



Estratégias de controlo Maximum Power Point Tracking (MPPT) para painéis fotovoltaicos.

BERNARDO BAPTISTA VIEIRA SILVA

julho de 2025

Estratégias de controlo *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) para painéis fotovoltaicos.

Bernardo Baptista Vieira da Silva

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia**

Orientador: Prof. Dr. Rui Filipe Marques Chibante

Júri:

Presidente:

Prof. Dr. Fernando Maurício Teixeira de Sousa Dias, Professor Adjunto, DEE/ISEP

Vogais:

Prof. Dr. Rui Filipe Marques Chibante, Professor Adjunto, DEE/ISEP

Prof. Dr. Rui Miguel Monteiro de Brito, Professor Adjunto, DEE/ISEP

Resumo

O aumento da preocupação da população com as questões ambientais tem impulsionado a produção de energia através de fontes de energia renováveis, com principal destaque para a produção por via de painéis fotovoltaicos. A potência extraída de um painel tem relação direta com a temperatura e com a irradiância solar, rápidas variações nestas condições alteram o *Maximum Power Point* (MPP). Com a implementação das técnicas *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), o controlador ajusta-se continuamente a estas mudanças visando garantir a melhor extração de potência possível. No caso de o painel estar sob condições *Partial Shading Condition* (PSC) o rastreamento do MPP torna-se mais desafiador, devido à existência de *Local Maximum Power Point* (LMPP), o que exige técnicas mais complexas.

Na presente dissertação, são abordados os conceitos teóricos que fundamentam o funcionamento dos painéis fotovoltaicos, designados na literatura inglesa como *Photovoltaic* (PV). As técnicas MPPT são classificadas em quatro categorias: clássicas, inteligentes, baseadas em otimização e híbridas. As clássicas são as mais simples e económicas, apresentam eficiência limitada em condições de rápidas mudanças ambientais e sob condições de PSC. As técnicas inteligentes destacam-se pela alta adaptabilidade e pela capacidade de rastreamento em PSC, contudo apresentam uma elevada complexidade de controlo. As técnicas de otimização, baseadas no comportamento animal, conseguem identificar de forma muito precisa o *Global Maximum Power Point* (GMPP) sob PSC. Por fim, as técnicas híbridas representam uma evolução, ao combinarem diferentes técnicas, com o objetivo de aumentar a eficiência do sistema.

No seguimento do estudo das principais técnicas MPPT, é realizada uma análise comparativa, em meio de simulação, de três destas. As duas primeiras são baseadas no método tradicional *Perturb and Observe* (P&O), distinguindo-se pela forma como é aplicada a perturbação. Uma atua diretamente no *duty cycle* do conversor CC/CC *Buck* utilizado, a outra abordagem altera a tensão de referência sendo o controlador Proporcional Integral (PI) responsável por ajustar o sistema para responder a esta alteração. A terceira técnica é baseada no *Gorilla Troops Optimizer* (GTO), um método de otimização recente que, no âmbito do MPPT, opera com maior capacidade de resposta em condições de PSC. Devido à não utilização de um modelo matemático para avaliar o impacto de cada indivíduo, o tempo de convergência do GTO aumentou. A nível prático, foram implementadas as duas técnicas baseadas no P&O, com e sem o controlador PI, sendo ambas comparadas com um sistema sem qualquer tipo de técnica MPPT. Os resultados evidenciaram uma clara vantagem na utilização destas técnicas, derivado ao aumento da potência extraída. Observou-se, ainda, uma maior estabilidade de operação e um ligeiro incremento da potência extraída na abordagem que utiliza o controlador PI, comportamento esperado face aos resultados obtido em simulação.

Palavras-chave: *Gorilla Troops Optimizer* (GTO), Painéis Fotovoltaicos, *Perturb and Observe* (P&O), Técnicas MPPT.

Abstract

The population's increasing concern about environmental issues has increased the production of energy through renewable energy sources, with a particular emphasis on production via photovoltaic panels. The power extracted from a panel is directly related to the temperature and solar irradiance; brisk variations in these conditions alter the MPP. Through the implementation of MPPT techniques, the controller adjusts continuously to these changes in order to ensure the best possible power extraction. In the case that the panel is under PSC conditions, tracking the MPP becomes more challenging due to the existence of LMPP, which requires techniques of higher complexity.

In this dissertation the theoretical concepts that underlie the operation of photovoltaic panels will be addressed, referred to in the English literature as PV. Techniques designated as MPPT are classified into four categories: classical, intelligent, optimization-based and hybrid. The classic techniques are the simplest and most economical, they display limited efficiency in rapidly changing environmental conditions and under PSC conditions. The intelligent techniques stand out for their high adaptability and their tracking capacity in PSC, however they present a high level of control complexity. The optimization techniques, based on animal behavior, can identify GMPP very accurately under PSC. Lastly, hybrid techniques represent an evolution, by combining different techniques, with the aim of increasing the system's efficiency.

As a follow-up to the study of the main MPPT techniques, a comparative analysis is carried out recurring to the simulation of three of them. The first two are based on the traditional P&O method, distinguished by the way in which the disturbance is applied. One acts directly on the duty cycle of the DC/DC *Buck* converter used, the other approach changes the reference voltage while the PI controller is responsible for adjusting the system to respond to this alteration. The third technique is based on GTO, a recent optimization method that within the scope of MPPT operates with greater responsiveness under PSC conditions. Due to the lack of use of a mathematical model to evaluate the impact of each individual, the GTO convergence time increased. At a practical level, the two techniques based on P&O were implemented, with and without the PI controller, and both were compared with a system without any type of MPPT technique. The results exhibit a clear advantage in using these techniques, derived from the increase in the extracted power. A greater operational stability and a slight increase in extracted power were also observed in the approach that implemented the PI controller, an expected behavior based on the results obtained in simulation.

Keywords: Gorilla Troops Optimizer (GTO), MPPT Techniques, Perturb and Observe (P&O), Photovoltaic Panels.

Agradecimentos

Quero expressar os meus agradecimentos, em primeiro lugar, aos meus pais, que sempre me deram suporte e as condições necessárias para que eu pudesse alcançar este objetivo.

Agradeço também a todos que me acompanharam ao longo destes últimos anos, com um agradecimento especial à minha namorada, pelo apoio constante, principalmente quando mais precisei.

Aos docentes, não docentes e colegas com quem tive a oportunidade de conviver e aprender nos últimos cinco anos, o meu sincero obrigado por terem contribuído para o meu crescimento a nível pessoal e académico.

Por fim, mas não menos importante, expressar o meu agradecimento ao Professor Doutor Rui Filipe Marques Chibante pela transmissão de conhecimentos e pela constante disponibilidade de ajuda durante a realização da dissertação.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Organização da Dissertação	2
2	Sistemas Fotovoltaicos	5
2.1	Princípio de Funcionamento de uma Célula Fotovoltaica	5
2.2	Principais Tipos de Células Fotovoltaicas	7
2.2.1	Silício Monocristalino	7
2.2.2	Silício Policristalino	7
2.2.3	Filmes Finos (<i>Thin Film</i>)	7
2.3	Modelo Elétrico da Célula Fotovoltaica	8
2.4	Características das células fotovoltaicas	9
2.5	Efeito do Sombreamento Parcial	11
2.6	Conversor CC/CC	14
2.6.1	Conversor CC/CC <i>Buck</i>	16
2.6.2	Conversor CC/CC <i>Boost</i>	20
2.7	Aplicação de Sistemas Fotovoltaicos	22
3	Maximum Power Point Tracking (MPPT)	25
3.1	Técnicas clássicas de controlo MPPT	25
3.1.1	<i>Constant Voltage Tracking</i> (CVT)	25
3.1.2	<i>Open Circuit Voltage</i> (OCV) (MPPT)	26
3.1.3	<i>Short Circuit Current</i> (SCC) (MPPT)	26
3.1.4	<i>Hill Climbing</i> (HC)	26
3.1.5	<i>Perturb and Observe</i> (P&O) MPPT	27
3.1.6	<i>Incremental Conductance</i> (Inc) MPPT	28
3.2	Técnicas inteligentes de controlo MPPT	28
3.2.1	<i>Artificial Neural Network</i> (ANN) MPPT	29
3.2.2	<i>Fuzzy Logic Controller</i> (FLC) MPPT	30
3.3	Técnicas de Otimização	31
3.3.1	<i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO)	31
3.3.2	<i>Ant Colony Optimization</i> (ACO)	33
3.3.3	<i>Cuckoo Search</i> (CS)	34
3.3.4	<i>Gorilla Troops Optimizer</i> (GTO)	35
3.3.4.1	Fase de <i>Exploration</i>	35
3.3.4.2	Fase de <i>Exploitation</i>	36
3.4	Técnicas híbridas	37

3.4.1	<i>Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)</i>	37
3.4.2	<i>Particle Swarm Optimization Perturb and Observe (PSO-P&O)</i>	38
3.4.3	<i>Perturb and Observe - Fuzzy Logic Controller (P&O-FLC)</i>	38
3.4.4	<i>Fuzzy Particle Swarm Optimization (FPSO)</i>	39
3.4.5	<i>Hill Climbing - Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (HC-ANFIS)</i>	39
3.5	Comparação entre as técnicas	40
4	Simulações	41
4.1	Simulação do Painel Fotovoltaico	41
4.2	Conversor CC/CC <i>Buck</i>	44
4.3	<i>Perturb and Observe (P&O)</i>	46
4.4	<i>Perturb and Observe (P&O)</i> com controlador PI	49
4.5	<i>Gorilla Troops Optimizer (GTO)</i>	53
4.6	Comparação entre os algoritmos desenvolvidos	58
5	Implementação Prática	61
5.1	<i>Perturb and Observe (P&O)</i>	65
5.2	<i>Perturb and Observe (P&O)</i> com controlador PI.	67
5.3	Comparação dos algoritmos desenvolvidos	68
6	Conclusão	71
6.1	Trabalhos Futuros	72
	Bibliografia	73
	Anexo A Avaliação População Inicial do GTO tradicional.	79
	Anexo B Fase <i>Exploration</i> do GTO tradicional.	81
	Anexo C Fase <i>Exploitation</i> do GTO tradicional.	83

Lista de Figuras

1	Processo de dopagem do silício com Fósforo e Índio.	6
2	Estrutura de uma célula fotovoltaica.	6
3	Funcionamento de uma célula fotovoltaica.	7
4	Equivalente elétrico de uma célula fotovoltaica.	8
5	Influência da irradiância e da temperatura na curva característica I-V da célula PV.	10
6	Ligações série e paralelo de duas células PV idênticas.	10
7	Díodos Bypass e Díodo de Bloqueio em módulos com ligação em série.	11
8	Curvas característica P-V do painel PV.	11
9	Curvas características I-V e P-V sob as condições STC, utilizadas como referência para simulação de condições PSC.	12
10	Circuito utilizado para simulação de condições PSC.	12
11	Curvas características I-V e P-V de dois módulos conectados em série, obtidas sob condições STC.	13
12	Curvas características I-V e P-V de dois módulos conectados em série, obtidas sob condições PSC, na ausência dos díodos <i>bypass</i>	13
13	Curvas características I-V referente a dois módulos conectados em série, sob condições de PSC.	14
14	Curvas características P-V sob condições de PSC.	14
15	Diagrama de blocos de um sistema PV.	15
16	Modulação PWM.	15
17	Conversor <i>CC/CC Buck</i>	16
18	Funcionamento do Conversor <i>CC/CC Buck</i> em dois períodos.	17
19	Formas de onda da Tensão e da Corrente no conversor <i>CC/CC Buck</i>	17
20	Formas de onda da Corrente no condensador no conversor <i>CC/CC Buck</i>	19
21	Conversor <i>CC/CC Boost</i>	20
22	Funcionamento do Conversor <i>CC/CC Boost</i> em dois períodos.	20
23	Formas de onda da Tensão e da Corrente no conversor <i>CC/CC Boost</i>	21
24	Desempenho P&O quando se altera as condições ambientais.	27
25	Curva P-V de um PV.	28
26	Fluxograma das técnicas clássicas P&O e InC.	29
27	Camadas Neural network.	29
28	Estrutura de um <i>Fuzzy Logic Controller</i> (FLC).	30
29	Funções de pertinência de um conjunto <i>fuzzy</i>	30
30	Representação vetorial da atualização da Velocidade em <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO).	32
31	Arquitetura <i>Adaptive Neuro Fuzzy Inference System</i> (ANFIS).	38

32	Equivalente Elétrico de uma célula PV no software PSIM.	42
33	Simulação do PV no PSIM.	42
34	Curvas do Painel utilizado nas condições STC.	42
35	Curvas do Painel para diferentes níveis de irradiância.	43
36	Simulação da condição de PSC no PSIM.	43
37	Curvas P-V para condições de PSC.	44
38	Circuito utilizado para a implementação dos algoritmos.	45
39	Fluxograma do P&O implementado.	46
40	Bloco C no PSIM.	47
41	Variações na irradiância e a correspondente potência máxima do PV nessas condições.	48
42	Curvas da Potência para o P&O implementado.	48
43	Varição da Tensão e da Corrente para o algoritmo P&O convencional.	49
44	Curvas da Potência para o P&O implementado sob condições de PSC.	49
45	Fluxograma do P&O com Controlador PI implementado.	50
46	Curvas da Potência para o P&O com Controlador PI implementado com comparação entre os algoritmos implementados baseados no P&O.	52
47	Varição da Tensão e da Corrente para o algoritmo P&O com controlador PI.	52
48	Variáveis do Controlador PI.	53
49	Curvas da Potência para os algoritmos P&O com e sem controlador PI quando utilizado uma frequência de MPPT igual a 40 Hz.	53
50	Fluxograma do GTO tradicional.	54
51	Fluxograma das fases <i>Exploration</i> e <i>Exploitation</i> do algoritmo GTO tradicional.	55
52	Curva da potência para o GTO tradicional sob as condições STC.	56
53	Varição da Tensão e da Corrente para o algoritmo GTO tradicional sob as condições STC.	56
54	Saída do algoritmo GTO tradicional e do GTO adaptado.	57
55	Curva da potência para o GTO proposto sob as condições STC.	57
56	Varição da Tensão e da Corrente para o algoritmo GTO proposto sob as condições STC.	58
57	Varição da irradiância, correspondente potência máxima, e resposta do algoritmo GTO face às variações observadas.	58
58	Curva da potência do GTO proposto e respetiva evolução da saída sob condições PSC.	58
59	Circuito utilizado para controlo dos MOSFETs, IR2104.	61
60	Conversor CC/CC utilizado para alimentação do <i>driver</i> IR2104.	61
61	Saídas de IR2104, em relação ao estado lógico dos pinos de entrada, SD e IN.	62
62	Formas de ondas de saída do IR2104, quando aplicado um PWM ao pino IN.	62
63	Circuito utilizado na implementação prática.	63
64	Microcontrolador utilizado, XMC4700.	64
65	Circuito implementado na prática.	65
66	Interface gráfica para o P&O convencional.	65
67	Curva da potência para o algoritmo P&O implementado na prática.	66
68	Varição da Corrente e da Tensão para o algoritmo P&O implementado na prática.	66
69	Interface gráfica para o P&O com Controlador PI.	67
70	Curva da potência para o algoritmo P&O com controlador PI implementado na prática e comparação com o P&O.	67
71	Varição da Corrente, da Tensão, do Erro e da Tensão de Referência para o algoritmo P&O com controlador PI implementado na prática.	68

72	Curvas da potência para os algoritmos P&O e P&O com controlador PI nas mesmas condições.	69
----	--	----

Lista de Tabelas

1	Varição probabilística da direção de <i>Hill Climbing</i> (HC).	26
2	Exemplo de tabela de regras FLC.	31
3	Comparação entre os métodos de rastreamento.	40
4	Características do painel utilizado (SOLARPOWER-5W).	41
5	Parâmetros do conversor CC/CC utilizado.	44
6	Valores calculados e componentes utilizados no conversor.	45
7	Desempenho dos algoritmos MPPT desenvolvidos.	59

Acrónimos, Siglas e Símbolos

Lista de Acrónimos e Siglas

ACO *Ant Colony Optimization.*

ADC *Analog-to-Digital Converter.*

ANFIS *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System.*

ANN *Artificial Neural Network.*

CA *Corrente Alternada.*

CC *Corrente Contínua.*

CCM *Continuous Conduction Mode.*

CS *Cuckoo Search.*

CVT *Constant Voltage Tracking.*

DC *Direct Current.*

DCM *Discontinuous Conduction Mode.*

DGEG *Direção-Geral de Energia e Geologia.*

FLC *Fuzzy Logic Controller.*

FM *Frequency Modulation.*

FPSO *Fuzzy Particle Swarm Optimization.*

FPU *Floating Point Unit.*

GMPP *Global Maximum Power Point.*

GTO *Gorilla Troops Optimizer.*

HC *Hill Climbing.*

HC-ANFIS *Hill Climbing - Adaptive Neuro Fuzzy Inference System.*

IEA *International Energy Agency.*

IGBT *Insulated Gate Bipolar Transistor.*

InC *Incremental Conductance.*

LMPP *Local Maximum Power Point.*

MOSFET *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.*

MPP *Maximum Power Point.*

MPPT *Maximum Power Point Tracking.*

OCV *Open Circuit Voltage.*

P&O *Perturb and Observe.*

P&O-FLC *Perturb and Observe - Fuzzy Logic Controller.*

PCB *Printed Circuit Board.*

PI *Proporcional Integral.*

PID *Proporcional Integral Derivativo.*

PSC *Partial Shading Condition.*

PSO *Particle Swarm Optimization.*

PSO-P&O *Particle Swarm Optimization Perturb and Observe.*

PV *Photovoltaic.*

PWM *Pulse Width Modulation.*

RESP *Rede Elétrica de Serviço Público.*

SCC *Short Circuit Current.*

SI *Sistema Internacional de Unidades.*

STC *Specifications at Standard Test Conditions.*

UC *Unidade Curricular.*

UPAC *Unidade de Produção para Autoconsumo.*

Lista de Símbolos

D	<i>Duty Cycle</i>
ΔE	Varição do Erro do FLC
E	Erro do FLC
G_X	Posição candidata do gorila (GTO)
I	Corrente
I_{MPP}	Corrente de MPP do PV
I_{SC}	Corrente de curto-circuito do PV
P	Potência
V	Tensão
V_{MPP}	Tensão de MPP do PV
V_{OC}	Tensão do PV em circuito aberto
X	Posição atual do gorila (GTO)
X_i	Posição da partícula (PSO)
V_i	Velocidade da partícula (PSO)
τ_{ij}	Feromona (ACO)
p_{ij}	Aceitação (ACO)

1 Introdução

A crescente consciencialização da população sobre questões ambientais tem impulsionado a adoção de fontes de energia renovável como alternativa aos combustíveis fósseis. Desde 2015, ano da adoção do Acordo de Paris, os investimentos em fontes renováveis e nucleares têm superado os investimentos em combustíveis fósseis, como aponta a *International Energy Agency* (IEA) [1]. Entre estas fontes de energia renováveis, a solar tem ganho relevância e previsões apontam para um contínuo crescimento até 2032 [2]. Portugal segue esta tendência de expansão, um exemplo notável é a câmara do Porto, que expandiu a rede de produção fotovoltaica, no âmbito do projeto “Porto Solar”, datado de 2022. Em 2024, a produção de energia solar, nesta cidade, triplicou face ao ano anterior [3].

O Sol produz uma grande quantidade de energia, estando continuamente a emitir radiação em forma de onda eletromagnéticas, designada de radiação solar. A quantidade de energia recebida num ponto específico da superfície terrestre varia no tempo e depende da posição relativa entre o Sol e a Terra. Neste âmbito, existem dois conceitos fundamentais que devem ser compreendidos, irradiância e irradiação. A irradiância representa a potência da radiação solar incidente, numa superfície, por unidade de área, expressa no sistema Sistema Internacional de Unidades (SI) em W/m^2 . Já a irradiação representa a energia incidente por unidade de área, expressa em Wh/m^2 [4], [5].

As células fotovoltaicas, elementos fundamentais para a produção de energia através da radiação solar, utilizam principalmente materiais semicondutores, como o silício. No interior destas, os fótons provenientes da luz solar transferem energia suficiente para libertar eletrões do material semicondutor, gerando assim corrente elétrica. Um painel *Photovoltaic* (PV) é formado por células fotovoltaicas em série e em paralelo de maneira a aumentar a potencia produzida [6].

1.1 Contextualização

A potência extraída pelo painel PV depende das condições a que este está sujeito, especialmente da irradiância e da temperatura, que influenciam diretamente o ponto em que o sistema opera à potência máxima, designado de *Maximum Power Point* (MPP). Para garantir a maior extração de potência possível, foram desenvolvidas técnicas que ajustam o funcionamento do sistema, de forma a mantê-lo continuamente a operar o mais próximo do MPP, mesmo sob as variações nas condições climáticas. Esta técnicas são designadas de *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) [7], [8].

Existem situações mais complexas, nomeadamente quando o painel está parcialmente sombreado, em que a curva de potência apresenta múltiplos MPP. Este fenómeno resulta das diferenças na produção entre as células fotovoltaicas que integram o painel, causadas pelas variações nos

níveis de irradiância a que cada uma está submetida. O impacto do sombreamento será abordado com mais detalhe ao longo da dissertação. Nestas circunstâncias, técnicas mais simples tendem a permanecer “presas” nos *Local Maximum Power Point* (LMPP), sem alcançar de facto o *Global Maximum Power Point* (GMPP), diminuindo a extração de potência. Foram analisadas as técnicas tradicionais, de fácil implementação, mas com desvantagens evidentes em cenários de sombreamento parcial. Foram ainda estudadas técnicas mais avançadas, que tendem a exigir um maior custo e uma maior complexidade, desenvolvidas para colmatar as desvantagens das técnicas tradicionais [7]–[9].

1.2 Objetivos

Esta dissertação foi desenvolvida no âmbito da Unidade Curricular (UC) de Dissertação/Estágio, no 2º ano do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica- Sistema Elétricos de Energia, no Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP. O principal objetivo desta é apresentar um estudo abrangente sobre diversas técnicas de MPPT, destacando as respetivas vantagens e desvantagens, bem como a validação, tanto em ambiente de simulação como através da implementação prática de alguma destas. Para alcançar esse objetivo, foram definidas as seguintes tarefas, que permitiram concluir a dissertação com sucesso:

- Compreensão da teoria associada aos painéis PV, incluindo a sua composição, princípio de funcionamento e principais fatores que influenciam a potência extraída;
- Seleção de informação acerca de estratégias MPPT, abrangendo técnicas clássicas, inteligentes e de otimização, terminando com técnicas híbridas, que combinam vantagens das abordagens anteriores;
- Implementação em ambiente de simulação de três técnicas distintas de MPPT, culminando numa comparação entre si;
- Validação experimental, com implementação num protótipo, de um conversor CC/CC com controlo MPPT, utilizando duas técnicas apresentadas.

1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos. O primeiro capítulo é dedicado à “Introdução”.

No segundo capítulo, é apresentada a componente teórica que sustenta o funcionamento dos painéis PV, incluindo o seu princípio de funcionamento, os principais tipos de células, o modelo elétrico destas e as devidas características. Neste ainda é abordado os problemas causados pelo sombreamento parcial, uma condição crítica para algumas técnicas MPPT. O capítulo termina com a análise teórica dos dois principais tipos de conversores CC/CC utilizados em sistemas fotovoltaicos.

O terceiro capítulo aborda o estado de arte dos algoritmos MPPT utilizados em painéis fotovoltaicos, inicialmente são apresentadas as técnicas mais tradicionais, que se caracterizam pela simplicidade e facilidade de implementação, mas com desvantagens evidentes. Em seguida, são exploradas técnicas mais complexas, nomeadamente técnicas inteligentes e técnicas de otimização. Aproveitando as vantagens de cada uma dessas abordagens, são apresentadas técnicas híbridas. O capítulo termina com uma tabela comparativa entre todas as técnicas discutidas.

1.3. Organização da Dissertação

Após o estudo das principais técnicas MPPT, o quarto capítulo dedica-se à simulação e comparação de duas técnicas clássicas com uma técnica baseada em otimização.

O quinto capítulo, intitulado de “Implementação prática”, expõem a implementação prática das duas técnicas clássicas previamente simuladas, a fim de validar as mesmas. O último capítulo, designado de “Conclusão”, sintetiza as conclusões retiradas a partir do estudo presente na dissertação.

2 Sistemas Fotovoltaicos

No século XIX, surge o primeiro registo do efeito fotovoltaico, mais precisamente no ano de 1839, quando o físico francês Alexandre Edmond Becquerel descobriu que certos materiais produzem uma corrente elétrica quando expostos à radiação solar, princípio fundamental das células PV [10].

Posteriormente, em 1877, William Grylls Adams e Richard Evans Day publicaram "*The action of light on selenium*", no qual identificaram propriedades elétricas no selênio. A partir deste trabalho, Charles Fritts construiu, em 1883, a primeira célula PV registada, utilizando uma fina camada de ouro sobre o selênio. Contudo, a baixa eficiência (menor que 1%) dificultava a sua aplicação prática [10].

Em 1905, Albert Einstein divulgou a sua explicação sobre o efeito fotoelétrico, uma descoberta que lhe valeu o Prémio Nobel da Física em 1921 e que foi essencial para os avanços registados na área fotovoltaica. Já em 1954, a *Bell Laboratories* desenvolveu as primeiras células fotovoltaicas de silício moderno, com uma eficiência de cerca de 6% [10], [11]. Desde então esta tem sido uma área em constante evolução, atualmente existem diversos tipos de células disponíveis no mercado.

2.1 Princípio de Funcionamento de uma Célula Fotovoltaica

Quando a luz solar incide sobre uma célula composta por materiais semicondutores, ocorre o efeito fotovoltaico. Este permite a conversão direta da luz em corrente elétrica.

Os materiais semicondutores tanto podem atuar como isolantes elétricos, impedindo a passagem de corrente, ou como condutores elétricos [12]. Estes são classificados em duas categorias: intrínsecos e extrínsecos. Um semicondutor é designado intrínseco, ou puro, quando se encontra na sua forma natural e, nestas condições, não apresenta as características desejadas para aplicações práticas. De maneira ao material adquirir propriedades desejadas, são adicionadas impurezas num processo designado dopagem, formando os semicondutores extrínsecos [13], [14].

A dopagem pode ocorrer pela adição de elementos com mais eletrões na camada de valência do que no material semicondutor que lhe serve de base. Estas impurezas são chamadas de doadoras, e o material obtido é chamado de semicondutor do tipo N. Usando o silício como exemplo, que possui quatro eletrões de valência, caso seja dopado com pequenas quantidades de fósforo (P), arsênio (As) ou antimônio (Sb), ambos com cinco eletrões de valência (um eletrão a mais que o silício) o quinto eletrão de valência não participa de nenhuma ligação covalente. Facilitando a sua libertação pelo átomo de fósforo, permitindo que este transite livremente entre a estrutura do semicondutor. A dopagem do silício com fósforo está representada na Figura 1a, na qual o resultante é um semicondutor do tipo N (tipo negativo pelo excedente de eletrões -) [13].

Caso o semicondutor seja dopado, por átomos de carga positiva (lacunas), as impurezas são designadas de recetoras e o material obtido é chamado de semicondutor do tipo P. Considerando o exemplo do silício, este tipo de dopagem é conseguida pela adição de pequenas quantidades de boro (B), gálio (Ga) ou índio (In), todos com três elétrons de valência. A dopagem do silício com índio está representada na Figura 1b e o semicondutor obtido é do tipo P (semicondutor positivo pelo défice de elétrons) [13]. Importa realçar que, quer os semicondutores do tipo N, quer os semicondutores do tipo P apresentam maior condutividade elétrica que o material em estado puro [14].

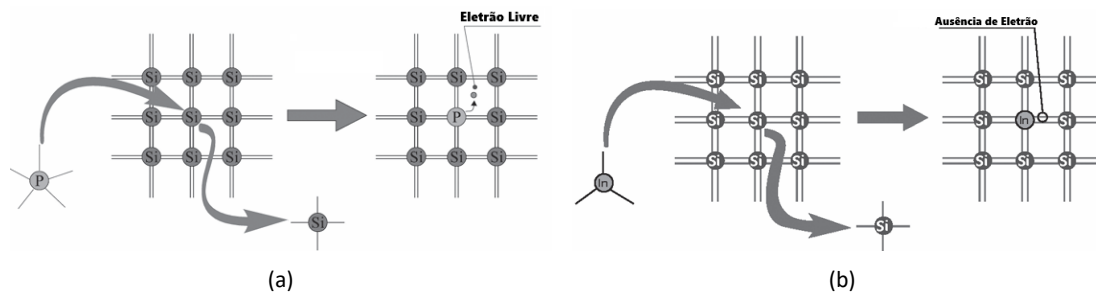


Figura 1: Processo de dopagem do silício com: (a) Fósforo e (b) Índio, adaptado de [13].

Uma célula PV é composta habitualmente pela junção de duas camadas de material semicondutor (Junção P-N, uma camada do tipo P e outra camada do tipo N). Tipicamente utiliza-se o silício, devido a ser muito abundante e de baixo custo. Ainda possui uma base metálica e conta com uma grade metálica responsáveis por coletar a corrente produzida. Na Figura 2 está representado a estrutura de uma célula fotovoltaica.

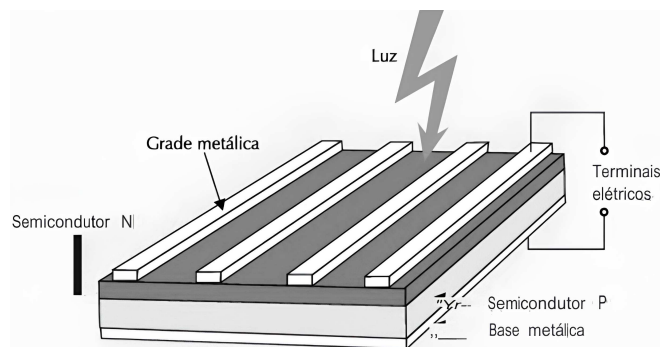


Figura 2: Estrutura de uma célula PV [12].

Quando a luz solar, composta por fótons, incide sobre a célula PV, esta é absorvida pelo material semicondutor. A energia dos fótons pode libertar elétrons. Devido à célula possuir uma junção P-N, cria-se um campo elétrico no interior desta, que afasta os elétrons em direção à camada N e as lacunas em direção à P. Caso exista um circuito externo, para contrariar este movimento de elétrons e lacunas, os elétrons movimentam-se em direção à camada P de maneira a combinarem-se com as lacunas, este movimento de elétrons designamos de corrente elétrica [15]. Na Figura 3 está apresentada a operação de um célula PV.

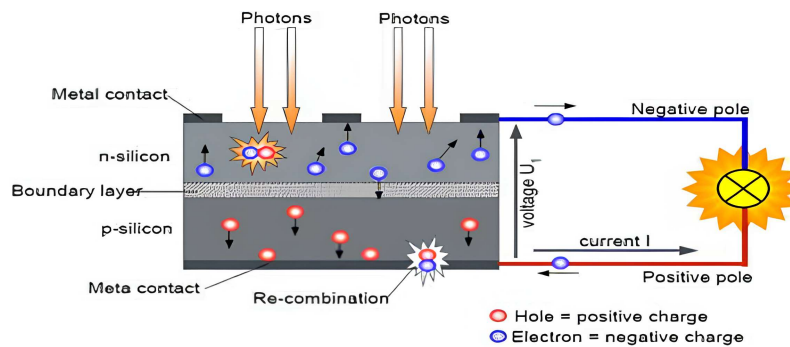


Figura 3: Funcionamento de uma célula fotovoltaica [14].

2.2 Principais Tipos de Células Fotovoltaicas

O silício é o segundo elemento mais abundante na Terra, sendo apenas superado pelo oxigênio o que o torna muito importante na produção das células PV. As tecnologias mais comuns no mercado são a de silício monocristalino, a de silício policristalino e a de filme fino [12], [16]. Apesar de diversos tipos existentes no mercado no seguimento daremos ênfase às mais utilizadas.

2.2.1 Silício Monocristalino

Os blocos de silício ultrapuro são aquecidos a altas temperaturas e submetidos a um processo de formação de cristais chamado método de Czochralski. Este processo resulta num lingote de silício monocristalino, que apresenta uma organização molecular homogênea. O lingote é posteriormente cortado em pequenas placas formando os *wafers* de silício. Estes *wafers* ainda não apresentam propriedades fotovoltaicas e necessitam de passar por processos de dopagem que formarão as camadas de silício do tipo P e do tipo N, essenciais para o funcionamento da célula. É aplicado um revestimento antirreflexo que aumenta a absorção da luz e a sua eficiência [12], [16].

As células fabricadas de silício monocristalino apresentam eficiências na ordem dos 15% a 18%, em produtos comerciais, destacando-se face a outras células. Contudo, apresentam um processo de fabricação complexo devido à quantidade de energia utilizada e a quantidade elevada de material com baixo nível de impureza, o que aumenta o custo associado à produção e dificulta a redução de custos, mesmo em produção de grande escala [16], [17].

2.2.2 Silício Policristalino

O lingote de silício policristalino é formado por um aglomerado de cristais, com tamanhos e orientações diferentes, ao contrário do utilizado nas células monocristalinas (apenas um cristal). Este lingote é cortado formando também os *wafers* de silício, que devem ser dopados para adquirirem as propriedades desejadas. O uso do antirreflexo também tem a mesma finalidade [12], [16].

