de ± 4 A. Além disso, permite o acionamento de 2 MOSFETs, porém em aplicações como esta pode-se ligar em paralelo as entradas A e B e as saídas A e B, respetivamente, Figura 4.3 (a), o que proporciona o reforço da corrente de saída [31]. Este circuito de *drive* requer uma tensão de alimentação de 12 V

e o encapsulamento que apresenta é o PDIP-8. Na Figura 4.3 é demonstrado o esquema elétrico da implementação deste elemento e o seu encapsulamento.

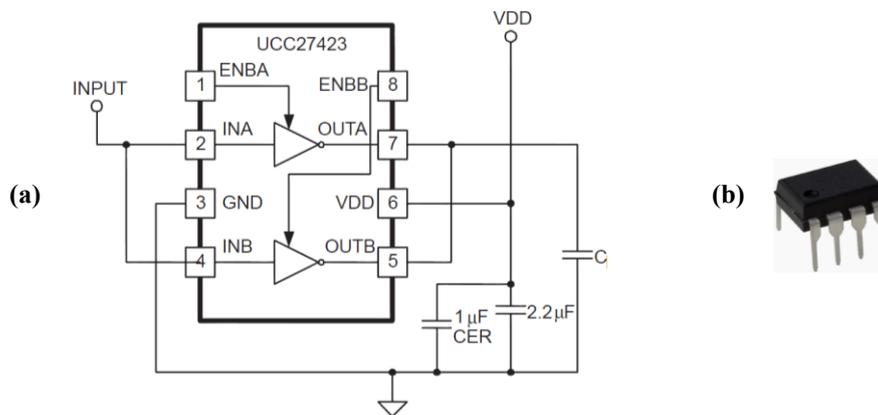


Figura 4.3 – Circuito de *drive* UCC27424. (a) Esquema elétrico [31]. (b) Encapsulamento PDIP-8.

Díodo:

Para a seleção do diodo do conversor *Boost* deve-se ter em consideração determinados aspetos, nomeadamente, a corrente máxima que suporta em condução, a tensão máxima de bloqueio, a queda de tensão e ainda o tempo de recuperação [32]. De destacar que tendo em atenção a frequência de comutação do conversor, é bastante importante que o diodo escolhido tenha como característica principal o rápido tempo de resposta. Assim, de acordo com os parâmetros anteriores, o diodo escolhido foi o STTH1002C que pertence à família de diodos ultrarrápidos e de alto rendimento da empresa *STMicroelectronics*. Este componente é constituído internamente por dois diodos, cuja corrente máxima admissível em cada é de 8 A, asseguram uma tensão máxima de bloqueio de 200 V, apresentam uma queda de tensão de 0,78 V e um tempo de recuperação na ordem dos 20 ns [33]. O encapsulamento escolhido foi o mesmo do MOSFET, ou seja, TO-220.

Bobina:

Para a escolha da bobina considerou-se os valores nominais de corrente do conversor e os cálculos efetuados para o valor de indutância (L) apresentados no Capítulo 3. No entanto, tendo em conta o valor de indutância calculado o preço da bobina é significativo, bem como o seu tamanho. Por isso, de forma a otimizar o sistema a implementar foi necessário proceder a alguns ajustes no valor da indutância. Nesse sentido, de acordo com a equação (2.26), duplicando a frequência de comutação do conversor para 62,5 kHz e sendo menos exigente no valor de *ripple* da corrente, foi

possível utilizar uma bobina no valor de 220 μH . Deste modo, conseguiu-se manter o carácter compacto e de custo reduzido desejado para o sistema. As principais características deste componente são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características elétricas e físicas da bobina do conversor *Boost* [34].

Fabricante		<i>Murata Power Solutions</i>		
Referência		1422455C		
Indutância		220 μH		
Tolerância		10%		
Máxima Corrente DC		5,5 A		
Máxima Resistência DC		0,062 Ω		
Dimensões (mm)				
a	b	c	d	$\varnothing e$
32,1	29,8	21,8	1,14	5,1

Com a Figura 4.4, juntamente com a informação da Tabela 4.1, é possível ter uma noção das dimensões da bobina que posteriormente vai ser integrada no protótipo final.

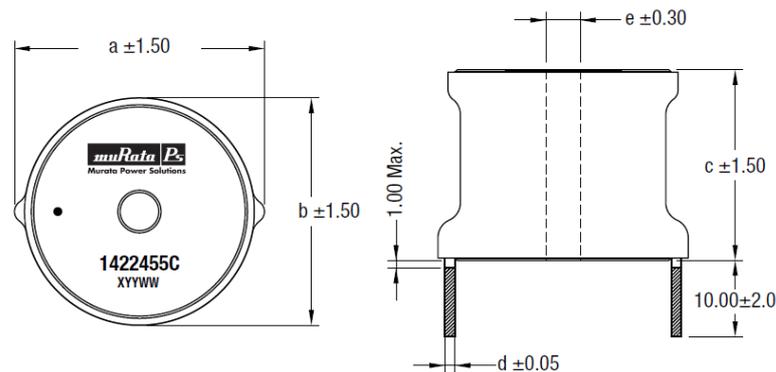


Figura 4.4 – Dimensões da bobina do conversor *Boost* [34].

Condensador de Saída:

Mais uma vez a frequência de comutação do conversor demonstrou ser um fator decisivo durante a seleção dos componentes. Para o caso do condensador de saída este parâmetro tem influência no valor de capacidade e na escolha do tipo de condensador. Assim, ajustando os cálculos do Capítulo 3 para o novo valor de frequência de comutação (62,5 kHz), e sabendo que para frequências elevadas os condensadores que têm melhor desempenho são os de polipropileno, o condensador escolhido para incorporar no conversor *Boost* foi o ECWF2W475JA da empresa *Panasonic*. Apresenta uma capacidade de 4,7 μF , com uma tolerância de $\pm 5\%$ e é capaz de suportar uma tensão máxima de 450 V. Este valor é bastante superior ao valor máximo esperado,

contudo a sua escolha deveu-se ao seu preço consideravelmente mais baixo que os restantes condensadores para a mesma capacidade e tensão inferior. Na Figura 4.5 é mostrado o condensador referido sendo possível perceber quais são as suas dimensões.

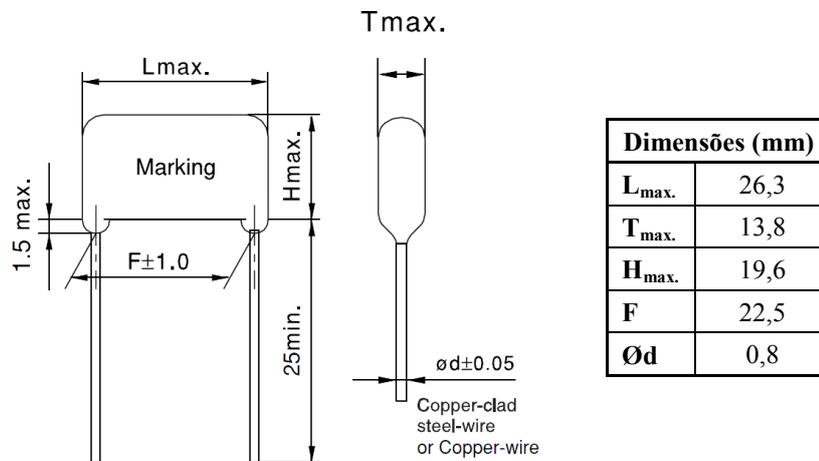


Figura 4.5 – Dimensões do condensador de saída do conversor *Boost* [35].

4.3. Circuito de Controlo

Nesta secção é realizada uma descrição detalhada relativamente aos componentes escolhidos para o sistema de controlo do protótipo. A unidade central é o microcontrolador, que recebe os sinais provenientes dos sensores de corrente e de tensão necessários para o controlo. Imediatamente antes da entrada dos canais de ADC encontram-se filtros RC do tipo passa-baixo, com o objetivo de minimizar a influência dos ruídos parasitas na leitura das grandezas medidas. Na Figura 4.6 é apresentado o diagrama de blocos que permite perceber a interligação dos diferentes elementos do sistema de controlo.

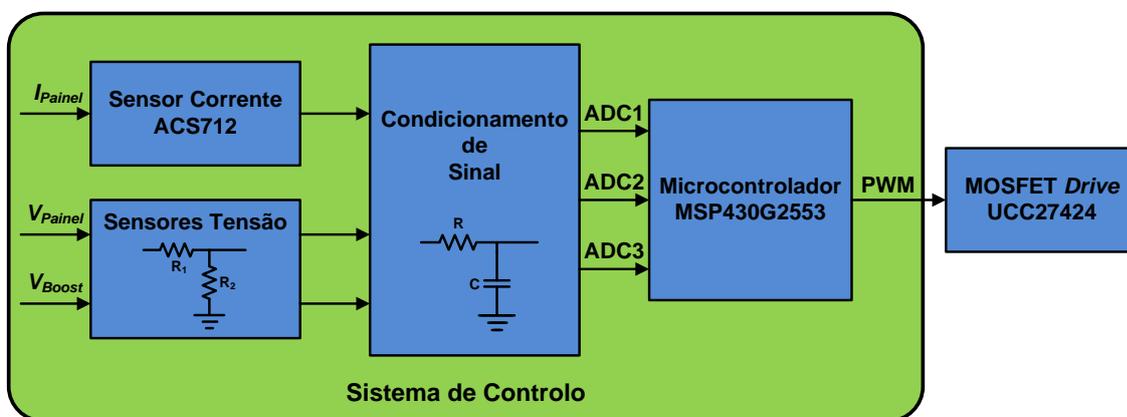


Figura 4.6 – Diagrama de blocos do sistema de controlo.

Nas subsecções seguintes são abordados os componentes de cada um dos blocos que constituem o sistema de controlo. As suas características principais são descritas e são apresentadas as razões que contribuíram para a sua escolha.

4.3.1. Microcontrolador

Para o modelo proposto o controlo do conversor de potência é individualizado, sendo responsável por essa tarefa o microcontrolador que o integra. A seleção desse elemento teve de ser feita de forma ponderada, de acordo com os requisitos impostos pelo sistema a desenvolver. Inicialmente foram consideradas as funcionalidades básicas que o microcontrolador deve assegurar, nomeadamente, 3 canais de ADC (*Analog to Digital Converter*) para a leitura das grandezas necessárias para a execução da estratégia de controlo, a capacidade de gerar sinais de PWM com frequência e resolução configuráveis, e finalmente velocidade/capacidade de processamento de dados que ofereça alguma flexibilidade. Cumpridas as condições anteriores, a decisão final foi tomada avaliando o desempenho global, o custo, o tamanho e a facilidade de integração no protótipo. Posto isto, o microcontrolador escolhido foi o MSP430G2553 do fabricante *Texas Instruments* que pode ser visto na Figura 4.7.



Figura 4.7 – Microcontrolador MSP430G2553 da *Texas Instruments*.

Os aspetos que prevaleceram na escolha deste componente assentam no facto de pertencer a uma família de microcontroladores do tipo “*ultra-low-power*”, com uma arquitetura de 16-bits, cuja velocidade de relógio do processador pode atingir os 16 MHz. Além disso, possui 8 canais de ADC com uma resolução de 10-bits, 2 temporizadores de 16-bits com modo de comparação que permitem gerar sinais de PWM, e por fim ainda possibilita comunicação via porta série [36]. Estas características aliadas ao número reduzido de pinos e ao custo do microcontrolador, reuniram todas as condições que levaram à sua utilização na solução final. Na Tabela 4.2 encontra-se um resumo com as principais especificações deste microcontrolador.

Tabela 4.2 – Principais características do microcontrolador MSP430G2553 [36].

Tensão de Alimentação	1,8 V a 3,6 V
CPU	RISC 16-bits
Velocidade Máxima de <i>Clock</i>	16 MHz
Memória <i>Flash</i>	16 kBytes
Memória RAM	512 Bytes
Temporizadores	2 – 16-bits
ADC	8 canais - 10-bits
Comunicações	UART, SPI e I2C
Número de pinos	20
Encapsulamento	PDIP

O código para o microcontrolador foi desenvolvido em linguagem de programação *C*, recorrendo ao IDE (*Integrated Development Environment*) *Code Composer Studio*TM V5. Para a transferência do código do ambiente de programação para o microcontrolador foi utilizada a placa de desenvolvimento *Launch Pad* MSP-EXP430G2, Figura 4.8, desenvolvida igualmente pela empresa *Texas Instruments* especificamente para a família MSP430G2. De referir que a placa de desenvolvimento *Launch Pad* MSP-EXP430G e o microcontrolador MSP430G2553 podem ser adquiridos no *site* do fabricante por apenas 7,5 €.

Figura 4.8 – Placa de desenvolvimento *Launch Pad* MSP-EXP430G2.

Para a monitorização do estado das variáveis, assim como dos valores lidos pelo ADC durante o funcionamento do conversor *Boost*, foi configurada a comunicação via porta série do microcontrolador, o que possibilita o envio desses dados através da placa de desenvolvimento para o computador. Como medida de segurança foi implementado um isolador USB (*Universal Serial Bus*), que garante o isolamento elétrico do computador na transferência dos dados enquanto o conversor de potência se encontra

em funcionamento. Além disso, o facto de o microcontrolador poder estar ligado ao computador, facilita a transferência do código a partir do ambiente de programação durante a fase experimental, em que frequentemente é necessário efetuar ajustes nos ganhos do sistema de controlo ou testar determinadas condições.

O circuito elétrico do isolador USB foi implementado com base no *application note* [37] da empresa *Analogue Devices* que é apresentado na Figura 4.9.

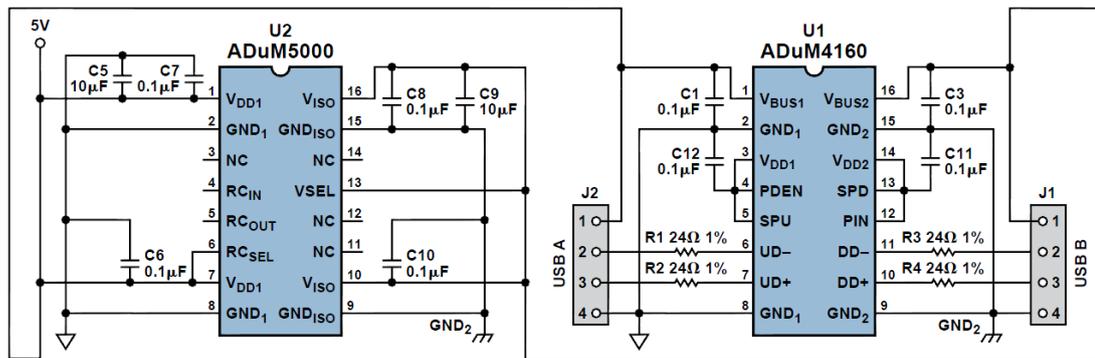


Figura 4.9 – Circuito elétrico do isolador USB apresentado no *application note* [37] da *Analogue Devices*.

Para este circuito foi desenvolvida uma PCB, recorrendo ao *software* PADS da empresa *Mentor Graphics*, tendo-se obtido o resultado demonstrado na Figura 4.10.

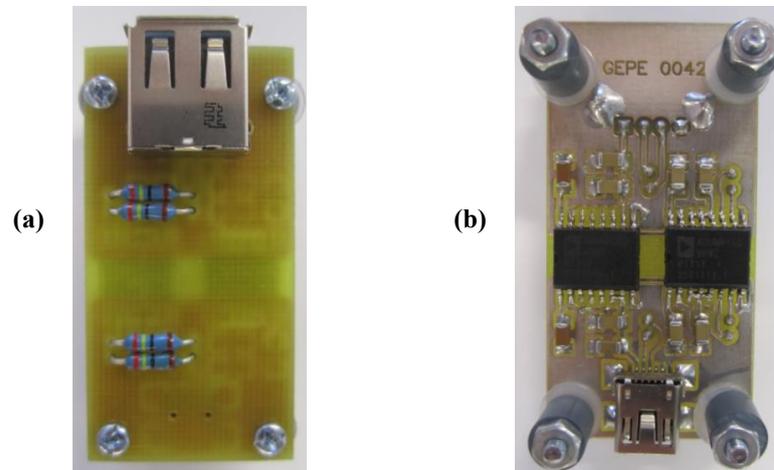


Figura 4.10 – Isolador USB impelmentado em PCB. (a) Vista superior. (b) Vista inferior.

