



ESTRATÉGIAS DE CONTROLO MPPT PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

RUI ALEXANDRE GOMES DA ROCHA

Julho de 2023

ESTRATÉGIAS DE CONTROLO MPPT PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Rui Alexandre Gomes da Rocha



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2023

Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Unidade Curricular de TESE, do 2º ano, do Mestrado de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores Ramo de Automação e Robótica

Candidato: Rui Alexandre Gomes da Rocha, N° 1151138, 1151138@isep.ipp.pt

Orientação científica: Prof. Doutor Rui Chibante, rmc@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2 de julho de 2023

Resumo

A pesquisa pelas energias renováveis foi acelerada devido à evolução do aquecimento global, causado pelo acúmulo de gases de efeito estufa gerados na sua maior parte pela queima de combustíveis fósseis. A energia fotovoltaica é amiga do meio ambiente, porém pode apresentar efeitos adversos como a não linearidade elétrica e para mitigar estes efeitos, recorre-se à implementação de algoritmos de rastreamento do ponto de potência máxima (Maximum Power Point Tracking - MPPT). Nesta tese, depois de abordados os principais conceitos da tecnologia inerente aos sistemas fotovoltaicos, é realizada uma revisão nos últimos anos, relativa aos métodos convencionais e novos métodos de MPPT.

No seguimento, é implementado um sistema de controlo para painéis fotovoltaicos sendo este controlado por um microcontrolador programado com um algoritmo MPPT. Desta forma é apresentado e discutido o trabalho realizado para a construção do sistema, explicado o algoritmo implementado para a extração de máxima potência e feita a avaliação dos resultados recolhidos ao sistema.

Como melhoria é apresentado uma solução de controlo de carga de bateria, inserido no sistema de forma complementar.

Palavras-Chave

Algoritmo MPPT, Energia solar, Painel fotovoltaico, Eficiência energética, Máxima transferência de potência, Controlador de carga, Rastreamento do ponto de máxima potência, Conversor DC-DC.

Índice

RESUMO	III
ÍNDICE	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABELAS	XI
ACRÓNIMOS.....	14
1. INTRODUÇÃO	16
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	17
1.2. OBJETIVOS.....	17
1.3. CALENDARIZAÇÃO	18
1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	18
2. PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	21
2.1. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	21
2.2. FUNCIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	23
2.3. RASTREAMENTO DO PONTO DE POTÊNCIA MÁXIMO (MPPT).....	31
2.4. EFEITO DO SOMBREAMENTO PARCIAL.....	31
2.5. CONVERSOR DC/DC.....	34
2.6. BATERIAS	40
2.7. CONTROLADOR MPPT.....	42
3. ESTADO DA ARTE SOBRE ALGORITMOS MPPT.....	43
3.1. INTRODUÇÃO	43
3.2. ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO MPPT.....	44
3.3. ALGORITMO DE PERTURBAÇÃO E OBSERVAÇÃO (P&O).....	45
3.4. CONDUTÂNCIA INCREMENTAL (INC)	49
3.5. TENSÃO CONSTANTE	51
3.6. PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO).....	52
3.7. FUZZY LOGIC CONTROL (FLC).....	54
3.8. ANT COLONY OPTIMIZATION (ACO).....	55
3.9. ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS (ANN).....	56
3.10. ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM (ANFIS).....	57
3.11. GENETIC ALGORITHM (GA).....	57
3.12. CUCKOO SEARCH (CS)	58
3.13. WHALE OPTIMIZATION ALGORITHM (WOA).....	58
3.14. RESUMO E CONCLUSÕES.....	59
4. DESENVOLVIMENTO PRÁTICO.....	60

4.1.	ARQUITETURA GERAL DO SISTEMA.....	60
4.2.	CARACTERÍSTICAS PAINEL FOTOVOLTAICO ESCOLHIDO	61
4.3.	SENSOR DE CORRENTE	62
4.4.	SENSOR DE TENSÃO	62
4.5.	DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR DC/DC	63
4.6.	SELEÇÃO DO DRIVER DE MOSFET.....	66
4.7.	REGULADOR DE TENSÃO.....	67
4.8.	TRANSFERÊNCIA DE DADOS	67
4.9.	UNIDADE DE CONTROLO.....	68
4.10.	ARQUITETURA DO HARDWARE.....	69
4.11.	ALGORITMO IMPLEMENTADO.....	71
5.	ENSAIOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS	76
5.1.	SETUP EXPERIMENTAL	76
5.2.	DESEMPENHO DO ALGORITMO MPPT P&O	79
6.	MELHORIA DO SISTEMA	87
6.1.	ARQUITETURA DO SISTEMA	87
6.2.	HARDWARE CONTROLO BATERIAS.....	88
6.3.	SOFTWARE CONTROLO BATERIAS	89
6.4.	ENSAIOS E RESULTADOS DAS MELHORIAS APLICADAS	93
7.	CONCLUSÃO	94
	REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....	96
	ANEXO A. FLUXOGRAMA FUNÇÃO CHARGING_CONTROL():	99

Índice de Figuras

Figura 1 - Esquema de um sistema <i>off-grid</i> [3].....	22
Figura 2 - Instalação tipo de um sistema fotovoltaico <i>on-grid</i> [3].....	23
Figura 3 - Constituição característica de uma célula fotovoltaica [3].....	25
Figura 4 - Modelo elétrico de uma célula fotovoltaica [4].....	26
Figura 5 - Curva característica I-V de um painel fotovoltaico[5].....	28
Figura 6 - Curvas característica I-V e P-V de um painel fotovoltaico[5].....	29
Figura 7 - Curva característica P-V em função da irradiância e da temperatura [5], [6].....	30
Figura 8 - Curva característica P-V em função da temperatura e irradiância [5].....	30
Figura 9 - Comparação da curva característica I-V sem e com sombreamento parcial [5].....	32
Figura 10 - Curva de potência em condições de sombreamento parcial [6].....	32
Figura 11 - Diagrama de blocos típico de um sistema de controlo MPPT [5].....	34
Figura 12 - Esquema elétrico do Conversor DC/DC (topologia <i>buck</i>) [7].....	35
Figura 13 – Etapas de operação do Conversor DC/DC <i>buck</i> [7].....	36
Figura 14 - Forma de onda da corrente na bobine [8].....	38
Figura 15 - Forma de onda de corrente da bobine – carga/descarga do condensador [8].....	39
Figura 16 - Processo típico de carregamento de uma bateria [9].....	41
Figura 17 - Fluxograma da técnica Perturba e Observa [12].....	45
Figura 18 - Ilustração de mau funcionamento do método P&O [12].....	46
Figura 19 - Curva da Potência de saída e respetiva derivada [21].....	50
Figura 20 - Fluxograma do método Condutância Incremental [22].....	51
Figura 21 - Fluxograma do método de Tensão Constante [24].....	52
Figura 22 – Esquema de arquitetura geral do sistema de controlo.....	60
Figura 23 – Painel Fotovoltaico SOLARPOWER-5W.....	61
Figura 24 – Sensor de corrente ACS712.....	62
Figura 25 – Sensor de tensão – divisor de tensão.....	63
Figura 26 – a) bobine b) condensador.....	64
Figura 27 - IRFZ44N MOSFET.....	66
Figura 28 - Driver Half Bridge IR2104.....	67
Figura 29 – Regulador de tensão LM7805.....	67
Figura 30 – Ligação uC-HC05 e HC-05 output.....	68
Figura 31 - Diagrama de blocos da arquitetura do hardware.....	69
Figura 32 - Esquema elétrico do <i>hardware</i>	70
Figura 33 - Esquema elétrico do <i>hardware</i> - microcontrolador.....	71
Figura 34 – Fluxograma função <i>Charging_Control</i>	73

Figura 35 – Fluxograma função <i>Get_Solar</i>	74
Figura 36 – Fluxograma função <i>Get_Charging_Current</i>	75
Figura 37- Fluxograma função <i>Get_Solar_power</i>	75
Figura 38 – Setup de testes em laboratório	76
Figura 39 – Sinais PWM de acionamento dos MOSFET do conversor	77
Figura 40 - Tensão de saída do Conversor	78
Figura 41 - Setup de testes em ambiente real	79
Figura 42 – Leitura dos valores de tensão, corrente e potência com (a) e sem (b) algoritmo MTTP	80
Figura 43 - Leitura dos valores de corrente com e sem algoritmo MPPT	81
Figura 44 - Leitura dos valores de tensão com e sem algoritmo MTTP	81
Figura 45 - Comparação dos valores de potência com e sem algoritmo MTTP.....	82
Figura 46 – Comparação dos valores de tensão, corrente e potência em diferentes ambientes	83
Figura 47 – Curva potência em função da tensão.....	84
Figura 48 - Curva potência em função da tensão, 20% sombreamento	85
Figura 49 - Curva potência em função da tensão, 50% sombreamento	85
Figura 50 - Curva potência em função da tensão, 80% sombreamento	86
Figura 51 - Diagrama de blocos da arquitetura do hardware	88
Figura 52 - Esquema elétrico do hardware.....	89
Figura 53 – Fluxograma função <i>Load_Control</i>	90
Figura 54 – Fluxograma função <i>Get_Battery_Current</i>	91
Figura 55 - Fluxograma função <i>Get_Bateery</i>	92

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Calendarização	18
Tabela 2 - Comparação entre os principais algoritmos MPPT	59

Acrónimos

ACO - Ant Colony Optimization

ACO NPU - Ant Colony Optimization with Non-Probabilistic Update

ADC - Analog-to-Digital Converter

AFL - Augmented Feedback Linearization

AFSA - Artificial Fish-Swarm Algorithm

ANFIS - Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

ANN - Artificial Neural Networks

APSO - Accelerated Particle Swarm Optimization

CC - Constant Current

CCM - Continuous Conduction Mode

CCP - Capture/Compare/PWM

CS - Cuckoo Search

DC - Direct Current

DCM - Discontinuous Conduction Mode

FIS - Fuzzy Inference System

FLC - Fuzzy Logic Control

FPSOGSA - Fuzzy Logic-based Particle Swarm Optimization with Gravitational Search Algorithm

GA - Genetic Algorithm

IC - Integrated Circuit

ICD - In-Circuit Debugger

IMPP - Current at Maximum Power Point

INC - Incremental Conductance

MPP - Maximum Power Point

MPPT - Maximum Power Point Tracking

P&O - Perturb and Observe

PCB - Printed Circuit Board

PIC - Programmable Integrated Circuit

PSO - Particle Swarm Optimization

PSOEM-FSA - Particle Swarm Optimization with the Enhanced Migration and Fish-Swarm Algorithm

PWM - Pulse Width Modulation

RBFNN - Radial Basis Function Neural Network

RNAs - Redes Neurais Artificiais (Artificial Neural Networks)

RXD - Receive Data

SMVS - Sliding Mode Variable Structure

SVR - Support Vector Regression

TXD - Transmit Data

UART - Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

VMPP - Voltage at Maximum Power Point

WOA - Whale Optimization Algorithm

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a necessidade de energia elétrica tem crescido e desta forma têm-se vindo a investigar diferentes tecnologias para suprimir esta carência.

Um dos métodos considerados como parte integrante no plano de geração de energia em vários países é a injeção de energia renovável na rede elétrica o que, conseqüentemente, potência o aumento da utilização de recursos naturais reduzindo assim a dependência da energia produzida sobre o esgotamento dos recursos não-naturais.

A energia renovável é a energia que pode ser obtida por meio de recursos naturais, tal como o sol, o vento, a chuva, marés e calor geotérmico. Estes recursos são fornecidos naturalmente e são considerados inesgotáveis ao contrário dos combustíveis fósseis convencionais utilizados para a produção de energia não-renovável.

A crise global de energia promoveu um impulso para o crescimento e desenvolvimento de fontes de energia renovável já que para além de não gastar recursos limitados, ao contrário da energia não-renovável, as fontes de energia renováveis são conhecidas por serem muito mais limpas e permitirem a produção de energia sem efeitos nocivos de poluição ao contrário da produção de energia convencional que implica a queima de combustíveis fósseis.

Esta tese centra-se na energia solar e nos meios eficazes para aumentar a sua eficiência através do desenvolvimento das estratégias de controlo para a extração de máxima potência (MPPT) de painéis fotovoltaicos.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Ao lidar com painéis fotovoltaicos, é importante considerar que a quantidade de energia gerada depende das condições de operação, como a intensidade da luz solar, a temperatura ambiente e as características elétricas do próprio painel e do próprio sistema de controle. Sem um sistema adequado de controle e otimização da extração de energia, a eficiência do painel pode ser comprometida.

A metodologia utilizada envolverá uma combinação de testes laboratoriais e avaliações práticas utilizando um painel fotovoltaico em condições reais. Serão feitos testes em laboratório ao sistema de controle e recolhidos dados de tensão, corrente e de potência em diferentes cenários, como variações de temperatura, sombreamento e diferentes intensidades de luz solar.

1.2. OBJETIVOS

Considerando a importância do MPPT para a eficiência e o desempenho dos painéis fotovoltaicos, esta tese tem como objetivo fazer um levantamento do estado da arte sobre este tema e implementar num protótipo uma dessas estratégias de controle. Este controle é na realidade aplicado a um conversor CC/CC que interliga o painel fotovoltaico a uma carga. Assim, o protótipo inclui o conversor como parte de potência sendo o controle implementado por um microcontrolador. O foco principal é investigar e avaliar diferentes abordagens de algoritmos de controle.

1.3. CALENDARIZAÇÃO

A Tabela 1 apresenta a calendarização relativa à execução do projeto onde esta inclui um conjunto de etapas.

Tabela 1 - Calendarização

ID	Etapas	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho
1	Estudo de sistema fotovoltaicos	■	■	■			
2	Estudo de algoritmos MPPT		■	■	■	■	■
3	Estudo das características de um painel fotovoltaico			■	■		
4	Estudo do conversor			■	■		
5	Escolha e criação do hardware			■	■	■	■
6	Criação do Software				■	■	■
7	Simulação e estudo dos resultados					■	■
8	Elaboração do relatório	■	■	■	■	■	■

No primeiro mês de trabalho é feito o levantamento dos conhecimentos necessários relativos aos sistemas fotovoltaicos. De seguida, avança-se para o estudo do estado de arte dos algoritmos MPPT que têm vindo a ser apresentados nos últimos anos e dos seus conceitos inerentes.

Mais tarde é feito o estudo das características do painel fotovoltaico, do conversor e de todos os elementos de hardware utilizados, seguindo-se da implementação e testes do hardware como um sistema de controlo montado.

Finalmente, são feitos os testes ao sistema, recolha de dados e avaliação dos resultados.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

Esta tese está dividida em 7 capítulos, sendo que como primeiro capítulo temos a introdução, onde é feita a contextualização dos sistemas de controlo para painéis fotovoltaicos e introduzida a importância dos algoritmos MPPT. Aqui ainda são apresentados os objetivos desta tese e a estrutura do relatório.

No capítulo 2, é feita a fundamentação teórica sobre a energia solar e o funcionamento dos painéis fotovoltaicos assim como os sistemas em que são aplicados. São explicados os

conceitos de rastreamento de máxima potência, o efeito do sombreamento parcial e é ainda feito o fundamento teórico dos conversores DC/DC e das estratégias de carregamento de baterias.

No capítulo 3 é feito o levantamento do estado de arte dos algoritmos MPPT mais comuns e dos últimos algoritmos apresentados pela comunidade científica.

No capítulo 4 é apresentado todo o trabalho pratico realizado relativamente à escolha dos elementos de hardware utilizados para a construção do sistema de controlo assim como detalhado o software criado para este sistema.

No capítulo 5 são apresentados os resultados recolhidos pelo sistema e discutido o funcionamento do mesmo em diferentes ambientes.

O capítulo 6 é referente a melhorias implementadas ao sistema inicial. É apresentado o trabalho pratico realizado para a adaptação do sistema de controlo com a utilidade de carregamento da bateria, assim como, explicado o algoritmo para o seu controlo. São ainda apresentados os dados recolhidos para a validação do funcionamento do algoritmo implementado.

Finalmente no capítulo 7 temos a conclusão, onde é feita a síntese dos principais resultados alcançados e a avaliação do cumprimento dos objetivos propostos. São apresentadas ainda sugestões de melhoria para trabalhos futuros.

2. PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

A preocupação com a limitação dos recursos energéticos e das suas consequências a nível do impacto ambiental expõem a necessidade de investigação sobre as energias renováveis. A principal razão para a mudança climática que atravessamos é a queima de combustíveis fósseis que produzem os gases de efeito de estufa. Quase 80% destes gases são provenientes da geração de energia elétrica e sendo a energia elétrica uma necessidade atual e com a previsão de um aumento de 60% do consumo atual para 2030 é esperado um aumento da emissão dos gases de estufa [1].

Um sistema fotovoltaico gera a eletricidade sem a emissão de gases de efeito de estufa e para além disso pode ser integrado na rede ou utilizado de forma isolada num grupo de baterias. A sua baixa manutenção ao longo da sua vida útil é uma das grandes vantagens, mas ainda assim são destacados alguns problemas inerentes a esta tecnologia, entre as quais, a principal – a sua fonte primária de energia (a luz do sol) [2].

2.1. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos posicionam-se como uma das áreas que tem recebido mais destaque dentro da eletrónica de potência, nos últimos anos, quer a nível da engenharia do sistema em si, quer nas investigações realizadas.

Uma das principais razões para esta evolução é o facto de ser ilimitada, dentro da escala de tempo e com os níveis atuais de consumo. Estima-se que a energia solar incidente na superfície terrestre seja 10 mil vezes superior ao consumo energético mundial.

Quando falamos em sistemas fotovoltaicos, podemos considerar duas categorias tendo em conta o seu modo de funcionamento:

- Sistemas isolados – sistemas *Off-Grid*;
- Sistemas conectados à rede – sistemas *On-Grid* ou *Grid-Tie*.

Como o próprio nome indica, nos **Sistemas Off-Grid** a energia que é gerada é exclusivamente utilizada para alimentar uma carga isolada, sem ligação direta à rede elétrica. Desta forma, estes sistemas são normalmente utilizados em aplicações em que o objetivo será a alimentação de uma ou mais cargas fisicamente próximas, sendo que, no período de “não geração fotovoltaica” estas cargas poderão ser alimentadas por um equipamento de armazenamento de energia, como por exemplo um grupo de baterias.

De forma que as características do painel fotovoltaico estejam adaptadas às características das baterias de armazenamento de energia existe a necessidade de incluir neste sistema um controlador de carga, cuja principal função está no controlo da carga e descarga das baterias, em função das necessidades energéticas das cargas do sistema.

Na Figura 1 podemos ver um esquema de uma instalação-tipo de um sistema fotovoltaico *off-grid*.

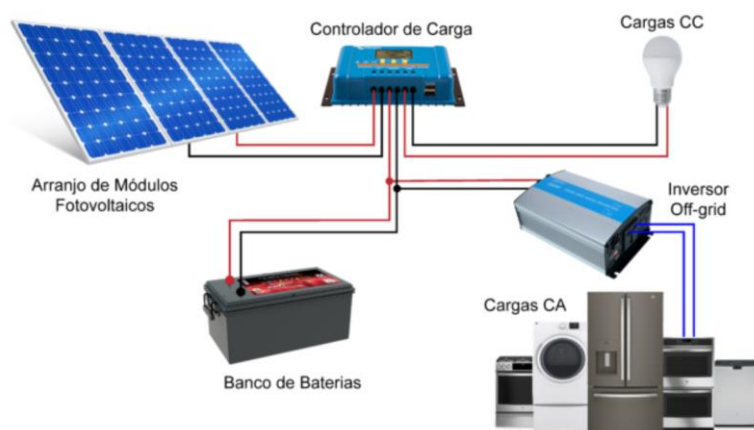


Figura 1 - Esquema de um sistema *off-grid* [3]

Como se pode verificar na Figura 1, a principal vantagem dos sistemas *off-grid* está no facto de não depender na rede elétrica da concessionária, permitindo que o sistema fotovoltaico mantenha a carga no caso de a rede apresentar algum problema. Desta forma, permite a sua instalação em regiões remotas e para além disso o beneficiário não suportará custos do consumo de energia.

Por outro lado, os **Sistemas On-Grid**, não necessitam de equipamentos de armazenamento de energia, pois a energia gerada pode ser consumida diretamente pela carga, ou então ser

injetada diretamente na rede elétrica da concessionária. Como se pode verificar na Figura 2, estes sistemas são normalmente compostos pelos módulos fotovoltaicos que estão ligados a um inversor.

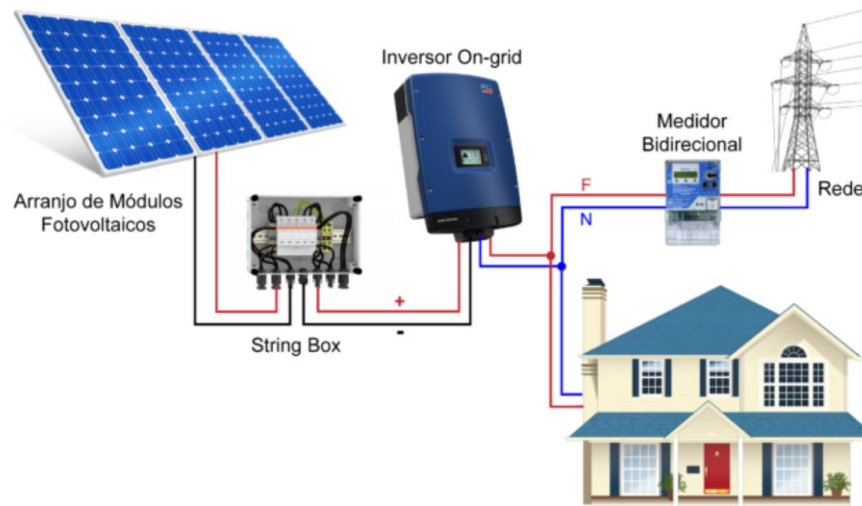


Figura 2 - Instalação tipo de um sistema fotovoltaico *on-grid* [3]

Uma vez que este tipo de sistemas não são caracterizados por terem armazenamento de energia, durante o dia a carga utiliza a energia solar fotovoltaica e durante a noite, quando não existe luz solar, utiliza a energia da concessionária, ou seja, é um sistema baseado na compensação, isto é, o excesso de energia que é produzida, mas não é gasta é injetada na rede elétrica e posteriormente é feito um balanço se o sistema injetou ou consumiu energia da rede.

Dentro das vantagens deste sistema pode-se destacar o custo mais baixo em relação ao sistema *off-grid*, pois não necessita da utilização de baterias e é mais eficiente. Como desvantagem, destaca-se o facto de ser um sistema dependente da rede elétrica.