As suas eficiências são ligeiramente inferiores na ordem dos 13% a 16%, no entanto a produção mais económica compensa esta diminuição de eficiência [12].

2.2.3 Filmes Finos (*Thin Film*)

Os materiais utilizados para produzir as células de filme fino apresentam apenas alguns micrómetros, tornando-se mais finas que as células de silício cristalino [18]. No processo de produção

nas células de filme fino, ao contrário das células cristalinas (produzidas através de fatias de lingote), ocorre a deposição de camadas muito finas de material sobre uma base. Este processo de deposição pode ocorrer por vaporização ou outro método, o que reduz significativamente a quantidade de matéria-prima [12]. Apesar de mais económicas, as células desta tecnologia, apresentam, por norma, eficiências inferiores às de silício cristalino. Os avanços tecnológicos nesta área têm contribuído para a crescente melhora da sua eficiência, permitindo que fiquem cada vez mais próximas das tradicionais em termos de desempenho. Ainda assim, cada tipo de célula de filme fino possui desvantagens que devem ser tidas em conta [19].

Podemos dividir as células de filme fino em duas categorias, as à base de silício, como as de silício amorfo e silício microcristalino, e as não baseadas em silício, como as de *perovskitas*, telureto de cádmio e cobre-índio- gálio-diselenida [18].

As células produzidas com silício amorfo apresentam eficiências bastante reduzidas, na ordem dos 5%, e sofrem degradação significativa nos primeiros 6 a 12 meses de operação, provocada pela exposição à luz, designado de efeito Staebler-Wronski [12], [16]. Por outro lado, as células de silício microcristalino são consideradas uma alternativa promissora no âmbito das células PV, apresentam um custo inferior em comparação com as tradicionais e não sofrem degradação presente nas células de silício amorfo. A sua eficiência ainda é considerada relativamente baixa, em comparação as tradicionais [12], [19].

Nas células de *perovkita*, a sua eficiência registou um avanço assinalável desde a sua criação em 2009, na altura apresentavam eficiência extremamente baixas, na ordem dos 3,8%. Atualmente, já se alcançaram eficiências na ordem dos 25% em pequenas amostras produzidas em laboratório. Apesar das células *perovkita* apresentarem eficiências competitivas face às principais células PV, apresentam limitações quanto a sua estabilidade e durabilidade. A transição de pequenas células produzidas em laboratório para grandes módulos comerciais são ainda um problema [18], [19].

As células de telureto de cádmio e de cobre-índio- gálio-diselenida apresentam níveis de eficiências comparáveis aos apresentados pelas células tradicionais. O uso de materiais tóxicos, como o cádmio, e o uso de materiais raros, como o índio, são desvantagens assentes neste tipo de células.

2.3 Modelo Elétrico da Célula Fotovoltaica

O modelo elétrico mais simples de uma célula fotovoltaica consiste numa fonte de corrente em paralelo com um díodo. A precisão do modelo aumenta quando se considera as não idealidades representadas pelas resistências em paralelo e em série como apresentado na Figura 4 [20], [21]. A corrente gerada pela célula será diretamente proporcional à irradiância.

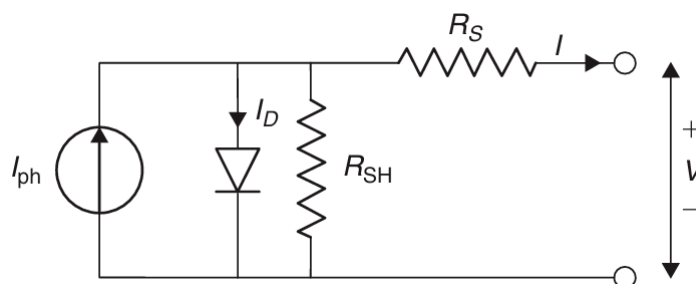


Figura 4: Equivalente elétrico de uma célula fotovoltaica [21].

2.4. Características das células fotovoltaicas

Seguindo a primeira lei de Kirchhoff, a corrente de saída do painel é dada pela equação 2.1, onde I_{ph} representa a fotocorrente, o I_d a corrente no díodo e I_{sh} a corrente de saturação inversa do díodo.

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2.1)$$

Seguindo-se o modelo apresentado temos que [20]:

$$I = I_{ph} - I_r \left[e^{\frac{q(V+I \cdot R_s)}{\eta k T}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2.2)$$

Onde:

- V – Tensão nos terminais de saída da célula PV.
- I – Corrente nos terminais de saída da célula PV.
- R_s, R_{sh} – Resistências série e paralela da célula.
- q – Carga do eletrão, $1,6 \times 10^{-19} C$.
- η – Fator de qualidade da junção p-n.
- k – Constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23} J/K$.
- T – Temperatura ambiente, em Kelvin K .

A corrente produzida pela célula, I_{ph} , será proporcional à irradiância e à temperatura. E é calculada pela expressão 2.3. Em relação a I_r a mesma é calculada seguindo a expressão 2.4 [20].

$$I_{ph} = [I_{sc} + \alpha \cdot (T - T_r)] \cdot \frac{E_e}{1000} \quad (2.3)$$

$$I_r = I_{rr} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \cdot e^{\left[\frac{q E_G}{\eta k} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (2.4)$$

Nas quais:

- I_{sc} – Corrente de curto-circuito por célula.
- α – Coeficiente de temperatura de I_{sc} .
- T_r – Temperatura de referência, $298K$.
- E_e – Irradiância, W/m^2 .
- I_{rr} – Corrente de saturação inversa de referência.
- E_G – Energia da banda proibida, $1,1eV$.

2.4 Características das células fotovoltaicas

Uma célula fotovoltaica apresenta uma relação não linear entre corrente e tensão, descrita pela curva característica Corrente-Tensão (I-V). Essa curva é diretamente influenciada quer pela irradiância solar, representada na Figura 5a, quer pela temperatura, representada na Figura 5b. Com

o aumento da temperatura, observa-se uma diminuição da tensão de circuito aberto, V_{OC} , e um leve aumento na corrente de curto-circuito, I_{SC} . O aumento de temperatura está associado à diminuição da eficiência, resultando em potências geradas menores. A tensão de circuito em aberto aumenta logarithmicamente com o aumento da irradiância. Já a corrente de curto-circuito aumenta linearmente com a irradiância, o que resulta num aumento na potência gerada, desde que as condições de temperatura sejam favoráveis [21].

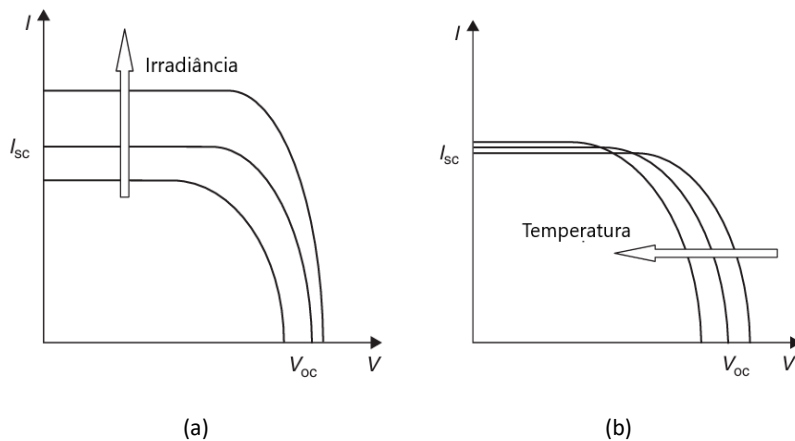


Figura 5: Influência da irradiância e da temperatura na curva característica I-V da célula fotovoltaica: (a) Efeito da irradiância e (b) Efeito da temperatura, adaptado de [21].

Devido às células fotovoltaicas produzirem uma baixa potência, quando isoladas, são conectadas em série ou em paralelo formando os módulos ou painéis PV, alterando assim a curva I-V de acordo com o pretendido. Quando conectada em paralelo, Figura 6a, observa-se que a tensão permanece constante, enquanto a corrente duplica. Caso sejam conectadas em série, Figura 6b, a tensão duplica e a corrente se mantém [6], [21].

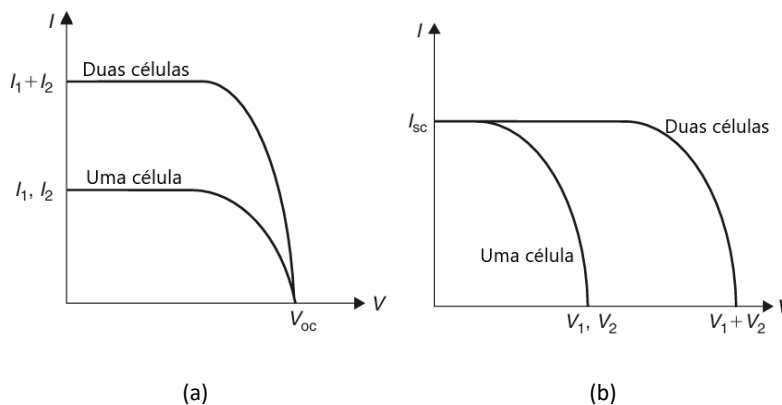


Figura 6: Ligação de duas células PV idênticas, (a) paralelo e (b) série, adaptado de [21].

Numa ligação em série de células PV, se uma célula apresentar um desempenho inferior às demais, devido a fatores como sombreamento, a produção de energia de todo o módulo seria limitada. Para evitar que tal aconteça utilizam-se diodos *bypass*, como mostrado na Figura 7. Estes diodos fornecem um caminho alternativo para a corrente, permitindo contornar a célula defeituosa. Ao inserir estes diodos, além de prevenir que a célula defeituosa limite a produção do módulo, reduz a dissipação de calor nessa mesma célula. Idealmente, cada célula estaria conectada a um diodo, mas, por questões de custo, é usual conectar um diodo *bypass* a um conjunto de células PV. O funcionamento do diodo *bypass* é abordado no seguimento da dissertação. Em

2.5. Efeito do Sombreamento Parcial

relação ao diodo de bloqueio este impede que a corrente flua no sentido oposto ao pretendido [6], [22].

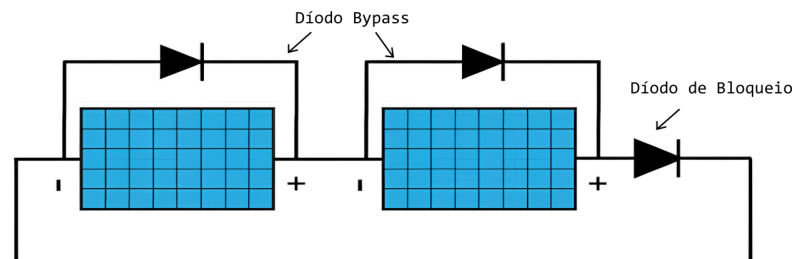


Figura 7: Diodos Bypass e Diodo de Bloqueio em módulos com ligação em série, adaptado de [22].

A curva Potência-Tensão (P-V) de um PV é apresentada na Figura 8a, onde está identificado o MPP, que representa a máxima potência possível a ser extraída pelo módulo para as condições a que está submetido. Visto que a potência é obtida através da multiplicação da corrente e tensão, a curva P-V é logicamente afetada pela temperatura e irradiância como representado na Figura 8b. Ou seja, uma rápida mudança nas condições ambientais altera o MPP. Para lidar com estas alterações dinâmicas no ponto de máxima potência, recorrem-se às técnicas de MPPT. Estas permitem otimizar a eficiência do conjunto PV, que tende a ser baixas, e procura garantir que a potência extraída pelo PV seja a maior possível [7], [8].

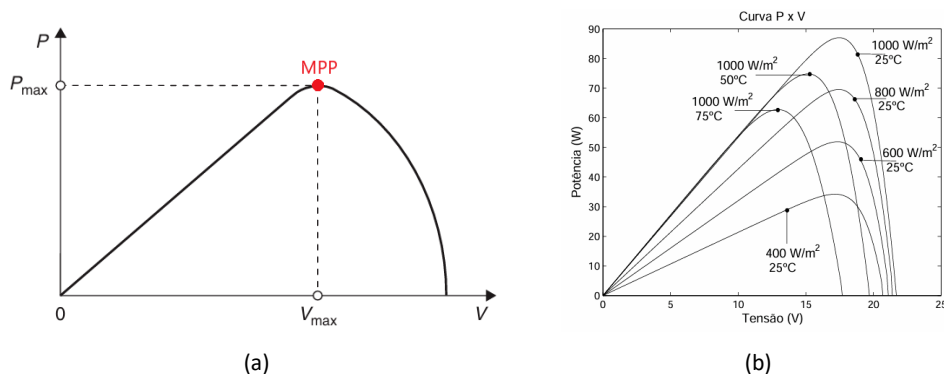


Figura 8: Em (a) Curva característica P-V de um PV, adaptado de [21], (b) Variação da curva P-V em relação à temperatura e irradiância [23].

2.5 Efeito do Sombreamento Parcial

Conforme previamente demonstrado, a corrente de uma célula PV é diretamente proporcional à intensidade da luz incidente sobre esta. Caso esteja sujeita a sombreamento, a corrente, por ela produzida, será necessariamente inferior quando comparada com células não sombreadas.

Face a condições de *Partial Shading Condition* (PSC), em configurações onde as células PV estão conectadas em paralelo, a corrente total fornecida pelo painel PV será reduzida, mas sem provocar impactos significativos sobre o mesmo. No entanto, em módulos conectados em série, uma vez que a corrente que circula entre as células é a mesma, a corrente fica limitada pela célula de menor produção (a célula sombreada), afetando o desempenho de todo o sistema. Os diodos *bypass* são utilizados para mitigar esta diminuição de corrente no módulo [24], [25].

Para simular as condições de PSC, utilizaram-se dois painéis com as mesmas características dos utilizados no capítulo 4, cujas curvas I-V e P-V sob as condições *Specifications at Standard Test Conditions* (STC) (1000 W/m^2 e 25°C) são apresentadas nas Figuras 9a e 9b, respectivamente. Estes painéis foram conectados em série a uma fonte de tensão variável entre 0 V e 44 V, valor que corresponde à soma das tensões de circuito aberto dos 2 painéis ($2 \cdot 22 \text{ V}$). Assim, foi possível simular todas as condições de funcionamento da série, permitindo analisar a resposta do sistema ao longo de toda a gama de tensões que este pode apresentar. O circuito utilizado para o efeito é apresentado na Figura 10, no qual os painéis estão sujeitos a níveis de irradiância diferentes, respectivamente, 1000 W/m^2 e 500 W/m^2 .

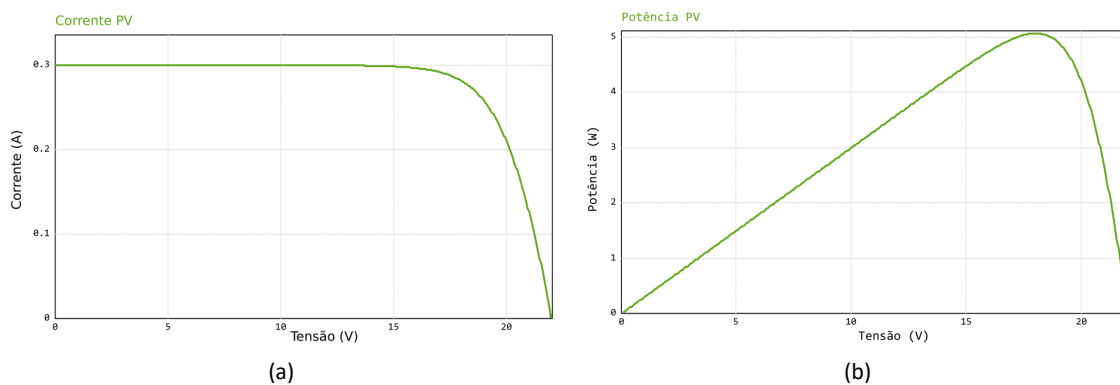


Figura 9: Curva característica (a) I-V e (b) P-V sob as condições STC, utilizadas como referência para simulação de condições PSC.

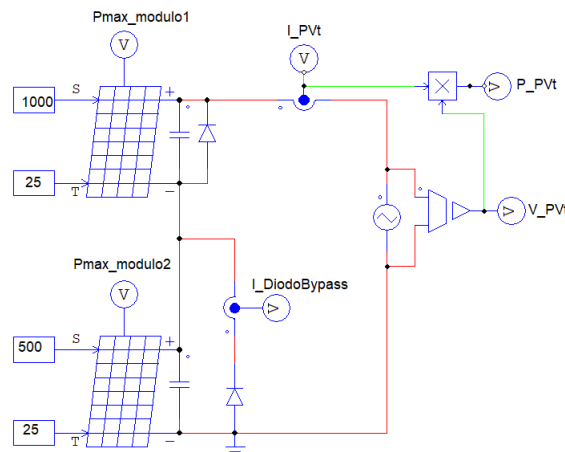


Figura 10: Circuito utilizado para simulação de condições PSC.

Analisando, inicialmente, os painéis sujeitos às mesmas condições de irradiância e temperatura (1000 W/m^2 e 25°C), observamos, através das curvas características, que a corrente total do conjunto apresenta o valor máximo de 300 mA, conforme indicado pela curva I-V apresentada na Figura 11a. Por outro lado, a potência máxima do sistema duplicou, atingindo os 10 W, conforme demonstrado no curva P-V da Figura 11b.

Avaliando agora o circuito apresentado na Figura 10, na ausência dos diodos *bypass* conectados aos painéis. Caso as condições de irradiância diminuam para metade, é expectável que a corrente tenha o mesmo comportamento. Dessa forma, o painel 2 deverá produzir uma corrente máxima de 150 mA. Como já mencionado, na ausência dos diodos *bypass*, a corrente do sistema fica

2.5. Efeito do Sombreamento Parcial

limitada pelo painel de menor produção, neste caso o painel 2. Este comportamento é evidenciado pelo gráfico I-V do sistema, apresentado na Figura 12a. Em termos de potência, a curva P-V sob estas condições, apresentada na Figura 12b, evidencia uma clara redução no valor do MPP, fixando-se nos 5,4 W.

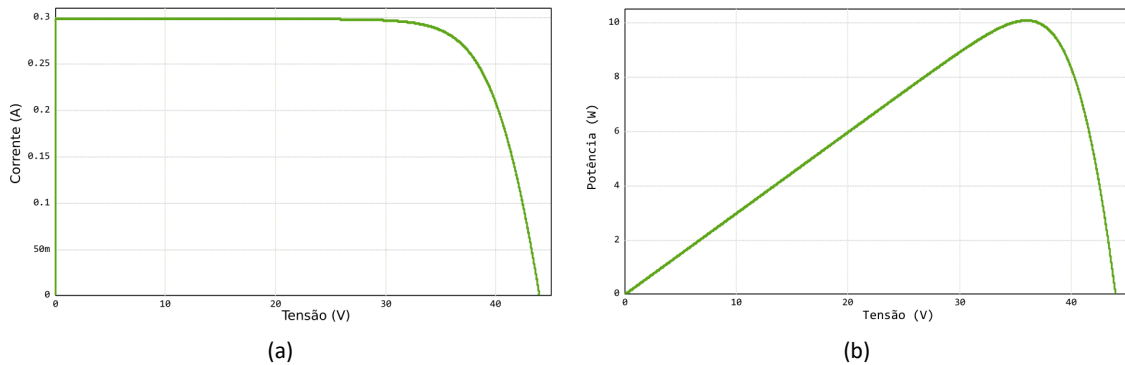


Figura 11: Curva característica (a) I-V e (b) P-V de dois módulos conectados em série, obtidas sob condições STC.

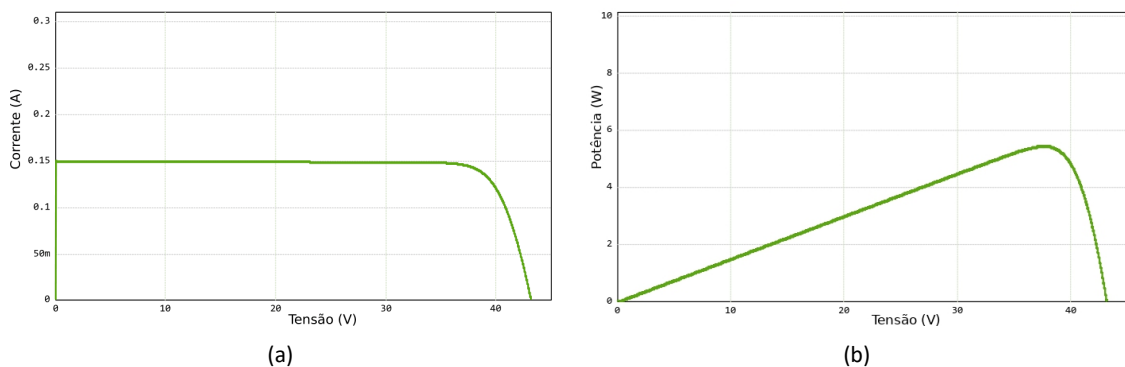


Figura 12: Curva característica (a) I-V e (b) P-V de dois módulos conectados em série, obtidas sob condições PSC, na ausência dos diodos *bypass*.

Introduzindo os diodos *bypass* conectados em antiparalelo aos painéis, caso a corrente que circula no circuito seja superior à produzida pelo painel de menor produção, a corrente circulará pelo diodo *bypass* do painel 2, o que caracteriza a polarização direta do diodo e fazendo com que, neste ponto, apenas o painel 1 produza potência. A polarização direta do diodo acontece apenas em condições de PSC [26]. No entanto, caso a corrente do circuito apresente um valor igual ou inferior a 150 mA, o diodo deixará de conduzir, o que permite que ambos os painéis produzam potência. Para evidenciar este facto na Figura 13, está apresentada a curva I-V do sistema. Fica evidente que a utilização do diodo *bypass* é imprescindível em configurações em série, uma vez que a corrente não fica limitada à produzida pelo painel sombreado.

Em relação a curva P-V, na utilização dos diodos *bypass*, esta toma a forma apresentada na Figura 14a. Diferente da curva P-V, apresentada na Figura 9b, que corresponde a uma temperatura e irradiância uniforme, nestes cenários, a curva pode apresentar diversos picos de potência com vários *Local Maximum Power Point* (LMPP), representado na Figura 14b¹ mas apenas um *Global Maximum Power Point* (GMPP). A maioria dos MPPT não conseguem distinguir a diferença entre os máximos locais e o máximo global, levando a perdas de energia. Diferentes técnicas foram

¹Obtido através da utilização de três painéis sob condições de irradiância de 1000 W/m^2 , 600 W/m^2 e 400 W/m^2 .

estudadas para contornar esta limitação e serão abordadas, juntamente com as técnicas clássicas, no seguimento da dissertação [7]–[9].

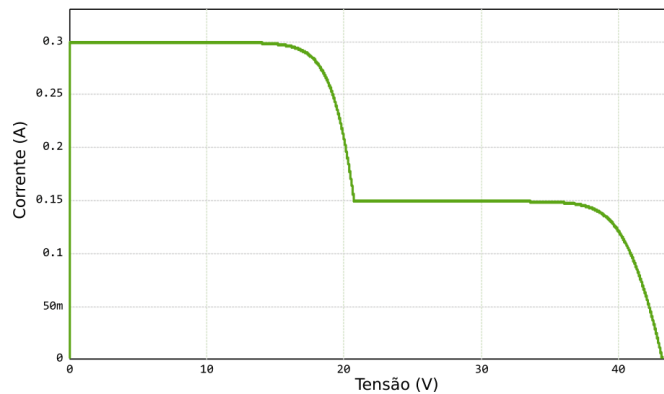


Figura 13: Curvas características I-V referente a dois módulos conectados em série, sob condições de PSC.

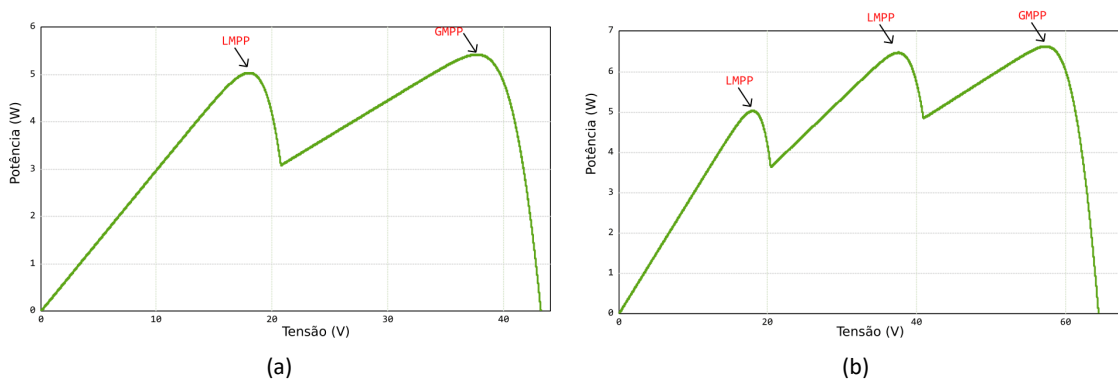


Figura 14: Curvas características P-V sob condições de PSC, considerando (a) dois módulos e (b) três módulos conectados em série.

2.6 Conversor CC/CC

A Figura 15 representa um diagrama esquemático simples de um sistema PV. O controlador MPPT otimiza o ponto de operação do módulo para gerar a potência máxima, ajustando o *duty cycle* do conversor CC/CC, que controla a corrente e a tensão solicitada ao painel, ajustando assim o seu ponto de funcionamento. Um inversor converte a energia em Corrente Alternada (CA), se assim for necessário, para alimentar uma carga. O *gate drive* controla os dispositivos de comutação do conversor e do inversor, garantindo o funcionamento eficiente do sistema.

Os conversores CC/CC podem ser classificados de diferentes formas. Segundo o fluxo de energia, podem ser unidirecionais, quando a energia apenas flui apenas num sentido, ou bidirecionais, quando existe a possibilidade de fluxo nas duas direções. Quanto à relação entre a tensão de entrada e saída, categorizam-se como *Boost*, quando elevam a tensão de saída face à de entrada, ou *Buck*, quando reduzem. Além disso, ainda podemos separar em conversores não isolados, quando não existe isolamento elétrico entre a entrada e a saída, ou isolados, quando existe esse isolamento. Para o controlo dos semicondutores presente nos conversores existem diferentes métodos de controlo, tais como, modulação por frequência (*Frequency Modulation (FM)*), no seguimento da dissertação, será utilizado a modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation (PWM)*) [27], [28].

2.6. Conversor CC/CC

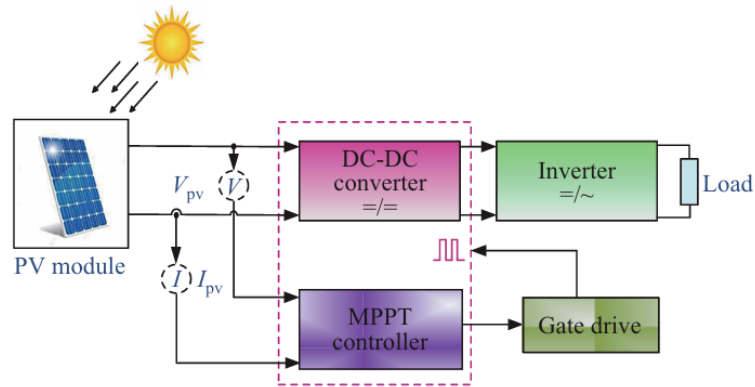


Figura 15: Diagrama de blocos de um sistema PV com sistema MPPT [8].

A modulação PWM consiste na comparação de um sinal de baixa frequência (referência) e outro sinal de frequência elevada (portadora), conforme apresentado na Figura 16a. A frequência da comutação é determinada pela portadora e o sinal resultante dessa comparação, sinal modulado, é o sinal de controlo. A razão cíclica, ou *duty cycle*, é definida como o quociente entre o período de condução, t_{on} , e o período de comutação, T [28]. No exemplo apresentado, com uma portadora de amplitude entre 0 e 1 a 1 kHz e uma referência de 0,3, o *duty cycle* obtido é de 30%, ou seja, o semiconductor teria um tempo de condução de $0,3 \cdot 1/1000$ segundos. O sinal da portadora e a referência encontra-se apresentada na Figura 16b e o PWM resultante na Figura 16c.

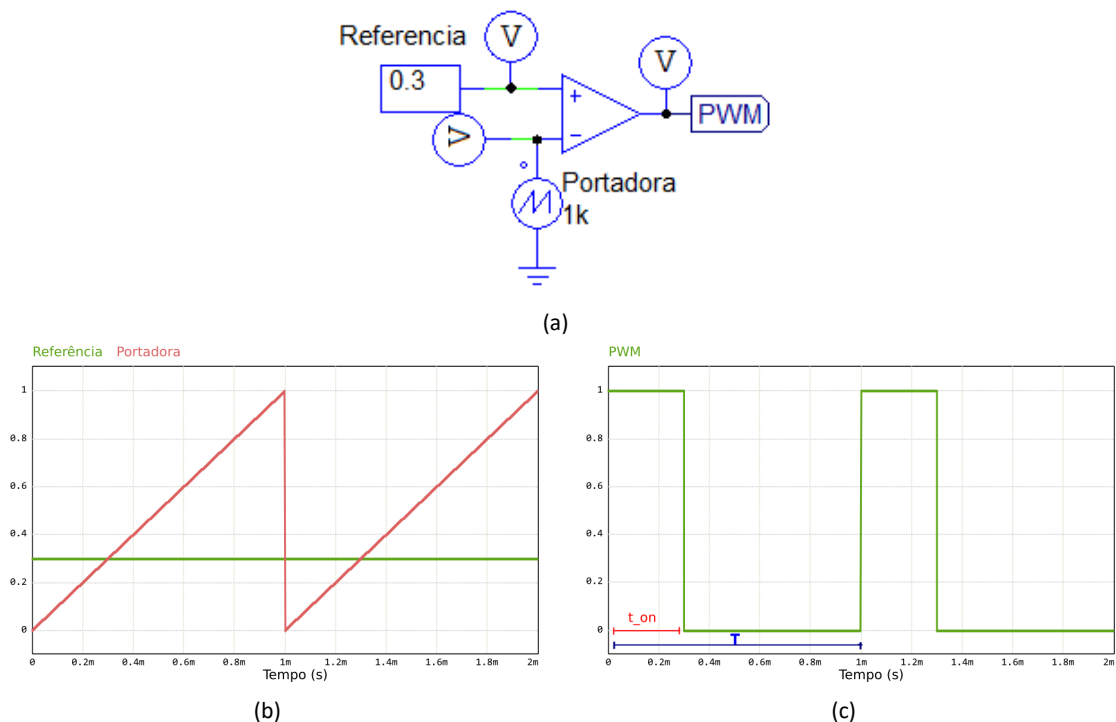


Figura 16: Modulação PWM: (a) Esquema elétrico da modulação PWM, (b) Comparação referência com portadora e (c) Resultado da comparação - Sinal PWM.

Nesta secção serão apresentados os conversores CC/CC mais usuais, nomeadamente, os conversores CC/CC *Buck* e *Boost*. Estes conversores operam em dois modos, o modo de Condução

Contínua (*Continuous Conduction Mode (CCM)*), ou o modo de Condução Descontínua (*Discontinuous Conduction Mode (DCM)*). No modo CCM, a corrente no indutor nunca atinge o valo zero durante o período de comutação. Já no modo DCM, como o nome indica, existem intervalos em que o indutor não é percorrido por corrente [29].

2.6.1 Conversor CC/CC Buck

Designados de Conversor CC/CC *Buck*, abaixador ou *step-down*, caracteriza-se por ter uma tensão de saída inferior à tensão de entrada. Os constituintes do mesmo prendem-se por um *switch* (um semicondutor como um *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET)* ou *Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)*), que serve de controlo, um díodo e uma carga. Usualmente o mesmo utiliza um filtro LC passa-baixo na saída e a configuração usual encontra-se representado na Figura 17 [28]–[30].

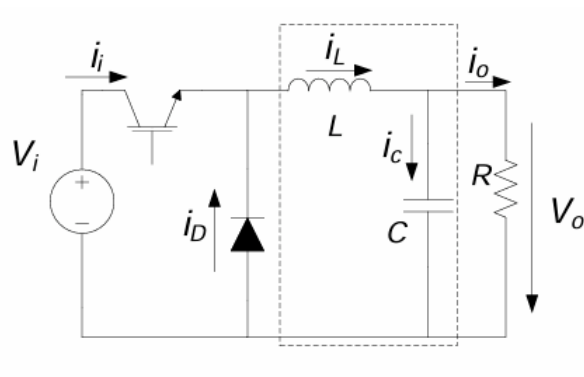


Figura 17: Conversor CC/CC *Buck* [28].

Podemos dividir o funcionamento do conversor em dois períodos, quando o *switch* está *ON*, $0 < t < D \cdot T$, sendo $t_{on} = D \cdot T$, e o segundo quando este se encontra *OFF*, $D \cdot T < t < T$, e a corrente circula pelo díodo.