4.3.2. Sensores e Condicionamento de Sinal

O sistema de controlo necessita do valor de tensão e de corrente do painel fotovoltaico, que são indispensáveis para a implementação do algoritmo MPPT (*Maximum Power Point Tracker*), além disso, é essencial adquirir o valor de tensão de saída do circuito elevador de tensão para ser utilizado pelo controlador PI para a

regulação da tensão de saída. Tendo sempre presente que o protótipo a desenvolver tem de ser de baixo custo e de dimensões reduzidas, a leitura dos valores de tensão é feito diretamente na entrada do painel solar e na saída do conversor CC-CC *Boost*. Sabendo que a tensão de entrada máxima admissível pelos canais do ADC do microcontrolador é 3,3 V, foi essencial implementar divisores resistivos que assegurassem esta especificação. A utilização de divisores resistivos vai ao encontro das condições impostas para a execução deste projeto, na medida em que constituem uma solução de custo e dimensões reduzidas, aliada à facilidade de implementação. Recorrendo à equação (4.1) garantiu-se que independentemente dos valores de tensão de saída do painel solar e do conversor de potência, os níveis de tensão do ADC do microcontrolador são respeitados.

$$V_{ADC} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{IN} \quad (4.1)$$

Por outro lado, para a leitura da corrente de saída do painel solar foi utilizado o sensor de corrente ACS712ELCTR-05B-T fabricado pela empresa *Allegro*, devido ao seu preço atrativo e tamanho reduzido. Não obstante, as características apresentadas pelo sensor também contribuíram para a decisão final da sua escolha. Trata-se de um sensor de efeito *Hall* que possibilita a medição de corrente contínua e alternada, a saída do valor de corrente medido é dado em tensão, que apresenta baixo *offset*, boa linearidade e imunidade a ruídos eletromagnéticos. No que concerne ao seu princípio de funcionamento, quando o valor de corrente medido é nulo (0 A) o valor de tensão na sua saída é de 2,5 V, por cada ± 1 A a sua saída é afetada em ± 185 mV. O valor máximo de corrente que é capaz de medir é 5 A e necessita de uma tensão de alimentação de 5 V [38]. Na Figura 4.11 é apresentado o circuito elétrico implementado para efetuar a leitura dos valores de corrente com este sensor, e o seu encapsulamento: SOIC-8.

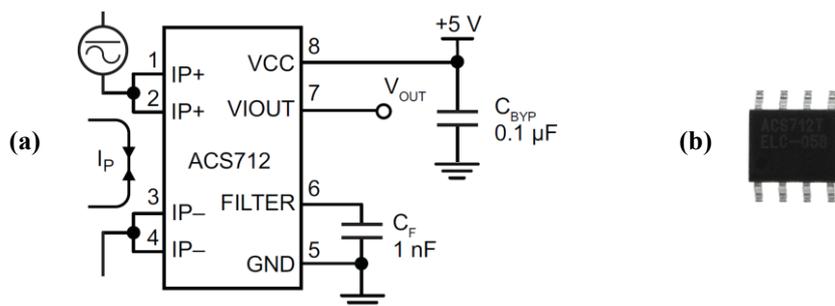


Figura 4.11 – Sensor de Corrente. (a) Circuito de leitura [38]. (b) Encapsulamento SOIC-8.

Para minimizar os efeitos dos ruídos parasitas do protótipo foram implementados filtros-passa baixo analógicos do tipo RC para as três grandezas medidas, imediatamente antes das entradas dos canais de ADC onde são feitas as suas leituras. Os filtros passa-baixo foram dimensionados de acordo com a equação (4.2), em que f_{corte} representa a frequência de corte do filtro.

$$f_{corte} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4.2)$$

4.4. Circuito de Alimentação

O protótipo a desenvolver tem de ser autónomo, o que significa que a única fonte de energia acessível para alimentar os diferentes circuitos que o compõem é o painel fotovoltaico. Por isso, foi preciso definir uma estratégia que permitisse obter de forma eficiente as tensões de alimentação requeridas pelos vários elementos do sistema. Na Tabela 4.3 são apresentados os níveis de tensão presentes no Seguidor do Ponto de Máxima Potência Multi-Convertor para Sistemas Solares Fotovoltaicos.

Tabela 4.3 – Níveis de tensão do protótipo.

Componente	Referência	Tensão de Alimentação
MOSFET <i>Drive</i>	UCC27424	12 V
Sensor de Corrente	ACS712	5 V
Microcontrolador	MSP430G2553	3,3 V

Esta parte do projeto revelou ser um grande desafio, porque tendo em conta os níveis de tensão exigidos pelos diferentes circuitos do conversor, e considerando que a tensão nominal de funcionamento dos painéis solares é de 34 V, baixar esse valor numa proporção tão significativa de modo eficaz não é uma tarefa fácil. A solução encontrada passou pela utilização do circuito integrado de referência LM2674-12 da *Texas Instruments*. Este componente trata-se de um regulador de tensão comutado do tipo *Step-Down*, o que significa que para diferentes valores de tensão de entrada, na sua saída obtém-se um valor de tensão inferior, neste caso 12 V fixos. O controlo da tensão de saída é feito internamente pelo próprio componente. A escolha deste elemento foi baseada sobretudo no seu rendimento, superior a 90% e pelo facto de apresentar uma frequência de comutação de 260 kHz, o que faz com que os componentes externos necessários sejam de dimensões reduzidas [39]. Antes de se optar por este circuito

integrado foi efetuado o estudo e teste prático de um regulador de tensão linear para tensões elevadas, cuja referência é TL783C também da *Texas Instruments*, por apresentar um custo mais reduzido e precisar de menos componentes externos. Dos ensaios experimentais efetuados constatou-se que este regulador de tensão apresenta um rendimento reduzido e verificaram-se perdas assinaláveis por efeito de *joule*, levando à necessidade da utilização de um dissipador. Desta forma, prevaleceu a opção do regulador comutado LM2674-12V por conferir mais fiabilidade e um rendimento superior. Ao longo do processo de seleção dos componentes tentou-se sempre estabelecer um compromisso entre custo/benefício de forma a não comprometer o desempenho do protótipo.

No que diz respeito às especificações do regulador comutado LM2674-12, importa destacar a corrente de saída máxima no valor de 500 mA, o valor máximo da tensão de entrada de 45 V e ainda o facto de oferecer proteção térmica e limitador de corrente. Para o dimensionamento e escolha dos componentes adicionais, bastou seguir o procedimento descrito no manual do fabricante mediante a aplicação pretendida [39]. Na Figura 4.12 está representado o esquemático genérico do regulador comutado, sendo ainda apresentado o seu encapsulamento: PDIP-8.

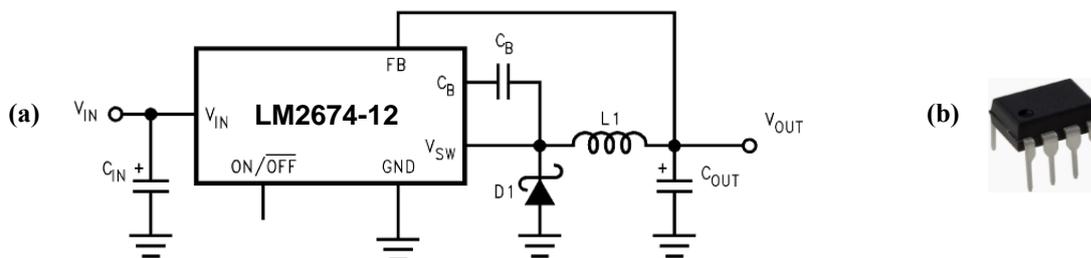


Figura 4.12 – Regulador de tensão LM2674-12. (a) Esquema elétrico [39]. (b) Encapsulamento PDIP-8.

Com a utilização do componente supracitado a tensão de alimentação do circuito de *drive* do MOSFET (12 V) está assegurada, contudo ainda são necessários mais dois níveis de tensão, 5 V e 3,3 V. Para obter esses valores recorreu-se a dois reguladores de tensão lineares que recebem na sua entrada os 12 V provenientes do regulador comutado e convertem esse valor nas suas saídas para 5 V e 3,3 V. Para estes casos, optou-se por reguladores de tensão lineares, porque a diferença de tensão a diminuir não é tão elevada, assim como a corrente exigida pelos componentes que vão alimentar. O regulador de tensão linear escolhido foi o LM1117-N da empresa *Texas Instruments*, que disponibiliza versões de tensão de saída fixa para 5 V e 3,3 V. As principais vantagens deste elemento são o seu custo reduzido e a facilidade de implementação,

visto que apenas precisam de condensadores na entrada e na saída para manter a tensão estável. Além disso, possuem um encapsulamento de pequenas dimensões, tornando-os bastante atrativos para a aplicação em questão. Na Figura 4.13 pode-se ver o encapsulamento destes elementos, TO-252, assim como o esquema elétrico da sua configuração típica. É importante referir que as características apresentadas pelo regulador de 5 V são as mesmas do regulador de 3,3 V e vice-versa.

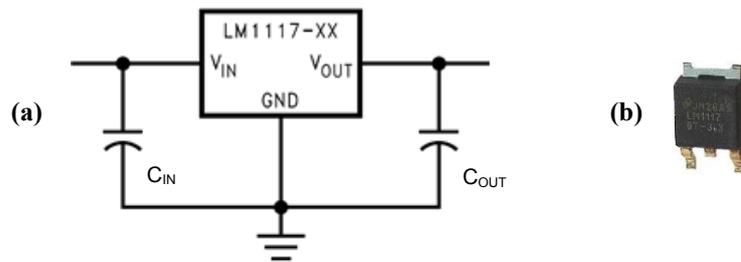


Figura 4.13 – Regulador de tensão LM1117-3,3/5 [40]. (a) Circuito elétrico. (b) Encapsulamento TO-252

Relativamente às especificações do regulador de tensão LM1117, importa salientar a corrente máxima de saída de 800 mA, a tensão de entrada máxima de 20 V e o facto de possuir proteção térmica e limitador de corrente [40]. Na Figura 4.14 é apresentado o diagrama de blocos que demonstra o modo como o circuito de alimentação foi implementado.

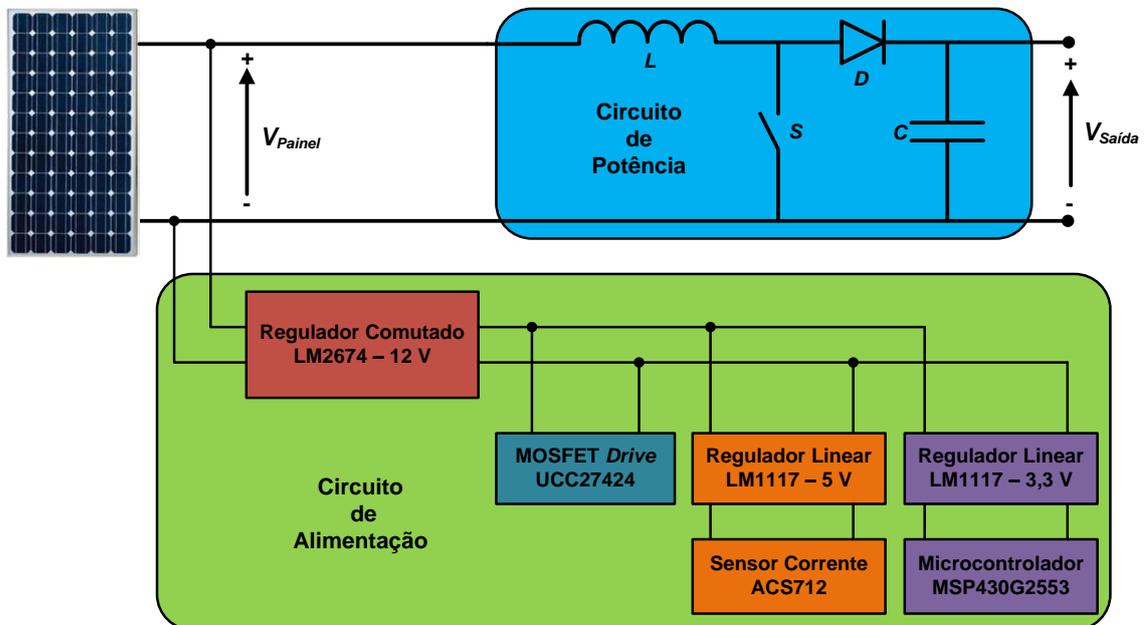


Figura 4.14 – Diagrama de blocos representativo do circuito de alimentação.

4.5. *Design* da Placa de Circuito Impresso do Protótipo

Todos os circuitos e componentes citados até aqui foram testados em *breadboard* individualmente para validar o seu funcionamento e justificar a sua utilização. Finalizada a fase de seleção e teste dos elementos constituintes do protótipo, foi necessário integrar todos esses elementos em apenas uma placa de circuito impresso. Para a realização dessa tarefa, tal como aconteceu para a implementação do isolador USB, recorreu-se ao *software* de desenho de PCBs denominado PADS. Ao longo do projeto da placa, sempre que possível, foram utilizadas resistências, condensadores e díodos SMD (*Surface Mounted Device*) de modo a ganhar algum espaço e compactar ao máximo a PCB.

O processo de desenvolvimento da placa de circuito impresso foi trabalhoso e um pouco demorado. A base de dados do *software* PADS é reduzida e por esse motivo foi preciso criar os “moldes” da maioria dos componentes. Para além disso, a PCB foi desenvolvida apenas com uma face, o que torna o seu *design* mais complexo, no entanto o processo de fabrico é mais simples, rápido e o custo é menor.

Durante a execução da placa de circuito impresso foram tomadas várias precauções para garantir o bom funcionamento de todo o circuito. Em primeiro lugar efetuou-se a separação dos planos de massa, correspondentes ao circuito de potência e ao sistema de controlo e de alimentações por intermédio de uma bobina. Com um plano de massa exclusivo para a parte de potência unido ao segundo plano de massa através da bobina, consegue-se minimizar a propagação dos ruídos parasitas associados às comutações do MOSFET. Adicionalmente foi considerado um conjunto de regras práticas que devem ser cumpridas durante o desenvolvimento de *hardware* de potência. Passando a enumerar:

- Os circuitos de alimentação devem ser colocados o mais próximo possível dos componentes a que vão fornecer energia;
- A saída do sinal de PWM proveniente do microcontrolador deve estar próxima da entrada do circuito de *drive* do MOSFET;
- A saída do circuito de *drive* do MOSFET deve encontrar-se o mais próximo possível da *gate* do MOSFET;
- Os filtros passa-baixo devem estar dispostos imediatamente antes da entrada dos canais de ADC;

- Os sinais de medida provenientes dos sensores devem percorrer a menor distância possível;
- Os valores máximos de corrente e de tensão têm de ser considerados para a definição da largura das pistas e do espaçamento entre as mesmas, respetivamente.

4.6. Protótipo Desenvolvido

Finalizada a fase de *design* da PCB, o seu fabrico ficou ao encargo das oficinas do Departamento de Eletrónica Industrial da Universidade do Minho. A Figura 4.15 apresenta a perspetiva superior e inferior do Seguidor do Ponto de Máxima Potência Multi-Convertor para Sistemas Solares Fotovoltaicos desenvolvido, depois de soldados todos os componentes na placa de circuito impresso.

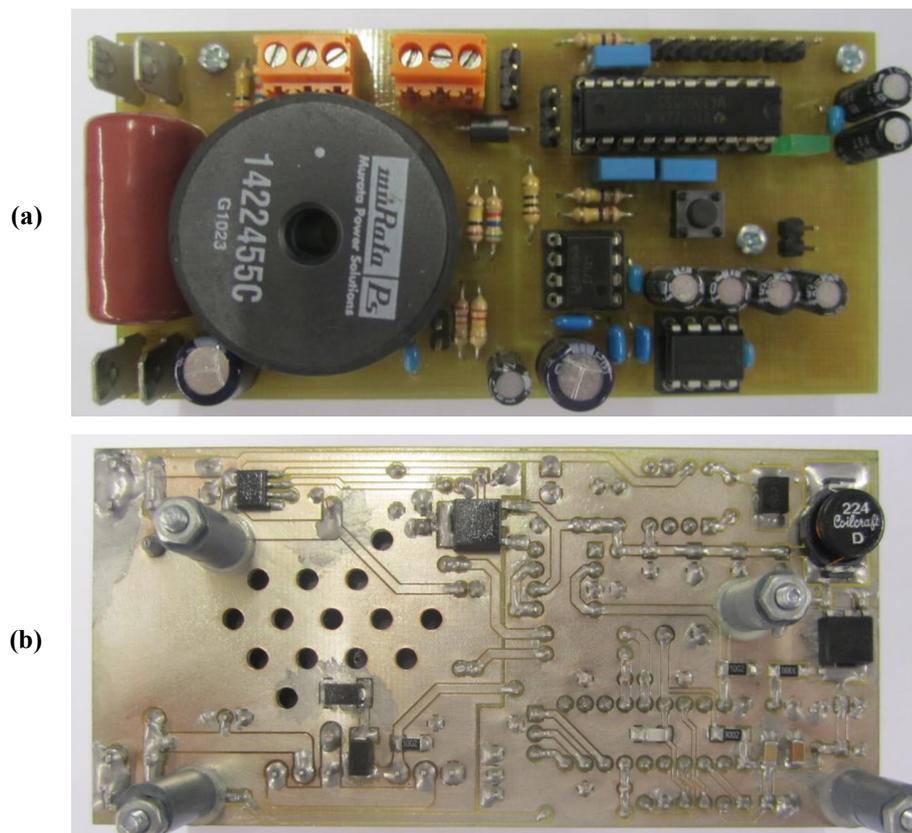


Figura 4.15 – Placa de circuito impresso do protótipo. (a) Vista superior. (b) Vista inferior.