2.2. FUNCIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Os módulos fotovoltaicos são compostos por células solares constituídas com materiais semicondutores de eletricidade. Na sua maior parte é utilizado o silício pois apesar de na sua forma pura não apresentar eletrões livres são acrescentadas percentagens controladas de outros elementos como por exemplo o fósforo e o boro. Este processo, chamado de dopagem,

permite de forma controlada a obtenção de um material com elétrons livres, ou seja, um material com portadores de carga negativa (Silício tipo Negativo - N). Realizando o mesmo processo, mas acrescentando boro ao invés de fósforo, obtém-se um material com características inversas, ou seja, um material com déficit de elétrons - material com cargas positivas livres (Silício tipo Positivo - P).

Cada célula solar é composta por um estrato fino de material do tipo N e outra camada, com maior espessura, de material do tipo P, conforme visualmente ilustrado na Figura 3. Separadamente, são utilizadas capas eletricamente neutras que ao serem unidas exatamente na união P-N permitem a geração um campo elétrico devido aos elétrons do tipo N que ocupam os elétrons livres presentes na estrutura do tipo P [2]. Este processo de geração de energia elétrica é explicado com mais detalhe no subcapítulo que se segue.

2.2.1. CARACTERÍSTICAS DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Um painel fotovoltaico é um dispositivo elétrico que converte energia solar em elétrica, constituído através das células fotovoltaicas conforme explicado anteriormente. Um material ou aparelho diz-se fotovoltaico quando consiga que fotões com comprimento de onda suficientemente pequeno e energia suficiente elevada façam com que os elétrons se libertem dos átomos desse material produzindo corrente e tensão realizando o efeito fotovoltaico.

Tendo em conta a Figura 3 as células fotovoltaicas tipicamente são constituídas por várias camadas, tais como:

- Grelha e contactos frontais;
- Película antirreflexo;
- Camada do tipo N;
- Camada do tipo P;
- Contacto traseiro (óhmico).

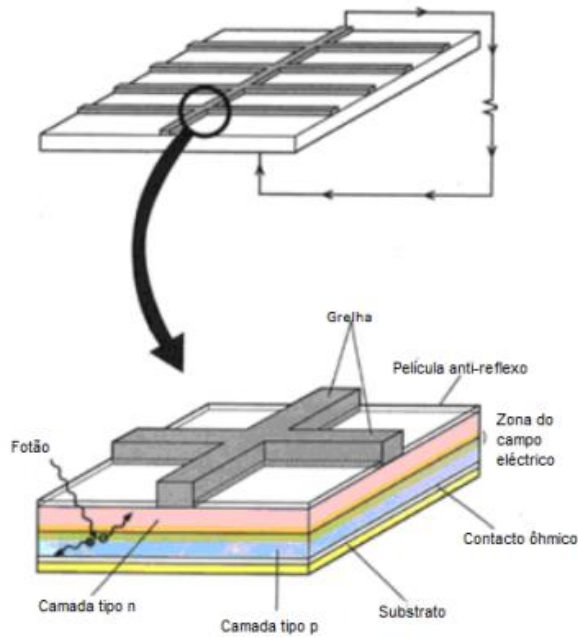


Figura 3 - Constituição característica de uma célula fotovoltaica [3]

No caso do Silício, os átomos na sua camada mais externa, chamada de banda de valência, dispõem de quatro eletrões e ao construir uma rede cristalina estes organizam-se formando quatro ligações covalentes com os átomos vizinhos partilhando assim cada um dos quatro eletrões disponíveis e aumentando o número de eletrões para oito (tendo em conta cada átomo).

Considerando que a banda de valência do Silício dispõe de quatro eletrões por átomo, para criar a camada de tipo P utilizam-se materiais que dispõem de três eletrões na banda de valência e, neste sentido, criam-se três ligações com um par de eletrões e uma ligação só com um eletrão. Esta lacuna é vista como uma carga positiva. Para se criar a camada de tipo N normalmente utilizam-se materiais que dispõem de cinco eletrões na sua banda de valência de forma a se conseguir criar quatro ligações covalentes com os átomos do Silício e um eletrão livre. A zona onde estas duas camadas se encontram tem o nome de junção P-N [2].

Tendo em conta a diferença potencial entre as duas camadas do painel fotovoltaico, é gerado um campo eléctrico na junção P-N, isto é, os eletrões que passarem da banda de valência para a banda de condução serão enviados para o terminal negativo e as lacunas para o terminal positivo. Desta forma, por ligações externas entre os terminais, positivo e negativo, utilizando um circuito com uma carga, circulará corrente eléctrica.

Uma célula fotovoltaica produz uma potência reduzida que depende do tipo de material utilizado na sua criação. Várias células são colocadas em série contruindo assim os módulos. Estes módulos são dispostos em paralelo, série ou de forma mista de forma a aumentar o valor da potência tendo em conta as características de tensão e de corrente pretendidas para o respetivo painel fotovoltaico.

2.2.2. MODELO ELÉTRICO DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA

A célula fotovoltaica é o elemento responsável pela transformação dos fotões diretamente em energia elétrica e o seu modelo é composto por uma fonte de corrente, duas resistências e um diodo uma vez que a característica de Corrente - Tensão (I-V) exponencial deste circuito assemelha-se à de uma célula fotovoltaica.

A corrente à saída da fonte depende principalmente da temperatura da célula e da radiação solar. Para representar a queda de tensão no circuito até aos contactos exteriores que se observam nas células fotovoltaicas utiliza-se a Resistência em Série – R_s , como se pode verificar na Figura 4. Da mesma forma, existem correntes de fuga que são representadas pela Resistência em Paralelo - R_p .

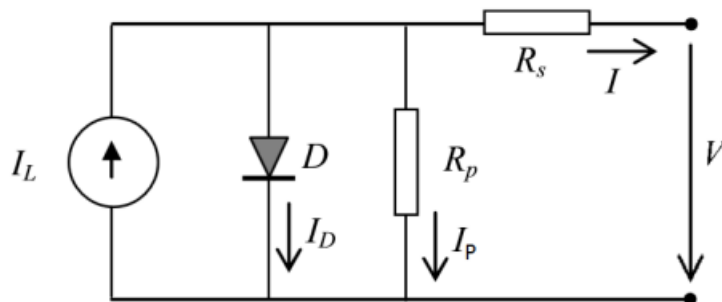


Figura 4 - Modelo elétrico de uma célula fotovoltaica [4]

A equação da Corrente – I de saída da célula fotovoltaica, será igual a:

$$I = I_L - I_D - I_P \quad (1)$$

A corrente que atravessa o díodo, I_D , tem uma característica não linear e depende da Corrente Inversa de Saturação $-I_S$, da temperatura do painel e das correntes fornecidas à carga como se pode ver pela Equação 2.

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{q(V+IR_S)}{nkT}} - 1 \right) \quad (2)$$

Onde:

- I_S – Corrente inversa de saturação do díodo;
- q - Carga do eletrão ($= 1,6 \times 10^{-19}$ C);
- k - Constante de *Boltzmann* ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K);
- T - Temperatura absoluta da célula;
- n - Constante de idealidade do díodo.

A constante n depende do material e da estrutura física da célula fotovoltaica.

Utilizando a fórmula anterior e substituindo a equação referente a I_D obtém-se:

$$I = I_L - I_S \left(e^{\frac{q(V+IR_S)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V+IR_S}{R_p} \quad (3)$$

Tendo em conta que um painel fotovoltaico é constituído por várias células em série e em paralelo a equação equivalente é a seguinte:

$$I = N_P I_L - N_P I_S \left(e^{\frac{q(V+IR_S \frac{N_S}{N_P})}{N_S nkT}} - 1 \right) - \frac{V+IR_S \frac{N_S}{N_P}}{\frac{N_P}{N_S} R_p} \quad (4)$$

Onde N_S é o número de células fotovoltaicas em série e N_P o número de células fotovoltaicas em paralelo.

2.2.3. CURVAS I-V DE UM PAINEL FOTOVOLTAICO

A capacidade de conversão de energia de um painel solar é descrita pela curva Corrente-Tensão para uma dada condição de radiação solar e de temperatura, sendo que, ao manterem-

se constantes as condições de temperatura e radiação esta curva representa a combinação de valores de corrente e de tensão para o qual o painel poderá operar.

Para se compreender as características da curva I-V, são definidas numa primeira fase por convenção de sinais, que a corrente gerada pela célula fotovoltaica a partir da energia solar é sempre positiva e surge uma tensão positiva aplicada aos terminais da célula.

Tendo uma resistência variável R aos terminais da célula fotovoltaica, o seu ponto de operação é definido pela intersecção da característica Corrente e Tensão do painel e da respetiva carga.

Na Figura 5 pode se observar que considerando uma carga resistiva, a característica é dada por uma linha reta com declive $\frac{I}{V} = \frac{1}{R}$. Neste caso, a potência fornecida à carga depende inteiramente da carga resistiva. Tendo em conta que o ponto de funcionamento varia inversamente com o valor da resistência, para uma carga resistiva pequena o ponto de funcionamento da célula estará entre o ponto M e o ponto N. Neste caso o painel fotovoltaico comportar-se-á como uma fonte de corrente constante e quase igual a um curto-circuito[5].

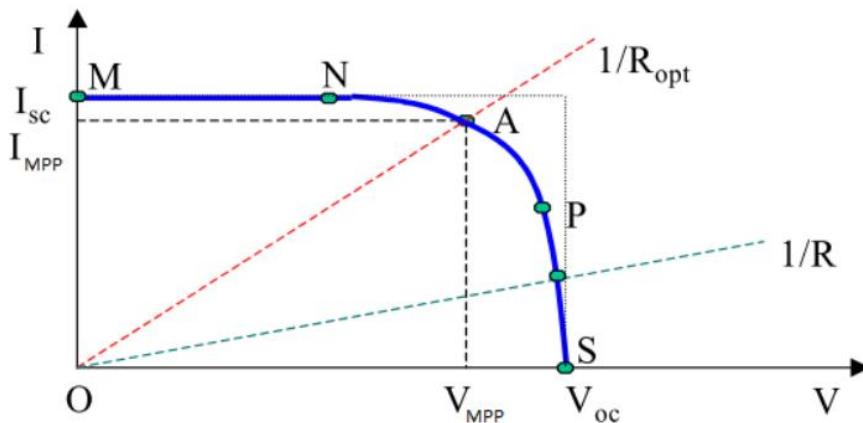


Figura 5 - Curva característica I-V de um painel fotovoltaico[5]

Por outro lado, se a carga resistiva for grande o ponto de funcionamento estará entre o ponto P e o ponto S. Neste caso o painel fotovoltaico comportar-se-á como uma fonte de tensão constante quase igual à tensão em circuito aberto.

Existem três pontos de operação muito importantes representados na Figura 6 que são fornecidos como parâmetros de um painel fotovoltaico, nomeadamente o ponto M

caracterizado pela corrente de curto-circuito (I_{SC}), o ponto S caracterizado pela tensão em vazio ou circuito em aberto (V_{OC}), e o ponto A denominado de Ponto de Máxima Potência - MPP. A corrente de curto-circuito - I_{SC} , representa a corrente máxima que o painel consegue gerar quando a tensão aos seus terminais é zero e depende do nível da radiação solar. A tensão em vazio - V_{OC} , representa o valor de tensão obtido aos terminais de um painel fotovoltaico quando este se encontra em vazio, ou seja, quando a corrente aos terminais do painel é nula[5].

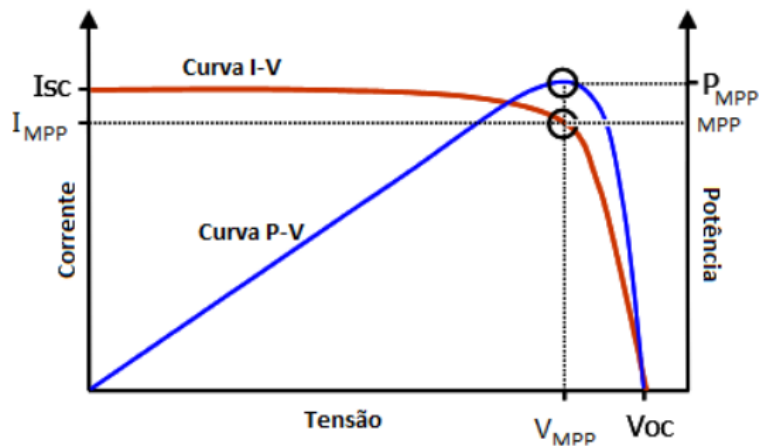


Figura 6 - Curvas característica I-V e P-V de um painel fotovoltaico[5]

O ponto de máxima potência corresponde ao ponto em que a potência P_{MPP} , fornecida à carga é máxima sendo este o ponto ideal para a operação do painel.

2.2.4. EFEITOS AMBIENTAIS

A tensão em vazio de um painel fotovoltaico varia com a temperatura uma vez que com o seu aumento há uma diminuição do valor da tensão e conseqüentemente a potência do painel diminui provocando a diminuição de eficiência como se pode verificar na Figura 7. A corrente de curto-circuito aumenta proporcionalmente com a temperatura da célula, mas numa proporção significativamente mais reduzida [5].

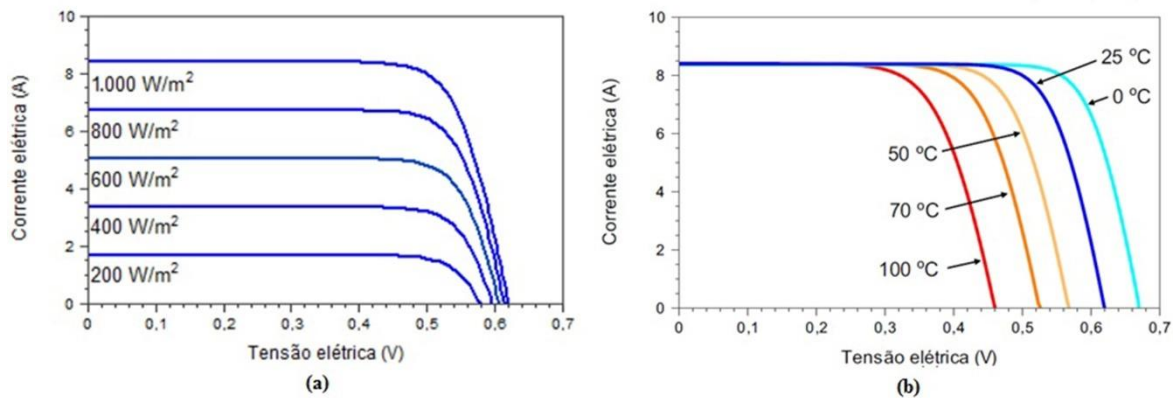


Figura 7 - Curva característica P-V em função da irradiância e da temperatura [5], [6]

Com o aumento da temperatura há uma diminuição do valor da tensão de vazio de um painel solar fotovoltaico e conseqüentemente uma diminuição da potência obtida, como se pode observar na ilustração que se segue. Já em relação à corrente de curto-circuito observa-se um ligeiro aumento com o aumento da temperatura como se pode verificar na Figura 8. A tensão em vazio aumenta logaritmicamente com a radiância solar enquanto a corrente de curto-circuito é proporcional à radiância [5], [6].

Relativamente ao ponto de funcionamento de potência máxima, como as condições ambientais influenciam os valores de corrente e de tensão, verifica-se que com altos valores de radiância este ponto move-se para cima aumentando o seu valor.

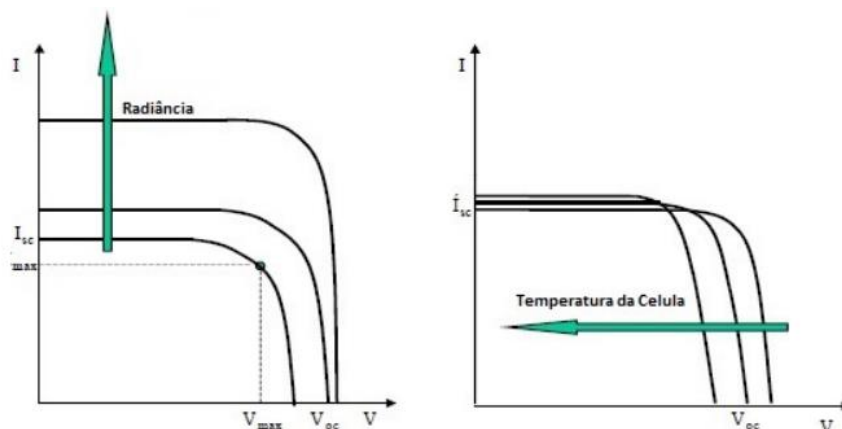


Figura 8 - Curva característica P-V em função da temperatura e irradiância [5]

2.3. RASTREAMENTO DO PONTO DE POTÊNCIA MÁXIMO (MPPT)

O MPPT é usado para melhorar a baixa eficiência natural das células solares e procura que o painel mantenha a potência de saída o mais alta possível em todos os momentos, especialmente durante variações das condições ambientais.

Existem muitas técnicas diferentes de MPPT que são usadas sob diferentes circunstâncias e para se obterem resultados diferentes também. No Capítulo 3, depois de contextualizada a tecnologia teórica contextualizada nesta Tese são descritos de forma objetiva 3 técnicas: (i) algoritmo de perturbação e observação, (ii) condutância incremental e (iii) tensão constante e ao longo do capítulo serão abordadas as mais recentes pesquisas apresentadas. Todas as técnicas de MPPT têm como objetivo encontrar a melhor combinação de tensão e corrente do painel para obter o nível ideal (máximo) de potência.

2.4. EFEITO DO SOMBREAMENTO PARCIAL

Um problema que afeta um algoritmo MPPT é o sombreamento parcial explicado no subcapítulo 2.4.4. Não é possível ter um fluxo fixo de luz solar a atingir a superfície do painel, devido a várias razões como a mudança das condições meteorológicas, nuvens, sombreamento não intencional e o ângulo de incidência dos raios solares com o painel. Portanto, é fundamental ter um algoritmo MPPT para garantir a extração da potência máxima do painel solar a qualquer momento, dependendo das condições climáticas específicas.

O sombreamento parcial não afeta apenas a curva MPPT de potência, mas também afeta a corrente e tensão como explicado anteriormente. Para esclarecer os efeitos do sombreamento parcial, na Figura 9 são ilustrados ambos os casos, isto é, de nenhum sombreamento e de sombreamento parcial. No caso de não sombreamento, a curva de potência tem um MPP que é mostrado por um pico e há apenas um ponto na curva de corrente, que corresponde ao mesmo nível de tensão que a do MPP.

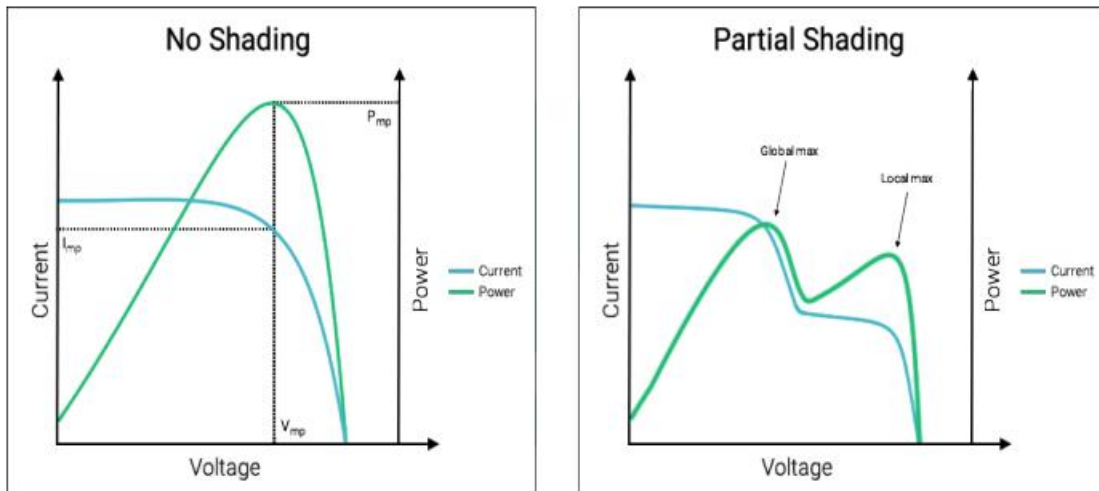


Figura 9 - Comparação da curva característica I-V sem e com sombreamento parcial [5]

Esta curva de potência é uma versão simplificada do que realmente acontece num caso real de não sombreamento, pois com uma radiação solar constante por todo o painel o resultado é termos apenas um único MPP nesse período.

No entanto, devido ao sombreamento parcial, a curva de potência sofre algumas mudanças, ou seja, vários picos podem ser observados na potência que são chamados de MPP local e MPP global. Assim, a curva poderá ter um ou mais MPPs locais, mas apenas um MPP máximo global, conforme ilustrado abaixo na Figura 10 - Curva de potência em condições de sombreamento parcial.

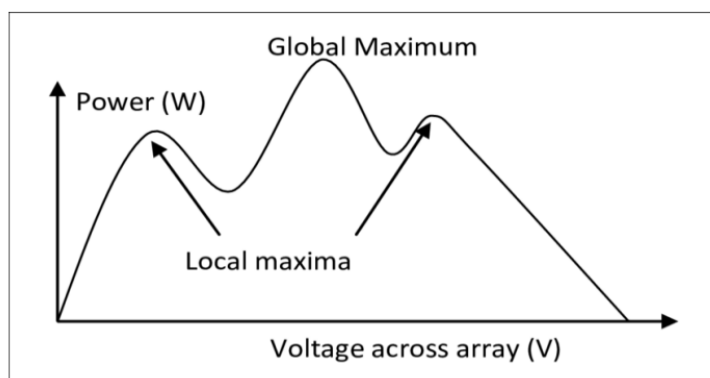


Figura 10 - Curva de potência em condições de sombreamento parcial [6]

Os painéis solares, em comparação a outras tecnologias de geração de energia, apresentam eficiências mais baixas, verificando-se que converte apenas cerca de 16% em eletricidade (podendo variar entre 12% a 22%) [6]. Assim, existe a necessidade de se aumentar o número de painéis numa instalação para compensar essa eficiência e, para além disso, necessita de outros dispositivos eletrónicos, como inversores e baterias de armazenamento de energia.

2.4.1. CONTROLO NO SISTEMA FOTOVOLTAICO

No controlo de um sistema fotovoltaico, o objetivo principal é monitorar e regular diversas variáveis para assegurar um funcionamento ideal. Esse controlo desempenha um papel crucial na deteção de falhas e mau funcionamento, sem impactar negativamente no restante do sistema. Um exemplo importante é o controlo da temperatura dos painéis solares, uma vez que altas temperaturas podem reduzir sua eficiência. Os sistemas de controlo podem ser projetados para monitorizar e regular a temperatura, evitando o sobreaquecimento.

O princípio básico do rastreamento de máxima potência (MPPT) é alcançar a correspondência de impedância entre a carga (como uma bateria ou carga elétrica) e o módulo fotovoltaico. Essa correspondência é essencial para garantir a transferência máxima de potência do módulo para a carga. Geralmente, é utilizado um conversor DC para DC, que é uma versão modificada de um regulador de tensão linear, para atingir essa correspondência[5].