Analisando, primeiramente, o modo *ON* do *switch*, representado na Figura 18a. Neste momento, origina-se uma corrente no indutor, i_L , que se divide quer pelo condensador quer pela carga. Devido a esta corrente, armazena-se no indutor energia sob o campo eletromagnético. De acordo com as leis de *Kirchhoff*, obtemos a expressão 2.5 [28].

$$V_i = L \frac{di_L}{dt} + V_o \Leftrightarrow i_L = \int_0^t \frac{V_i - V_o}{L} dt \Rightarrow i_{L_{ON}}(t) = \frac{V_i - V_o}{L} t + I_{L_{min}} \quad (2.5)$$

Quando o *switch* desliga, Figura 18b, o indutor altera a sua polaridade e começa a descarregar, a corrente neste ponto circula pelo díodo. A equação obtida esta presente na expressão 2.6 [28].

$$0 = L \frac{di_L}{dt} + V_o \Leftrightarrow i_L = \int_{t_{on}}^t \frac{-V_o}{L} dt \Rightarrow i_{L_{OFF}}(t) = -\frac{V_o}{L} (t - t_{on}) + I_{L_{max}} \quad (2.6)$$

2.6. Conversor CC/CC

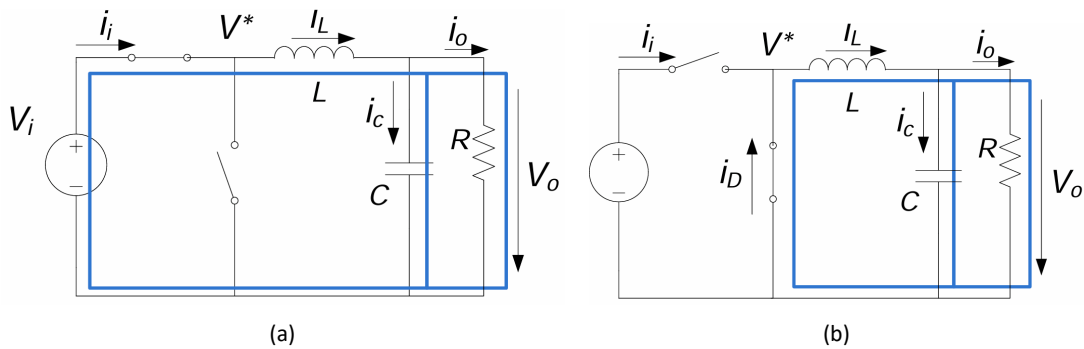


Figura 18: Funcionamento do Conversor CC/CC Buck em dois períodos: (a) *switch ON* e (b) *switch OFF*.

Na Figura 19, é apresentada a forma de onda da tensão aos terminais do indutor. Nesta, é perceptível que, quando o *switch* está *ON*, a tensão no indutor é determinada pela diferença entre a tensão de entrada e a tensão de saída. Caso o *switch* esteja *OFF*, a tensão inverte-se, assumindo um valor negativo equivalente à tensão de saída, mas com sinal oposto. Na mesma figura, é possível acompanhar a evolução da corrente no mesmo componente.

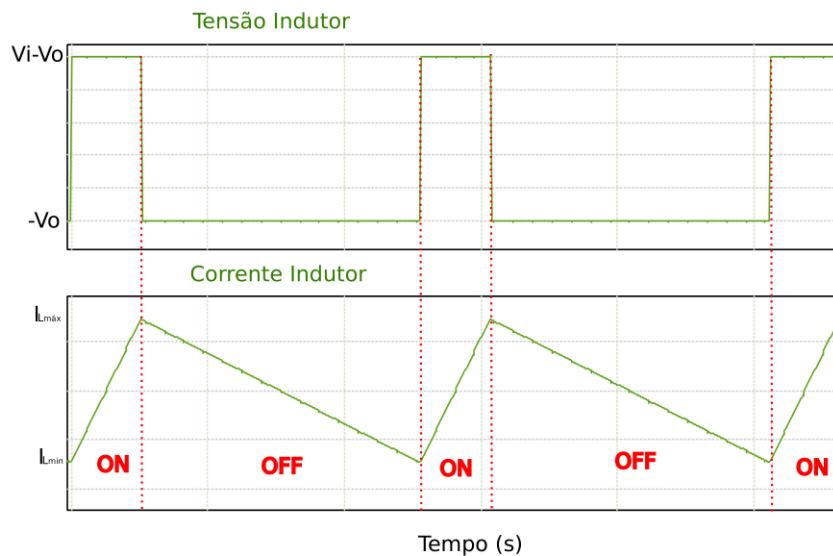


Figura 19: Formas de onda da Tensão e da Corrente no conversor CC/CC Buck.

Para que o conversor opere em regime permanente as expressões 2.7 e 2.8 devem ser satisfeitas. Isto significa que a tensão e a corrente devem oscilar de forma periódica e estável, repetindo-se a cada ciclo. Será analisado o comportamento dinâmico do indutor e do condensador neste regime de funcionamento [31].

$$v(t_0 + T) = v(t_0) \Leftrightarrow v(t_0 + T) - v(t_0) = 0 \quad (2.7)$$

$$i(t_0 + T) = i(t_0) \Leftrightarrow i(t_0 + T) - i(t_0) = 0 \quad (2.8)$$

Partindo da expressão da tensão no indutor é possível obter a expressão da corrente em função da tensão, expressão 2.9, esta dedução encontra-se representada abaixo [31].

$$\begin{aligned}
 v_L = L \frac{di_L}{dt} &\Leftrightarrow v_L dt = L di_L \Leftrightarrow \int_{t_0}^t v_L dt = \int_{i_L(t_0)}^{i_L(t)} L di_L \\
 &\Leftrightarrow \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v_L dt = i_L(t) - i_L(t_0) \Leftrightarrow i_L(t) = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v_L dt + i_L(t_0)
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Ao analisarmos a resposta do indutor ao longo de um período T , iniciando num instante t_0 , obtemos a expressão 2.10. É de ressaltar que o primeiro membro representa o valor médio da tensão no indutor. Segundo a expressão apresentada em 2.8, o segundo membro é igual a zero, o que leva à conclusão de que, em regime permanente, o valor médio da tensão no indutor é nulo [31].

$$\begin{aligned}
 \frac{L}{T} \cdot \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v_L dt &= \frac{L}{T} (i_L(t) - i_L(t_0)) \\
 \Leftrightarrow \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v_L dt &= \frac{L}{T} (i_L(t_0 + T) - i_L(t_0)) = 0
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

De forma análoga, ao avaliar a resposta dinâmica de um condensador em regime permanente, partindo da expressão da corrente no condensador, considerando o intervalo de tempo entre t_0 e t_0+T , o primeiro membro da expressão representa o valor médio da corrente no condensador. O segundo membro indica a condição de regime permanente logo, o funcionamento neste regime implica que o valor médio da corrente no indutor seja zero [31]. Toda a dedução encontra-se representado a expressão 2.11.

$$\begin{aligned}
 i_c = C \frac{dv_c}{dt} &\Leftrightarrow i_c dt = C dv_c \Leftrightarrow \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_c dt = v_c(t) - v_c(t_0) \\
 \Leftrightarrow \frac{1}{T} \int_{t_0}^t i_c dt &= (v_c(t) - v_c(t_0)) \frac{C}{T} \Leftrightarrow \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i_c dt = (v_c(t_0 + T) - v_c(t_0)) \frac{C}{T} = 0
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Como demonstrado, o valor médio da tensão no indutor, em regime permanente, é nulo. Partindo desse pressuposto, obtemos a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada para o conversor *Buck*. Esta dedução está apresentada no seguimento e culminou na expressão 2.12 [28].

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{T} \int_0^T v_L(t) dt &= \frac{1}{T} \int_0^{DT} (V_i - V_o) dt + \frac{1}{T} \int_{DT}^T (-V_o) dt = 0 \\
 \Leftrightarrow \frac{1}{T} (V_i - V_o) DT - \frac{1}{T} V_o (T - DT) &= 0 \Leftrightarrow V_o = DV_i
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

Para o dimensionamento do filtro LC, na saída o valor do *ripple* da corrente no indutor, analisando o período *ON* do *switch* (visto que o *ripple* é igual analisar o outro instante traria os mesmos resultados), é dado pela expressão 2.16 [32].

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \Leftrightarrow v_L = L \cdot \frac{\Delta i_L}{\Delta t} \Leftrightarrow \Delta i_L = \frac{V_i \cdot (1 - D) \cdot D \cdot T}{L} \quad (2.13)$$

Considerando que pretendemos que o conversor opere no modo CCM, partindo do limiar entre este modo de operação e o DCM, conforme as expressões 2.14 e 2.15. Nestas condições, o valor mínimo que garanta o funcionamento no modo CCM é dado pela expressão 2.16 [28]. Considerando que o valor médio da corrente da carga, i_o , é igual à corrente média no indutor, $\langle i_o \rangle = \frac{i_{Lmin} + i_{Lmax}}{2}$.

$$i_{Lmin} = \langle i_L \rangle - \frac{\Delta i_L}{2} = \langle i_o \rangle - \frac{\Delta i_L}{2} = 0 \quad (2.14)$$

$$i_{Lmax} = i_L(t_0) = 0 + \frac{V_i - V_o}{L} \cdot t_{on} \quad (2.15)$$

$$\begin{cases} i_{Lmax} = \Delta i_L = (V_i - V_o) \frac{DT}{L} \\ \Delta i_L \leq 2 \cdot \langle i_o \rangle = 2 \cdot \frac{V_o}{R} \end{cases} \Leftrightarrow \left\{ 2 \cdot \frac{V_o}{R} \geq (V_i - V_o) \frac{DT}{L} \Leftrightarrow L \geq (1 - D) \frac{RT}{2} \right. \quad (2.16)$$

Em relação ao condensador, o *ripple* da tensão de saída é dado pela expressão 2.17. Onde ΔQ representa a variação de carga no condensador. Podemos definir ΔQ através da expressão 2.18, obtida através da forma de onda da corrente no condensador, Figura 20. Dado que já conhecemos o valor de Δi_L , substituindo-o, obtemos a expressão 2.19, onde é perceptível que *ripple* da tensão de saída é controlado com base num condensador que siga a expressão 2.19 [28], [32].

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} \quad (2.17)$$

$$\Delta Q = \frac{\left(\frac{DT}{2} + \frac{(1-D)T}{2} \right) \cdot \frac{\Delta i_L}{2}}{2} \quad (2.18)$$

$$C = \frac{(1 - D)V_o \cdot T^2}{8 \cdot L \cdot \Delta V_o} \quad (2.19)$$

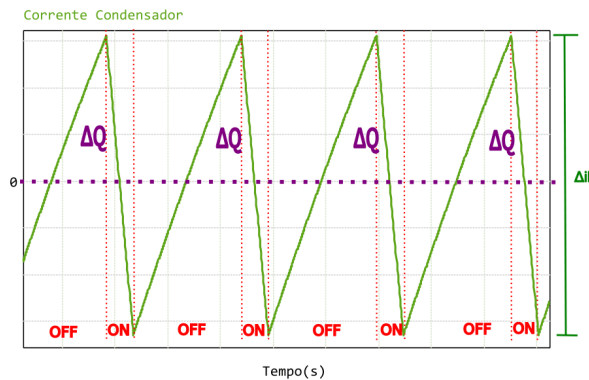


Figura 20: Formas de onda da Corrente no condensador no conversor CC/CC Buck.

De modo a suavizar a ondulação da tensão de entrada proveniente de um painel PV, devido à não linearidade das suas características, é necessário utilizar um condensador de entrada, C_{in} . De acordo com [33] e de forma a garantir que a ondulação de entrada, $\Delta V_i/V_i$, seja limitada a 1%, para melhor eficiência, o dimensionamento desse condensador pode ser efetuado com recurso a expressão 2.20.

$$C_i \geq \frac{V_i \cdot D \cdot (1 - D)}{8 \cdot L \cdot f^2 \cdot \Delta V_i} \quad (2.20)$$

2.6.2 Conversor CC/CC Boost

O conversor *CC/CC Boost*, *step-up* ou elevador, é caracterizado por uma tensão de saída superior à de entrada. Os componentes que o constituem são semelhantes aos utilizados num conversor *Buck*. A configuração de um conversor *Boost* tradicional está representado na Figura 21.

A análise do funcionamento do conversor *Boost* seguirá os princípios utilizados para o conversor *Buck*, serão analisados em regime permanente e em CCM.

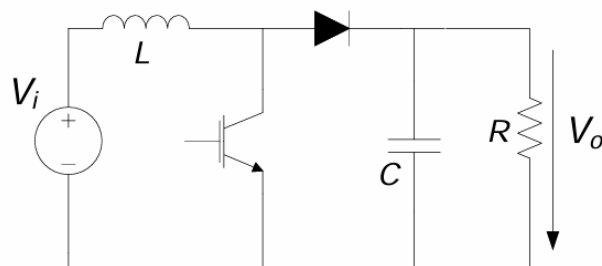


Figura 21: Conversor CC/CC Boost [28].

No conversor *Boost*, à semelhança do anterior, também podemos dividir o funcionamento em dois períodos, período *ON* ($0 < t < D \cdot T$) e período *OFF* ($D \cdot T < t < T$). Caso o *switch* esteja *ON*, Figura 22a, o diódo encontra-se inversamente polarizado, não conduzindo, a tensão aos seus terminais é igual a $-V_o$. O indutor armazenará energia, sendo submetido a uma tensão igual à tensão de entrada. No período *OFF*, Figura 22b, o interruptor abre e o indutor inverte a sua polaridade. A corrente no indutor força a condução do diódo, permitindo transferir energia para a carga. A tensão aos terminais do indutor passa a ser dado por $V_L = V_i - V_o$ [28], [34].

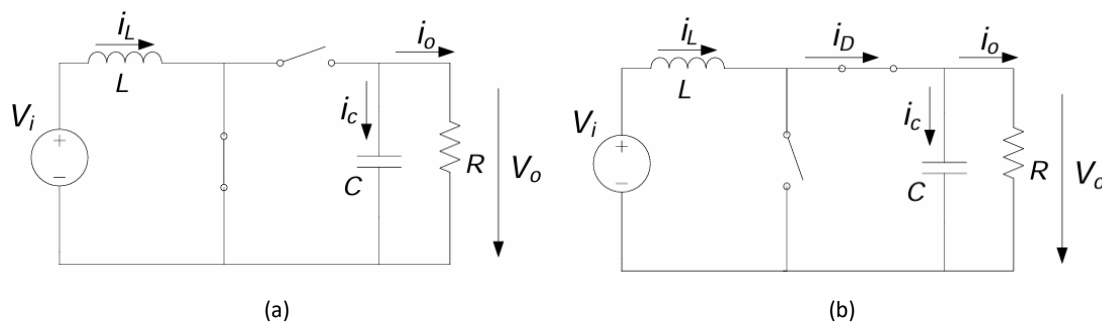


Figura 22: Funcionamento do Conversor CC/CC Boost em dois períodos: (a) *switch ON* e (b) *switch OFF*.

Analisando a corrente no indutor partindo da expressão 2.9. Durante o período *ON*, sabendo que $V_L = V_i$, a variação da corrente neste é dada pela expressão 2.21. Em relação ao período *OFF*,

2.6. Conversor CC/CC

temos que $V_L = V_i - V_o$, a variação da corrente passa a ser dada pela expressão 2.22. A forma de onda da tensão no indutor e da sua corrente esta apresentada em Figura 23 [34].

$$i_L = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v_L dt + i_L(0) \Leftrightarrow i_{L_{ON}} = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t V_i dt + I_{L_{\min}} = \frac{V_i}{L} t + I_{L_{\min}} \quad (2.21)$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v_L dt + i_L(0) \Leftrightarrow i_{L_{OFF}} = \frac{1}{L} \int_{DT}^t (V_i - V_o) dt + I_{L_{\max}} = \frac{V_i - V_o}{L} (t - DT) + I_{L_{\max}} \quad (2.22)$$

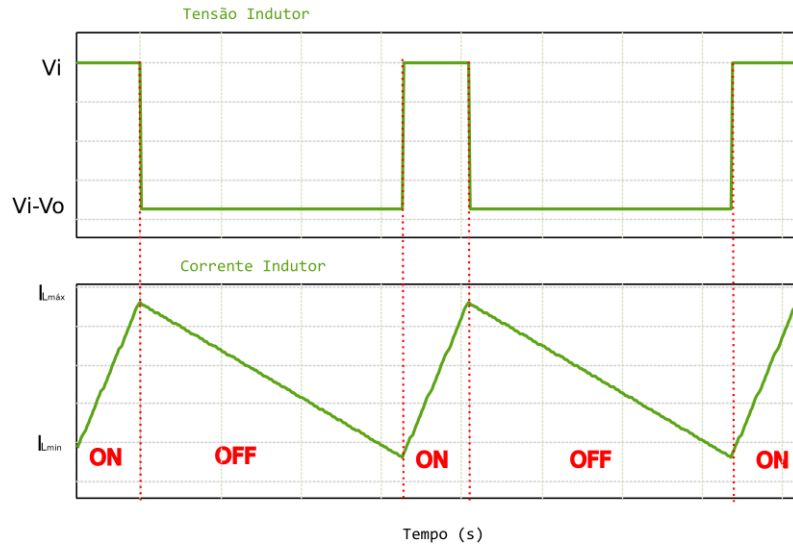


Figura 23: Formas de onda da Tensão e da Corrente no conversor CC/CC Boost.

Em regime permanente, como já explicado, a tensão média no indutor terá de ser nula. A partir da análise do gráfico da tensão no indutor, observamos que o valor médio num período é dado pela expressão 2.23. Evidenciando o termo V_o , obtém-se a expressão 2.24, que evidencia a relação entre a tensão de saída e de entrada [28], [34].

$$\int_0^T v_L(t) dt = 0 \Leftrightarrow V_i DT + (V_i - V_o)(1 - D)T = 0 \quad (2.23)$$

$$V_o = \frac{V_i}{1 - D} \quad (2.24)$$

Para o dimensionamento do indutor, parte-se da expressão da tensão no mesmo, o que permite deduzir a expressão 2.25, que relaciona o valor do indutor com o *ripple* de corrente desejado [34].

$$\begin{cases} v_L = L \frac{\Delta i_L}{\Delta t} \\ v_L = V_i \\ \Delta t = DT \end{cases} \Rightarrow V_i = L \frac{\Delta i_L}{DT} \Leftrightarrow L = V_i \frac{DT}{\Delta i_L} \quad (2.25)$$

Assumindo que no instante ON , a corrente que circula no condensador pode ser aproximadamente simétrica, a que circula na carga podemos afirmar que i_c aproximadamente $-V_O/R$. A corrente negativa traduz a descarga do condensador. Durante esse período, a evolução da tensão no condensador é dada pela expressão 2.26. A partir desta, pode ser determinada a expressão 2.27, que relaciona o valor do condensador de saída com o *ripple* de tensão pretendido [28].

$$\frac{dV_C(t)}{dt} = \frac{i_C(t)}{C} \simeq \frac{1}{C} \left(\frac{-V_O}{R} \right) \quad (2.26)$$

$$\Delta V_C = \left| \frac{1}{C} \left(\frac{-V_O}{R} \right) \right| DT \Leftrightarrow \Delta V_C = \frac{V_O DT}{RC} \quad (2.27)$$

2.7 Aplicação de Sistemas Fotovoltaicos

Atualmente, observa-se um aumento na utilização de sistemas fotovoltaicos, impulsionada especialmente por preocupações ambientais. Estes sistemas são utilizados em diferentes contextos, desde o setor residencial, onde permite uma menor dependência da rede e proporciona benefícios económicos, até ao meio rural, onde assumem um papel importante devido ao acesso à rede limitado. No meio industrial, a utilização dos sistemas PV aumentou nos últimos anos, visando diminuir os custos de operação, e tornar o meio mais sustentáveis.

Podemos classificar os sistemas PV quanto à sua ligação à rede elétrica em duas categorias, não conectados, *Off-Grid*, e conectados, *On-Grid*. Em relação à fonte de produção de energia, caso esta não seja unicamente fotovoltaica, ou seja, utiliza outras fontes como, por exemplo, a eólica, designamos o sistema como híbrido [18], [35].

Os sistemas *Off-Grid* ou isolados são aqueles que operam sem conexão à rede elétrica. Estes tipos de sistemas são usuais em regiões onde o acesso à rede é limitado ou economicamente inviável. Neste tipo de sistemas, além da conexão à carga, é usual a utilização de baterias para armazenamento de energia. Dependendo do tipo de carga (Corrente Contínua (CC) ou CA) pode ser necessário um inversor (CC/CA). O sistema ainda utiliza um controlador de carga, que incorpora o MPPT, que tem a função de regular a carga e descarga das baterias em função da produção e consumo do sistema [17], [18], [35].

Nos sistemas *On-Grid*, não é necessário o uso de baterias para armazenamento do excedente de energia, uma vez que este é injetado na rede elétrica. Estes sistemas podem variar desde instalações residenciais, com potências na ordem de alguns kW, até grandes sistemas operados de forma comercial, podendo atingir potências na ordem dos MW. Todos os sistemas conectados à rede necessitam obrigatoriamente de um inversor [17].

A legislação em vigor em Portugal, prevê que um autoconsumidor, ou seja, um produtor de energia a partir de fontes renováveis, deve possuir uma Unidade de Produção para Autoconsumo (UPAC) [36]. O cumprimento dos requisitos legais depende da potência instalada:

1. Potência instalada igual ou inferior a 700 W está isenta de controlo prévio, desde que não esteja prevista a injeção na Rede Elétrica de Serviço Público (RESP);
2. Potência instalada superior a 700 W e igual ou inferior a 30 kW está sujeita a comunicação prévia junto da Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG);
3. Potência instalada superior a 30 kW e igual ou inferior a 1 MW está sujeita a registo prévio e certificado de exploração emitido pela DGEG;

2.7. *Aplicação de Sistemas Fotovoltaicos*

4. Potência instalada superior 1 MW está sujeita a atribuição de licença de produção e de exploração por parte da DGEG [37].

Um sistema unicamente fotovoltaico é muito dependente das variações ambientais, assim como muitas outras fontes renováveis. Para tentar ajustar-se a essa dependência, é usual utilizar sistemas híbridos, que combinam várias fontes de produção, como a eólica e a solar [17].

3 *Maximum Power Point Tracking* (MPPT)

Devido às mudanças ambientais, na temperatura e na irradiância solar, o ponto de MPP sofre alterações. Para garantir que a potência extraída esteja sempre próxima da máxima, surgem as técnicas MPPT. De acordo com [8] e [38] podemos classificar as técnicas MPPT em quatro categorias principais sendo estas:

- Técnicas clássicas de controlo MPPT;
- Técnicas inteligentes de controlo MPPT;
- Técnicas de otimização;
- Técnicas híbridas.

No seguimento deste capítulo, serão apresentadas algumas técnicas dentro destas quatro categorias.

3.1 *Técnicas clássicas de controlo MPPT*

Os métodos clássicos são facilmente implementados devido à menor complexidade do algoritmo. Em condições de irradiância constante, estes métodos apresentam um bom desempenho, sobretudo devido à existência de apenas um MPP [8]. Contudo, apresentam oscilações rápidas perto deste, o que resulta em perda de potência. Além disto, estas técnicas negligenciam o efeito de sombreamento parcial do painel, o que pode levar a não ser rastreado o real GMPP, devido à existência de máximos locais nestas condições [8], [38]. Os benefícios prendem-se pela simplicidade e baixo custo de implementação, mas apresentam limitações na precisão, principalmente em PSC.

3.1.1 *Constant Voltage Tracking (CVT)*

O *Constant Voltage Tracking* (CVT) é o método mais simples, rápido e fácil de implementar, mas apresenta uma precisão baixa. Este método compara a tensão do PV com a tensão de referência fixa equivalente ao MPP, geralmente entre 72% e 80% da tensão em vazio do painel, V_{oc} [38], [39]. Esta tensão de referência é utilizada para ajustar o valor do *duty cycle* do conversor por meio de um *feedback* [38]. Esta técnica deve ser usada para condições de irradiância uniforme, visto que negligencia o efeito da irradiação e da temperatura. O CVT estima o ponto MPP um pouco distante do MPP genuíno (baixa precisão) [8], [39].

3.1.2 Open Circuit Voltage (OCV) (MPPT)

Para que o painel funcione perto do MPP, a *Open Circuit Voltage* (OCV) assume uma tensão para o MPP. A tensão de MPP é definida em função da tensão em vazio do painel, V_{OC} , que deve ser medida em intervalos regulares, de acordo com a equação 3.1, onde k é uma constante compreendida entre 0,73 e 0,8 [38].

$$V_{MPP} = k \cdot V_{OC} \quad (3.1)$$

Durante o processo de comparação, o módulo deve ser temporariamente isolado, o que promove perda de energia, para que se meça a tensão em vazio. Utilizando a equação 3.1 é calculado a tensão do MPP e ajustado a tensão do painel até que se atinja V_{MPP} calculado [38].

3.1.3 Short Circuit Current (SCC) (MPPT)

O *Short Circuit Current* (SCC) é semelhante ao método OCV, mas este utiliza a corrente de curto-circuito do PV para determinar a corrente ideal para extrair maior potência (I_{MPP}). Utiliza a equação 3.2 para definir essa corrente, na qual I_{SC} é a corrente de curto-circuito. O valor de k_i está compreendido entre valores de 0,75 a 0,9 [8] sendo 0,85 no caso de módulos PV policristalinos [40].

$$I_{MPP} = k_i \cdot I_{SC} \quad (3.2)$$

3.1.4 Hill Climbing (HC)

As técnicas *Perturb and Observe* (P&O) e *Incremental Conductance* (InC), que serão abordadas no seguimento, são baseadas nos princípios da *Hill Climbing* (HC), que consistem na movimentação do ponto de operação do sistema PV na direção em que se verifique um aumento da potência. Se a solução encontrada resultar numa melhoria, a busca mantém os mesmos incrementos. Este processo continua até não ser observado mais melhorias na solução [8]. O modo de funcionamento deste tipo de estratégias aparece na Tabela 1 e é a mesma para as técnicas restantes, mas os cálculos/algoritmos diferem.

Tabela 1: Variação probabilística da direção de HC, adaptado de [8].

ΔP	ΔV	Direção de perturbação na Tensão
+	+	+
+	-	-
-	+	-
-	-	+

Nota: ΔP , ΔV são variação de potência e tensão, respetivamente; + Incremento; - Decremento.

Este tipo de técnicas apresenta uma limitação que está associada às oscilações em torno do MPP, além de não conseguir diferenciar mudanças repentinas nas condições ambientais [8]. Em condições de PSC as técnicas baseadas no HC apresentam eficiências limitadas [39].

3.1.5 Perturb and Observe (P&O) MPPT

O método *Perturb and Observe* (P&O) é o algoritmo MPPT mais utilizado pela sua simplicidade e baixo custo de implementação. O mesmo atua perturbando a tensão periodicamente, aumentando ou diminuindo, e comparando a potência de saída do PV com a perturbação anterior, baseado do método de tentativa e erro [8], [41]. Caso a perturbação resulte num aumento de potência, então esta é aplicada novamente na mesma direção, caso contrário, a perturbação é aplicada na direção oposta [42]. Para o efeito necessita de dois sensores, um para a corrente e outro para a tensão. O fluxograma do P&O pode ser acompanhado na Figura 26a.

Para o método P&O convencional com *fixed perturbation*, é definido, à partida, um *step size* que desempenha um papel importante para o rastreamento do MPP. Se o tamanho do *step* for muito grande, resulta em grandes oscilações sobre o ponto de máxima potência. Por outro lado, um *step* muito pequeno leva a uma resposta muito lenta para ambientes em que as condições ambientais estejam em constante mudança [38], [42].

No método P&O convencional com *adaptive perturbation*, o processo de rastreamento envolve o ajuste da perturbação, que neste caso é a tensão. O *step size* para a perturbação da tensão é inicialmente definido com 10% da tensão em circuito aberto (V_{oc}). Esta abordagem traz melhor desempenho relativamente à abordagem com *fixed perturbation*, diminuindo o tempo de resposta e as oscilações em torno do máximo [38].

O algoritmo do P&O convencional pode falhar em condições de sombreamento parcial, onde múltiplos pontos de potência máxima locais podem existir. Este tende a ficar “preso” num LMPP, que são menores que o GMPP, devido a este não distinguir os máximos locais do máximo global. Além disso, este método pode levar a que o sistema prossiga na direção errada quando existem mudanças repentinas nas condições ambientais. Considerando a Figura 24, em que o ponto de funcionamento seja o ponto A, de repente a condição de irradiância muda e o sistema se move para o ponto B1. Nesse ponto, o algoritmo verifica a diferença de potência que é $B1-A > 0$. Em seguida, o algoritmo verifica a diferença de tensão que é $B1-A > 0$, ou seja, assume que um aumento na tensão levou a um aumento da potência, logo vai progredir nessa direção. Isso move o ponto operacional para B2, que está mais longe do MPP, neste caso o ponto B. Este fenômeno é chamado de *drifting* [42].

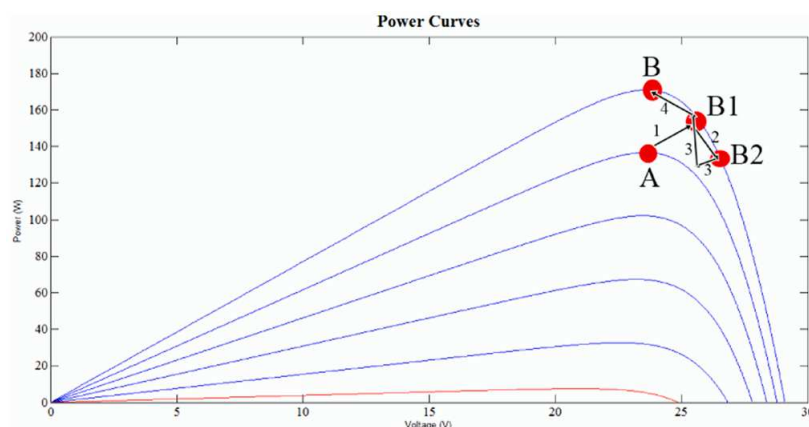


Figura 24: Desempenho P&O quando se altera as condições ambientais [42].

3.1.6 Incremental Conductance (InC) MPPT

Os algoritmos baseados no *Incremental Conductance* (InC) rastreiam o MPP utilizando a relação única da curva I-V (Corrente-Tensão). Esta relação está diretamente associada à curva de P-V, permitindo determinar a trajetória do ponto de trabalho. Sabemos que encontramos o MPP (sendo este GMPP ou LMPP) quando o $dP/dV = 0$. Quando $dP/dV > 0$ o ponto real de funcionamento parece estar na metade esquerda do MPP, caso contrário, na metade direita [8]. Na Figura 25 encontra-se apresentada uma curva P-V de um painel fotovoltaico.

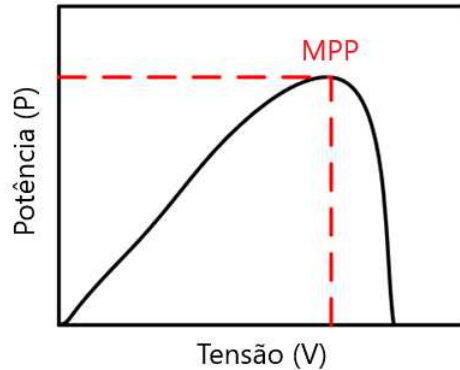


Figura 25: Curva P-V de um PV, adaptada de [43].

Explicando em termos matemáticos, e partindo do pressuposto que $\frac{dP}{dV} = 0$ é o ponto do MPP, temos que:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \iff \frac{d(I \cdot V)}{dV} = 0 \iff I + V \cdot \frac{dI}{dV} = 0 \iff -\frac{I}{V} = \frac{dI}{dV} \quad (3.3)$$

Temos que [44]:

- $-\frac{I}{V} = \frac{dI}{dV}$, o ponto de funcionamento está no MPP;
- $-\frac{I}{V} < \frac{dI}{dV}$, o ponto de funcionamento está à esquerda do MPP (deve-se aumentar a tensão);
- $-\frac{I}{V} > \frac{dI}{dV}$, o ponto de funcionamento está à direita do MPP (deve-se diminuir a tensão).

O valor do incremento deve ser ajustado com cuidado, visto um grande incremento ditar uma maior velocidade, contudo uma maior oscilação em torno do MPP. Este método apresenta um controlo mais complexo quando comparados com o P&O, embora esteja associado a rendimentos maiores [40]. O fluxograma do algoritmo pode ser na Figura 26b.

3.2 Técnicas inteligentes de controlo MPPT

Devido às limitações das técnicas clássicas foram desenvolvidas técnicas inteligentes de controlo MPPT. Estes tipos de técnicas destacam-se por serem altamente adaptáveis a ambientes em rápidas mudanças. Embora apresentem vantagens no rastreamento em condições de PSC em comparação com as técnicas clássicas, ainda apresentam limitações quanto à precisão [43]. As suas eficiências e velocidades de rastreamento são altas. Contudo, este tipo de métodos requer uma enorme complexidade do circuito de controlo [8].