Relativamente à Figura 4.15 é importante referir que o protótipo implementado apresenta um comprimento de 101,6 mm e uma largura de 48,9 mm. Por isso, numa fase ainda muito preliminar, pode-se dizer pelo menos que o carácter compacto desejado foi alcançado com sucesso.

4.7. Conclusões

Ao longo deste capítulo foi realizada uma descrição pormenorizada de todos os elementos constituintes do protótipo, capaz de validar experimentalmente a eficácia da topologia *Module Integrated Converter* na resolução dos problemas associados ao efeito sombra numa instalação solar fotovoltaica.

Iniciou-se esse processo com a exposição de todos os componentes e circuitos selecionados para o conversor CC-CC *Boost*. Os elementos do circuito de potência foram escolhidos de acordo com os cálculos efetuados e os valores nominais de funcionamento verificados no capítulo dos Dimensionamentos e Simulações Computacionais. Foi indispensável proceder a ajustes na bobina do circuito de potência, porque para os valores teóricos calculados as dimensões e o custo desse elemento são elevados. Para resolver esta contrariedade duplicou-se o valor da frequência de comutação do conversor para 62,5 kHz, com o objetivo de reduzir o valor de indutância e consequentemente o tamanho e o custo da bobina.

Posteriormente foram abordados os elementos que compõem o sistema de controlo. Começando pela apresentação do elemento principal, o microcontrolador MSP430G2553. As suas características principais foram descritas e a decisão da sua escolha foi justificada. Seguidamente foram introduzidos os elementos responsáveis pela medição das grandezas necessárias para a execução da estratégia de controlo. O sensor de corrente ACS712 foi o componente selecionado para a medição da corrente de saída do painel fotovoltaico. Por outro lado, para a aquisição dos valores de tensão provenientes do painel fotovoltaico e da saída do conversor de potência *Boost*, optou-se por utilizar divisores resistivos.

A descrição dos elementos constituintes do protótipo terminou com a indicação dos componentes que formam o circuito de alimentação. O elemento fundamental deste circuito é o regulador de tensão comutado LM2674-12 que tem como função receber na sua entrada a tensão do painel fotovoltaico e disponibilizar na saída 12 V fixos, independentemente das variações que possam ocorrer na sua entrada. O valor de tensão fornecido por este componente é utilizado para alimentar diretamente o circuito de *drive* do MOSFET e ainda serve como entrada para dois reguladores lineares de referência LM1117, cuja função é garantir nas suas saídas as tensões de alimentação do sensor de corrente (5 V) e do microcontrolador (3,3 V).

O presente capítulo foi finalizado com uma explicação sobre as considerações tomadas durante a fase de *design* da placa de circuito impresso que engloba todos os

componentes e circuitos mencionados. A PCB desenvolvida com todos os elementos integrados deu origem ao Seguidor do Ponto de Máxima Potência Multi-Convertor para Sistemas Solares Fotovoltaicos.

Posto isto, no capítulo seguinte vão ser apresentados todos os ensaios experimentais, em bancada e em ambiente real, efetuados para comprovar o funcionamento da solução desenvolvida.

CAPÍTULO 5

Resultados Experimentais

5.1. Introdução

Neste capítulo são relatados todos os ensaios experimentais realizados, com o objetivo de comprovar o funcionamento do Seguidor do Ponto de Máxima Potência Multi-Convertor para Sistemas Solares Fotovoltaicos apresentado no Capítulo 4.

Numa primeira fase serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios executados em ambiente laboratorial. Desses ensaios fazem parte:

- O teste em malha aberta e regime permanente para a potência nominal;
- O teste em malha fechada em regime transitório;
- A validação do algoritmo de controlo MPPT;
- O teste da topologia *Module Integrated Converter* (MIC).

Numa segunda fase são apresentados os resultados dos ensaios experimentais realizados em ambiente real de aplicação, e que permitem confirmar que os protótipos implementados são capazes de otimizar o rendimento de uma instalação fotovoltaica (constituída por dois painéis) e para além disso, compensar os efeitos do fenómeno sombra.

5.2. Teste em Malha Aberta e em Regime Permanente para a Potência Nominal

Para validar o sistema implementado, em primeiro lugar optou-se por verificar o seu comportamento para a potência nominal de funcionamento, ou seja, 150 W. Esta decisão foi tomada, porque com este ensaio para além de ser possível confirmar a operação do conversor *Boost* a elevar a tensão de saída, também se pode validar o correto dimensionamento dos diversos componentes, tanto a nível elétrico, como especialmente térmico, quando em funcionamento à potência nominal por um período de tempo mais alargado.

Como ao nível laboratorial não existem infraestruturas disponíveis que possibilitem a utilização de um painel fotovoltaico como fonte de energia, para a realização deste ensaio recorreu-se a uma fonte de tensão CC para alimentar o conversor de potência. Como instrumentos de medida utilizou-se um osciloscópio e dois wattímetros. Um colocado na entrada e outro na saída do protótipo com o intuito de determinar o seu rendimento. É importante mencionar que todos os circuitos e componentes apenas foram alimentados a partir da fonte de tensão CC, de forma análoga ao que se verifica na realidade com o painel solar.

Para comprovar que o conversor *Boost* desempenha corretamente a sua função o ensaio foi efetuado em malha aberta, com o microcontrolador a enviar para o circuito de *drive* do MOSFET um *duty-cycle* fixo na ordem dos 46%. Assim, com uma carga resistiva de $27\ \Omega$ e para uma tensão de entrada de $33,8\ \text{V}$, o sistema solicitou à fonte CC uma corrente de entrada de $4,48\ \text{A}$ e obteve-se uma tensão de saída de aproximadamente $62\ \text{V}$. A potência de entrada verificada foi de $151,5\ \text{W}$, enquanto que na saída foi de $142\ \text{W}$, correspondendo a um rendimento de $93,73\%$. Estes valores podem ser confirmados através da Figura 5.1 que ilustra a bancada de trabalho durante a realização do ensaio em questão.

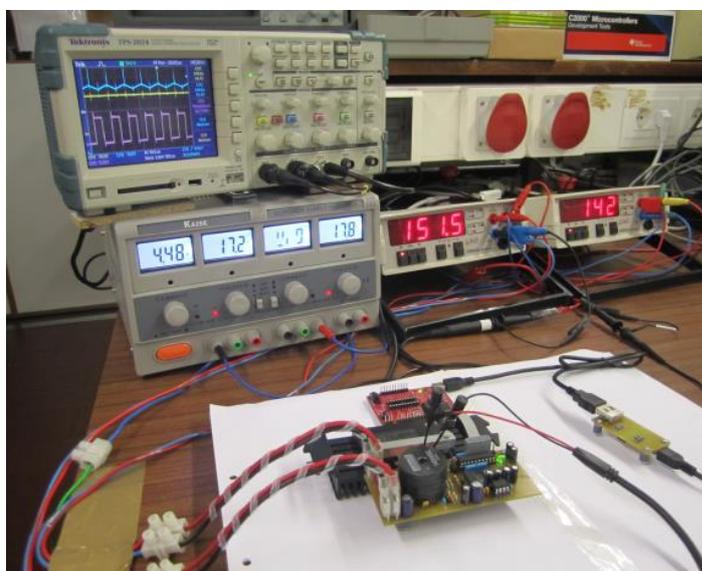


Figura 5.1 – Bancada de teste para a potência nominal de funcionamento.

As principais formas de onda deste ensaio podem ser visualizadas na Figura 5.2. Para além de representar as formas de onda, o osciloscópio utilizado permite calcular algumas grandezas, a primeira corresponde ao valor médio da tensão de entrada, a segunda ao valor médio da tensão de saída e por fim, a terceira indica a frequência do sinal de PWM aplicado à *gate* do MOSFET.

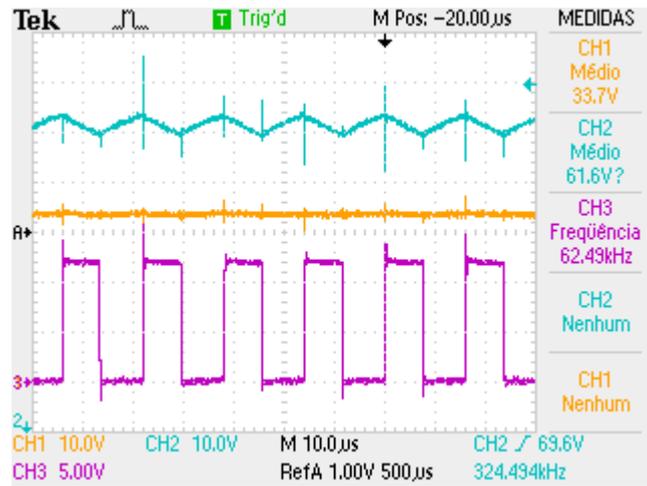


Figura 5.2 – Principais formas de onda do conversor *Boost*. Canal 1 - tensão de entrada, Canal 2 - tensão de saída, Canal 3 - *duty-cycle* aplicado à *gate* do MOSFET.

Na Figura 5.3 é mostrado em detalhe o *ripple* da tensão de saída, sendo possível observar que o seu valor é sensivelmente 4 V.

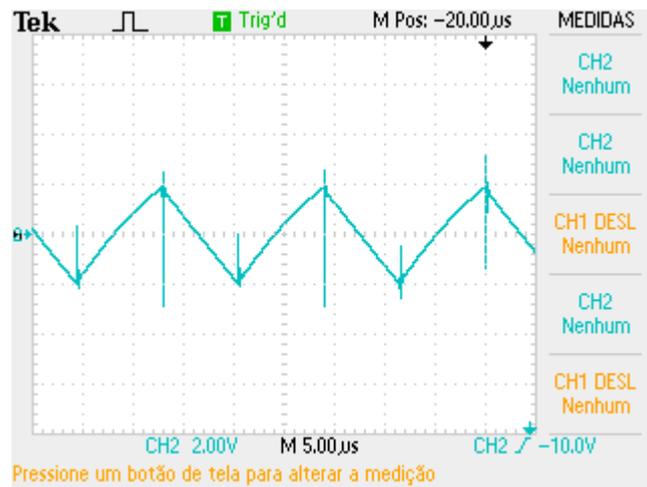


Figura 5.3 – Pormenor do *ripple* da tensão de saída do conversor *Boost*.

Após o funcionamento do conversor de potência por um período de tempo considerável (cerca de 20 minutos), recorrendo à câmara termográfica FLIR foi tirada uma imagem térmica global do protótipo nas condições em análise. Pela Figura 5.4 pode-se verificar que a temperatura máxima atingida foi de 60,7 °C, para uma temperatura ambiente de aproximadamente 30 °C. O objetivo desta imagem é demonstrar a fiabilidade de operação do conversor em ambiente real. Numa aplicação final estes dispositivos, geralmente, encontram-se instalados na parte de trás dos painéis solares onde a temperatura ambiente pode chegar facilmente aos 50 °C [22]. Por isso, para um aumento de 20 °C face ao teste em ambiente laboratorial, pode-se deduzir que a temperatura dos componentes permanece abaixo dos 100 °C. De referir que a câmara

termográfica FLIR apresenta uma resolução bastante elevada, sendo os resultados obtidos através deste equipamento extremamente rigorosos.

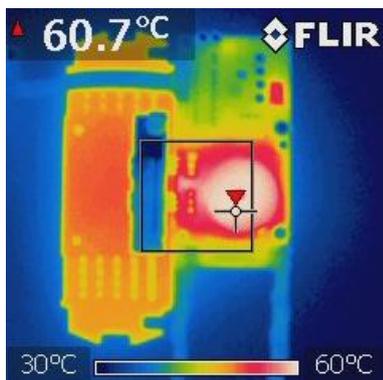


Figura 5.4 – Imagem termográfica do protótipo para a potência nominal.

De seguida é apresentada a Tabela 5.1 que sumariza os resultados alcançados para este ensaio. Os valores indicados foram medidos através dos wattímetros.

Tabela 5.1 – Sumário do ensaio ao protótipo para a potência nominal.

Wattímetro 1 (entrada)			Wattímetro 2 (saída)			Frequência Comutação	Rendimento
Tensão Entrada	Corrente Entrada	Potência Entrada	Tensão Saída	Corrente Saída	Potência Saída		
33,8 V	4,48 A	151,5 W	62 V	2,29 A	142 W	62,5 kHz	93,73%

5.3. Teste em Malha Fechada em Regime Transitório

A estrutura de controlo, descrita no Capítulo 3, constituída pelo algoritmo de controlo MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) e pelo controlador PI (Proporcional-Integral) foi testada individualmente. Nesta secção é avaliado o desempenho do controlador PI, cuja função é manter a tensão de saída do conversor CC-CC *Boost* regulada. O ensaio efetuado consistiu em provocar alterações na variável de referência num curto espaço de tempo, de forma a determinar a resposta do controlador em regime transitório. Assim, para uma tensão de entrada de 30 V o valor inicial de referência estabelecido para a tensão de saída foi de 40 V. Este valor foi sofrendo incrementos de 10 V até atingir 70 V, nesse instante manteve-se a referência constante por alguns momentos e depois aplicou-se novamente o valor inicial de 40 V. A resposta do sistema para estas condições pode ser verificada através da Figura 5.5.

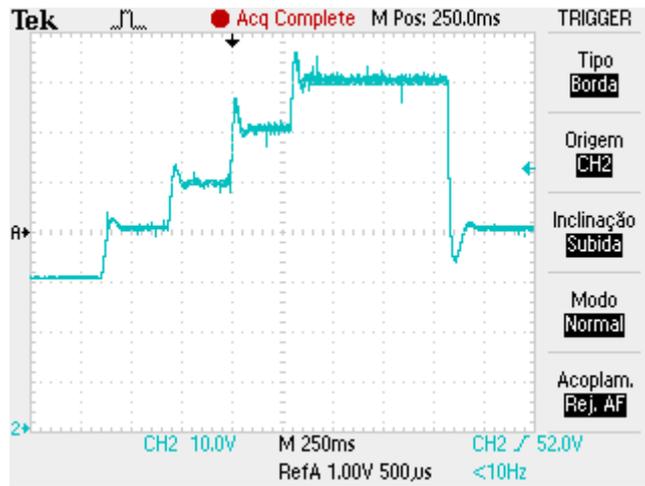


Figura 5.5 – Resposta do sistema em regime transitório.

Pela visualização da figura anterior é possível concluir que a tensão de saída tende sempre para a referência estabelecida, oscilando pouco até a atingir. Adicionalmente, também se verifica um ligeiro *overshoot* em cada transição, no entanto é importante não esquecer que o valor da variável de referência foi alterado num curto período de tempo e numa proporção significativa. Para averiguar em pormenor o tempo de resposta do controlador foi considerado o pior caso, que corresponde à diminuição da tensão de saída de 70 V para 40 V. A Figura 5.6 ilustra essa situação em detalhe.

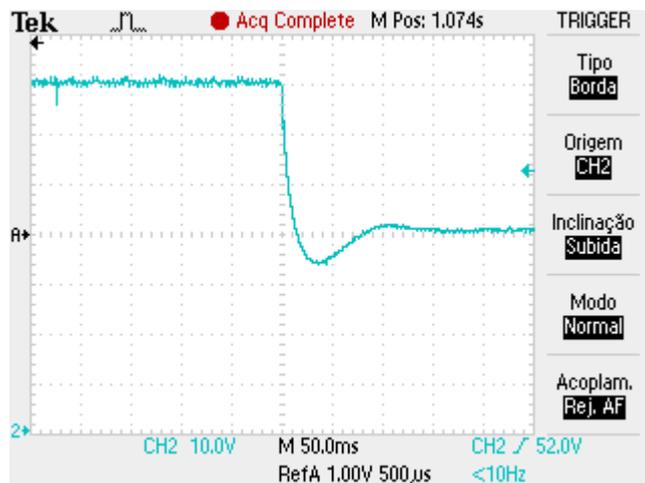


Figura 5.6 – Tempo de resposta do sistema para uma diminuição da referência de saída de 70 V para 40 V.