O diagrama de blocos de um MPPT apresentado na Figura 11 ilustra os diferentes componentes envolvidos no processo de rastreamento de máxima potência.

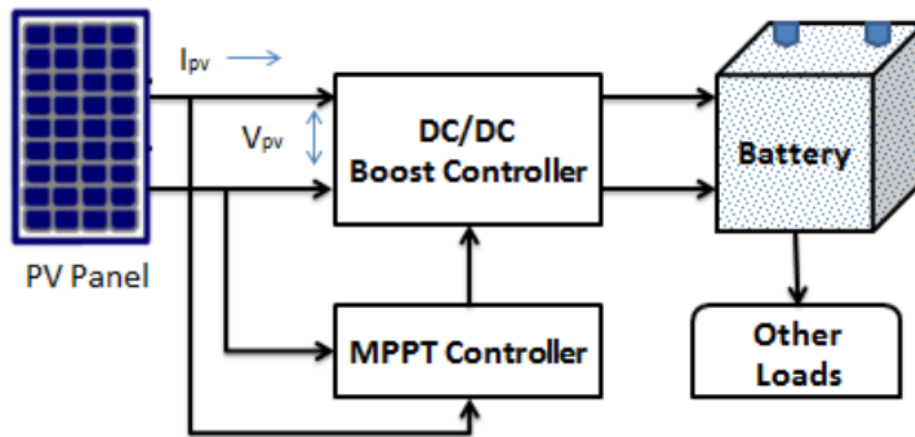


Figura 11 - Diagrama de blocos típico de um sistema de controlo MPPT [5]

O conversor DC para DC é responsável por combinar as impedâncias do módulo e da carga, e isto é feito alterando o ciclo de trabalho do interruptor do conversor. Dependendo da situação, pode ser necessário fornecer uma tensão mais alta para obter uma corrente mais alta e, assim, atingir a máxima transferência de energia.

Os conversores do tipo *buck* e *buck-boost* são os mais utilizados nestes sistemas, e baseiam-se na utilização de sensores de tensão e corrente para medir as características do sistema. Estas informações são então usadas num *loop* de realimentação, onde um controlador ajusta os tempos de comutação do conversor para obter a máxima potência.

2.5. CONVERSOR DC/DC

Um conversor DC/DC é um conversor que visa ter uma tensão de saída superior ou inferior à tensão de entrada e dentro das diversas tipologias as mais conhecidas são chamadas de *Buck Converter*, *Boost Converter* e *Buck-Boost Converter*.

Vários semicondutores são organizados de forma a criar um circuito que a partir de uma comutação periódica, com uma dada razão cíclica, permite o controlo dinâmico de transferência de energia da entrada para a saída com o objetivo de produzir o valor DC desejado na conversão.

Normalmente é utilizado um filtro passa-baixo para a redução da ondulação de tensão de saída e tendo em conta a aplicação que consiste em ter um painel fotovoltaico à entrada, deverá também de se ter em atenção ao filtro do valor de entrada. A razão cíclica, δ , é definida como a relação entre a duração “ON” e o período de comutação. Variando δ realiza-se o efeito de modulação por largura de pulso, PWM (Pulse Width Modulation). Os conversores DC/DC possuem dois modos de operação distintos, o modo de Condução Contínua – CCM e Modo de Condução Descontínua - DCM. O conversor pode operar em qualquer um desses modos e cada modo tem características que os diferenciam [7].

O conversor DC/DC serve então para transferir a energia do módulo fotovoltaico para a carga e atua como uma interface entre a carga e o módulo. Neste projeto utilizamos um conversor DC/DC a operar em Modo Condução Contínua - CCM.

O conversor *buck* ideal tem quatro componentes básicos, como se pode verificar na Figura 12, ou seja, um transístor, um díodo, uma bobine e um condensador, complementados com um controlador de PWM.

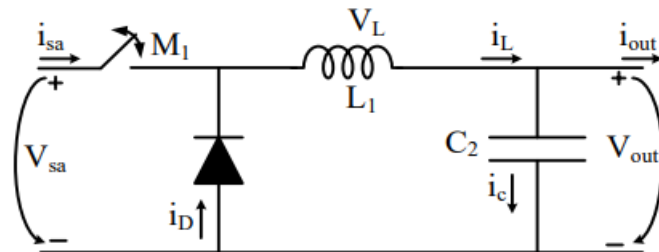
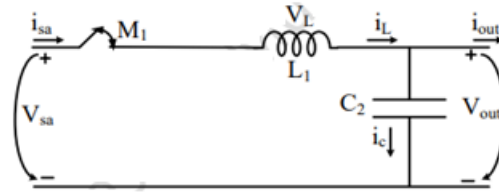
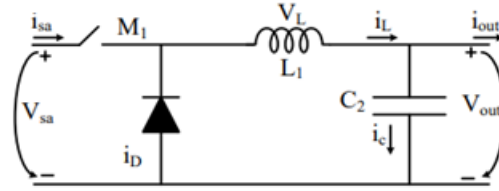


Figura 12 - Esquema elétrico do Conversor DC/DC (topologia *buck*) [7]

Assim, o conversor DC/DC permite o controlo de forma conveniente entre o painel fotovoltaico e a carga com base no sinal de PWM que o controla. Tendo em conta o modelo ideal ilustrado na Figura 12 e considerando que o valor de tensão de entrada, V_{sa} , é livre de ondulação, o circuito possui duas etapas de operação: uma com o *switch* M_1 fechado e outra com o *switch* M_1 aberto.



a) Switch M1 closed



b) Switch M1 open

Figura 13 – Etapas de operação do Conversor DC/DC *buck* [7]

Na Figura 13(a), quando o *switch* M1 está fechado, a potência da fonte de tensão V_{sa} é entregue à carga através da bobine L_1 . O díodo está polarizado inversamente, abre e desta forma, a corrente i_L aumenta seguindo a expressão (5).

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_L}{L_1} = \frac{V_{sa} - V_{out}}{L_1}, \quad 0 \leq t \leq \delta T \quad (5)$$

Neste caso, a bobine L_1 está em carregamento.

Na Fig. 2.9 (b), quando o *switch* está aberto, a corrente i_L continua a circular pelo díodo e diminui à taxa da equação 6, descarregando.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_L}{L_1} = \frac{-V_{out}}{L_1}, \quad \delta T \leq t \leq T \quad (6)$$

Se os parâmetros do circuito estiverem dimensionados de forma que a corrente i_L não chegue a zero, o díodo permanece em condução até que o *switch* se feche.

Estando a bobine no seu estado estacionário, a tensão média V_L em L_1 é zero. Como V_L tem dois estados, ambos com tensão constante, o valor médio é dado como:

$$\begin{aligned}
V_{L_{\text{médio}}} &= \frac{1}{T} \int_0^T V_L(t) dt = \\
&= \frac{1}{T} (V_{sa} - V_{out})\delta T - \frac{1}{T} V_{out} (T - \delta T) = 0
\end{aligned} \tag{7}$$

$$V_{out} = \delta V_{sa} \tag{7.1}$$

Esta relação descreve o funcionamento do conversor *buck*.

A razão cíclica, varia entre 0 e 1, portanto, a tensão de saída será sempre menor que a tensão de entrada.

No protótipo, decidiu-se substituir o díodo por um MOSFET. Esta troca foi feita para reduzir as perdas de condução que ocorrem durante o funcionamento do conversor. Assim o conversor é do tipo síncrono, sendo mais eficiente e melhorando o desempenho e a eficiência do protótipo.

2.5.1. DIMENSIONAMENTO DO FILTRO DE SAÍDA

O valor médio de i_L é encontrado aplicando a Lei dos Nós e considerando que o valor médio da corrente através de um estado operacional no condensador é zero, segundo [7] temos a expressão:

$$i_{L_{avg}} = i_{out} \tag{8}$$

Explicado no gráfico ilustrado na Figura 14.

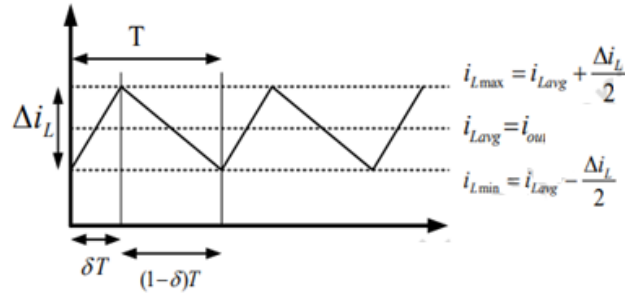


Figura 14 - Forma de onda da corrente na bobine [8]

2.5.2. DIMENSIONAMENTO DA BOBINE

Seguindo a raciocínio anterior, como a corrente na bobine consiste em segmentos de linha reta, é possível chegar à seguinte expressão:

$$i_{Lavg} = \frac{i_{Lmax} + i_{Lmin}}{2} \quad (9)$$

$$i_{Lmax} = i_{Lavg} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (10)$$

$$i_{Lmin} = i_{Lavg} - \frac{\Delta i_L}{2} \quad (11)$$

A partir da equação (6), temos:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{sa} - V_{out}}{L_1} = \frac{\Delta i_L}{\delta T} \quad (12)$$

Por isso:

$$\Delta i_L = \frac{V_{sa} - V_{out}}{L_1} \delta T = \frac{V_{sa} - \delta V_{sa}}{L_1} \delta T = \frac{V_{sa} \delta (1 - \delta)}{L_1 F_{pwm}} \quad (13)$$

Onde, F_{pwm} é a frequência de comutação. No limite de Modo Corrente Contínua (CCM), temos: $\Delta i_L = 2i_{avg} = 2i_{out}$,

$$\frac{V_{out}}{L_{max}} (1 + \delta) T = 2i_{out} \quad (14)$$

$$L_{max} = \frac{V_{out} (1 - \delta)}{2i_{out} \times F_{pwm}} \quad (14.1)$$

Desta forma, garante-se uma condução contínua para qualquer valor de ciclo de trabalho. V_{out} e i_{out} são a tensão e a corrente de saída do conversor na potência máxima de entrada e F_{pwm} é a frequência de comutação.

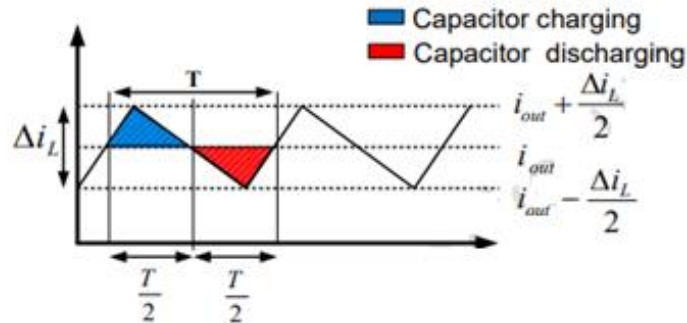


Figura 15 - Forma de onda de corrente da bobine – carga/descarga do condensador [8]

2.5.3. DIMENSIONAMENTO DO CONDENSADOR

A corrente no condensador, i_c é dada pela diferença entre a corrente na bobine e a corrente de carga i_{out} como:

$$i_c = i_L - i_{out} \quad (15)$$

Observando a Figura 15, pode-se ver que cada processo de carga e descarga é dada por uma área igual, onde cada área representa um incremento de carga, ΔQ , do condensador. ΔV é a tensão de ondulação de saída e a relação pode ser expressa como:

$$V = \frac{\Delta Q}{C} \quad (16)$$

Da Figura acima temos,

$$\Delta V = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} \frac{1}{2} \frac{T}{2} \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{T \Delta i_L}{8C} \quad (17)$$

No pior caso, $\Delta i_L = 2i_{out}$ e, portanto,

$$C_2 = \frac{i_{out}}{4\Delta V F_{pwm}} \quad (18)$$

Onde,

i_{out} = corrente de saída do conversor no ponto de potência de input máxima

ΔV = *ripple* de tensão

F_{pwm} = frequência de comutação.

2.6. BATERIAS

As baterias normalmente são apresentadas em duas categorias, as primárias ou descartáveis e as secundárias ou recarregáveis, e os materiais mais predominantes usados na sua composição são o lítio, o chumbo e o níquel. As baterias primárias têm densidades de energia mais altas que as secundárias e são utilizadas em aplicações em que a recarga é inviável. O lítio-metal e o alcalino são os principais materiais utilizados neste tipo de baterias que normalmente encontramos em relógios, brinquedos, etc. No entanto, a energia fotovoltaica requer uma bateria secundária, constituída normalmente pelas matérias: chumbo-ácido, níquel-cádmio, níquel-metal-hidreto e íon-lítio. Embora existam inúmeras baterias recarregáveis, as baterias mais usadas em sistemas fotovoltaicos são as baterias de chumbo-ácido.

Não entrando muito no detalhe da teoria da constituição de uma bateria e no seu processo de armazenamento de energia, focamo-nos nos algoritmos de controlo de carga que devem de ser considerados para aplicações de carregamento de baterias. Sendo que cada aplicação implica o seu algoritmo de carregamento da bateria, existem três momentos neste processo que precisam de ser considerados. Estes três momentos são apresentados na Figura 16.

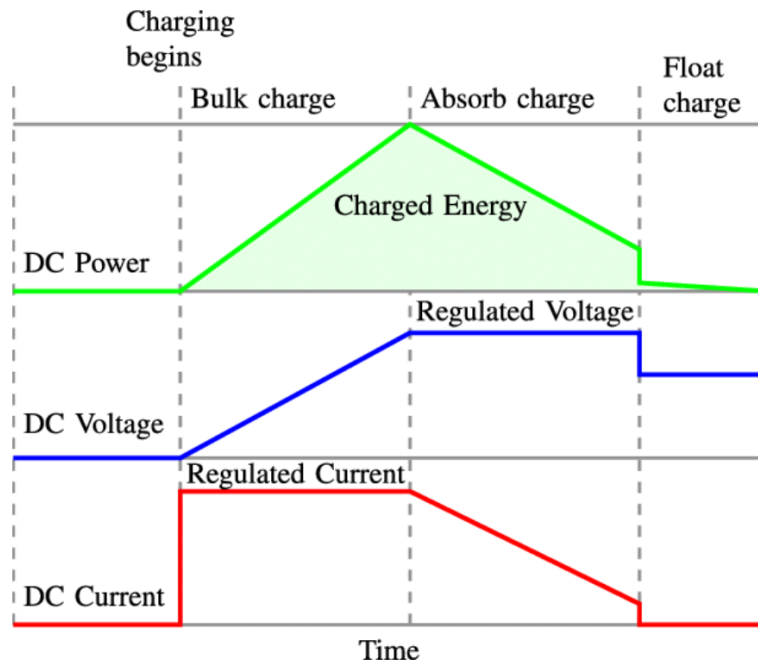


Figura 16 - Processo típico de carregamento de uma bateria [9]

No carregamento em massa (*Bulk Stage*), o momento inicial de carregamento, fornece-se a corrente constante máxima permitida à bateria. Quando o carregamento em massa estiver completo e a bateria estiver cerca de 80% a 90% carregada (quando a tensão da bateria atinge um limite pré-determinado), o carregamento por absorção deve de ser aplicado. Durante o carregamento por absorção, a regulação da tensão constante é aplicada, sendo que a tensão de carga deve de ser maior que a tensão nominal da bateria. A tensão de carga normalmente varia entre cerca de 11V a 15V para uma bateria de 12V. Nesta etapa, a corrente diminui livremente à medida que a bateria se aproxima de um estado de carga total, evitando o aquecimento da mesma [9]. No final do carregamento por absorção, a bateria normalmente está com 98% de carga ou mais.

Na terceira fase, no carregamento flutuante, a tensão da carga é ajustada para um valor constante, mas com um valor mais baixo do que o estágio de absorção.

2.7. CONTROLADOR MPPT

Um Maximum Power Point Tracker (MPPT) é incluído no controlo de um conversor DC/DC que otimiza a transferência de potência entre um módulo fotovoltaico e a carga conectada. O objetivo do MPPT é maximizar a potência de saída do módulo, independentemente das condições ambientais, como temperatura e níveis de irradiação. Na curva I-V de um módulo fotovoltaico típico, é possível identificar um único ponto de potência máxima, correspondente a uma determinada tensão e corrente. Para obter o máximo desempenho do painel solar, é desejável operá-lo no ponto de potência de pico, onde a máxima potência é fornecida à carga.

Existem várias técnicas de MPPT, sendo as mais comuns estudadas no próximo capítulo, incluindo a perturbação e observação, o método de corrente constante, a tensão constante e o método de condutância incremental.

3. ESTADO DA ARTE SOBRE ALGORITMOS MPPT

No capítulo 3, é apresentado o estado da arte sobre algoritmos MPPT. Estes algoritmos são projetados para maximizar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos, buscando extrair a máxima potência dos módulos solares em diferentes condições de irradiação solar.

3.1. INTRODUÇÃO

A intermitência da radiação solar sobre a superfície da terra depende dos movimentos de rotação e da translação da Terra em volta do sol. Estes movimentos provocam de forma natural e previsível, a ocorrência de sombreamentos nos painéis fotovoltaicos que se traduz na redução da eficiência do sistema de geração de energia. Aponta-se uma perda de rendimento causado pelo sombreamento que pode variar dos 10% aos 70% dependendo do padrão do sombreamento [10].

Desta forma, os Métodos de Rastreamento do Ponto de Máximo de Potência (MPPT) têm vindo a ser desenvolvidos e melhorados para mitigar os efeitos não lineares no sistema compensando a variação da potência gerada pelos sistemas fotovoltaicos. Estes métodos resultam no aumento da potência gerada pelo sistema fotovoltaico em diferentes graus de complexidade, desempenho e custo e de uma forma geral podem ser consideradas 3 abordagens diferentes para a mitigação dos efeitos não lineares dos sistemas fotovoltaicos: o ajuste do inversor/conversor (que com o recurso a circuitos de eletrónica de potência desenvolvidos para a recuperação da energia dos módulos sombreados), a utilização de um micro inversor por modulo fotovoltaico com o seu próprio MPPT e a implementação de algoritmos MPPT mais inteligentes e autónomos no inversor, sendo esta última abordagem a mais atrativa do ponto de vista tecnológico e económico.

Neste capítulo são abordadas as principais estratégias para a extração de máxima potência, desde os métodos mais convencionais, as suas combinações e as mais recentes soluções

apresentadas de forma a fazer o levantamento da solução a ser implementada tendo em conta o seu grau de eficiência, dificuldade de desenvolvimento e custo.

3.2. ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO MPPT

Desde há vários anos podemos verificar a existência de vários estudos e propostas de algoritmos de MPPT que se focam na investigação da baixa eficiência natural das células solares com o objetivo de manter a potência de saída dos sistemas fotovoltaicos o mais alta possível em todos os períodos e em especial nos momentos de sombreamento.

Estas pesquisas, em especial nos últimos 5 anos, tendem a deixar a metodologia de melhoria de um algoritmo MPPT de forma isolada e focam-se na abordagem híbrida, isto é, partem de um algoritmo convencional (um algoritmo existente e não otimizado) que é melhorado e integrado com outros algoritmos para que sob diferentes circunstâncias produzam resultados finais melhores. Por exemplo o algoritmo *Perturb and Observe - P&O*, que é o mais utilizado e abordado em diferentes bibliografias pela sua simplicidade e facilidade de implementação é apresentado em vários artigos mas quase sempre associado à implementação híbrida que mostram resultados com melhores desempenhos.

De forma a facilitar a compreensão dos algoritmos existentes, estes são normalmente apresentados com a classificação de: algoritmos baseados em modelos matemáticos, algoritmos heurísticos e algoritmos meta-heurísticos.

Os algoritmos MPPT baseados em modelos dependem de um modelo matemático para obter o ponto de potência máxima (MPP) por cálculo. Os algoritmos heurísticos têm como base a medição da corrente e tensão do painel fotovoltaico para tomar a decisão de aumentar ou diminuir a variável de controlo. Os algoritmos meta-heurísticos são algoritmos mais complexos do ponto de vista de desenvolvimento e são inspirados tipicamente no comportamento biológico de seres vivos.

Os principais algoritmos MPPT e as melhorias que têm vindo a ser investigadas serão apresentadas e analisadas separadamente e destaca-se que o objetivo é apresentar as várias soluções apresentadas nos últimos anos de forma a ser possível perceber o seu grau de complexidade, eficiência e custo para que mais tarde, depois de selecionado o algoritmo a ser implementado, este ser analisado mais a fundo.

3.3. ALGORITMO DE PERTURBAÇÃO E OBSERVAÇÃO (P&O)

A abordagem P&O é uma técnica MPPT muito utilizada e na sua forma convencional baseia-se na medição da tensão e da corrente do painel fotovoltaico e na perturbação da tensão de operação. Comparando a potência calculada no presente momento com a potência calculada no momento anterior, decide a direção da nova perturbação, ou seja, aumentar ou diminuir o valor da tensão do painel. Isso é conseguido variando o valor da razão cíclica, δ . O algoritmo calcula a potência, $P_{k-1} = I_{k-1} \times V_{k-1}$ tendo os valores da corrente I_{k-1} e tensão V_{k-1} de saída do painel [11], como se pode ver no fluxograma apresentado na Figura 17.

De forma a validar se o ponto de funcionamento atual está à esquerda ou à direita do ponto de máxima potência é necessário realizar a verificação da tensão relativamente ao valor da tensão no momento anterior e com isso decidir se é preciso aumentar ou diminuir a razão cíclica.

Sempre que se aumentar ou diminuir o valor da razão cíclica, δ , calcula-se o valor da nova potência, P_k e compara-se com a potência anterior. A tensão do painel fotovoltaico deverá então de ser perturbada. Se a perturbação na tensão fizer com que a potência aumente, a próxima perturbação deve ser mantida na mesma direção, caso contrário, a próxima perturbação deve de ser revertida.

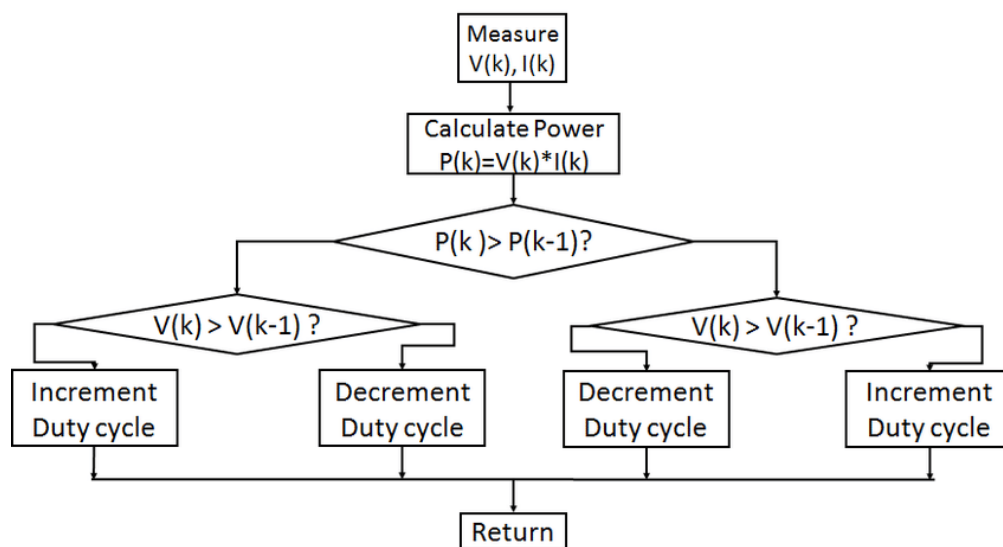


Figura 17 - Fluxograma da técnica Perturba e Observa [12]

O método P&O é de fácil implementação e o mais utilizado, mas sob a rápida mudança atmosférica, pode exibir comportamentos imprevisíveis, isto é, quando encontrado o ponto de trabalho, oscila muito em torno deste ponto, uma vez que o algoritmo muda constantemente o valor da razão cíclica e desta forma não se consegue obter o máximo possível de energia do painel de forma estável.