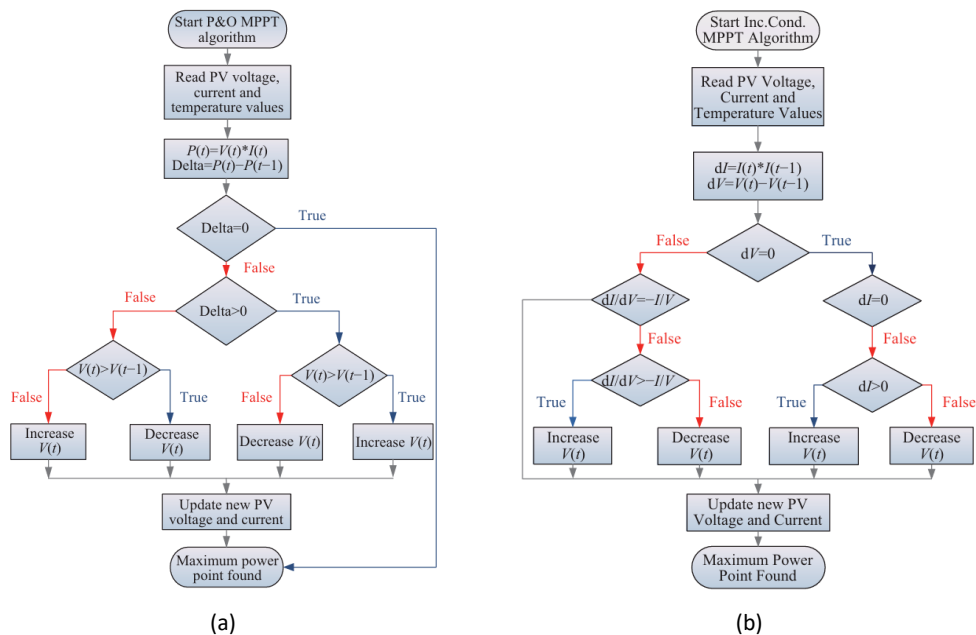


Figura 26: Fluxograma das técnicas clássicas (a) P&O e (b) Inc [8].

3.2.1 Artificial Neural Network (ANN) MPPT

As Artificial Neural Network (ANN) funcionam de forma semelhante ao cérebro humano, onde “neurónios” (nós) artificiais se conectam e ajustam os seus pesos durante o treinamento para otimizar o desempenho [38]. O modelo consiste geralmente em três camadas: uma camada de entrada (“Input Layer”), uma camada de saída (“Output Layer”) e uma camada oculta (“Hidden Layer”) [43], conforme ilustrado na Figura 27. Como variáveis de entrada podemos ter os parâmetros do módulo PV, como a V_{OC} e a I_{SC} , dados atmosféricos, como irradiância e temperatura, ou uma combinação destes fatores. A saída corresponde ao duty cycle do conversor que permitirá rastrear o MPP, conforme o algoritmo aplicado na camada oculta. O link entre os nós i e j é representado pelo peso w_{ij} na Figura 27 [38], [40].

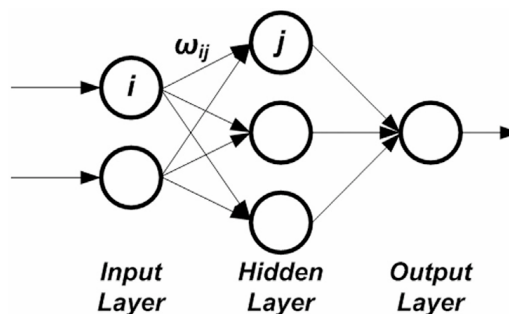


Figura 27: Camadas Neural network [40].

Na técnica ANN, os pesos das conexões são ajustados com base em dados coletados em longos períodos, estando a precisão dependente da quantidade de dados utilizados. Esta deve ser treinada especificamente para o módulo PV utilizado, não podendo ser generalizada para trabalhar em vários modelos simultaneamente. Além disso, deve ser treinada com frequência devido às alterações nas características do módulo com o passar do tempo [8], [38], [40].

3.2.2 Fuzzy Logic Controller (FLC) MPPT

As técnicas de rastreamento baseadas em *Fuzzy Logic* são consideradas inteligentes na medida que conseguem rastrear o MPP, mesmo que as entradas sejam imprecisas. Os controladores *Fuzzy* não precisam do modelo matemático do sistema, ou seja, não necessita de conhecimento do sistema, sendo muito eficiente em problemas de não linearidade, como os painéis fotovoltaicos [8], [45].

A estrutura geral de um *Fuzzy Logic Controller* (FLC) pode ser acompanhada na Figura 28. A técnica *fuzzy* compreende três estágios, nomeadamente, *fuzzification*, *rule inferences* e *defuzzification*. Além disso, possui uma tabela de regras na qual as regras projetadas são armazenadas [45].

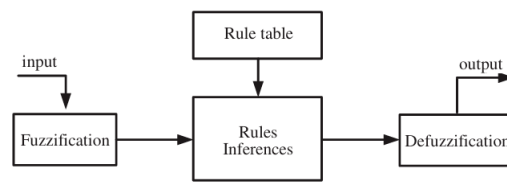


Figura 28: Estrutura de um FLC [45].

No processo de *fuzzification*, as entradas numéricas são convertidas em variáveis linguísticas (*fuzzy quantity*) baseadas numa função de pertença (da literatura inglesa “*membership function*”), semelhante ao da Figura 29. São utilizados, por exemplo, cinco níveis fuzzy: NB (*negative big*), NS (*negative small*), ZE (*zero*), PS (*positive small*) and PB (*positive big*). A atribuição desses níveis depende do usuário, geralmente com base na experiência do mesmo para o problema em questão. A função de pertença pode ser projetada de forma assimétrica para dar mais peso a níveis *fuzzy* específicos. Em geral, a quantidade de funções de pertença é mais importante do que o tipo e a forma, em termos de velocidade e precisão do sistema. Mais funções de pertença, recomendadas para problemas mais complexos, resultam em maior precisão, contudo estão associados a tempo de processamento mais longos. Em contraste, menos funções de pertença levam a um tempo de processamento mais rápido, mas com maior possibilidade de incerteza [9], [45].

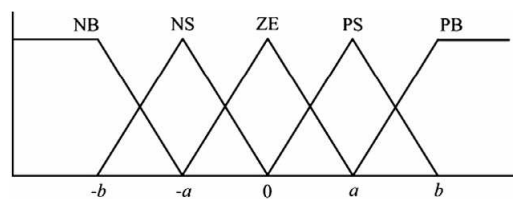


Figura 29: Funções de pertença de um conjunto *fuzzy* [45].

As entradas de um FLC, normalmente, são o erro, E , e a variação do erro, ΔE , e são calculados de acordo com a expressão 3.4 e 3.5, respetivamente [8].

$$E(n) = \frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{V_{PV}(n) \cdot I_{PV}(n) - V_{PV}(n-1) \cdot I_{PV}(n-1)}{V_{PV}(n) - V_{PV}(n-1)} \quad (3.4)$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1) \quad (3.5)$$

3.3. Técnicas de Otimização

Após calcular e converter as variáveis de entrada em variáveis linguísticas, a saída do controlador *fuzzy* normalmente corresponde à diferença no *duty cycle* (ΔD) do conversor. As variáveis linguísticas associadas à variável de saída (por exemplo ΔD), para diferentes combinações de E e ΔE , são determinadas com base nas características do conversor de potência e na experiência do usuário, por meio de uma tabela de regras semelhante à Tabela 2, onde E e ΔE são as variáveis de entrada e ΔD a variável de saída. Tomando um exemplo em que o ponto de operação esta muito à esquerda do MPP significa que a variável E será PB, caso ΔE for ZE, o *duty cycle* precisa ser aumentado, e ΔD , segundo a tabela de regras, passará a PB [45].

Tabela 2: Exemplo de tabela de regras FLC [45].

$E \backslash \Delta E$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	ZE
NS	NB	NS	NS	ZE	PS
ZE	NB	NS	ZE	PS	PB
PS	NB	ZE	PS	PB	PB
PB	ZE	PS	PB	PB	PB

No estágio de *defuzzification*, a saída do FLC é convertida de uma variável linguística para uma variável numérica. Existem várias técnicas de *defuzzification* [45].

O FLC mostra bom funcionamento em condições atmosféricas variáveis. Contudo, a sua eficácia está fortemente relacionada com escolha da função de pertinência e a tabela de regras utilizada, ou seja, a eficiência deste método exige um conhecimento abrangente do usuário que projeta o sistema [9], [40].

Além dessas limitações, o FLC (puro) demonstra dificuldade em lidar com condições de sombreamento parcial, uma vez que para tal seria necessário modificar dinamicamente a tabela de regra. No entanto, essa tabela é fixa o que torna muito difícil alterá-la enquanto o controlador está em operação. Para contornar essa limitação, torna-se necessário acoplar o FLC a outro controlador, como por exemplo o P&O tradicional. Esta e outras abordagens serão discutidas no seguimento do relatório [45]. Em [46] é proposto um FLC adaptável capaz de reajustar a regras de pertinência, com o objetivo de melhorar o desempenho em condições de PSC.

3.3 Técnicas de Otimização

As técnicas baseadas em algoritmos meta-heurísticos, são, amplamente, utilizados para rastrear o MPP em PV. Esses métodos oferecem abordagens confiáveis para rastrear o MPP de forma eficaz, mesmo em cenários de condições meteorológicas desafiadoras, superando as limitações dos métodos convencionais. Estas técnicas, na sua essência, são inspiradas no comportamento biológico de certos animais [8].

3.3.1 Particle Swarm Optimization (PSO)

A *Particle Swarm Optimization* (PSO), introduzida por James Kennedy e Russel Eberhart em 1995 [47], é um algoritmo baseado no comportamento coletivo de animais, como bandos de pássaros e cardumes de peixes. Este utiliza partículas que se movimentam num espaço n-dimensional ao redor delas, designado de o espaço do problema, interagindo entre si em busca de um objetivo

definido por uma função de aptidão [48]. Podemos fazer uma analogia, por exemplo, com o comportamento de um bando de pássaros na busca pelo melhor lugar para descansar, considerando características importantes, como a existência de alimento [49].

No contexto do MPPT, as partículas do PSO podem representar valores possíveis para o *duty cycle* do conversor, conectado ao PV, como explorado em [48]. A função de aptidão avalia o desempenho de cada partícula baseada na potência gerada, orientando para o MPP. No processo de inicialização, as partículas são posicionadas no espaço do problema, de forma uniforme ou aleatória. Caso haja informação sobre a possível localização do GMPP as partículas devem ser inicializadas ao seu redor. Um maior número de partículas resulta num rastreamento mais preciso, contudo está associada aos tempos de computação mais prolongados [48].

Visto ter uma população completamente conectada, cada partícula ajusta a sua trajetória com base na sua melhor posição encontrada até ao momento, p_{best} , e na melhor posição descoberta pela população, g_{best} . Garantindo que o movimento de cada partícula é determinado tanto pelas suas experiências anteriores como pelas soluções das demais partículas [8], [49]. A posição de cada partícula pode ser calculada pela equação 3.6.

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (3.6)$$

Na qual V_i^{k+1} representa a velocidade da partícula i na iteração $k + 1$, e pode ser calculada através da equação 3.7:

$$V_i^{k+1} = w^k \cdot V_i^k + c_1 \cdot rand_1() \cdot (p_{best,i} - X_i^k) + c_2 \cdot rand_2() \cdot (g_{best,i} - X_i^k) \quad (3.7)$$

Em que, X_i^k representa a posição da partícula i na iteração $k + 1$, V_i^{k+1} a velocidade da partícula na iteração $k + 1$, w^k é designado de peso da inércia, que permite a própria partícula ter informação sobre a movimentação anterior, $rand_1()$ e $rand_2()$ são valores aleatórios compreendidos entre 0 e 1, $p_{best,i}$ representa a melhor posição encontrada pela partícula i até ao momento e $g_{best,i}$ a melhor posição encontrada por todas as partículas até ao momento, c_1 e c_2 são coeficientes de aceleração cognitiva e social, respetivamente. A escolha destes coeficientes determina a influência, individual e da população, sobre a velocidade da partícula. Caso c_1 for superior a c_2 , a movimentação da partícula prioriza a melhor posição encontrada pela partícula face à melhor posição da população [50]. Concluindo, cada partícula altera a sua posição de acordo com a posição e velocidade atual, bem como na distância entre a posição atual e p_{best} e g_{best} , representado vetorialmente na Figura 30.

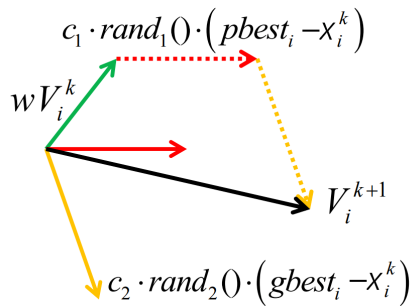


Figura 30: Representação vetorial da atualização da Velocidade em PSO [50].

O algoritmo termina quando um critério de convergência é atingido, o que pode ocorrer ao alcançar o número máximo de iterações definidas ou quando as velocidades das partículas estabilizam, indicando que o sistema está num MPP [48], [49].

A utilização de PSO para MPPT verifica-se fiável, preciso e de convergência rápida na procura de um GMPP mesmo em condições de sombreamento parcial. Normalmente, o PSO é utilizado em conjunto com outras técnicas de maneira a melhorar a eficiência de rastreamento [45].

3.3.2 Ant Colony Optimization (ACO)

O *Ant Colony Optimization* (ACO) é baseado no comportamento de uma colónia de formigas especialmente durante a busca por alimento, em que as formigas seguem o caminho mais curto entre o ninho e a comida. Muitas espécies de formigas realizam comunicação utilizando uma substância química denominada de feromona [50], [51].

Inicialmente as formigas escolhem o caminho entre o ninho e a comida de forma aleatória. Com o passar do tempo, um dos caminhos acumula mais feromona atraindo mais formigas. Caso haja um caminho mais curto, ele é percorrido mais rapidamente, acumulando feromona de forma mais eficiente. Nos caminhos mais longos a substância evapora levando as formigas a convergi-rem para o trajeto mais curto, ou seja, o melhor trajeto [50].

O algoritmo segue esta lógica para o rastreio do MPP. O processo inicializa com as “formigas” distribuídas aleatoriamente, sendo que a função objetivo é obter a melhor potência de saída (GMPP) [51]. A formiga segue o caminho com maior aceitação, p_{ij} , calculado pela equação 3.8, entre as soluções que não testou.

$$p_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{[k_{ij}(t)]^\alpha [m_{ij}]^\beta}{\sum_{j \in N_i^k} [k_{ij}(t)]^\alpha [m_{ij}]^\beta}, & \text{se } j \in N_i^k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.8)$$

Onde $k_{ij}(t)$ representa a quantidade de feromona presente entre o caminho (i, j) , m_{ij} é a proximidade da cidade i à j , α e β parâmetros que determinam a influência do feromona e da distância e N_i^k a vizinhança da formiga k (conjunto dos caminho ainda não explorados). A fórmula indica que, à medida que a concentração de feromona aumenta, a probabilidade de a formiga escolher esse caminho também aumenta, levando a um caminho mais curto [50], [52].

No final de cada iteração, a concentração de feromona deve ser atualizada, de acordo com a equação 3.9.

$$\tau_{ij}(t) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t - 1) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \quad (3.9)$$

Onde τ_{ij} representa a taxa de feromona, $1 - \rho$ representa a taxa de evaporação do feromona, m é o número de formigas e $\Delta\tau_{ij}^k$ é o depósito total de feromona pela formiga número k no caminho ij [50] [52].

Inicialmente, é necessário definir parâmetros, tais como o número de formigas (m), o tamanho do arquivo de solução (k) e os parâmetros que determinam a influência do feromona e da distância. Um elevado número de formigas possibilita uma exploração mais abrangente das condições ambientais, contudo, está associado a um aumento no tempo computacional [8]. O algoritmo termina quando se atinge o critério de paragem, semelhante ao PSO.

Esta técnica supera os métodos clássicos de MPPT, como o P&O [51] e o CVT [53], demonstrando uma resposta rápida, robusta e capacidade de rastrear o GMPP mesmo em condições de sombreamento parcial [43].

3.3.3 Cuckoo Search (CS)

Os cucos não constroem os seus próprios ninhos, em vez disso, utilizam os ninhos de outras aves para incubar os seus ovos. Durante o processo, normalmente retiram os ovos do hospedeiro e os substituem pelos seus próprios. Quando os filhos do cuco nascem, instintivamente empurram os ovos do hospedeiro para fora do ninho. Além disso, para garantir a sua sobrevivência, os filhotes imitam os sons produzidos pelos filhos dos hospedeiros, de maneira a serem alimentados pelo pássaro “pai” [43]. O *Cuckoo Search* (CS) funciona seguindo a mesma lógica, fundamentado em três regras:

1. Cada cuco põe um ovo de cada vez e o coloca em um ninho escolhido aleatoriamente.
2. O melhor ninho com ovos de alta qualidade será passado para a próxima geração.
3. O número de ninhos disponíveis é fixo e o ovo posto por um cuco é encontrado pelo pássaro hospedeiro com uma probabilidade, P_a , de $[0, 1]$ [54].

Caso o hospedeiro detete os ovos de cuco, este pode descartar apenas o ovo ou então abandona o ninho. Um dos modelos mais comuns para modelar a procura do ninho por parte dos cucos é o modelo de voo Lévy. Este representa um modelo aleatório onde os tamanhos de passo são definidos usando a distribuição de Lévy, representado na equação 3.10.

$$\text{Lévy}(\lambda) \approx u = 1 - \lambda, \quad \text{onde } (1 < \lambda < 3) \quad (3.10)$$

Para a utilização do CS para o MPPT, seguindo a abordagem apresentada em [55], as amostras são definidas como os valores da tensão do sistema fotovoltaico. Quer o número de amostras (n) quer o tamanho de passo (a) devem ser definidos, sendo que a na maioria das vezes assume o valor unitário [54]. A função de aptidão (J) representa o valor da potência PV, que depende diretamente da tensão (V), logo temos que $J = f(V)$.

Inicialmente, são geradas amostras de tensão de forma aleatória e aplicadas ao sistema PV. A amostra que apresentar maior J (maior potência gerada) é definida como melhor solução atual. Em seguida, o voo de Lévy é executado, gerando novos valores de tensão baseados na equação 3.11 [55].

$$V_i^{(t+1)} = V_i^{(t)} + a \oplus \text{Lévy}(\lambda) \quad (3.11)$$

Onde i é o número de amostras (ou ovos), t é o número da iteração e \oplus indica multiplicação por entrada [9].

As potências geradas pelas novas tensões são comparadas e a tensão que produzir maior potência passa a ser a melhor amostra. Em analogia ao observado nos cucos, alguma das outras amostras são destruídas aleatoriamente com probabilidade P_a e novas amostras aleatórias são geradas para substituir as destruídas. Este processo é repetido, avaliando sempre a função de aptidão e atualizando a melhor amostra. O algoritmo termina quando todas as amostras tenham chegado ao MPP [55].

O estudo de [55] comparou esta técnica com os algoritmos P&O e PSO, demonstrando que o CS apresenta melhor desempenho em termos de velocidade de convergência, flutuações transitórias e comportamento em estado estacionário. Além de possuir menor número de variáveis de ajuste em relação ao PSO, o que contribui para um desempenho mais robusto [38].

3.3.4 Gorilla Troops Optimizer (GTO)

Baseado no comportamento social dos gorilas na natureza, mencionado inicialmente em 2021 [56], surgiu o *Artificial Gorilla Troops Optimizer* (GTO). O *Gorilla Troops Optimizer* (GTO) é um algoritmo meta-heurístico baseado no comportamento do animal pela busca por alimento. Onde a população inicial é gerada de forma aleatória, e usando técnicas de *exploration* e *exploitation*, o algoritmo busca pela melhor solução de acordo com a função objetivo do problema. O GTO revela-se robusto, simples e flexível, embora apresente limitações como baixa capacidade de exploração e tendência à convergência prematura, fazem deste um algoritmo capaz de hibridização e adaptação ao problema em questão [57].

O gorila é um animal que vive em grupo designados de *troops*, onde cada grupo conta com um líder, designado de *Silverbacks*, várias fêmeas e os seus descendentes. O GTO é aplicado seguindo esta lógica. Pode-se dividir o algoritmo em duas fases distintas a fase de *exploration* e a fase de *exploitation* [57].

3.3.4.1 Fase de Exploration

Os gorilas tendem a seguir o seu líder, mas ocasionalmente, estes separam-se do grupo, seguindo um caminho não explorado anteriormente ou progredindo para um caminho já reconhecido. Cada gorila representa uma solução candidata, sendo a melhor, a que traz melhor resposta à função objetivo, designada de *Silverback*. O movimento de cada gorila dentro do espaço de pesquisa é definido pela Expressão 3.12, na qual se gera um valor aleatório, *rand*, entre 0 e 1, que determina o seu comportamento na iteração seguinte, segundo três cenários possíveis [57], [58]:

- Caso $rand < p$, sendo p definido previamente (tipicamente baixo, como 0,03 [58]), o gorila movimenta-se para um local desconhecido;
- Caso $rand \geq 0,5$, a movimentação do gorila é em direção a outros gorilas;
- Caso $rand < 0,5$, o gorila move-se para um local já conhecido.

$$GX(t+1) = \begin{cases} (UB - LB) \cdot r_1 + LB & , \text{rand} < p \\ (r_2 - C) \cdot X_r(t) + L \cdot H & , \text{rand} \geq 0,5 \\ X(t) - L \cdot (L \cdot (X(t) - GX_r(t)) + r_3 \cdot (X(t) - GX_r(t))) & , \text{rand} < 0,5 \end{cases} \quad (3.12)$$

Na expressão, X e GX representam vetores de tamanho igual ao número de gorilas predefinido. $GX(t+1)$ representa a posição candidata do gorila na próxima iteração, $t+1$, $X(t)$ a posição atual do gorila. LB (*lower bound*) e UB (*upper bound*) define o limite inferior e superior da variável. Os valores de r_1 , r_2 e r_3 são valores aleatórios estando compreendidos entre 0 e 1. $X_r(t)$ e $GX_r(t)$ simbolizam gorilas selecionados aleatoriamente. Os parâmetros C , L e H são calculados pelas expressões 3.13, 3.15 e 3.16, respetivamente [57], [58].

$$C = F \cdot \left(1 - \frac{t}{maxIt}\right) \quad (3.13)$$

$$F = \cos(2 \cdot r_4) + 1 \quad (3.14)$$

$$L = C \cdot l \quad (3.15)$$

$$H = Z \cdot X(t) \quad (3.16)$$

$$Z = [-C, C] \quad (3.17)$$

Nestas equações, t e $maxIt$ representam a iteração atual e o máximo de iterações definidas. As variáveis r_4 e l são ambas aleatórias estando compreendidas entre 0 e 1, no caso de r_4 , e entre -1 e 1, no caso de l [57], [58].

3.3.4.2 Fase de *Exploitation*

Nesta fase do algoritmo, o gorila pode adotar dois comportamentos, seguir o *Silverback* ou competir por fêmeas adultas, visando explorar regiões promissoras do espaço de pesquisa. Esta decisão é baseada no valor da variável C , calculado previamente conforme a expressão 3.13, em comparação com o parâmetro W , que deve ser predefinido [57], [58].

Se o valor de C for igual ou superior a W , o gorila escolhe seguir o *Silverback*, respeitando a expressão 3.18. Caso contrário, este opta por competir pelas fêmeas, em conformidade com a expressão 3.21 [57].

O valor de W estabelece um papel importante no equilíbrio entre o tempo de convergência e a exploração do espaço de pesquisa. Quando W assume um valor baixo, que implica que os gorilas tendam a seguir o *Silverback*, a convergência será mais rápida. No entanto, este valor baixo pode impactar na exploração do espaço de pesquisa, o que pode ser prejudicial, por exemplo, em condições de PSC havendo maior probabilidade de o algoritmo permanecer preso LMPP. Contrariamente, um valor de W alto incentiva um comportamento competitivo por parte dos gorilas, aumentando a exploração do espaço de pesquisa, o que leva a um algoritmo mais lento, em termos de convergência. A definição correta de W é um dos desafios do algoritmo, segundo os estudos [56]–[59], os valores mais usuais prendem-se entre 0,8 e 1.

$$GX(t + 1) = L \cdot M \cdot (X(t) - X_{\text{Silverback}}) + X(t) \quad (3.18)$$

Na qual $X_{\text{Silverback}}$ representa a melhor solução encontrada (posição do *Silverback*), e M e L são calculados de acordo com as expressões 3.19 e 3.20, respetivamente [57].

$$M = \left(\left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N GX_i(t) \right|^g \right)^{\frac{1}{g}} \quad (3.19)$$

$$g = 2^L \quad (3.20)$$

O número total de gorilas é definido com N e $GX_i(t)$ representa a posição de cada gorila na iteração t [57].

Para $C < W$, a expressão que traduz a competição pelas fêmeas é dada pela expressão 3.21.

$$GX(i) = X_{\text{Silverback}} - (X_{\text{Silverback}} \cdot Q - X(t) \cdot Q) \cdot A \quad (3.21)$$

$$Q = 2 \cdot r_5 - 1 \quad (3.22)$$

$$A = \beta \cdot E \quad (3.23)$$

$$E = \begin{cases} N_1 & , rand \leq 0,5 \\ N_2 & , rand > 0,5 \end{cases} \quad (3.24)$$

Nas equações acima apresentadas, Q determina o impacto de força, sendo influenciada por r_5 , um número aleatório entre 0 e 1. A variável A define o grau de violência do conflito com base em variáveis predefinidas, β e E . O termo E , assume valores aleatórios nas dimensões do problema e na distribuição normal, caso $rand$ (número aleatório entre 0 e 1) seja inferior ou igual a 0,5. Caso contrário assume um valor aleatório dentro da distribuição normal. Já a variável β deve ser predefinida, impactando o processo de busca do algoritmo. Valores reduzidos de β traduzem-se numa melhor exploração do espaço de pesquisa, convergindo mais lentamente. Valores mais elevados de β estão associados a convergências mais rápidas devido a menor exploração do espaço de pesquisa [58]. Nos trabalhos apresentados [56] e [59] assumem β igual a 3.

Em [60], foi aplicado o GTO-MPPT visando otimizar a eficiência de um gerador termoelétrico. Os resultados obtidos demonstraram um algoritmo mais eficiente e com melhor capacidade para detetar o GMPP, em relação a técnicas como o CS e o PSO.

3.4 Técnicas híbridas

Algumas técnicas de MPPT são frequentemente utilizadas em combinação com outras, de forma a aumentar a eficiência global do sistema. Nesta secção serão apresentados alguma destas combinações.

3.4.1 Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)

Este método combina as técnicas MPPT, ANN e a lógica *fuzzy*. A ANN é utilizada para reduzir o erro de rastreamento e otimizar parâmetros, enquanto a FLC controla as entradas não lineares sem exigir qualquer conhecimento prévio do sistema [38]. Esta técnica é aplicável a qualquer sistema mesmo em PSC [8]. A estrutura *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS) é apresentada na Figura 31, e possui 5 camadas distintas:

- **Camada 1 Fuzzificação:** Converte os dados de entrada em valores linguísticos por meio de funções de pertinência;
- **Camada 2 Regras:** Executa a operação lógica “and”, calculando o produto entre as funções de pertinência geradas na camada anterior. As saídas desta camada funcionam como pesos de entrada para o próximo nó.
- **Camada 3 Normalização:** Normaliza os pesos de entrada, garantindo que estejam proporcionados. Esta camada é rotulada como N.

- **Camada 4 Defuzzificação:** Determina as funções de pertença de saída com base nas regras fuzzy previamente definidas.
- **Camada 5 Soma:** Calcula a saída final ao somar as saídas de todas as regras geradas na camada de defuzzificação [61].

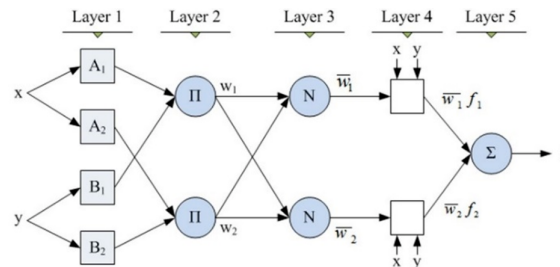


Figura 31: Arquitetura ANFIS [62].

Na comparação entre o método ANFIS e o P&O convencional, apresentado em [62], o ANFIS mostrou um tempo mais reduzido para atingir a estabilidade, quando a irradiância foi constante. Aliado ao facto de ANFIS provar ser mais confiável em todos os aspetos, contribuindo significativamente para maior eficiência na extração de energia. Em condições de irradiância variável, o método ANFIS demonstrou maior precisão e conseguiu extrair uma maior potência. A sua capacidade de adaptação às condições atmosféricas, aliada à ausência de necessidade de informações prévias para modelagem matemática, o destaca como uma solução robusta. Em [63], o ANFIS mostrou melhor desempenho quando comparado a InC, P&O e FLC.

3.4.2 Particle Swarm Optimization Perturb and Observe (PSO-P&O)

O algoritmo P&O convencional, como já mencionado, apresenta limitações no rastreamento do GMPP em condições de sombreamento parcial, devido à possibilidade de ficar preso num LMPP. Foram desenvolvidas técnicas para contornar esta limitação. O *Particle Swarm Optimization Perturb and Observe* (PSO-P&O) é uma técnica híbrida, que combina o PSO com o P&O, diferentes abordagens são utilizadas para o uso de PSO e P&O.

Em [64] e [65], o PSO é utilizado nos estágios iniciais de rastreamento para identificar a região próxima do GMPP. Quando a maioria das partículas do PSO converge para uma dada posição (próxima ao GMPP), o método P&O é iniciado, tirando partido da sua rápida capacidade de convergência nestas condições. O P&O utiliza a melhor posição identificada pelo PSO como ponto de partida, realiza o ajuste fino e localiza precisamente o GMPP. No estudo [64], o método combinado apresenta melhores resultados em termos de potência extraída, velocidade e eficiência quando comparados aos métodos utilizados de forma separada, especialmente o P&O. Já em [65], o sistema consegue rastrear o GMPP, contudo apresenta dificuldades em padrões de sombreamento complexo, ou seja, se a curva P-V exibir mais de quatro picos de potência.

Em [66] o P&O é o algoritmo principal, onde o tamanho da perturbação é otimizado usando PSO. Esta abordagem mostrou-se mais poderosa e precisa na extração da potência em comparação ao P&O convencional.

3.4.3 Perturb and Observe - Fuzzy Logic Controller (P&O-FLC)

No método P&O convencional, o tamanho do passo está associado a dois problemas. Um passo grande resulta numa resposta dinâmica mais rápida, contudo resulta em oscilações excessivas ao

redor do ponto MPP. Por outro lado, um passo pequeno reduz essas oscilações e melhora a eficiência no estado estacionário, mas compromete a velocidade de resposta a alterações climáticas [67]–[69].

Para superar estas limitações, diversos autores propuseram o *Perturb and Observe - Fuzzy Logic Controller* (P&O-FLC), que utiliza a lógica do FLC para ajustar o tamanho do passo de forma adaptativa. O FLC aumenta o passo quando o ponto operacional está distante do MPP e o reduz à medida que o ponto de operação se aproxima de MPP. Este processo continua até que o tamanho do passo se torne praticamente zero, indicando que o ponto MPP foi alcançado [70].

Comparando o seu desempenho com o P&O convencional em [67]–[69] mostrou que a técnica híbrida apresenta um melhor desempenho, visto atingir o MPP mais rapidamente, além de reduzir as oscilações nesse mesmo ponto.

3.4.4 Fuzzy Particle Swarm Optimization (FPSO)

A *Fuzzy Particle Swarm Optimization* (FPSO) é uma técnica híbrida que combina a robustez da PSO na exploração do espaço de pesquisa com a capacidade da lógica fuzzy para lidar com a incerteza e não-linearidades associadas aos painéis PV. Desenvolvida para melhorar a eficiência das duas técnicas na busca pelo GMPP sobretudo em condições de sombreamento parcial [8].

O mecanismo de tomada de decisão é baseado nas regras *fuzzy*, o que permite que o algoritmo se ajuste as condições ambientais variáveis. Enquanto isso, a PSO otimiza os parâmetros do controle fuzzy e realiza a busca no espaço de pesquisa, garantindo que o algoritmo funcione próximo do GMPP [38].

No estudo realizado em [71], a FPSO demonstrou maior eficiência de rastreamento sob condições ambientais variáveis, incluindo sombreamento parcial. Apresentado uma capacidade de rastreamento mais rápida e estável, sem oscilações em torno do MPP, quando comparada com o P&O convencional e o PSO puro. No estudo [65], a FPSO mostrou-se mais rápido, estável e com maior potência extraída, em situações de sombreamento parcial, quando comparados com PSO-P&O.

No entanto, a FPSO está associada a maior complexidade computacional e exige um conhecimento especializado do usuário para projetar adequadamente as regras *fuzzy* e a função de pertinência.

3.4.5 Hill Climbing - Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (HC-ANFIS)

O método *Hill Climbing - Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (HC-ANFIS), proposto em [72], combina o ANFIS seguido do método HC. Neste sistema, a temperatura e a irradiância solar são consideradas entradas, enquanto o *duty cycle* (D) aplicado ao conversor funciona como saída. O ANFIS é treinado de forma a estimar, de forma eficaz, o valor inicial de D , mesmo em condições de sombreamento parcial. Esse valor inicial é obtido num ambiente *off-line*, ou seja, antes do sistema entrar em operação. Essa abordagem elimina a necessidade de um controlador Proporcional Integral (PI), simplificando o processo de controle.

Na segunda etapa, o método HC realiza um ajuste fino do *duty cycle* estimado, refinando o valor inicial para determinar o MPP. Essa estratégia reduz a sensibilidade do método HC às rápidas variações climáticas, uma vez que a estimativa inicial do *duty cycle* é gerada de forma robusta pelo ANFIS em ambiente *off-line* [38], [44], [72]. Este método provou ser mais rápido em comparação com outras técnicas, nomeadamente HC, CVT, ANFIS e InC. Além disso, apresentou um aumento

de 20% na energia gerada em relação ao método HC, e provou ser altamente robusto em relação a variações ambientais [72].