Através da Figura 5.6 pode-se constatar que o tempo que a tensão de saída demora a estabilizar é de aproximadamente 150 ms, para uma alteração de 30 V no valor de referência. As alterações na radiação incidente sobre uma instalação fotovoltaica variam de dia para dia, dependendo das condições climáticas. Em dias de céu limpo a radiação solar muda de forma gradual, não ocorrendo alterações substanciais de minuto

a minuto. Por outro lado, em dias enublados a situação complica-se e a radiação incidente pode mudar de forma significativa em apenas alguns segundos [41][42]. Posto isto, pode-se afirmar que mesmo para os cenários mais complicados, a velocidade de convergência apresentada pelo controlador pode ser considerada satisfatória. De referir que o tempo de resposta em regime transitório pode ser melhorado, no entanto outros parâmetros são afetados, tais como, o valor do *overshoot* que se torna mais elevado, a oscilação em torno da referência aumenta, assim como, a suscetibilidade a ruídos. Portanto, o tempo de resposta de 150 ms verificado resulta de um compromisso estabelecido entre a velocidade de convergência, o desempenho global do controlador e as características do microcontrolador utilizado, tendo em atenção a dinâmica apresentada pelas variáveis de um sistema solar fotovoltaico. O facto das grandezas que influenciam a produção de energia de um painel solar (radiação e temperatura) exibirem uma dinâmica não muito rápida, torna-se num aspeto positivo no desenvolvimento de uma solução de baixo custo, uma vez que o preço do microcontrolador reduz em conformidade com a velocidade/capacidade de processamento requerida.

Depois de verificada a resposta do sistema em regime transitório, efetuou-se um teste rápido para comprovar o funcionamento do controlador em regime permanente. Para uma tensão de entrada de 30 V foi definida uma referência de saída fixa de 50 V. Nesta situação, a nível teórico de acordo com a equação (2.18), o *duty-cycle* definido pelo controlador deve ser de 40%. Esse facto foi verificado e é comprovado pela Figura 5.7 apresentada em baixo. O canal 1 refere-se à tensão de entrada, o canal 2 à tensão de saída e o canal 3 representa o sinal de PWM aplicado à *gate* do MOSFET.

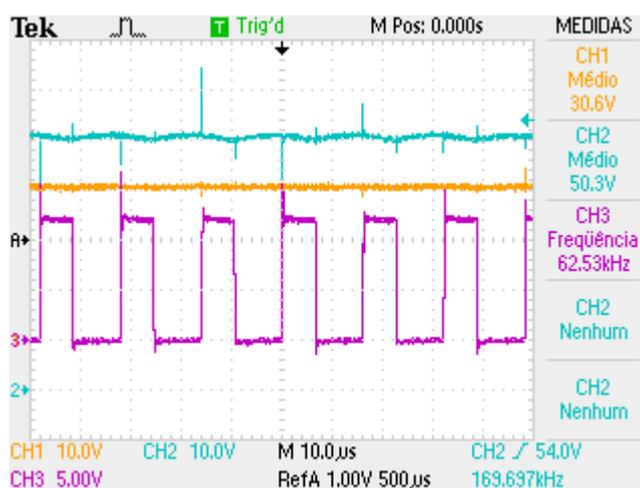


Figura 5.7 – Conversor *Boost* a operar em regime permanente para uma referência de saída fixa de 50 V e uma tensão de entrada de 30 V.

Para averiguar a resposta do sistema em regime permanente diminuiu-se a tensão de entrada para 20 V, tendo-se verificado que a tensão de saída se manteve próxima dos 50 V, uma vez que o controlador automaticamente incrementou o valor do *duty-cycle* de modo a respeitar o valor de referência estabelecido. Na Figura 5.8 pode-se observar que relativamente à Figura 5.7 a tensão de entrada é inferior, a tensão de saída é praticamente a mesma e o valor de *duty-cycle* determinado é superior.

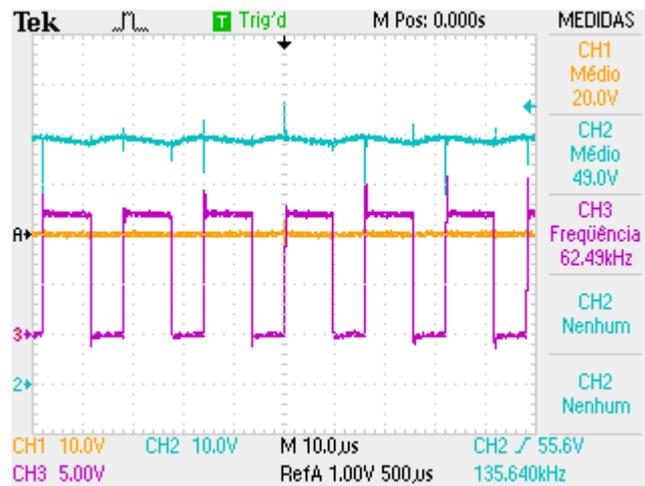


Figura 5.8 – Conversor *Boost* a operar em regime permanente para uma referência de saída fixa de 50 V e uma tensão de entrada de 20 V.

5.4. Validação do Algoritmo de Controlo MPPT

Nesta secção é apresentado o procedimento utilizado para validar o funcionamento do algoritmo de controlo MPPT implementado. Tal como já foi mencionado, em ambiente laboratorial não é possível utilizar um painel fotovoltaico para a realização dos testes experimentais. A solução encontrada para executar este ensaio passou pela utilização de uma fonte de tensão CC com um reóstato em série. O conjunto fonte CC mais reóstato formam o circuito equivalente de uma fonte de tensão CC não-ideal, que pode ser visto na Figura 5.9. Este modelo foi adotado porque mediante o valor de resistência definido pelo reóstato, é possível determinar teoricamente o valor máximo de potência que a fonte não-ideal é capaz de disponibilizar. Idealmente, esta condição ocorre quando o valor da resistência de carga é o mesmo que o valor da resistência interna da fonte (que é definido pelo reóstato), pois nestas circunstâncias a queda de tensão nas duas resistências é a mesma [43].

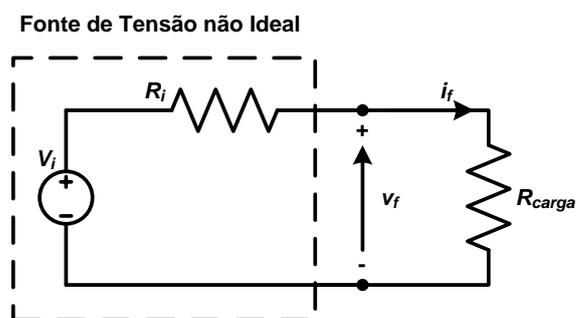


Figura 5.9 – Representação elétrica do modelo equivalente de uma fonte de tensão não-ideal.

Desta forma, ao ligar o conversor de potência aos terminais da fonte não-ideal, como é demonstrado na Figura 5.10, o algoritmo de controlo MPPT vai ter de atuar no sentido de garantir que a tensão na sua entrada é a mesma que a queda de tensão na resistência do reóstato (R_i). Uma vez assegurado o mesmo valor de tensão, tanto na resistência do reóstato como na entrada do conversor *Boost*, a potência disponibilizada pela fonte não-ideal é máxima.

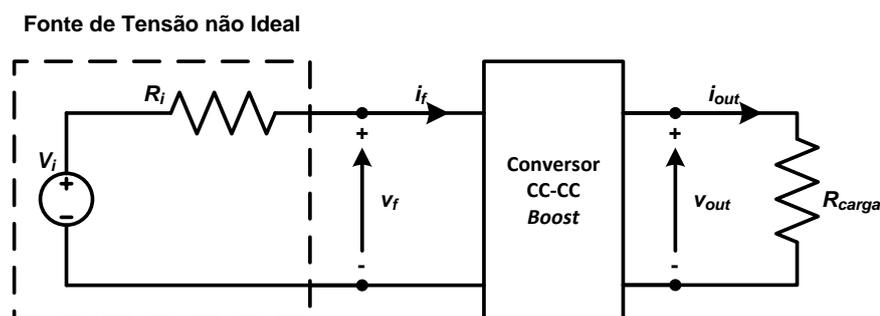


Figura 5.10 – Representação elétrica do modelo utilizado para validar o funcionamento do algoritmo de controlo MPPT.

Depois de estabelecida a metodologia para este ensaio, antes da sua realização prática efetuou-se o cálculo teórico da potência máxima que é possível extrair para diferentes valores de resistência do reóstato, quando a fonte de tensão CC apresenta uma tensão de 40 V. Numa perspetiva ideal a queda de tensão na resistência em série e na entrada do conversor deve ser 20 V, através da equação (5.1) e de acordo com o valor da resistência do reóstato consegue-se determinar o valor máximo de potência.

$$P_{max} = \frac{V^2}{R_i} \tag{5.1}$$

O passo anterior é bastante importante, pois permite aferir se o algoritmo está a funcionar corretamente, pela comparação do valor teórico com o valor de potência

obtido experimentalmente com recurso à técnica de controlo MPPT. Para a medição dos valores de tensão, de corrente e conseqüentemente da potência requerida pelo conversor *Boost* colocou-se um wattímetro aos terminais da sua entrada.

Deste modo, sabendo a potência máxima teórica que a fonte é capaz de fornecer, bem como, a potência extraída pelo conversor através do wattímetro é possível determinar a eficácia do algoritmo MPPT implementado. Para além da potência de entrada também se verificou a capacidade do conversor em elevar a tensão de saída, colocando outro wattímetro na sua saída para efetuar a medida dessa grandeza.

Inicialmente o algoritmo testado foi o de Condutância Incremental por apresentar maior fiabilidade e eficácia, tal como foi referido nos capítulos anteriores. Porém, os resultados obtidos com esta técnica não foram satisfatórios. O controlo resultante com este algoritmo demonstrou ser instável, nunca se atingiu o valor teórico de potência calculado e por vezes estabilizava num valor de potência que não correspondia ao valor máximo. Estes problemas devem-se primordialmente à dificuldade de implementação deste algoritmo num microcontrolador *fixed-point* e com poucos recursos, como é o caso. Os cálculos e os ajustes que este método implica são exigentes e o facto de o microcontrolador não permitir a visualização do estado das variáveis em tempo real, dificulta bastante o processo de adaptação do algoritmo ao sistema. Tentou-se ultrapassar esta última contrariedade com o envio do estado de algumas variáveis através da porta série, no entanto esta solução é lenta e consome capacidade de processamento que é essencial para a execução das tarefas desta técnica.

Pelos motivos supracitados e de modo a cumprir as especificações impostas para esta Dissertação, em particular, que se pretende uma solução de baixo custo, foi necessário optar por uma técnica de controlo MPPT cuja implementação fosse mais simples, em vez da substituição do microcontrolador. Por conseguinte, a técnica utilizada foi a de Perturbação e Observação, em que os resultados obtidos demonstraram desde cedo serem significativamente melhores que os conseguidos com a técnica anterior. Com este método conseguiu-se obter valores de potência bastante próximos aos dos cálculos teóricos, somente com uma pequena oscilação em torno do ponto de máxima potência.

A Tabela 5.2 contém os resultados obtidos no ensaio que permitiu confirmar o funcionamento do algoritmo de Perturbação e Observação implementado. O procedimento utilizado foi o descrito anteriormente e os resultados presentes na tabela foram medidos através dos wattímetros colocados nos terminais de entrada e saída do

Seguidor do Ponto de Máxima Potência Multi-Convertor para Sistemas Solares Fotovoltaicos. É importante mencionar que em virtude do princípio de operação do algoritmo testado, os valores visualizados nos wattímetros apresentam uma ligeira flutuação. De forma a ser o mais rigoroso possível os valores mencionados na tabela são uma aproximação aos valores médios verificados. Na Figura 5.11 são demonstrados os valores da potência de entrada e da tensão de saída do conversor *Boost* (da esquerda para a direita, respetivamente), quando a resistência do reóstato apresentava um valor de 20 Ω . Para este ensaio optou-se por mostrar só uma imagem relativa aos resultados obtidos, pois foram testadas diversas situações e apresentar imagens para todas elas não acrescentava valor aos resultados alcançados.

Tabela 5.2 – Resultados obtidos no ensaio ao algoritmo de controlo MPPT Perturbação e Observação.

Tensão Fonte Ideal (V)	Resistência Reóstato (Ω)	Potência Teórica (W)	Potência Extraída (W)	Corrente Entrada Conversor (A)	Tensão Entrada Conversor (V)	Tensão Saída Conversor (V)	Rendimento MPPT (%)
40	10	40	39,5	1,72	23	54	98,75
	15	26,6	26	1,18	22	43	97,74
	20	20	19,5	1	19,5	37	97,5
	25	16	15,5	0,86	18	33	96,88
	30	13,4	12,5	0,69	18	30	93,28
	35	11,4	10,5	0,57	18,5	28	92,10
	40	10	9	0,50	18	26	90

Pela análise dos dados apresentados na Tabela 5.2, ao comparar os valores da potência extraída com a potência teórica, pode-se concluir que o algoritmo Perturbação e Observação foi capaz de responder de forma satisfatória às mudanças no valor de resistência do reóstato, que por sua vez tem repercussões na potência máxima que a fonte CC não-ideal é capaz de disponibilizar. Para além disso, é interessante indicar que a queda de tensão verificada na entrada do conversor *Boost* manteve-se perto dos 20 V teóricos espectáveis. No que diz respeito ao rendimento deste método, no melhor caso obteve-se 98,75%. Este facto deve-se em grande parte ao valor reduzido da variável de perturbação, que permitiu diminuir a oscilação em torno do ponto de máxima potência, inerente a este método, em regime permanente.

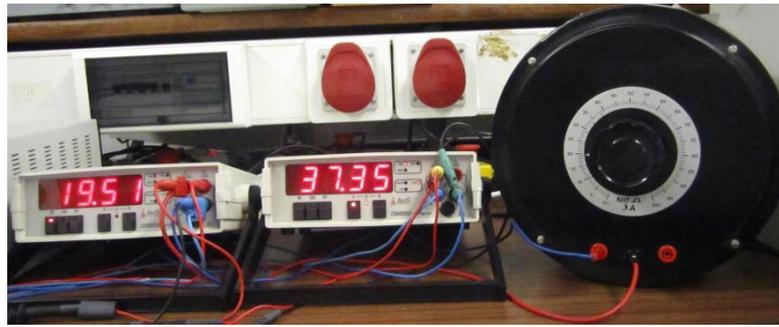


Figura 5.11 – Potência de entrada (wattímetro da esquerda) e tensão de saída (wattímetro da direita) do conversor *Boost* para a situação em que $R_i = 20 \Omega$.

5.5. Teste da Topologia *Module Integrated Converter*

Após validar o funcionamento de todos os elementos constituintes do protótipo desenvolvido, o passo seguinte consistiu em comprovar experimentalmente que a topologia *Module Integrated Converter* (MIC) é capaz de minimizar o efeito sombra sobre um, ou mais, painéis de uma instalação solar fotovoltaica. O procedimento utilizado para a realização deste ensaio encontra-se ilustrado na Figura 5.12. Como é possível observar o sistema é composto por dois Seguidores do Ponto de Máxima Potência Dinâmico para Sistemas Solares Fotovoltaicos, conectados em série através das suas saídas. Nas entradas de cada conversor é utilizado o modelo descrito no ensaio da secção anterior que permite emular, de certa forma, o ganho ou a perda de potência de um painel fotovoltaico tal como se verifica na realidade.

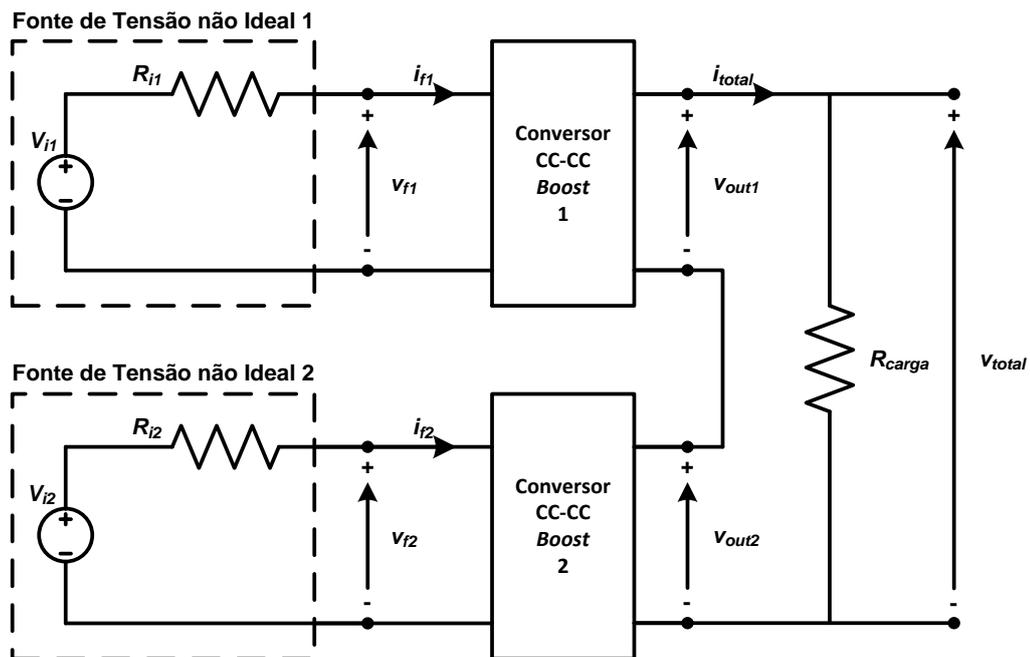


Figura 5.12 – Representação elétrica do modelo utilizado para validar a topologia MIC.