Para além disso, quando as condições ambientais mudam rapidamente o algoritmo pode procurar o ponto de máxima potência no sentido contrário ao suposto, como explicado na Figura 18. Neste caso o MPPT tem como ponto de trabalho B, A e C, oscilando entre os mesmos. Estando o algoritmo a oscilar do ponto A para o ponto B, e havendo um aumento brusco da radiação, o ponto de trabalho passa de A para D e neste caso em vez de oscilar para o ponto B passa para o ponto F. Consequentemente há um aumento de potência que faz com que o algoritmo faça perturbações no sentido contrário ao suposto. Aumentando outra vez a radiação o novo ponto de trabalho será o ponto G passando para o ponto I em vez do H onde se encontra o ponto máximo.

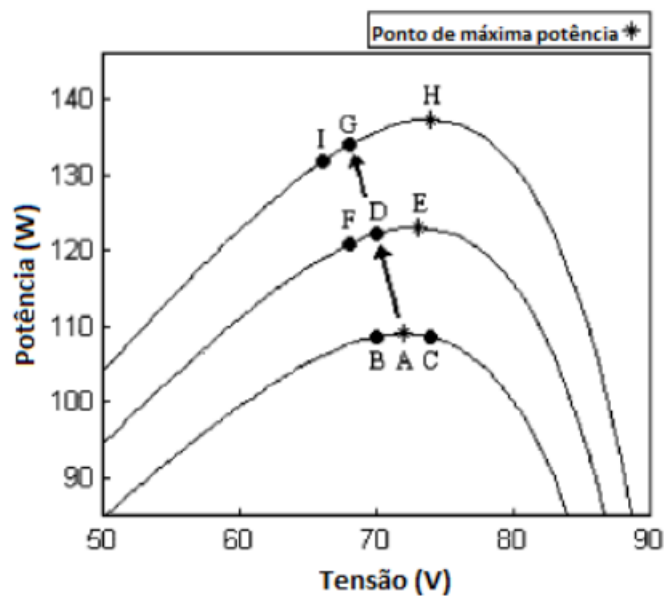


Figura 18 - Ilustração de mau funcionamento do método P&O [12]

Vários métodos modificados de P&O são introduzidos para reduzir estes efeitos, por exemplo[13] propõem um critério para escolher uma perturbação adaptada, com o objetivo

de garantir a amplitude de perturbação mais adequada para o MPPT. Apresenta assim uma melhor resposta na procura do MPP, em condições ambientais variáveis.

3.3.1. COMBINAÇÕES DO ALGORITMO P&O

Outros autores propõem a otimização do algoritmo P&O com a combinação de outros algoritmos. Nos subcapítulos que se seguem são abordados estes algoritmos hibridizados.

3.3.1.1. P&O E FUZZY LOGIC CONTROL (FLC)

As técnicas de Controlo por Lógica Fuzzy (*Fuzzy Logic Control - FLC*), explicado com mais detalhe no decorrer deste capítulo, geralmente decompõem um sistema complexo em vários subsistemas de acordo com o conhecimento sobre este mesmo sistema. Enquanto isso, um conjunto de leis de controlo (simples e concretas) são utilizadas para emular a estratégia de controlo humano em cada região operacional do sistema.

A combinação dos dois algoritmos visa eliminar oscilações em torno do MPP operacional, variando o tamanho do passo de perturbação com recurso ao FLC. Este método através da variação do passo de perturbação permite obter melhores resultados. Quando o ponto de operação está longe do MPP, é usado um passo maior para aumentar a velocidade de convergência. Quando o ponto de operação está próximo do MPP, um tamanho menor é usado para evitar oscilações. Este método apresenta melhores resultados sob condições atmosféricas com grandes oscilações. O FLC tem algumas vantagens, entre as quais: funciona com entradas imprecisas ou sem um modelo matemático exato, o que significa que o sistema não linear pode ser facilmente manipulado[11], [14].

Por simulações, Narwat L e Dhillon J, [15] compararam os resultados com o método P&O clássico sob as mesmas condições de temperatura e irradiância, concluindo que a otimização utilizando o FLC é eficaz e mais precisa do que o método convencional quando há uma variação de irradiância.

3.3.1.2. P&O E PARTICLE SWARM OTIMIZATION (PSO)

Particle Swarm Optimization – PSO será também descrito com mais detalhe no decorrer do capítulo. É uma técnica de otimização estocástica, isto é, para análise de eventos aleatórios cujo estado é indeterminado, baseada no movimento e inteligência de enxames. Em geral,

algoritmos MPPT baseados em *Particle Swarm Optimization* mostram longa convergência de tempo para atingir o MPP e apresentam problemas de flutuações.

Em [16] propõe-se um algoritmo MPPT baseado em PSO Acelerado (APSO) que utiliza o método P&O para encontrar o MPP global. Os resultados mostraram que o algoritmo APSO proposto pode distinguir claramente o MPP global dos MPPs locais face ao P&O.

[17] apresenta um algoritmo MPPT PSO combinado com P&O para diferenciar o sombreamento parcial do não sombreamento. O P&O segue continuamente o MPP em caso de uniformidade do sol, e no caso de sombreamento parcial, o algoritmo recorre ao P&O para rastrear o MPP local atual, e neste caso, o PSO é ativado dentro de um pequeno espaço de busca.

3.3.1.3. P&O E SLIDING MODE VARIABLE STRUCTURE (SMVS)

A Estrutura Variável em Modo Deslizante (*Mode Variable Structure - SMVS*) é uma técnica adequada para sistemas com perturbações e incertezas. Este método fornece uma abordagem robusta para alcançar o desempenho desejado e é um método descontínuo, no qual a entrada de controlo alterna entre dois limites.

[11], [18] propõem um algoritmo que combina P&O e *Sliding Mode Variable Structure* (SMVS) e a sua estratégia de controlo apresenta uma resposta rápida e eficaz no rastreio do MPP quando a irradiância é alterada, diminuindo a oscilação em torno do MPP. Em comparação com o P&O tradicional, a velocidade de rastreamento aumenta em 60% e o erro relativo diminui em 20%.

3.3.1.4. P&O E SUPPORT VECTOR REGRESSION (SVR)

A regressão do vetor de suporte é um algoritmo de aprendizagem supervisionado utilizado para prever valores discretos em aplicações de classificação e regressão. A ideia básica do SVR é encontrar a melhor linha de ajuste, o chamado hiperplano que é basicamente a melhor zona no espaço de trabalho do algoritmo que separa dois vetores com características diferentes.

[19] apresenta-se um algoritmo P&O integrado com regressão do vetor suporte (SVR) que pode ser utilizado para resolver problemas de regressão. Uma das vantagens mais significativas do SVR é a capacidade de obter uma boa estimativa estatística com base em

um pequeno número de amostras. Comparado com o FLC, o SVR tem um menor tempo de aprendizagem, menos dependência de dados e a sua implementação é mais simples.

3.4. CONDUTÂNCIA INCREMENTAL (INC)

O método INC é simples de implementar, no entanto, ainda precisa de melhorias para obter as vantagens oferecidas por outros métodos que iremos verificar no decorrer do capítulo.

Este método baseia-se na inclinação da curva de potência P-V e obtém o MPP quando a derivada de potência, em relação à tensão de saída, é igual a zero. Derivando os valores da curva de potência em ordem à tensão e igualando este valor a zero, como mostrado na Equação 19, encontra-se o ponto máximo.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(I \times V)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0, \text{ em MPP} \quad (19)$$

Resolvendo teremos:

$$-\frac{I}{V} = \frac{dI}{dV} \quad (20)$$

Tendo em conta a Figura 19, a razão cíclica aumenta ou diminui dependendo da zona de trabalho do painel fotovoltaico, isto é, se estiver a trabalhar à esquerda ou à direita do ponto de MPP de acordo com as seguintes condições [20]:

- $-\frac{I}{V} = \frac{dI}{dV}$; $(\frac{dP}{dV} = 0)$, manter a razão cíclica – atingido o MPP.
- $-\frac{I}{V} < \frac{dI}{dV}$; $(\frac{dP}{dV} > 0)$, variar a razão cíclica de forma a aumentar a potência de saída – ponto de trabalho do painel encontra-se à esquerda do MPP.
- $-\frac{I}{V} > \frac{dI}{dV}$; $(\frac{dP}{dV} < 0)$, variar a razão cíclica de forma a diminuir a potência de saída – ponto do painel encontra-se à direita do MPP.

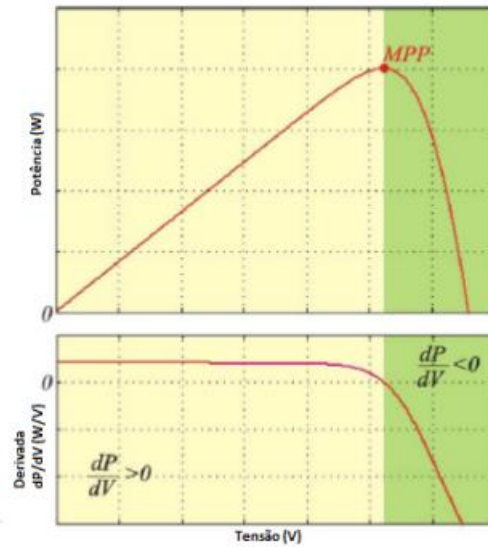


Figura 19 - Curva da Potência de saída e respetiva derivada [21]

Este método é caracterizado por implicar dois sensores para medida da corrente e tensão, ser um método mais complexo que a técnica Perturba e Observa (P&O) e não oscilar muito em torno do MPP. O algoritmo mantém-se no MPP desde que não se verifiquem grandes mudanças ambientais que resultem em grandes variações de corrente. Neste caso o algoritmo procurará o novo MPP variando a razão cíclica e consequentemente a tensão. A velocidade do MPPT depende da variação do valor da razão cíclica, $\Delta\delta$. Quanto maior a $\Delta\delta$ maior será a velocidade do MPPT e maior a sua oscilação em torno do MPP, sendo que este valor deve de ser bem ajustado.

Na Figura 20 é representado o fluxograma do método INC com o explicado anteriormente.

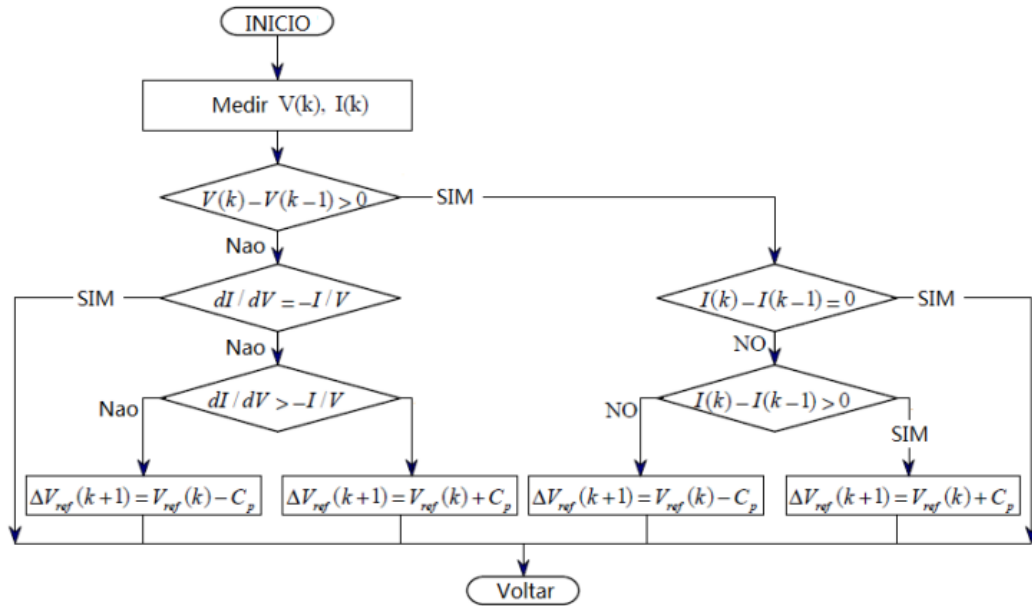


Figura 20 - Fluxograma do método Condutância Incremental [22]

Algoritmos integrados com INC são propostos por [22] para melhorar a velocidade e a precisão do rastreamento em ambientes com grandes mudanças ambientais usando respectivamente, otimizador de temperatura e controlo de ordem fracionária. Li C, Chen Y e Zeng J [20] usam o MPPT INC num inversor modificado para aplicações fotovoltaicas de baixa potência.

3.5. TENSÃO CONSTANTE

Este método advém da observação do facto de a razão entre o valor da Tensão no Ponto de Máxima Potência, V_{MPP} , e a Tensão de Circuito Aberto, V_{OC} , ser quase constante como mostrado na Equação 21, mesmo com condições ambientais variáveis de temperatura e irradiância.

$$\frac{V_{MPP}}{V_{OC}} \approx K \quad (21)$$

Como o valor de referência, K, depende dos valores associados ao painel a ser utilizado é preciso primeiro determinar a tensão em vazio tendo em conta diferentes valores de temperatura e irradiância. Posteriormente utilizar equações e valores predefinidos de K para

determinar o MPP ou utilizar os dados fornecidos pelo fabricante. O valor do K varia normalmente entre 0,71 e 0,80 [23]. Na Figura 21 é ilustrado o fluxograma tipo para a implementação de um algoritmo de Tensão Constante.

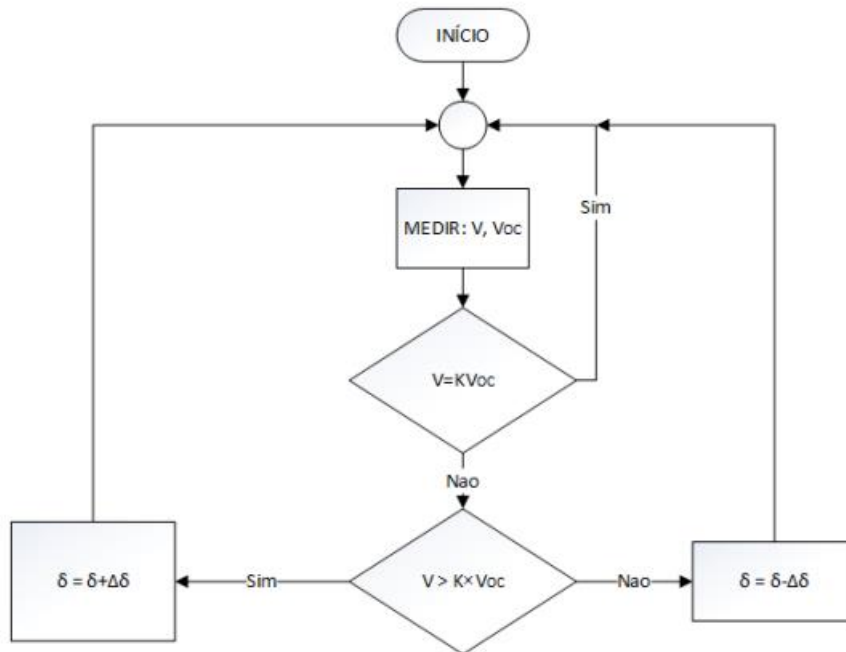


Figura 21 - Fluxograma do método de Tensão Constante [24]

Este método tem a desvantagem de não conseguir acompanhar rapidamente a variação da irradiância e fazer com que a potência de saída não seja a máxima possível. Para além disso, sempre que é necessário medir o valor da tensão em vazio, a energia está a ser desperdiçada.

3.6. PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO)

De uma forma muito simplista, o método PSO é uma técnica de otimização desenvolvida com base no comportamento de um bando de pássaros e é utilizado na otimização problemas de n dimensões. Assim, existe uma população de partículas, chamada de *agentes cooperativos*, que é utilizada para encontrar a solução ideal. Cada partícula, segue duas

regras fundamentais para encontrar a partícula ideal: avança a partícula com melhor desempenho e a melhor solução encontrada pela própria partícula. Assim, todas as partículas da população convergem para a melhor solução.

O PSO funciona em cinco etapas. Na primeira, o número de partículas é definido e estas são distribuídas uniformemente no espaço de dimensão n , no qual cada partícula tem uma posição e uma velocidade. Na segunda, é avaliada a função associada a cada partícula. Na terceira, o valor da função correspondente à posição atual da partícula é comparado com os melhores valores individuais e globais, sendo este atualizado. Se o valor atual da função for maior do que o melhor indivíduo e valores globais. Na quarta, a velocidade e a posição das partículas são atualizadas, de modo que na quinta etapa, se os critérios de convergência não forem atendidos, o algoritmo retorna à segunda etapa [25].

Técnicas de MPPT para sistemas fotovoltaicos baseados em PSO modificado foram propostas e aplicadas pelos autores [16], [17], [26]–[28].

3.6.1. PSO E ARTIFICIAL FISH-SWARM ALGORITHM (AFSA)

AFSA (algoritmo artificial de enxame de peixes) é um dos melhores métodos de otimização entre os algoritmos de inteligência de enxame. Este algoritmo é inspirado no comportamento social coletivo dos peixes que pela sua natureza tentam manter as suas colônias e, conseqüentemente, demonstram comportamentos inteligentes. A procura por comida, a imigração e a forma como enfrentam diferentes perigos acontece de forma social, isto é, existem interações entre todos os peixes do mesmo grupo que resultam num comportamento em grupo perante a alteração do ambiente. Este algoritmo tem muitas vantagens, incluindo alta velocidade de convergência, flexibilidade, tolerância a falhas e alta precisão.

Em [28] propôs-se um algoritmo hibridizado, otimizado pelo Algoritmo de Otimização de Enxame de Partículas (PSO) com memória estendida (PSOEM-FSA). As várias características do algoritmo PSOEM, incluem a inércia da velocidade, memória (aprendizagem) de uma partícula individual e partilha de informações entre as partículas. Comparado com o convencional PSO o AFSA, apresenta melhorias na confiabilidade e eficácia do MPPT.

3.6.2. PSO E FLC (FUZZY LOGIC CONTROL)

Os métodos MPPT já descritos anteriormente são caracterizados pela sua alta eficiência e rápida velocidade de convergência. [17] propuseram um MPPT baseado no algoritmo PSO otimizado com o algoritmo Fuzzy Logic Controller, que tem como vantagem a velocidade de rastreamento do MPP, com oscilações muito pequenas em torno do MPP. Esta proposta mostra que o algoritmo consegue localizar o MPP para qualquer variação de irradiância e de temperatura.

3.6.3. PSO E REDE NEURAL RADIAL BASIS FUNCTION (RBFNN)

As Redes Neurais de Função de Base Radial (RBFNN) são técnicas de aprendizagem de máquina (*machine learning*) supervisionado, que visa criar um modelo para uma função desconhecida para encontrar uma relação entre os dados de entrada e os dados de saída. [16] usa o algoritmo PSO para otimizar os parâmetros do RBFNN, introduzindo uma nova estratégia adaptativa de otimizador de enxame de partículas para ajustar dinamicamente a nova velocidade. O sistema fotovoltaico mostrou uma rápida velocidade de convergência e verifica-se uma redução considerável nas oscilações na potência de saída.

3.7. FUZZY LOGIC CONTROL (FLC)

A estratégia FLC já abordada anteriormente é um sistema de controle baseado em lógica difusa - um sistema matemático que analisa valores de entrada analógica em termos de variáveis lógicas que assumem valores contínuos entre 0 e 1. Este método não implica ter um modelo matemático do sistema, portanto, é indicado para controlar sistemas não lineares, como sistemas fotovoltaicos.

O FLC é implementado em três etapas: (1) “Fuzzificação”, na qual as entradas são convertidas em variáveis linguísticas com base nas funções de pertinência; (2) os dados são então processados através das regras Fuzzy que visam a tomada de decisão (as regras fuzzy fornecem certas combinações possíveis para satisfazer várias condições); (3) “Desfuzzificação”: as variáveis linguísticas são convertidas de volta, formando as saídas analógicas, que controlam a potência do painel [15].

A principal vantagem do FLC é que não é implica conhecer o sistema, apenas as regras de linguagem para realizar determinadas operações de controlo. Técnicas de MPPT otimizadas baseadas no FLC foram propostas e aplicadas pelos investigadores Narwat L, Dhillon J[14], [29].

3.7.1. FLC E ALGORITMO GENÉTICO (GA)

Um algoritmo genético, de forma muito simples, é um método para resolver problemas de otimização que se baseia na seleção natural, o processo que impulsiona a evolução biológica. O algoritmo genético modifica repetidamente uma população de soluções individuais e avançam os indivíduos com as melhores características que estão a ser avaliadas pelo algoritmo.

Em [29] apresenta-se a otimização da lógica fuzzy através da combinação com um algoritmo genético. O recurso a AG provou ser mais eficiente que o FLC sozinho, e o número de iterações influencia na sua precisão (quanto maior o número de iterações melhor é o resultado). No entanto, o método depende do período em que o MPP está a ser calculado. Os melhores resultados foram em períodos mais longos.

3.8. ANT COLONY OPTIMIZATION (ACO)

A otimização de colónia de formigas (ACO) é uma abordagem meta-heurística para resolver problemas de otimização inspirada no comportamento coletivo das formigas, que utiliza a inteligência de enxame dos indivíduos da colónia.

No ACO, um conjunto de agentes de software chamados de *formigas artificiais* procuram boas soluções para um determinado problema de otimização. Para aplicar o ACO, o problema de otimização é transformado no desafio de encontrar o melhor caminho na busca da melhor solução. As *formigas artificiais* constroem então soluções de forma incremental movendo-se num processo de construção da solução estocástico que é influenciado por um modelo de feromônio, isto é, um conjunto de parâmetros associados a componentes do problema a ser resolvido cujos valores são atualizados em tempo de execução pelas *formigas artificiais*.

[30] propôs-se um novo método de MPPT baseado no algoritmo de otimização ACO com uma nova estratégia de atualização de feromona, chamado de ACO NPU MPPT, que se distingue pela redução de tempo de computação, pela execução precisa no rastreamento do MPP e pela alta robustez quando é utilizado em ambientes com grandes variações climáticas e de sombreamento. Os resultados obtidos foram comparados com outros algoritmos MPPT, mostrando alta eficiência.