Entre as desvantagens, destaca-se a necessidade de treinamento inicial, cujo desempenho está diretamente associado, além de exigir uma alta complexidade computacional [8].

3.5 Comparação entre as técnicas

Após a apresentação dos métodos, é fornecida a Tabela 3 que avalia diversos fatores, entre os métodos apresentados, como a velocidade de rastreamento (classificada como Lenta, Média ou Rápida), a precisão de rastreamento (baixa, média ou alta), a capacidade de rastreamento sob PSC (sim ou não) e a complexidade (classificada como baixa, média ou alta).

Tabela 3: Comparação entre os métodos de rastreamento, adaptada de [8], [38], [43].

Método	Velocidade de Rastreamento	Precisão de Rastreamento	Rastreamento em PSC	Complexidade
CVT	Lenta	Baixa	Não	Baixa
OCV	Lenta	Baixa	Não	Baixa
SCC	Lenta	Média	Não	Baixa
HC	Média	Média	Não	Baixa
P&O	Lenta	Média	Não	Baixa
InC	Varia	Média	Não	Média
ANN	Média	Alta	Sim	Alta
FLC	Rápida	Alta	Sim (Quando adaptável)	Alta
PSO	Rápida	Média	Sim (Elevada)	Média
ACO	Rápida	Média	Sim (Elevada)	Baixa
CS	Rápida	Alta	Sim	Baixa
GTO	Rápida	Alta	Sim	Média
ANFIS	Rápida	Média	Sim (Elevada)	Alta
PSO-P&O	Rápida	Média	Sim (Elevada)	Média
P&O-FLC	Rápida	Alta	Sim (Elevada)	Alta
FPSO	Rápida	Alta	Sim	Baixa
HC-ANFIS	Rápida	Alta	Sim (Elevada)	Alta

4 Simulações

Após o estudo de algumas técnicas de MPPT, foram desenvolvidos três algoritmos. Sendo estes o P&O, uma variação deste que integra um controlador PI, e, por fim, o algoritmo GTO. A implementação destes, em contexto de simulação, é apresentado no seguimento deste capítulo.

Para a realização das simulações que serão apresentadas recorreu-se ao *software* PSIM, projetado especificamente para aplicações de eletrónica de potência.

4.1 Simulação do Painel Fotovoltaico

Dentro das diversas opções de painéis disponíveis no mercado para a execução do projeto foi escolhido, essencialmente por questões económicas, de peso e tamanho, o painel SOLARPOWER-5W da fabricante XUNZEL. Todas as características deste podem ser acompanhadas na Tabela 4

Tabela 4: Características do painel utilizado (SOLARPOWER-5W).

Parâmetro	Valor
Tipo de painel	Policristalino
Potência máxima	5W
Número de células	36
Tensão nominal	12V
Tensão em circuito aberto	22V
Tensão em MPP	18V
Corrente de Curto-Circuito	0,30A
Corrente MPP	0,28A
Dimensões	240x180x17 mm
Peso	0,60 kg

O *software* PSIM possui, na sua biblioteca, um modelo físico de um painel PV - *Solar Module (physical model)*- que foi utilizado para simular o PV utilizado. Este modelo permite, através de dados coletados no *datasheet* do fabricante, calcular os parâmetros do modelo elétrico do painel. O *software* considera o PV como N_s células conectadas em série e utiliza o modelo elétrico de cada célula PV apresentado na Figura 32.

O modelo físico, Figura 33a, possibilita a simulação de diferentes condições climáticas, permitindo alterar a irradiância (S) e a temperatura (T), influenciando o MPP do painel. Como a potência máxima em cada instante é conhecida, torna-se possível verificar se o algoritmo MPPT aplicado comporta-se como esperado. Os parâmetros do modelo SOLARPOWER-5W obtido está apresentado na Figura 33b.

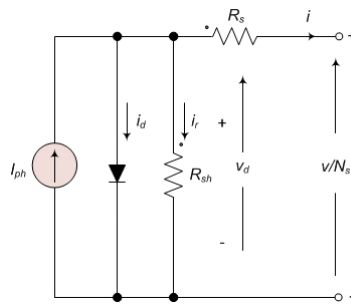
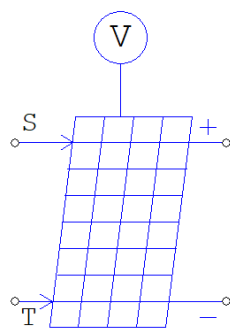
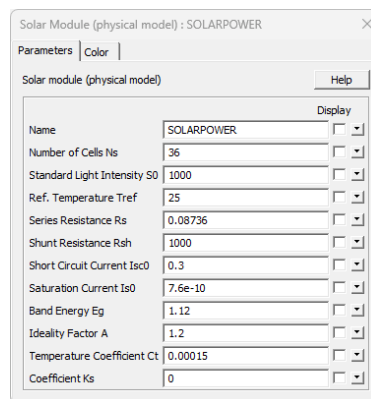


Figura 32: Equivalente Elétrico de uma célula PV no software PSIM (retirada do *software*).

Potencia_maxima



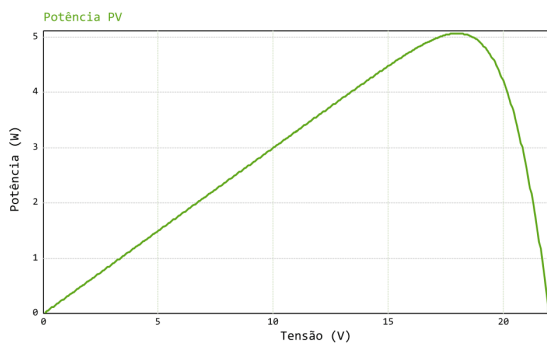
(a)



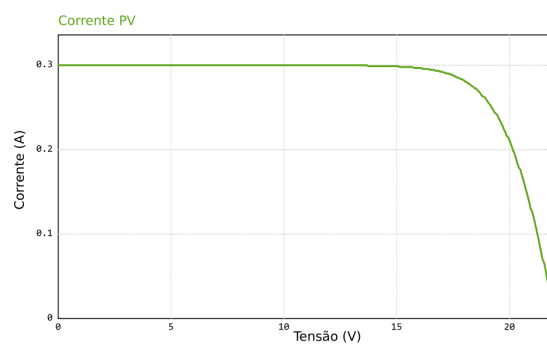
(b)

Figura 33: Simulação do PV no PSIM:(a) Painel PV e (b) parâmetros do modelo do SOLARPOWER.

Nesta etapa, foram simuladas as curvas do painel sob as condições STC, com irradiância de 1000 W/m^2 e temperatura de 25°C . A Figura 34a apresenta a curva Potência-Tensão (P-V) e a Figura 34b a curva Corrente-Tensão (I-V).



(a)



(b)

Figura 34: Curvas do Painel utilizado nas condições STC: (a) Curva P-V e (b) Curva I-V.

Além disso, foram analisadas diferentes condições de irradiância, mantendo a temperatura constante nos 25°C , a fim de avaliar o impacto no MPP. O aumento da irradiância leva a um aumento da potência máxima produzida pelo PV. As curvas encontram-se representadas na Figura 35a enquanto na Figura 35b encontra-se representado a variação na corrente.

O painel utilizado na prática possui 36 células fotovoltaicas conectadas em série, sem a presença de diodos *bypass*. Em caso de sombreamento parcial, a irradiância irregular afeta diretamente a

4.1. Simulação do Painel Fotovoltaico

potência total extraída do painel, sem a formação de múltiplos MPP. Na prática, com os componentes utilizados, não é possível observar o comportamento do MPPT quando sujeito a condições de PSC.

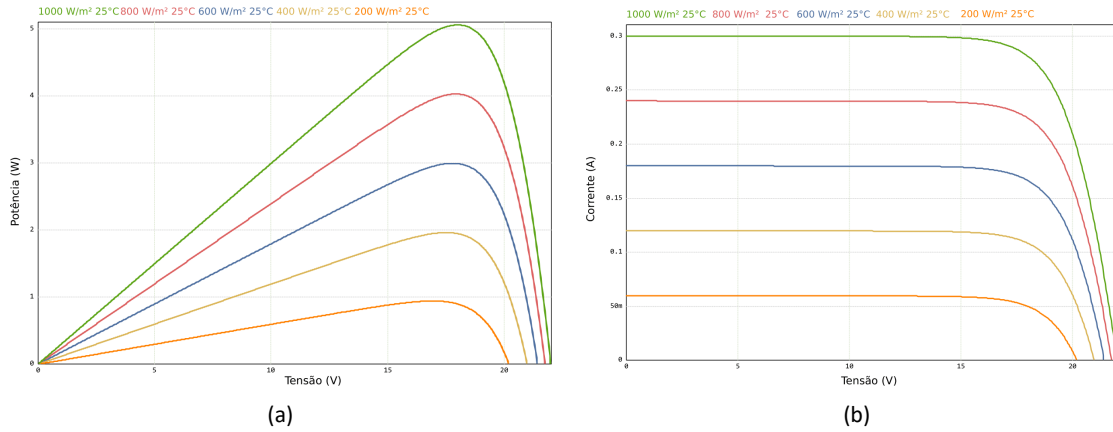


Figura 35: Curvas do Painel para diferentes níveis de irradiância: (a) Curva P-V e (b) Curva I-V.

No entanto, para efeitos de validação, foi realizada uma simulação no PSIM considerando essas condições. Para tal, considerou-se três painéis semelhantes ao utilizado na prática, conectados em série. Em antiparalelo com cada painel, foram ligados um diodo de *bypass* e um condensador. O condensador é utilizado para evitar problemas de convergência na simulação do PSIM. Já os diodos de *bypass* têm a função principal de fornecer um caminho *bypass* para a corrente, caso alguma célula fique sombreada ou apresente falhas. Isto evita que as células sombreadas ou defeituosas afetem negativamente a potência extraída do painel. Sem estes diodos, uma célula sombreada ou com defeito comprometia o desempenho de todo o painel [22].

Na figura 36a encontra-se representado o circuito utilizado quando todos os PV operam sob as condições STC. Já na Figura 36b, foi simulada uma situação de PSC, na qual os PV estão sujeitos a níveis de irradiância de 1000 W/m^2 , 600 W/m^2 e 400 W/m^2 , respetivamente, todos a operar a uma temperatura de 25°C . Os painéis encontram-se conectados a uma fonte de tensão que varia entre os 0 e os 66 V, considerando que cada painel apresenta uma tensão máxima de circuito aberto de 22 V.

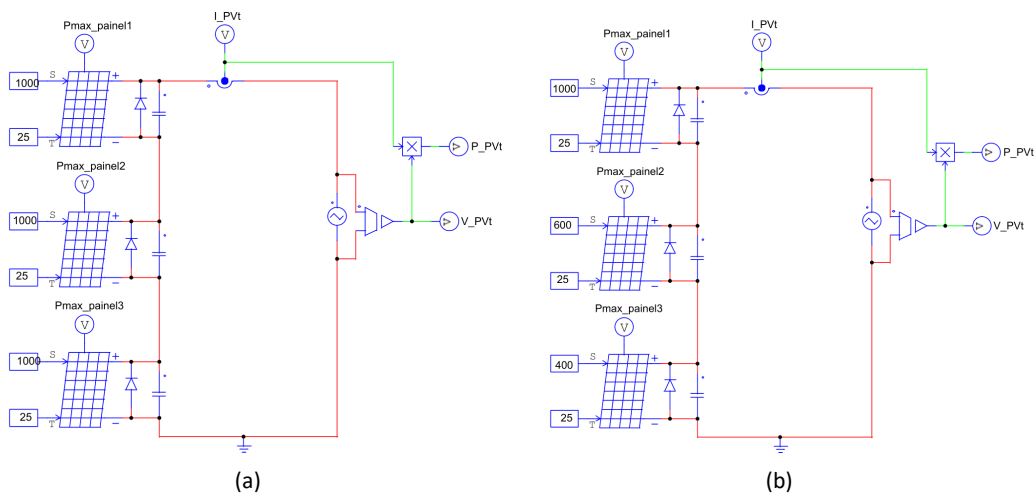


Figura 36: Simulação da condição de PSC no PSIM, utilizando três painéis conectados em série: (a) sob condições de STC e (b) com diferentes irradiações para cada painel.

As curvas P-V dos circuitos analisados encontram-se representadas na Figura 37. Na Figura 37a, espera-se uma potencia máxima de 15 W (3 (painéis) · 5 W), o que é confirmado. Na condição de PSC, observa-se dois LMPP e um GMPP, representado na Figura 37b.

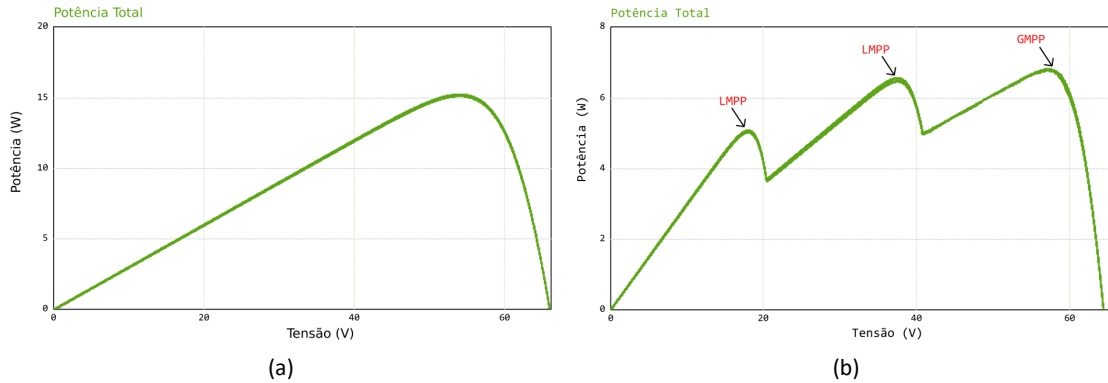


Figura 37: Curvas P-V, para os três painéis, para condições de: (a) STC e (b) PSC.

4.2 Conversor CC/CC Buck

Com o painel devidamente modelado, o próximo passo passa pelo dimensionamento do conversor ao qual o PV estará ligado. Para o âmbito deste projeto considerou-se o uso de um conversor *Buck*. Na Tabela 5 encontra-se os parâmetros inicialmente definidos para o dimensionamento do conversor utilizado.

Tabela 5: Parâmetros do conversor CC/CC utilizado.

Parâmetro	Valor
Tensão de entrada (V_{in})	18 V
Potência de Entrada (P_{in})	5 W
Corrente de Saída (i_{out})	1 A
Frequência de Comutação (f)	40 kHz
Eficiência do Conversor (η)	100%
Ripple Corrente na Bobine (Δi_L (%))	30%
Ripple Tensão de Saída (ΔV_{out} (%))	1%

Como o conversor foi dimensionado para uma eficiência de 100%, conversor ideal, temos que $P_{in} = P_{out}$. Assim, a tensão que garante uma corrente de 1 A na saída será $V_{out} = P_{out}/i_{out} = 5$ V.

O dimensionamento foi realizado com base nas expressões demonstradas no Capítulo 2.6, conforme [28]. Inicialmente, definiu-se o *duty cycle* (D) a fim de $V_{out} = 5$ V, de acordo com a expressão 4.1.

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in} \cdot \eta} = \frac{5}{18 \cdot 1} = 0,28 \quad (4.1)$$

Para o dimensionamento da bobine, considerou-se um *ripple* na corrente de 30% ($\Delta i_L = 0,3 \cdot 1$ A = 0,3 A) temos a expressão 4.2.

4.2. Conversor CC/CC Buck

$$L = \frac{V_{in}(1-D)D}{f \cdot \Delta i_L} = \frac{18 \cdot (1-0,28) \cdot 0,28}{40000 \cdot 0,3} = 300,9 \mu H \quad (4.2)$$

O condensador de saída foi dimensionado com o intuito de minimizar a ondulação da tensão de saída do conversor. Considerando um *ripple* aceitável de 1% na tensão de saída, temos que $\Delta V_{out} = 0,01 \cdot 5 \text{ V} = 0,05 \text{ V}$. Visando garantir que a ondulação da tensão na saída não exceda os 18 mV, utiliza-se um condensador com valor mínimo de acordo com a expressão 4.3.

$$C \geq \frac{(1-D)V_{out}}{8 \cdot L \cdot \Delta V_{out} \cdot f^2} \Leftrightarrow C \geq \frac{(1-0,28) \cdot 5}{8 \cdot 300,9 \cdot 10^{-6} \cdot 0,05 \cdot 40000^2} = 18,75 \mu F \quad (4.3)$$

A carga utilizada no projeto corresponde a uma resistência que assegure, nas condições consideradas, uma potência de saída de 5 W. Para tal temos que $R = P_{out} / i_{out}^2 = 5/1^2 = 5 \Omega$.

De acordo com [33], de forma a suavizar a tensão do PV, é necessário utilizar um condensador de entrada, C_{in} , devido à não linearidade das suas características. Para garantir $\Delta V_{in}/V_{in} = 0,01$ o valor mínimo do condensador de entrada é determinado de acordo com base na equação 4.4.

$$C_{in} \geq \frac{D \cdot (1-D)}{8 \cdot L \cdot f^2 \cdot \frac{\Delta V_{in}}{V_{in}}} = \frac{0,28 \cdot (1-0,28)}{8 \cdot 300,9 \mu \cdot 40000^2 \cdot 0,01} = 5,2 \mu F \quad (4.4)$$

A Tabela 6 resume os componentes de forma teórica, juntamente com os respetivos valores utilizados na prática.

Tabela 6: Valores calculados e componentes utilizados no conversor.

Componente	Valor Calculado	Valor Utilizado
Bobine	300,9 μ H	220 μ H \cdot 2 = 440 μ H
Condensador	18,75 μ F	100 μ F
Resistência de carga	5 Ω	3,9 Ω \cdot 2 = 7,8 Ω
Condensador de entrada	5,2 μ F	10 μ F

O circuito utilizado nas simulações está ilustrado na Figura 38, este inclui uma resistência de *shunt*, R_{shunt} , utilizada na prática para a leitura da corrente, visando aproximar as simulações da realidade.

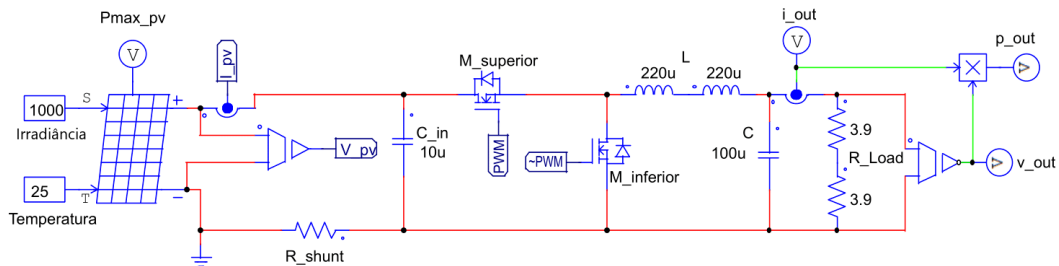


Figura 38: Circuito utilizado para a implementação dos algoritmos.

4.3 Perturb and Observe (P&O)

O primeiro algoritmo implementado foi o P&O convencional com *fixed perturbation*, devido à simplicidade de implementação e o seu baixo custo. Relembrando o princípio de funcionamento do algoritmo, este perturba a tensão periodicamente, ajustando o *duty cycle*, e avalia o impacto que a perturbação teve na potência do PV. Caso a perturbação resulte num aumento de potência, a próxima perturbação é aplicada na mesma direção. Caso contrário, a perturbação será aplicada na direção oposta, visando convergir para o MPP. Na Figura 39, encontra-se representado o fluxograma do algoritmo P&O implementado. É importante salientar que foi definido um *Step* de 0,5% no *duty cycle*, valor esse definido após a realização de alguns testes.

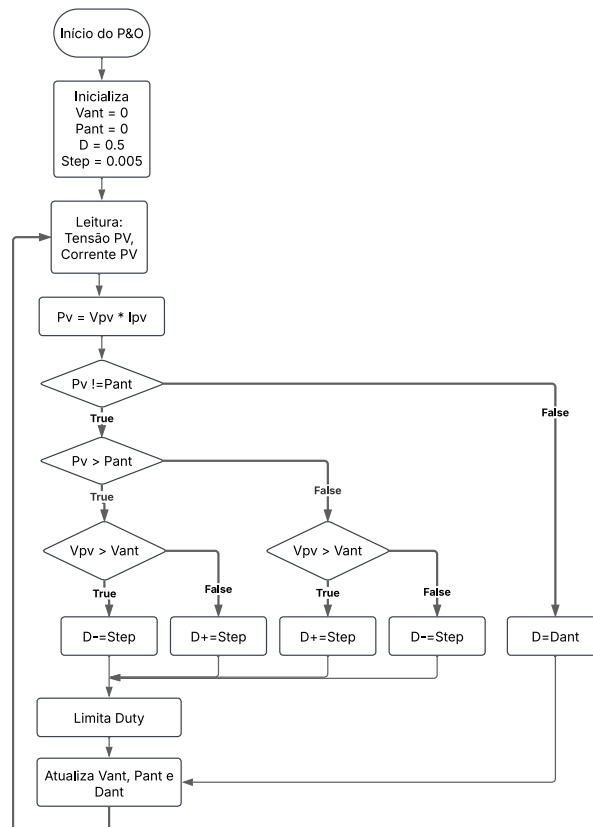


Figura 39: Fluxograma do P&O implementado.

Foi utilizado o bloco C (“C Block”) presente no PSIM, Figura 40, que permite a escrita de código em linguagem C. Antes de iniciar a simulação, é necessário definir o *Time Step*. Foi escolhido um valor de $2,5e - 7$ s. Considerando que a frequência de comutação do conversor é de 40 kHz, temos $\frac{1}{40000 \cdot 2,5 \cdot 10^{-7}} = 100$ amostras por ciclo, o que foi considerado adequado para uma simulação próxima da realidade.

O código do algoritmo encontra-se apresentado em Código 1. Definiu-se uma frequência de 4 kHz para o MPPT, ou seja, é realizada uma perturbação no *duty* a cada $250 \mu s$, sendo posteriormente avaliada o impacto desta sobre a potência extraída. Na implementação prática, o algoritmo apresenta uma menor frequência, optou-se pelo aumento desta, visando diminuir o tempo de simulação e, assim, otimizar o uso de recursos computacionais. Para garantir a frequência de 4 kHz a variável “passos_por_ciclo” apresenta o valor de $1000 \left(\frac{1}{4000 \cdot 2,5 \cdot 10^{-7}} \right)$.

4.3. Perturb and Observe (P&O)

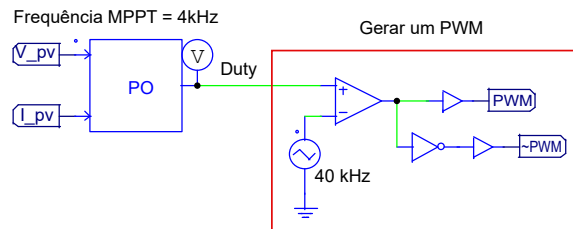


Figura 40: Bloco C no PSIM.

```
1 void SimulationStep
2 {
3     double Vpv = in[0]; // Leitura da Tensão do painel fotovoltaico
4     double Ipv = in[1]; // Leitura da Corrente do painel fotovoltaico
5
6     if (contador_auxiliar >= passos_por_ciclo) // garantir que o MPPT
7     tem frequência de 4kHz
8     {
9         double P = Vpv * Ipv; // Potência atual
10        contador_auxiliar = 0; // Reiniciar o contador
11
12        if (P != Pant)
13        {
14            if (P > Pant) // Potência atual maior que a potência
15            anterior
16            {
17                if (Vpv > Vant) D -= Step;
18                else D += Step;
19            }
20            else // Caso a potência atual seja menor que a anterior
21            {
22                if (Vpv > Vant) D += Step;
23                else D -= Step;
24            }
25        }
26        else
27            D = Dant;
28
29        // Limitação do duty cycle entre 5% e 95%
30        if (D > 0.95) D = 0.95;
31        else if (D < 0.05) D = 0.05;
32
33        out[0] = D; // Saída do bloco C --> duty cycle
34
35        // Atualiza os valores anteriores
36        Vant = Vpv;
37        Pant = P;
38        Dant = D;
39    }
40    contador_auxiliar++; // Incrementa a cada Step Time
41 }
```

Código 1 Implementação do algoritmo do P&O MPPT.

De modo a analisar o comportamento do algoritmo face às variações das condições climáticas, foram aplicadas variações ao nível de irradiância, conforme ilustrado na Figura 41. Como esperado, essas alterações influenciaram a potência máxima do PV, sendo possível acompanhar essa evolução na mesma figura.

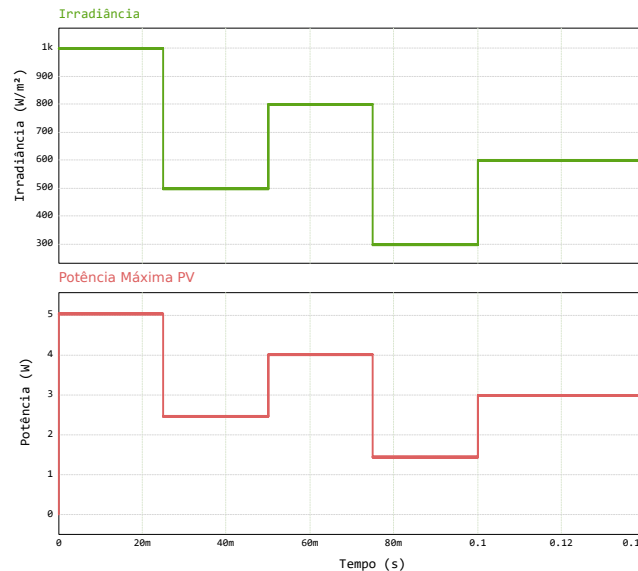


Figura 41: Variações na irradiância e a correspondente potência máxima do PV nessas condições.

Relativamente à potência extraída do PV, apresentada na Figura 42a, observa-se que o algoritmo ajusta-se às variações impostas ao PV, garantindo que a potência extraída se mantenha, a cada instante, o mais próximo possível da potência máxima. O algoritmo leva cerca de 8 ms, desde o início do MPPT até alcançar o MPP. Este tempo reduzido deve-se, em grande parte, à elevada frequência utilizada. Em implementações práticas, não se justifica este nível de frequência, visto não serem esperadas mudanças climáticas tão repentinas num espaço tão reduzido de tempo. Fica evidente que, apesar do algoritmo responder de acordo com o esperado, existem oscilações próximas do MPP, desvantagem já enunciada desta técnica. A potência média extraída sob as condições STC foi de $5,055 \text{ W}^1$. Na Figura 42b, apresenta-se a curva P-V face a estas variações, permitindo observar que o algoritmo procura maximizar a potência ajustando a tensão, em conformidade com o esperado. A evolução da tensão e da corrente encontra-se representada nas Figuras 43a e 43b.

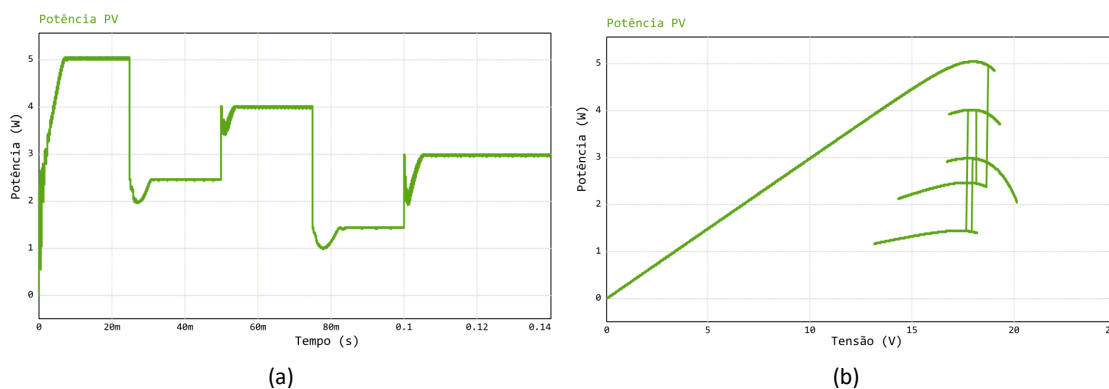


Figura 42: Curvas da Potência para o P&O implementado, onde: (a) Curva P(t) e (b) Curva P-V.

¹O equivalente do painel no PSIM produz até $5,063 \text{ W}$, ligeiramente superior aos 5 W nominais.

4.4. Perturb and Observe (P&O) com controlador PI

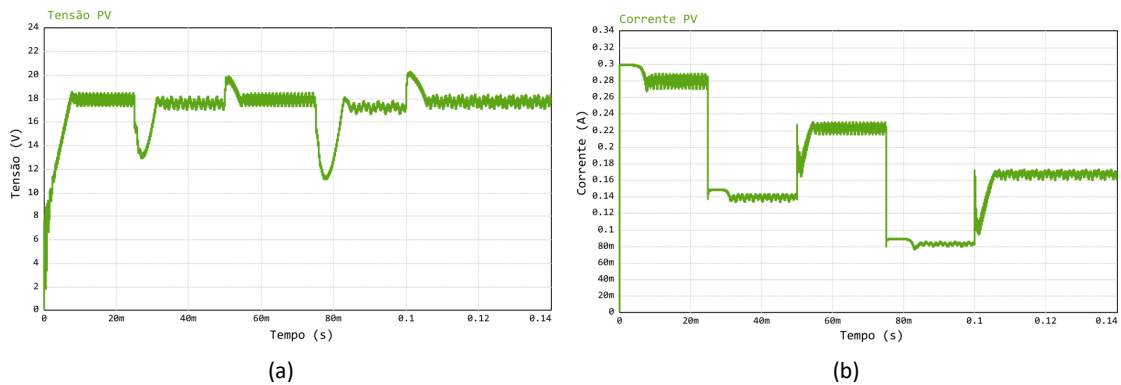


Figura 43: Variação (a) da Tensão e (b) da Corrente para o algoritmo P&O convencional.

Uma das desvantagens evidente desta técnica é a sua resposta em condições de PSC. Nestas condições, surgem múltiplos pontos máximos de potência, que podem levar o algoritmo a convergir para um LMPP, sem garantir que se atinja o GMPP. Para analisar o comportamento em PSC, foram utilizados três painéis em série, sob as condições da Figura 36b. Relembrando a curva P-V nessas, Figura 44a, é expectável que a potência máxima extraída seja algo próximo de 5 W, correspondente ao primeiro LMPP. A curva P-V ilustrada na Figura 44b confirma esta limitação, evidenciando que o algoritmo permanece “preso” no LMPP, sem alcançar a potência máxima global.

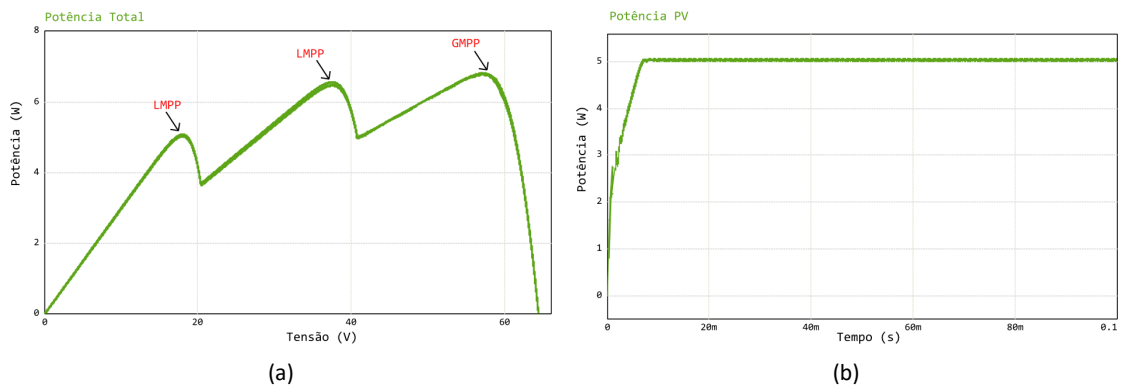


Figura 44: Curvas da Potência sob condições de PSC: (a) Curva P-V sob condições de PSC, onde a carga é variada entre 0 V e a tensão de circuito aberto (b) Curva P-V do PV para o conversor utilizado quando aplicado P&O.

4.4 Perturb and Observe (P&O) com controlador PI

O segundo algoritmo implementado segue a base lógica do anterior. Contudo, neste, a perturbação de 0,1 V é aplicada à tensão de referência, que é limitada entre 0 V e a tensão de circuito aberto. Esta tensão é inicializada com o valor de 18 V, correspondente à tensão do MPP sob condições STC. Em seguida, esta referência é aplicada a um controlador PI, cuja saída corresponde ao *duty cycle* aplicado ao conversor, de modo a ajustar o ponto de funcionamento do painel para a tensão de referência. O fluxograma do mesmo é apresentado na Figura 45.

Em relação ao Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID), a sua expressão, em tempo contínuo, está apresentada na equação 4.5. Nesta, os k 's representam o ganho proporcional, k_p , integral, k_i , e derivativo, k_d . O valor do erro, $e(t)$, é determinado pela diferença do valor medido

de tensão e o valor de referência. A componente derivativa não será utilizada neste projeto, devido à sua sensibilidade ao ruído [73].