O que se pretende demonstrar com o sistema da Figura 5.12 é que através da configuração MIC, quando ocorre a diminuição da potência na entrada de um dos conversores, não se verificam consequências na potência extraída pelo outro elemento. Para isso, colocou-se um wattímetro na entrada do conversor *CC Boost* 1 que é responsável por medir a potência requerida por esse elemento e colocou-se um segundo wattímetro em paralelo com a carga resistiva (R_{carga}) para medir a potência total do sistema. Deste modo, ao aumentar ou diminuir a potência que a fonte CC não-ideal consegue disponibilizar ao conversor *Boost* 2, através do wattímetro 1 é possível verificar se a potência do conversor 1 se alterou devido ao ganho ou à perda de potência no conversor 2. Para além dos wattímetros, colocou-se dois multímetros a medir a tensão de saída de cada um dos conversores, o que permite observar de que forma estes se adaptam perante as alterações das condições de funcionamento em um dos conversores. Adicionalmente foram medidas as tensões de entrada e de saída de cada conversor através do osciloscópio. A Figura 5.13 mostra a bancada de trabalho implementada para a execução deste ensaio.

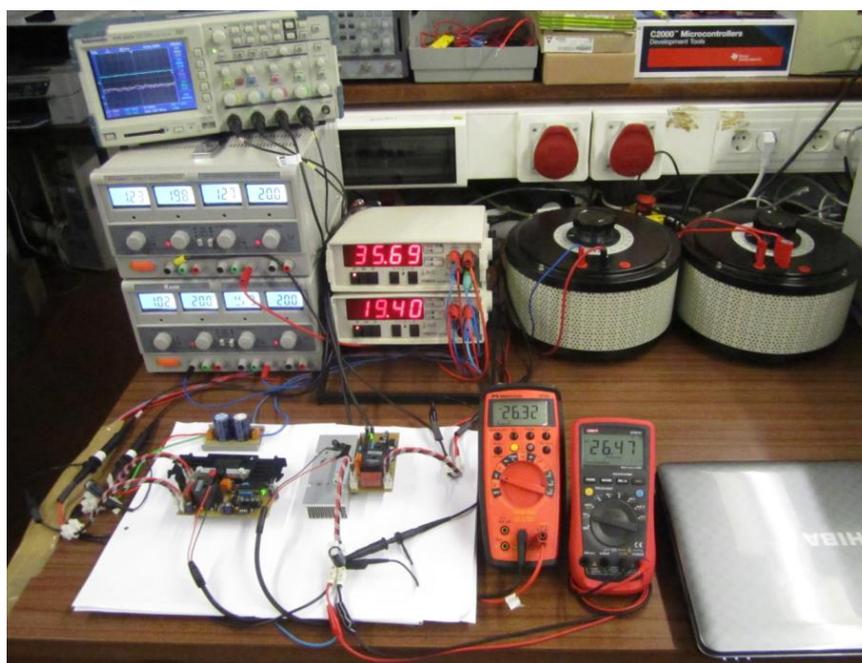


Figura 5.13 – Bancada de teste para a validação da topologia MIC.

É importante referir que para todos os ensaios efetuados nesta secção o valor de tensão das fontes CC ideais é sempre de 40 V.

Terminada a preparação do ensaio, em primeiro lugar verificou-se a resposta do sistema quando os dois conversores operam nas mesmas condições. Na Tabela 5.3 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 5.3 – Ensaio 1: Resposta dos dois conversores para as mesmas condições de funcionamento.

Ri 1	Ri 2	Wattímetro 1 (Baixo)			Wattímetro 2 (Cima)			Mult. 1 (Esq.)	Mult. 2 (Drt.)
		Potência Entrada	Corrente Entrada	Tensão Entrada	Potência Total	Corrente Total	Tensão Total	Tensão Saída 1	Tensão Saída 2
20 Ω	20 Ω	19,5 W	1 A	19,5 V	35,5 W	0,68 A	52 V	26 V	26 V

Dos valores indicados na tabela anterior, importa salientar que para as mesmas condições de funcionamento os dois conversores contribuem de modo igual para alimentar a carga resistiva, pois a tensão de saída em ambos é de 26 V. Ao comparar a potência extraída pelo conversor 1, com o ensaio efetuado para validar o algoritmo de controlo MPPT, para o mesmo valor de resistência, pode-se constatar que o conversor 1 para este ensaio também foi capaz de extrair a potência máxima que a fonte CC não-ideal foi capaz de conceder. Na Figura 5.14 encontram-se os resultados dos instrumentos de medida que permitem comprovar os dados deste primeiro teste. Na Figura 5.14 (b), o canal 1 indica a tensão de entrada e o canal 2 a tensão de saída do conversor 1. O canal 3 é referente à tensão de entrada e o canal 4 à tensão de saída do conversor 2. Os resultados do osciloscópio, apresentados ao longo desta secção, são coerentes com esta descrição. Pela observação da Figura 5.14 (b) pode-se constatar que a tensão na entrada dos dois conversores é próxima dos 20 V teóricos mencionados na secção precedente. Por isso, a potência total do sistema, considerando as perdas nos conversores, resulta do somatório das potências máximas disponíveis.

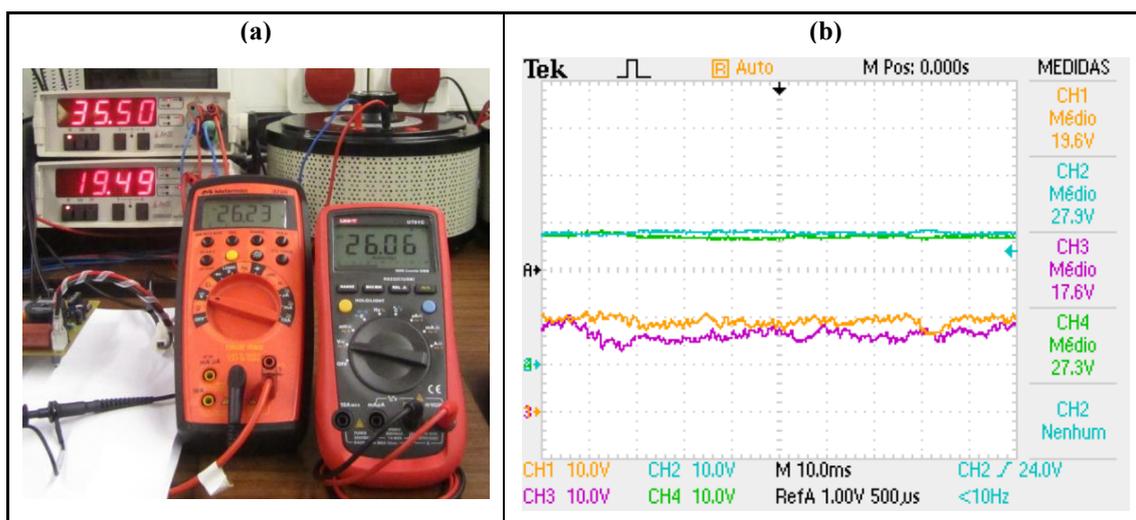


Figura 5.14 – Resultados obtidos para o ensaio 1. (a) Potência de entrada do conversor 1 (wattímetro de baixo) e Potência total do sistema (wattímetro de cima), Tensão de saída do conversor 1 (multímetro da esquerda) e Tensão de saída do conversor 2 (multímetro da direita). (b) Formas de onda da tensão de entrada (canal 1 e 3) e de saída (canal 2 e 4) do conversor 1 e 2.

O segundo ensaio consistiu em aumentar o valor da resistência do reóstato 2, provocando uma diminuição na potência do conversor *Boost 2*. Desta forma, emula-se experimentalmente o aparecimento de uma sombra e é possível verificar de que forma o conversor 1 reage a esta mudança. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Ensaio 2: Diminuição do valor de potência no conversor 2.

Ri 1	Ri 2	Wattímetro 1 (Baixo)			Wattímetro 2 (Cima)			Mult. 1 (Esq.)	Mult. 2 (Drt.)
		Potência Entrada	Corrente Entrada	Tensão Entrada	Potência Total	Corrente Total	Tensão Total	Tensão Saída 1	Tensão Saída 2
20 Ω	25 Ω	19,36 W	0,99 A	19,5 V	32,5 W	0,64 A	51 V	28 V	23 V

Da análise dos dados precedentes pode-se concluir que para uma diminuição da potência no conversor 2, a potência no conversor 1 manteve-se praticamente a mesma do ensaio 1. A pequena diferença que existe deve-se à oscilação característica do algoritmo Perturbação e Observação. A potência extraída pelo conversor 1 não foi afetada, porque quando a potência no conversor 2 diminuiu, a corrente de saída do sistema automaticamente também decresceu até atingir a corrente de MPP (*Maximum Power Point*) do conversor 2. Perante essa alteração, o conversor 1 para assegurar as condições de funcionamento que lhe permitem extrair a potência máxima da sua fonte CC não-ideal, compensou a diminuição da corrente com o aumento da tensão de saída. Comparativamente com o ensaio 1, neste caso, a sua tensão de saída foi superior 2 V. Por sua vez, em virtude da perda de potência, a tensão de saída do conversor 2 foi menor 3 V. Estes resultados são suportados pela Figura 5.15.

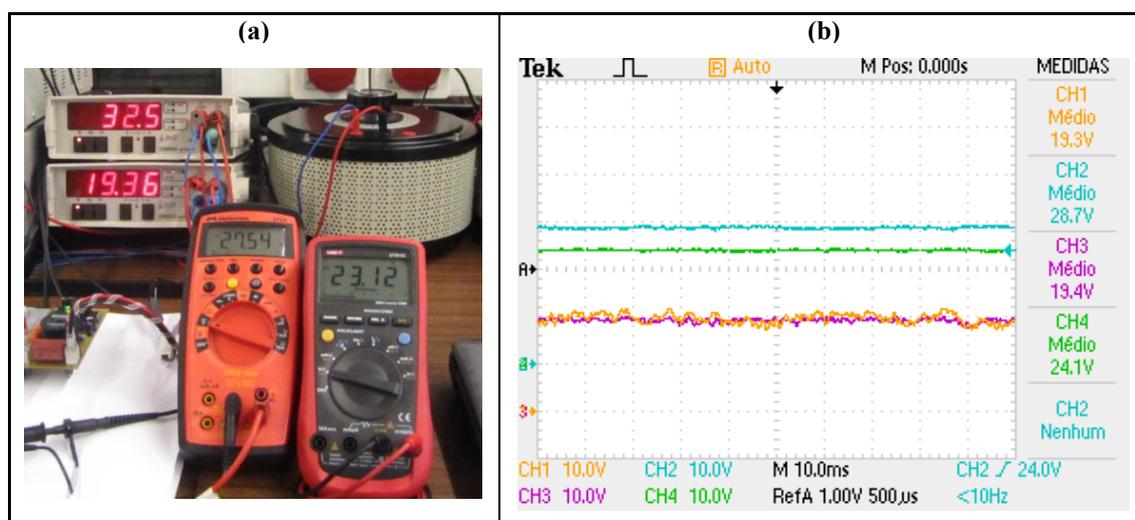


Figura 5.15 – Resultados obtidos para o ensaio 2. (a) Potência de entrada do conversor 1 (wattímetro de baixo) e Potência total do sistema (wattímetro de cima), Tensão de saída do conversor 1 (multímetro da esquerda) e Tensão de saída do conversor 2 (multímetro da direita). (b) Formas de onda da tensão de entrada (canal 1 e 3) e de saída (canal 2 e 4) do conversor 1 e 2.

No terceiro ensaio realizado, a situação testada foi a contrária ao caso anterior. Desta vez emulou-se um ganho de potência no conversor 2, com o objetivo de comprovar que para as mesmas condições de funcionamento do ensaio anterior no conversor 1 ($R_{i1} = 20 \Omega$), o conversor 2 não é limitado por esse elemento e é capaz de acompanhar o aumento da potência, provocando um incremento na potência total do sistema. Os resultados obtidos para este ensaio são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Ensaio 3: Aumento do valor de potência no conversor 2.

Ri 1	Ri 2	Wattímetro 1 (Baixo)			Wattímetro 2 (Cima)			Mult. 1 (Esq.)	Mult. 2 (Drt.)
		Potência Entrada	Corrente Entrada	Tensão Entrada	Potência Total	Corrente Total	Tensão Total	Tensão Saída 1	Tensão Saída 2
20 Ω	15 Ω	19,5 W	1,03 A	19 V	43 W	0,74 A	58 V	24 V	34 V

De acordo com os resultados anteriores, verifica-se que a potência no conversor 1 não manifestou qualquer alteração significativa. No entanto, é possível constatar que a potência total do sistema aumentou de forma evidente, aproximadamente mais 10,5 W. Este facto indica que o funcionamento dos dois conversores é individualizado e independente um do outro, com o intuito de manter as condições ideais para que seja possível maximizar a produção de energia do painel a que estão associados, na situação em questão, da fonte de tensão CC não-ideal, o que permite validar os fundamentos da topologia *Module Integrated Converter*. Na Figura 5.16 são mostrados os resultados conseguidos através dos instrumentos de medida.

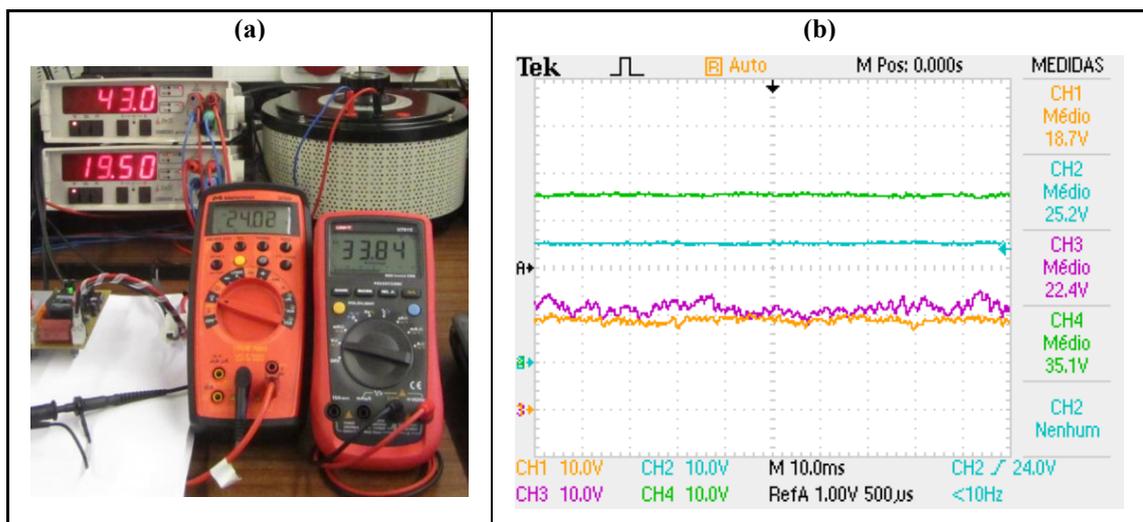


Figura 5.16 – Resultados obtidos para o ensaio 3. (a) Potência de entrada do conversor 1 (wattímetro de baixo) e Potência total do sistema (wattímetro de cima), Tensão de saída do conversor 1 (multímetro da esquerda) e Tensão de saída do conversor 2 (multímetro da direita). (b) Formas de onda da tensão de entrada (canal 1 e 3) e de saída (canal 2 e 4) do conversor 1 e 2.

O quarto ensaio elaborado consistiu em emular novamente um aumento de potência, mas agora no conversor 1. O que se pretende provar é que independentemente do conversor onde ocorre o ganho ou perda de potência, o outro elemento não é afetado. A Tabela 5.6 demonstra os resultados conseguidos neste ensaio.

Tabela 5.6 – Ensaio 4: Aumento do valor de potência no conversor 1.

Ri 1	Ri 2	Wattímetro 1 (Baixo)			Wattímetro 2 (Cima)			Mult. 1 (Esq.)	Mult. 2 (Drt.)
		Potência Entrada	Corrente Entrada	Tensão Entrada	Potência Total	Corrente Total	Tensão Total	Tensão Saída 1	Tensão Saída 2
10 Ω	15 Ω	39,3 W	1,87 A	21 V	62,1 W	0,9 A	69 V	41 V	28 V

Tal como já era de esperar, pela análise dos dados anteriores pode-se constatar que ocorreu um aumento na potência total do sistema, em resposta ao ganho de potência no conversor 1. Adicionalmente verificou-se que para esta situação, a tensão de saída do conversor 1 aumentou quase para o dobro quando comparado com o ensaio prévio. Na Figura 5.17 podem-se visualizar os resultados medidos experimentalmente para este teste. Até ao momento ainda não se fez referência às formas de onda da tensão de saída de ambos os conversores, que pela sua análise através da Figura 5.17 (b) é possível concluir que apenas apresentam uma ligeira oscilação. Este aspeto é positivo, uma vez que numa aplicação em que a instalação fotovoltaica é ligada a um inversor central, conseguir manter o barramento CC estável é um fator importante.