3.9. ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS (ANN)

Os cérebros humanos interpretam o contexto das situações do mundo real de uma forma que os computadores não conseguem e assim as redes neuronais foram desenvolvidas pela primeira vez na década de 1950 para resolver este problema. Uma rede neuronal artificial é uma tentativa de simular a rede de neurónios que compõem um cérebro humano para que o computador seja capaz de aprender e tomar decisões de forma humana. Foram então desenvolvidas RNAs para se comportarem como se fossem células cerebrais interconectadas entre si. Uma rede neuronal artificial (ANN) normal tem três camadas: a entrada, a camada oculta e a camada de saída.

À entrada, no caso dos painéis fotovoltaicos, são considerados os parâmetros de irradiância, temperatura e a tensão de saída. À saída ANN é utilizada como a potência de referência para o controlador DC/DC. O MPP, que é registado como dados de saída da ANN, corresponde a cada combinação de entrada. Portanto, a potência de referência de saída não é exatamente a potência ideal, no entanto, este ponto de operação de referência está próximo do MPP [31].

Em [32] simulou-se um MPPT baseado em ANN para um sistema elaborado que combina os modelos estabelecidos do módulo fotovoltaico e um conversor DC/DC. Outros autores integram algoritmos para otimizar o ANN, como no caso de Elobaid L, Abdelsalam A e Zakzouk E [31] que respetivamente usaram os algoritmos de linearização precisam do feedback de estado aumentado (AFL) e a otimização do enxame algoritmo de partículas híbridas e algoritmo de busca gravitacional baseado em lógica difusa (FPSOGSA).

3.10. ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM (ANFIS)

ANFIS é uma técnica que combina ANN e FLC. Enquanto o sistema ANN identifica e confirma os padrões de mudança climática, o Sistema de Interferência Difusa (FIS) combina o conhecimento humano e faz a indução no processo de tomada de decisão. A estrutura típica do algoritmo ANFIS é dividido em cinco fases. Na primeira camada existem os conjuntos de variáveis de entrada e as suas respectivas funções. Na segunda camada, os valores das entradas são operados por funções de pertinência (*fuzzificação*), em que cada nó executa uma operação correspondente a uma regra. Na camada três, os nós da camada anterior são normalizados. Na quarta camada, é realizada a etapa de *desfuzzificação*, na qual os valores consequentes da regra são calculados. Finalmente, na última camada, o valor de saída é calculado[33]. Andrew-Cotter J [34] propôs um conversor para geração de energia fotovoltaica em conjunto com energia eólica com um algoritmo MPPT sendo que utiliza os métodos de otimização de baleia adaptável (AWOA) e o sistema de interferência neuro-fuzzy (ANFIS).

3.11. GENETIC ALGORITHM (GA)

Os algoritmos genéricos são inspirados na teoria de Darwin de seleção natural. O algoritmo é baseado em um conjunto de cromossomas que são codificados usando uma cadeia de valores possíveis. Os indivíduos têm a função de criar a próxima população pela seleção de melhor desempenho e com base na taxa de adequação determinada, obtendo uma solução ótima. Com base numa amostragem estocástica com substituição, este algoritmo estabelece uma taxa de adequação para cada cromossoma. Um indivíduo é selecionado proporcionalmente à taxa de aptidão e usando um gerador de números aleatórios, ou seja, uma alta taxa de seleção resulta numa alta taxa de aptidão e vice-versa. No entanto, não garante que mais indivíduos aptos serão representados na próxima geração. No entanto, este problema pode ser resolvido com o uso de outro algoritmo que identifica cromossomas com melhor eficiência [35]. Esta referência investiga um algoritmo MPPT que integra GA para otimizar o FLC.

3.12. CUCKOO SEARCH (CS)

O algoritmo CS é inspirado no comportamento de reprodução do cuco. Existem algumas espécies de cucos que põem os seus ovos em ninhos comunitários e retiram os ovos de outras aves desse mesmo ninho para aumentar a probabilidade de os seus próprios ovos eclodirem. Os cucos voam aleatoriamente de um ninho para outro para avaliar o candidato que está em cada ninho. Desta forma, depois de avaliado, escolhe o ninho com a maior probabilidade de incubação. No entanto, a ave hospedeira pode identificar os ovos do cuco e deixar o ninho não eclodindo nenhum dos ovos.

Para a identificação do MPP utilizando este método existem três regras características. A primeira é que cada cuco colocará apenas um ovo no ninho hospedeiro, a segunda é que o ninho com a mais alta qualidade e que conseqüentemente terá a melhor probabilidade de eclodir fará parte da próxima geração. Por último, existe um número fixo de ninhos de hospedeiros no ecossistema e a probabilidade de um ovo do cuco ser descoberto pelo pássaro hospedeiro tem um valor determinado. Do ponto de vista da otimização, os cucos representam as partículas projetadas para encontrar a solução, enquanto os ovos do cuco representam a solução para o processo de iteração [36], [37].

3.13. WHALE OPTIMIZATION ALGORITHM (WOA)

Um algoritmo de otimização da baleia é uma técnica inspirada na biologia que busca imitar o comportamento de caça das baleias jubarte. Essas baleias são conhecidas por sua habilidade em caçar pequenos peixes próximos à superfície do mar. Elas iniciam o processo de caça liberando bolhas de ar no ambiente do alvo. Essas bolhas criam uma rede que permite às baleias cercar e capturar seus alvos de forma eficiente.

O algoritmo de otimização da baleia utiliza uma abordagem similar. Durante várias condições operacionais, como diferentes níveis de irradiância solar (uniforme ou não uniforme), o objetivo do algoritmo é encontrar o ponto de potência máxima (MPP) de um sistema fotovoltaico. O MPP é o ponto em que a potência gerada pelo sistema é máxima.

Para realizar essa otimização, o algoritmo da baleia busca localizar o MPP com menos flutuação de energia e alta eficiência de rastreamento. Ele emprega estratégias inspiradas nas bolhas de ar liberadas pelas baleias jubarte, criando uma rede de soluções possíveis e explorando diferentes combinações de parâmetros para encontrar o MPP ideal [38].

3.14. RESUMO E CONCLUSÕES

Na pesquisa realizada para a elaboração deste capítulo verificou-se a existência de muitos artigos relativos a novas estratégias e à implementação de novos algoritmos com base nos métodos tradicionais, mas ainda assim poucos autores abordam a complexidade do algoritmo de forma detalhada e o seu custo de implementação. Assim sendo, conseguimos evidenciar a melhoria no desempenho/eficiência quando comparados aos tradicionais métodos de MPPT. Escolher um método MPPT específico para uma dada aplicação é uma tarefa difícil, pois existe uma elevada variedade de métodos desenvolvidos e cada um deles apresentam os seus próprios prós e contras.

Na tabela 2 são apresentados os algoritmos mais comuns e é feita uma comparação entre os mesmos a nível de eficiência, velocidade de convergência e complexidade de implementação [39].

Tabela 2 - Comparação entre os principais algoritmos MPPT

MPPT	Eficiência	Velocidade de Convergência	Complexidade
ACO	Alta	Rápido	Média
PSO	Alta	Rápido	Média
ANN	Alta	Rápido	Alta
FLC	Alta	Rápido	Alta
FL GA	Alta	Rápido	Alta
ANFIS	Alta	Rápido	Alta
INC	Média	Rápido	Baixa
P&O	Baixa	Baixa	Baixa

4. DESENVOLVIMENTO PRÁTICO

Neste capítulo é apresentado o trabalho prático realizado em relação à seleção e dimensionamento dos componentes de hardware utilizados na construção do sistema de controlo para a implementação do algoritmo MPPT e detalhado o software desenvolvido para esse sistema. O algoritmo implementado é o MPPT P&O cujo processo teórico foi detalhado no estado de arte deste relatório.

4.1. ARQUITETURA GERAL DO SISTEMA

Para a realização do objetivo de testar um algoritmo MPPT foi projetado e testado o seguinte esquema representado na Figura 22 que se segue.

O sistema é constituído essencialmente por um painel fotovoltaico de 5 W, um sensor de corrente e um de tensão, um conversor DC/DC, um microcontrolador e um módulo de Bluetooth.

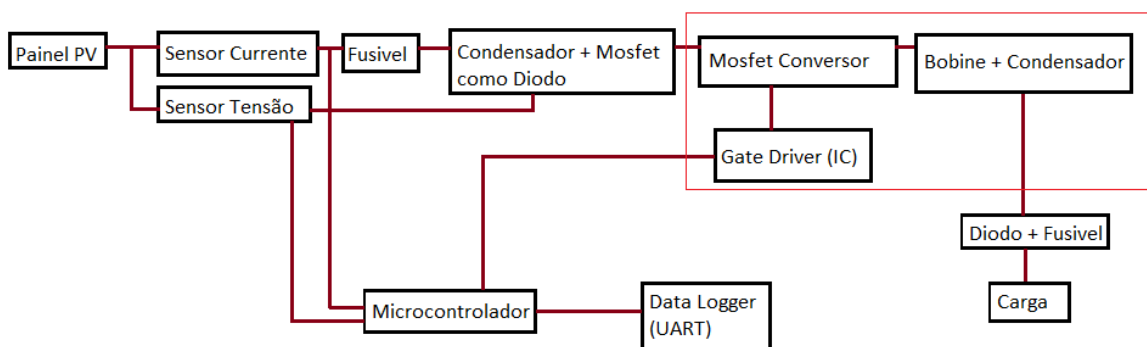


Figura 22 – Esquema de arquitetura geral do sistema de controlo

De forma a explicar cada um dos blocos de forma mais concreta estes são divididos e explicados nos subcapítulos que se seguem.

4.2. CARACTERÍSTICAS PAINEL FOTOVOLTAICO ESCOLHIDO

Existem muitas opções de tecnologias de painéis solares e para este projeto o painel foi escolhido essencialmente tendo em conta suas características de dimensão e peso, para que fosse possível o seu manuseamento no processo de testes e validações, e a sua potência de operação para que fosse possível realizar os testes em *breadbord*.



Figura 23 – Painel Fotovoltaico SOLARPOWER-5W

O painel escolhido é do tipo policristalino que em comparação com os painéis do tipo monocristalinos podem ser um pouco menos eficientes, mas a nível de custo são significativamente mais baratos. Foi utilizado o modelo SOLARPOWER-5W da XUNZE e as suas características podem ser verificadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características do painel fotovoltaico SOLARPOWER-5W

Tipo de painel	Policristalino
Potência	5 W
Tensão Nominal	12 VDC
Tensão Circuito Aberto (VOC)	22 VDC
Corrente Curto Circuito (ISC)	0,30 ADC
VMPP – Max. Power Point Voltage	18 VDC
IMPP – Max. Power Point Current	0,28 ADC
Largura do painel solar (em cm)	24
Altura do painel solar (em cm)	18
Espessura do painel solar (em cm)	1,8
Peso do painel solar (em kg)	0,6

4.3. SENSOR DE CORRENTE

Para a medição da corrente do painel fotovoltaico foi utilizado o sensor ACS712 apresentado na Figura 24. Este sensor pode medir corrente AC ou DC variando de +5A a -5A, +20A a -20A ou +30A a -30A, dependendo do seu modelo. Para este projeto foi selecionado o modelo de +30A a -30A e assim é produzida uma tensão analógica (0-5V) com base na corrente a ser medida. O sensor deve de ser alimentado com uma tensão de 5V, sendo a corrente a ser medida inserida entre os pinos IP+ e IP-, e o sinal analógico recolhido no pino Out.

Para a interpretação pelo Microcontrolador, recorrendo a um ADC de 10 bits e tensão de operação 5V, podemos calcular a tensão de saída dos valores ADC a partir da fórmula:

$$V_{out} (mV) = (Valor\ ADC / 1023) \times 5000 \quad (6)$$

Depois de calculada a tensão de saída, podemos calcular o valor da corrente a partir da tensão a partir da fórmula:

$$Corrente\ através\ do\ fio\ (A) = \frac{V_{out}(mV) - 2500}{factor\ de\ escala} \quad (7)$$

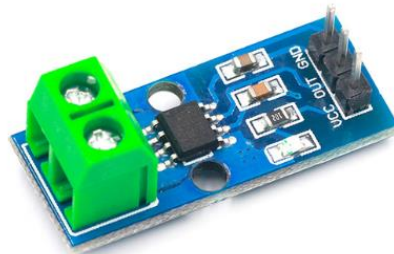


Figura 24 – Sensor de corrente ACS712

4.4. SENSOR DE TENSÃO

Para a medição da tensão do painel fotovoltaico foi contruído um circuito baseado em resistências como se pode observar na Figura 25. O terminal de saída do painel é ligado a um circuito divisor de tensão onde a tensão será distribuída pelas resistências R1 e R2.

Os valores das resistências são determinados pelas especificações de energia do painel e as especificações de entrada das portas do microcontrolador. Idealmente, R1 terá um valor de

resistência alto para evitar que o circuito do sensor receba altos fluxos de corrente, que se traduz na perda de energia e numa possível danificação do circuito.

A tensão em R2, é a tensão que vai ser monitorizada para detetar qualquer variação na tensão gerada pelo painel, mas antes passa ainda por um filtro passa-baixo para evitar picos de ruído no sinal, resultando em leituras falsas.

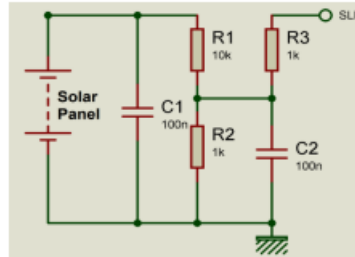


Figura 25 – Sensor de tensão – divisor de tensão

$$V_{out} = V_{in} \frac{R2}{R1+R2} \quad (8)$$

4.5. DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR DC/DC

A nível de hardware, o dimensionamento do conversor DC/DC é uma das partes mais importantes pois é a partir deste circuito que conseguimos controlar a potência aplicada à carga a partir do controlo de tensão e de corrente do painel fotovoltaico aqui conectado.

Para este sistema foi projetado um conversor *buck* que consiste principalmente em três componentes chave: a bobine, o condensador e o circuito de MOSFET.

A frequência de comutação é inversamente proporcional ao valor da bobine e do condensador e diretamente proporcional às perdas de comutação nos MOSFETs. Quanto maior a frequência, menor o valor da bobine e do condensador, mas maior as perdas por comutação dos MOSFETs.

4.5.1. SELEÇÃO DA BOBINE

Calcular o valor da bobine é a fase mais crítica do dimensionamento do conversor *buck*. Assumindo que o conversor está no Modo de Condução Contínua (CCM), implica que a bobine não descarregue durante o tempo de OFF.



Figura 26 – a) bobine b) condensador

Para projetar um conversor *buck* para sistemas solares de 5 W, 12 V, foram feitos os seguintes cálculos: o primeiro passo é determinar a razão cíclica, D , para a tensão máxima de entrada. A eficiência, η é adicionada ao cálculo da razão cíclica para que sejam consideradas as perdas de energia de forma a termos um resultado mais realista.

Usando um fator estimado, e tendo em consideração os valores de *datasheet* do painel fotovoltaico escolhido para o projeto podemos chegar às seguintes expressões:

$$\text{Tensão de entrada, } V_{in} = 18 \text{ V}$$

$$\text{Tensão de saída, } V_{out} = 12 \text{ V}$$

$$\text{Corrente de saída, } I_{out} = \frac{5\text{W}}{12\text{V}} = 0,41 \text{ A}$$

$$\text{Duty Cycle, } D = \frac{V_{out}}{V_{in} \times \eta} = \frac{12}{18 \times 0,9} = 0,74 \text{ ou } 74\% \quad (13)$$

Onde η é a eficiência estimada do conversor. A frequência de comutação (F_{sw}) escolhida foi de 50 kHz.

Uma opção usual para a corrente de ondulação na bobine é de 20% a 40% da corrente de saída, portanto, a corrente de ondulação será:

$$\Delta I_L = 40\% \text{ de } I_{out} \times L_{current\ output} = 0,4 \times 0,41 = 0,16 \quad (14)$$

portanto, o valor da indutância,

$$L = V_{in} - V_{out} D \left(\frac{1}{F_{sw}} \right) \left(\frac{1}{\Delta I_L} \right) \quad (15)$$
$$L = (18 - 12) 0,74 \left(\frac{1}{50000} \right) \left(\frac{1}{0,16} \right)$$
$$L = 0,55 \mu\text{H}$$

Relativamente à corrente de pico na bobine,

$$\text{Corrente de pico na bobine} = I_{out} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (16)$$
$$= 0,41 + (0,16/2) = 0,49 \text{ A}$$

4.5.2. SELEÇÃO DO CONDENSADOR

A capacitância de saída é necessária para minimizar a ondulação presente na saída de um conversor *buck*. Grandes *overshoots* podem ser causados pela falta de capacitância na saída do conversor.

Tendo em conta as características:

$$\text{Corrente de ondulação na bobine, } \Delta I_L = 0,16 \text{ A}$$

$$\text{Frequência de comutação, } F_{sw} = 50 \text{ kHz}$$

$$\text{Tensão de ondulação de saída, } \Delta V_{out} = 20 \text{ mV}$$

Temos como valor de capacitância de saída:

$$C_{out} = \left(\frac{\Delta I_L}{8 F_{sw} \Delta V_{out}} \right) \quad (17)$$

$$C_{out} = \left(\frac{0,16}{8 \times 50000 \times 0,02} \right) = 200 \mu\text{F}$$

Tendo em consideração uma margem, foi utilizado um valor de 200 μF . A Figura 26 (b) mostra o condensador usado para o dispositivo.

4.5.3. SELEÇÃO DO MOSFET

Outro elemento fulcral para o conversor é o MOSFET. Neste projeto utilizamos o MOSFET IRFZ44N apresentado na Figura 27. Este MOSFET é de canal N e é utilizado em diversos projetos pois as suas características incluem resistência de estado muito baixa, tecnologia de processamento de alta velocidade, capacidade de comutação de alta velocidade, o que o torna ideal para uso em aplicações onde a comutação de alta velocidade é um requisito e, para além disso, as perdas por condução (que dependem do valor de R_{ds}) e as perdas por comutação (que dependem principalmente da frequência de comutação, tensão e corrente) são reduzidas devido às características internas deste componente elétrico.

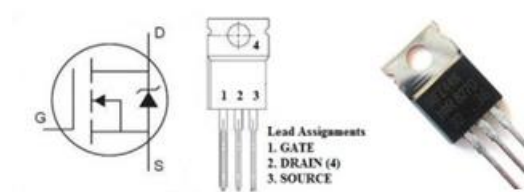


Figura 27 - IRFZ44N MOSFET

4.6. SELEÇÃO DO DRIVER DE MOSFET

O driver permite que através de um sinal de saída digital de baixa corrente de um microcontrolador se consiga controlar o estado dos MOSFET. Para este projeto, foi selecionado o driver *Half Bridge* IR2104 ilustrado na Figura 28, pois foi essencialmente construído para aplicações em que seja requerido o controlo de transístores em ponte, como é o caso neste projeto.



Figura 28 - Driver Half Bridge IR2104

4.7. REGULADOR DE TENSÃO

Para o regulador de tensão, foi selecionado o LM7805 (Figura 29) com V_{out} de +5 volts. Como a maioria dos outros reguladores do mercado, é um IC de três pinos: pino de entrada onde recebe a tensão DC de entrada, pino de *ground* para estabelecer a ligação à massa do regulador e o pino de saída que fornece os 5 volts positivos.

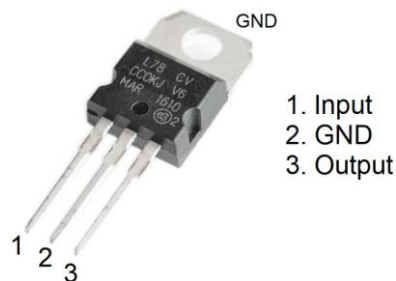


Figura 29 – Regulador de tensão LM7805

4.8. TRANSFERÊNCIA DE DADOS

Para a leitura de dados sem fios, de forma a termos os dados registados num documento de texto, foi utilizado o módulo de Bluetooth HC-05. Este é um protocolo de comunicação sem fio que é usado para enviar e receber dados entre dois dispositivos. Embora o seu alcance seja menor do que outros protocolos de comunicação sem fio, como por exemplo o WiFi, adequa-se a este projeto pois como requisito temos apenas a leitura de dados pelo microcontrolador com baixo alcance de transmissão.

Na Figura 30, podemos observar a conexão entre o Microcontrolador e o módulo Bluetooth utilizado, onde os pinos RXD e TXD são conectados diretamente ao pino RC7 e RC6 do microcontrolador PIC-16F877A. Este módulo requer uma alimentação de 5V.

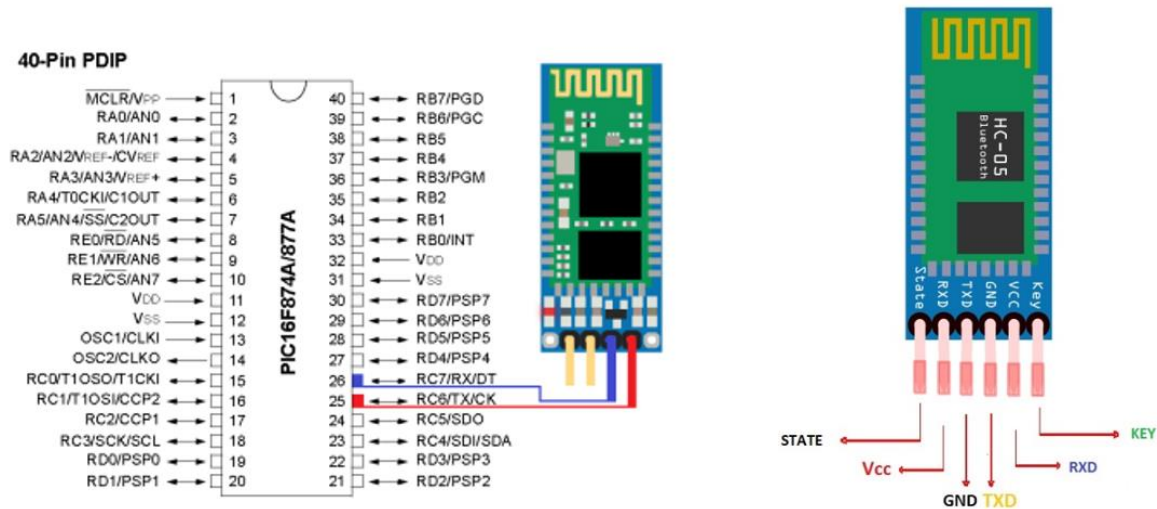


Figura 30 – Ligação uC-HC05 e HC-05 output

4.9. UNIDADE DE CONTROLO

Para este projeto foi utilizado o microcontrolador PIC16F877A que possui 256 bytes de memória de dados EEPROM, um depurador no circuito (ICD), 2 comparadores, 8 canais analógicos para sinais digitais de 10 bits (A/D), 2 funções de comparação/PWM, 1 porta serie síncrona que pode ser configurada como interface serie periférica de 3 fios (SPI) ou barramento de circuito integrado de 2 fios e um transmissor recetor assíncrono universal (UART). Desta forma, o microcontrolador permitirá medir o valor de tensão e de corrente analógica da saída do painel fotovoltaico, converter estes sinais para sinais digitais de forma a serem os inputs de controlo do algoritmo MPPT e finalmente enviar um valor ao circuito integrado por forma a permitir a controlo da razão cíclica.