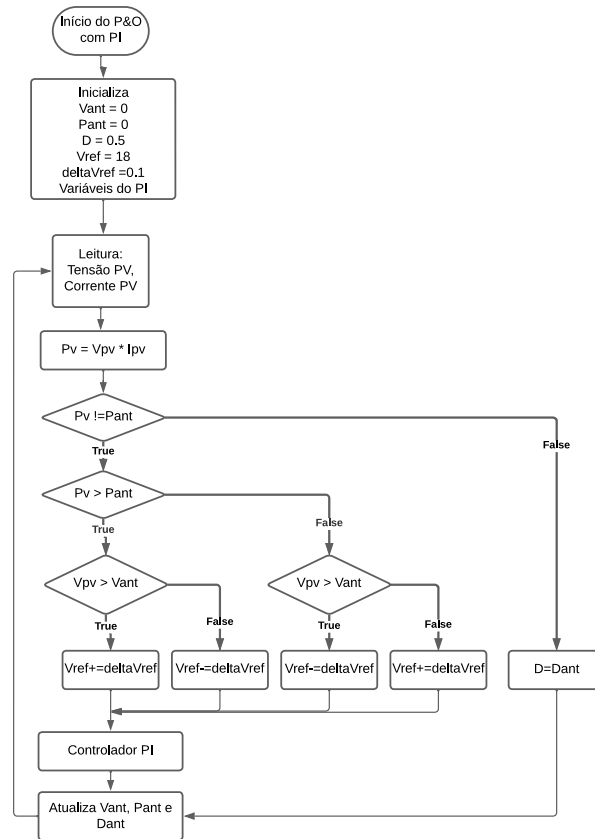


Figura 45: Fluxograma do P&O com Controlador PI implementado.

$$pid(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot \int_0^t e(t)dt + k_d \cdot \frac{de}{dt} \quad (4.5)$$

A equação do PID pode ser expressa na equação 4.6, na qual cada constante apresenta um significado físico. O termo T_i representa o tempo de integração, ou seja, tempo de atuação da componente integral, e T_d o tempo derivativo, não usada neste controlo, tempo de atuação da componente derivativa, ambos expressos em segundos [74], [75].

$$pid(t) = k_p \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (4.6)$$

Na prática e, dado que a implementação ocorre num microcontrolador, o código é executado no domínio do tempo discreto. Em tempo discreto, a equação do PI assume a forma expressa na equação 4.7. Na qual, $pi[n]$ representa o valor atual da saída do PI, $pi[n - 1]$ a saída do PI na iteração anterior, $e[n]$ sendo o erro atual e $e[n - 1]$ o erro do PI na iteração anterior. As outras constantes apresentam o mesmo significado físico da equação 4.6 [74], [75]. Foi definido que o controlador PI será executado com uma frequência igual à de comutação, 40 kHz.

4.4. Perturb and Observe (P&O) com controlador PI

$$pi[n] = pi[n - 1] + k_p \cdot (e[n] - e[n - 1]) + \frac{k_p}{T_i} \cdot \frac{T_s}{2} \cdot (e[n] + e[n - 1]) \quad (4.7)$$

O Código 2 implementa o controlador PI utilizado no bloco C do PSIM. Para evitar a acumulação de erros, em situação de saturação, foi utilizado um detetor de saturação. Quando a saída do PI ultrapassa 95% ou desce abaixo de 5%, a ação do termo integral é suspensa, prevenindo o acumular de erro nestas situações. As constantes k_p e T_i foram definidos após vários testes. O MPPT é executado a uma frequência de 4 kHz e o código utilizado é semelhante ao apresentado no método 4.3, Código 1, diferenciando-se apenas na variável onde a perturbação é aplicada.

```
1 #define tempo_amostragem 0.000025 //frequência de 40kHz
2
3 float Kp = 0.2;
4 float Ti = 0.0005;
5 void SimulationStep
6 {
7
8     //MPPT executado com frequência de 4kHz
9
10    //Controlador PI
11    if (contador_auxiliar_pi >= 100) //frequencia de 40kHz (para um
12    sample time de 2.5E-7)
13    {
14        contador_auxiliar_pi = 0;
15        erro = V - Vref;
16
17        pi = pi_anterior + Kp*(erro - erro_anterior) + d_sat*(Kp/(Ti))*((
18        tempo_amostragem)/2)*(erro + erro_anterior);
19
20        erro_anterior = erro;
21        pi_sat = pi;
22
23        //limitador para garantir que o duty cycle esteja entre 5% e 95%
24        pi_sat = (pi_sat > 0.95) ? 0.95 : pi_sat;
25        pi_sat = (pi_sat < 0.05) ? 0.05 : pi_sat;
26
27        pi_anterior = pi_sat;
28        duty_cycle = pi_sat;
29
30        //detetor de saturação
31        if ((pi_sat - pi) < -0.001 || (pi_sat - pi) > 0.001)
32            d_sat = 0; //saturado
33        else
34            d_sat = 1; // não saturado
35            out[0] = duty_cycle; //saída do Controlador PI
36    }
37    contador_auxiliar_pi++;
38 }
```

Código 2 Implementação do algoritmo do Controlador PI.

Foram aplicadas as mesmas condições de irradiância da Figura 41 para avaliar a resposta do MPPT. Através das Figura 46a e 46c, percebe-se que a potência do PV apresenta uma maior estabilidade em relação ao anterior, atingindo o MPP em cerca de 2,3 ms, em contraste com os 8 ms necessários para o algoritmo anterior. A potência média extraída sob as condições STC registou um

valor ligeiramente superior, de 5,059 W. Já na Figura 46b, fica evidente que a busca pelo MPP é mais precisa do que no primeiro algoritmo. A evolução da tensão e da corrente encontra-se representado nas Figuras 47a e 47b.

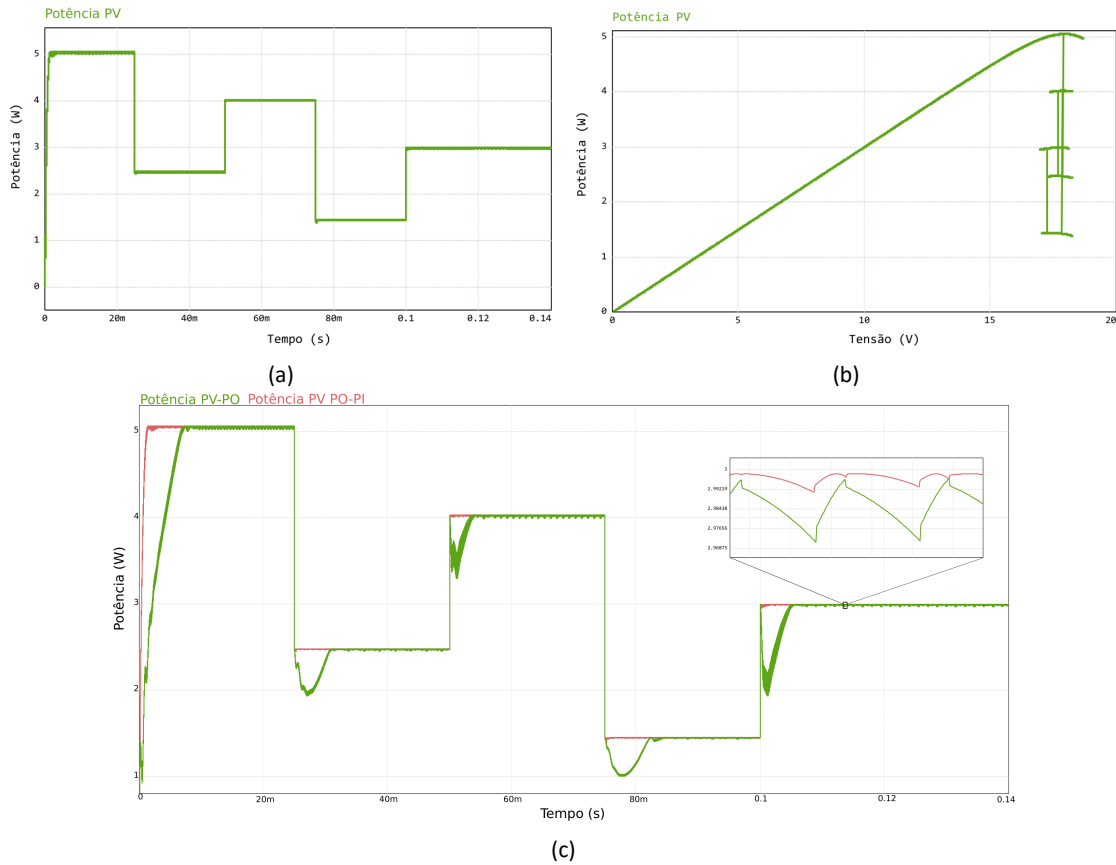


Figura 46: Curvas da Potência para o P&O com Controlador PI implementado, onde: (a) Curva P(t) e (b) Curva P-V, sendo (c) as curvas de potência para o P&O com e sem Controlador PI.

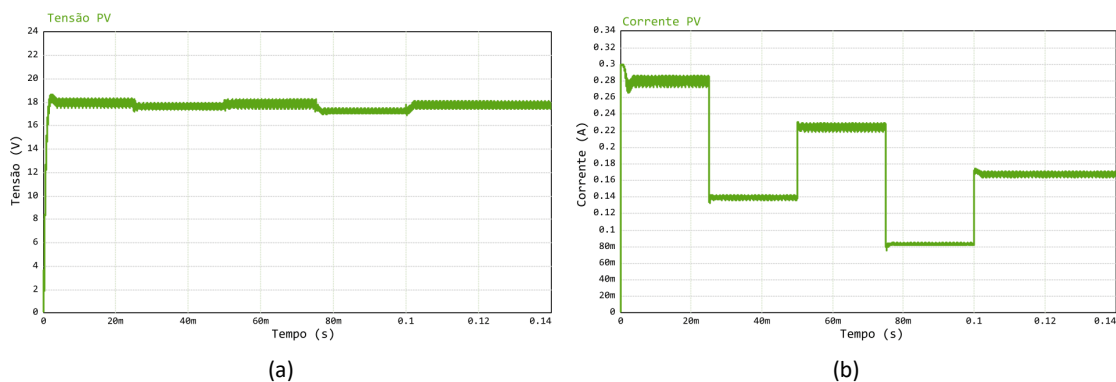


Figura 47: Variação (a) da Tensão e (b) da Corrente para o algoritmo P&O com controlador PI.

Na Figura 48a, observa-se a evolução da tensão de referência determinada pelo MPPT, bem como a evolução da tensão do PV, que segue essa mesma referência. Na Figura 48b, percebe-se a evolução do erro, que se aproxima de zero, indicando que o PI segue corretamente a referência. Além disso, observa-se a evolução do *duty cycle*, que se ajusta visando o rastreamento adequado da referência.

4.5. Gorilla Troops Optimizer (GTO)

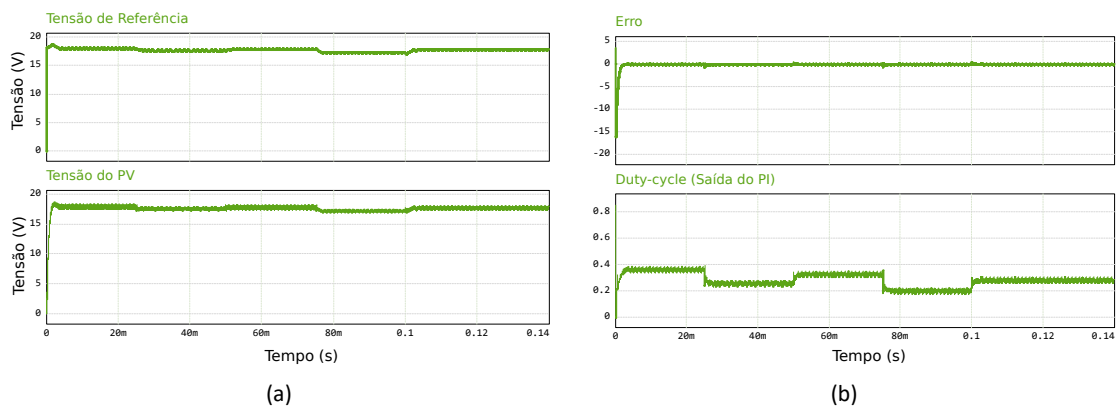


Figura 48: Variáveis do Controlador PI: (a) evolução da tensão de referência e do PV; (b) evolução do erro e do *duty cycle*.

Em condições de PSC, visto que a base do algoritmo é a mesma do anterior, este apresenta a mesma desvantagem, podendo ficar preso em um LMPP.

Nesta etapa, ambos os algoritmos foram novamente simulados, agora utilizando a frequência de MPPT prevista para a implementação prática, fixa nos 40 Hz. Nestas condições, o painel foi submetido às condições STC e, após 1 segundo, exposto a uma irradiância de 500 W/m^2 . A curva de potência para estas circunstâncias encontra-se representado na Figura 49. A redução da frequência do MPPT teve um forte impacto sobre o algoritmo P&O convencional, tanto a nível de tempo de convergência, passou de 8 ms para 0,67 s, como numa ligeira diminuição da potência média extraída nas condições STC, de 5,055 W para 5,047 W. Contrariamente, o algoritmo que utiliza o controlador PI manteve o seu desempenho praticamente inalterado, tendo uma potência média extraída de 5,056 W. Isto deve-se à pouca influência das mudanças de irradiância sobre a tensão do MPP, aliados ao facto do controlador manter a elevada frequência de controlo.

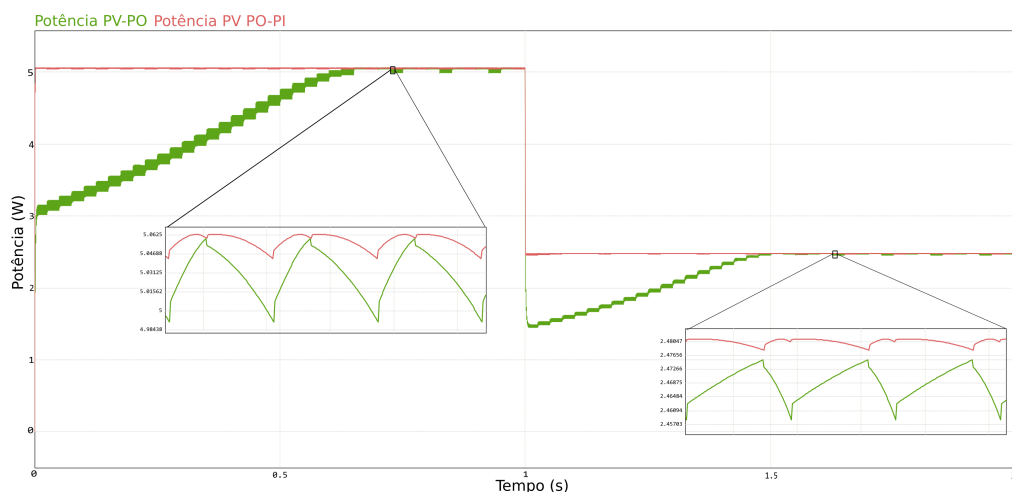


Figura 49: Curvas da Potência para os algoritmos P&O com e sem controlador PI quando utilizado uma frequência de MPPT igual a 40 Hz.

4.5 Gorilla Troops Optimizer (GTO)

O próximo algoritmo a ser implementado foi o GTO, no qual cada “gorila” representa um valor de um *duty cycle*. Na prática, o “gorila” é aplicado ao conversor, sendo esperado um período

suficiente para que a resposta dinâmica do sistema se estabilize. Após este período, é avaliado o impacto do indivíduo na potência extraída.

Este procedimento implica um aumento no tempo de rastreamento, devido à avaliação física real do sistema. Neste tipo de algoritmos, a utilização de um modelo matemático equivalente para avaliar a resposta permitiria velocidades de rastreamento muito superiores, uma vez que o tempo de estabilização não seria necessário.

A Figura 50 apresenta o fluxograma geral do algoritmo implementado. As etapas correspondentes às fases de *Exploration* e *Exploitation* encontram-se detalhadas nas Figuras 51a e 51b, respectivamente. Numa primeira fase, para fins de comparação, optou-se pela utilização dos valores mais mencionados na literatura para os parâmetros W , β e p , nomeadamente 0,8, 3 e 0,03.

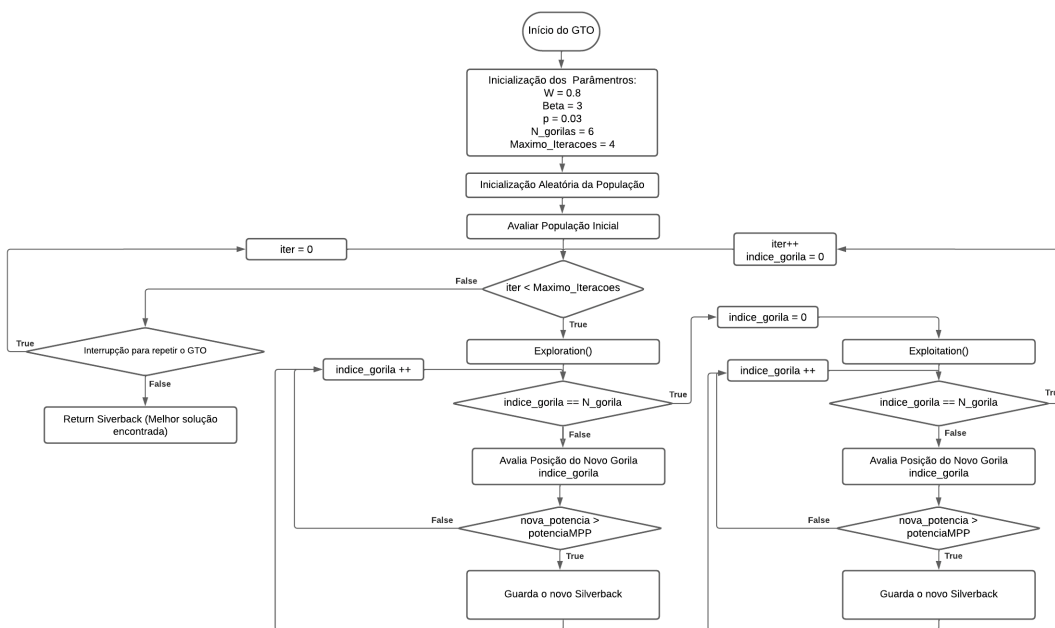


Figura 50: Fluxograma do GTO tradicional.

Uma vez alcançado o número de iterações, o conversor passa a operar com o melhor valor de *duty* encontrado, por outras palavras, funciona com o *Silverback*. Contudo, o algoritmo foi estruturado de forma a realizar uma nova procura pela melhor solução, após um intervalo definido. Durante os testes, esta atualização foi configurada para ocorrer a cada 1s, visando diminuir o tempo necessário para a simulação. Em contextos reais, dado que não se espera mudanças tão repentinas nas condições climáticas, um maior intervalo de tempo para esta nova procura seria mais pertinente.

Inicialmente, é gerada uma população aleatória composta por 6 gorilas, cujos valores de *duty cycle* se situam entre os limites definidos, nomeadamente, entre 5 e 95. Após a população inicial estar criada, acontece a sua avaliação com o intuito de identificar o *Silverback*. O tempo definido para permitir que o conversor se estabilize antes da avaliação foi 7,5 ms, definido após a realização de alguns testes. O código apresentado no Anexo A apresenta o processo relatado.

4.5. Gorilla Troops Optimizer (GTO)

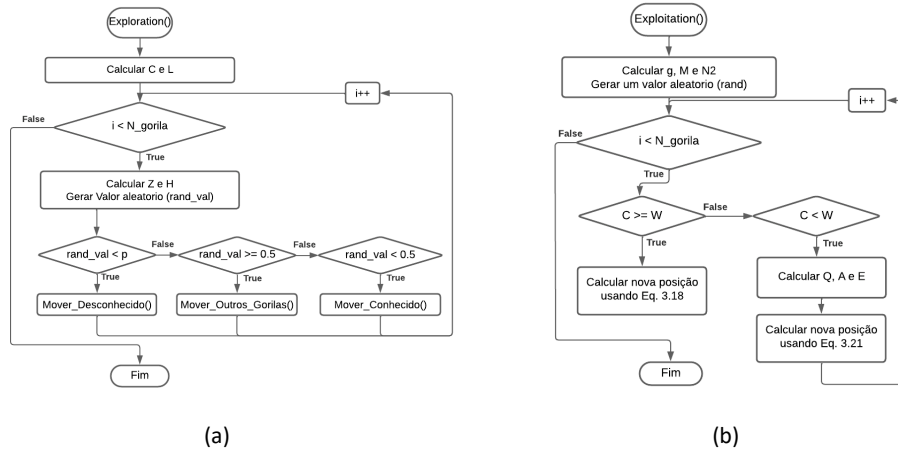


Figura 51: Fluxograma das fases (a) *Exploration* e (b) *Exploitation* do algoritmo GTO tradicional.

Concluída a avaliação da população inicial, dá-se início à fase de *Exploration*, na qual se tira partido das fórmulas apresentadas na equação 3.12. O código apresentado no Anexo B, correspondente às três possibilidades de deslocamento do gorila nesta fase, que respeitam os princípios definidos pelas equações de movimentação de GX . Uma vez gerada a '*nova_populacao*', resultado da aplicação dessas equações, realiza-se a sua avaliação, à semelhança do que acontece com a população inicial. Nesta avaliação, além de identificar um possível novo *Silverback*, os valores da '*populacao*' (representada como X nas equações) são atualizados com os de GX , sempre que se detete indivíduos que provoquem uma melhor potência extraída.

Após a avaliação de todos os indivíduos da etapa anterior, dá-se início à fase de *Exploitation*. Com base nas fórmulas apresentadas na secção 3.3.4.2, desenvolveu-se o código apresentado no Anexo C. Para gerar valores correspondentes a $N1$ e $N2$, utilizou-se o princípio da Transformada de *Box-Muller*. Este permite através das equações 4.8 e 4.9, gerar variáveis aleatórias com distribuição normal [76], [77].

$$z_1 = \sqrt{-2 \log(u_2)} \cos(2\pi u_1) \quad (4.8)$$

$$z_2 = \sqrt{-2 \log(u_2)} \sin(2\pi u_1) \quad (4.9)$$

Nas quais, u_1 e u_2 são números aleatórios uniformemente distribuídos no intervalo $[0, 1]$.

A avaliação desta '*nova_populacao*' segue as diretrizes utilizadas na fase anterior.

Os testes do algoritmo foram iniciados simulando as condições de STC. Na Figura 52 encontra-se representado a evolução da potência extraída do PV ao longo do tempo. A melhor potência média extraída nestas condições, foi de 5,060 W. Visto o algoritmo possuir características estocásticas, ou seja, baseia-se em decisões aleatórias, a potência extraída pode apresentar variações mesmo sob as mesmas condições ambientais. A evolução da tensão e da corrente está representado na Figura 53a e 53b, respetivamente.

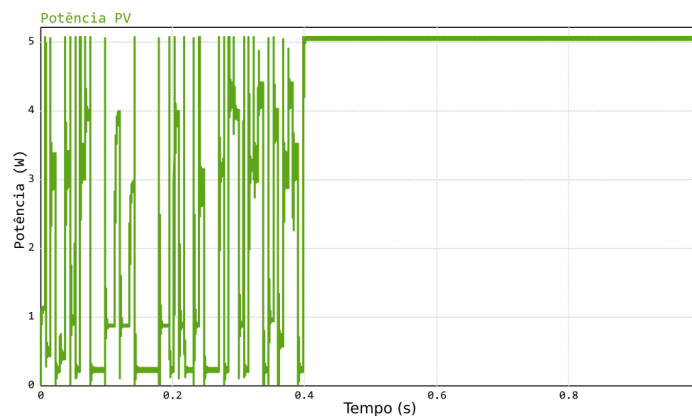


Figura 52: Curva da potência para o GTO tradicional sob as condições STC.

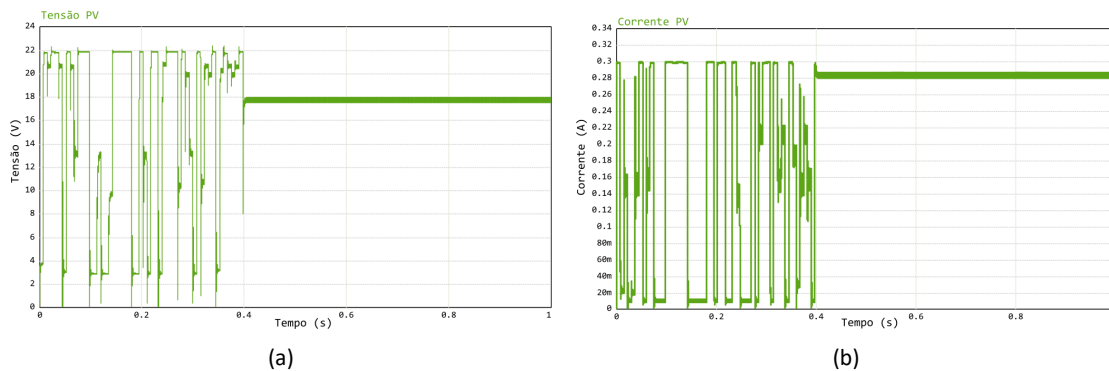


Figura 53: Variação (a) da Tensão e (b) da Corrente para o algoritmo GTO tradicional sob as condições STC.

Na Figura 54a é apresentada a saída do MPPT, onde se encontram representados os indivíduos testados durante a primeira iteração, que culminaram na seleção do *Silverback*. Destaca-se dois pontos, a presença de muitos indivíduos que atingem os extremos (máximos e mínimos), assim como variações acentuadas no *duty cycle* em indivíduos adjacentes. Estas flutuações bruscas provocam uma maior instabilidade no funcionamento do sistema, além de prolongar o tempo necessário para que o conversor opere em regime estacionário. Com o objetivo de mitigar estes efeitos, foram introduzidas adaptações ao algoritmo:

- A população inicial deixou de ser gerada aleatoriamente, passando a ser distribuída uniformemente e de forma sequencial, entre os limites inferior ($LB = 5$) e superior ($UB = 95$);
- Os parâmetros da fase de *Exploration* foram reduzidos, o coeficiente F antes limitado entre $[0, 2]$ passou para o intervalo $[0, 1]$, já o coeficiente l ajustado de $[-1, 1]$ para $[-0,5, 0,5]$;
- Após a fase de *Exploration* e de *Exploitation*, antes da avaliação dos indivíduos, estes são reorganizados de forma sequencial. Em ordem decrescente após a fase de *Exploration* e em ordem crescente após a *Exploitation*, visando impedir mudanças bruscas no *duty cycle* em indivíduos adjacentes. O tempo de espera para o sistema estabilizar foi diminuído de 7,5 ms para 4 ms;
- Os coeficientes do problema (W e p) foram ajustados, para 0,9 e 0,08, respetivamente.

4.5. Gorilla Troops Optimizer (GTO)

Na Figura 54b está representado a saída do MPPT, após as mudanças propostas e mantendo as condições a que o sistema está sujeito. Percebe-se que os indivíduos estão organizados de forma sequencial e, apesar de casos pontuais, os mesmos não tendem a estar nos extremos. A redução do tempo necessário para que o conversor atinja o regime estacionário permitiu aumentar o número de iterações (de 4 para 5), diminuindo ainda assim o tempo de rastreamento do algoritmo.

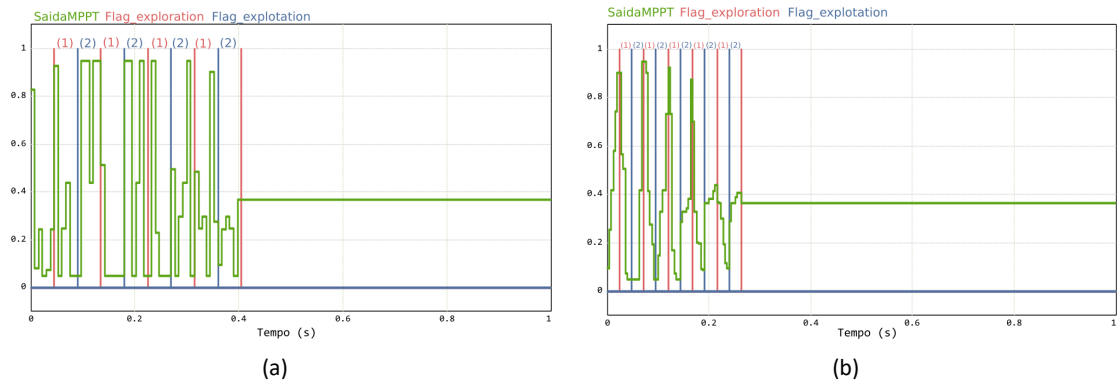


Figura 54: Saída do algoritmo GTO: (a) tradicional e (b) adaptado, na qual (1) representa a fase de *Exploration* e (2) fase de *Exploitation*.

A evolução da potência, da tensão e da corrente para o algoritmo com as adaptações propostas está representada nas Figuras 55, 56a e 56b, respectivamente. A potência média extraída prende-se nos 5,060 W, valor idêntico ao algoritmo tradicional.

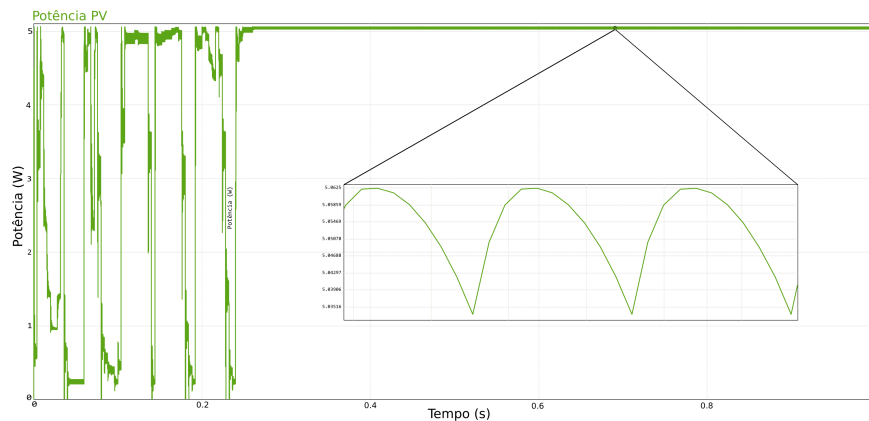


Figura 55: Curva da potência para o GTO proposto sob as condições STC.

A fim de demonstrar que o GTO reinicia a busca pelo MPP, após o intervalo de 1 segundo, o PV foi submetido às condições ilustradas na Figura 57a. A curva de potência resultante, apresentada na Figura 57b, comprova a nova busca passado o tempo definido, de acordo com o desejado.

Uma das vantagens, já mencionada, deste tipo de algoritmos é a capacidade de rastrear o MPP mesmo sob condições PSC. Foram aplicadas as mesmas condições descritas na Figura 36b, de forma a validar este aspeto. A evolução da potência extraída e a saída do MPPT estão representadas nas Figuras 58a e 58b. A potência média extraída, nesta simulação, prende-se nos 6,7025 W, tendo o GMPP o valor de 6,715 W, o que evidencia que o algoritmo não ficou preso nos dois LMPP, aproximando-se do GMPP teórico.

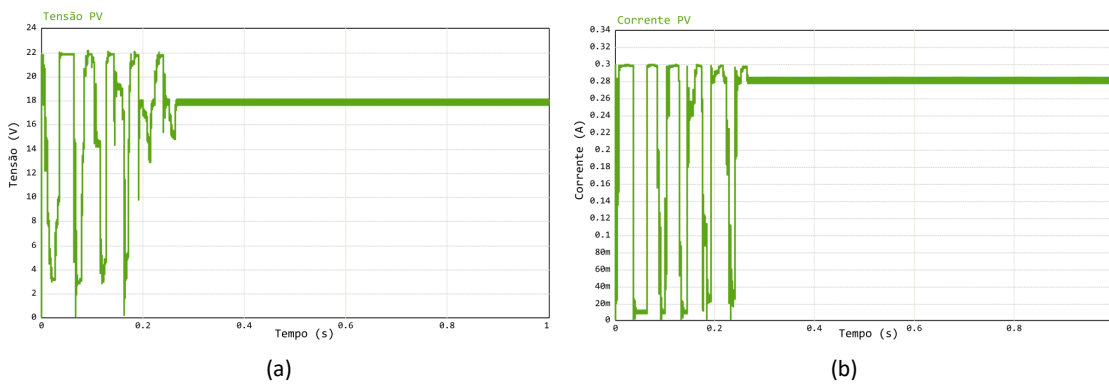


Figura 56: Variação (a) da Tensão e (b) da Corrente para o algoritmo GTO proposto sob as condições STC.