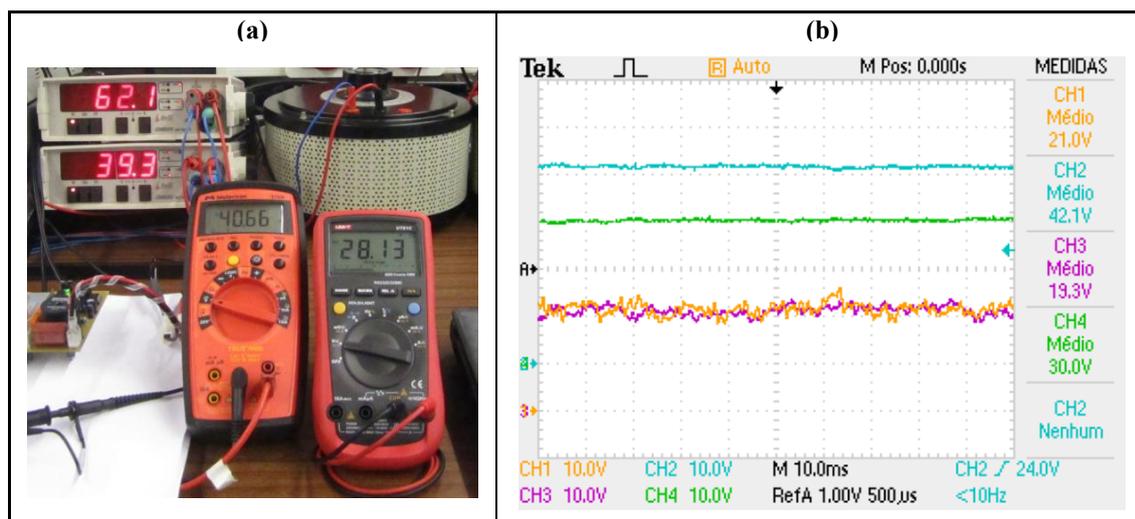


Figura 5.17 – Resultados obtidos para o ensaio 4. (a) Potência de entrada do conversor 1 (wattímetro de baixo) e Potência total do sistema (wattímetro de cima), Tensão de saída do conversor 1 (multímetro da esquerda) e Tensão de saída do conversor 2 (multímetro da direita). (b) Formas de onda da tensão de entrada (canal 1 e 3) e de saída (canal 2 e 4) do conversor 1 e 2.

Para terminar este conjunto de ensaios, diminuiu-se o valor de resistência do reóstato 2, colocando os dois conversores a funcionar nas mesmas condições de operação, só que desta vez com um valor de potência superior. Tendo-se verificado que naturalmente a potência total do sistema aumentou e que os dois conversores apresentam valores muito próximos na tensão de saída, contribuindo de forma semelhante para alimentar a carga resistiva. Na Tabela 5.7 são apresentados os resultados alcançados para este ensaio.

Tabela 5.7 – Ensaio 5: Aumento do valor de potência no conversor 2.

Ri 1	Ri 2	Wattímetro 1 (Baixo)			Wattímetro 2 (Cima)			Mult. 1 (Esq.)	Mult. 2 (Drt.)
		Potência Entrada	Corrente Entrada	Tensão Entrada	Potência Total	Corrente Total	Tensão Total	Tensão Saída 1	Tensão Saída 2
10 Ω	10 Ω	39,4 W	1,92 A	20,5 V	72,6 W	0,97 A	75 V	37 V	38 V

A Figura 5.18 mostra os resultados obtidos através dos instrumentos de medida para este último teste. É importante relembrar, que também para esta situação, a tensão aos terminais das entradas dos dois conversores permanece perto dos 20 V, Figura 5.18 (b), o que permite confirmar que o algoritmo de controlo MPPT implementado está a funcionar corretamente.

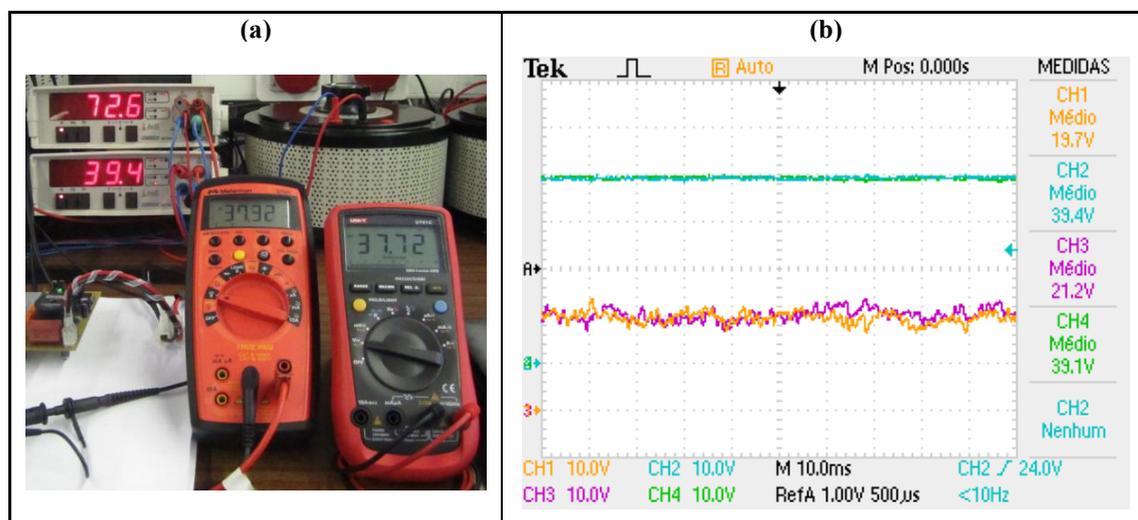


Figura 5.18 – Resultados obtidos para o ensaio 5. (a) Potência de entrada do conversor 1 (wattímetro de baixo) e Potência total do sistema (wattímetro de cima), Tensão de saída do conversor 1 (multímetro da esquerda) e Tensão de saída do conversor 2 (multímetro da direita). (b) Formas de onda da tensão de entrada (canal 1 e 3) e de saída (canal 2 e 4) do conversor 1 e 2.

Na Figura 5.19 são apresentados os sinais de PWM determinados individualmente pelas unidades de controlo, para uma situação em que ambos os conversores estão a

funcionar nas mesmas condições. A forma de onda a roxo representa o sinal de PWM do conversor 1, enquanto que a verde corresponde ao do conversor 2, podendo-se verificar que o sinal aplicado à *gate* dos MOSFETs é semelhante.

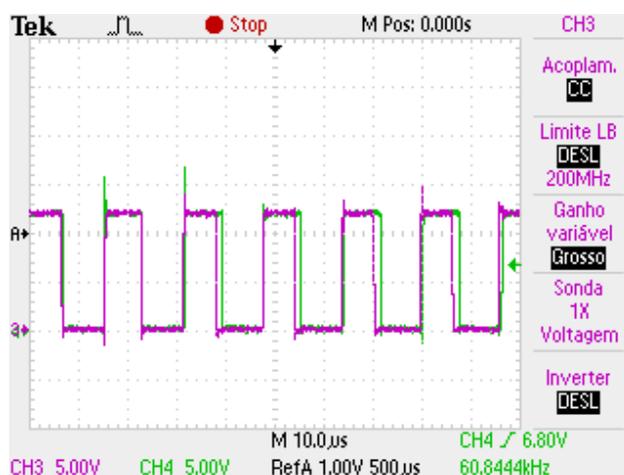


Figura 5.19 – Valores de *duty-cycle* determinados pelas unidades de controlo dos dois conversores para as mesmas condições de funcionamento.

Por outro lado, a Figura 5.20 mostra os sinais de PWM determinados para diferentes condições de operação nos dois conversores ($R_{i1} = 10 \Omega$ e $R_{i2} = 20 \Omega$). Desta forma, consegue-se demonstrar que o controlo de cada conversor é individualizado, visto que para esta situação os sinais de controlo resultantes são distintos.

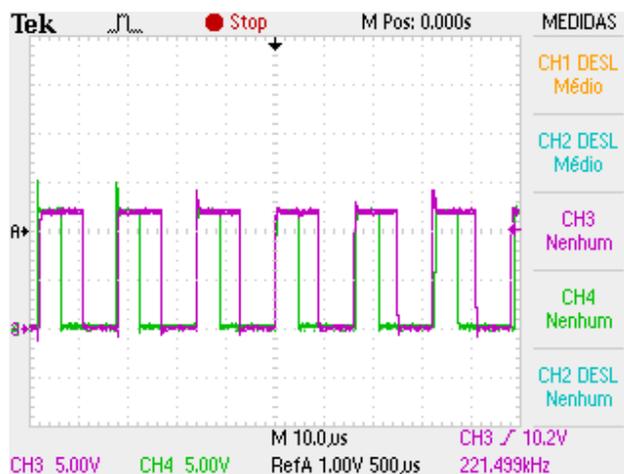


Figura 5.20 – Valores de *duty-cycle* determinados pelas unidades de controlo dos dois conversores para condições de funcionamento diferentes.

Finalizada a exposição dos resultados desta secção, é importante mencionar que relativamente ao *hardware* descrito no Capítulo 4, foi necessário colocar um condensador eletrolítico de $470 \mu\text{F}/100 \text{V}$ em paralelo com o condensador de polipropileno de cada conversor CC-CC *Boost*. A necessidade deste condensador surgiu

devido ao princípio de funcionamento do algoritmo MPPT, que ininterruptamente introduz uma perturbação na tensão de operação do painel fotovoltaico. Este facto contribui para que a tensão de saída resultante de cada conversor apresente alguma flutuação. Ao acrescentar o condensador referido, essa flutuação é substancialmente minimizada e para além disso, como os conversores estão dispostos em série a tensão total do sistema, proveniente do somatório das tensões individuais de saída de cada conversor fica consideravelmente mais estável.

5.6. Teste em Ambiente Real de Aplicação

Após confirmar o funcionamento do Seguidor do Ponto de Máxima Potência Multi-Conversor para Sistemas Solares Fotovoltaicos implementado e de comprovar que a topologia *Module Integrated Converter* permite mitigar os problemas associados ao efeito sombra, em ambiente laboratorial, estavam reunidas todas as condições necessárias para a realização de ensaios em ambiente real de aplicação. Para isso foram utilizados os painéis solares BP2150S da empresa BP Solar mostrados na Figura 5.21. De referir que no painel mais à direita se encontra um piranómetro, cuja função é medir a radiação solar sobre uma superfície, e nos outros dois painéis foram testados os conversores de potência implementados.



Figura 5.21 – Painéis solares BP2150S usados nos ensaios em ambiente real.

Com os ensaios no terreno pretende-se demonstrar que a solução desenvolvida cumpre os objetivos propostos para esta Dissertação, permitindo otimizar o rendimento de uma instalação solar fotovoltaica e compensar o efeito sombra sobre um, ou mais, painéis. Na Figura 5.22 encontra-se a montagem efetuada no exterior para a obtenção desses resultados. Apenas foram utilizados instrumentos de medida, visto que o

protótipo desenvolvido recorre exclusivamente ao painel solar para obter a energia requerida para o seu funcionamento. Foram usados dois wattímetros, um deles responsável por medir a potência extraída do painel solar 1, enquanto que o segundo tem a função de medir a potência total da instalação. Assim, com a introdução de uma sombra no painel solar 2 é possível observar se a potência no painel 1 é afetada, e verificar em que medida a potência total do sistema é prejudicada em consequência do efeito sombra. Para além dos wattímetros, foram utilizados três multímetros, um para medir a tensão de saída do piranómetro e os outros dois para medirem a tensão de saída dos conversores de potência. Com a utilização destes dois últimos instrumentos de medida consegue-se observar de que forma os conversores se adaptam perante o aparecimento de uma sombra em um dos painéis. É importante mencionar que o piranómetro utilizado foi o PYR-P da empresa *Apogee*. O seu princípio de funcionamento é bastante simples, uma vez que para se obter o valor correspondente de radiação solar incidente apenas é necessário multiplicar por cinco o valor de tensão adquirido na sua saída [44].

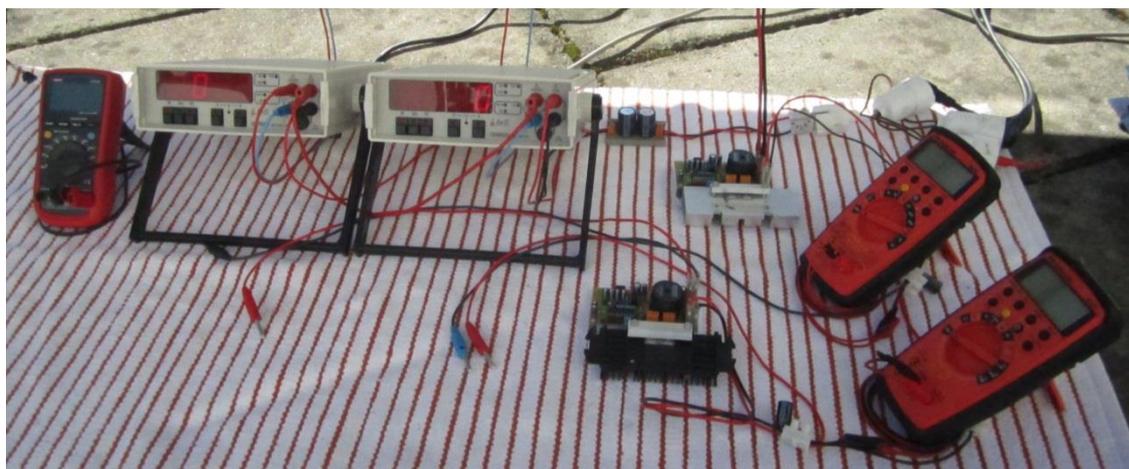


Figura 5.22 – Montagem efetuada na parte de trás dos painéis fotovoltaicos para a realização dos testes práticos.

A metodologia utilizada para a realização dos testes no exterior fundamentou-se na comparação do desempenho da instalação solar, sem e com o contributo do conversor de potência desenvolvido em duas situações distintas. Na primeira a radiação solar incidente distribui-se de forma uniforme pelos dois painéis, enquanto que na segunda é introduzida uma sombra no painel solar 2.

Para os resultados apresentados nesta secção, os ensaios em ambiente real foram executados no dia 8-10-2013 e tiveram início às 15:10 com o céu completamente limpo.

Recorrendo à câmara termográfica FLIR tirou-se uma imagem térmica da parte traseira dos painéis solares, visto que para além da radiação o valor de temperatura também condiciona a potência disponibilizada por um painel. A temperatura verificada foi de 53,4 °C, tal como se pode observar na Figura 5.23. O valor da radiação incidente sobre os painéis foi determinado pelo sensor (piranómetro) em cada um dos testes efetuados, sendo o seu valor medido através do multímetro 1 (Figura 5.22 lado esquerdo).

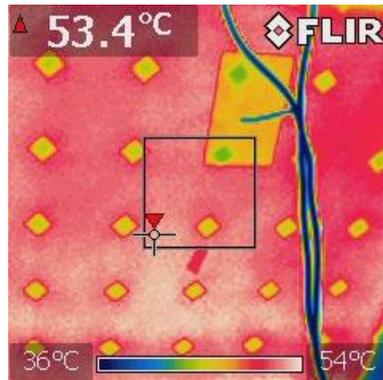


Figura 5.23 – Imagem térmica da parte de trás dos painéis solares.

Para as condições de radiação uniforme, em primeiro lugar ligou-se unicamente os dois painéis solares em série com uma carga resistiva, tendo-se obtido os valores de potência apresentados na Figura 5.24.

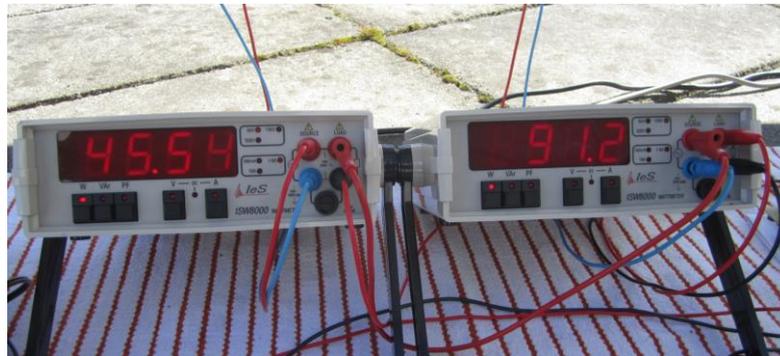


Figura 5.24 – Potência obtida com dois painéis fotovoltaicos ligados em série com uma carga resistiva (Wattímetro da esquerda: Potência painel solar 1, Wattímetro da direita: Potência total da instalação).

Logo de seguida procedeu-se ao mesmo teste, mas com os painéis ligados em série à carga resistiva através da saída dos seus conversores CC-CC *Boost* dedicados. Os valores de potência e de tensão verificados são apresentados na Figura 5.25.