4.10. ARQUITETURA DO HARDWARE

Na Figura 31 está representado o diagrama de blocos do sistema, em que a tensão e a corrente geradas pelo módulo fotovoltaico entram no sistema de controlo (microcontrolador) através de sinais digitais. O microcontrolador e todos os restantes elementos que necessitam de tensão de alimentação dependem de uma bateria de 12V que fornece as tensões de alimentação necessárias de 12V, para além de um regulador de tensão de 5V. Para a transmissão de dados é utilizado um módulo de Bluetooth ligado ao microcontrolador para recolha dos valores de tensão, corrente, razão cíclica e potência.

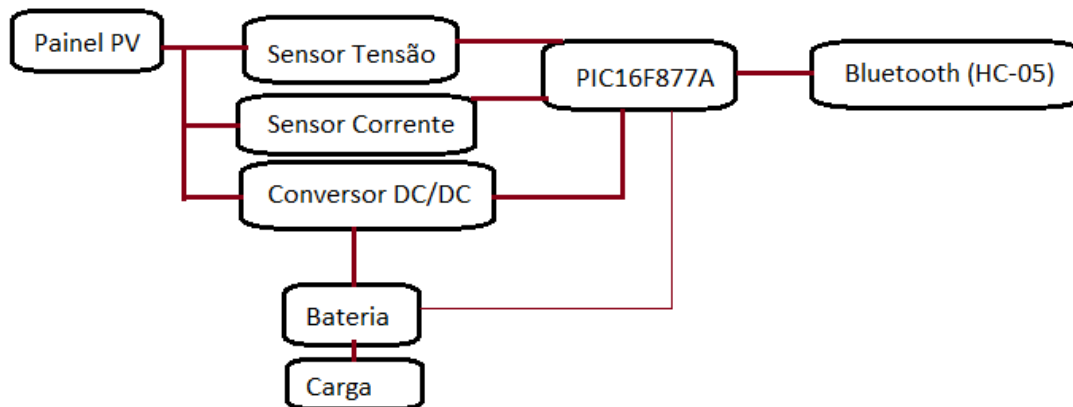


Figura 31 - Diagrama de blocos da arquitetura do hardware

Na Figura 32 e 33, podemos verificar a implementação do esquema acima no software Proteus. O Proteus foi utilizado para a realização dos testes quer a nível da performance elétrica, quer a nível dos testes do algoritmo MPPT realizado uma vez o Proteus é uma ferramenta que permite inserir no microcontrolador o software desenvolvido e permite simular a performance do mesmo.

Como podemos verificar na imagem, a circuito baseia-se no painel fotovoltaico, nos sensores de corrente e de tensão, no conversor *buck*, no módulo Bluetooth e no circuito de alimentação. Desta forma, logo seguido do painel fotovoltaico temos as resistências R1 e R2 que constituem o circuito de divisor de tensão utilizado para a medição da tensão do painel e o sensor de corrente ACS712 utilizado para a medição da sua corrente. O conversor *buck* síncrono é constituído pelos MOSFETs Q2 e Q3, pela bobine L1 e o condensador C8. A

bobine L1 é utilizada para suavizar a corrente de comutação e o condensador C8 a tensão de saída. O terceiro MOSFET Q1 é adicionado para permitir que o sistema bloqueie o fluxo de energia da bateria de volta para o painel fotovoltaico por exemplo em períodos de noite. Como todos os diodos têm uma queda de tensão, um MOSFET é muito mais eficiente que os diodos.

O IC IR2104 é um *half bridge* MOSFET driver e aciona os MOSFETs através de um sinal PWM do microcontrolador. A condensadores C3 e C4 são usados para remover os picos de alta frequência.

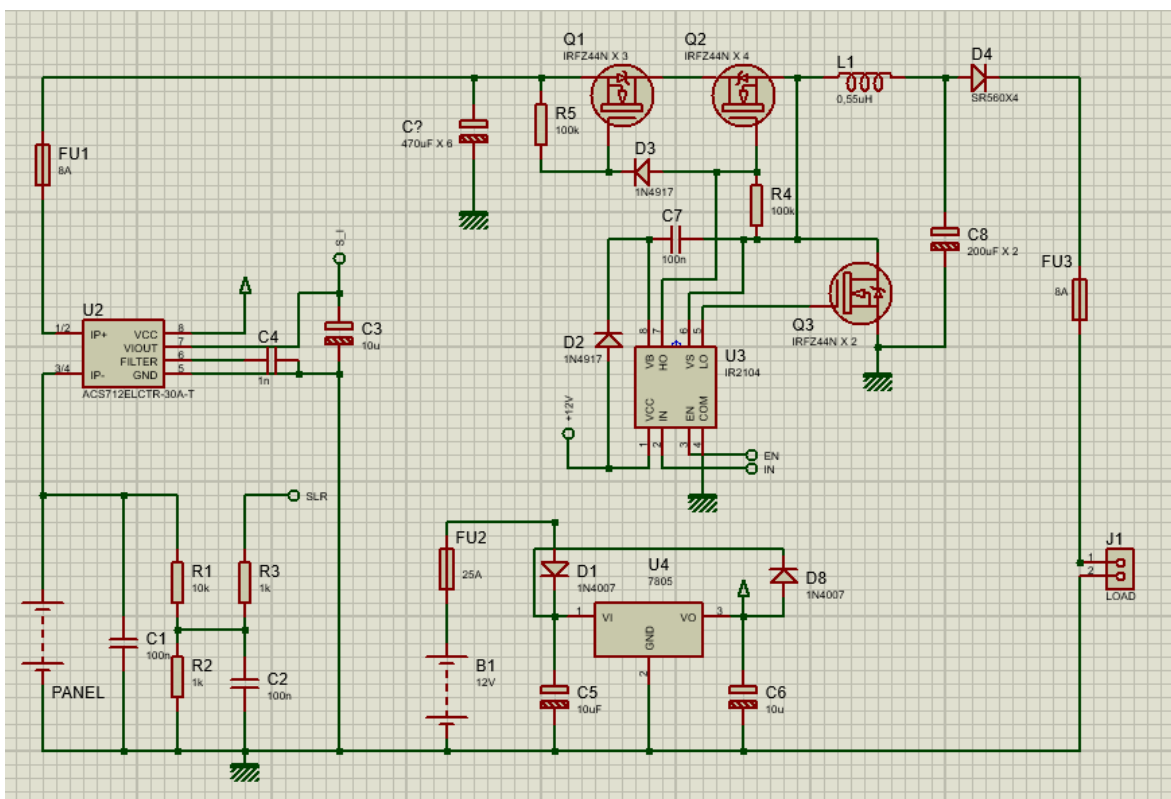


Figura 32 - Esquema elétrico do *hardware*

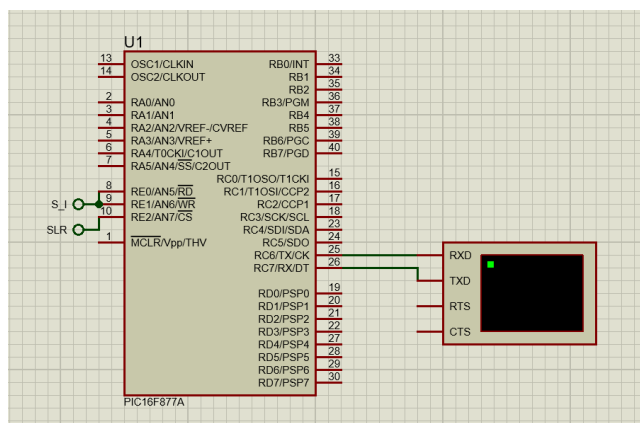


Figura 33 - Esquema elétrico do *hardware* - microcontrolador

4.11. ALGORITMO IMPLEMENTADO

O algoritmo MPPT P&O implementado é constituído pelas funções de leitura do valor de tensão, leitura do valor de corrente, cálculo de valor de potência e definição do controlo de carga.

Como em qualquer código de programação de microcontroladores começou-se por criar as variáveis globais e definição dos pinos de I/O como entradas/saídas (TRIS), desabilitação do registo ADCON1 para garantir que todas as portas estão configuradas como digitais e inicialização dos ADC com 10 bits de resolução.

Fora do *loop* principal *while(1)* recorreu-se às funções baseadas em bibliotecas de rotinas externas, *PWMx_Set_Duty()* e de *UART()*.

O módulo CCP (Capture/Compare/PWM) é um recurso disponível em vários microcontroladores PIC para realizar funções como captura de sinais, comparação de valores e geração de sinais PWM. A biblioteca utilizada é uma coleção de rotinas pré-programadas que simplificam o uso do módulo PWM (geração de sinais PWM) dentro do software de programação da PIC. Através destas rotinas, podemos controlar de forma mais simples o módulo CCP para gerar sinais PWM com diferentes razões cíclicas. Desta forma, utilizamos a função *PWMx_Init()* que é uma rotina que inicializa o módulo PWM com uma razão cíclica de 0. É necessário atribuir o parâmetro "*freq*", que representa a frequência desejada do sinal PWM em Hz. O parâmetro "*timer_prescaler*" representa o *prescaler* do timer e pode ter os

valores de 1, 4, 16 ou 64. Esta rotina deve ser chamada antes de usar outras funções da biblioteca PWM.

PWMx_Set_Duty() é uma rotina utilizada para definir a taxa de serviço do sinal PWM. O parâmetro "*duty_ratio*" varia de 0 a 255, onde 0 representa 0% e 255 representa 100% de taxa de *duty*. Outros valores específicos para a razão cíclica podem ser calculados usando a fórmula: $(\text{porcentagem} * 255) / 100$. O número "x" presente nos nomes das rotinas (por exemplo, *PWM1_Init*, *PWM1_Set_Duty()*) representa o número do módulo CCP que se está a utilizar.

Relativamente às comunicações é utilizada uma biblioteca UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) para microcontroladores PIC. A biblioteca fornece algumas rotinas que simplificam o uso do módulo de hardware UART presente em vários microcontroladores PIC. Utiliza-se *UARTx_Init()*, uma rotina que permite configurar e inicializar o módulo UART em que o parâmetro "*baud_rate*" representa a taxa de transmissão desejada em bps (bits por segundo) e a rotina *UARTx_Write_Text()* para a escrita de texto através da UART. O parâmetro "*UART_text*" é um apontador para uma *string* de texto que se deseja enviar, sendo que o texto está limitado a 255 caracteres.

Estas rotinas da biblioteca UART exigem que seja indicado o módulo UART com o qual se deseja trabalhar substituindo a letra "x" no protótipo da rotina por um número de 1 a 2, dependendo do número de módulos UART disponíveis no microcontrolador.

No *loop* principal *while(1)* é executado indefinidamente cada uma das funções:

- *Get_Solar()*
- *Get_Charging_Current()*
- *Get_Solar_power()*
- *Charging_Control()*

Função Charging_Control():

Esta função controla o processo de carga com base nos dados de potência solar. Aqui é aplicado o algoritmo MPPT P&O analisado no estado de arte. Seguindo o fluxograma teórico, compara-se a potência recente relativamente à potência anterior e de seguida compara-se o valor de tensão em relação à tensão no momento anterior. O ciclo de trabalho do PWM é então ajustado com base na potência e da tensão, sendo este atualizado usando

PWMI_Set_Duty(duty). O ciclo de trabalho é convertido em percentagem e exibido pela UART.

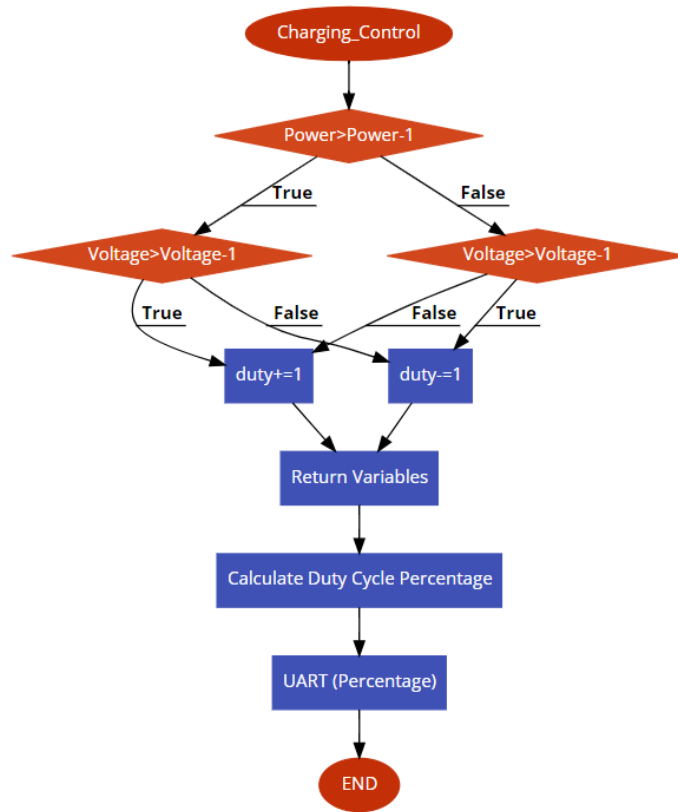


Figura 34 – Fluxograma função *Charging_Control*

Função *Get_Solar()*:

Esta função é utilizada para realizar a leitura da tensão do painel fotovoltaico. É limpo o valor de *adc_rd* e é configurado o registo *ADCON0* para seleccionar o canal 7 do ADC. É feita uma média de 50 leituras dos valores lidos no ADC e multiplica-se este valor médio por um fator de escala para converter a leitura do ADC numa tensão em volts. Este valor é armazenado na variável e é enviado pela UART.

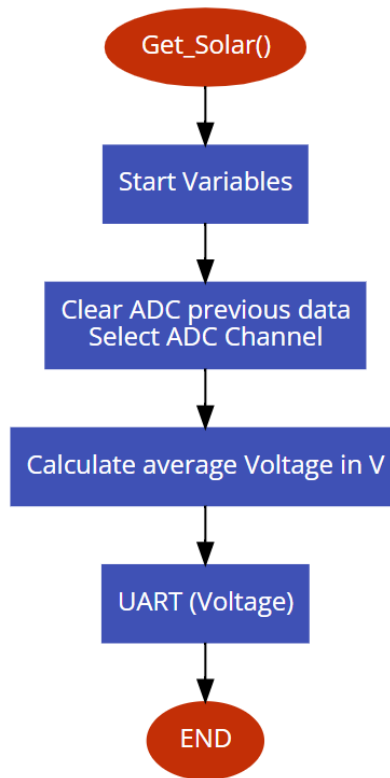


Figura 35 – Fluxograma função *Get_Solar*

Função *Get_Charging_Current()*:

Na função *Get_Charging_Current()* obtém-se a corrente do painel fotovoltaico a partir de uma leitura analógica do ADC. É realizado o cálculo da corrente em Amperes (A) e é enviado este valor por comunicação UART.

A variável *adc_rd* é colocada a zero para limpar quaisquer dados anteriores. O registo *ADCON0* é configurado com o valor 0x29 para selecionar o canal 5 do ADC. São feitas 50 leituras ao valor de ADC e feita uma média destes valores. Mais tarde este valor é convertido para a escala adequada de corrente e é finalmente enviado pela UART o valor recolhido pela função.

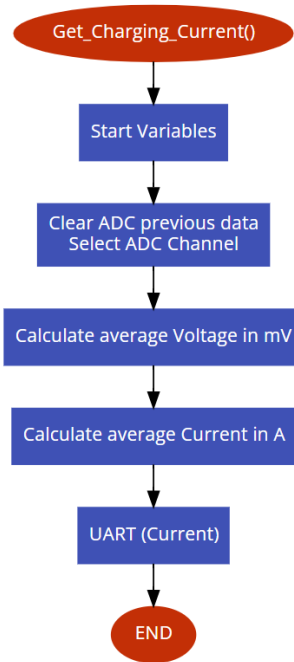


Figura 36 – Fluxograma função *Get_Charging_Current*

Função *Get_Solar_power()*:

Na função *Get_Solar_power()* é multiplicado o valor obtido pela função *Get_Solar()* pela função *Get_Charging_Current()* de forma a ser calculado o valor de potência do painel fotovoltaico. Este valor é enviado pela UART.

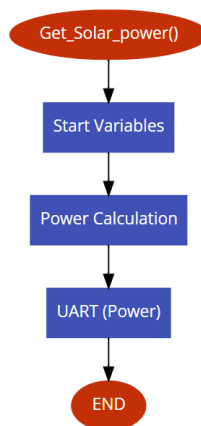


Figura 37- Fluxograma função *Get_Solar_power*

5. ENSAIOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, apresentamos os testes realizados para validação do funcionamento do sistema contruído e os resultados experimentais obtidos na implementação do algoritmo MPPT P&O para a recolha de valores de tensão e corrente do painel fotovoltaico. O objetivo desta análise é avaliar o desempenho do algoritmo em termos de eficiência e precisão na extração da máxima potência disponível do painel fotovoltaico.

5.1. SETUP EXPERIMENTAL

Na Figura 38 podemos verificar o *setup* com todos os elementos montados de forma a ser testado o algoritmo MPPT em laboratório e onde foi feita a avaliação que as medições de tensão e de corrente estavam a ser bem realizadas e bem amostradas. Neste ambiente de testes foi utilizado uma resistência como carga.

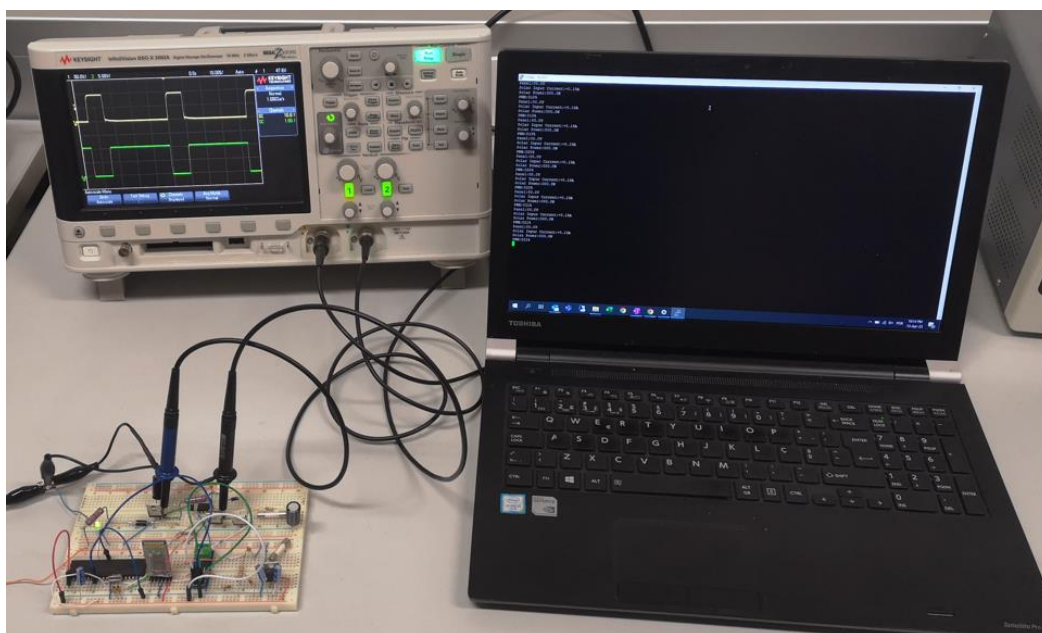


Figura 38 – Setup de testes em laboratório

Foi utilizado também o osciloscópio, principalmente para visualizar os pulsos dos MOSFETs do conversor DC/DC do tipo *Synchronous Buck* e da sua tensão de saída. Na Figura 39 mostra-se os pulsos PWM de acionamento dos dois MOSFET utilizados na conversão em diferentes fases do controlo do sistema implementado.



Figura 39 – Sinais PWM de acionamento dos MOSFET do conversor

E na Figura 40, o valor de tensão de saída do conversor em duas situações distintas.

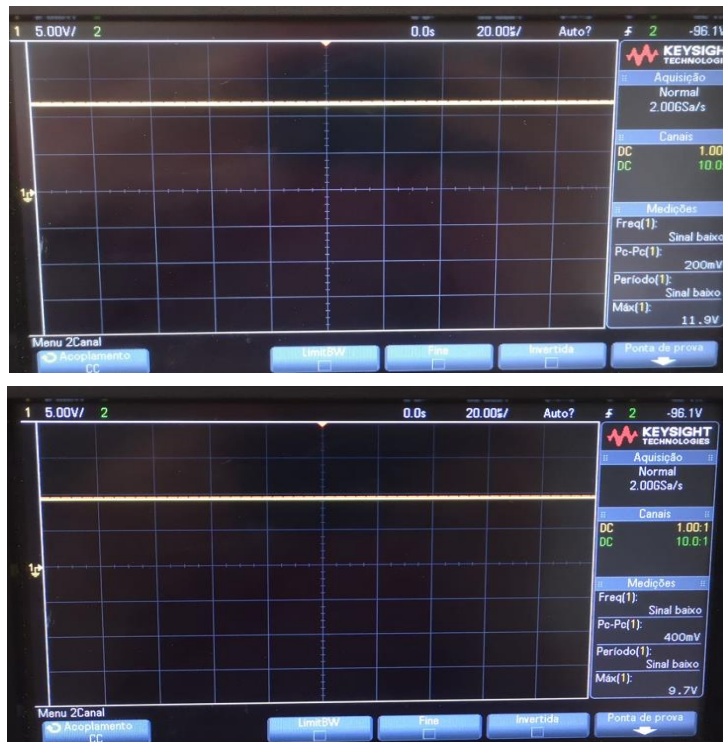


Figura 40 - Tensão de saída do Conversor

Finalmente, na Figura 41 ilustra-se o sistema com todos os elementos numa situação real onde foram feitos os testes para a recolha de valores para a posterior análise dos dados e avaliação do algoritmo MPPT P&O implementado.



Figura 41 - Setup de testes em ambiente real

5.2. DESEMPENHO DO ALGORITMO MPPT P&O

Nesta seção, discutimos o desempenho do algoritmo MPPT P&O com base nos resultados experimentais obtidos relativamente ao controlo das variáveis de tensão, corrente e potência do painel fotovoltaico.