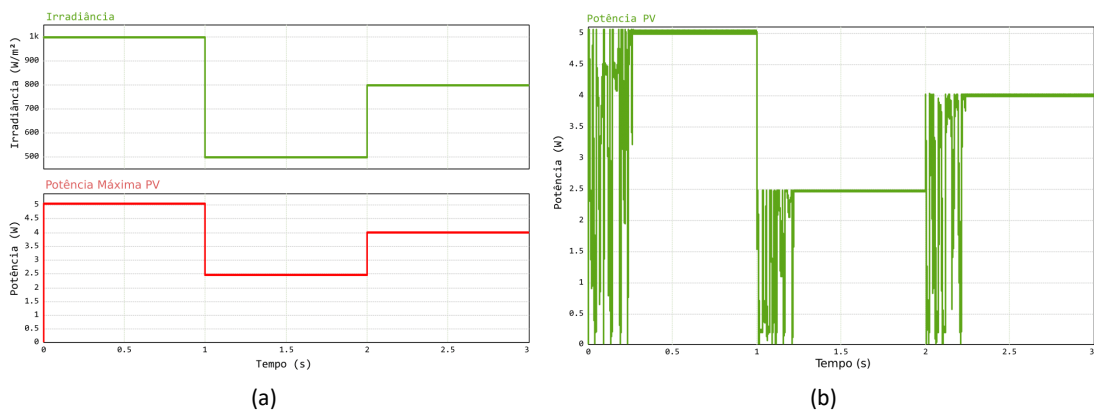


Figura 57: Variação da: (a) irradiância, correspondente potência máxima, e (b) resposta do algoritmo GTO face às variações observadas.

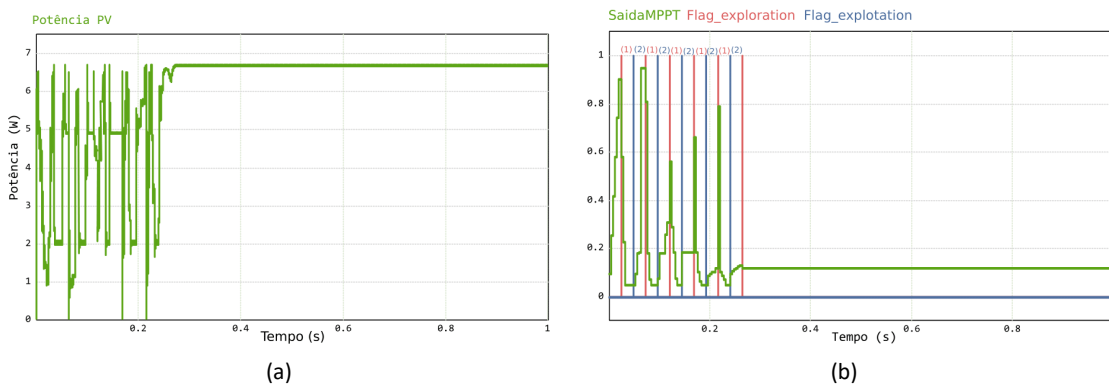


Figura 58: Curva: (a) da potência do GTO proposto e (b) respetiva evolução da saída sob condições PSC.

4.6 Comparação entre os algoritmos desenvolvidos

Com base na expressão 4.10 da eficiência, analisa-se o desempenho dos algoritmos desenvolvidos quando se utiliza 3 paralelos, cada um composto por 2 painéis em série. A simulação tem início sob as condições STC. Após 1 segundo, a irradiância é reduzida para 500 W/m^2 . Nesta, P_{MPP} representa o valor teórico do MPP, que, no caso da simulação, assume o valor de 30,40 W e 14,90 W, respetivamente. Já P_{MPPT} corresponde à potência média extraída durante o regime

4.6. Comparação entre os algoritmos desenvolvidos

permanente do algoritmo. A Tabela 7 apresenta as eficiências para cada um dos algoritmos, o tempo necessário para rastrear a potência máxima, sob as condições STC, e a capacidade ou não de rastrear o GMPP mesmo sob condições de PSC.

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{MPPT}}{P_{MPP}} \cdot 100\% \quad (4.10)$$

Em relação à eficiência, todos os algoritmos apresentam valores elevados, o que se justifica pelo seu afinamento adequado, bem como pela utilização de componentes ideais nas simulações. Importante ressaltar que a frequência dos algoritmos P&O foi de 4 kHz, significativamente superior à normalmente utilizada na prática. O impacto desta elevada frequência foi anteriormente analisado. O algoritmo menos eficiente é o P&O convencional, como expectável, este destaca-se pela sua simplicidade de implementação. O P&O com controlador PI destaca-se devido ao menor tempo de convergência. Como previamente referido, a avaliação real, sem a utilização de equivalentes matemáticos, do impacto do “gorila” no sistema contribui para este aumento no tempo de convergência. Os algoritmos GTO, por sua vez, apresentam uma vantagem evidente e muito útil em contexto real, que se prende pela boa capacidade de rastreamento do GMPP mesmo em condições de sombreamento. As vantagens do GTO proposto, face ao GTO tradicional, já foram evidenciadas anteriormente, e prendem-se por um menor tempo de convergência, uma maior exploração do espaço de pesquisa e uma menor tendência aos indivíduos atingirem os extremos.

Tabela 7: Desempenho dos algoritmos MPPT desenvolvidos.

Algoritmo	STC			500 W/m ²		
	P_{MPPT}	Eficiência	Tempo de Convergência	P_{MPPT}	Eficiência	PSC
P&O	30,261 W	99,54%	5 ms	14,812 W	99,41%	Não
P&O-PI	30,351 W	99,84%	2,3 ms	14,881 W	99,87%	Não
GTO Tradicional	30,356 W	99,86%	0,405 s	14,870 W	99,80%	Sim
GTO Adaptado	30,355 W	99,85%	0,264 s	14,885 W	99,90%	Sim

5 Implementação Prática

Concluída a etapa de simulação, iniciou-se a parte prática. Neste capítulo, serão apresentadas as etapas fundamentais para implementação das técnicas MPPT no protótipo laboratorial, nomeadamente, o P&O convencional e o P&O com controlador PI.

Para implementação das técnicas MPPT e, considerando a necessidade de controlo do MOSFET, IRF510, utilizou-se o driver IR2104. É importante salientar que o microcontrolador utilizado opera com lógica de 3,3 V, sendo driver IR2104 compatível com esta lógica possibilita a integração de ambos.

O circuito utilizado para o controlo do MOSFET é apresentado na Figura 59, adaptado do circuito apresentado no *datasheet* do driver.

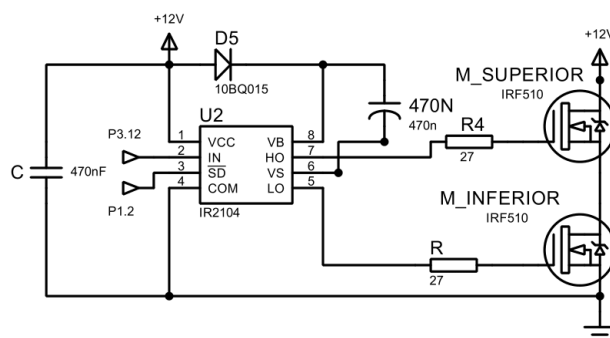


Figura 59: Circuito utilizado para controlo dos MOSFETs, IR2104.

Para alimentação do *driver*, utilizou-se um conversor CC/CC de 5 V para 12 V, semelhante ao ilustrado na Figura 60. A tensão de entrada de 5 V é proveniente de um carregador de dispositivo móvel convencional.



Figura 60: Conversor CC/CC utilizado para alimentação do *driver* IR2104.

Numa fase inicial, procedeu-se aos testes individuais dos MOSFET, de forma a validar o funcionamento de cada MOSFET de forma isolada. A relação lógica entre as saídas do *driver*, HO e LO, e os estados lógicos dos pinos de entrada, SD e IN, está representado na Figura 61.

O pino IN atua como seletor do MOSFET que está em condução. Quando este pino se encontra a nível lógico alto (3,3 V), o *driver* ativa a saída HO, colocando o MOSFET superior em condução. Quando o nível lógico do pino IN é baixo (0 V), a saída LO é ativada, permitindo a condução do MOSFET inferior. O pino SD é responsável por ativar/desativar a saída do *driver*. Com um nível lógico alto, o *driver* mantém as saídas ativas, permitindo controlar o MOSFET em condução de acordo com o pino IN. Caso este esteja a 0 V, ambas as saídas são desativadas, impedindo a condução de ambos os MOSFETs. O *driver* dispõem de um *deadtime* garantindo que, durante a transição entre a comutação dos MOSFETs, ambos não se encontrem em condução simultaneamente, evitando a ocorrência de um curto-circuito.

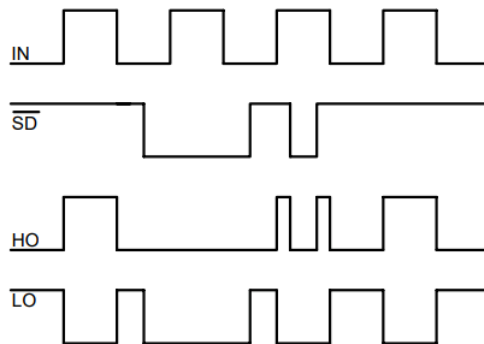


Figura 61: Saídas de IR2104, em relação ao estado lógico dos pinos de entrada, SD e IN [78].

Foi aplicado ao pino IN do *driver* um PWM com uma frequência de 40 kHz e um *duty cycle* de 20%. De acordo com a lógica apresentada, este sinal de PWM deve resultar na condução do MOSFET superior durante 20% do período, enquanto o MOSFET inferior está em condução durante os restantes 80%. As formas de onda apresentadas nas Figuras 62 confirmam esta lógica de funcionamento. A forma de onda apresentada na Figura 62a corresponde à tensão entre a *gate* e a *source* do MOSFET superior, correspondente aos pinos HO e VS, respetivamente. Já a Figura 62b representa a forma de onda da tensão entre a *gate* (LO) e a *source* (massa) do MOSFET inferior.



Figura 62: Formas de ondas de saída do IR2104 sendo em: (a) onda de HO (b) onda de LO, quando aplicado um PWM ao pino IN.

Uma vez que o controlo dos MOSFETs é realizado de acordo com o pretendido, procedeu-se à implementação do circuito do conversor CC/CC *Buck*, apresentado na Figura 63. A alimentação

do conversor, como já mencionado, advém de um painel fotovoltaico, nomeadamente, o painel SOLARPOWER-5W da fabricante XUNZEL, cujas características foram apresentadas na Tabela 4. Foi necessário aumentar o condensador de entrada, C_{in} , face ao utilizado em simulação, de forma a suavizar a tensão do PV.

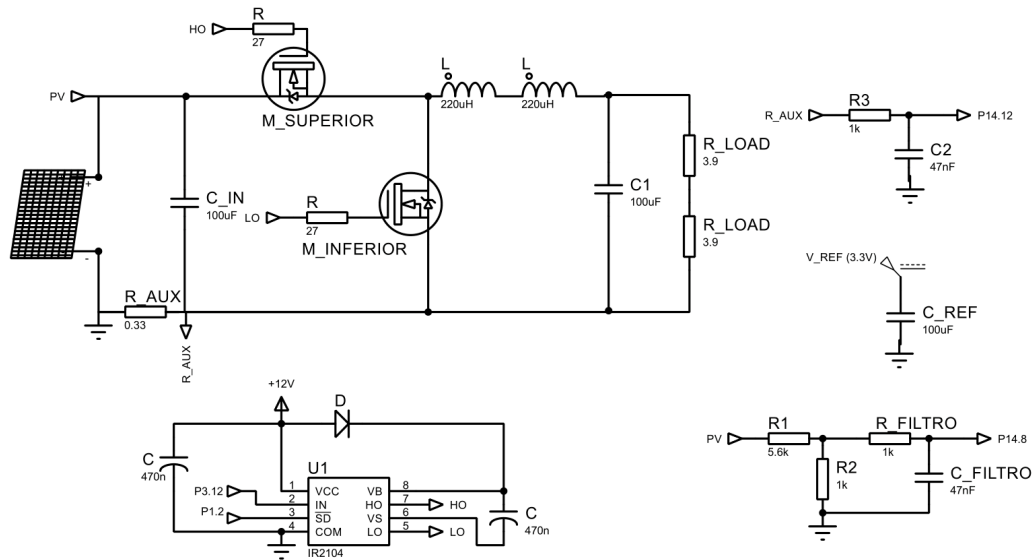


Figura 63: Circuito utilizado na implementação prática.

Para obtenção da tensão de entrada, considerando que a tensão máxima do painel excede o limite suportado pelo microcontrolador, foi utilizado um divisor de tensão. Pode-se traduzir este divisor através da expressão 5.1. Na qual V_{ADC} representa a tensão lida pelo *Analog-to-Digital Converter* (ADC) do microcontrolador, e V_{painel} , a tensão real fornecida pelo painel.

$$V_{painel} = V_{ADC} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} = V_{ADC} \cdot \frac{5,6 \cdot 10^3 + 10^3}{10^3} = V_{ADC} \cdot 6,6 \quad (5.1)$$

Para a leitura da corrente de entrada foi utilizado uma resistência de 0,33 Ω . Com base na tensão obtida pelo ADC e aplicando a Lei de Ohm, obtém-se a corrente real do painel por meio da expressão $I_{PV} = V_{ADC} / 0,33$. Foram utilizados filtro-passa baixo com uma frequência de corte de aproximadamente 4 kHz, conforme a expressão 5.2. Adicionalmente, foi utilizado um condensador de 100 μF para estabilizar a tensão de referência, minimizando flutuações e permitindo maior precisão nas leituras.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3 \cdot 47 \cdot 10^{-9}} = 3,39kHz \quad (5.2)$$

Utilizou-se um microcontrolador da *Infineon* para implementação dos algoritmos MPPT, mais precisamente o XMC4700, que integra o núcleo *ARM Cortex-M4F*, com uma frequência de operação até 144 MHz. O mesmo inclui *Floating Point Unit* (FPU), que permite operações matemáticas com maior precisão e rapidez, e um ADC de alta resolução (12bits), essenciais para aquisição precisa dos valores de tensão e corrente [79]. Estas características tornam o XMC4700 adequado para aplicações de MPPT. Na Figura 64 está representado o microcontrolador utilizado.

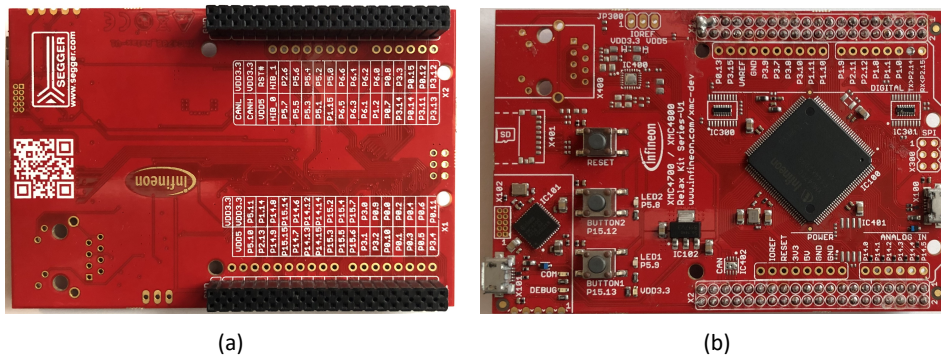


Figura 64: Microcontrolador utilizado, XMC4700.

A nível de software, o desenvolvimento foi realizado com recurso à ferramenta DAVE, desenvolvida pela *Infineon*. Esta permite desenvolver e compilar código em linguagem C e C++ e dispõem de APPs que facilitam a configuração e implementação de determinadas funcionalidades, como o ADC e o PWM.

Tirando partido desta funcionalidade, foram utilizadas diferentes APPs com objetivos específicos. Nomeadamente, uma APP PWM, responsável por gerar o sinal de controlo utilizado no conversor, permitindo variar o seu *duty cycle* e, assim controlar a potência extraída do PV. Para a leitura das tensões referentes à tensão e à corrente do PV, foi utilizado uma APP ADC, com uma resolução de 12 bits, que executa a leitura após o *Period Match* do PWM referido. Para tornar as leituras mais precisas foi, ainda, aplicado um filtro a nível de software, que tem como objetivo obter a média dos últimos 15 valores lidos. O código do filtro está apresentado em Código 1. A APP I/O utilizada possibilita a alteração do estado lógico de um pino específico, no caso, utilizado para ativar/desativar a saída do *driver* IR2104.

```
float windowFilter_Leituras(float Nova_Leitura)
{
    // Filtro de janela móvel com "Tamanho_Vetor" posições
    // a Variavel "Tamanho_Vetor" inicializada como 15 (numero de
    // posições desejada)

    Soma_Leituras = Soma_Leituras - Vetor_Leituras[Posicao_Vetor] +
        Nova_Leitura;
    Vetor_Leituras[Posicao_Vetor] = Nova_Leitura;
    Posicao_Vetor++;

    //Caso se atinja a posição máxima, a "Posicao_Vetor" é reiniciada
    if (Posicao_Vetor > Tamanho_Vetor-1)
        Posicao_Vetor = 0;

    Media_Leituras = Soma_Leituras/Tamanho_Vetor;
    return Media_Leituras;
}
```

Código 1 Código para implementação do filtro (média móvel).

Visando garantir a frequência do algoritmo MPPT, foram utilizadas duas APPs. Uma APP PWM, configurada com a frequência desejada, e uma APP INTERRUPT, ativa pelo sinal PWM, que executa o algoritmo em questão.

5.1. Perturb and Observe (P&O)

O sistema que inclui todos os elementos utilizados para se proceder aos testes dos algoritmos MPPT implementados, encontra-se representado na Figura 65.

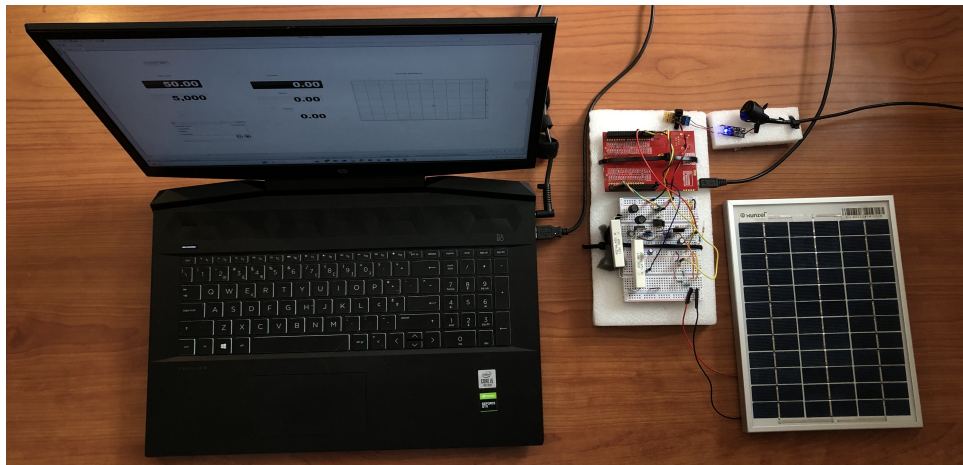


Figura 65: Circuito implementado na prática.

5.1 Perturb and Observe (P&O)

O primeiro algoritmo implementado foi o P&O convencional. Foi desenvolvida uma interface gráfica com recurso ao *software Micrium μ C/Probe*, apresentada na Figura 66. Este software permite a monitorização e o controlo de sistemas *embedded* em tempo real [80]. A interface permite iniciar o algoritmo, botão de *on/off*, bem como a monitorização em tempo real da tensão, corrente e a potência do sistema. A evolução temporal da potência é apresentada no gráfico. Os dados monitorizados são armazenados num ficheiro em intervalos de tempo definidos, através do bloco *Data Logger*, destacado na Figura. A interface permite ainda a visualização e modificação de parâmetros relevantes do algoritmo MPPT, nomeadamente, a frequência de execução e o valor do *step*.

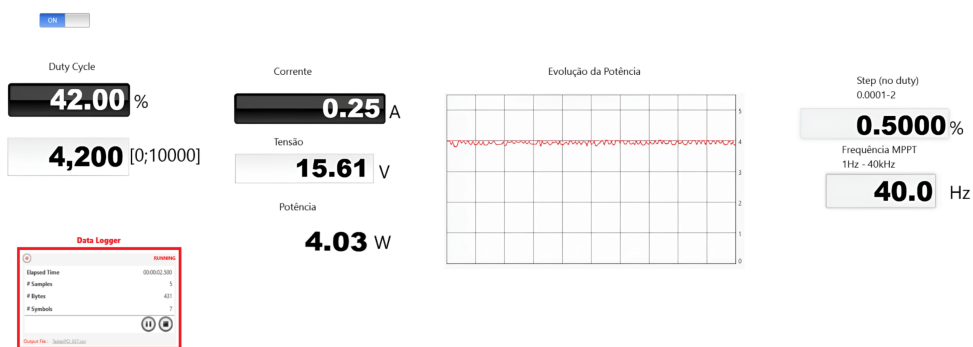


Figura 66: Interface gráfica para o P&O convencional.

O código implementado na aplicação prática assemelha-se ao utilizado nas simulações. Nesta implementação, o algoritmo P&O foi integrado numa interrupção designada de *'MPPT_PO'*. Esta é executada periodicamente, de acordo com a frequência definida para o algoritmo, 40 Hz.

A análise do desempenho do algoritmo foi realizada em ambiente não controlado, ou seja, sujeito a variações externas e sem a possibilidade de determinar qual o verdadeiro MPP para as condições em questão. Ainda assim, procurou-se manter as condições semelhantes entre os testes

realizados.

As condições definidas para a realização dos testes seguiram uma sequência, visando compreender a resposta do algoritmo a variações forçadas. Inicia-se com o painel orientado em direção ao Sol, permanecendo nesta posição por 30 segundos. Em seguida, o PV for direcionado para uma posição intermédia, onde permaneceu por 15 segundos, posteriormente voltado na direção oposta à do Sol, por mais 15 segundos. Logo após, o painel é completamente coberto por 10 segundos terminando na posição inicial. Os testes foram realizados num dia com bastante sol, céu parcialmente limpo e uma temperatura a rondar os $19^{\circ}C$.

Na Figura 67 está representado a evolução da potência extraída do painel, nas condições descritas, tanto para o P&O convencional quanto na ausência de um MPPT. Para representar a ausência de um MPPT, foi aplicado um *duty cycle* fixo de 50% ao sistema. Esta comparação pretende demonstrar, na prática, a importância do uso de técnicas MPPT no aumento da eficiência do sistema. Evidencia-se que a potência extraída acompanha as mudanças de irradiação, provocadas pela alteração da posição do painel. Conforme esperado, o sistema que utiliza o MPPT mostrou-se mais eficiente, resultando numa maior potência extraída. Durante os 85 segundos de ensaio demonstrados na Figura, a potência média extraída pelo MPPT prendeu-se nos 3,037 W, já na ausência do MPPT, a potência é bastante inferior fixando-se nos 1,320 W.

Nas Figuras 68a e 68b são apresentadas, respetivamente, a evolução da corrente e da tensão ao longo do teste para o sistema com o P&O. A corrente, como esperado, responde diretamente às mudanças da irradiação. A tensão, no entanto, apresenta menor sensibilidade a estas mudanças, permanecendo praticamente constante ao longo do ensaio. A exceção ocorre durante o período em que o painel é coberto por completo, momento em que há uma queda significativa na tensão produzida.

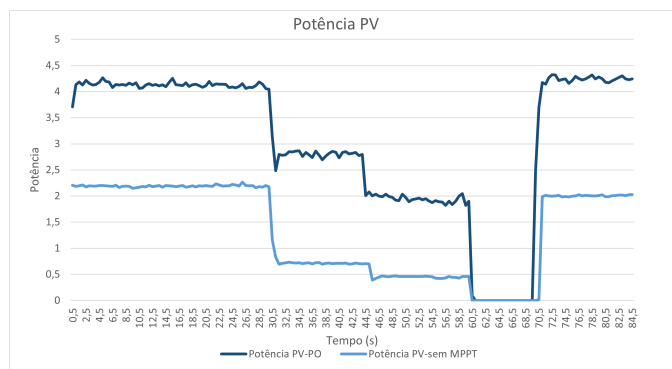


Figura 67: Curva da potência para o algoritmo P&O implementado na prática.

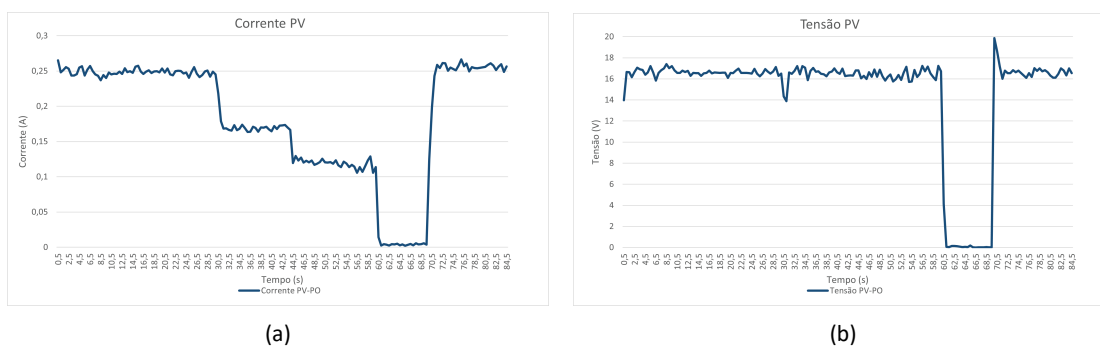


Figura 68: Variação da: (a) Corrente e (b) Tensão para o algoritmo P&O implementado na prática.

5.2 Perturb and Observe (P&O) com controlador PI.

O segundo algoritmo implementado foi o P&O com controlador PI. Numa primeira fase foi ajustado o PI de forma isolada, forçando variações na tensão de referência e avaliando a resposta do sistema. Este procedimento tem com o objetivo garantir que o controlador apresentasse o comportamento esperado face às alterações impostas na tensão de referência. A frequência de atualização do controlador PI manteve-se nos 40 kHz, enquanto a execução do P&O fixou-se nos 40 Hz, como no algoritmo anterior desenvolvido. Os testes determinaram que os valores de k_p e T_i mais adequados prendiam-se nos 0,07 e 0,03, respetivamente.

Com o PI devidamente ajustado, foi desenvolvido o P&O com controlador PI. Nesta fase, o *step* foi aumentado de 0,1 para 0,15, visando uma melhor resposta a nível prático. A interface gráfica desenvolvida para o algoritmo está representada na Figura 69.

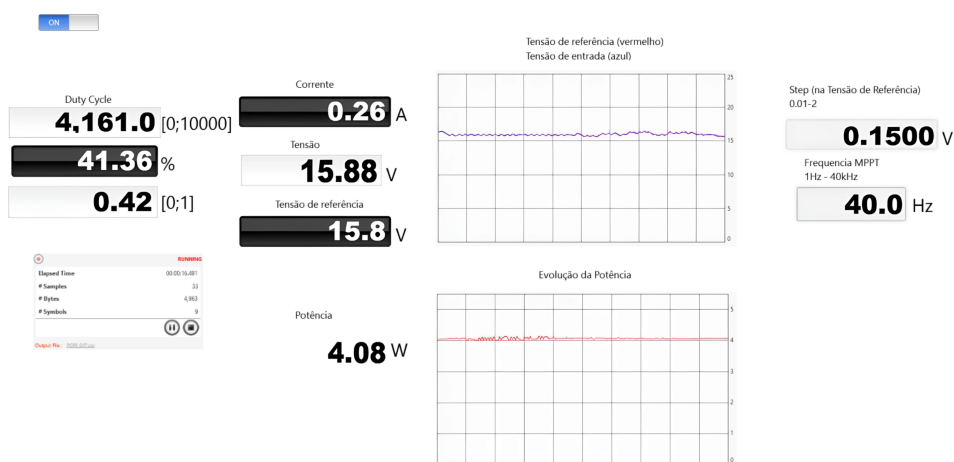


Figura 69: Interface gráfica para o P&O com Controlador PI.

O sistema foi submetido às mesmas condições aplicadas ao algoritmo anterior. A evolução da potência está apresentada na Figura 70a, tendo uma potência média de 3,044 W. Na Figura 70b está representado as curvas de potência dos dois algoritmos implementados, evidenciando uma clara semelhança em termos de desempenho. As Figuras 71a, 71b, 71c e 71d representam, respetivamente, a evolução da corrente, da tensão, do erro e da comparação entre a tensão de referência e a tensão do PV. Revela-se que o sistema MPPT responde de forma eficaz às alterações sujeitas, com o controlador ajustando dinamicamente a tensão de referência visando minimizar o erro, evidenciando o ajuste como pretendido.

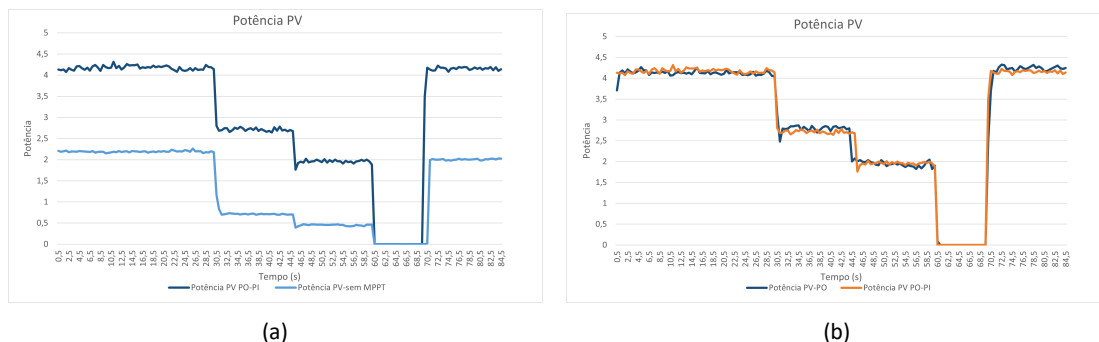


Figura 70: Curva da potência: (a) para o algoritmo P&O com controlador PI implementado na prática e (b) comparação com o P&O.

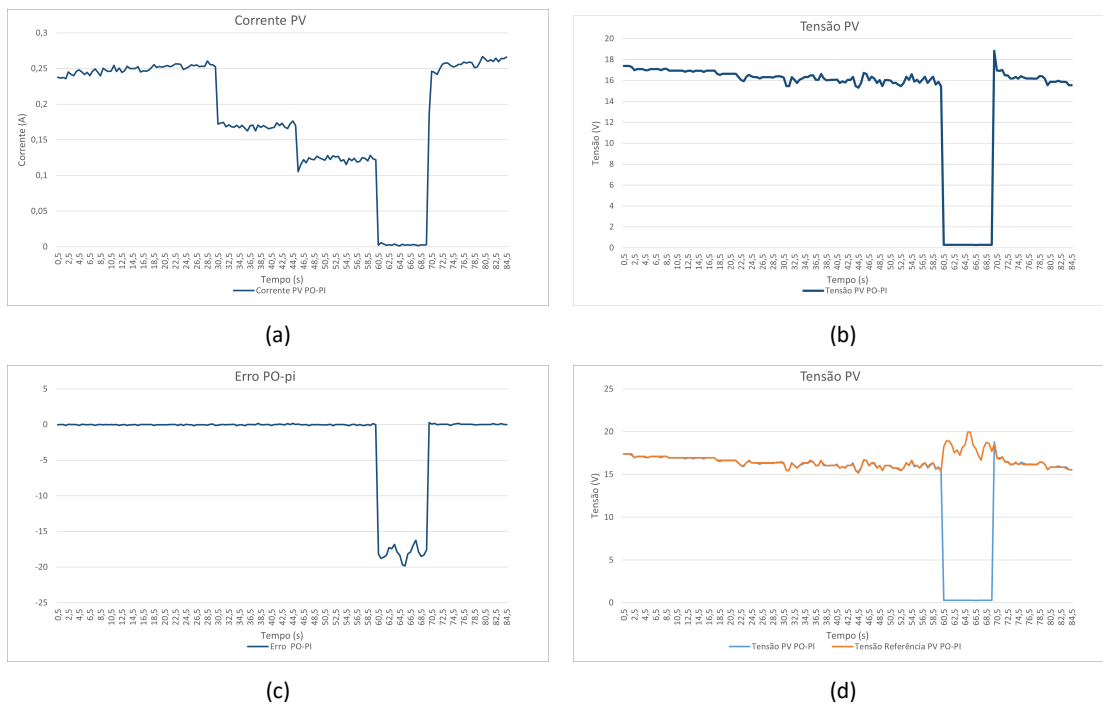


Figura 71: Variação da: (a) Corrente, (b) Tensão, (c) do Erro, e (d) Tensão de Referência para o algoritmo P&O com controlador PI implementado na prática.

5.3 Comparação dos algoritmos desenvolvidos

Embora os testes anteriormente apresentados terem sido realizado em condições iguais, na medida do possível, estes são facilmente influenciados por fatores como variações no posicionamento do painel e pequenas diferenças nos intervalos de tempo entre as mudanças de posição que afetam os resultados obtidos. Com o intuito de uma comparação mais precisa, os dois algoritmos MPPT e o sistema sem o rastreamento, foram submetidos a um ensaio no qual o painel é fixo na posição ideal (orientado para o sol) durante um período de 45 segundos.

As curvas de potência são apresentadas na Figura 72a, 72b e 72c. Os valores de potência foram registados com uma frequência igual à do algoritmo MPPT, ou seja, 40 Hz. A potência média extraída foi de 4,165 W para o algoritmo P&O convencional, 4,187 W para o P&O com controlador PI e 2,924 W na ausência de algum tipo de MPPT. Estes resultados estão em conformidade com as simulações realizadas, confirmando que, entre os algoritmos desenvolvidos, o mais eficiente é o P&O com o controlador PI.

5.3. Comparação dos algoritmos desenvolvidos

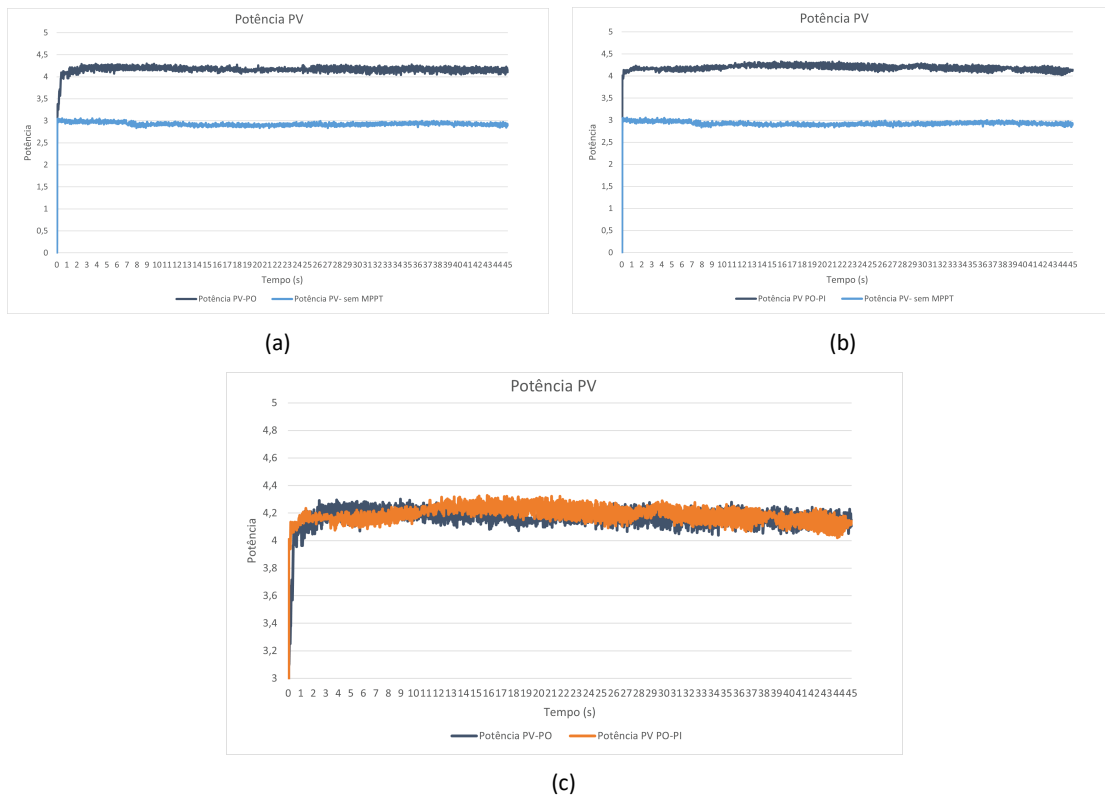


Figura 72: Curvas da potência para os algoritmos: (a) P&O, (b) P&O com controlador PI e (c) comparação entre os dois algoritmos, nas mesmas condições.

6 Conclusão

A crescente preocupação com questões ambientais alavancou a utilização de fontes de energia renovável, entre as quais, a energia solar se destaca com uma das mais promissoras. A presente dissertação permitiu explorar os conceitos fundamentais ao funcionamento dos painéis PV, desde o princípio de operação das células fotovoltaicas, elemento que pode ser conectado em série e/ou em paralelo nos painéis fotovoltaicos, até ao seu modelo elétrico.

Um dos aspetos a destacar é o impacto das condições ambientais, nomeadamente a temperatura, e, sobretudo, a irradiância, na produção de potência pelos painéis PV. Como já mencionado, as condições ambientais são voláteis, o que influencia diretamente a energia produzida pelo sistema. Estas constantes alterações nas condições adjacentes impactam no ponto de potência máxima (MPP), exigindo algoritmos que permitam a adaptação contínua às mesmas mudanças.

Neste contexto, a dissertação abordou diferentes categorias de MPPT, baseadas na classificação utilizada por alguns autores, sendo, estas as tradicionais, as inteligentes, as de otimização e as híbridas. As tradicionais, de implementação simples e de custo mais reduzidos, apresentam limitações evidentes sobretudo em condições de PSC, na qual a curva P-V pode apresentar vários LMPP. As técnicas inteligentes apresentam uma boa resposta nestas condições e são altamente adaptáveis a ambientes em rápidas mudanças, embora sejam tendencialmente complexas em termos de controlo. No âmbito das técnicas de otimização estas são inspiradas em comportamentos do reino animal, entre os quais os gorilas (GTO), algoritmo recente e não muito abordado no contexto das técnicas MPPT, mas com um potencial interessante que valeu especial atenção neste relatório. As híbridas, por sua vez, revelam-se eficazes pela combinação de diferentes técnicas tirando partido das vantagens de cada uma.

Foi realizada uma análise comparativa de três das técnicas estudadas nesta dissertação, sendo elas, o P&O, com perturbação direta no *duty cycle*, P&O com controlador PI, com perturbação na tensão de referência e por fim o GTO, na qual cada indivíduo representa um *duty cycle* visando identificar o *Silverback*. Foram aplicadas alterações ao GTO descrito na literatura, visando aprimorar o mesmo no contexto de MPPT. Dentro das alterações propostas destacam-se a distribuição uniforme da população inicial, o ajuste de coeficientes e a organização sequencial antes da avaliação da nova população. Estas alterações conduziram para uma melhor exploração do espaço de pesquisa, uma menor tendência aos extremos e um menor tempo de convergência. A natureza estocástica deste algoritmo pode originar níveis de potência diferentes mesmo sob as mesmas condições.

Analisando os três métodos, todos apresentaram eficiências elevadas em termos de potência extraída. No entanto, o algoritmo P&O convencional apresentou um pior desempenho, mesmo tendo sido simulado com uma frequência de 4 kHz, muito superior à utilizada na prática. Caso fosse utilizada uma frequência de atualização inferior, seria expectável um aumento no tempo

de convergência, assim como uma redução na potência extraída. O algoritmo que exige um menor tempo de convergência foi o P&O com controlador PI. Na possibilidade de utilização de um modelo matemático para avaliar o impacto de cada “gorila” na potência extraída, o tempo necessário para o GTO reduziria drasticamente. Uma vantagem evidente do algoritmo GTO é a possibilidade de rastreamento do GMPP em condições de PSC, contrariamente às restantes, que tendem a ficar “presas” num LMPP.

A nível prático foram implementadas as técnicas baseadas no P&O num protótipo de um conversor *CC/CC Buck* alimentado por um painel de $5W$. Os resultados obtidos mostraram a clara vantagem da utilização destas técnicas quando comparadas a ausência de qualquer MPPT. O algoritmo que utiliza o controlador PI mostrou-se mais eficaz e mais estável, o que confirma os resultados obtidos em ambiente de simulação.

6.1 Trabalhos Futuros

Como trabalho futuro, destaca-se a implementação do protótipo numa *Printed Circuit Board* (PCB), substituindo a *breadbord* atualmente utilizada, o que permitia um aumento da potência admissível no sistema, uma vez que a *breadboard* impõem limitações no que diz respeito à corrente e à tensão suportadas. Este aumento de potência admissível, possibilitava a utilização de vários painéis conectados, em série, juntamente com a utilização de díodos *bypass*, permitiria avaliar o desempenho em condições de sombreamento. Neste cenário, justificava-se a implementação do algoritmo GTO, dada a sua eficácia nestas condições.

A implementação de um sistema de comunicação sem fio, apesar de não imprescindível, representava uma melhoria no sentido de praticidade e monitorização do desempenho dos algoritmos. Para finalizar, a utilização de sensores, por exemplo os sensores de efeito *Hall* para as medições tanto da tensão como da corrente, levariam a medições mais precisas.

Apesar destas possíveis melhorias, o protótipo desenvolvido cumpriu o principal objetivo proposto neste trabalho, ou seja, demonstrar, na prática, a importância da utilização de técnicas MPPT nos sistemas PV com o propósito de melhorar a eficiência do mesmo.

Bibliografia

- [1] IEA, *Investment in clean energy this year is set to be twice the amount going to fossil fuels*, jun. de 2024. URL: <https://www.iea.org/news/investment-in-clean-energy-this-year-is-set-to-be-twice-the-amount-going-to-fossil-fuels>. [Citado na página 1]
- [2] J. A. Hussein, «Perspectives on Solar Energy. Technology Analysis,» em *Proceedings of 2024 27th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2024*, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., 2024, pp. 62–68, ISBN: 9798350363708. DOI: 10.1109/SCM62608.2024.10554204. [Citado na página 1]
- [3] P. Canal, «Porto produziu três vezes mais energia solar em 2024 do que o ano anterior,» fev. de 2025. URL: <https://portocanal.sapo.pt/noticia/360688>. [Citado na página 1]
- [4] C. Monteiro, «Energia Eólica e Solar (EESO)-Energia Solar Fotovoltaica Aula 1-Irradiação Solar,» Faculdade de Engenharia do Porto (FEUP), rel. téc. [Citado na página 1]
- [5] L. Wald, «Solar radiation energy (fundamentals),» em *SOLAR ENERGY CONVERSION AND PHOTOENERGY SYSTEMS*. jan. de 2007. [Citado na página 1]
- [6] C. de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), *Energia Solar Princípios e Aplicações*. 2006. URL: <http://www.cresesb.cepel.br>. [Citado nas páginas 1, 10, 11]
- [7] Z. Ishrat, A. K. Gupta e S. Nayak, «A Comprehensive Review of MPPT Techniques Based on ML Applicable for Maximum Power in Solar Power Systems,» *Journal of Renewable Energy and Environment*, vol. 11, pp. 28–37, 1 jan. de 2024, ISSN: 24237469. DOI: 10.30501/jree.2023.385661.1556. [Citado nas páginas 1, 2, 11, 14]
- [8] R. B. Bollipo, S. Mikkili e P. K. Bonthagorla, *Hybrid, optimal, intelligent and classical PV MPPT techniques: A review*, jan. de 2021. DOI: 10.17775/CSEJJPES.2019.02720. [Citado nas páginas 1, 2, 11, 14, 15, 25–33, 37, 39, 40]
- [9] M. Seyedmahmoudian, B. Horan, T. K. Soon et al., *State of the art artificial intelligence-based MPPT techniques for mitigating partial shading effects on PV systems – A review*, out. de 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2016.06.053. [Citado nas páginas 2, 14, 30, 31, 34]
- [10] L. Fraas, *Low Cost Solar Electric Power*. mar. de 2014, ISBN: ISBN 978-3-319-07529-7. DOI: 10.1007/978-3-319-07530-3. [Citado na página 5]
- [11] A. Goetzberger, C. Hebling e H.-W. Schock, *Photovoltaic materials, history, status and outlook*, ago. de 2002. [Citado na página 5]
- [12] M. G. Villalva e J. R. Gazoli, *Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações*, 1ª. Érica, 2012. [Citado nas páginas 5–8]
- [13] F. C. Batistel, *Materiais elétricos e semicondutores*. 2017, ISBN: 9788584828517. URL: <http://www.kroton.com.br/>. [Citado nas páginas 5, 6]
- [14] A. H. Shneishil, *CHAPTER THREE Solar Photovoltaic System*, 2018. [Citado nas páginas 5–7]

- [15] M. J. Parry-Hill, R. T. Sutter e M. W. Davidson, *Solar Cell Operation*, 2018. URL: <https://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/solarcell/index.html>. [Citado na página 6]
- [16] D. G. F. S. (Dgs), *Planning and Installing Photovoltaic Systems*, 2nd ed. Earthscan, 2008, ISBN: 978-1-84407-442-6. [Citado nas páginas 7, 8]
- [17] P. Eliane, A. Faria e A. Fadigas, *Energia Solar Fotovoltaica : Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica*, 2019. URL: <https://www.docsity.com/pt/apostila-de-energia-solar/4941183/>. [Citado nas páginas 7, 22, 23]
- [18] A. C. Silva, C. Consolo, D. de Moraes et al., *Energia Solar-fundamentos, tecnologia e aplicações*, Edgard Blücher Ltda. 2021. [Citado nas páginas 7, 8, 22]
- [19] K. Nguyen-Vinh, S. Gonapaladeniya, N. Nguyen-Quang e Z. Leonowicz, «A Review of Photovoltaic Technology,» em *Proceedings of the 2024 24th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2024*, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., 2024, ISBN: 9798350348774. DOI: 10.1109/EPE61521.2024.10559575. [Citado na página 8]
- [20] M. M. Casaro e C. Martins, *Modelo de Arranjo Fotovoltaico Destinado a Análises em Eletrônica de Potência Via Simulação*, ago. de 2008. [Citado nas páginas 8, 9]
- [21] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Elsevier, jan. de 2009. DOI: 10.1016/B978-0-12-374501-9.X0001-5. [Citado nas páginas 8, 10, 11]
- [22] S. Prajapati e E. Fernandez, «Effect of the Positioning of Single and Double Bypass Diodes in a PV String on its Reliability,» em *2020 International Conference on Computer, Electrical & Communication Engineering (ICCECE)*, 2020, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICCECE48148.2020.9223091. [Citado nas páginas 11, 43]
- [23] W. T. da Costa, «Modelagem, Estimção de Parâmetros e Método MPPT para Módulos Fotovoltaicos,» set. de 2010. [Citado na página 11]
- [24] S. Veerapen e H. Wen, «Shadowing effect on the power output of a photovoltaic panel,» em *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*, 2016, pp. 3508–3513. DOI: 10.1109/IPEMC.2016.7512858. [Citado na página 11]
- [25] N. M. F. Heringer, «Modelagem de Arranjo Fotovoltaico com Sombreamento Parcial para Referência de Emuladores Estáticos,» 2016. [Citado na página 11]
- [26] Y. Sun, S. Chen, L. Xie, R. Hong e H. Shen, «Investigating the Impact of Shading Effect on the Characteristics of a Large-Scale Grid-Connected PV Power Plant in Northwest China,» *International Journal of Photoenergy*, vol. 2014, p. 763 106, 1 2014. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/763106>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2014/763106>. [Citado na página 13]
- [27] M. Forouzes, Y. P. Siwakoti, S. A. Gorji, F. Blaabjerg e B. Lehman, «Step-Up DC-DC converters: A comprehensive review of voltage-boosting techniques, topologies, and applications,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, pp. 9143–9178, 12 dez. de 2017, ISSN: 08858993. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2652318. [Citado na página 14]
- [28] R. Chibante, *Eletrônica de Potência - Conversores CC/CC*, 2022. [Citado nas páginas 14–16, 18–22, 44]
- [29] M. H. Rashid, *Power electronics handbook*. Academic Press, 2001, p. 895, ISBN: 0125816502. [Citado na página 16]
- [30] K. H. Billings e T. Morey, *Switch mode power supply handbook*. McGraw-Hill, 2011, ISBN: 9780071639729. [Citado na página 16]
- [31] D. F. Cortez, *Resposta Dinamica de Indutores e Capacitores*, set. de 2018. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=2PeBKp-TEgY>. [Citado nas páginas 17, 18]

- [32] D. F. Cortez, *Conversor CC-CC Buck - Modo de Condução Contínua - CCM*, set. de 2018. URL: https://www.youtube.com/watch?v=gGUoB-HvKTY%5C&list=PLuMa9F8K-p6d-rCGgsljJ_r7jnWAXBC3x. [Citado nas páginas 18, 19]
- [33] D. Toumi, D. Benattous, A. Ibrahim et al., «Optimal design and analysis of DC–DC converter with maximum power controller for stand-alone PV system,» *Energy Reports*, vol. 7, pp. 4951–4960, nov. de 2021, ISSN: 23524847. DOI: 10.1016/j.egy.2021.07.040. [Citado nas páginas 20, 45]
- [34] D. F. Cortez, *Conversor CC-CC Boost - Modo de Condução Contínua - CCM*, nov. de 2018. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=FRnqgkM-EN8%5C&t=474s>. [Citado nas páginas 20, 21]
- [35] J. T. Pinho, M. A. Galdinho e G. de Trabalho de Energia Solar- GTES, *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. 2014. URL: https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. [Citado na página 22]
- [36] E-redes, *Autoconsumo Individual*, 2025. URL: <https://www.e-redes.pt/pt-pt/clientes-e-parceiros/produtores/quero-ser-autoconsumidor>. [Citado na página 22]
- [37] R. Portuguesa, A. para a Energia (ADENE) e D.-G. de Energia e Geologia (DGEG), *Autoconsumo e Comunidade de Energia Renovável- Guia Legislativo*, 2022. [Citado na página 23]
- [38] M. L. Kathe, A. B. Makokha, S. O. Zachary e M. S. Adaramola, *A Comprehensive Review of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Techniques Used in Solar PV Systems*, mar. de 2023. DOI: 10.3390/en16052206. [Citado nas páginas 25–27, 29, 35, 37, 39, 40]
- [39] R. B. Bollipo, S. Mikkili e P. K. Bonthagorla, *Critical Review on PV MPPT Techniques: Classical, Intelligent and Optimisation*, jul. de 2020. DOI: 10.1049/iet-rpg.2019.1163. [Citado nas páginas 25, 26]
- [40] N. Karami, N. Moubayed e R. Outbib, *General review and classification of different MPPT Techniques*, fev. de 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.132. [Citado nas páginas 26, 28, 29, 31]
- [41] R. Kumaradhas, S. Manjuladevi, V. Gowtham, P. Hrishikesh e G. Gokulakrishnan, *MAXIMUM POWER POINT TRACKING USING PERTURB AND OBSERVE METHOD*, mar. de 2020. [Citado na página 27]
- [42] R. Ahmad, A. F. Murtaza e H. A. Sher, *Power tracking techniques for efficient operation of photovoltaic array in solar applications – A review*, mar. de 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2018.10.015. [Citado na página 27]
- [43] P. Li, J. Zhang, R. Xu, J. Zhou e Z. Gao, «Integration of MPPT algorithms with spacecraft applications: Review, classification and future development outlook,» *Energy*, vol. 308, nov. de 2024, ISSN: 18736785. DOI: 10.1016/j.energy.2024.132927. [Citado nas páginas 28, 29, 34, 40]
- [44] Ö. Çelik e A. Teke, «A Hybrid MPPT method for grid connected photovoltaic systems under rapidly changing atmospheric conditions,» *Electric Power Systems Research*, vol. 152, pp. 194–210, nov. de 2017. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.07.011. [Citado nas páginas 28, 39]
- [45] Z. Salam, J. Ahmed e B. S. Merugu, *The application of soft computing methods for MPPT of PV system: A technological and status review*, 2013. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.02.008. [Citado nas páginas 30, 31, 33]
- [46] N. Patcharaprakiti e S. Premrudeepreechacharn, «Maximum power point tracking using adaptive fuzzy logic control for grid-connected photovoltaic system,» em *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)*, vol. 1, 2002, 372–377 vol.1. DOI: 10.1109/PESW.2002.985022. [Citado na página 31]
- [47] J. Kennedy, R. Eberhart e Bls gov, *Particle Swarm Optimization*, 1995. [Citado na página 31]

- [48] Y. H. Liu, S. C. Huang, J. W. Huang e W. C. Liang, «A particle swarm optimization-based maximum power point tracking algorithm for PV systems operating under partially shaded conditions,» *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, pp. 1027–1035, 4 2012, ISSN: 08858969. DOI: 10.1109/TEC.2012.2219533. [Citado nas páginas 32, 33]
- [49] G. Pereira, *Particle Swarm Optimization*, abr. de 2011. URL: <https://www.researchgate.net/publication/228518470>. [Citado nas páginas 32, 33]
- [50] N. Gomes, *Otimização e Métodos de Decisão em SE- Métodos de Pesquisa Não Exactos*, 2023. [Citado nas páginas 32, 33]
- [51] R. Sridhar, V. D. Hima e B. A. Divya, *Ant Colony Optimization based Maximum Power Point Tracking (MPPT) for Partially Shaded Standalone PV System*, 2016. [Citado nas páginas 33, 34]
- [52] I. Saady, B. Majout, M. S. Adouairi et al., *Soft computing approaches for photovoltaic water pumping systems: A review*, out. de 2024. DOI: 10.1016/j.clet.2024.100800. [Citado na página 33]
- [53] L. L. Jiang, D. L. Maskell e J. C. Patra, «A novel ant colony optimization-based maximum power point tracking for photovoltaic systems under partially shaded conditions,» *Energy and Buildings*, vol. 58, pp. 227–236, 2013, ISSN: 03787788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.12.001. [Citado na página 34]
- [54] M. I. Mosaad, M. O. abed el-Raouf, M. A. Al-Ahmar e F. A. Banakher, «Maximum power point tracking of PV system based cuckoo search algorithm; review and comparison,» em *Energy Procedia*, vol. 162, Elsevier Ltd, 2019, pp. 117–126. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.04.013. [Citado na página 34]
- [55] J. Ahmed e Z. Salam, «A Maximum Power Point Tracking (MPPT) for PV system using Cuckoo Search with partial shading capability,» *Applied Energy*, vol. 119, abr. de 2014. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.12.062. [Citado nas páginas 34, 35]
- [56] B. Abdollahzadeh, F. S. Gharehchopogh e S. Mirjalili, «Artificial gorilla troops optimizer: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems,» *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 36, pp. 5887–5958, 10 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/int.22535>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/int.22535>. [Citado nas páginas 35–37]
- [57] A. G. Hussien, A. Bouaouda, A. Alzaqebah, S. Kumar, G. Hu e H. Jia, «An in-depth survey of the artificial gorilla troops optimizer: outcomes, variations, and applications,» *Artificial Intelligence Review*, vol. 57, 9 set. de 2024, ISSN: 15737462. DOI: 10.1007/s10462-024-10838-8. [Citado nas páginas 35, 36]
- [58] M. Abdel-Basset, D. El-Shahat, K. M. Sallam e K. Munasinghe, «Parameter extraction of photovoltaic models using a memory-based improved gorilla troops optimizer,» *Energy Conversion and Management*, vol. 252, jan. de 2022, ISSN: 01968904. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.115134. [Citado nas páginas 35–37]
- [59] J. You, H. Jia, D. Wu et al., «Modified Artificial Gorilla Troop Optimization Algorithm for Solving Constrained Engineering Optimization Problems,» *Mathematics*, vol. 11, 5 mar. de 2023, ISSN: 22277390. DOI: 10.3390/math11051256. [Citado nas páginas 36, 37]
- [60] A. Fathy e D. Yousri, «An efficient artificial gorilla troops optimizer-based tracker for harvesting maximum power from thermoelectric generation system,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 234, nov. de 2023, ISSN: 13594311. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121290. [Citado na página 37]
- [61] O. S. Vargas, S. E. D. L. Aldaco, J. A. Alquicira, L. G. Vela-Valdes e A. R. L. Nunez, «Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System (ANFIS) Applied to Inverters: A Survey,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 39, pp. 869–884, 1 jan. de 2024, ISSN: 19410107. DOI: 10.1109/TPEL.2023.3327014. [Citado na página 38]

- [62] A. Fareed, H. G. Ali e A. Rasheed, «ANFIS based MPPT Controller in PV Electrical Generation,» em *Proceedings of 2022 19th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology, IBCAST 2022*, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 262–267, ISBN: 9781665460514. DOI: 10 . 1109 / IBCAST54850 . 2022 . 9990337. [Citado na página 38]
- [63] M. R. Javed, A. Waleed, U. S. Virk e S. Z. U. Hassan, «Comparison of the Adaptive Neural-Fuzzy Interface System (ANFIS) based Solar Maximum Power Point Tracking (MPPT) with other Solar MPPT Methods,» em *Proceedings - 2020 23rd IEEE International Multi-Topic Conference, INMIC 2020*, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., nov. de 2020, ISBN: 9781728198934. DOI: 10 . 1109 / INMIC50486 . 2020 . 9318178. [Citado na página 38]
- [64] K. Sundareswaran, V. V. kumar e S. Palani, «Application of a combined particle swarm optimization and perturb and observe method for MPPT in PV systems under partial shading conditions,» *Renewable Energy*, vol. 75, pp. 308–317, mar. de 2015, issn: 18790682. [Citado na página 38]
- [65] M. Brahmi, C. B. Regaya, A. M. Ghanmi, H. Hamdi e A. Zaafouri, «Modified Hybrid PSO-FL MPPT for Photovoltaic Systems Under Partial Shading Conditions,» em *SCC 2023 - IEEE 3rd International Conference on Signal, Control and Communication*, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., 2023, ISBN: 9798350326390. DOI: 10 . 1109 / SCC59637 . 2023 . 10527490. [Citado nas páginas 38, 39]
- [66] S. Panda, R. Pradhan e B. B. Pati, «A Metaheuristic Technique Based MPPT for An Off-grid Photovoltaic Based Microgrid System,» em *2023 IEEE 3rd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation, SeFet 2023*, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., 2023, ISBN: 9798350319972. DOI: 10 . 1109 / SeFeT57834 . 2023 . 10245399. [Citado na página 38]
- [67] S. Baraskar, S. K. Jain e P. K. Padhy, «Fuzzy logic assisted P&O based improved MPPT for photovoltaic systems,» em *2016 International Conference on Emerging Trends in Electrical Electronics & Sustainable Energy Systems (ICETEESES)*, 2016, pp. 250–255. DOI: 10 . 1109 / ICETEESES . 2016 . 7581369. [Citado na página 39]
- [68] J. Macaulay e Z. Zhou, «A fuzzy logical-based variable step size P&O MPPT algorithm for photovoltaic system,» *Energies*, vol. 11, 6 jun. de 2018, issn: 19961073. DOI: 10 . 3390 / en11061340. [Citado na página 39]
- [69] K. Dahmane, B. Bouachrine, M. Ajaamoum et al., «Fuzzy Logic Based Adaptive P&O MPPT Control of a DC-DC Boost Converter Used in a Wind Energy Conversion System with a Permanent Magnet Synchronous Generator,» em *IFAC-PapersOnLine*, vol. 58, Elsevier B.V., jul. de 2024, pp. 587–592. DOI: 10 . 1016 / j . ifacol . 2024 . 07 . 546. [Citado na página 39]
- [70] C. Bertin, N. Fapi, H. Tchakounté et al., *Enhanced P&O MPPT Algorithm Based on Fuzzy Logic for PV System: Brief Review and Experimental Implementation*, 2023. [Citado na página 39]
- [71] N. Priyadarshi, S. Padmanaban, P. K. Maroti e A. Sharma, «An Extensive Practical Investigation of FPSO-Based MPPT for Grid Integrated PV System under Variable Operating Conditions with Anti-Islanding Protection,» *IEEE Systems Journal*, vol. 13, pp. 1861–1871, 2 jun. de 2019, issn: 19379234. DOI: 10 . 1109 / JSYST . 2018 . 2817584. [Citado na página 39]
- [72] M. Lasheen e M. Abdel-Salam, «Maximum power point tracking using Hill Climbing and ANFIS techniques for PV applications: A review and a novel hybrid approach,» *Energy Conversion and Management*, vol. 171, pp. 1002–1019, set. de 2018, issn: 01968904. DOI: 10 . 1016 / j . enconman . 2018 . 06 . 003. [Citado nas páginas 39, 40]
- [73] R. Brito, *Sistemas de Controlo e Eletrónica de Potência- PID CONTROLLER BASICS*, abr. de 2021. [Citado na página 50]

- [74] R. Brito, *Sistemas de Controlo e Eletrónica de Potência -THE IMC-BASED PROCEDURE FOR PID TUNING*, abr. de 2021. [Citado na página 50]
- [75] R. Brito, *Sistemas de Controlo e Eletrónica de Potência-PID TIME-DISCRETE CONTROLLER*, mar. de 2023. [Citado na página 50]
- [76] G. E. P. Box e M. E. Muller, «A note on the generation of random normal deviates,» *The annals of mathematical statistics*, vol. 29, pp. 610–611, 2 1958. [Citado na página 55]
- [77] D. Scott, «Box–Muller transformation,» *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, vol. 3, mai. de 2011. DOI: 10.1002/wics.148. [Citado na página 55]
- [78] I. Rectifier, «DATASHEET, HALF-BRIDGE DRIVER-IR2104,» rel. téc. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IR2104-DS-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c7c1c31671. [Citado na página 62]
- [79] Infineon, «DATASHEET, XMC4700/XMC4800 Microcontroller Series for Industrial Applications,» rel. téc., 2024. URL: <http://www.infineon.com/xmc4000>. [Citado na página 63]
- [80] Infineon, «Micrium® uC/Probe™ XMC™ getting started,» rel. téc., 2016. [Citado na página 65]

Anexo A Avaliação População Inicial do GTO tradicional.

```
//TESTAR A POPULAÇÃO INICIAL
#define Tempo_espera_estabilizar 3000 //Lógica: Time Step = 2.5*10^-6
                                     //Tempo de espera = 7.5 ms = 7.5*10^-3
                                     //Tempo_espera_estabilizar = 7.5 ms / 2.5*10^-6

double populacao[N_gorilas]; //representa o X(t) nas formulas
double nova_populacao[N_gorilas]; // representa o GX(t)

void SimulationStep()
{
    double V = in[0];
    double I = in[1];

    if(testarPopulacaoInicial == 1) //flag ativa após a geração da
        população inicial
    {
        out[0] = populacao[indice_gorila]/100; //necessário dividir por
        100 pois a saída deve estar entre 0 e 1

        // Conta steps (tempo passado)
        contador_step++;

        if (contador_step >= Tempo_espera_estabilizar) //Esperar para o
        conversor estabilizar a potencia
        {
            contador_step = 0;
            potencia_atual = V*I;

            numero_gorilas ++;
            potencia[indice_gorila] = potencia_atual; //Armazena os valores
            da fitness function // (neste caso a potencia) para cada gorila

            //Para verificar se é a melhor potencia ate agora
            if (potencia_atual > potenciaMPP) {
                potenciaMPP = potencia_atual;
                indice_duty_MPP = indice_gorila;}

            indice_gorila++;

            // Se já testou todos, para de aplicar
```

```
    if (indice_gorila == N_gorilas) {
        testarPopulacaoInicial = 0; //uma vez testado a população
        inicial não volta a ser testada
            // Mesmo quando se repete o GTO
        indice_gorila = 0; //vai a zero para posteriormente testar-se
        todos os novos gorilas
        flag_exploration = 1; //ativa a flag exploration para iniciar
        esta fase
    }
}
//Continuação do código
}
```

Código 1 Avaliação População Inicial do GTO tradicional.

Anexo B Fase *Exploration* do GTO tradicional.

```
double Random01 () {
    return (double)rand() / (double)RAND_MAX; //gera um valor
    aleatorio entre 0 e 1
}

double Mover_Desconhecido() {
    double r1 = Random01 ();
    double posicao = (UB-LB)*r1 +LB;

    if (posicao > UB) return UB;
    else if (posicao < LB) return LB;
    else return posicao;
}

double Mover_Outros_Gorilas(double C, double L, double H){
    double r2 = Random01();
    int Xr = rand() % N_gorilas; //escolhe aleatoriamente um numero
    entre 0 e N_gorilas-1 (ou seja escolhe aleatoriamente um gorila)

    double posicao = (r2-C) *populacao[Xr] + L*H;

    if (posicao > UB) return UB;
    else if (posicao < LB) return LB;
    else return posicao;
}

double Mover_Conhecido( double L, int i){

    double r3 = Random01();
    int Xr = rand() % N_gorilas; //escolhe aleatoriamente um numero
    entre 0 e N_gorilas-1 (ou seja escolhe aleatoriamente um gorila)
    double posicao = populacao[i] - L * (L * (populacao[i] -
    nova_populacao[Xr])) + r3 * ( populacao[i] - nova_populacao[Xr]));

    if (posicao > UB) return UB;
    else if (posicao < LB) return LB;
    else return posicao;
}
```

Código 1 Fase *Exploration* do GTO tradicional.

Anexo C Fase *Exploitation* do GTO tradicional.

```
double gerar_gaussiana() //usado a Transformada de Box-Muller
{
    double u1 = Random01();
    double u2 = Random01();

    if (u1 < 1e-10) u1 = 1e-10; // evitar log(0)
    return sqrt(-2.0 * log(u1)) * cos(2.0 * PI * u2);
}

void Exploitation ()
{
    double W = valorW;
    g = pow(2, L); // g = 2^L
    M = calcular_M(g);
    N2 = gerar_gaussiana();
    double E;
    double rand = Random01(); //utilizado para calcular o E

    for (i = 0; i < N_gorilas; ++i){
        if (C >= W){
            nova_populacao[i] = L * M * ( populacao[i] - populacao[
            indice_duty_MPP]) + populacao[i];
            if (nova_populacao[i] > UB) nova_populacao[i] =UB;
            else if (nova_populacao[i] < LB) nova_populacao[i] =LB;
        }
        if (C < W){
            double r5 = Random01 ();
            double Q = 2*r5 -1;
            if (rand <= 0.5) E = gerar_gaussiana(); //assume um valor da
            distribuição normal diferente para cada gorila
            else E = N2; //igual para todos os gorilas
            double A = BETA * E;
            nova_populacao[i] = populacao[indice_duty_MPP] - (populacao[
            indice_duty_MPP] * Q - populacao[i] *Q) *A;
            if (nova_populacao[i] > UB) nova_populacao[i] =UB;
            else if (nova_populacao[i] < LB) nova_populacao[i] =LB;}
        }
    }
    flag_exploitation = 0;
    avaliarExploitation = 1;
}
```

Código 1 Fase *Exploitation* do GTO tradicional.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

ISEP, Porto, 22 de 6, de 2025

Bernardo Baptista Vieira da Silva.