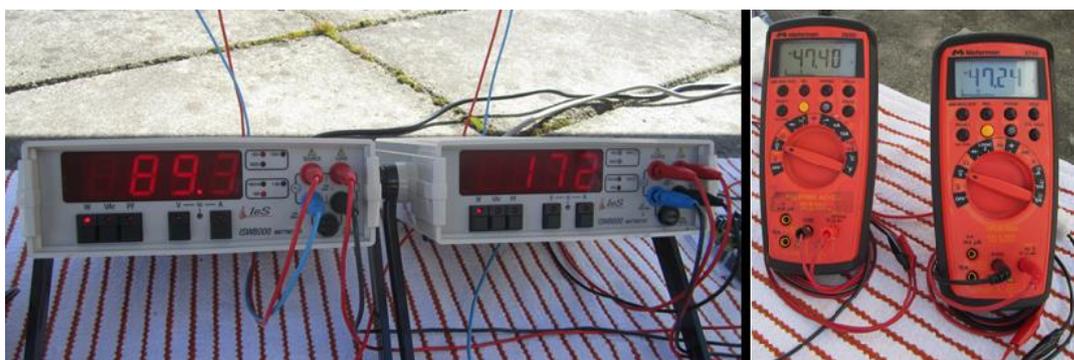


Figura 5.25 – Potência obtida com dois painéis fotovoltaicos ligados em série através dos seus conversores de potência dedicados (Wattímetro da esquerda: Potência painel solar 1, Wattímetro da direita: Potência total da instalação, Multímetro da esquerda: Tensão de saída do conversor 2, Multímetro da direita: Tensão saída do conversor 1).

Pela comparação das imagens anteriores, torna-se evidente que a potência extraída dos painéis fotovoltaicos aumentou significativamente, praticamente para o dobro, quando os Seguidores do Ponto de Máxima Potência Dinâmico para Sistemas Solares Fotovoltaicos foram incluídos na instalação. Deste modo, pode-se afirmar que o algoritmo de controlo MPPT implementado funcionou corretamente, no sentido de extrair a potência máxima dos painéis solares. Da Figura 5.25 é relevante mencionar o facto de que para as mesmas condições de funcionamento a tensão de saída nos dois conversores é aproximadamente a mesma.

Assim, pode-se afirmar que o primeiro objetivo para esta Dissertação foi cumprido, pois conseguiu-se otimizar a produção de energia com recurso à solução desenvolvida e reforçar através deste ensaio a importância dos circuitos de potência com controlo baseado em algoritmos MPPT nos sistemas solares fotovoltaicos. Na Tabela 5.8 são apresentados todos os resultados registados para este ensaio através dos diferentes instrumentos de medida.

Tabela 5.8 – Ensaio 1: Radiação solar distribuída de forma uniforme pela instalação solar.

Sensor de Radiação	Radiação Solar	Wattímetro 1 (Esquerda)			Wattímetro 2 (Direita)		
		Potência Painel 1	Tensão Painel 1	Corrente Painel 1	Potência Total	Tensão Total	Corrente Total
165 mV	825 W/m ²	45,54 W	34,57 V	1,32 A	91,2 W	69,1 V	1,32 A
161 mV	805 W/m ²	89,3 W	29 V	3,1 A	172 W	94.5 V	1,82 A

■ Sem um conversor dedicado por painel solar.

■ Com um conversor dedicado por painel solar.

Analisando a Tabela 5.8, para além do que já foi dito, pode-se constatar que a potência total da instalação aumentou de forma substancial, bem como, a tensão de

saída total, confirmando a capacidade do conversor *Boost* em elevar a tensão do painel a que está associado.

Depois de comprovar que o protótipo desenvolvido é capaz de otimizar o rendimento de uma instalação solar, o passo seguinte consistiu em validar a topologia MIC defendida ao longo desta Dissertação. Para isso, simulou-se o aparecimento de uma sombra em um dos painéis. A Figura 5.26 ilustra a sombra introduzida no painel 2 durante a realização deste ensaio.



Figura 5.26 – Introdução de uma sombra no painel solar 2.

De modo análogo ao ensaio anterior, em primeiro lugar verificou-se a resposta da instalação solar à introdução da sombra sem a presença dos conversores, tendo-se obtido os valores de potência apresentados na Figura 5.27.

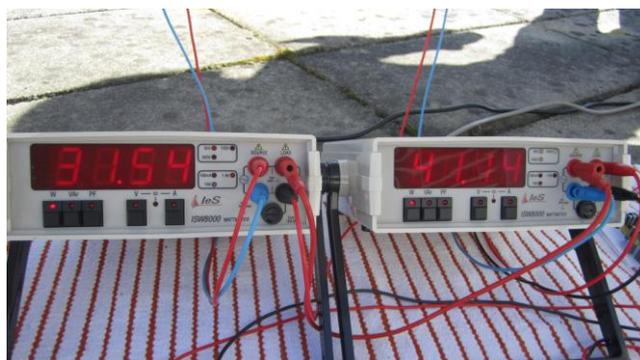


Figura 5.27 – Potência obtida com dois painéis fotovoltaicos ligados em série com uma carga resistiva quando é introduzida uma sombra no painel 2 (Wattímetro da esquerda: Potência painel solar 1, Wattímetro da direita: Potência total da instalação).

Em seguida, verificou-se o comportamento da instalação com os conversores de potência ligados em série. Na Figura 5.28 são demonstrados os valores de potência e de tensão alcançados para esta situação.



Figura 5.28 – Potência obtida com dois painéis fotovoltaicos ligados em série através dos seus conversores de potência dedicados quando é introduzida uma sombra no painel 2 (Wattímetro da esquerda: Potência painel solar 1, Wattímetro da direita: Potência total da instalação, Multímetro da esquerda: Tensão de saída do conversor 2, Multímetro da direita: Tensão saída conversor 1).

Comparando os ensaios em que os conversores de potência estão presentes na instalação solar, é possível observar uma ligeira diminuição da potência no painel 1 no segundo ensaio, que não se deve à introdução da sombra, mas sim a uma pequena redução no valor de radiação relativamente ao primeiro ensaio, tal como se pode verificar pela Tabela 5.8 e Tabela 5.9.

Confrontando os resultados da Figura 5.27, com os resultados da Figura 5.24 é possível constatar que a potência do painel 1 foi afetada pela sombra introduzida no painel 2. Por outro lado, analisando os resultados da Figura 5.28 e da Figura 5.25 pode-se concluir que com a integração dos conversores na instalação, apesar da sombra no painel 2, a potência extraída do painel solar 1 permanece praticamente a mesma. Isto ocorreu porque o controlo do conversor 1 ajustou-se dinamicamente de modo a manter as condições de operação ótimas, para que fosse possível extrair a potência máxima do painel a que estava acoplado. Este facto é confirmado pelo valor de tensão apresentado pelo multímetro da direita na Figura 5.28, que quando comparado com o valor obtido na Figura 5.25, percebe-se que é superior em mais de 10 V. O aumento da tensão de saída do conversor 1 ocorreu como forma de compensar a diminuição da corrente de saída do sistema, em virtude da sombra introduzida no painel 2. Todos os resultados obtidos para o segundo ensaio podem ser visualizados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Ensaio 2: Introdução de uma sombra no painel 2.

Sensor de Radiação	Radiação Solar	Wattímetro 1 (Esquerda)			Wattímetro 2 (Direita)		
		Potência Painel 1	Tensão Painel 1	Corrente Painel 1	Potência Total	Tensão Total	Corrente Total
164 mV	820 W/m ²	31,54 W	35,64 V	0,88 A	41,14 W	46,34 V	0,88 A
159 mV	795 W/m ²	87,8 W	31,10 V	2,82 A	104,6 W	73,5 V	1,42 A

Sem um conversor dedicado por painel solar.

Com um conversor dedicado por painel solar.

Avaliando os resultados apresentados na Tabela 5.9 é possível demonstrar o valor do trabalho exposto ao longo deste documento, uma vez que permitem aferir que o protótipo desenvolvido é funcional e que através da topologia MIC proporcionou uma melhoria assinalável no desempenho da instalação solar fotovoltaica. Os valores totais de potência e de tensão alcançados com a solução implementada são muito superiores aos registados para a situação que não a engloba.

Para terminar os ensaios em ambiente real, recorrendo novamente à câmara termográfica, foi tirada uma imagem térmica do conversor em funcionamento para uma potência nominal de 88 W e uma temperatura ambiente de aproximadamente 30 °C. Pela Figura 5.29 é possível constatar que a temperatura máxima medida foi 44 °C.

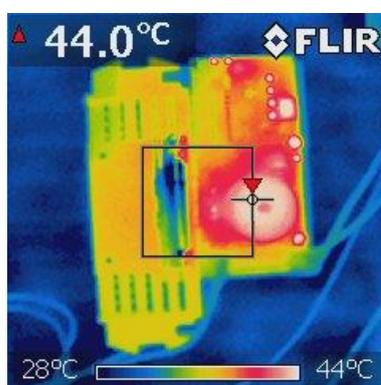


Figura 5.29 – Imagem térmica do conversor *Boost*, em ambiente real, para uma potência de funcionamento de 88 W e uma temperatura ambiente de aproximadamente 30 °C.

5.7. Aspeto Final do Protótipo Desenvolvido

Os resultados demonstrados nas secções anteriores permitiram comprovar de forma clara que o protótipo concebido cumpre os objetivos propostos para esta Dissertação. Por conseguinte, o mesmo foi integrado numa caixa metálica com o intuito de lhe conferir um carácter robusto e próximo de uma solução comercial. A Figura 5.30 mostra o resultado final alcançado. Este equipamento está preparado para ser facilmente integrado numa instalação solar fotovoltaica constituída por painéis solares BP2150S da empresa BP Solar, bastando ligar o terminal positivo e negativo de cada painel nos respetivos conectores de entrada. É importante mencionar, que nesta fase não se colocou nenhum dissipador, visto que a própria caixa desempenha essa função. Para além disso, a estação do ano vigente, Outono, impossibilitou testar o protótipo nas condições mais exigentes ao nível de temperatura, ao contrário do que ocorre no Verão. Porém, se posteriormente se revelar fundamental a utilização de um dissipador, toda a área que se

encontra ao lado dos conetores é suficiente para o incluir, tal como é demonstrado na Figura 5.31. No que concerne à estrutura do protótipo é relevante mencionar que a colocação dos conectores e do dissipador (se necessário) na tampa da caixa foi intencional, para facilitar o acesso aos componentes que o constituem sempre que for preciso.

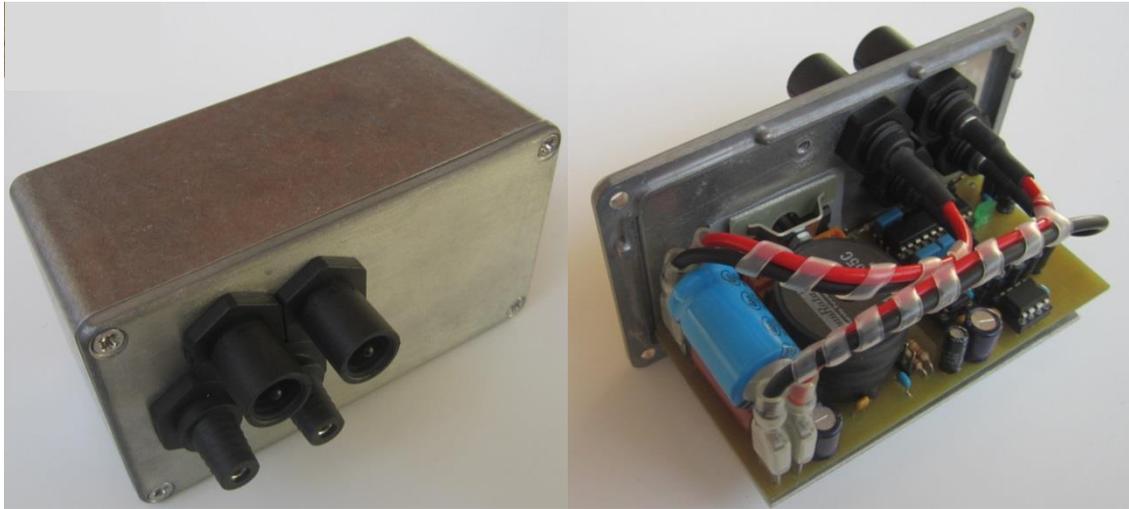


Figura 5.30 – Aspeto final do protótipo desenvolvido.

A Figura 5.31 fornece uma perspetiva da aparência do protótipo ao incorporar o dissipador.



Figura 5.31 – Aspeto do protótipo perante a necessidade de um dissipador.

5.8. Conclusões

No presente capítulo foram apresentados os resultados obtidos, em ambiente laboratorial e em ambiente real de aplicação, que permitem demonstrar de forma inequívoca que o protótipo desenvolvido consegue maximizar o rendimento e para além

disso, minimizar o efeito sombra de forma eficaz numa instalação solar fotovoltaica através da configuração MIC.

Numa primeira instância foram apresentados os resultados obtidos em bancada laboratorial, onde foi possível testar por etapas o sistema desenvolvido. Iniciaram-se os ensaios experimentais com o teste em malha aberta e em regime permanente para a potência nominal de funcionamento, de modo a averiguar o rendimento do conversor CC-CC *Boost*. Os resultados verificados foram satisfatórios, uma vez que todos os elementos funcionaram corretamente e sem a ocorrência de sobreaquecimentos. Relativamente ao rendimento do conversor de potência conseguiu-se alcançar uma marca interessante de aproximadamente 94%.

Os ensaios seguintes centraram-se na análise do desempenho da unidade de controlo. Para isso, foram realizados testes individuais ao controlador PI e ao algoritmo MPPT Perturbação e Observação. Procedeu-se ao teste em malha fechada e em regime transitório, para avaliar o tempo de resposta do controlador PI implementado no microcontrolador perante a alteração da variável de referência. Pelos resultados obtidos foi possível observar que este consegue seguir as referências estabelecidas num intervalo de tempo aceitável. Numa situação extrema em que a referência de saída baixa de 70 V para 40 V alcançou-se um tempo de resposta de 150 ms, o que é mais do que suficiente tendo em conta a dinâmica relativamente lenta de um sistema solar fotovoltaico.

Os testes para a validação da implementação do algoritmo MPPT Perturbação e Observação foram executados recorrendo ao modelo equivalente de uma fonte de tensão CC não-ideal. A alteração da resistência série do modelo permite modificar a potência máxima disponibilizada pela fonte CC não-ideal, conseguindo-se deste modo emular a perda, e o ganho, de potência que ocorre ao longo do dia num painel solar. A metodologia utilizada para o ensaio consistiu em calcular previamente o valor máximo de potência, que idealmente seria possível extrair da fonte para diferentes valores de resistência e posteriormente compará-los com os valores obtidos experimentalmente através do conversor CC-CC *Boost*, com o controlo baseado no algoritmo Perturbação e Observação. Para demonstrar os resultados alcançados foi apresentada a Tabela 5.2, a partir da qual é possível constatar que o algoritmo implementado foi capaz de acompanhar dinamicamente as flutuações introduzidas, exigindo da fonte valores de potência muito próximos aos esperados teoricamente.

Depois de verificado o funcionamento de todos os elementos constituintes do protótipo desenvolvido e validada a unidade de controlo, o ensaio seguinte consistiu em

comprovar em bancada que a topologia MIC é capaz de minimizar o efeito sombra. O ensaio realizado fundamentou-se na utilização de dois Seguidores do Ponto de Máxima Potência Dinâmico para Sistemas Solares Fotovoltaicos, conectados em série através das suas saídas. Nas suas entradas foi novamente utilizado o modelo equivalente de uma fonte CC não-ideal. O procedimento adotado para este ensaio baseou-se na análise de várias situações, em que se emulou o ganho e/ou perda de potência em ambos os conversores CC-CC *Boost*. Os resultados obtidos permitem aferir que quando ocorre a diminuição da potência em um dos conversores, não se verificam consequências no valor de potência extraída pelo outro elemento. Adicionalmente demonstrou-se que o controlo de cada conversor é individualizado, no sentido de manter as condições ótimas de operação que possibilitam a extração da potência máxima do painel a que está associado, neste caso, da fonte de tensão CC não-ideal.

Posto isto, uma vez que no âmbito laboratorial os resultados conseguidos corresponderam ao que era esperado, estavam reunidas todas as condições para transitar para ambiente real de aplicação. Nos ensaios realizados no exterior foram utilizados dois painéis solares BP2150S, mencionados no Capítulo 3. O procedimento seguido consistiu em verificar o comportamento da instalação solar na ausência e na presença do protótipo desenvolvido, para uma situação em que a radiação se distribui de forma uniforme pelos dois painéis e noutra em que é introduzida uma sombra no painel solar 2. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, em primeiro lugar, porque o carácter autónomo do protótipo foi alcançado com sucesso, visto que todos os seus circuitos foram alimentados exclusivamente através do painel solar a que estava associado. Em segundo lugar, verificou-se que para a situação em que a radiação se distribui uniformemente, através dos conversores desenvolvidos conseguiu-se praticamente duplicar a potência extraída dos painéis fotovoltaicos. Por fim, no caso em que se introduziu uma sombra no painel solar 2, constatou-se que a potência extraída do painel solar 1 não sofreu alterações. Assim, a potência total da instalação resultou da soma das potências máximas que cada painel foi capaz de conceder, validando todos os fundamentos que suportam a topologia *Module Integrated Converter* como sendo capaz de mitigar os problemas inerentes ao efeito sombra numa instalação solar fotovoltaica.