5.2.1. RESPOSTA DO ALGORITMO MPPT

As amostras recolhidas representadas na Figura 42 foram recolhidas num espaço temporal de cerca de 1 hora, num dia não muito quente, mas de céu limpo e sol completamente incidente no painel. Na figura 42(a) temos os valores recolhidos do sistema sem implementação do algoritmo MPPT e na 42(b) os valores recolhidos com o algoritmo implementado. Como se pode verificar a resposta do controlador MPPT é satisfatória pois os valores de tensão e de corrente com este controlo, ainda que de forma oscilatória, tendem a manter um valor mais estável e mais próximos dos respetivos VMPP e IMPP. Para além disso verifica-se uma elevação do valor de tensão e uma diminuição do valor da corrente em pequenos ciclos mais curtos, mas também ao longo do tempo, o que é indicativo que o algoritmo responde corretamente à procura do valor de potência máxima. Desta forma, os valores, ainda que variem, esta variação é menor do que sem o controlo MPPT implementado

e existe uma aproximação das variáveis ao Maximum Point Track que no caso da tensão é 18V e da corrente é 0,28A.

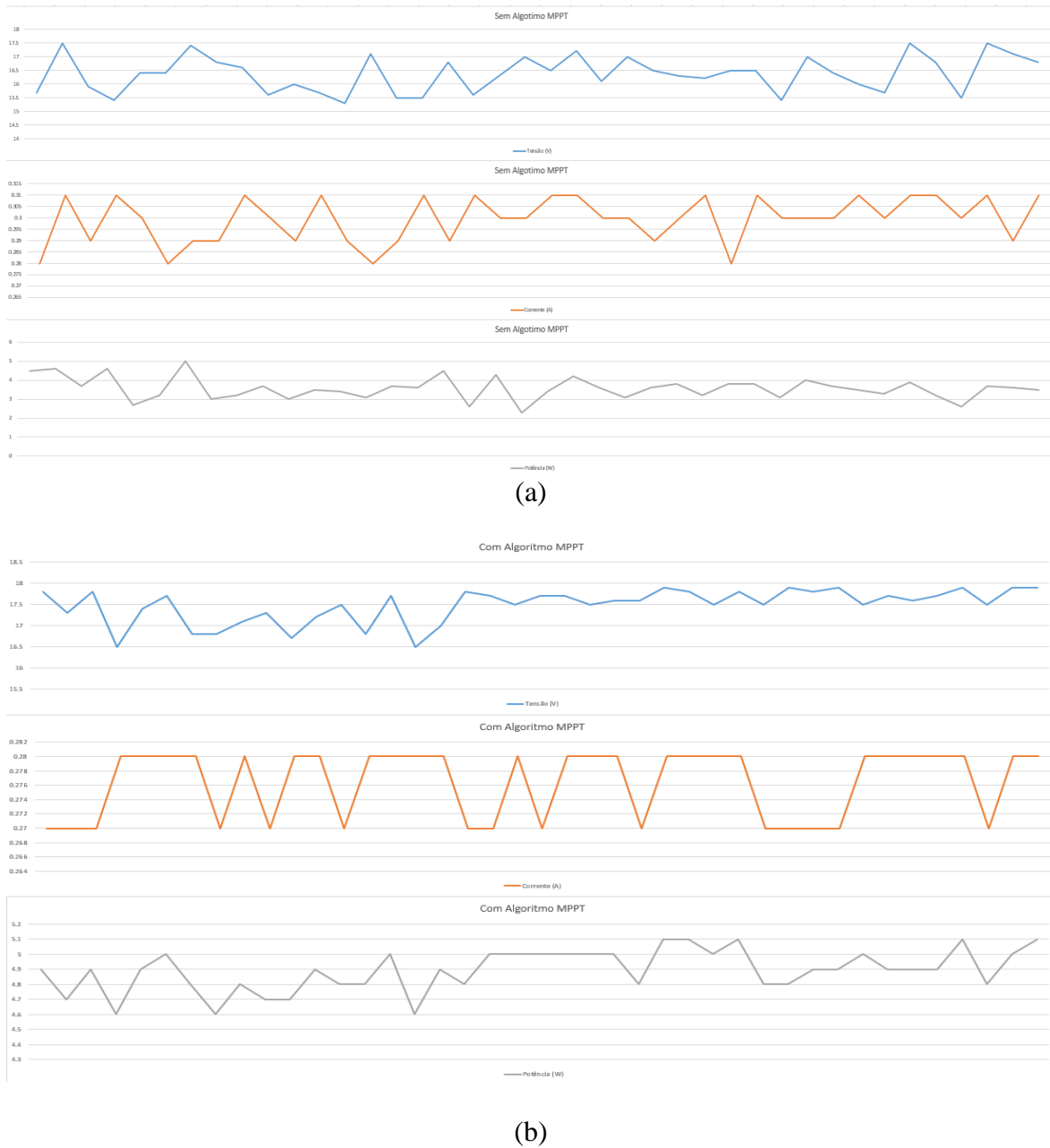


Figura 42 – Leitura dos valores de tensão, corrente e potência com (a) e sem (b) algoritmo MTPP

5.2.2. RESPOSTA DO ALGORITMO MPPT - CORRENTE

Na Figura 43 podemos verificar as amostras recolhidas da corrente do painel fotovoltaico com e sem algoritmo MPPT implementado. Com mais detalhe, a corrente do painel sem

algoritmo implementado num dia de céu limpo varia entre os valores de 0,28A e os 0,31A sensivelmente. No gráfico inferior, verificamos as leituras realizadas com o algoritmo implementado e conseguimos ver uma resposta de controlo desta variável quando comparada com as imagens anteriores. Verificamos que os valores de corrente tendem a variar menos e existem períodos em que a corrente se mantém estável nos 0.28A.

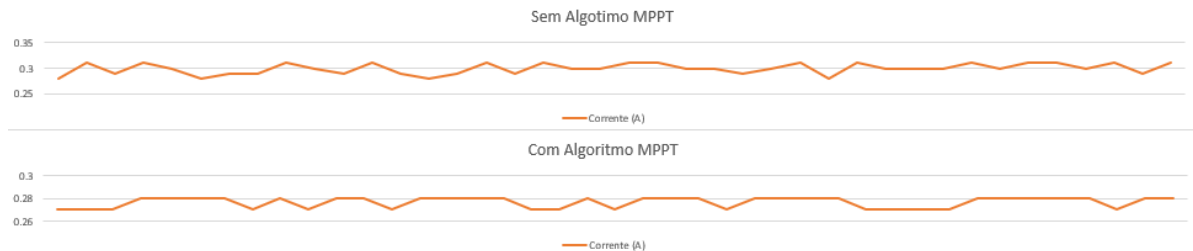


Figura 43 - Leitura dos valores de corrente com e sem algoritmo MPPT

5.2.3. RESPOSTA DO ALGORITMO MPPT - TENSÃO

Na Figura 44 verifica-se o resultado das amostras dos valores de tensão com e sem o algoritmo implementado com a mesma posição dos gráficos da análise realizada anteriormente. Verifica-se, tal como na corrente, uma oscilação menor entre amostras. Os valores de tensão sem o algoritmo variam entre os valores de 15,5V e os 17,3V e com o algoritmo os valores variam dos 16,1V e os 17,8V.

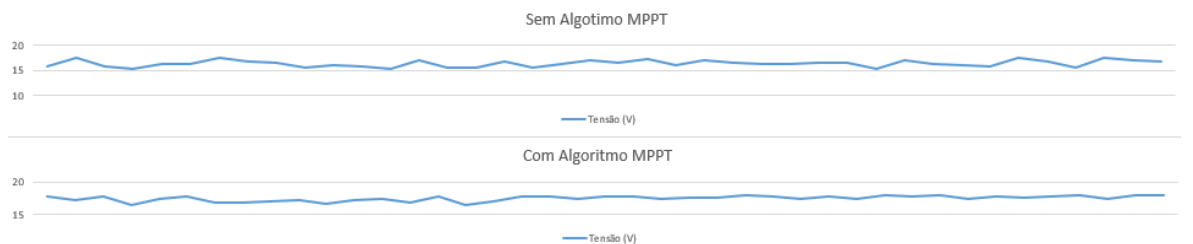


Figura 44 - Leitura dos valores de tensão com e sem algoritmo MTPP

5.2.4. RESPOSTA DO ALGORITMO MPPT – POTÊNCIA

Na Figura 45 podemos verificar o gráfico dos valores recolhidos relativamente à potência sem o algoritmo implementado versus com o algoritmo implementado.

Com a aplicação do algoritmo verificam-se 5 períodos em que a potência atinge o valor de MPP e num desses momentos mantem-se com oscilações quase nulas. Os valores de potência sem o algoritmo variam entre os 2,7W e os 4,7W e com o algoritmo os valores variam dos 4,7W e os 5V.

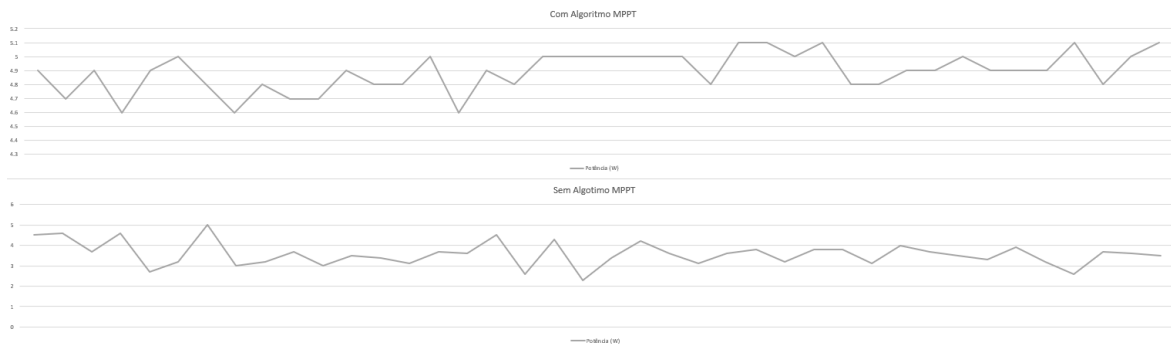


Figura 45 - Comparação dos valores de potência com e sem algoritmo MTTP

5.2.5. RESPOSTA DO ALGORITMO MPPT A MUDANÇAS AMBIENTAIS

Relativamente à resposta do algoritmo a mudanças ambientais verificamos a resposta do controlo implementado à alteração da temperatura e da incidência de energia solar.

Relativamente à temperatura não foi possível fazer nenhum teste *in-site*, de forma a recolher os dados de várias leituras, pois implicava recolher o painel para o conseguir refrescar. De qualquer forma, foram feitas leituras do painel fotovoltaico *in-loco* depois de o retirar de uma camara frigorifica e comparado os valores das leituras realizadas nesse momento com as leituras realizadas com o painel à temperatura normal. Aqui verificou-se que algoritmo realizou o espectável, ou seja, com o painel frio os valores de tensão lidos pelo algoritmo são muito menores na casa dos 0V aos 3V nas medições feitas logo depois de retirar o painel da camara frigorifica (aproximadamente -18°C) e este valor de tensão vai aumentando à medida que o painel se aproxima do valor de temperatura ambiente. Já com os valores de corrente, verificou-se uma pequena diminuição do valor de corrente lida, mas nada significativo, começando com leituras (com o painel a aproximadamente -18°C) na casa dos

0,4A que tende a diminuir relativamente com o aumento da temperatura do painel fotovoltaico.

Relativamente à incidência do sol e a períodos de sombreamento foram realizadas leituras em ambientes de céu limpo e de incidência direta do sol, com leituras realizadas com o céu com nuvens e com períodos de incidência solar não direta.

Como se pode verificar na Figura 46, a tensão mantém-se relativamente próxima nos dois cenários de testes, mas o valor de corrente é significativamente mais alto, nas medições realizadas em dia de céu limpo e incidente. Este valor é traduzido na resposta da potência que é consideravelmente superior num dia de céu limpo.

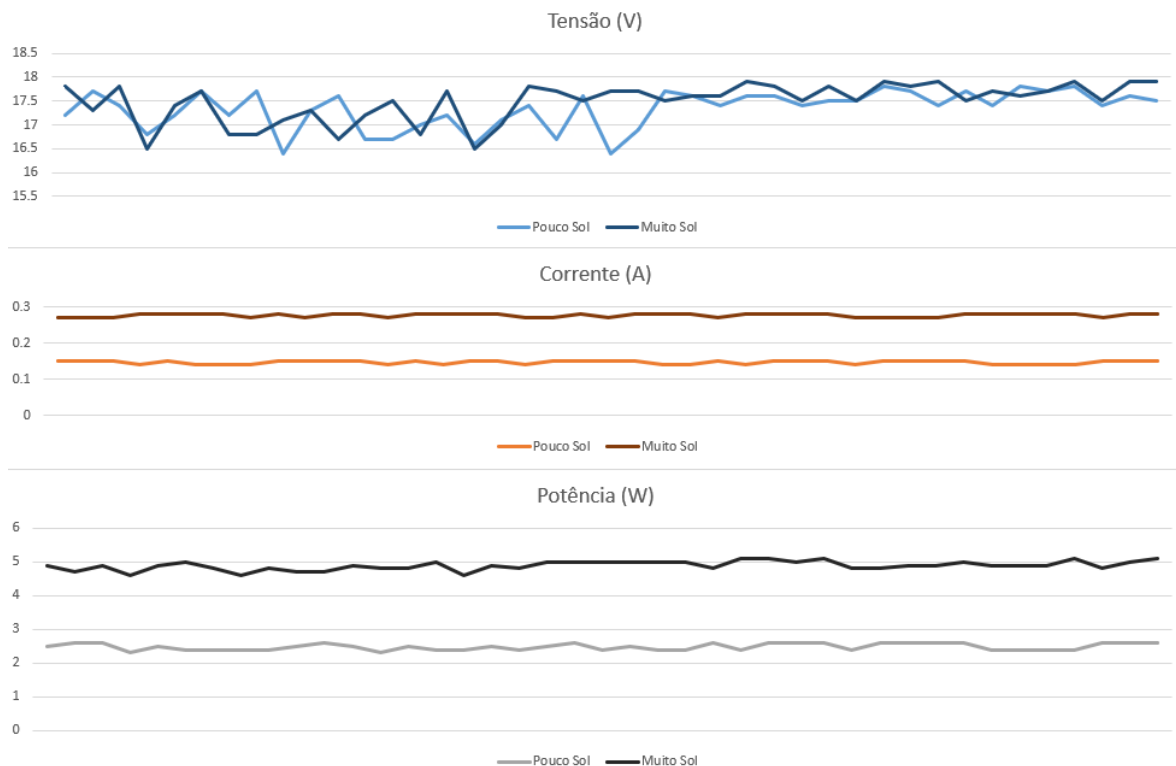


Figura 46 – Comparação dos valores de tensão, corrente e potência em diferentes ambientes

Para a obtenção de um gráfico da potência em função da tensão foram realizados novos testes, num período de cerca de 40 min com 2 momentos de sombreamento provocados intencionalmente. Na Figura 47 podemos verificar a resposta do algoritmo de forma mais objetiva quando submetido a períodos de sombreamento.

Conseguimos verificar uma queda significativa na curva de potência em função da tensão durante os períodos de sombreamento, enquanto o algoritmo tenta rastrear e encontrar o novo ponto de potência máxima.

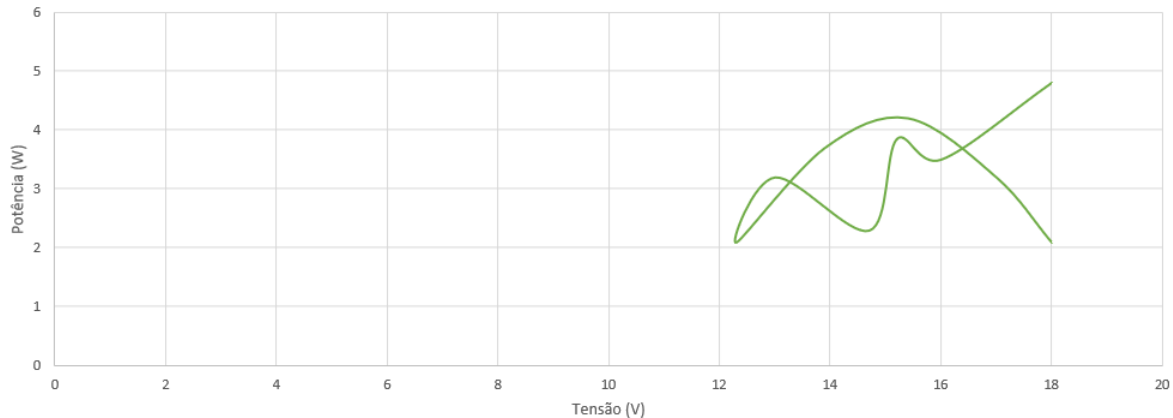


Figura 47 – Curva potência em função da tensão

De forma a validar a resposta do algoritmo implementado, foi realizado também o teste de sombreamento com diferentes percentagens, o que na prática consistiu em provocar o sombreamento parcial do painel tapando 20%, 50% e 80% das células fotovoltaicas, com um período de sensivelmente 20 min. Este teste foi realizado num dia relativamente mais quente e com uma incidência solar no painel mais forte que os testes apresentados anteriormente.

Nas Figuras 48, 49 e 50, que se seguem, podemos retirar as seguintes conclusões relativamente aos resultados obtidos:

- O intervalo de variações de tensões difere entre os casos de estudo, sendo que quanto maior a percentagem do sombreamento menor é o valor de tensão. Verifica-se que com o aumento do sombreamento o intervalo das alterações de tensão é realizado com valores mais baixos.
- Com 20% de sombreamento as alterações de tensão ocorreram sempre no sentido ascendente. A potência variou entre os 4,5W e os 5W.
- Com 50% de sombreamento verificou-se que as perturbações de tensão oscilam tanto no sentido ascendente como descendente e o intervalo de potência manteve-se entre os 3W e os 5W.

- Com 80% de sombreamento, verificam-se vários momentos de perturbações no sentido ascendente e descente na tensão e a potência nunca atingiu o MPP.
- Em todos os casos pode-se verificar uma queda significativa na curva de potência em função da tensão durante os períodos de sombreamento, sendo que nos casos de 20% e 50% de sombreamento conseguimos ver de forma clara a aplicação do algoritmo a encontrar o novo ponto de potência máxima.

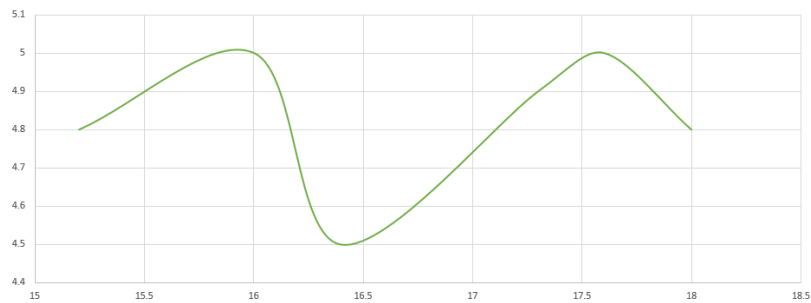


Figura 48 - Curva potência em função da tensão, 20% sombreamento

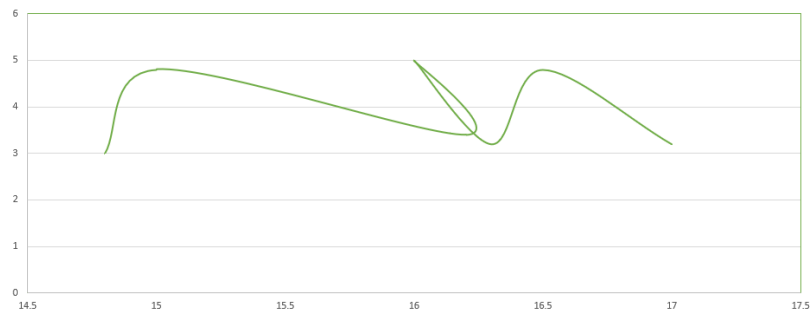


Figura 49 - Curva potência em função da tensão, 50% sombreamento

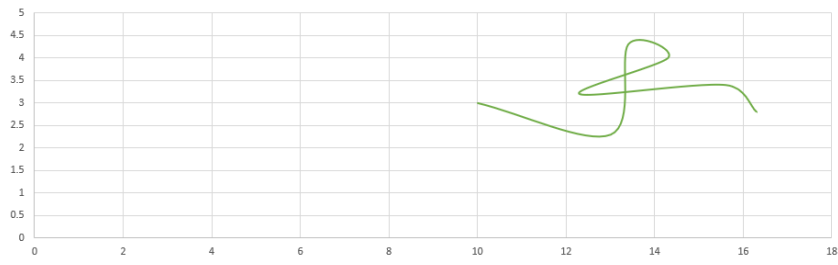


Figura 50 - Curva potência em função da tensão, 80% sombreamento

6. MELHORIA DO SISTEMA

Neste capítulo, apresentamos a arquitetura do sistema com a adição das melhorias implementadas relativas ao controlo de carga de uma bateria. Desta forma, explicamos com detalhe uma possível implementação a nível de hardware e software. Salienta-se que não foram realizados testes para comprovar a solução proposta.

6.1. ARQUITETURA DO SISTEMA

A bateria escolhida é o modelo KB1212 da marca Kaise. É uma bateria de chumbo-ácido recarregável com uma tensão nominal de 12 volts, e capacidade de 1.2 Ah (Amperes-hora), o que indica a quantidade de corrente que a bateria pode fornecer ao longo de uma hora. Essa capacidade determina a duração da bateria num determinado uso, considerando a corrente de descarga. É uma bateria recarregável, o que significa que pode ser recarregada repetidamente usando um carregador adequado, neste caso, seguindo as características da bateria, em *Floating Use* com tensão entre 13,5V a 13,8V e em *Cycle Use* entre 14,4V e 15,5V com o valor máximo de 0,3A.

Para o controlo de carregamento da bateria, tal como ilustrado na Figura 51 foi adicionado ao sistema inicial mais um sensor de corrente ACS712, mais um divisor de tensão para a leitura da tensão da bateria e o circuito de controlo de carga.

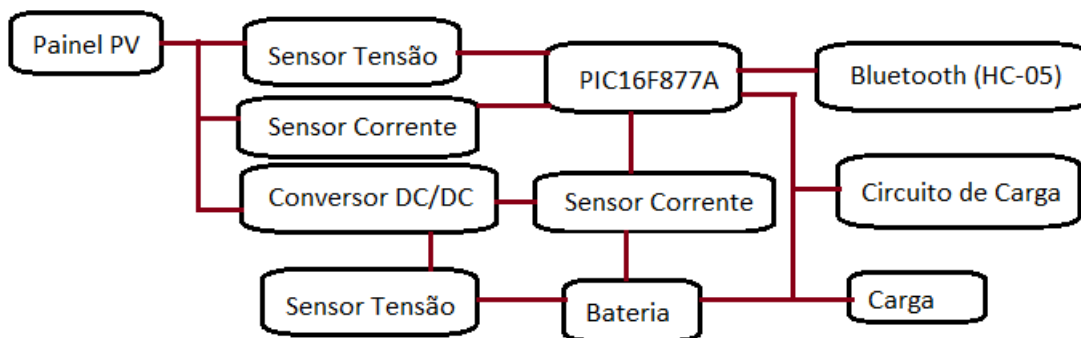


Figura 51 - Diagrama de blocos da arquitetura do hardware

6.2. HARDWARE CONTROLO BATERIAS

A nível de implementação de hardware é utilizada um divisor de tensão para leitura da tensão da bateria conectado ao canal 0 do microcontrolador e o adicionado o sensor ACS712 para a leitura da sua corrente pelo canal 2 do microcontrolador. É utilizado o MOSFET Q4 para o controlo da carga, sendo este acionado por um driver composto por um transístor e as resistências R9 e R10. Os díodos D4 e D5 são utilizados para proteção contra sobretensão tanto no lado do painel solar quanto no lado da carga.