CAPÍTULO 6

Conclusão e Trabalho Futuro

6.1. Conclusão

No âmbito desta Dissertação foi realizado o estudo, implementação e teste de um Seguidor do Ponto de Máxima Potência Multi-Convertor para Sistemas Solares Fotovoltaicos. O que se pretende com o mesmo é otimizar a energia produzida por uma instalação solar e mitigar os problemas causados pelo efeito sombra, sobre um, ou mais, painéis fotovoltaicos de uma instalação produtora. Para a concretização dos objetivos propostos foi preciso cumprir etapas intermédias, descritas pormenorizadamente em forma de capítulos, do presente documento.

No primeiro capítulo abordou-se de forma ligeira a influência da energia solar fotovoltaica no atual panorama energético mundial. Em seguida contextualizou-se o leitor sobre o tema da Dissertação ao explicar sucintamente as consequências do efeito sombra numa instalação fotovoltaica clássica, tendo-se destacado a importância do desenvolvimento de soluções inovadoras que possibilitem colmatar esse problema e otimizar a extração de potência desses sistemas.

No segundo capítulo foram apresentados todos os fundamentos teóricos necessários para a execução desta Dissertação. Inicialmente foi efetuada uma exposição global sobre os sistemas solares fotovoltaicos e os elementos que os constituem. Posteriormente focou-se num problema específico, o efeito sombra, que é responsável pelo decréscimo significativo da energia produzida em instalações cujos painéis solares estão ligados em série. Para minimizar as consequências verificadas aquando do aparecimento de uma sombra em um, ou mais, painéis de uma instalação fotovoltaica foi identificada a topologia *Module Integrated Converter* (MIC), que defende a utilização de um conversor eletrónico de potência dedicado por painel solar. Para a otimização da potência extraída de cada painel solar, foram explicados os algoritmos de controlo MPPT de Perturbação e Observação e de Condutância Incremental, onde se constatou que a primeira técnica é de fácil implementação e requer poucos recursos, porém é falível quando ocorrem alterações rápidas nas condições ambientais. Por outro

lado, a técnica de Condutância Incremental apresenta uma estrutura mais complexa e exige mais recursos, contudo demonstrou ser mais fiável e eficiente. Por fim, foi elaborada uma descrição detalhada do conversor CC-CC do tipo *Boost*, por este ser o circuito de potência que reúne as características mais interessantes para tornar viável a implementação da topologia MIC a nível prático. A simplicidade, o rendimento, o custo e a dimensão reduzida dos elementos que o constituem, foram os fatores principais que contribuíram para a sua escolha.

No terceiro capítulo foi mostrado o modelo de simulação, a partir do qual se demonstra a eficácia da solução baseada na utilização de um conversor de potência dedicado por painel solar, para minimizar os problemas relacionados com o efeito sombra. O sistema implementado em simulação permitiu averiguar o desempenho da topologia adotada em situações semelhantes às que ocorrem num cenário real. Isto porque, através da ferramenta PSIM foi possível criar o modelo equivalente do painel solar BP2150S, usado posteriormente nos testes em ambiente real. A partir dos resultados obtidos em simulação, pode-se concluir que recorrendo ao conceito MIC é possível otimizar a produção de energia numa instalação solar fotovoltaica, em que os painéis estão sujeitos a diferentes condições de radiação. Das situações testadas, constatou-se que a potência total do sistema resultou do somatório das potências máximas que cada painel foi capaz de disponibilizar, mediante as condições de radiação solar incidente a que estava submetido. O que significa que a produção de energia é individualizada e independente nos vários painéis constituintes da instalação.

No quarto capítulo foi efetuada uma descrição detalhada do *hardware* de potência, de controlo e de alimentação do Seguidor do Ponto de Máxima Potência Multi-Convertor para Sistemas Solares Fotovoltaicos. A escolha dos elementos constituintes do protótipo final revelou-se uma tarefa delicada, devido aos requisitos impostos para a solução a desenvolver, em especial, o carácter compacto e de baixo custo pretendido. Para além disso, o facto de o sistema ter de ser autónomo, ou seja, recorrer exclusivamente ao painel solar para obter as tensões de alimentação requeridas pelos diferentes circuitos, também se revelou um grande desafio. As características mencionadas tornaram a seleção dos componentes bastante exigente, assim como, a sua integração em apenas uma placa de circuito impresso. Ao longo do Capítulo 4 foram indicados os diversos componentes selecionados para o protótipo final, sendo apresentadas as suas especificações e justificada a sua escolha. É importante referir que no processo de seleção dos componentes foi imprescindível estabelecer um

compromisso entre custo/benefício, de forma a não comprometer o desempenho da solução final implementada.

No quinto capítulo foram apresentados os resultados experimentais obtidos em ambiente laboratorial e em ambiente real de aplicação, que possibilitaram comprovar o funcionamento do protótipo desenvolvido e demonstrar o êxito da configuração MIC. Dos ensaios realizados em bancada laboratorial constatou-se que o rendimento do conversor CC-CC *Boost* para a potência nominal, 150 W, é de aproximadamente 94%. A unidade de controlo foi validada, no entanto foi necessário proceder à alteração do algoritmo de controlo MPPT de Condutância Incremental implementado em simulação, pelo algoritmo de Perturbação e Observação. Os resultados obtidos com a primeira técnica não foram satisfatórios, devido à dificuldade de implementação num microcontrolador *fixed-point*, com poucos recursos e que não possibilita a visualização do estado das variáveis em tempo real. De outra forma, os resultados obtidos através do algoritmo de Perturbação e Observação, em virtude da simplicidade do seu princípio de funcionamento, foram significativamente melhores tendo-se verificado, no melhor caso testado, um rendimento muito próximo dos 99%. No âmbito laboratorial o último ensaio realizado foi o teste da topologia *Module Integrated Converter*, onde foram apresentados resultados, consistentes com os que se apurou em simulação, que permitem comprovar de forma inequívoca que este conceito é capaz de minimizar os problemas associados ao efeito sombra.

Depois de apresentados os resultados no âmbito laboratorial, foram demonstrados os resultados alcançados no terreno. Os ensaios em ambiente real de aplicação consistiram em verificar o comportamento da instalação solar fotovoltaica, sem e com o contributo dos protótipos implementados. Os resultados conseguidos foram bastante satisfatórios, na medida em que foi possível constatar que com o auxílio da solução desenvolvida o rendimento da instalação aumenta significativamente, quase para o dobro. Para além disso, conseguiu-se mostrar que quando um dos painéis é afetado por sombra, o outro não evidencia qualquer consequência no seu funcionamento. Dos resultados obtidos em ambiente real, a conclusão principal a reter é que a implementação da configuração MIC através de conversores CC-CC do tipo *Boost* é viável e funcional, na medida em que possibilita otimizar a energia produzida numa instalação solar fotovoltaica numa proporção significativa, a partir de um protótipo de baixo custo e de dimensões reduzidas.

Posto isto, a avaliação global do trabalho elaborado é bastante positiva, visto que os objetivos propostos foram cumpridos praticamente na totalidade. Para tal, ao longo

desta Dissertação foi necessário aplicar a nível prático, grande parte dos conhecimentos obtidos no decorrer do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrónica Industrial e de Computadores, o que permitiu consolidá-los e fortalecê-los. Por outro lado, foram adquiridas novas competências que se podem revelar fundamentais no mercado de trabalho.

6.2. Trabalho Futuro

O protótipo desenvolvido cumpre os objetivos propostos para esta Dissertação, porém existem alguns aspetos que podem ser melhorados, contribuindo para a sua valorização. A placa de circuito impresso desenhada apresenta dimensões reduzidas, no entanto o seu tamanho pode ser diminuído com a utilização de componentes com encapsulamento SMD (*Surface Mounted Device*). Depois de confirmado o funcionamento e a fiabilidade em ambiente real, para os componentes como o circuito de *drive* do MOSFET, o microcontrolador, o regulador comutado LM2674 e em particular para as resistências e os condensadores, podem ser utilizados os seus encapsulamentos equivalentes em SMD, que o desempenho do protótipo seguramente não é afetado.

Relativamente aos algoritmos de controlo MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) sugere-se a implementação de outras técnicas, em especial a de Condutância Incremental em que é necessário despende mais algum tempo, de forma a comparar o seu comportamento e rendimento em relação ao algoritmo Perturbação e Observação.

Adicionalmente propõe-se o desenvolvimento de um sistema de comunicação sem fios baseado na tecnologia de rádio frequência. A comunicação através de rádio frequência foi mencionada devido ao preço reduzido dos seus módulos e pela simplicidade de implementação, quando comparado com outros protocolos de comunicação. Cada Seguidor do Ponto de Máxima Potência Multi-Convertor para Sistemas Solares Fotovoltaicos dispunha de um módulo RF *slave* que envia os valores de corrente e de tensão do seu painel fotovoltaico, quando o módulo RF *master* lhe ordena. O módulo RF *master* por sua vez transmite os dados recebidos via porta série para um computador central. O qual por intermédio de uma GUI (*Graphical User Interface*) possibilitaria ao utilizador monitorizar em tempo real a produção de energia de forma individualizada, por exemplo numa grande instalação solar fotovoltaica, e averiguar a ocorrência da diminuição da potência disponibilizada especificamente em um dos painéis, devido a avaria, um possível defeito de fabrico ou até mesmo sujidade.

Bibliografia

- [1] G. Masson, M. Latour, M. Reking, I.-T. Theologitis e M. Papoutsi, “Global Market Outlook for Photovoltaics 2013-2017,” Relatório Técnico - European Photovoltaic Industry Association (EPIA), Maio 2013.
- [2] “Solar Generation 6: Solar Photovoltaic Electricity Empowering the World,” Relatório Técnico - European Photovoltaic Industry Association (EPIA) e Greenpeace International, Fevereiro 2011.
- [3] “Renováveis - Estatísticas Rápidas - Agosto 2013,” Relatório Técnico - Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), 2013.
- [4] Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), [Online]. Disponível: www.dgeg.pt. [Acedido em Agosto 2013].
- [5] W. Xiao, N. Ozog e W. Dunford, “Topology Study of Photovoltaic Interface for Maximum Power Point Tracking,” em *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 3, pp. 1696-1704, Junho 2007.
- [6] A. Labouret e M. Viloz, “Solar Photovoltaic Energy,” Inglaterra: Institution of Engineering and Technology, 2010.
- [7] GreenPRO, “Energia Fotovoltaica - manual sobre tecnologias, projecto e instalação,” Janeiro 2004. [Online]. Disponível: www.greenpro.de/po/index.html. [Acedido em Agosto 2013].
- [8] Ministério da Economia, “Decreto-Lei n.º 68/2002 de 25 de Março,” em *Diário da República - I Série-A*, N.º. 71, 25 de Março de 2002.
- [9] A.Goetzberger e V.U.Hoffmann, “Photovoltaic Solar Energy Generation,” Alemanha: Springer-Verlag, 2005.
- [10] C. J. Chen, “Physics of Solar Energy,” John Wiley & Sons, Inc, 2011.
- [11] D. S. Findley, “Solar Power for Your Home,” McGraw-Hill, 2010.
- [12] R. H. Bube, “Photovoltaic Materials,” Imperial College Press, 1998.
- [13] H. Bergveld, D. Büthker, C. Castello, T. Doorn, A. de Jong, R. van Otten e K. de Waal, “Module-Level DC/DC Conversion for Photovoltaic Systems,” em *INTELEC - IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference*, pp. 1-9, Outubro 2011.
- [14] S. Lyden, M. E. Haque, A. Gargoom, M. Negnevitsky e P. I. Muoka, “Modelling and Parameter Estimation of Photovoltaic Cell,” em *AUPEC - 22nd Australasian Universities Power Engineering Conference*, pp. 1-6, Setembro 2012.
- [15] A. K. Verma, B. Singh e S. Kaushik, “An Isolated Solar Power Generation using Boost Converter and Boost Inverter,” em *International Journal of Engineering and Information Technology*, vol. 2, no. 2, pp. 101-108, 2010.

- [16] W.-Y. Choi e J.-S. J. Lai, "High-efficiency grid-connected photovoltaic module integrated converter system with high-speed communication interfaces for small-scale distribution power generation," em *Solar Energy - Journal of the International Solar Energy Society*, vol. 84, no. 4, pp. 636-649, Abril 2010.
- [17] W. Saranrom e S. Polmai, "The Efficiency Improvement of Series Connected PV Panels Operating under Partial Shading Condition by Using per-Panel DC/DC Converter," em *ECTI - 8th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, pp. 760-763, Maio 2011.
- [18] Q. Zhang, X. Sun, Y. Zhong e M. Matsui, "A Novel Topology for Solving the Partial Shading Problem in Photovoltaic Power Generation System," em *IPEMC '09 - IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference*, pp. 2130-2135, Maio 2009.
- [19] E. Roman, R. Alonso, P. Ibanez, S. Elorduizapatarietxe e D. Goitia, "Intelligent PV Module for Grid-Connected PV Systems," em *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 4, pp. 1066-1073, Junho 2006.
- [20] M. Kasper, D. Bortis, T. Friedli e J. Kolar, "Classification and Comparative Evaluation of PV Panel Integrated DC-DC Converter Concepts," em *EPE/PEMC - 15th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Setembro 2012.
- [21] L. Linares, R. W. Erickson, S. MacAlpine e M. Brandemuehl, "Improved Energy Capture in Series String Photovoltaics via Smart Distributed Power Electronics," em *APEC '09 - 24th IEEE Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 904-910, Fevereiro 2009.
- [22] G. Walker e P. Sernia, "Cascaded DC-DC Converter Connection of Photovoltaic Modules," em *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 4, pp. 1130-1139, Julho 2004.
- [23] T. ESRAM e P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," em *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439-449, Junho 2007.
- [24] N. Onat, "Recent Developments in Maximum Power Point Tracking Technologies for Photovoltaic Systems," em *International Journal of Photoenergy*, vol. 2010, pp. 11, 2010.
- [25] B. Subudhi e R. Pradhan, "A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems," em *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 89-98, Janeiro 2013.
- [26] F. Zhang, K. Thanapalan, A. Procter, S. Carr e J. Maddy, "Adaptive Hybrid Maximum Power Point Tracking Method for a Photovoltaic System," em *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 28, no. 2, pp. 353-360, Junho 2013.
- [27] N. Mohan, T. Underland e W. Robbins, "Power Electronics - Converters, Application and Design," John Wiley & Sons Inc, 1995.
- [28] D. W. Hart, "Introduction to Power Electronics," Prentice-Hall, 1997.
- [29] BP Solar, "Datasheet BP 2150S," 2001.
- [30] STMicroelectronics, "Datasheet STP20NF20," 2009.

- [31] Texas Instruments, “Datasheet UCC27424,” 2013.
- [32] B. Hasaneen e A. Mohammed, “Design and Simulation of DC/DC Boost Converter,” em *MEPCON - 12th International Middle-East Power System Conference*, pp. 335-340, Março 2008.
- [33] STMicroelectronics, “Datasheet STTH1002C,” 2004.
- [34] Murata Power Solutions, “Bobbin Type Inductors, 1400 Series datasheet,” 2012.
- [35] Panasonic, “Datasheet ECWF2W475JA”.
- [36] Texas Instruments, “Datasheet MSP430G2553,” 2012.
- [37] M. Cantrell, “Digital Isolator Simplifies USB Isolation in Medical and Industrial Applications,” Analogue Devices, 2009.
- [38] Allegro MicroSystems Inc, “Datasheet ACS712”.
- [39] Texas Instruments, “Datasheet LM2674,” 2013.
- [40] Texas Instruments, “Datasheet LM1117-N,” 2012.
- [41] H. Gonçalves, M. Hlaili, H. Amira, H. Mechergui e J. L. Afonso, “Simulation Results of 1 kW Photovoltaic System with MPPT Function in the Inverter,” em *SAAEI'12 - Annual Seminar on Automation, Industrial Electronics and Instrumentation*, pp. 420-424, Julho 2012.
- [42] O. Wasynczuk, “Dynamic Behavior of a Class of Photovoltaic Power Systems,” em *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 102, no. 9, pp. 3031-3037, Setembro 1983.
- [43] M. M. G. Fernando, “Conversor Eletrónico de Potência para uma Bomba de Água Alimentada por Painéis Solares Fotovoltaicos,” Universidade do Minho, 2012.
- [44] Apogee Instruments Inc, “Datasheet Piranómetro PYR-P”.