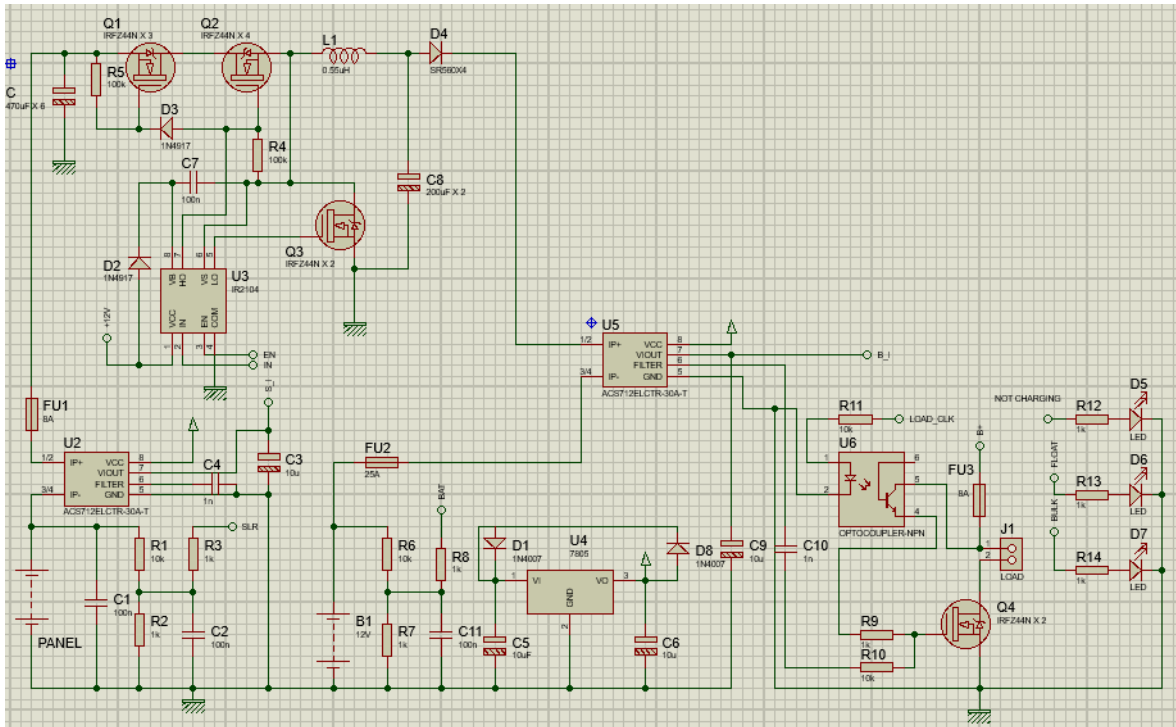


Figura 52 - Esquema elétrico do hardware

6.3. SOFTWARE CONTROLO BATERIAS

Para as melhorias implementadas a função *Get_Solar()*, *Get_Charging_Current()* e *Get_Solar_Power()* mantiveram-se iguais, mas a função de controlo *Charging_Control()* como é logico foi alterada segundo a explicação que será feita no decorrer deste relatório. Para além disso foram criadas as funções *Get_Battery()*, *Get_Battery_Current()* e *Load_Control()* que são explicadas se seguida.

Load_Control():

Esta função controla a carga com base no nível de tensão da bateria. É verificado o nível de tensão da bateria e no caso de ser superior a 12,6V a variável *load* é definida como 1, indicando que a carga pode ser ativada. Se a tensão da bateria for inferior a 11,6V, a variável *load* é definida como 0, indicando que a carga deve de ser desligada.

Se *load* for igual a 1, a variável *load_clk* é definida como ON e a mensagem "Load ON" é enviada pela porta UART. Se *load* for igual a 0, a variável *load_clk* é definida como OFF e é enviada a mensagem "Load OFF".

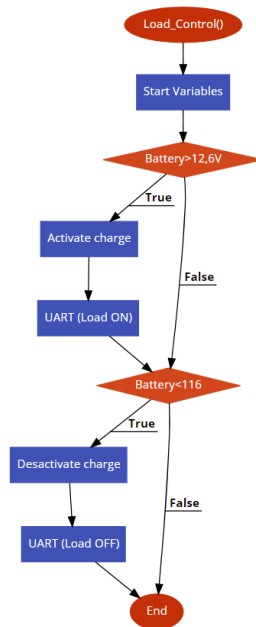


Figura 53 – Fluxograma função *Load_Control*

Get_Battery_Current():

Esta função é utilizada para recolher informações sobre a corrente da bateria. É selecionado o canal 4 do ADC e de seguida é feita a leitura da corrente num *loop* de 50 repetições de forma a obter uma média. Esta média é convertida em milivolts (mV) e de seguida a corrente da bateria é calculada em amperes (A). A corrente da bateria é então enviada pela UART.

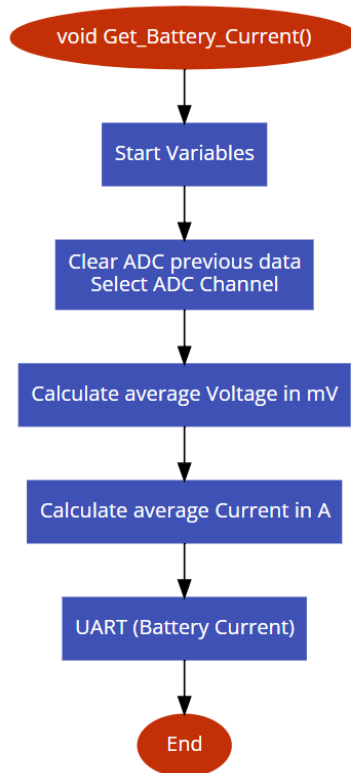


Figura 54 – Fluxograma função *Get_Battery_Current*

Get_Bateery():

A função *Get_Bateery()* é utilizada para obter informações sobre a bateria utilizada no sistema. Para o cálculo da percentagem de carga da bateria verificamos o valor calculado na função *Get_Solar()*. Se a tensão for superior a 12V (indicando disponibilidade de energia solar), verificamos o valor calculado de bateria e caso seja maior que 11,6V carga é ativada, segundo a função *Load_Control()*, e a percentagem da bateria é calculada tendo em conta a energia solar disponível, caso contrário, a percentagem de carga é definida como 0.

Se o valor obtido pela função *Get_Solar()* for menor a 12V (indicando indisponibilidade de energia solar) e se o valor de bateria for maior que 11,6V, a percentagem de carga é calculada tendo em conta a indisponibilidade de energia solar. O valor da percentagem de carga é limitado entre 0 e 100 e é enviado o pela UART.

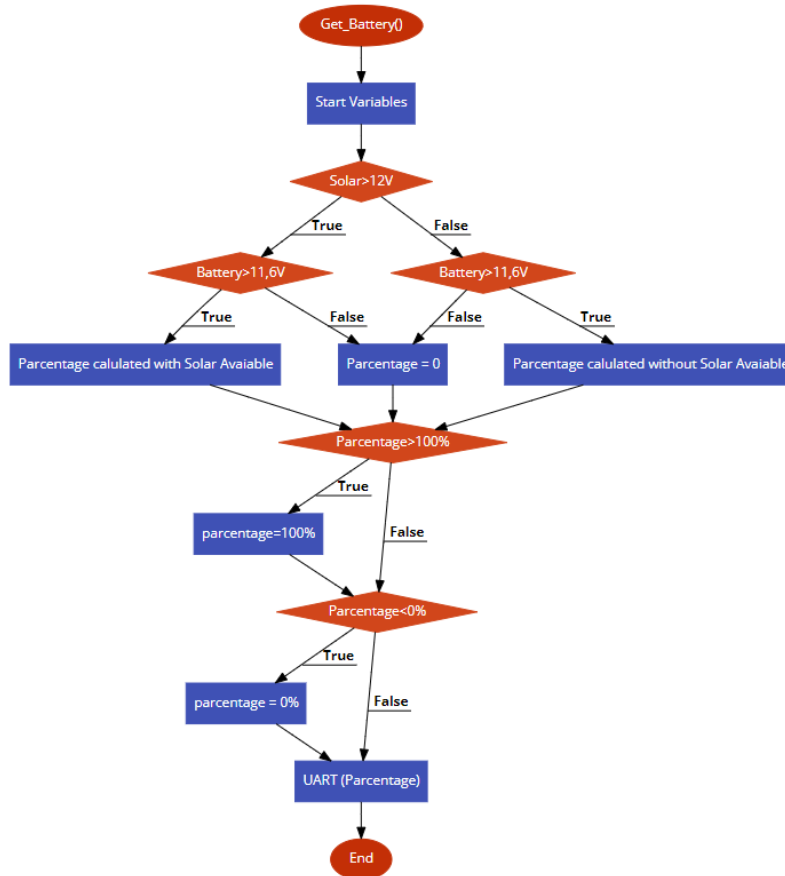


Figura 55 - Fluxograma função *Get_Battery*

Charging_Control():

O fluxograma desta função está inserido como anexo. Esta é a função principal implementada para o controlo de todo o processo de carregamento da bateria com base nas leituras de corrente e tensão do painel fotovoltaico.

A função começa por verificar a disponibilidade de energia solar, (se *solar* é superior ou inferior a 12,5V). De seguida, é verificado o estado da bateria, se a tensão da bateria for superior a 15V a variável *charge* é definida como 1, indicando que o modo de carga é "*float*". Se a tensão da bateria for inferior a 13,5V a variável *charge* é definida como 0, indicando que o modo de carga é "*bulk*". Com base no modo de carga, é enviada uma mensagem pela porta UART indicando o modo de carga.

É feito o ajuste da largura do pulso do PWM para controlo do conversor com base na corrente de carga (*Charging_current*) e no valor do *duty cycle* (*duty*). Se o modo de carga for "float", o *duty cycle* é aumentado ou diminuído dependendo da corrente de carga.

Se o modo de carga for "bulk", o *duty cycle* é ajustado com base na potência solar recente, comparando-a com a potência solar anterior e atualizando o *duty cycle* de acordo.

Se a leitura do painel solar for menor que 10,5V o *duty cycle* é definido como 0.

O código também calcula a percentagem do *duty cycle* e envia essa informação pela porta UART.

6.4. ENSAIOS E RESULTADOS DAS MELHORIAS APLICADAS

Para validar o sistema relativo às melhorias implementadas, não foi possível realizar um estudo abrangente do comportamento do sistema implementado devido ao tempo necessário para a recolha de amostras e à limitação de tempo para a implementação das melhorias. No entanto, o sistema foi submetido a testes em condições específicas para obter amostras e validar cada interação do algoritmo.

Assim, os resultados recolhidos não foram completamente satisfatórios já que, não existiu tempo útil para se conseguir ultrapassar problemas como, a falha de leituras do nível de tensão da bateria, entre outros. Por outro lado, conseguiu-se validar o funcionamento da condição de existência de energia solar, leituras corretas dos valores de corrente da bateria, assim como a validação em laboratório da resposta do PWM a alterar quando submetido o sistema a diferentes inputs.

7. CONCLUSÃO

Esta tese foi realizada com o objetivo de fazer um levantamento do estado da arte sobre as estratégias de controlo MPPT para painéis fotovoltaicos e implementar uma destas estratégias de controlo. De forma a melhorar o sistema, inclui-se um processo de carregamento da bateria e assim criou-se um sistema de controlo de carga a partir de um painel fotovoltaico fundamentado num algoritmo MPPT P&O. A principal vantagem deste controlador está na exportação dos valores recolhidos e disponíveis via Bluetooth o que permite a análise dos dados em tempo real que possibilitaram o estudo do comportamento do algoritmo implementado sob diferentes condições atmosféricas.

Finalmente, o objetivo principal da tese foi alcançado. O protótipo final, com as melhorias implementadas relativas ao carregamento da bateria permitiu criar um sistema que poderá ser facilmente integrado em aplicações do mundo real. Além disso, o facto do sistema permitir a recolha de dados via Bluetooth permitiu verificar a utilidade e eficiência do algoritmo MPPT para a extração de máxima potência do painel fotovoltaico e avaliar o comportamento do algoritmo MPPT P&O em diferentes condições ambientais.

Em relação a trabalhos futuros, a adaptação do circuito de *breadbord* para um circuito PCB seria um dos primeiros pontos a ser considerado, pois apesar de não ser crucial para a análise do sistema construído e realização de testes de funcionamento do sistema seria mais prático para a realização de testes das leituras do sistema construído quando sujeito às condições ambientais o que possibilitaria o teste do sistema sob condições ambientais mais severas, como por exemplo períodos noturnos, de ventos mais fortes e até mesmo de chuva. Para além disso, as melhorias do sistema apresentadas, relativas ao carregamento da bateria careceu de testes da dinâmica do sistema e do seu comportamento em diferentes condições ambientais, pois não sendo o objetivo desta tese, não foi o foco estudar o comportamento do sistema na fase de carregamento e descarregamento da bateria, mas seria sem dúvida uma possível análise que poderia ser realizada e apresentada em trabalhos futuros. Para terminar, como sugestão final, a substituição do dispositivo Bluetooth por um módulo WiFi permitiria

a leitura de dados a longas distâncias o que poderia também facilitar os testes realizados *insite*.

Referências Documentais

- [1] PNEC 2030, “PLANO NACIONAL INTEGRADO ENERGIA E CLIMA 2021-2030,” 2018.
- [2] Ass.Proff. Dr. Alaa H. Shneishil, “CHAPTER THREE Solar Photovoltaic System 3.1 Introduction,” 2018.
- [3] P. Eliane, A. Faria, and A. Fadigas, “PEA-2420 PRODUÇÃO DE ENERGIA Energia Solar Fotovoltaica : Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica,” 2004.
- [4] D. Luís and M. V. Gonçalves, “Implementação de um Sistema MPPT em Circuito Integrado CMOS,” 2017.
- [5] U. U. Khan, M. Raheem, S. Ata, and Z. H. Khan, “Design and implementation of a low-cost MPPT controller for solar PV system,” in *ICOSST 2016 - 2016 International Conference on Open Source Systems and Technologies, Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jan. 2017, pp. 156–163. doi: 10.1109/ICOSST.2016.7838594.
- [6] D. Calheiros De Lemos, “MPPT Algorithm for DC-DC Converter for Photovoltaic Panel Applications,” 2016.
- [7] V. Frederick, “DC-DC Converter Design,” 2013.
- [8] R. W. Erickson, “DC-DC Power Converters,” 2015.
- [9] S. H. Yang, J. W. Liu, and C. C. Wang, “A single-chip 60-V bulk charger for series Li-ion batteries with smooth charge-mode transition,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 59, no. 7, pp. 1588–1597, 2012, doi: 10.1109/TCSI.2011.2177137.
- [10] D. Murillo-Yarce *et al.*, “A review of control techniques in photovoltaic systems,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 24. MDPI, pp. 1–22, Dec. 02, 2020. doi: 10.3390/su122410598.
- [11] D. Guiza, D. Ounnas, Y. Soufi, A. Bouden, and M. Maamri, “Implementation of Modified Perturb and Observe Based MPPT Algorithm for Photovoltaic System,” in *Proceedings - 2019 1st International Conference on Sustainable Renewable Energy Systems and Applications, ICSRESA 2019*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2019. doi: 10.1109/ICSRESA49121.2019.9182483.
- [12] A. Patel, R. Gandhi, P. Vishwavidyalaya, V. Kumar, and Y. Kumar, “Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Cell,” vol. 4, no. 6, 2013, [Online]. Available: www.iiste.org
- [13] A. M. Atallah, A. Y. Abdelaziz, and R. S. Jumaah, “IMPLEMENTATION OF PERTURB AND OBSERVE MPPT OF PV SYSTEM WITH DIRECT CONTROL METHOD USING BUCK AND BUCK-BOOST CONVERTERS,” 2014.
- [14] L. K. Narwat and J. Dhillon, “Design and Operation of Fuzzy Logic Based MPPT Controller under Uncertain Condition,” in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, May 2021. doi: 10.1088/1742-6596/1854/1/012035.
- [15] M. A. Sasi, S. John’s, and C. Newfoundland, “Fuzzy Logic Control of MPPT Controller for PV Systems,” 2017.

- [16] W. Hayder, E. Ogliari, A. Dolara, A. Abid, M. Ben Hamed, and L. Sbita, "Improved PSO: A comparative study in MPPT algorithm for PV system control under partial shading conditions," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 8, Apr. 2020, doi: 10.3390/en13082035.
- [17] T. Wei, D. Liu, and C. Zhang, "An improved Particle Swarm Optimization (PSO)-Based MPPT strategy for PV system," in *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, Dec. 2017. doi: 10.1051/mateconf/201713900052.
- [18] J. J. Nedumgatt, K. B. Jayakrishnan, S. Umashankar, D. Vijayakumar, and D. P. Kothari, "Perturb and observe MPPT algorithm for solar PV systems-modeling and simulation," in *Proceedings - 2011 Annual IEEE India Conference: Engineering Sustainable Solutions, INDICON-2011*, 2011. doi: 10.1109/INDCON.2011.6139513.
- [19] B. Tan, X. Ke, D. Tang, and S. Yin, "Improved perturb and observation method based on support vector regression," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 6, 2019, doi: 10.3390/en12061151.
- [20] C. Li, Y. Chen, D. Zhou, J. Liu, and J. Zeng, "A high-performance adaptive incremental conductance MPPT algorithm for photovoltaic systems," *Energies (Basel)*, vol. 9, no. 4, Apr. 2016, doi: 10.3390/en9040288.
- [21] R. I. Putri, S. Wibowo, and M. Rifa'i, "Maximum power point tracking for photovoltaic using incremental conductance method," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, Apr. 2015, pp. 22–30. doi: 10.1016/j.egypro.2015.03.228.
- [22] R. Pazhampilly, S. Saravanan, and N. R. Babu, "Incremental Conductance based MPPT for PV System Using Boost and SEPIC Converter," vol. 10, no. 7, 2015, [Online]. Available: www.arpnjournals.com
- [23] K. A. Aganah and A. W. Leedy, "A constant voltage maximum power point tracking method for solar powered systems," in *Proceedings of the Annual Southeastern Symposium on System Theory*, 2011, pp. 125–130. doi: 10.1109/SSST.2011.5753790.
- [24] S. S. Bhatara, R. F. Iskandar, and M. R. Kirom, "Design and simulation of maximum power point tracking (MPPT) system on solar module system using constant voltage (CV) method," in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Feb. 2016. doi: 10.1063/1.4941877.
- [25] F. DE Marcos Oliveira, "RASTREAMENTO DA MÁXIMA POTÊNCIA EM ARRANJOS FOTOVOLTAICOS SOB EFEITO DE SOMBREAMENTO," 2015.
- [26] K. Basiński, B. Ufnalski, and L. M. Grzesiak, "HYBRID MPPT ALGORITHM FOR PV SYSTEMS UNDER PARTIALLY SHADED CONDITIONS USING A STOCHASTIC EVOLUTIONARY SEARCH AND A DETERMINISTIC HILL CLIMBING," *POWER ELECTRONICS AND DRIVES*, vol. 2, no. 37, 2017, doi: 10.5277/PED170212.
- [27] A. F. Z. Ramdan B. A. Koad, "A Novel MPPT Algorithm Based on Particle Swarm Optimisation for Photovoltaic Systems," *Senior Member, IEEE and Adel El-Shahat*, 2021.
- [28] Y. Hu, J. Lu, Y. Deng, and Z. Zhang, "MPPT ALGORITHM BASED ON PARTICLE SWARM OPTIMIZATION WITH NATURAL SELECTION," 2015.
- [29] S. and T. Asian Institute of Medicine, "Simulation of Fuzzy Logic Control Based MPPT Technique for Photovoltaic System," *International Institute of Engineers*, Sep. 2014. doi: 10.15242/iie.e0914026.

- [30] R. Sridhar, V. D. Hima, and B. A. Divya, “Ant Colony Optimization based Maximum Power Point Tracking (MPPT) for Partially Shaded Standalone PV System,” 2016.
- [31] L. M. Elobaid, A. K. Abdelsalam, and E. E. Zakzouk, “Artificial neural network-based photovoltaic maximum power point tracking techniques: A survey,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 9, no. 8, pp. 1043–1063, Nov. 2015, doi: 10.1049/iet-rpg.2014.0359.
- [32] E. Abderrahmane and O. Soares Kerboua Abdelfettah Bragança, “MPPT Technique Based on Neural Network for Photovoltaic System Master Degree In Renewable Energy and Energy Efficiency MPPT Technique Based on Neural Network for Photovoltaic System,” 2016, 2016.
- [33] S. R. Revathy *et al.*, “Design and Analysis of ANFIS - Based MPPT Method for Solar Photovoltaic Applications,” *International Journal of Photoenergy*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/9625564.
- [34] J. Andrew-Cotter, “Particle Swarm Optimization based Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for MPPT Control of a Three Phase Grid Connected Photovoltaic System,” 2019.
- [35] S. Hadji, J. P. Gaubert, and F. Krim, “Real-time Genetic Algorithms-based MPPT: Study and comparison (theoretical an experimental) with conventional methods,” *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 2, Feb. 2018, doi: 10.3390/en11020459.
- [36] J. Ahmed and Z. Salam, “A Maximum Power Point Tracking (MPPT) for PV system using Cuckoo Search with partial shading capability,” *Appl Energy*, vol. 119, pp. 118–130, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.12.062.
- [37] C. Hussaian Basha, V. Bansal, C. Rani, R. M. Brisilla, and S. Odofoin, “Development of Cuckoo Search MPPT Algorithm for Partially Shaded Solar PV SEPIC Converter,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, 2020, pp. 727–736. doi: 10.1007/978-981-15-0035-0_59.
- [38] C. H. Santhan Kumar and R. Srinivasa Rao, “A novel global MPP tracking of photovoltaic system based on whale optimization algorithm,” *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 5, no. 3, pp. 225–232, Oct. 2016, doi: 10.14710/ijred.5.3.225-232.
- [39] A. Pradeep, K. Yadav, S. Thirumaliah, and G. Haritha, “Comparison of MPPT Algorithms for DC-DC Converters Based PV Systems,” 2012. [Online]. Available: www.ijareeie.com

Anexo A. Fluxograma Função *Charging_Control()*:

